

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

CENTRO UNIVERSITARIO DEL NORTE

INGENIERO GEÓLOGO

TRABAJO DE GRADUACIÓN



**ANÁLISIS PETROGRÁFICO Y GEOQUÍMICO DEL CUERPO
GRANÍTICO QUE AFLORA AL NORESTE DEL MUNICIPIO DE
SAN JUAN BAUTISTA DEL DEPARTAMENTO DE
SUCHITEPÉQUEZ**

KAREN INÉS PAAU YAT

COBÁN, ALTA VERAPAZ, FEBRERO DE 2018

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

TRABAJO DE GRADUACIÓN

ANÁLISIS PETROGRÁFICO Y GEOQUÍMICO DEL CUERPO
GRANÍTICO QUE AFLORA AL NORESTE DEL MUNICIPIO DE SAN
JUAN BAUTISTA DEL DEPARTAMENTO DE SUCHITEPÉQUEZ

PRESENTADO AL HONORABLE CONSEJO DIRECTIVO DEL
CENTRO UNIVERSITARIO DEL NORTE

POR

KAREN INÉS PAAU YAT
200943144

COMO REQUISITO PREVIO A OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERA GEÓLOGA

COBÁN, ALTA VERAPAZ, FEBRERO DE 2018

AUTORIDADES UNIVERSITARIAS

RECTOR MAGNÍFICO

Dr. Carlos Guillermo Alvarado Cerezo

CONSEJO DIRECTIVO

PRESIDENTE:	Lic. Zoot. Erwin Gonzalo Eskenasy Morales
SECRETARIA:	Lcda. T.S. Floricelda Chiquín Yoj
REPRESENTANTE DE DOCENTES:	Ing. Geól. César Fernando Monterroso Rey
REPRESENTANTE DE EGRESADOS	Lic. Abg. Not. Edwin Alcides Barrios Sosa
REPRESENTANTES ESTUDIANTILES:	Mtro. Disraely Dárin Manfredy Jom Hernández Br. Karla Vanessa Barrera Rivera

COORDINADOR ACADÉMICO

Ing. Ind. Francisco David Ruiz Herrera

COORDINADOR DE LA CARRERA

Ing. Geól. Sergio David Morán Ical

COMISIÓN DE TRABAJOS DE GRADUACIÓN

COORDINADOR:	Ing. Geól. Sergio David Morán Ical
SECRETARIA:	Ing. Geól. Silvia Frine Cortez Bendfeldt
VOCAL:	Ing. Geól. Luis Alfonso Laj Hun

REVISOR DE REDACCIÓN Y ESTILO

Ing. Civil *MSc.* Julio Enrique Reynosa Mejía

REVISOR TRABAJOS DE GRADUACIÓN

Ing. Geól. Luis Alfredo Godoy Morales

ASESOR

Ing. Geól. *MSc.* Osmín Jared Vásquez Hernández

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA



Cobán, Alta Verapaz
01 de agosto de 2017

**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

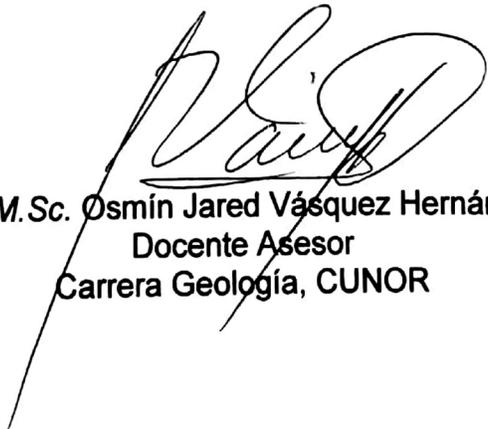
Señores
Comisión Trabajos de Graduación
Carrera Geología
CUNOR

Respetables Señores:

Por este medio informo a ustedes que he procedido a la **ASESORÍA** del informe final de Trabajo de Graduación de la T.U. **GEÓL. KAREN INÉS PAAU YAT**, carné n.º **200943144**, titulado: **“ANÁLISIS PETROGRÁFICO Y GEOQUÍMICO DEL CUERPO GRANÍTICO QUE AFLORA AL NORESTE DEL MUNICIPIO DE SAN JUAN BAUTISTA DEL DEPARTAMENTO DE SUCHITEPÉQUEZ”**, 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. Osmin Jared Vásquez Hernández
Docente Asesor
Carrera Geología, CUNOR



c.c. archivo

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA



Ref. 15-CG-13/2018
23 de enero de 2018

**CENTRO UNIVERSITARIO
DEL NORTE (CUNOR)
CARRERA GEOLOGÍA**
Código Postal 16001 – Cobán, Alta Verapaz
PBX: 79 566 600 Ext. 209
Guatemala, C. A.
c. c.: geologiausac@gmail.com

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 de la T.U. **GEÓL. KAREN INÉS PAAU YAT**, carné n.º **200943144**, titulado: **“ANÁLISIS PETROGRÁFICO Y GEOQUÍMICO DEL CUERPO GRANÍTICO QUE AFLORA AL NORESTE DEL MUNICIPIO DE SAN JUAN BAUTISTA DEL DEPARTAMENTO DE SUCHITEPÉQUEZ”**, 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. Luis Alfredo Godoy Morales
Docente Revisor
Carrera Geología
CUNOR



c.c. archivo

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA



Ref. 15-CG-18/2018
07 de febrero de 2018

**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

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 PETROGRÁFICO Y GEOQUÍMICO DEL CUERPO GRANÍTICO QUE AFLORA AL NORESTE DEL MUNICIPIO DE SAN JUAN BAUTISTA DEL DEPARTAMENTO DE SUCHITEPÉQUEZ”**, realizado por la T.U. GEÓL. KAREN INÉS PAAU YAT, carné n.º **200943144**, 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.

Atentamente,

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Julio Enrique Reynosa Mejía'.

Ing. Civil MSc. Julio Enrique Reynosa Mejía
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 PETROGRÁFICO Y GEOQUÍMICO DEL CUERPO GRANÍTICO QUE AFLORA AL NORESTE DEL MUNICIPIO DE SAN JUAN BAUTISTA DEL DEPARTAMENTO DE SUCHITEPÉQUEZ**, como requisito previo a optar al título profesional de Ingeniera Geóloga.

A handwritten signature in black ink, enclosed within a large, loopy oval shape. The signature appears to be 'Karen Paau Yat' with some stylized flourishes.

Karen Inés Paau Yat

200943144

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 año 2012.

ACTO QUE DEDICO A:

Mis Padres, por ser los pilares de mi vida, ya que en todo momento manifestaron su amor y apoyo incondicional, porque sé que este triunfo también es suyo. Con todo mi amor para ustedes Alfredo y Zoily.

AGRADECIMIENTOS A:

DIOS

Por mostrarme su amor y misericordia en todo momento; mi alentador, luz y proveedor, quien me permitió seguir su voluntad por medio de esta meta alcanzada.

MIS PADRES

Mamá Zoily, por el amor y atenciones que me demostró en todo momento, Papá Alfredo por el apoyo, en especial por la compañía en las prácticas de campo.

MI HERMANA CRISTA

Por el amor fraternal, y ser un ejemplo para mi vida de responsabilidad y lucha.

MI HERMANO ALFREDO

Por el cariño, la compañía en las prácticas de campo, y el apoyo en momentos difíciles.

A MI BEBE DANIEL ISAAC

Por el amor inmenso que compartes conmigo.

MI HERMANA

Alejandra por alentarme a iniciar y terminar este trabajo, en un momento tan difícil de mi vida.

MIS ABUELOS

Cayetana y Pancho, por el apoyo y ánimo, así como a Adela por las oraciones, consejos y amor.

LAS FAMILIAS

Paau, Cuz Paau, Yat y Sosa Poou; en especial a mis tíos: Rubén, Bertha, Regina, por el apoyo y ánimo y cariño.

MI AMOR

Por el compañerismo, amistad y amor, durante la época de estudiantes, así también por el apoyo incondicional en toda esta etapa.

MIS GUÍAS ESPIRITUALES

Willie y Karlita Girón, por el cariño y oraciones en todo momento

MIS AMIGOS

Por su amistad y compañerismo, en especial Jennie, Anny, Carla, TH y *Dioritic Army*.

LA UNIVERIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

Al Centro Universitario del Norte, por ser mi *Alma Mater*, formarme por medio de conocimientos académicos y personales, para ser una buena profesional.

LA CARRERA DE GEOLOGÍA

Por mostrarme la belleza geológica por medio de conocimientos académicos.

LOS CATEDRATICOS DE LA CARRERA DE GEOLOGÍA

Que transmitieron conocimientos, experiencias, consejos y amistad en mi formación académica.

MIS ASESORES

Ing. Osmín Vásquez e Ing. Ricardo Milián, por guiarme y orientarme en esta etapa.

ÍNDICE GENERAL

	Página
LISTA DE ABREVIATURAS Y SIGLAS	v
RESUMEN	vii
INTRODUCCIÓN	1

CAPÍTULO 1 MARCO TEÓRICO

1.1 Antecedentes	3
1.2 Justificación	4
1.3 Planteamiento de problema	4
1.4 Hipótesis	5
1.4.1 Variables	5
1.5 Objetivos	5
1.5.1 Objetivo general	5
1.5.2 Objetivos específicos	6
1.6 Ubicación y extensión del área de investigación	6
1.7 Accesos	7
1.8 Marco geológico regional	8
1.8.1 Estratigrafía	9
a. Terciario	10
1) Granitos y Granodioritas (Tg)	11
2) Diques félsicos (Trd)	11
3) Toba María Tecún (Tmt)	11
4) Sedimentos de relleno de caldera I (Tcf1)	12
5) La brecha intrusiva de Tzapetey (Tti)	13
6) Toba El Adelanto (Tat)	14
7) Toba Panajachel (tpt)	14
8) Toba San Jorge (Tsjt)	15
9) Sedimentos de relleno de caldera II (Tcf2)	15
10) Toba Inferior Catarata (Tc1)	16
11) Toba Superior Catarata (Tc2)	16
12) Toba San Pablo (Tspt)	16
13) Flujos de lavas, lodos y piroclastos (Qta)	17
b. Cuaternario	17
1) Depósitos pomáceos de Los Chocoyos	17
2) Depósitos aluviales (Qal)	18
3) Depósitos coluviales (Qcol)	18
1.8.2 Geología estructural	18
1.9 Revisión Bibliográfica	19

1.9.1 Datos geoquímicos	20
1.9.2 Petrografía	20
a. Elementos mayores y traza	20
1.9.3 Diagrama <i>TAS</i> para rocas plutónicas	22
1.9.4 Diagrama R1-R2	22
1.9.5 Series alcalinas	23
1.9.6 Series subalcalinas	25
1.9.7 Saturación de alúmina	25
1.9.8 Clasificación del intrusivo según origen y ambiente tectónico	27
a. Margen convergente	27
b. Margen divergente	27
1.9.9 Diagrama de Maniar & Picolli, 1989	28
1.9.10 Diagrama <i>REE</i> y multielementales	29
1.9.11 Norma (<i>ICP-MS</i>)	30
1.9.12 Ambiente tectónico	32

CAPÍTULO 2 METODOLOGÍA

2.1. Métodos: cualitativo y cuantitativo	35
2.2. Marco metodológico o metodología validada	36
a. Etapa de recopilación y análisis bibliográfico	36
b. Etapa de trabajo de campo	36
c. Etapa de trabajo de laboratorio	37
d. Etapa de gabinete	38

CAPÍTULO 3 PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

3.1. Litología	39
3.1.1 Unidad de Granodiorita (Tg)	40
3.1.2 Unidad de Diorita (Td)	47
a. Sub-unidad de Dique Gabroíco (Tdg)	51
3.1.3 Unidad de Granito Rico en Cuarzo (Tgr)	53
3.1.4 Unidad de Toba (Tcr)	57
3.2. Geoquímica	60
3.2.1 Elementos mayores	61
3.2.2 Elementos traza	67
3.3. Discusión de resultados	70
3.3.1 Diorita (Td)	70
3.3.2 Granodiorita (Tg)	71
3.3.3 Granito Rico en Cuarzo (Tgr)	72
CONCLUSIONES	79
RECOMENDACIONES	81

BIBLIOGRAFÍA	83
ANEXOS	87
1. Mapa geológico	89
2. Geoquímica de elementos traza y mayores	91

ÍNDICE DE FIGURAS

No.		Página
1.	Localización del área de estudio	7
2.	Acceso al área de estudio	8
3.	Ubicación de los eventos de Atitlán	9
4.	Diagrama TAS para rocas plutónicas	22
5.	Diagrama R1-R2	23
6.	Diagrama de serie alcalina	24
7.	Diagrama de series subalcalinas	25
8.	Diagrama $AL_2O_3 / (CaO + Na_2O + K_2O)$ en función a $AL_2O_3 / (Na_2O + K_2O)$	28
9.	Ambientes de formación por distribución de <i>REE</i>	30
10.	Muestras recolectadas	39
11.	Columna litoestratigráfica	40
12.	Diagrama de Streckeinsen de Unidad de Granodiorita	43
13.	Diagrama de Streckeinsen de Unidad de Diorita	49
14.	Diagrama de Streckeinsen de la Unidad de Granito rico en Cuarzo	55
15.	Clasificación composicional de Tobas	59
16.	Localización de muestras con análisis geoquímico	61
17.	Diagrama de clasificación geoquímica	63
18.	Diagrama de serie ígnea	64
19.	Diagrama de multielementos mayores	65
20.	Clasificación de rocas graníticas	66
21.	Diagrama de elementos trazas normalizados al manto primitivo	68
22.	<i>REE</i> (Tierras raras) normalizado a condrito	70
23.	Diagrama de discriminación tectónica de granito	75
24.	Movimiento convergente de placas	76

ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS

No.		Página
1.	Bloques de la Unidad de Granodiorita	41
2.	Unidad de Granodiorita	42
3.	Sección delgada de la Unidad de Granodiorita	45
4.	Subunidad de Enclave	46
5.	Sección delgada de los Enclaves	47
6.	Afloramiento de la Unidad de Diorita	48
7.	Unidad de Diorita	49
8.	Sección delgada de la Unidad de Diorita	51
9.	Sección delgada de la subunidad de Dique	53

10.	Afloramiento de la Unidad de Granito Rico en Cuarzo	54
11.	Unidad de Granito Rico en Cuarzo	55
12.	Sección delgada de la Unidad de Granito Rico en Cuarzo	56
13.	Afloramiento de la Unidad de Toba	58
14.	Sección delgada de la Unidad de Toba	60

ÍNDICE DE CUADROS

No.		Página
1.	Coordenadas GTM del área de estudio	6
2.	Unidades litológicas del lago de Atitlán	10
3.	Abundancias relativas estimadas de los elementos mayores de la corteza continental	21
4.	Saturación alúmina	26
5.	Elementos e iones detectados mediante ICP-MS	32
6.	Ambientes tectónicos de rocas plutónicas	33
7.	Contenido de la norma CIPW de los minerales normativos	62

LISTADO DE ABREVIATURAS Y SIGLAS

Al₂O₃:	Óxido de Aluminio
Afs:	Feldespatos alcalinos
Amp:	Anfíbol
Ba:	Bario
Bt:	Biotita
CaO:	Óxido de Calcio
Ce:	Cesio
FeO:	Óxido de Hierro
Fd:	Feldespatos
Hf:	Hafnio
K:	Potasio
K₂O:	Óxido de Potasio
M:	Máficos
MgO:	Óxido de Magnesio
Mo:	Minerales opacos
Na₂O:	Óxido de Sodio
Nb:	Niobio
Ox:	Óxidos
P:	Potasio
Pl:	Plagioclasa
P₂O₅:	Óxido de Fósforo
Qal:	Depósitos aluviales.
Qpa4:	Depósitos piroclásticos de caída post-Los Chocoyos
Qrdf:	Depósitos volcánicos de domo de lava riolítica
QTa:	Depósitos volcánicos andesíticos
QTV:	Depósitos volcánicos no divididos

Qz:	Cuarzo
Rb:	Rubidio
Sm:	Samario
Ta:	Tántalo
Tbg:	Rocas graníticas
Td:	Unidad de Diorita
Tgr:	Unidad de Granito Rico en Cuarzo
Tg:	Unidad de Granodiorita
TiO₂:	Óxido de Titanio
Y:	Itrio
Yb:	Iterbio
Zr:	Circón

RESUMEN

Esta investigación se realizó con el objetivo principal de analizar petrográfica y geoquímicamente el cuerpo granítico que aflora al noroeste del municipio San Juan Bautista, se estableció la composición mineralógica y petrográfica del granito, así también se definió la composición geoquímica del cuerpo intrusivo a través de los elementos traza y elementos mayores; por último, la interpretación del origen y ambiente tectónico en el que se formó el intrusivo.

Se utilizó el método cuantitativo, que tomó en cuenta los porcentajes de minerales mayores de composición química y también la relación de los elementos Y, Yb, Ba, Ta, Ce, S, Zr y Hf por medio de gráficas, para determinar el origen y ambiente del intrusivo. El grado de saturación en alúmina fue calculado por medio de los valores en moles de los óxidos de K_2O , CaO , Na_2O y Al_2O_3 , los cuales sirvieron para la discriminación entre peraluminoso, metaluminoso y peralcalino.

Las muestras analizadas se clasificaron petrográfica y geoquímicamente en las siguientes unidades: Diorita (Td), Granodiorita (Tg), Granito Rico en Cuarzo (Tgr), Dique Gabroíco (Tdg) y Toba Cristalina (Tcr). Este intrusivo tiene naturaleza metaluminosa, clasificándose como una serie de rocas como: Diorita (Td), Granodiorita (Tg) y Granito (Tgr). El *stock* de San Juan Bautista, está clasificado como un intrusivo tipo I, lo que refiere a una zona de movimiento convergente, así también por la clasificación petrográfica del granitoide, este corresponde al primer evento de la caldera Atitlán.

INTRODUCCIÓN

El análisis petrográfico y geoquímico del cuerpo intrusivo granítico que aflora al noroeste del municipio de San Juan Bautista del departamento de Suchitepéquez, consta de un informe que contiene la recopilación de información y antecedentes del área, análisis de laboratorio, descripciones de campo, elaboración de diagramas, gráficos y mapas para explicar los aspectos petrográficos y geoquímicos.

El marco teórico en donde se presenta el problema que se identificó en el área de estudio; así como los objetivos. La breve descripción del marco geológico general, que incluyen la estratigrafía del terciario y cuaternario, que conforman el área de interés y los alrededores, también la geología estructural general.

En la revisión bibliográfica, se encuentran definiciones de los gráficos y los aspectos que se toman en cuenta para el análisis de resultados, obtenidos en campo y la etapa de laboratorio.

La metodología que se utilizó para realizar esta investigación, está compuesta por aspectos cualitativos y cuantitativos. Para la elaboración del estudio, se dividió por etapas, las cuales fueron: recopilación y análisis bibliográfico, trabajo de campo, laboratorio y gabinete. En el análisis y discusión de resultados, se tomaron en cuenta los datos obtenidos en la fase de laboratorio petrográfico y geoquímico, para relacionarlos y obtener la clasificación de la cristalización del cuerpo intrusivo; así también el origen y su clasificación, según la ubicación y la distribución.

CAPÍTULO 1

MARCO TEÓRICO

1.1 Antecedentes

Christopher G. Newhall en el documento: *Geology of the Atitlán Region, Western Guatemala* (1986), hace referencia a un marco geológico regional del área del Lago Atitlán, en el que menciona que las rocas plutónicas que afloran al oeste, sur y sureste de éste; pertenecen a cuarzo diorita, granodiorita, cuarzo monzonita y leucogranito. Los afloramientos de cuerpos intrusivos que se encuentran en la bahía de Santiago los describe como acontecimientos similares a los afloramientos que se encuentran en los ríos Nahualate y Madre Vieja.¹

En la investigación *Quaternary silicic pyroclastic deposits of Atitlán caldera Guatemala*, realizada por Rose, W., Newhall, Bornhorst, T. y Self, S. (1987), hacen referencia sobre los estudios geoquímicos realizados en los depósitos de Los Chocoyos, los cuales son eventos posteriores a la actividad basáltica-andesítica y al evento de la caldera.²

¹ Christopher G. Newhall. *Geology of the Lake Atitlán region, western Guatemala* (Hanover, Alemania: Dartmouth College, 1986).

² William I. Rose, *Et.Al. Quaternary silicic pyroclastic deposits of Atitlán caldera, Guatemala*. (Michigan, Estados Unidos: *Department of Geology and Geological Engineering, Michigan Technological University, Houghton*, 1987).

1.2 Justificación

Debido a la poca información de estudios geológicos, litológicos, entre otros, no se ha realizado la caracterización y clasificación del cuerpo granítico que aflora al noreste del municipio San Juan Bautista, el cual es únicamente conocido como parte de los eventos de Atitlán. Por lo tanto, se propone un análisis geoquímico y petrográfico de la unidad del granito para conocer su génesis y composición mineralógica.

Por medio de las muestras recolectadas en el área de estudio, y con los datos obtenidos en el análisis petrográfico y geoquímico, se diferencié e identifiqué la naturaleza mineralógica de dicho cuerpo granítico; a partir de su contenido de elementos mayores y traza, así como el ambiente tectónico de formación.

Los resultados obtenidos, se utilizaron para correlacionar la génesis que produjo el cuerpo intrusivo, así también, se identificó la etapa de la actividad magmática; el primer ciclo fue en la caldera Atitlán.

1.3 Planteamiento de problema

La unidad de granito que se encuentra al noroeste del municipio San Juan Bautista carece de información de origen, como también de características petrográficas y geoquímicas que podrían indicar porcentaje de elementos, saturación alúmina, ambiente tectónico y tipo de granito, ya que solo se menciona que podrían ser parte de alguno de los eventos de Atitlán, sin ningún tipo de estudio más específico. Por lo tanto se plantea lo siguiente:

¿Cuáles son las características petrográficas y geoquímicas que tiene el cuerpo granítico que aflora el noreste del municipio San Juan Bautista, Suchitepéquez?

1.4 Hipótesis

El cuerpo granítico se encuentra dentro de la actividad de la zona de subducción, por lo que indica que es un ambiente tectónico convergente según la clasificación de elementos mayores por origen y ambiente tectónico; con características petrográficas y geoquímicas similares a los cuerpos graníticos que se encuentran en las localidades de San Lucas Tolimán y Pochuta.

1.4.1 Variables

- a) **Dependientes:** Petrografía, mineralogía, geoquímica de rocas.

- b) **Independientes:**

Contenido de elementos mayores y elementos traza para la determinación del ambiente tectónico de la formación del cuerpo granítico.

1.5 Objetivos

1.5.1 General

Analizar petrográfica y geoquímicamente el cuerpo granítico que aflora al noreste del municipio de San Juan Bautista, Suchitepéquez.

1.5.2 Específicos

- a) Identificar la composición mineralógica y petrográfica del granito para su clasificación
- b) Definir la composición geoquímica del cuerpo intrusivo, a través de los elementos mayores y elementos trazas
- c) Determinar el origen y ambiente tectónico de formación para conocer el entorno geológico que permitió la génesis

1.6 Ubicación y extensión del área de investigación

El área de estudio se localiza al noreste del municipio San Juan Bautista, en el departamento de Suchitepéquez entre las fincas: San Antonio, La Concha, Canarias, San Fernando, Veracruz, Sacramento y San Luis Palmira. Se delimita al norte con la comunidad agraria Las Conchas, al este con la aldea Santa Bárbara, al oeste con la finca Arizona y al sur con el municipio San Juan Bautista.

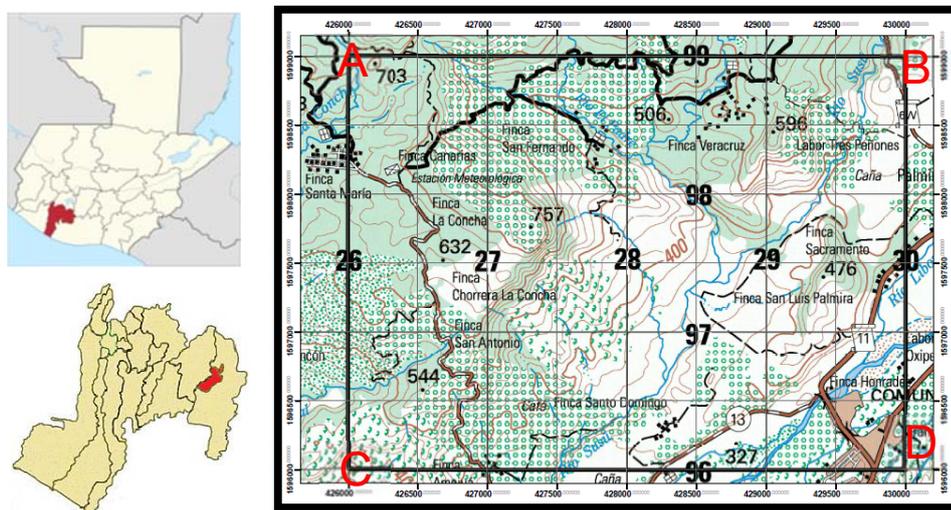
La extensión espacial del área es de 12 km², se encuentra delimitada por las coordenadas que se muestran en la cuadro 1; el área de estudio se puede observar en el figura 1.

CUADRO 1
COORDENADAS GTM DE LOS VERTICES DEL ÁREA DE ESTUDIO

Vértice	Norte	Este
A	1599000	426000
B	1599000	430000
C	1596000	426000
D	1596000	430000

Fuente: Investigación 2015.

FIGURA 1 LOCALIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO



Fuente: Modificado de la hoja topográfica Patulul. 2015

1.7 Accesos

El acceso más corto hacia el área de estudio (figura 2) es desde del municipio de Guatemala, aproximadamente 150 km, en dirección sur; desde la capital debe conducirse sobre la autopista al Pacífico, CA - 9, allí se encuentra el desvío hacia Suchitepéquez sobre la carretera CA - 2, en el cruce hacia Coteles sobre la ruta 13 que conduce al municipio de San Juan Bautista.

FIGURA 2
ACCESO AL ÁREA DE ESTUDIO

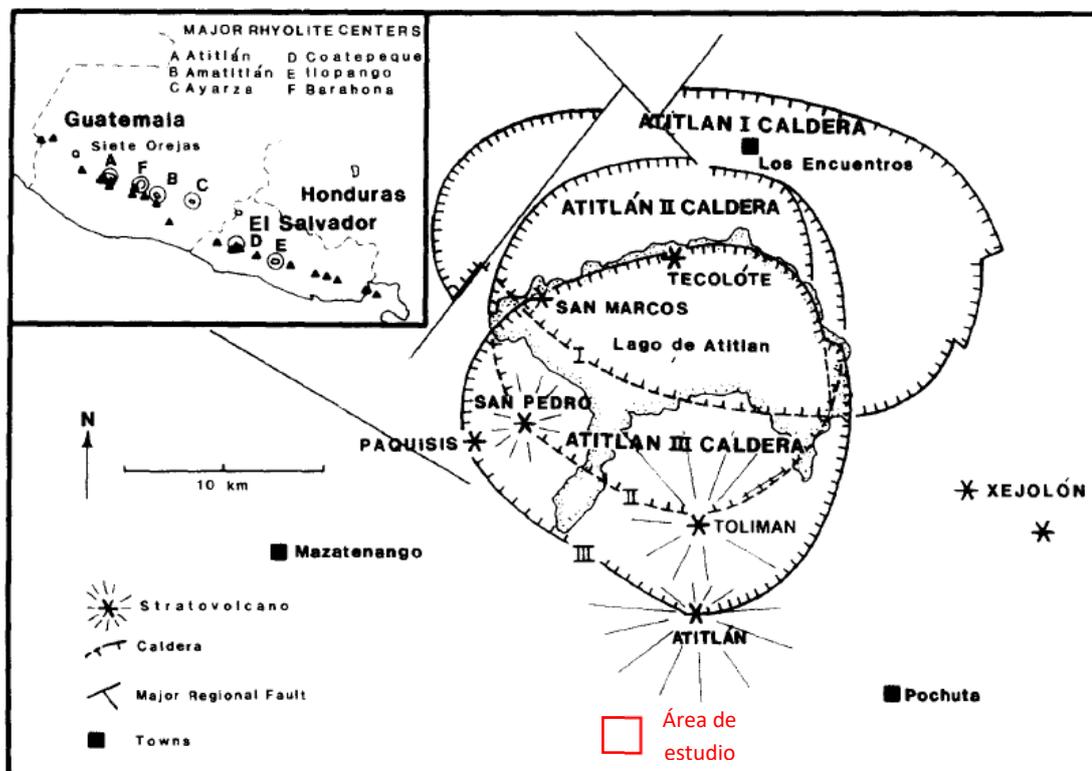


Fuente: Modificado de Google Maps. 2015

1.8 Marco geológico regional

El área de estudio se encuentra dentro de la zona de subducción, según Atwood (1933), quien llegó a la conclusión que la cuenca Atitlán se formó por colapso de estratovolcanes. Según Newhall (1980), el lago de Atitlán está formado por el colapso de tres estratovolcanes, contiene una profundidad aproximada de 300 m. Según el mapeo de Newhall estas calderas se formaron en los últimos 13 Ma. La caldera más reciente es el evento III del colapso mientras que las otras dos estas rellenas por sedimentos y depósitos volcánicos (figura 3).

FIGURA 3
UBICACIÓN DE LOS EVENTOS DE ATITLÁN



Fuente: Modificado de *Quaternary silic pyroclastic deposits of Atitlán Caldera, Guatemala*. 2015.

1.8.1 Estratigrafía

La formación de la caldera de Atitlán está dividida en tres ciclos que están asociados a actividad de vulcanismo en una zona de subducción. Según L. Núñez Álvarez y V. Martínez Cobo en el Informe complementario de la cartografía geológica y geomorfológica (1: 25 000) de la cuenca del Lago Atitlán,³ describen las siguientes unidades geológicas (cuadro 2) del área que pertenecen al terciario y cuaternario.

³L. Núñez Álvarez y V. Martínez Cobo. *Informe complementario de la cartografía geológica y geomorfológica (1: 25 000) de la cuenca del Lago Atitlán*. (Guatemala: 2011).

CUADRO 2 UNIDADES LITOLÓGICAS DEL LAGO DE ATITLÁN

CUATERNARIO	Qcol	Limos arcillas, y arenas pomáceas, bloques, cantos y gravas.
	Qal	Arenas, limos, arcillas, cantos, gravas y bloques.
	Qa	Flujos de lavas, lodos y piroclásticos andesíticos asociados a complejos estratovolcánicos cuaternarios.
TERCIARIO	Qta	Flujos de lavas, lodos y piroclásticos andesíticos asociados a complejos estratovolcánicos terciarios-cuaternarios.
	QTb	Flujos de lavas, escorias y piroclásticos basálticos asociados a complejos estratovolcanes terciarios-cuaternario
	Tspt	Toba conglomerática (Toba San Pablo)
	Tc2	Toba riolítica (Toba Superior Catarata)
	Tc1	Toba riolítica (Toba San Jorge)
	Tsjt	Toba riolítica (San Jorge)
	Tpt	Toba riolítica (Brecha Panajachel)
	Tat	Toba riolítica (El Adelanto)
	Tti	Toba cristalina (Brecha Intrusiva Tzampetey)
	Tcf1	Conglomerados areniscas y limos (Sedimentos de relleno caldera I)
	Tmtl	Toba Cristalina (Toba María Tecún)
	Trd	Dique de cuarzo
	Tg	Granito y granodiorita

Fuente: Investigación 2016.

a. Terciario

1) Granito y granodiorita (Tg)

Dentro de la unidad de rocas plutónicas se encuentran granitos y granodioritas, también se pueden encontrar leucogranitos, aunque espacialmente son menores y aparecen como intrusiones de estadio tardío dentro de granitos biotíticos. Esta unidad presenta rocas muy duras y consolidadas, se meteoriza en la superficie en forma de bloques en los sedimentos volcánicos terciarios del oeste,

sur y sureste (San Pablo La Laguna, San Juan La Laguna, San Pedro La Laguna, Santiago Atitlán y San Lucas Tolimán). La edad de estas rocas plutónicas es incierta, aunque la hipótesis de mayor peso es que son de edad miocena.

2) Diques félsicos (Trd)

Existen tres grupos de diques, los principales afloramientos del primer grupo de diques se encuentran dentro del bloque de falla Tzanpetey en el escarpe suroeste del lago, la roca tiene tonalidades de blanca a gris, con hornblendas orientadas de grano fino, abundantes intercrecimientos de cuarzo y plagioclasa y algunas pertitas. Estos diques cortan al menos la Toba María Tecún y poseen un paleomagnetismo inverso (Newhall, 1986).

El segundo grupo de diques afloran a lo largo del este y sureste del escarpe del lago Atitlán e incluyen varios diques dentro del mismo bloque Tzanatepey. El dique es generalmente de color de gris claro a marrón. Consiste en cuarzo anheudral y plagioclasas subaheudriales, con feldespatos de potasio subordinados y menores cantidades de biotitas (ahora cloritas). Como mucho posee un pequeño porcentaje de fenocristales de plagioclasa alterada.

Un tercer grupo de diques aflora a lo largo del escarpe noreste del lago Atitlán, también corta los sedimentos de rellenos de caldera de la fase I. En algunos casos son claramente diques, pero a 1,5 km al norte del hotel Tzanjuyub (Panajachel) este mismo tipo de rocas aparecen como un dique o como un pequeño flujo de riolita a lo largo de la falla de dirección N - S.

Los diques de este tercer grupo están formados por una riodacita de color gris, que contiene como mucho un 17 % de plagioclasa, un 8 % de hornblenda, un 2 % de minerales opacos y un 1% a 2 % de fenocristales de biotita y cuarzo. Mientras está alterada, la roca es de color gris verdoso con una capa de color marrón rojiza en las superficies de unión, la biotita y hornblenda han sido alteradas a cloritas.

3) Toba María Tecún (Tmt)

Se encuentra en contacto discordante sobre los plutones del cañón Madre Vieja y de manera concordante sobre los sedimentos de grano grueso de los rellenos de la caldera Atitlán I.

Se trata de 5 capas de tobas que pueden llegar a alcanzar un espesor de más de 1 000 m; y es probablemente la toba más voluminosa y extensa de todas las existentes en el altiplano guatemalteco.

Las tobas poseen tonalidades pálidas (grises y azules) a rojizas o marrones. Contiene un 50 % de cuarzo fracturado y corroído, plagioclasa, sanidina, biotita y fenocristales del hornblenda. La hornblenda es más abundante que la biotita en la capa más antigua y en las más jóvenes, así mismo se observa un bajo contenido en sílice en las tobas intermedias.

4) Sedimentos de relleno de caldera I (Tcf1)

Los sedimentos de relleno de la caldera I están formados por depósitos de conglomerados y areniscas que tiene un espesor

aproximado de 400 m, estos depósitos son ricos en clastos y gravas de la Toba María Tecún.

La mejor exposición se encuentra en el escarpe situado al noreste de la actual caldera. Los clastos de la Toba María Tecún son dominantes en la parte baja de dichos sedimentos de relleno.

Aproximadamente un 10 % de los clastos y gravas en los jóvenes conglomerados y areniscas, son de andesita y más del 50 % en los conglomerados tardíos, lo que reflejan un decremento en los influjos de clastos de María Tecún y el crecimiento de los estratovolcanes de Atitlán II en, o alrededor de la caldera.

5) La brecha intrusiva de Tzapetey (Tti)

La formación de la brecha Tzapetey se encuentra cerca de la finca Tzapetey la cual se cree que es la raíz del estratovolcán Atitlán II. Las hornblendas de dicha brecha están datadas en 10 Ma +/- 1,1 Ma.

La brecha contiene abundantes inclusiones de gabros hornbléndicos parcialmente absorbidos. La mayoría de los afloramientos contienen entre un 30 % y un 50 % de inclusiones en una matriz de la misma mineralogía original, ahora alterada, que incluye abundantes cloritas, sericita, clacita y zeolita. Estas inclusiones varían ampliamente en su textura, desde grano grueso a fino y granos panidiomorfos a granos hypautomórficos.

6) Toba El Adelanto (Tat)

La unidad de la toba riolítica bandeada está situada al *NE* de la cuenca, cerca de la comunidad El Adelanto, en el municipio de Sololá. Aparece como un cerro de toba riolítica y en las laderas de la cabecera del río Pacubaja. La estratificación tiene un ancho de 20 cm aproximadamente. Es una toba riolítica consolidada, de color gris claro a beige con textura bandeada. Se aprecian a simple vista cristales de plagioclasa (5 % a 8 %), hornblenda (10 % a 20 %), moscovitas (5 %) y biotitas (10 %) con un tamaño aproximado de 2 mm, en una matriz afanítica. Según Newhall, esta toba podría ser la componente de los clastos brechosos que componen la Toba Panajachel.

7) Toba Panajachel (Tpt)

Está formada por abundantes fragmentos angulares riolíticos de grano fino, fundidos o compactados, en una matriz producto de desvitrificación de grano fino. Algunos de los fragmentos se encuentran bandeados y contienen vetas de cristales finos de cuarzo que se han desarrollado paralelas a la foliación. Estos dos tipos de clastos raramente aparecen en el mismo afloramiento y no se han observado integrados. Unos pocos clastos grandes de brecha están redondeados relativamente por pequeños fragmentos angulares, como si estos los hubiesen roto los clastos grandes. Esta relación indica que la brechificación estaba ocurriendo todavía en el momento del emplazamiento (Newhall, 1986).

8) Toba San Jorge (Tsjt)

Se localiza en los escarpes norte y noreste del lago. Tiene unas tonalidades de una toba semi-consolidada de color crema, con abundantes fragmentos de pumita (0,1 cm a 6 cm, raramente más largos de 15 cm), hasta una toba consolidada marrón claro que contiene abundantes fragmentos de vidrios, pero menos clastos de pumita (Newhall, 1983).

Contiene espesores de 10 m a 30 m, los fragmentos vítreos de la matriz de la toba representan un espectro completo de vitrificación, desde fragmentos frescos a una masa de granos fino de cuarzo desvitrificados y feldespatos reveladores de fragmentos (Newhall, 1986). Al igual que la Toba Panajachel, su morfología horizontal de toba, da lugar a escarpes muy pronunciados, lo que le proporciona una marcada tendencia a sufrir desprendimientos.

9) Sedimentos de relleno de caldera II (Tcf2)

El rango de composición de estos sedimentos va desde conglomerado de fragmentos de pómez hasta sílex bandeado, pero la mayoría de capas son arenas, lutitas y pizarras de grano fino.

Esta unidad es generalmente más estrecha, de grano más fino y más corta que los sedimentos de relleno de la caldera I, lo que indica que durante la formación de la caldera II existía un ambiente de menor energía que durante la formación de la caldera I.

Los granos finos pueden llegar a ser de sílex bandeado y sílex limoso, en los cuales forman capas de 1 mm a 3 mm de espesor de limos silíceos grises alternados con capas de 0,5 mm a 2 mm de

sílex blanco. Similar con capas de 1 mm a 2 mm de espesor de limos diatomáceo blancas alternadas con 1 mm a 15 mm de capas de arcillas grises y limos no compactados profundos de sedimentos de la actual cuenca, donde reflejan la alternancia de láminas de diatomáceas y sedimentos de clastos finos (Newhall, 1986).

10) Toba Inferior Catarata (Tc1)

Varía desde inconsolidada a levemente consolidada, es más permeable que las anteriores y mucho más deleznable. Contiene hornblendas, biotitas y lapillis pómez orientadas en una matriz con abundantes fragmentos grises de grano fino.

11) Toba Superior Catarata (Tc2)

Se encuentra mejor expuesta a lo largo de la carretera de Sololá a Panajachel, en lo alto de la sección del puente de la catarata, donde se encuentra atravesada por dos importantes fallas, que han generado numerosos deslizamientos. Se trata de una toba muy consolidada e impermeable que genera importantes escarpes, que pueden alcanzar hasta 15 m a 20 m de espesor. Litológicamente la toba superior, posee tonalidades desde color crema a gris y rica en pómez.

12) Toba San Pablo (Tspt)

Aflora en solo tres puntos de la cuenca de forma discontinua en San Pablo La Laguna. Se trata de una toba conglomerática que presenta bloques, cantos y gravas de andesitas, andesitas horbléndicas, andesitas basálticas, etc., dentro de una matriz de color gris que contiene vidrio y minerales feldespáticos. Desde el

punto de vista estructural, se distingue por tener una dirección principal de fractura N - S, con grietas de 0,5 m de separación.

13) Flujos de lavas, lodos y piroclastos asociados a complejos estratovolcánicos terciarios-cuaternarios (Qta)

Como en los ciclos anteriores, el ciclo Atitlán III, comenzó con la formación y desarrollo de tres edificios volcánicos previos a los actuales, que ya no existen en su totalidad hoy en día: volcán de San Marcos, volcán Tecolote y volcán Paquisís.

Las litologías predominantes en estos estratovolcanes son en orden decreciente: andesita augita - hiperstenica, andesita basáltica, andesita hornbléndica - piroxénica, andesita hornbléndica, andesita con fenocristales en desequilibrio ensamblados (olivino, augita, hiperstena, hornblenda, biotita, plagioclasa sódica y cálcica y cuarzo), basalto olivínico y dacitas hornblendo - biotíticas (Newhall, 1986).

a. Cuaternario

1) Depósitos pomáceos de Los Chocoyos

Actualmente se pueden encontrar extensas áreas en el altiplano volcánico de depósitos blanquecinos, de tefra silíceos, procedentes de la misma erupción. Las características de los rellenos tefra son espesores de 1 m a 10 m y rellenos de valle de 20 m a 200 m de espesor. Basaltos y andesitas tefra son intercalados con tefra silícica cerca de los conos volcánicos. Varias erupciones en la región del lago han formado extensos depósitos (Rose, *Et.Al.*, 1987). Según Newhall, cuatro grandes unidades de pómez

cuaternarias se encuentran incluidas en una única unidad de pómez cuaternaria:

2) Depósitos aluviales (Qal)

Esta unidad está compuesta por arena, limos, arcillas, bloques y cantos de gravas que provienen de las paredes de los conductos de circulación del magma y de las bocas de salida de las calderas, derivados de la erosión y fragmentación de los depósitos de lava.

3) Depósitos coluviales (Qcol)

Los depósitos se localizan en las partes bajas de las laderas de los cerros, están compuestos por arcillas y arenas.

1.8.2 Geología estructural

El área de estudio se encuentra al sureste del volcán Atitlán, en donde se encuentran evidencias de actividad tectónica y volcánica. En perfiles sísmicos de reflexión de sedimento del lago, se encontraron evidentes respiraderos, fallas, pliegues de alta resolución que representa al menos 17 500 años y probablemente más de 35 000 años de deposición.

Tres estratovolcanes posteriores a la caldera (San Pedro, Tolimán, y Atitlán) han crecido en las partes meridionales de la caldera y dos deltas han crecido desde la orilla norte del lago. En otros lugares, la caldera está ocupada por el lago Atitlán, que es de más de 300 m de profundidad y tiene un piso relativamente plano.

Los perfiles de refracción sugieren que el suelo original de la caldera se encuentra a 300 m por debajo del actual lago, sin embargo, enormes cantidades de gas metano en los sedimentos del lago atenuaron las señales sísmicas e impidieron cualquier vista detallada del suelo de la caldera original o faltas a lo largo de la cual se presume el colapso.

Según Williams (1960), el área presenta plegamientos en las zonas volcánicas más elevadas y se limita a la deformación local a través de las zonas de falla y en algunos pliegues generales. La tendencia general de las zonas de falla es:

A $N45 - 60W$ y $N30 - 60E$, 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 Americana. Estos tres comportamientos de las fallas regionales corresponden a los patrones de fallas descritas en otras partes de Guatemala por Stoiber y Carr (1973), Carr (1976), Plafket (1976), Schwartz *Et.Al.* (1979), y Burkart & Self (1985).

1.9 Revisión bibliográfica

Para la clasificación y composición de las rocas ígneas se utilizan parámetros como: la petrografía y geoquímica, en los cuales se encuentran condiciones cualitativas y cuantitativas.

1.9.1 Datos geoquímicos

Estos proporcionan la cantidad absoluta y relativa de los elementos químicos de las rocas, de los cuales se obtiene la composición de las mismas y permite establecer las leyes y principios de distribución.

1.9.2 Petrografía

Trata de la descripción y las características de las rocas cristalinas determinadas por examen microscópico con luz polarizada. Los petrólogos estudian los cambios ocurridos de forma espontánea en las masas de roca cuando el magma se solidifica, cuando rocas sólidas se funden total o parcialmente, o cuando sedimentos experimentan transformaciones químicas o físicas.

a. Elementos mayores y trazas

Por conveniencia los elementos son separados en mayores, menores y trazas. Los límites entre los grupos son arbitrarios, pero los más aceptados son:

- Elementos mayores > 1,0 % peso
- Elementos menores 0,1 a 1,0 % peso
- Elementos trazas < 0,1 % peso

Se denominan elementos mayores porque están presentes en altas concentraciones y controlan en gran medida la cristalización de los minerales petrogenéticos en las rocas a partir de fundidos.

Ellos también controlan propiedades tales como viscosidad, densidad, difusividad, etc., en magmas y rocas. Los elementos menores comúnmente sustituyen a algunos elementos en los minerales principales (Mn, por ejemplo, sustituye al Fe o al Mg en los minerales máficos). Si llegan a estar en concentraciones suficientemente altas pueden llegar a formar minerales independientes, que se denominan minerales accesorios (cuadro 3).

CUADRO 3
ABUNDANCIAS RELATIVAS ESTIMADAS DE LOS ELEMENTOS
MAYORES DE LA CORTEZA CONTINENTAL

Elemento	Óxido peso %	Porcentaje atómico
O	-----	60,8
Si	59,3	21,2
Al	15,3	6,4
Fe	7,5	2,2
Ca	6,9	2,6
Mg	4,5	2,4
Na	2,8	1,9
K	2,2	1,0
Total	98,5	98,5

Fuente: Disponible en: http://www.insugeo.org.ar/libros/misc_18/08.htm
(12 de agosto de 2015).

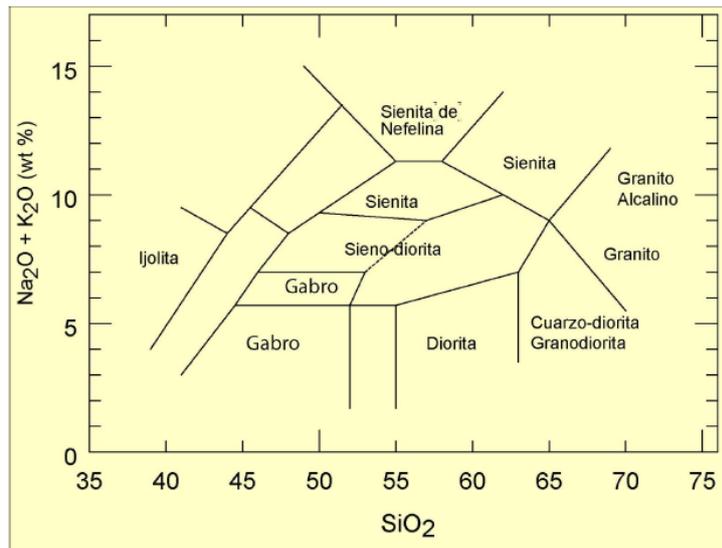
Se puede observar que estos 8 elementos constituyen el 99 % del total de la corteza y que son los elementos mayores que forman la mayoría de las rocas y minerales. El O y Si son los dominantes.

1.9.3 Diagrama TAS para rocas plutónicas

Para las rocas volcánicas se utiliza el diagrama TAS (*Total Alkalies vs Silica*). En este diagrama no se utilizan términos modales (máfico, félsico, etc.) sino químicos: rocas

ultrabásicas, básicas, intermedias, y ácidas, en función de la abundancia de SiO_2 en porcentajes en peso, como se observa en la figura 4.

FIGURA 4
DIAGRAMA TAS PARA ROCAS PLUTÓNICAS



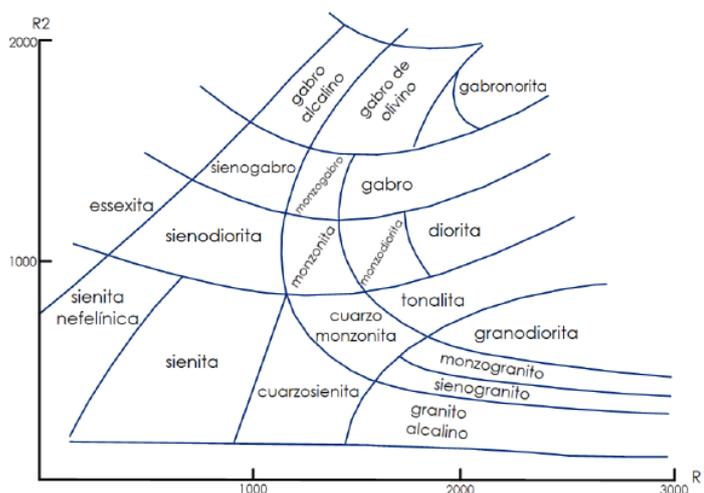
Fuente: Disponible en http://www.insugeo.org.ar/libros/misc_18/02.htm (19 de abril 2017)

1.9.4 Diagrama R1-R2

Propone una clasificación de rocas ígneas en base a la proporción de los cationes. Involucra a todos los elementos mayores y se puede aplicar a todo tipo de rocas ígneas. Se recalcula la composición de la roca como cationes y utilizando la proporción en milicaciones, se calculan los parámetros R1 y R2 (figura 5).

Para recalcular la composición en cationes se divide el porcentaje en peso del óxido dentro de su peso molecular y se multiplica por el número de cationes en la fórmula. Para expresar las proporciones catiónicas en milicaciones, se multiplican por 1 000.

FIGURA 5
DIAGRAMA R1-R2



$$R1 = [4Si - 11(Na+K) - 2(Fe+Ti)]$$

$$R2 = Al + 2Mg + 6Ca$$

Fuente: Castro Dorado, *Petrografía de rocas ígneas y metamórficas*. España: Paraninfo, 2015 (pag. 148).

1.9.5 Series alcalinas

Es un conjunto de las relaciones espacio-temporales, en lo que las rocas comparten su carácter químico y mineralógico (figura 6). Las rocas ígneas de una zona en particular pueden contribuir una variedad de asociaciones petrográficas, siendo estas afinidades las señales de que estas rocas fueron originadas por una fuente originadas por una fuente en común, siendo estas características para clasificarlas en:

a. Series alcalinas

Ambiente oceánico o continental, poco abundantes.

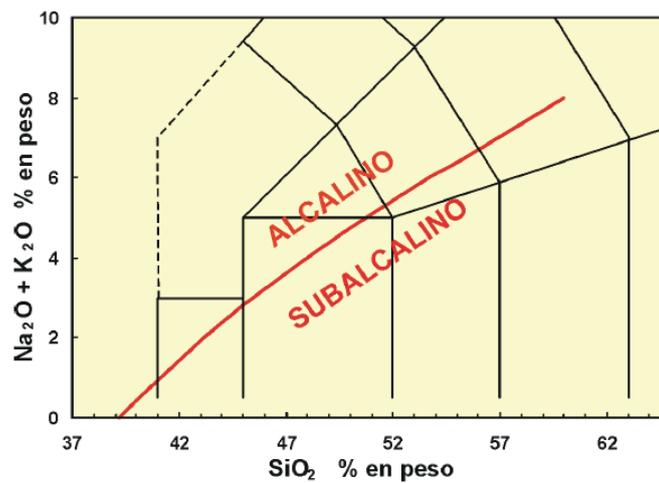
b. Series sub alcalinas**1) Series calco alcalinas**

Asociadas a zonas de subducción.

2) Series toleíticas

Asociadas a dorsales oceánicas y flujos basálticos continentales.

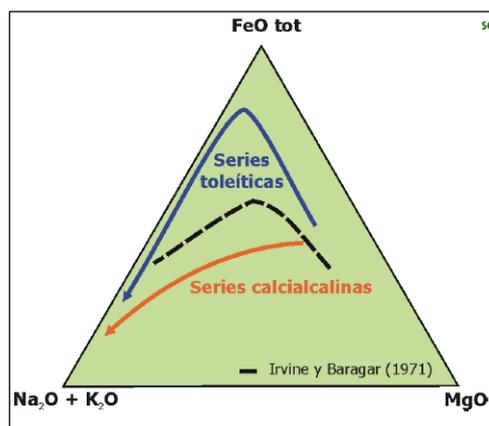
FIGURA 6
DIAGRAMA DE SERIE ALCALINA



Fuente: Disponible en http://www.insugeo.org.ar/libros/misc_18/08.htm.
(19 de abril de 2017).

1.9.6 Series subalcalinas

FIGURA 7
DIAGRAMA DE SERIES SUBALCALINAS



Fuente: Disponible en http://www.insugeo.org.ar/libros/misc_18/08.htm.
(19 de abril de 2017)

1.9.7 Saturación de alúmina

Shand (1927) propuso una clasificación química, balanceando paralelamente el contenido de sílice y alúmina (cuadro 4), que le permitió desarrollar el concepto de saturación. Reconoce dos grupos de minerales ígneos, aquellos compatibles con cuarzo o tridimita (saturados) y aquellos que nunca están asociados con minerales de sílice (subsaturados).

CUADRO 4 SATURACIÓN ALÚMINA

Saturación en sílice	Minerales Saturados	Feldespatos, Piroxenos, Anfíboles, Micas, Fayalita, Espesartina-almandino, Titanita, Circón, Turmalina, Topacio, Magnetita, Ilmenita y Apatito.
	Minerales Sub-saturados	Leucita, Nefelina, Sodalita, Hauyna, Noseana, Forsterita, Andradita, Perovskita, Mellita, Corindón y Augita,

Fuente: Disponible en: http://www.insugeo.org.ar/libros/misc_18/02.htm (12 de agosto de 2015).

a. Sobresaturadas

1) Peraluminoso

Minerales ricos en alúmina: moscovita, biotita rica en Al, cordierita, granate, topacio, turmalina, corindón y silimanita.

b. Subsaturadas

1) Metaluminosos

Estos no son ricos en minerales como: Al_2O_3 , anfíboles y piroxenos sódicos (biotita, hornblenda).

2) Peralcalinos

Minerales ricos en álcali: olivinos ricos en Fe, anfíboles alcalinos (riebeckita, arfvedsonita), piroxenos alcalinos (aegirina).

1.9.8 Clasificación del intrusivo según origen y ambiente tectónico

a. Margen convergente

1) Granito tipo S

Metaluminoso a peraluminoso, generados por fusión parcial de las rocas sedimentarias, generalmente asociados a Sn y W, se forman en la parte superior de la corteza

2) Granito tipo I

Metaluminoso, generado por la fusión parcial de rocas ígneas, generalmente asociadas a Cu y Mo.

b. Margen divergente

1) Granito tipo A

Metaluminoso a levemente peralcalinos, enriquecidos en Fe, generalmente asociados a U y REE.

2) Granito tipo M

Generados por diferenciación de fundidos mantélicos.

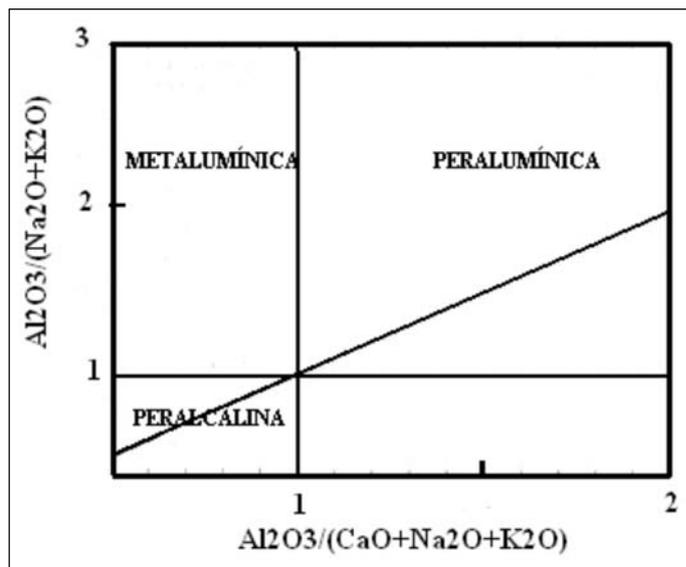
1.9.9 Diagrama $Al_2O_3 / (CaO+Na_2O+K_2O)$ en función a $Al_2O_3 / (Na_2O+K_2O)$ (Maniar & Picolli, 1989)

La figura 8 representa fuentes y marcos tectónicos de la formación de la roca presentando algún tipo de limitantes, debido a las complejidades que muestran los granitoides.

Indica que está en una zona de colisión continental y de subducción cuando la concentración de alúmina es mayor que la concentración de Na_2O , K_2O y el CaO indica que las rocas son peraluminosas, al considerar que proviene de la refusión de materiales de la corteza continental.

Por otro lado, las rocas peralcalinas tienen una concentración de los álcalis mayor que el aluminio y están asociadas a zonas de apertura continental e islas oceánicas.

FIGURA 8
DIAGRAMA $Al_2O_3 / (CaO+Na_2O+K_2O)$ EN FUNCIÓN A $Al_2O_3 / (Na_2O+K_2O)$



Fuente: Tectonic discrimination of granitoids. 2015.

1.9.10 Diagrama *REE* y multielementales o de tipo *Spider*

Los elementos de tierras raras (*REE* siglas en inglés) tienen una importante aplicación para la petrología ígnea, más importante que cualquier otro grupo de elementos trazas. Los *REE* están compuestos por las series de metales con números atómicos del 57 al 71 desde Lantano (La) a Lutecio (Lu).

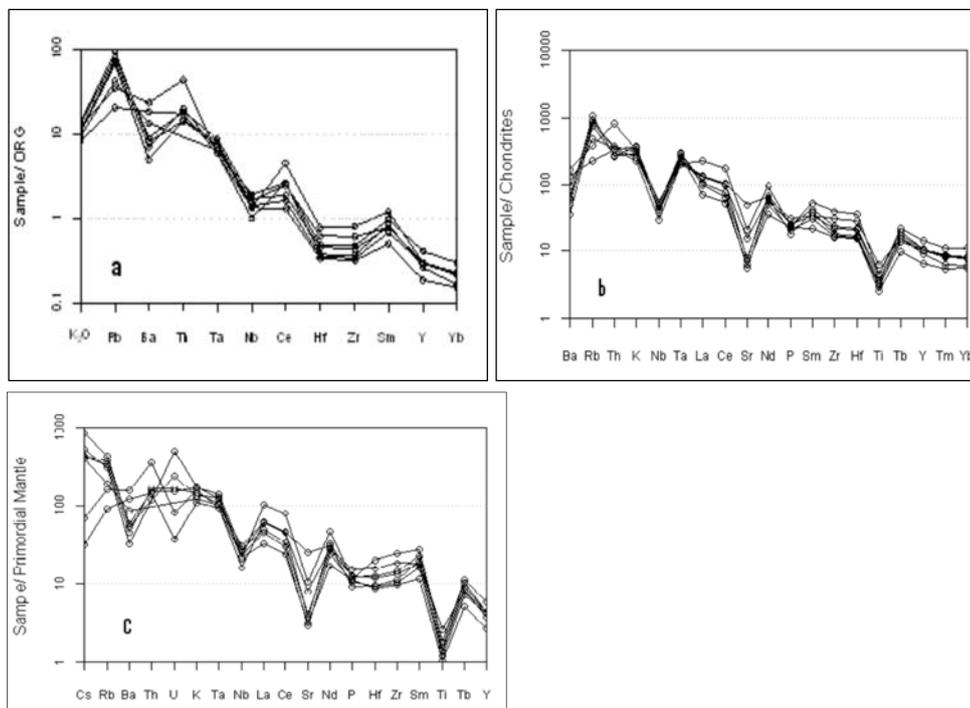
Los *REE* suelen estar agrupados en miembros con ligero número atómico llamados elementos de tierras raras ligeras (*LREE* siglas en inglés), mientras que los que poseen un número atómico pesado son llamados elementos de tierras raras pesadas (*HREE* siglas en inglés). El elemento divisorio entre *LREE* y *HREE* es el Europio (Eu). Es decir, La a Eu se consideran *LREE* y de Eu a Lu se consideran *HREE*.

Químicamente, las *REE* son muy similares en sus propiedades físicas y químicas. Esto es porque todas forman iones relativamente inmóviles con valencia 3+ de radio iónico parecido. Se comporta de tal manera que aumenta el número atómico mientras disminuye el radio iónico.

Los diagramas multielementales contrastan el comportamiento de los elementos más móviles Cs, Rb, K, Ba, Sr con los menos móviles Y, Hf, Zr, Ti, Nb y Ta (figura 9). La concentración de los elementos más móviles (*LIL* siglas en inglés) puede ser una función del comportamiento de la fase fluida en el magma, mientras que la concentración de los elementos menos móviles (*HFS*), puede estar controlada por la química de la fuente y los procesos cristal/fundido que tengan lugar durante la evolución de la roca.

La concentración de determinados elementos también puede estar controlada por ciertas fases minerales. La concentración de Zr puede estar asociada al circón, P al apatito, Sr a la plagioclasa, Ti, Nb y Ta a la ilmenita o esfena.

FIGURA 9
AMBIENTES DE FORMACIÓN POR DISTRIBUCIÓN DE
REE



Fuente: Geochemistry, White (2000). 2015.

1.9.11 Norma (ICP-MS)

La geoquímica será proporcionada por medio del método *ICP-MS* por sus siglas en inglés (*Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry*). Es una técnica de análisis elemental e isotópico que se ha impuesto para las más diversas aplicaciones, por la capacidad de discriminar isótopos y a sus bajos límites de detección, que pueden llegar a ser inferiores a los 10 mg/L a 6 mg/L, dichos límites son mucho más bajos que otras técnicas analíticas más convencionales como la

fluorescencia de rayos X, espectrometría de emisión o absorción atómica.⁴

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 a 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 focal.⁵

Tiene como ventaja los bajos límites de detección para la mayoría de los elementos; detecta una poca ppb- ppt lo que facilita el análisis de elementos traza, siendo más específico los elementos detectados por esta norma, los cuales se enlistan en la tabla 2. También es aplicable a diferentes áreas como la biología, física de materiales, medioambiente y geoquímica.⁶

⁴ Haydn Barros, *Et. Al.*, *Espectrometría de masas con plasma inductivamente acoplado* (Argentina: Cyted, 2015), 113.

⁵ Robert Thomas. *A beginner's guide to ICP-MS. Part I, Spectroscopy* (Iselin, New Jersey: Estados Unidos, 2001), 1.

⁶ *Ibid.*

CUADRO 5 ELEMENTOS E IONES DETECTADOS MEDIANTE ICP-MS

Elemento	Límite de detección	Límite superior	Elemento	Límite de detección (ppm)	Límite superior (ppm)
SiO ₂	0,01 %	100 %	Er	0,03	10 000
Al ₂ O ₃	0,01 %	100 %	Eu	0,02	10 000
CaO	0,01 %	100 %	Ga	0,5	10 000
Cr ₂ O ₃	0,002 %	100 %	Gd	0,05	10 000
Fe ₂ O ₃	0,04 %	100 %	Hf	0,1	10 000
K ₂ O	0,01 %	100 %	Ho	0,02	10 000
MgO	0,01 %	100 %	La	0,1	50 000
MnO	0,01 %	100 %	Lu	0,01	10 000
Na ₂ O	0,01 %	100 %	Nb	0,1	50 000
P ₂ O ₆	0,01 %	100 %	Nd	0,3	10 000
TiO ₂	0,01 %	100 %	Pr	0,02	10 000
Ba	5 ppm	5 %	Rb	0,1	10 000
Nb	5 ppm	50 000 ppm	Sm	0,05	10 000
Ni	20 ppm	10 000 ppm	Sn	1	10 000
Sc	1 ppm	10 000 ppm	Sr	0,5	50 000
Sr	2 ppm	50 000 ppm	Ta	0,1	50 000
Y	3 ppm	50 000 ppm	Tb	0,01	10 000
Zn	5 ppm	50 000 ppm	Th	0,2	10 000
LOI	0,1 %	100 %	Tm	0,01	10 000
Sum	0,01 %	100 %	U	0,1	10 000
Ce	30 ppm	50 000 ppm	V	8	10 000
Co	20 ppm	10 000 ppm	W	0,5	10 000
Cu	5 ppm	10 000 ppm	Y	0,1	50 000
Zn	5 ppm	10 000 ppm	Yb	0,05	10 000
Ba	1 ppm	50 000 ppm	Zr	0,1	50 000
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			

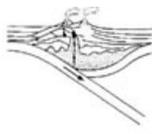
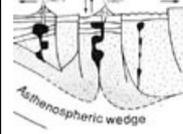
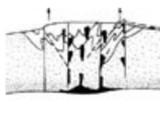
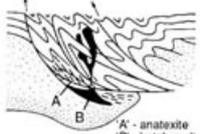
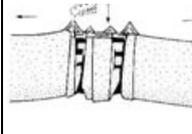
Fuente: Modificado de Catalogo empresa *Bureau Veritas Minerals*. 2015 *Schedule of services an Fees* (CDN). 2015.

1.9.12 Ambiente tectónico

Para determinar la clasificación de los ambientes tectónicos, existen diferentes propuestas, como se muestra en la tabla 3, modificada de Pitcher (1983, 1993), Barbarín (1990) y Winter (2001).

Estos investigadores han tomado diferentes criterios para caracterizar la fuente de los materiales, una clasificación basada en el ambiente tectónico provee a los estudiosos las razones y el lugar donde se han formado; como también la evidencia de la continua relación entre los procesos geológicos y la generación magmática.⁷

CUADRO 6 AMBIENTES TECTÓNICOS DE 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
Mecanismosd e fusión	Subducción, transferencia de calor y fluidos hacia arriba que disuelven minerales de la loza		Engrosamiento o tectónico + calor radiogén	Calor cortical + mantélico (ascen. Astenosfera)	Punto caliente y/o ascenso del manto

Fuente: Modificado de http://www.insugeo.org.ar/libros/misc_18/11.htm (13 de agosto de 2015).

⁷ Universidad Nacional de Tucuman. *Rocas plutónicas*, 2015. http://www.insugeo.org.ar/libros/misc_18/11.htm (13 de agosto de 2015).

CAPÍTULO 2 METODOLOGÍA

2.1 Método: cualitativo y cuantitativo

Para esta investigación el método es mixto, ya que está compuesto por cuantitativo y cualitativo. El método cuantitativo abarca los resultados de la etapa de laboratorio, por medio del porcentaje de los minerales mayores para la determinación de la composición química (Al_2O_3 , K_2O , CaO , Na_2O , P_2O_5 , MgO , FeO y TiO_2). Se determinó el intrusivo con el uso de las relaciones entre K_2O , CaO , Na_2O , Al_2O_3 , Fe_2O_3 y MgO .

Se estableció el origen y ambiente de la roca por medio de diagramas que toman como base las relaciones entre Y, Yb, Rb, Ba, K, Nb, Ta, Ce, Sm, Zr y Hf. Se definió el grado de saturación en alúmina mediante gráficos al considerar las relaciones de valores en moles de los óxidos de K_2O , CaO , Na_2O y Al_2O_3 , para discriminar entre peraluminoso, metaluminoso y peralcalino.

El método cualitativo está relacionado con el análisis del método cuantitativo (diagramas, tablas, entre otros), a través del cual se realizó la descripción e interpretación de las características de la roca, tanto en la etapa de campo como en el laboratorio; también se evaluaron aspectos como la distribución superficial y la litología; esta última específicamente en la mineralogía, meteorización y los contactos con la roca caja.

2.1.1 Marco metodológico o metodología validada

a. Etapa de recopilación y análisis bibliográfico

Corresponde a la obtención de información del área de estudio, mediante consultas bibliográficas como: libros, tesis, artículos de revistas, etc., también se utilizaron mapas topográficos y geológicos, así como fotografías aéreas.

b. Etapa de trabajo de campo

Se visitó el área de estudio con el fin de recolectar datos y descripciones del lugar, con el método de caminamiento, a través del cual se buscó detallar la información de la exposición del intrusivo y así delimitar las unidades litológicas dentro del área de investigación. También se recolectaron muestras, se determinaron estructuras geológicas y la disposición y características locales de los granitos.

El cartografiado se realizó a escala 1: 10 000, ya que refleja de mejor manera la disposición de los cuerpos graníticos y sus contactos con las otras unidades de roca.

La descripción de aspectos cualitativos y cuantitativos se llevó a cabo mediante la visita al área de estudio, para cada una de las variables establecidas previamente.

La recolección de muestras con la finalidad de su análisis petrográfico y geoquímico, se realizó mediante la evaluación de las características como: ausencia de alteraciones, meteorización, representatividad de minerales

observables con lupa y con una masa de 1 kg. Además, se contempló la obtención de muestras de mano en los diferentes afloramientos.

c. Etapa de laboratorio

Se utilizó el laboratorio de la Carrera de Geología – CUNOR; con la ayuda de diferentes herramientas, se elaboraron secciones delgadas de las diferentes muestras de rocas recolectadas en la fase de campo.

Para la descripción de las mismas se utilizaron microscopios petrográficos, con el fin de analizar y determinar la mineralogía, texturas, porcentajes, etc. Para ello se utilizó la clasificación petrográfica modal QAPF o diagrama Streckeisen para rocas plutónicas, también diagramas porcentuales de minerales, guías texturales y guías para la identificación de minerales al microscopio petrográfico.

Se evaluaron en secciones delgadas la carencia de alteraciones (a nivel microscópico), lo cual determinó la cantidad de muestras que se enviaron a la fase de análisis geoquímico.

Las muestras fueron seleccionadas según los resultados de la petrografía, se eligieron las más representativas por cada unidad; físicamente las muestras no presentaban fracturación, oxidación, etc. Posterior a ello fueron enviadas al laboratorio *Inspectorate America Corp*, en la división *Metals & Minerals*, para el análisis geoquímico.

Se utilizó el método ICP-MS, se trituraron las muestras para obtener fragmentos menores a 4 mm, estos se enjuagaron con agua desionizada, para descartar fragmentos alterados. Seguidamente se pulverizaron entre 30 g y 40 g de la muestra hasta un tamaño menor a 75 micras, con el fin de obtener los elementos mayores y traza de las muestras con concentraciones mayores al 0,1 % o 1 000 ppm en la roca total (elementos mayores) y la concentración de 0,1 % o a 1 000 ppm del total de la muestra para los elementos trazas.

d. Etapa de gabinete

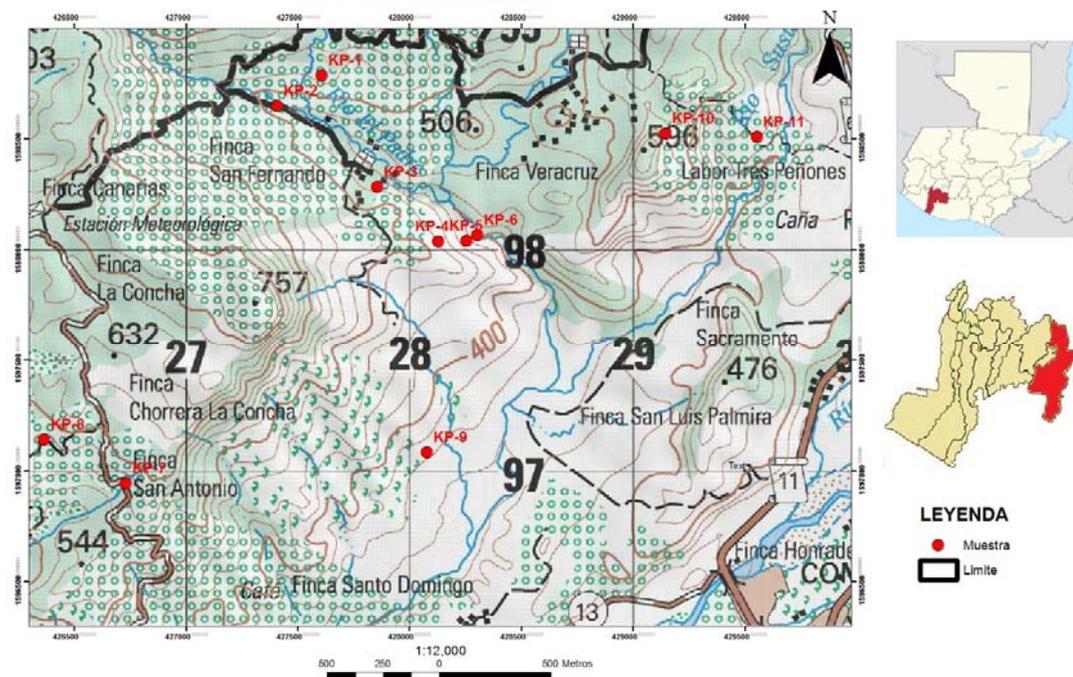
Se realizó la interpretación de los resultados obtenidos en las diferentes etapas para lograr las características geoquímicas y petrográficas de la unidad de roca granítica, así como la elaboración de este documento.

CAPÍTULO 3 PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

3.1 Litología

El cuerpo intrusivo identificado informalmente como granito San Juan Bautista, esta descrito macroscópica y microscópicamente por medio de la recolección de muestras distribuidas espacialmente en el área de estudio (figura 10). Se tomaron aspectos como: coloración, textura, granulometría y exposición, para detallar la descripción de los cambios que presenta.

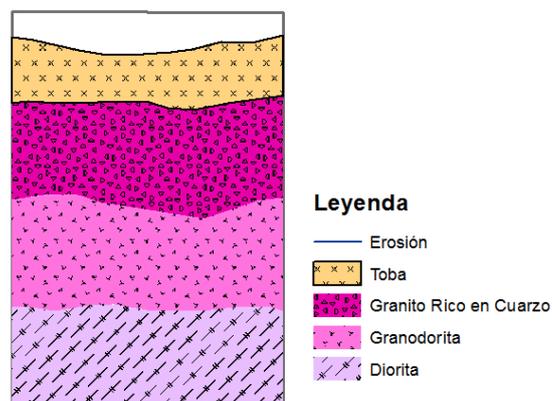
**FIGURA 10
MUESTRAS RECOLECTADAS**



Fuente: Investigación campo. 2015.

Se recolectaron doce muestras en la etapa de campo, estas se clasificaron macroscópicamente por lo que se realizaron ocho secciones delgadas para realizar el análisis petrográfico, en donde se identificaron tres unidades dentro del intrusivo, según el proceso de cristalización la más antigua es la Diorita, luego la Granodiorita y por último el Granito Rico en Cuarzo, con una cubierta de toba vítrea, (figura 11).

FIGURA 11
COLUMNA LITOSTRATIGRÁFICA



Fuente: Investigación campo. 2016

3.1.1 Unidad de Granodiorita (Tg)

Se localiza en el norte - centro del área de estudio, dentro de las fincas San Fernando y Veracruz, con una extensión aproximada de 4 km². La mayor parte se localiza en las pendientes de las laderas y las superficies de cumbres a los alrededores del río El Padre.

La Granodiorita (Tg) se observó como una cubierta de bloques (fotografía 1, c y 1, d), con medidas de aproximadamente 0,2 m a 0,5 m, se identificaron enclaves dentro de la unidad (fotografía 1, d). Estos son característicos, ya que se presentaron de forma distribuida dentro de los bloques. Aproximadamente miden de

10 cm a 50 cm, particularmente se presentaban en forma sub-redondeados.

Los bloques se encuentran en contacto discordante con la Toba Cristalina (Tcr), algunos bloques se encontraron dentro de la Tcr y otros están solo por encima de la misma.

FOTOGRAFÍA 1 BLOQUES DE LA UNIDAD DE GRANODIORITA

a. Bloque de granodiorita (Tg), afectado por vegetación e intemperismo hídrico en las coordenadas GTM 426869/1598368, b. Granodiorita (Tg) localizada en los alrededores del río Padre, coordenadas GTM 428099/ 1597672, c. Bloques de granodiorita rodeado de vegetación, coordenadas GTM 429153/ 1599346, d. Enclaves (círculos rojos) dentro de la granodiorita, coordenadas GTM 428079/ 1597086.



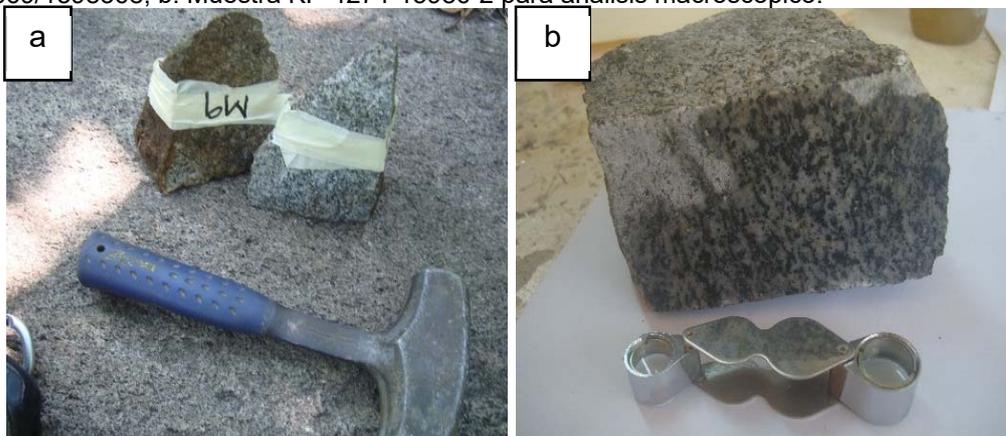
Tomada por: Karen Paau. 2015.

Macroscópicamente se encuentran afectados por intemperismo y con un grado de meteorización 4 (fotografía 1, a). Presenta una tonalidad mesocrática (fotografía 2, a y 2, b), con presencia de una leve argilización y alineación de los minerales.

Muestra una textura holocristalina, los granos son faneríticos con una distribución inequigranular. Se identificaron minerales como: cuarzo (Qz) 28 %, feldespatos (Fel) 32 %, biotita (Bt) 5 % y minerales opacos 3 %, dentro de una mesostaza silícea.

FOTOGRAFÍA 2 UNIDAD DE GRANODIORITA

a. Muestra de la unidad (Tg) recolectada en la etapa de campo coordenadas GTM 426869/1598368, b. Muestra KP-4274-15986-2 para análisis macroscópico.

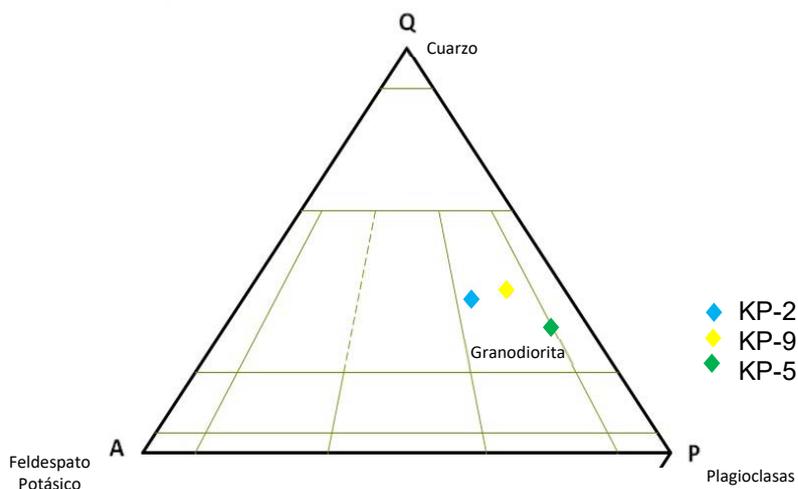


Tomada por: Karen Paau. Año 2015.

Petrográficamente se analizaron dos muestras de la unidad de granodiorita (Tg) identificadas como: KP-2 y KP-9 (figura 12), y una muestra de enclaves KP-5.

Se clasificaron con el diagrama de *Streckeisen* en las que se situaron en el campo de granodiorita (Tg) las muestras KP-2 y KP-9 y en el campo de Tonalita la muestra KP-5 (figura 12).

FIGURA 12
DIAGRAMA DE STRECKEISEN DE UNIDAD DE GRANODIORITA



Fuente: Investigación de campo. 2015.

Esta unidad presenta microscópicamente una textura inequigranular hipidiomórfica, con presencia de fenocristales de plagioclasas y cuarzo. La forma de los cristales es subhedral.

Se identificaron minerales esenciales: plagioclasas (Pl) 32 %, las cuales se clasificaron según su ángulo de extinción como: labradorita y andesina, con su típico maclado polisintético (fotografía 3, a). La labradorita se presenta como fenocristal con zonaciones discontinuas oscilatorias (fotografía 3, a), con inclusiones antipertíticas.

Cuarzo (Qz) 28 %, que se observó de tamaño medio - grande, anfíboles (Amp) 15 % que están afectados por alteración (cloritización) en donde se observan colores de tercer orden de birrefringencia.

Biotita (Bt) 5 %, la cual se encuentra asociada íntimamente con los anfíboles en forma de cúmulos, dentro de la biotita se observaron pequeños circones (fotografía 3, d).

Feldespatos (Kfp) 15 %, se clasificaron como sanidina por su simetría monoclínica y coloración de primer orden (fotografía 3, b), afectada por pequeñas inclusiones de cuarzo.

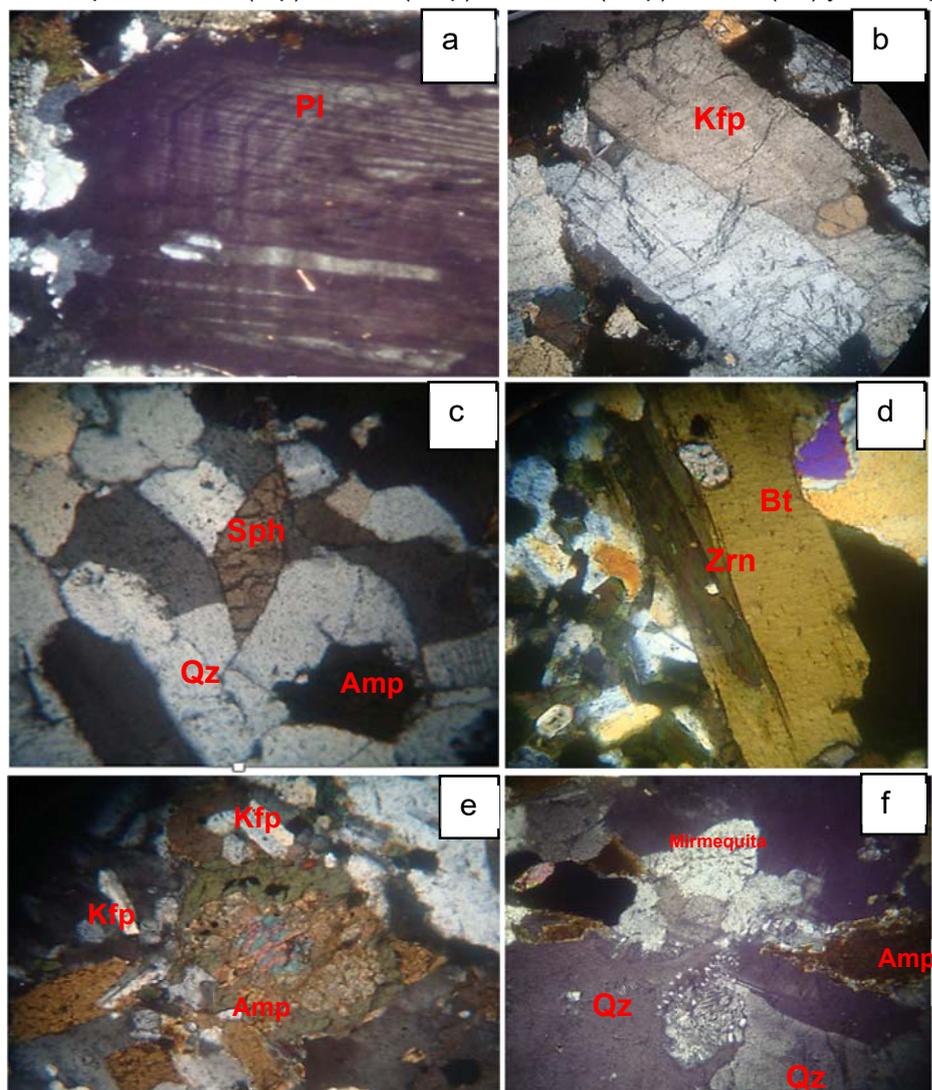
Clinopiroxenos (Cpx) 1 %, también se identificaron minerales accesorios: opacos 3 %, circón (Zrn) 0,5 % y esfena (Sph) 0,5 %.

Los minerales opacos se clasificaron como pirita, ya que presentan una forma rómbica (fotografía 3, e). La presencia de mirmequita se caracteriza por el intercrecimiento de cuerpos pequeños de cuarzo y plagioclasas en forma de gusano, encerrados en Kfp (fotografía 3, f).

FOTOGRAFÍA 3

SECCIÓN DELGADA DE LA UNIDAD DE GRANODIORITA

Viste en XPL, de los minerales encontrados en la unidad de Granodiorita; a. Plagioclasa zonada (Pl), b. Feldespato alcalino (Kfp), c. Esfena (Sph), cuarzo (Qz), anfíbol (Amp), d. Biotita (Bt), circón (Zrn), e. Feldespato alcalino (Kfp), anfíbol (Amp), f. Anfíbol (Amp), cuarzo (Qz) y mirmequita.



Tomada por: Karen Paau. 2015.

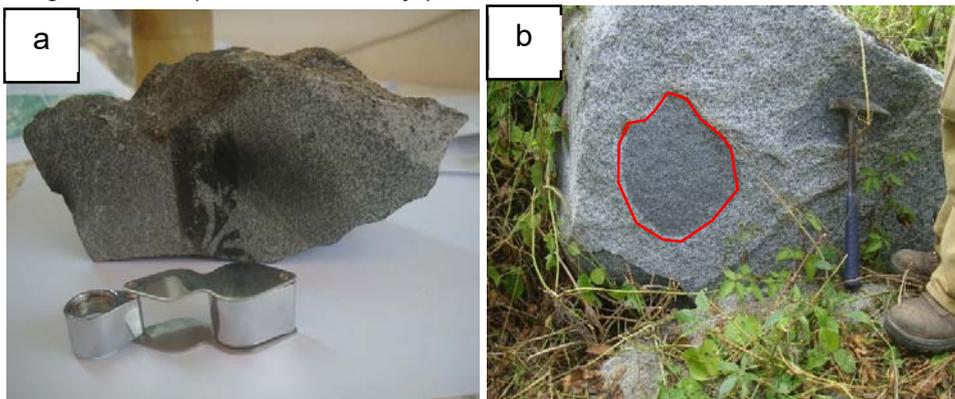
Los Enclaves dentro de las rocas intrusivas son muy comunes, refiere a las inclusiones en las rocas ígneas durante el flujo de magma y la erupción. Los enclaves pueden alojarse a lo largo de los márgenes de la cámara magmática, estar como material suelto en las paredes de un

conducto de lava en erupción a la base de una colada de lava en la superficie terrestre, por lo que se puede indicar como prueba de mezcla magmas. Los enclaves como anteriormente se mencionó, se encuentran distribuidos dentro de la unidad de granodiorita (fotografías 4, a y 4, b).

Macroscópicamente presenta una coloración melanocrática. Con un grado de meteorización 2. Se observó una textura de flujo, con un tamaño de cristales afanático. Se identificaron minerales como: biotita (Bt) 20 %, anfíboles (Amp) 50 %, y otros 30 % no se pudieron identificar.

FOTOGRAFÍA 4 ENCLAVES EN LA UNIDAD DE GRANODIORITA

a. Muestra de mano de enclave, coordenadas GTM 428079/ 1597086, b. Enclave dentro de la unidad de granodiorita (circulo de color rojo), coordenadas GTM 428079/ 1597086.

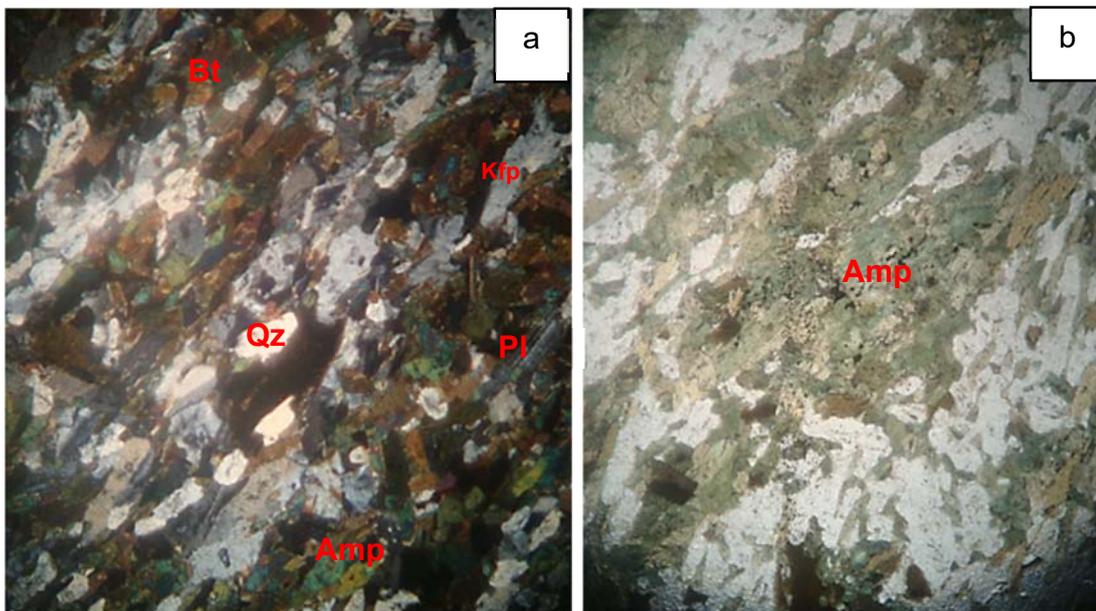


Tomada por: Karen Paau. 2015.

Microscópicamente se observaron (fotografía 5): plagioclasas (Pl) 24 % que regularmente presentan zonaciones en la andesina, anfíboles (Amp) 40 % los cuales en su mayoría fueron afectados por la cloritización y levemente epidotización. Biotita (Bt) 15 %, cuarzo (Qz) 15 % que presenta una extinción ondulante, feldespatos (Kfp) 15 % los cuales presentan inclusiones de plagioclasas, minerales opacos 1 %. La sección muestra estructura de flujo con un tamaño medio y una textura inequigranular hipidiomórfica.

FOTOGRAFÍA 5 SECCIÓN DELGADA DE LOS ENCLAVES

- a. Vista XPL, plagioclasa (Pl), feldespato (Kfp), cuarzo (Qz), anfíbol (Amp), biotita (Bt), circón (Zrn),
b. Vista PPL, anfíbol (Amp).



Tomada por: Karen Paau. 2015.

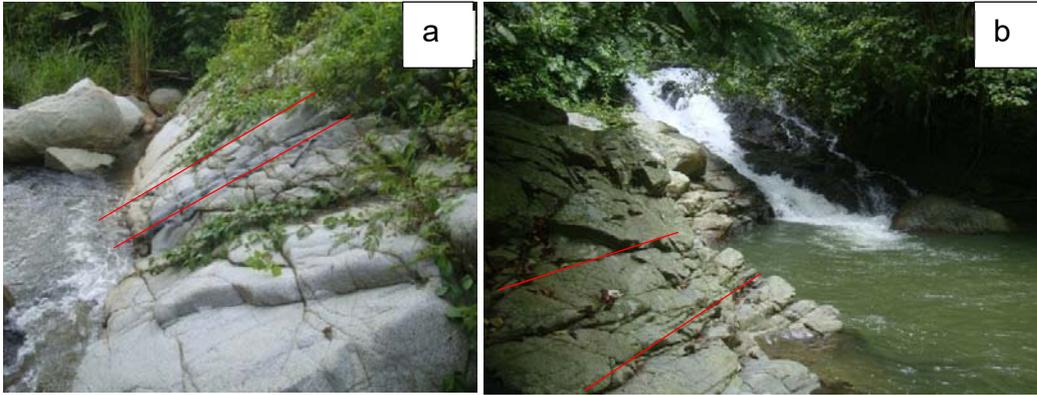
3.1.2 Unidad de diorita (Td)

Se encuentra en la parte norte - centro del área de estudio, dentro de la finca San Fernando.

La única exposición se localiza dentro del río El Padre (fotografía 6, a) con una dirección preferencial del afloramiento de N110. Esta unidad fue intruída por un dique tabular con una dirección N102/90, como también se observaron enclaves distribuidos en todo el afloramiento. Esta unidad está en contacto discordante con una cubierta de toba.

FOTOGRAFIA 6 AFLORAMIENTO DE LA UNIDAD DE DIORITA

a. Afloramiento de diorita con intrusión de un dique (líneas de color rojo), coordenadas GTM 427233/ 1598712, b. Patrones preferenciales de fracturas dentro de la unidad (líneas de color rojo)



Tomada por: Karen Paau. 2015.

Macroscópicamente se observó (fotografía 7): cuarzo 35 %, plagioclasa 5 %, anfíboles 10 %, biotita 20 % y 5 % de presencia de oxidación. Presenta una textura inequigranular con tamaño fino - medio, con una coloración mesocrática. Posee una meteorización de grado 2,5 con presencia de intemperismo hídrico. Dentro de la unidad se midieron estructuras de foliación con direcciones de rumbo y buzamiento (regla de la mano derecha): $N72/42$, $N200/52$ y fracturas $N102/32$, $N33/64$, $N232/20$.

FOTOGRAFÍA 7 UNIDAD DE DIORITA

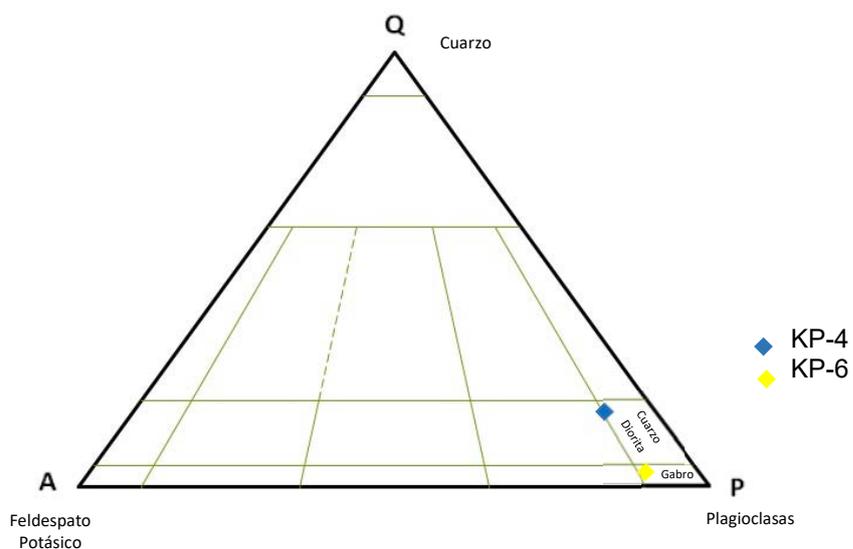
Muestra de la unidad Td recolectada en la etapa de campo coordenadas GTM 428129/ 1598040.



Tomada por: Karen Paau. 2015.

Se analizó petrográficamente una muestra (KP-4) de Unidad de Diorita (figura 9). En dicha unidad se encuentra la subunidad de dique con la muestra (KP-6), se encuentra dentro del campo de cuarzo - gabro (figura 13).

FIGURA 13 DIAGRAMA DE STRECKEISEN DE UNIDAD DE DIORITA



Fuente: Investigación de campo. 2015.

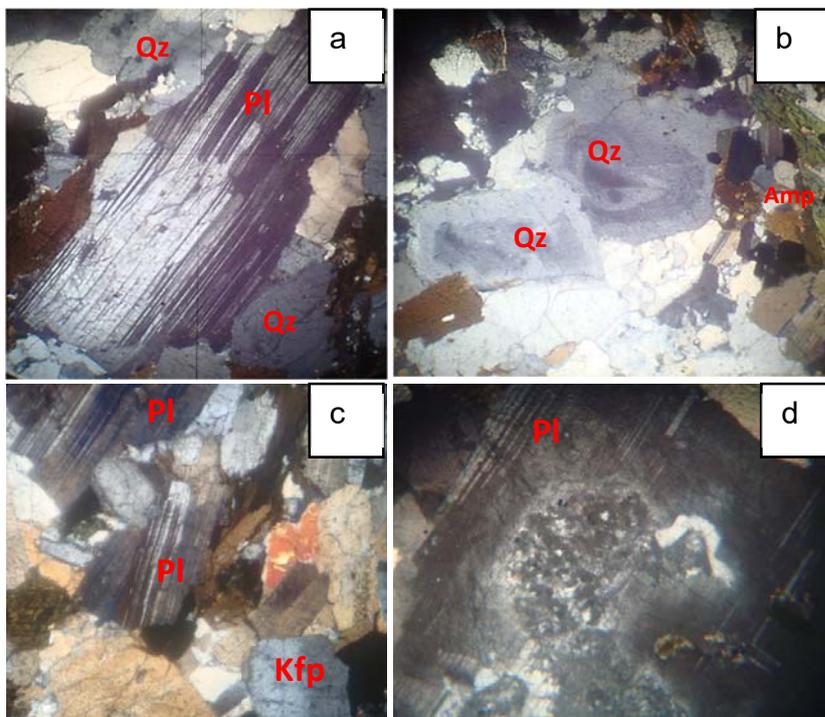
En el diagrama de Streckeisen (figura 13) se observa que la muestra se encuentra en el campo de diorita (Td), por medio del análisis microscópico se identificaron minerales esenciales: plagioclasas (Pl) 56 %, las que presenta una leve zonación con presencia de ceritización, las mismas se clasificaron según el ángulo de extinción como: labradorita y andesina (fotografía 8, a y 8, c). El cuarzo (Qz) 14 % se observó de tamaño medio - grande, algunos presenciaban ángulo de extinción ondulante y una textura poiquilítica (fotografía 8, b).

Anfíboles (Amp) 20 %, biotita (Bt) 5 %, feldespatos (Kfp) 7 % y clinopiroxenos (Cpx) 1 %, también se identificaron minerales opacos con 2 %.

Presentaban una textura preferencial inequigranular, en los que se observaron cristales de plagioclasas, con aristas subhedrales. La presencia de mirmequita (fotografía 8, d) se caracteriza por el intercrecimiento de cuerpos pequeños de cuarzo y plagioclasas en forma de gusano, encerrados en Kfp (fotografía 8, c).

FOTOGRAFÍA 8 SECCIÓN DELGADA DE LA UNIDAD DE DIORITA

a. Vista XPL, cuarzo (Qz) y plagioclasa (Pl), b. Cuarzo (Qz) con extinción ondulante, c. Presencia de plagioclasa (Pl), feldespatos Kfp, d. Mirmequita.



Tomada por: Karen Paau. 2015.

a. Sub-unidad de Dique Gabroico (Tdg)

Los diques representan conductos de forma tabular, ya que son los canales que atraviesan la litosfera que conectan el sistema magmático.

La sub-unidad de Dique Gabroico (Tdg) intruye a la unidad de diorita (Td) (fotografía 6, a), aproximadamente tiene un espesor de 50 cm con una orientación preferencial 90/N102.

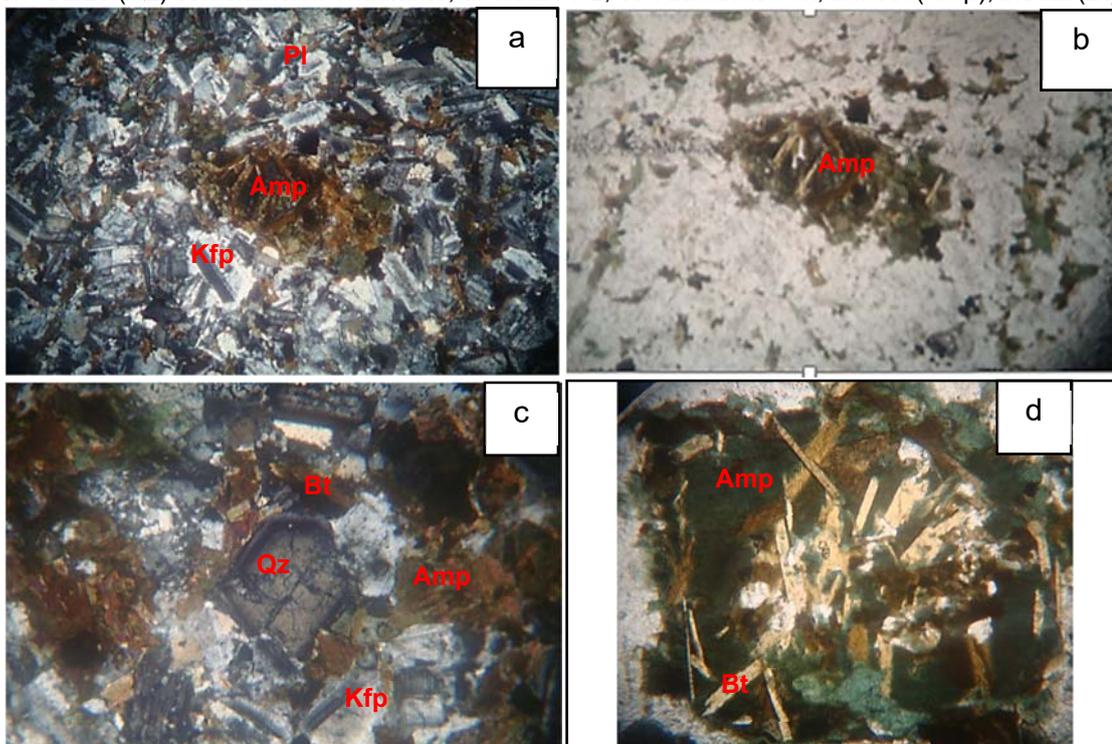
Macroscópicamente presenta una coloración melanocrática y una textura afanática, con un grado de meteorización 2. Se observaron fenocristales de biotita (Bt) de 1 cm - 3 cm, esto dominó un 20 % en las muestras, el 80 % restante no se identificó por el tamaño de las partículas.

Microscópicamente se analizó la muestra (KP-6); presenta una textura inequigranular holocristalina. Mineralógicamente está compuesta por: cuarzo (Qz) 5 % con una extinción ondulante (fotografía 9, c), minerales opacos 3 %, anfíboles (Amp) 10 % con presencia de clorita y epidota (fotografía 9, b y 9, d), feldespatos (Kfp) 7 %; se clasificó como sanidina por el sistema monoclinico, con un color de birrefringencia de primer orden.

Biotita (Bt) 10 %, plagioclasa (Pl) 65 % las cuales se clasificaron por su ángulo de extinción en andesina y labradorita, las plagioclasas se muestran de tamaño fino a mediano con zonaciones discontinuas oscilatorias (fotografía 9, a).

FOTOGRAFÍA 9 SECCIÓN DELGADA DE LA SUB-UNIDAD DE DIQUE

a. Vista XPL, plagioclasa (Pl), anfíboles (Amp), feldespatos (Kfp), b. Vista PPL, anfíboles (Amp), c. Cuarzo (Qz) con extinción ondulante, d. Vista PPL, con aumento 60x, anfíbol (Amp), biotita (Bt).



Tomada por: Karen Paau. 2015.

3.1.3 Unidad de Granito Rico en Cuarzo (Tgr)

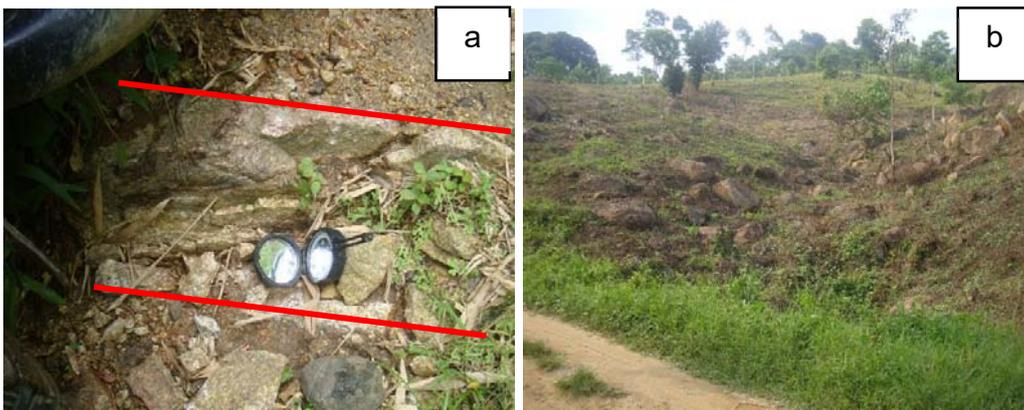
Se localiza en la parte *NE* del área, dentro de la comunidad Veracruz y la finca Tres Peñones, posee una extensión espacial aproximada de 1 km², la unidad se presenta de forma *in-situ* y como una capa de bloques.

La exposición *in-situ* se localiza en la carretera que atraviesa la finca los Tres Peñones, espacialmente tiene 2 m² de exhibición. Presenta una dirección preferencial N350/65 (fotografía 10, a).

La cubierta de esta unidad (fotografía 10, b) se localiza en la comunidad Veracruz, los bloques tienen tamaño entre 0,5 m y 1,5 m; aproximadamente tiene dimensión espacial de 0,9 km² en la parte *NE* del área de estudio. Se observaron enclaves redondeados distribuidos en los bloques, el tamaño comprende entre 10 cm a 50 cm.

FOTOGRAFÍA 10 AFLORAMIENTO DE LA UNIDAD DE GRANITO RICO EN CUARZO

a. Afloramiento de la unidad del Granito rico en cuarzo, con una dirección preferencial (líneas rojas), coordenadas GTM 429555/1598509, b. Cubierta de bloque de granito rico en cuarzo, coordenadas GTM 429153/1599346.



Tomada por: Karen Paau. 2015.

Macroscópicamente (fotografía 11) presenta una coloración leucocrática con textura inequigranular y fenocristales de cuarzo (Qz) aproximadamente de 0,2 cm a 0,7 cm, con un grado de meteorización 3,5. Mineralógicamente está compuesto por: cuarzo (Qz) 70 %, biotita (Bt) 5 %, óxidos 5 % y feldespatos (Kfp) 20 %.

FOTOGRAFÍA 11 UNIDAD DE GRANITO RICO EN CUARZO

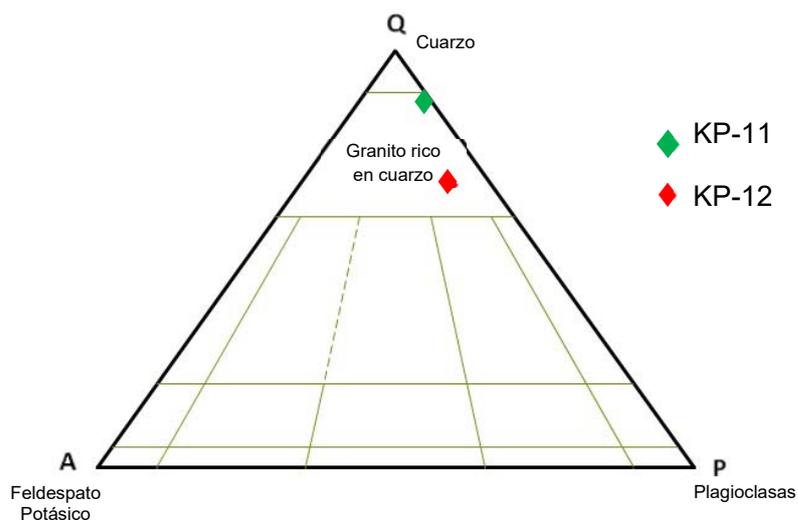
Muestra de la unidad Tgr recolectada en la etapa de campo coordenadas GTM 429153/1599346.



Tomada por: Karen Paau. 2015.

Para el análisis petrográfico se recolectaron dos muestras KP-11 y KP-12, ambas secciones se localizan en el diagrama de Streckeisen (figura 14) en el campo de granito rico en cuarzo.

FIGURA 14 DIAGRAMA DE STRECKEISEN DE LA UNIDAD DE GRANITO RICO EN CUARZO

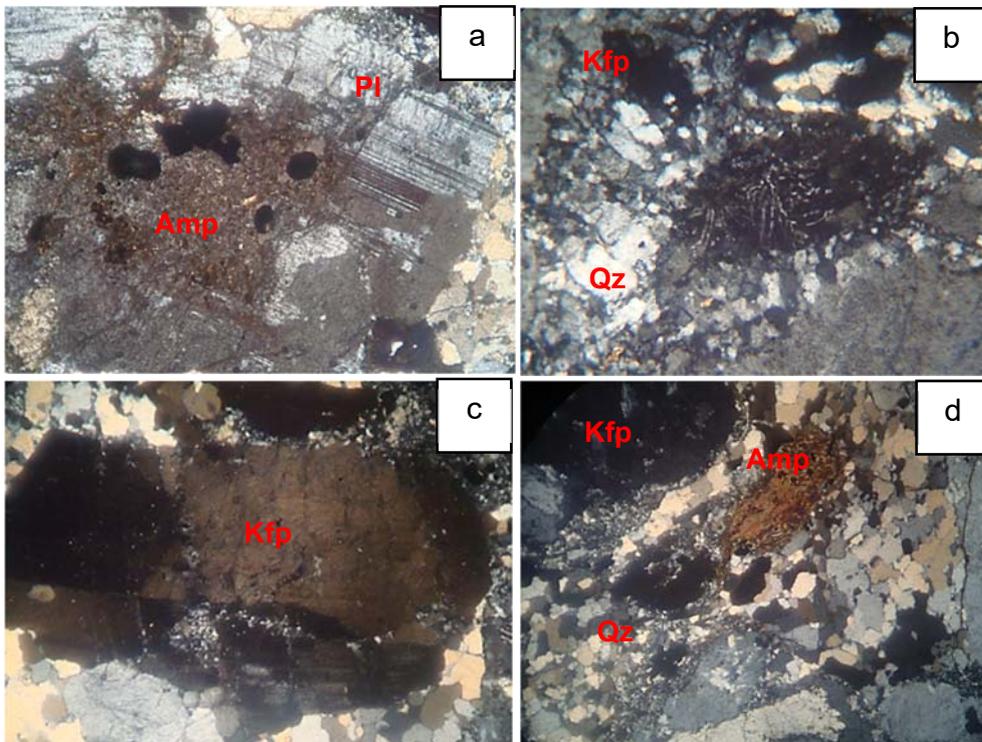


Fuente: Investigación de campo. 2015.

Microscópicamente se observaron minerales como: plagioclasa (Pl) 18 % clasificada por su ángulo de extinción como andesina, la cual presenta inclusiones de cuarzo (fotografía 12, a). Feldespato (Kfp) 20 % con inclusiones de mirmequita (fotografía 12, c), anfíboles (Amp) 5 % con presencia de cloritización (fotografía 12, d), cuarzo (Qz) 50 % (fotografía 12, d) regularmente se presenta con extinción ondulante en los fenocristales medios y minerales opacos 3 %. La presencia de mirmequita se caracteriza por la forma típica de intercrecimiento en forma de gusano encerrando en Kfp (fotografía 12, b).

FOTOGRAFÍA 12 SECCIÓN DELGADA DE LA UNIDAD DE GRANITO RICO EN CUARZO

a. Vista XPL, plagioclasa (Pl), anfíboles (Amp), b. Vista XPL, feldespatos (Kfp), cuarzo (Qz), c. Feldespato con inclusiones (Kfp), d. Vista XPL, anfíbol (Amp), feldespato (Kfp), cuarzo (Qz).



Tomada por: Karen Paau. 2015.

3.1.4 Unidad de Toba (Tcr)

La unidad se encuentra en contacto discordante con la Unidad de Granodiorita (Tg) y Granito Rico en Cuarzo (Tgr). La unidad abarca aproximadamente 6 km² en el área de estudio.

La Toba Cristalina (Tcr) que se localiza en la finca San Fernando de forma masiva (fotografía 13, a), se encuentra con un grado de meteorización 4,3 y está afectado por vegetación e interperismo hídrico. Se observaron dentro de la unidad, pequeños diques de Qz (cuarzo) con una dirección preferencial 10/N130.

Dentro de la finca San Antonio la unidad Tcr se encuentra seudoestratificada con una dirección preferencial N230 (fotografía 13, b), con un grado de meteorización 4, afectada por vegetación. Dentro del afloramiento se tomaron datos de fractura con dirección 56/N140 y una falla con dirección 10/N165 sinistral normal con un *Pitch* 55° SW.

En la finca Chorrera La Concha se encontró la Toba (Tcr) más pseudoestratificada (fotografía 13, c) con una dirección preferencial 10/N34, en donde presenta fuerte intemperismo hídrico. También se localizó en la finca Tres Peñones en donde se observaron escarpes de la toba (Tcr) en forma masiva (fotografía 13, d), presenta estructuras como pseudoestratificaciones con una dirección preferencial 45/N330, fracturamiento con dirección predominante 15/N115. Posee una tonalidad grisácea – beige con una textura inequigranular. Macroscópicamente se observaron minerales de cuarzo, biotita, mica y feldespatos.

FOTOGRAFÍA 13 AFLORAMIENTO DE LA UNIDAD DE TOBA

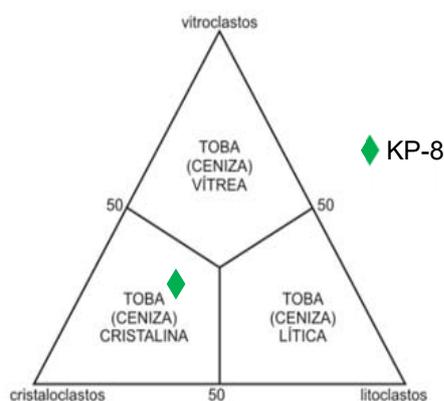
a. Toba masiva, coordenadas GTM 426918/ 1598322, b. Afloramiento dentro de una estructura de lineación mineral, coordenadas GTM 426733/ 1596947, c. Toba estratificada, coordenadas GTM 426368/ 1597142, d. Escarpe de toba, coordenadas GTM 429301/ 1596982.



Tomada por: Karen Paau. Año 2015.

Se analizó la muestra KP-8, para su clasificación se utilizó el diagrama de clasificación composicional de tobas (figura 15) en donde se determinó por su porcentaje de cristales como una Toba Cristalina.

FIGURA 15 CLASIFICACIÓN COMPOSICIONAL DE TOBAS



IUGS Subcomisión (1980)

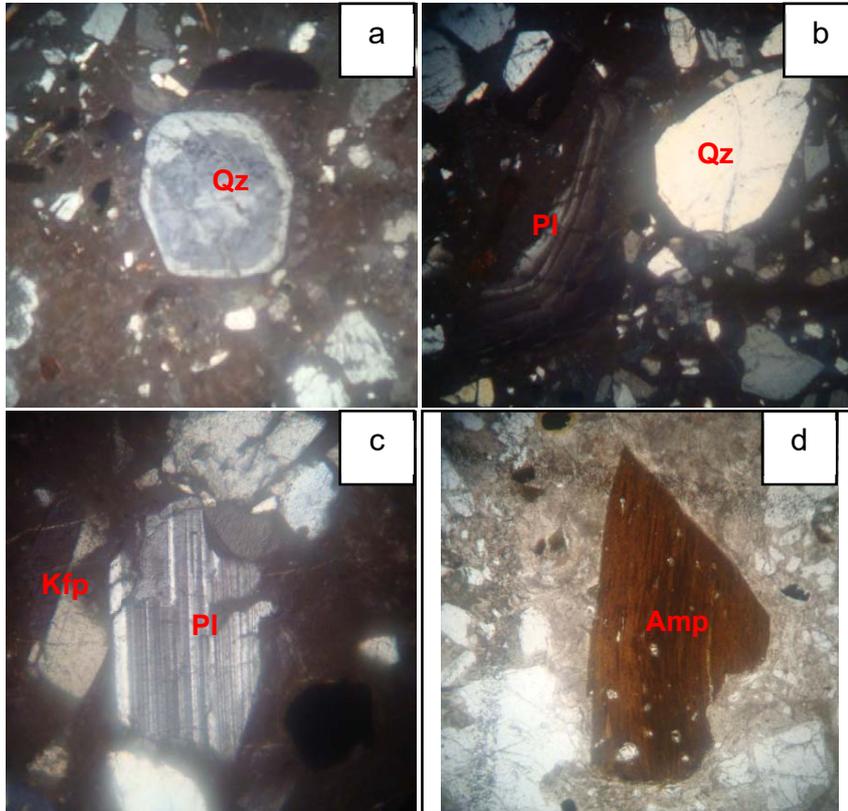
Fuente: Investigación de campo. 2015.

Microscópicamente se identificaron minerales en Tcr como: cuarzo (Qz) 10 %, con una extinción ondulante (fotografía 14, a), plagioclasas (Pl) 45 %, las que por su ángulo de extinción de clasificaron como andesina y labradorita, se observa (fotografía 14, b) que se encuentra con una zonación discontinua oscilatoria y en la fotografía 14, c se observa la plagioclasa con su típico maclado polisintético.

Dentro de la sección también se encuentran fenocristales de anfíboles (Amp) 5 %, los que presentan cloritización (fotografía 14, d), minerales opacos 5 % y una mesostaza porfídica microlítica en una matriz de ceniza.

FOTOGRAFÍA 14 SECCIÓN DELGADA DE LA UNIDAD DE TOBA

a. Vista XPL, cuarzo ondulante (Qz), b. Vista XPL, plagioclasa zonada (Pl), cuarzo (Qz), c. Plagioclasa polisintética (Pl), feldespato (Kfp), d. Vista PPL, anfíbol (Amp).

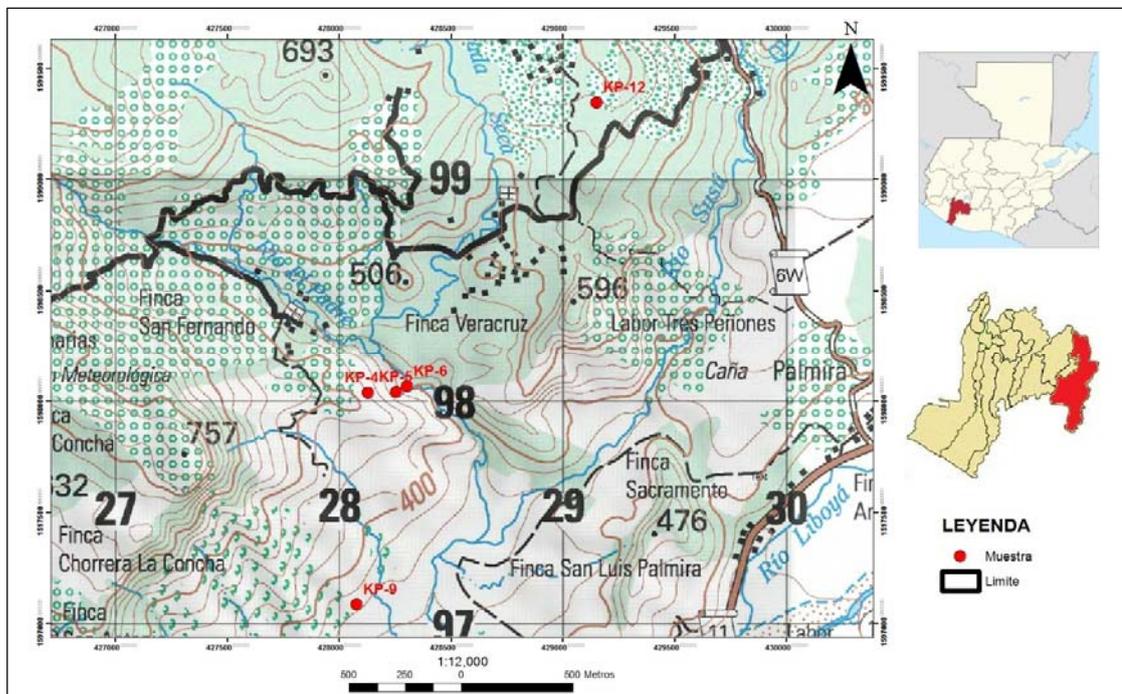


Tomada por: Karen Paau. 2015.

3.2 Geoquímica

El análisis geoquímico del *stock* San Juan Bautista se realizó en cinco muestras (figura 16), KP-4, KP-5, KP-6, KP-9 y KP-12, las cuales fueron tomadas aleatoriamente dentro del área de estudio.

FIGURA 16
LOCALIZACIÓN DE MUESTRAS CON ANÁLISIS GEOQUÍMICO



Fuente: Investigación campo. 2016

3.2.1 Elementos mayores

Se denominan elementos mayores porque están presentes en altas concentraciones y controlan en gran medida la cristalización de los minerales petrogenéticos en las rocas a partir de fundidos (cuadro 7).

En la gráfica de R1- R2 de De la Roche *Et.Al.* (1980), (figura 12, a) se involucran los elementos mayores; para recalcular la composición de la roca se utilizaron miliciones para los parámetros de las gráficas R1 y R2.

El diagrama de clasificación de rocas, según la concentración de SiO_2 se pueden establecer tres grupos: el primer grupo pertenece

a un nivel de roca básico como el campo de gabro. El segundo grupo corresponde a intermedias que se encuentran en los campos gabro, diorita y granodiorita. El último grupo que es más ácido se encuentra en campo de granito que contiene $> 80\%$ SiO_2 .

CUADRO 7
CONTENIDO DE LA NORMA CIPW DE LOS
MINERALES NORMATIVOS: ALBITA, ANORTITA Y
ORTOCLASA

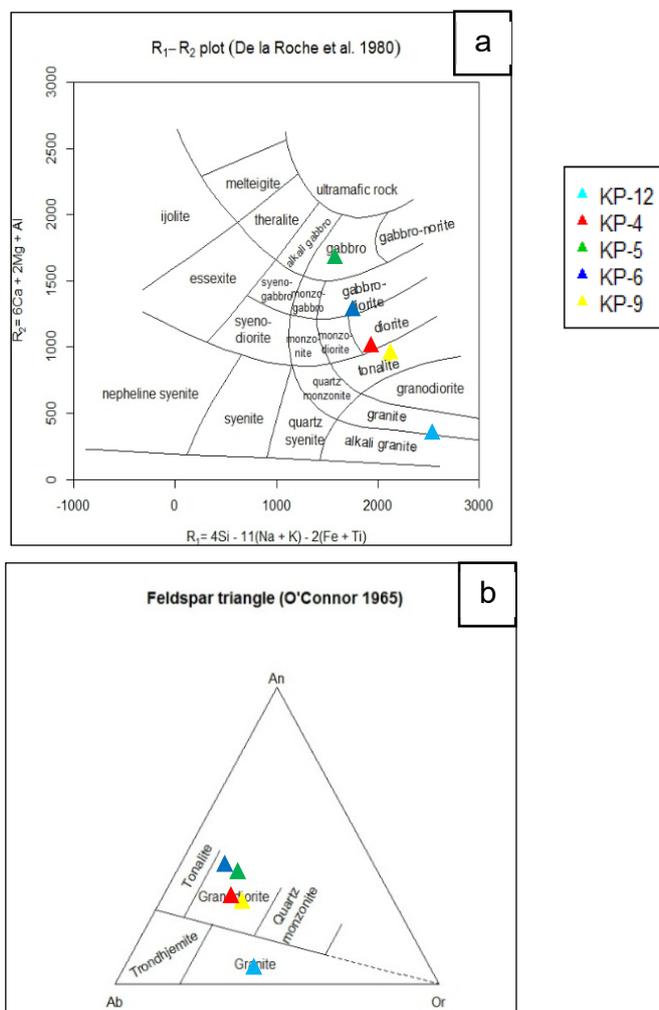
	KP-4	KP-5	KP-6	KP-9	KP-12
Q	15,252	0	9.119	19.127	33.693
C	0	0	0	0	0.53
Or	15,288	11,725	10,335	17,288	25,617
Ab	34,63	26,135	33,382	32,12	34,969
An	20,725	22,078	28,702	18,513	2,96
Di	0,766	13,253	0,736	0,896	0
Hy	5,712	10,619	7,688	5,182	0,403
Ol	0	3,928	0	0	0
Il	0,173	0,416	0,239	0,173	0,13
Hm	5,75	9,624	7,454	5,214	1,536
Tn	1,339	1,948	1,813	1,168	0
Ru	0	0	0	0	0,104
Ap	0,383	0,291	0,554	0,336	0,072
Sum	100,018	100,018	100,022	100,017	100,011

Fuente: Investigación de campo. 2016.

El diagrama de O'Connor (1965) (figura 17, b) se utiliza para rocas que contienen sílice (cuarzo $> 10\%$), y se basa en la norma CIPW (*Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry*) normativo con contenido de albita, anortita y feldespato potásico (cuadro 7). Las muestras (figura 17, b) se encuentran en el campo de granodiorita mientras que la muestra KP-12 se encuentra en el campo de granito.

FIGURA 17 DIAGRAMAS DE CLASIFICACIÓN GEOQUÍMICA

a. R1- R2 De la Roche *Et. Al.* (1980), b. Feldspar triangle O'Connor (1965).



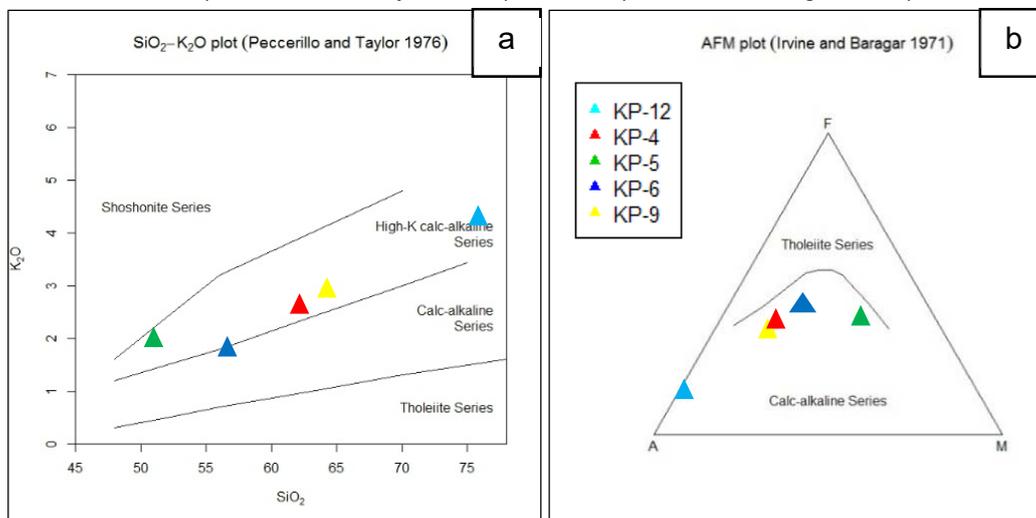
Fuente: Investigación de campo. 2016.

La serie ígnea se determinó en base a los diagramas AFM (Irvine y Baragar, 1971) que sirve para discriminar entre series calcoalcalinas y toleíticas. Las cinco muestras (figura 18, b) se encuentran dentro del campo de serie calcoalcalina.

En el diagrama propuesto por Peccerillo y Taylor (1976) para distinguir las series toleítica, calcoalcalina y rocas shoshoníticas (figura 18, a), la muestra KP-12 se encuentra en el punto medio de la serie calcoalcalina, mientras que las muestras KP-4, KP-5, KP-6, KP-9 pertenecen a la serie calcoalcalina alta en K.

FIGURA 18 DIAGRAMA DE SERIE ÍGNEA

a. SiO_2 - K_2O (Peccerillo and Tylor 1976), b. AFM (Irvine and Baragar 1971)



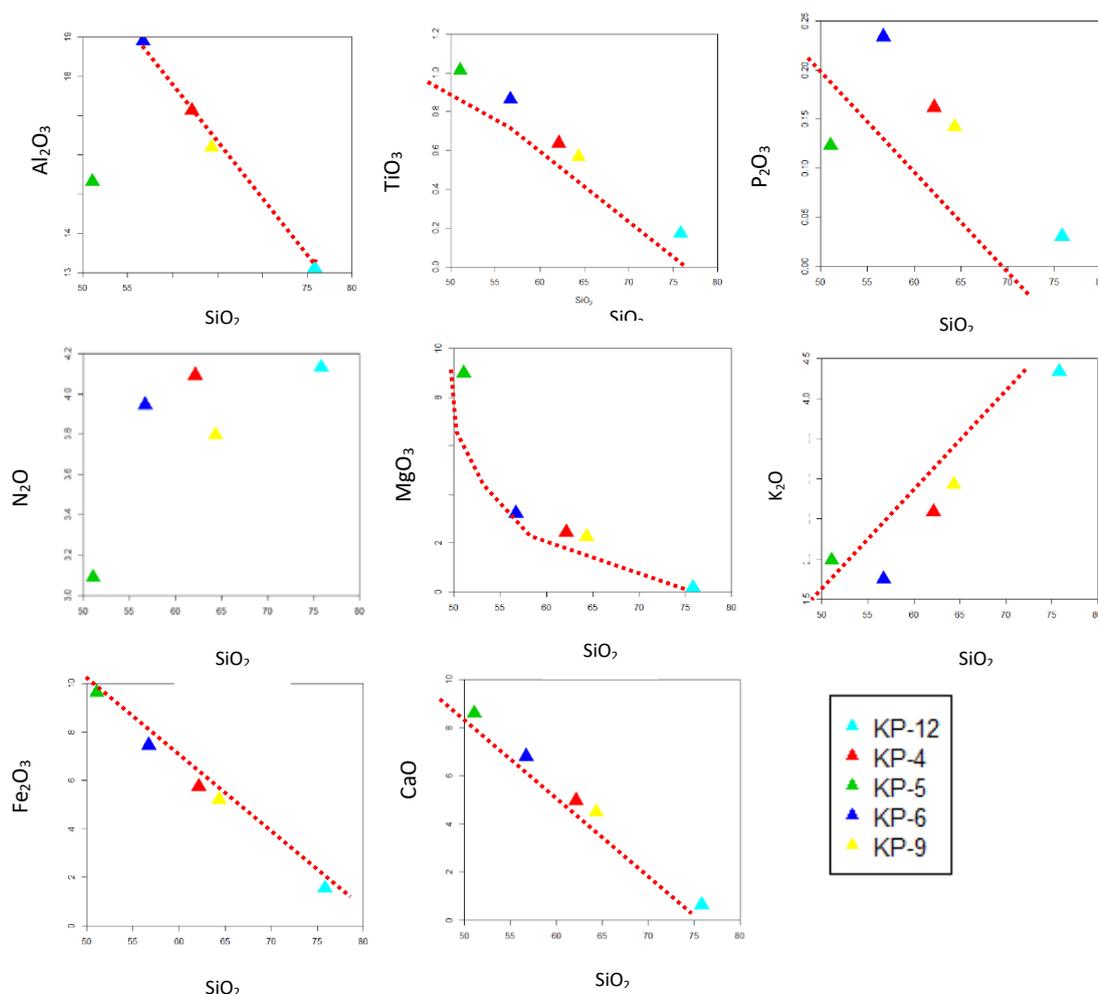
Fuente: Investigación de campo. 2016.

En los diagramas de variación de Harker, para los elementos mayores de las muestras analizadas versus SiO_2 en porcentaje en peso, se observa una tendencia tanto positiva como negativa en los diferentes elementos (figura 19). Los contenidos de Fe_2O_3 , TiO_2 y CaO muestran una clara tendencia negativa con el aumento de la SiO_2 , por lo que pertenece a la muestra de gabbro el valor más bajo de SiO_2 y el valor más alto de SiO_2 está en la muestra de granito.

Con respecto a K_2O presenta una preferencia positiva al aumento de SiO_2 , que pertenece a la muestra de granito. Mientras que los elementos con mayor dispersión se encuentran P_2O_5 , Na_2O ,

Al_2O_3 y MgO lo que podría ser evidencia de la cristalización de minerales afines a estos óxidos (plagioclasas, ortosas).

FIGURA 19
DIAGRAMA DE VARIACIÓN DE HARKER
DE MULTIELEMENTOS MAYORES



Fuente: Investigación de campo. 2016

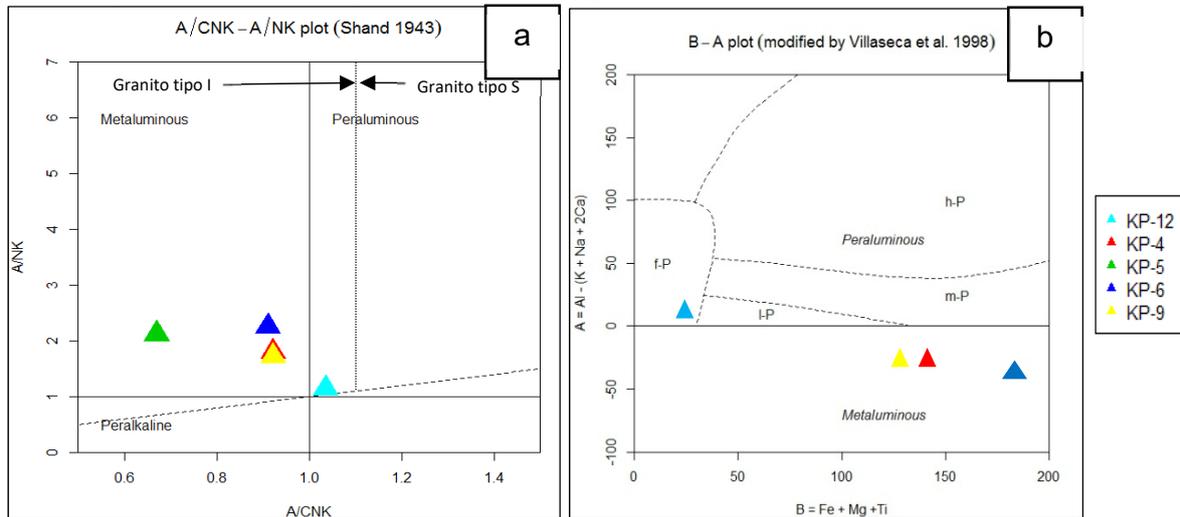
Shand (1943) propuso una clasificación química, balanceando paralelamente el contenido de sílice y alúmina, que le permitió desarrollar el concepto de saturación. En el diagrama de A/CNK- A/NK (figura 20) se observa la clasificación según el grado de saturación alúmina, en donde se observan las cinco muestras distribuidas en dos campos: metaluminoso y peraluminoso.

Las muestras se encuentran dentro del campo metaluminoso por lo que indican, según Loiselle y Wones 1979, que pertenecen a un granitoide tipo-I cordillerano, representados por la asociación de gabros-dioritas cuarzosas y tonalitas de bordes continentales activos.

En el diagrama B-A discriminó las rocas por su grado de saturación de álcalis (modificado por Villaneca 1983), la mayoría de las muestras se encuentran localizadas en el campo de *Metaluminous*, esto indica que tienen mayor concentración de Ca, Na y K (alcalinotérreos) a comparación de Al, ya que el K, Ca y Na se alojan preferentemente en los anfíboles, olivino y plagioclasas, así como el Fe, Mg y Ti también se alojan en óxidos y anfíboles. La muestra KP-12 se encuentra en el campo f-P, pertenece al grupo de peraluminoso que es altamente félsico, por lo indica que carece de Fe, Mg, y Ti.

FIGURA 20 CLASIFICACIÓN DE ROCAS GRANÍTICAS

a. Diagrama A/CNK-A/NK (Shand 1943), b. Diagrama B-A (Modificado por Villaneca 1983).



Fuente: Investigación de campo. 2016.

3.2.2 Elementos trazas

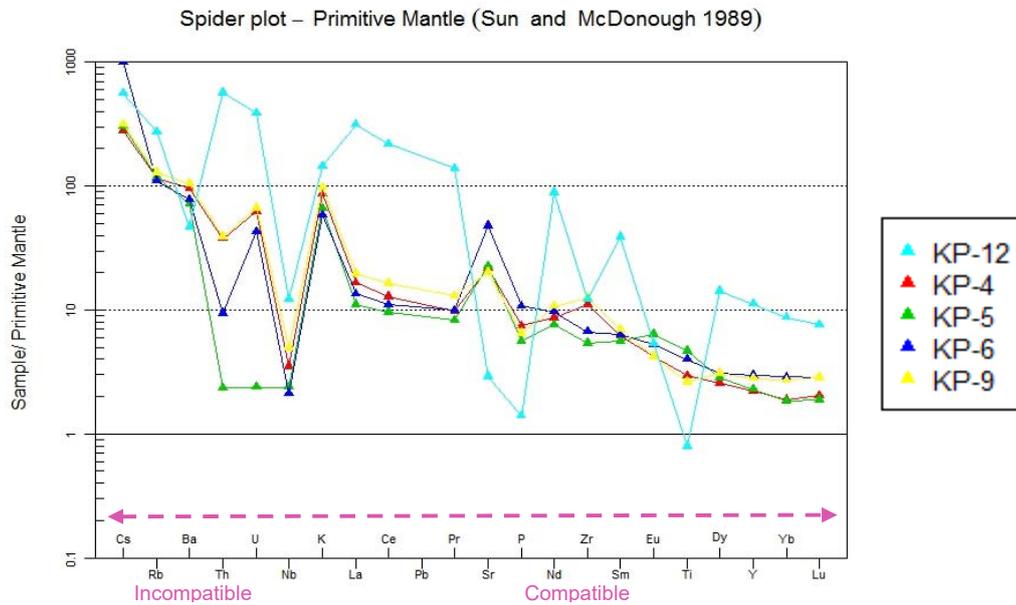
Los elementos trazas son clasificados en base a su comportamiento químico, ya que son incorporados en las diferentes fases y son muy sensibles a los procesos de fraccionamiento.

Los elementos trazas según Tosselli (2010), pueden ser incompatibles y compatibles. Los incompatibles se concentran más en el fundido que en el sólido. Mientras que los compatibles se concentran en el sólido, esto depende de los minerales involucrados, que comúnmente se ajustan a los minerales del manto (olivino, piroxenos y granate). A los elementos mayores Fe y Mg se les considera compatibles, mientras que K y Na serían incompatibles.

Los elementos trazas incompatibles son subdivididos en dos subgrupos según la relación de valencia a radio iónico. Los más pequeños y con mayor carga *High field strenght* (HFS), incluyen a las tierras raras, Th, U, Ce, Pb⁴⁺, Zr, Hf, Ti, Nb y Ta. Los de baja carga *large ion lithophile* (LIL) que incluye a: K, Rb, Cs, Ba, Pb²⁺, Sr, Eu²⁺, son considerados más móviles, particularmente en presencia de fases fluidas.

En la figura 21 se observa el comportamiento de los elementos trazas de todas las muestras, en las que algunas coinciden en las anomalías negativas y positivas de algunos elementos.

FIGURA 21
DIAGRAMA DE ELEMENTOS TRAZAS
NORMALIZADOS AL MANTO PRIMITIVO



Fuente: Investigación de campo 2016

Las muestras KP-4, KP-9, KP-6 y KP-5 tienen anomalías negativas en los elementos Th, según Rollinson (1996) indica la interacción con corteza continental durante los procesos magmáticos y Nb que es típico en el magmatismo de zona de subducción. También presentan anomalías positivas en el elemento de K; se puede explicar a partir de la evolución de los magmas en la corteza por su grado de incompatibilidad al igual que el Sr lo que permite deducir que el magma que le dio origen a la roca tuvo un aporte de la corteza y por lo cual ha sido muy diferenciada.

La muestra KP-12 tiene un comportamiento muy variante a comparación de las otras muestras, tienen niveles bajos en los elementos Nb, P y Ti, lo que se puede interpretar como la ocurrencia de fraccionamiento de los minerales como titanita y apatito y también

la ausencia de minerales máficos; además de ser un indicativo que el magma se formó en una zona de subducción, contiene anomalías positivas en los elementos Th y U por la composición de la región fuente y por los procesos de fraccionamiento mineral, durante la evolución magmática. Según Green (1989) un decaimiento (anomalía negativa) en la concentración del Sr indica la remoción de una serie relacionada a los magmas, la que es incompatible bajo condiciones del manto, pero en ausencia de los feldespatos.

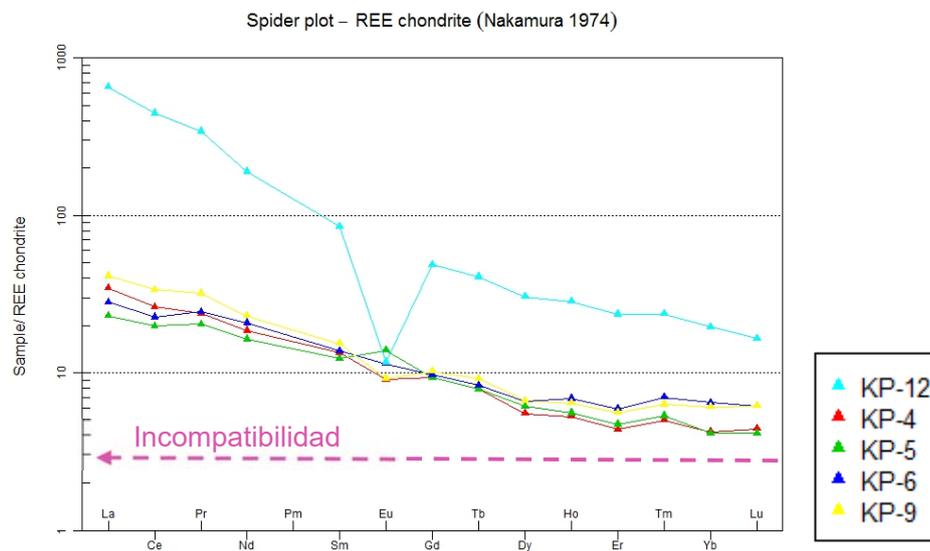
Rollinson (1993) señala que las tierras raras (*REE*) en una roca ígnea están controladas principalmente por la química original de su fuente y por el equilibrio entre las fases cristal - magma que tiene lugar durante su evolución. Las tierras raras, se distinguen como parte de la concentración del manto; pueden ser ligeras (*LREE*), son las más compatibles con la corteza y están presentes en feldespatos, biotitas y apatito, las pesadas (*HREE*) principalmente en piroxenos, anfíboles y granates.

En el diagrama de *REE* (figura 22) normalizadas con los valores de condritas (Nakamura 1974) se observan las muestras KP-4, KP-9 y KP-6 que tienden a presentar una pendiente negativa en los elementos pertenecientes al grupo *LREE* (tierras raras ligeras), también presenta una anomalía negativa más pronunciada en el elemento Eu, lo cual indica el fraccionamiento de las plagioclasas.

Mientras que los elementos del grupo de *HREE* (tierras raras pesadas) se encuentran con valores constantes. La muestra KP-5 presenta anomalías, positivas en Eu y negativas en Ce; German 1999 y Chen 2006 sugieren una influencia de fluidos hidrotermales en la formación.

La muestra KP-12 tienen un comportamiento que evidencia una pendiente negativa en las tierras raras ligeras, lo que probablemente sea evidencia del aporte de corteza, en la que existe una anomalía del Eu, probablemente se debe al fraccionamiento de plagioclasas, ya que el Eu_{2+} tiende a remplazar más al calcio en este tipo de feldespatos (anomalía del Eu); las tierras medias (*MREE*) y tierras pesadas (*HREE*) son menos regulares en su comportamiento.

FIGURA 22
REE (TIERRAS RARAS) NORMALIZADO A CONDRITO



Fuente: Investigación de campo. 2016

3.3 Discusión de resultados

3.3.1 Diorita (Td)

En el análisis microscópico, se identificaron minerales esenciales: plagioclasas (PI) 56 %, las cuales presentan una leve zonación, con presencia de ceritización. Las plagioclasas se clasificaron, por el ángulo de extinción como labradorita y andesina. Según las características que presentan las caras de las

plagioclasas, las cuales predominan con más del 50 % del contenido, establecen una secuencia de cristalización temprana, se encuentra en la última etapa de cristalización de la primera fase de cristalización, también se puede observar la matriz de Qz rellenando la sección; y se observan amorfos o de manera intersticial los anfíboles y la biotita.

Cuarzo (Qz) 14 % se observó de tamaño medio - grande, algunos ángulos de extinción ondulante y con una textura poiquilítica, que refleja la diferencia de densidad y velocidad de crecimiento o distintos momentos de nucleación.

La presencia de mirmequita se caracteriza por el intercrecimiento de cuerpos pequeños de cuarzo y plagioclasa en forma de gusano, encerrados en Kfp (fotografía 8, d). Como se muestra en los diagramas de clasificación geoquímica, esta unidad se encuentra en los límites de los gráficos entre granito y monzogranito, lo cual explica por qué la diorita se localiza en el margen del proceso de cristalización.

3.3.2 Granodiorita (Tg)

En esta unidad Tg se identificaron minerales esenciales: cuarzo (Qz) 28 %, plagioclasas (Plg) 32 %, éstas se clasificaron según su ángulo de extinción como: labradorita y andesina, con su típico maclado polisintético; los anfíboles (Amp) 15 % presentan alteración (cloritización) en donde se observan colores de tercer orden de birrefringencia, el alargamiento que presenta, indica que pertenecen a una fase más pausada en la roca plutónica.

Biotita (Bt) 5 % se encuentra asociada íntimamente con los anfíboles en forma de cúmulos, dentro de la biotita se observaron pequeños circones; los feldespatos (Kfsp) 15 % presenta una simetría monoclínica y coloración de primer orden, lo que indica un proceso de enfriamiento lento de la consolidación del magma formando una desmezcla, justificó su formación como la etapa pausada de cristalización de los oikocristales, que pudieron formarse posteriormente. Clinopiroxenos (Cpx) 1 %, opacos 3 %, circón (Zrn) 0,5 % y esfena (Sph) 0,5 %.

Según el análisis petrográfico, los cristales euhedrales son de mayor antigüedad, puede establecerse que las plagioclasas son minerales tempranos debido a que tienen un desarrollo de las aristas y caras relativamente bien desarrolladas (fotografía 3, a), a partir de esto se puede definir que los minerales que se desarrollaron en el último proceso dentro de la secuencia son: los anfíboles y el cuarzo, ya que estos crecen de una forma libre dentro del líquido residual que cristaliza en el magma. Por lo tanto, la granodiorita (Tg) pertenece a una fase de cristalización dentro de la secuencia más pausada.

3.3.3 Granito rico en cuarzo (Tgr)

Microscópicamente se observaron minerales como: plagioclasa (Plg) 18 % clasificada por su ángulo de extinción en andesina, esta presenta inclusiones de cuarzo. Feldespato (Kfps) 20 % con inclusiones de mimerquita, anfíboles (Amp) 5 % con presencia de cloritización, cuarzo (Qz) 50 %, regularmente presenta extinción ondulante en los fenocristales medios y minerales opacos 3 %. La presencia de mimerquita se caracteriza por la forma típica de intercrecimiento en forma de gusano encerrando en Kfps.

Presenta inclusiones antipertíticas, el feldespato cristaliza en una masa predominante de albita, con una coloración leucática. La textura mirmequita que es muy común en los intrusivos, es el contacto entre Pl y Kfp. Con presencia de zonaciones y extinción ondulante en las Pl y Qz.

Las plagioclasas presentan aristas bien definidas, las cuales pertenecen a una secuencia de cristalización temprana, posterior a ello la biotita cristaliza de manera que llegó a formarse con un hábito subhedral.

En los diagramas de variación de Harker, para los elementos mayores de las muestras analizadas vs. SiO_2 en porcentaje en peso (figura 13), generalmente presenta un patrón negativo en los óxidos, los cuales tienen relación con el proceso de cristalización fraccionada. López Ruiz (1990), menciona que la secuencia de cristalización fraccionada es cuando los minerales y el líquido residual se separan, los elementos se disminuyen de los minerales que se han formado y aumentan en otros que no han entrado en dichos minerales; al generar líquidos residuales estos son empobrecidos en MgO, CaO y FeO y enriquecidos en SiO_2 . La variedad de rocas que se originan tendrán una composición más variada a la del magma primario, tomando en cuenta esta secuencia en rocas de las series calcoalcalina, asociadas a la zona de subducción a las cuales pertenece las rocas analizadas.

En la figura 16 normalizada con respecto al manto primitivo (*Sun and McDonough* 1989), la mayoría de las muestras tienen anomalías negativas en los elementos Torio (Th), Rollinson (1996) indica interacción con la corteza continental durante los procesos

magmáticos, y Niobio (Nb) que es típico en el magmatismo de zona de subducción.

También presentan anomalías positivas en el elemento de Potasio (K); se puede explicar a partir de la evolución de los magmas en la corteza por su grado de incompatibilidad al igual que el Estroncio (Sr) lo que permite deducir que el magma que le dio origen a la roca tuvo un aporte de la corteza, la cual ha sido muy diferenciada.

El contenido de las anomalías positivas en los elementos Th y Uranio (U), se debe a la composición de la región fuente y por los procesos de fraccionamiento mineral, durante la evolución magmática.

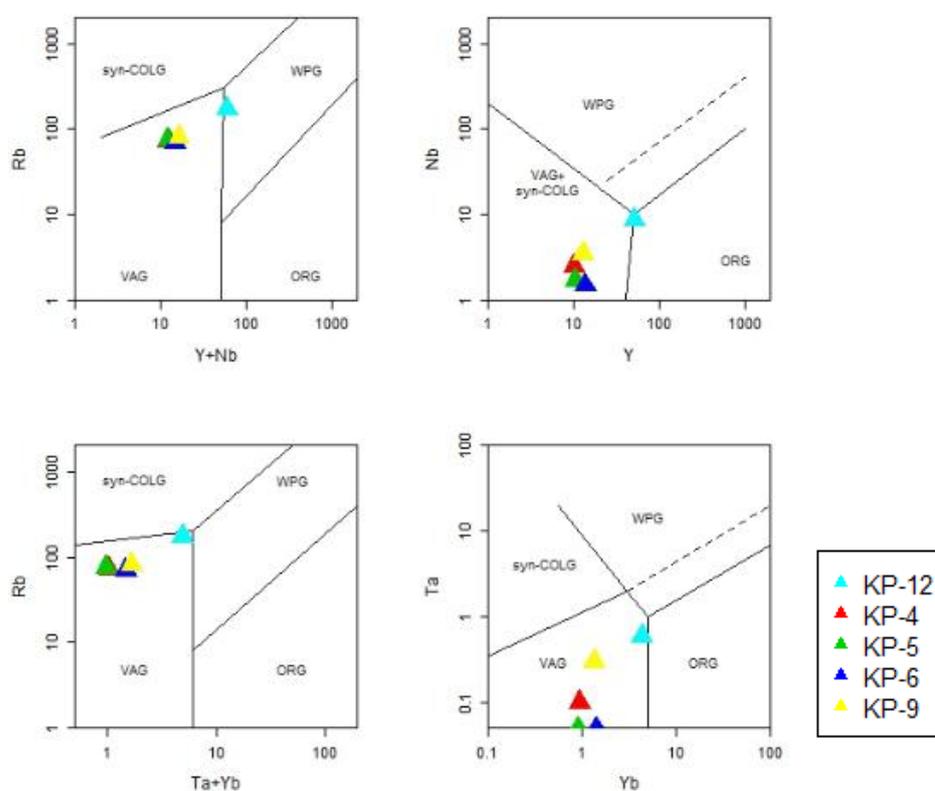
El comportamiento de la muestra K-12, es diferente a comparación de las demás; presenta anomalías negativas en los elementos Nb, P y Ti ya que esto refiere a fraccionamiento de minerales, así también anomalías positivas en el Th y U los cuales están relacionados con la composición de la región fuente durante la evolución magmática. El comportamiento diferente que presenta esta muestra, está relacionada a que carece de minerales máficos y con más aporte de corteza continental.

Según el diagrama de Discriminación tectónica de granito, de Pearce *Et. Al.* 1984 (figura 23), generalmente usa elementos de tierras raras, para realizar la clasificación en los campos: VAG (Arco Volcánico), WPG (Adelgazamiento de la placa), ORG (Orogénico), *Syn-COLD* (sin colisión); generalmente las muestras se encuentran dentro del campo VAG, lo que indica que el área se encuentra dentro de una zona de placas con movimiento convergente; la muestra KP-

12 presenta un comportamiento diferente, ya que se encuentra dentro del límite, generalmente con los campos *WPG* y *ORG*, lo que indica que se formó dentro de una zona de adelgazamiento de la placa por su alto contenido de sílice que contiene esta muestra.

FIGURA 23 DIAGRAMA DE DISCRIMINACIÓN TECTÓNICA DEL GRANITO

Granite tectonic discrimination – Pearce et al. (1984)

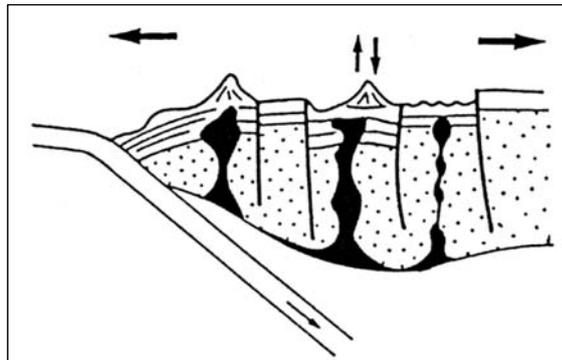


Fuente: Investigación de campo. 2016

El ambiente al cual pertenece esta asociación de granitoides es un granito tipo I de origen mixto, según Barbarin 1996, indica que es una mezcla de magmas, principalmente en la fusión de la cuña del manto; este cuerpo intrusivo pertenece a un intrusivo calcoalcalino con un magma mixto, compuesto por manto y corteza.

Según Wilson 1966, este granitoide se encuentra en un movimiento de placas que producen convergencias de dos litosferas (figura 24), en las que generalmente forman plutones superficialmente. La zonación de los minerales está relacionada con el cambio químico, por el aumento del elemento K y la disminución Nd indica el engrosamiento de la corteza y la participación de más materiales en génesis de los granitoides calcoalcalinos, la interacción química entre el magma y la corteza produce una cámara magmática; estos tienden a tener una mayor afinidad con el SiO_2 , en donde se encuentran atrapados en la interfaz entre el manto superior y la corteza durante el periodo de compresión.

FIGURA 24 MOVIMIENTO CONVERGENTE DE PLACAS



Fuente: B. BarbarinrLithos. 2016.

El intrusivo tipo I, está relacionado con la actividad que se encuentra en la caldera de Atitlán, Newhall (1986) menciona que las rocas plutónicas que afloran al oeste, sur y sureste del lago de Atitlán; por lo general pertenecen a cuarzo diorita, granodiorita, cuarzo monzonita, leucogranito entre otras. Los afloramientos de los intrusivos, que se encuentran en la bahía de Santiago los describe como acontecimientos similares a los afloramientos que se encuentran en los ríos Nahualate y Madre Vieja, estos se encuentran

cerca del área de estudio, el *stock* estudiado denominado San Juan Bautista, puede corresponder al primer evento de la caldera Atitlán.

L. Núñez Álvarez, V. Martínez Cobo (2011) mencionan que el primer evento de la caldera que está formada por magmas basálticos (que poseen una menor viscosidad y por lo tanto son más fluidos) ascendió a través de fracturas, salieron así al exterior y formaron coladas de lava, dando origen a los estratovolcanes San Pedro, Atitlán y Tolimán.

Mientras los magmas basálticos son diferenciados, el material silícico se fundió en la corteza continental progresivamente. En algunos casos este magma ácido no fue expulsado y se solidificó en interior de la corteza dando lugar a plutones superficiales graníticos. Se han caracterizado estos intrusivos de grano fino a grueso en los sedimentos volcánicos terciarios del oeste, sur y sureste del lago (San Pablo La Laguna, San Juan La Laguna, San Pedro La Laguna, Santiago Atitlán y San Lucas Tolimán; aunque éstos últimos se encuentran fuera de la cuenca). La edad de estas rocas plutónicas es incierta, aunque la hipótesis de mayor peso es que son del mioceno.

CONCLUSIONES

- a)** Se analizaron ocho secciones delgadas petrográficamente, de las que se identificaron las unidades, Diorita (Td) (KP-4), Granodiorita (Tg) (KP-2 y KP-9), Enclaves (KP-5), Granito Rico en Cuarzo (Tgr) (KP-11 y KP-12), Dique de Gabroíco (Tdg) (KP-6) y Toba Cristalina (Tcr) (KP-8).

Geoquímicamente se analizaron cinco muestras, las que se clasificaron en: Diorita (Td) (KP-4), Granodiorita (Tg) (KP-9), Enclave (KP-5), Granito Rico en Cuarzo (Tgr) (KP-11 y KP-12) y Dique Gabrodiorítico (Tdg) (KP-6).

- b)** La Unidad de Diorita (Td) está compuesta por Plg, Qz, Amp, Bt, Kfps y Cpx, minerales accesorios: opacos; la Unidad de Granodiorita (Tg) posee: Plg, Qz, Amp, Bt, Kfps y Cpx, minerales accesorios: opacos, Zrn, Sph; la Unidad Granito Rico en Cuarzo (Tgr) está compuesta por Plg, Qz, Amp y Kfps, minerales accesorios: opacos y la Subunidad de Dique de Gabro (Tdg) posee Plg, Amp, Bt, Qz, Kfps y opacos.

- c)** Según los elementos mayores el intrusivo se clasificó en Diorita (Td), Granodiorita (Tg) y Granito (Tgr) ya que contiene SiO_2 entre el rango de 51 % a 75 % por lo que se clasificó dentro de la serie alta calcoalcalina. El ambiente al cual pertenece esta asociación de granitoides, es un granito tipo I de origen mixto, es una mezcla de magmas, principalmente en la fusión de la cuña del manto; compuesto por manto y corteza, asociado a una zona de subducción.

- d) Anomalías negativas en los elementos traza con el Th, indica interacción con corteza continental durante los procesos magmáticos y Nb se refiere al magmatismo de zona de subducción. También presentan anomalías positivas en el elemento K que representa la evolución de los magmas en la corteza por su grado de incompatibilidad al igual que el Sr lo que permite deducir que el magma que le dio origen a la roca con mayor aporte a la corteza la cual ha sido diferenciada.

Los intrusivos son de naturaleza metaluminosa, clasificándose como una serie de rocas como: Diorita (Td), Granodiorita (Tg) y Granito (Tgr).

El intrusivo pertenece a una secuencia de cristalización fraccionada, que se da cuando los minerales y el líquido residual se separan, los elementos se disminuyen de los minerales que se han formado y aumentan en otros que no han entrado en dichos minerales; al generar líquidos residuales estos son empobrecidos en MgO, CaO y FeO y enriquecidos en SiO₂

- e) El *stock* de San Juan Bautista, está relacionado con la actividad magmática que Newhall (1986) localiza al oeste, sur y sureste del Lago Atitlán; siendo estas rocas plutónicas compuestas de Cuarzo Diorita, Granodiorita, Cuarzo Monzonita, Leucogranito y otras.

Clasificado como un intrusivo tipo I, lo que refiere a una zona de movimiento convergente, así también por la clasificación petrográfica del granitoide, este corresponde al primer evento de la caldera Atitlán.

RECOMENDACIONES

- a) Al referirse a este cuerpo intrusivo que aflora en el noroeste del municipio de San Juan Bautista, departamento de Suchitepéquez, sea nombrado como *Stock* San Juan Bautista, ya que hasta ahora fue su mineralogía y geoquímica.
- b) Realizar datación radiométrica para establecer la edad del *Stock* San Juan Bautista.
- c) Analizar las zonaciones de las plagioclasas y cuarzo con un microscopio de barrido para obtener las variaciones composicionales del magma al momento de la cristalización.
- d) Realizar una comparación de los cuerpos intrusivos que afloran en las cercanías de la Caldera de Atitlán, por medio de sus características geoquímicas y geocronología, para complementar la información de los eventos que ha presentado la caldera anteriormente mencionada.
- e) Comparar los cuerpos intrusivos del occidente de Guatemala con los cuerpos intrusivos del sureste de México, para determinar si existe alguna relación geoquímica, geocronológica y tectónica.

BIBLIOGRAFÍA

- Barbarin, Bernard. "A review of the relationships between granitoid types, their origins and their geodynamic environments". *Lithos Journal*. 46. (1999): 605-626.
- Barros, Haydn. Et.Al. *Espectrometría de masas con plasma inductivamente acoplado*. <http://www.bvsde.paho.org/texcom/cd045364/MCEcap7.pdf> (13 de agosto de 2015).
- Bellos, L.I. Et.Al. "Caracterización petrográfica y geoquímica y condiciones de deformación del plutón San Cristóbal, Sierra de Velasco, La Rioja, Argentina", *Estudios geológicos Argentina*. 66. (Julio-2010):157-169.
- Castro Dorado, Antonio. *Petrografía de rocas ígneas y metamórficas*. España: Paraninfo, 2015.
- Concepto de saturación*. http://www.insugeo.org.ar/libros/misc_18/02.htm. (13 de septiembre de 2015).
- Definición Maclas*. http://www.insugeo.org.ar/libros/misc_18/09.htm (20 enero de 2016).
- Duque, José. *Geocronología (U/Pb y 40Ar/39Ar) y geoquímica de los intrusivos Paleógenos de la Sierra Nevada de Santa Marta y sus relaciones con la tectónica del Caribe y el arco magmático circuncaribeño*. Tesis Maestría en Ciencias de la Tierra. Universidad Autónoma de México. México: Facultad de Ciencias de la Tierra, 2009.
- Elementos mayores y trazas*. http://www.insugeo.org.ar/libros/misc_18/08.html (16 de agosto de 2015).
- Espectrometría*. <http://www.ubu.es/es/pct/servicios-cientificotecnicos/espectrometria/espectrometria-masas-plasma-icp-ms> (25 de agosto de 2015).
- Instituto Geográfico Militar –IGM-. *Mapa geológico Guatemala*. (ND15-8). Guatemala. Instituto Geográfico Militar. 1984. Escala 1:250 000 color.
- Irvine, T. N. "A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks". *Canadian Journal of Earth Sciences*. 8. (1971). 523–48.



- Jerram, Dougal y Nick Petford. *The field description of igneous rocks*. United States of America: Waley-Blackwell, 2011.
- Llambías, Eduardo. *Geología de los cuerpos ígneos*. Argentina: Instituto Superior de Correlación Geológica, 2001.
- Man, Paul. Et. Al. *Geologic and Tectonic Development of the Caribbean Plate Boundary in Northern Central America*. United States of America: The Geological society of America, 2007.
- Middlemost, E. A. K. "Naming materials in magma/igneous rock system". *Earth Science Review*. 37. (1994). 215-224.
- Milián, Ricardo. *Petrografía, geoquímica y geocronología del Stock ubicado en los alrededores de la Aldea Matanzas, Municipio de San Jerónimo, Baja Verapaz, Guatemala*. Tesis Ingeniero Geólogo. Centro Universitario del Norte- Universidad de San Carlos de Guatemala. Cobán Alta Verapaz, Guatemala: Carrera de Geología, 2013.
- Nakamura, N. "Determination of REE, Ba, Fe, Mg, Na and K in carbonaceous and ordinary chondrites". *Geochimical et Cosmochimica*. 38 (1974).757-775.
- Newhall, Christopher G. *Geology of the Lake Atitlán region, western Guatemala*. Hanover, Germany: Dartmouth College, 1986.
- Núñez, L. y V., Martínez. *Informe complementario de la cartografía geológica y geomorfológica (1: 25,000) de la cuenca del Lago Atitlán (Guatemala)*. Guatemala: Vivamos Mejor Guatemala, 2012.
- O'Connor, J. "A classification for quartz-rich igneous rocks based on feldspar ratios". *US Geological Survey*. 4 (Agosto-1965). B79-B84.
- Origen y ambiente tectónico*, http://www.insugeo.org.ar/libros/misc_18/11.htm (13 de agosto de 2015).
- Percillo, R. "Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, North Turkey". *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 58 (1976): 63-81.
- Petrografía*. <http://bernietic.blogspot.com/2007/11/petrografia.html> (20 de septiembre de 2015).
- Pitcher, W. *Granite type and tectonic environment*. London, England: Academic Press, 1983.



- Roche, H. de la. Et. Al. "A clasification of volcanic and plutonic rocks using R1-R2. Diagramas and major elements analysis – its relationships whit current nomenclature". *Chemical Geology Journal*. 29. 1-4. (1980). 183-210.
- Rollinson, Hugh. *Using geochemical data: evaluation, presentation, interpretation*. United State of America: Longman Scientific & Technical Series Geochemistry, 1993.
- Rose, W. "Geochemistry of the Los Chocoyos Ash, Quetzaltenango Valley, Guatemala". *Geological Society American*. 180. (1979). 87-89.
- Et.Al. *Quaternary silicic pyroclastic deposits of Atilán caldera, Guatemala*. Michigan, Unites State of America: Department of Geology an Geological Engineering, Michigan Technological University, Houghton. 1987.
- Saturación Alúmina*, <http://www.insugeo.org.ar/libros/misc18/02.html> (25 de septiembre 2015).
- Shand, S.J. *Eruptive rocks: their genesis, composition, classification, and their relation to ore deposits, with a chapter on meteorites*. London, England: T. Murby, New York, J. Wiley, 1943.
- *The eruptives rocks*. New York, United State of America: John Wiley and Sons, 1947.
- Streckeisen, A. "A chemical approximation to the modal QAPF classification of the igneous rocks: Neues Jahrbuch fuer Mineralogie". *Mineralogy and petrology*. 176. (Marzo-1979): 169-206.
- Thomas, Robert. *A beginner's guide to ICP-MS. Part I. Spectroscopy*. Iselin, New Jersey. United States of America: Marcel Dekker, 2001.
- Toselli, Alejandro. *Elementos básicos de petrología ígnea*. Argentina: Instituto Superior de Correlación Geológica, 2010.
- Villaseca, Carlos. Et.Al. "A re-examination of the typology of peraluminous granite types in intracontinental orogenic belts". *Transactions of the Royal Society of Edinburgh. Earth Sciences*. 89 (junio-1998): 113-119.
- Winter, Ohn D. *An introduction to Igneous and Metamorphic Petrology*. River, New Jersey. United State of America: Department of Geology Whitman College, 2001.





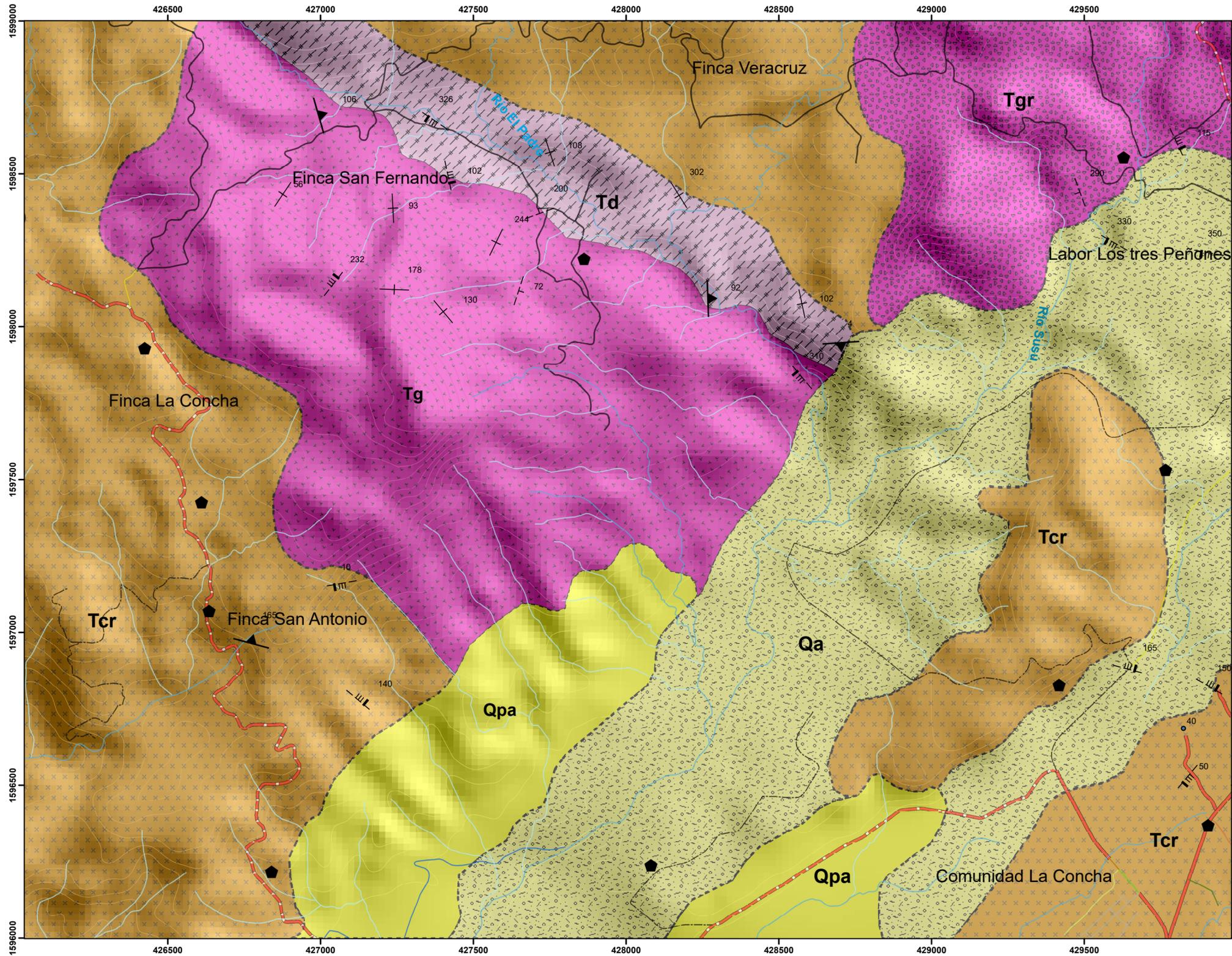
V.ºB.º
[Handwritten signature]

Adán García Véliz
Licenciado en Pedagogía e Investigación Educativa
Bibliotecario



ANEXOS

MAPA GEOLÓGICO



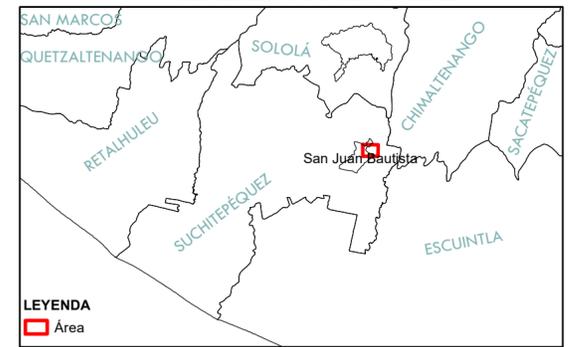
LEYENDA

- Aluvi3n (Qa)
- Ceniza (Qpa)
- Toba Cristalina (Tcr)
- Granito Rico en Cuarzo (Tgr)
- Granodiorita (Tg)
- Diorita (Td)

SIMBOLOGÍA

- Contacto discordante
- Contacto concordante
- Fractura
- Foliaci3n
- Dique
- Falla Inversa
- R3o
- Quebradas
- Poblaciones
- Ruta Nacional 13
- Ruta Nacional 11
- Terracer3a
- Veredas
- Curvas de 20 mts.

REFERENCIA REGIONAL



1:10,000

	UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA CENTRO UNIVERSITARIO DEL NORTE		
	ÁNALISIS PETROGRÁFICO Y GEOQUÍMICO DEL CUERPO GRANÍTICO QUE AFLORA AL NOROESTE DEL MUNICIPIO DE SAN JUAN BAUTISTA DEL DEPARTAMENTO DE SUCHITEPÉQUEZ		
CONTIENE:	MAPA GEOLÓGICO		
REALIZADO POR:	KAREN INES PAU YAT		
CARNÉ:	200943144		
ESCALA: 1: 10 000	ASESOR: Ing. Osmín Vásquez	FECHA: Enero 2018	ANEXO I

ANEXO III
RESULTADOS GEOQUÍMICA DE ELEMENTOS TRAZA Y MAYORES

Muestra	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂
KP-4	62,1564268	17,1281326	5,7497979	2,43532741	4,97170574	4,09256265	2,5869038	0,63662086
KP-5	51,0738392	15,3201064	9,62364492	8,97934138	8,60094089	3,08856617	1,98404582	1,01247699
KP-6	56,7158109	18,901881	7,45297407	3,22318251	6,80223691	3,94509405	1,74885613	0,86426029
KP-9	64,3486183	16,1959713	5,21307825	2,24719101	4,48425954	3,79593076	2,92539731	0,56685899
KP-12	75,8310599	13,1049813	1,53581894	0,16166515	0,63655653	4,13256542	4,33464686	0,17176922

Muestra	P ₂ O ₅	MnO	Cr ₂ O ₃	Ni	Sc	LOI	Sum	Ba	Be
KP-4	0,16168149	0,08084074	0,022	<20	11	0.8	99,79	672	<1
KP-5	0,12272448	0,19431377	0,099	177	24	1.8	99,66	501	<1
KP-6	0,23385867	0,11184545	0,014	<20	12	1.3	99,70	542	<1
KP-9	0,14171475	0,08097986	0,029	<20	10	1.0	99,78	731	<1
KP-12	0,03031222	0,06062443	0,041	<20	3	0.8	99,83	328	2

Muestra	Co	Cs	Ga	Hf	Nb	Rb	Sn	Sr	Ta	Th
KP-4	15,1	2,2	17,1	3,6	2,5	72,9	<1	458,3	0,1	3,2
KP-5	41,0	2,4	18,0	1,7	1,7	74,8	<1	478,2	<0,1	0,2
KP-6	16,2	7,9	21,7	2,0	1,5	69,5	2	1011,5	<0,1	0,8
KP-9	14,8	2,5	16,9	4,0	3,5	81,6	<1	426,4	0,3	3,3
KP-12	1,1	4,4	16,4	4,9	8,7	173,0	2	61,5	0,6	48,0

Muestra	U	V	W	Zr	Y	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu
KP-4	1,3	120	<0,5	124,4	10,0	11,4	22,7	2,68	11,7	2,74	0,70
KP-5	<0,1	243	<0,5	60,2	10,4	7,6	17,1	2,28	10,3	2,50	1,07
KP-6	0,9	247	1,5	74,7	13,5	9,3	19,5	2,73	13,1	2,79	0,88
KP-9	1,4	110	<0,5	140,0	12,8	13,6	29,2	3,59	14,5	3,11	0,71
KP-12	8,1	9	0,8	135,6	50,8	215,5	384,9	38,24	119,7	17,22	0,90

Muestra	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
KP-4	2,56	0,37	1,89	0,37	0,98	0,15	0,93	0,15
KP-5	2,56	0,37	2,10	0,39	1,06	0,16	0,91	0,14
KP-6	2,67	0,39	2,27	0,48	1,33	0,21	1,42	0,21
KP-9	2,82	0,43	2,28	0,45	1,26	0,19	1,34	0,21
KP-12	13,36	1,91	10,44	1,99	5,30	0,71	4,29	0,56

**USAC
CUNOR**

Universidad de San Carlos de Guatemala
Centro Universitario del Norte



No. 057-2018

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 PETROGRÁFICO Y GEOQUÍMICO DEL CUERPO GRANÍTICO QUE
AFLORA AL NORESTE DEL MUNICIPIO DE SAN JUAN BAUTISTA DEL
DEPARTAMENTO DE SUCHITEPEQUEZ**

Presentado por el (la) estudiante:

KAREN INÉS PAAU YAT

Autoriza el

IMPRIMASE



Cobán, Alta Verapaz 08 de Febrero de 2018.

Lic. Erwin Gonzalo Eskensy Morales
DIRECTOR