

**CARACTERIZACIÓN PETROGRÁFICA, GEOQUÍMICA y GEOCRONOLÓGICA  
EN ROCAS ÍGNEAS INTRUSIVAS DE LA CUENCA CAUCA-PATÍA (CCP),  
DEPARTAMENTO DEL CAUCA, COLOMBIA**

**Edith Katherine Jerez Heredia  
Geóloga**

**Universidad EAFIT  
Escuela de Ingeniería  
Departamento de Geología  
Maestría en Ciencias de la Tierra  
2012**

**CARACTERIZACIÓN PETROGRÁFICA, GEOQUÍMICA y GEOCRONOLÓGICA  
EN ROCAS ÍGNEAS INTRUSIVAS DE LA CUENCA CAUCA-PATÍA (CCP),  
DEPARTAMENTO DEL CAUCA, COLOMBIA**

**EDITH KATHERINE JEREZ HEREDIA**  
**Geóloga**

**Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de  
Magíster en Ciencias de la Tierra**

**Asesor: GLORIA ELENA TORO VILLEGAS**  
**Ing. Geóloga PhD. en Tefrocronología**

**MEDELLÍN**  
**UNIVERSIDAD EAFIT**  
**MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA TIERRA**  
**2012**

**Nota de Aceptación**

---

---

**Presidente del Jurado**

---

**Jurado**

---

**Jurado**

---

**Medellín, 26 de Julio de 2012**

*Dedicado a:  
Dios,  
La Virgen María  
y mis ángeles*

*Ana Beatriz Heredia  
Zulma Johanna Jerez  
Manuel Fernando Roa*



## **AGRADECIMIENTOS**

A la planta docente de la U. EAFIT, Departamento de Geología, en especial a la Dra. Gloria Elena Toro Villegas por compartir su conocimiento y dirigir éste trabajo.

A INGEOMINAS, por su financiamiento y directrices. A los geólogos de la seccional Popayán: Bernardo Pulgarín, María Luisa Monsalve, Adriana Agudelo por sus aportes como colegas y maestros, y un agradecimiento muy especial a la Dra. Marta Calvache.

A La ANH por su apoyo al laboratorio de termocronología donde se realizaron todas las separaciones minerales y análisis petrográficos del proyecto.

A mis compañeros de trabajo y estudio: Sandra López, Laura Téllez, Eliana Cañola, Patricia Torres, José Duque, Harold Albarracín, María Isabel Marín, Andrés Sandoval, María Acevedo y Wilson Echavarría, por su apoyo y amistad.

A Lina Ospina, por su valiosa colaboración bibliográfica desde Francia.

A Mirna y Cande, por brindarme un hogar y una familia en Medellín.

A Mami, Johita y Manuel por su apoyo incondicional, de todo tipo y en cantidades enormes.

## CONTENIDO

Resumen

Abstract

1. INTRODUCCION .....	2
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	2
1.2 OBJETIVOS .....	3
1.2.1 Objetivo General .....	3
1.2.2 Objetivos específicos .....	3
1.3 LOCALIZACIÓN.....	4
1.4 METODOLOGÍA.....	7
1.5 CONTEXTO GENERAL Y LIMITACIONES .....	11
2. GEOLOGÍA.....	13
2.1 UNIDADES LITOLÓGICAS .....	13
2.2. ESTRUCTURAS.....	18
2.3 EVOLUCIÓN DEL SUROCCIDENTE COLOMBIANO.....	20
2.4 CARACTERÍSTICAS DEL PLUTONISMO Y VULCANISMO EN COLOMBIA.....	26
2.5 MODELO DE GENERACIÓN DE MAGMAS .....	33
3. RESULTADOS.....	36
3.1 DESCRIPCIÓN DE LOS CUERPOS INTRUSIVOS MUESTREADOS.....	36
3.1.1 Stock El Rosario (Ngr) .....	36
3.1.2 Intrusivo La Tetilla (Ngpa) .....	38
3.1.3 Intrusivo La Yunga (Ngy) .....	39
3.1.4 Intrusivo Patico (Ngpa).....	40

3.1.5 Intrusivo Quebrada La Carpintería (Ngca) .....	41
3.1.6 Intrusivo Pusná (Ngpu) .....	42
3.1.7 Intrusivo El Encenillo (Ngen) .....	43
3.1.8 Intrusivo Oso Guaico (No).....	44
3.1.9 Intrusivo El Pantano (Ngpt) .....	46
3.1.10 Intrusivo El Tablón (Ngt) .....	46
3.1.11 Intrusivo Guachicono (Nggc).....	47
3.2. ALTERACIÓN HIDROTERMAL.....	48
3.3 GEOQUÍMICA .....	49
3.3.1 Análisis de Elementos Mayores. ....	51
3.3.2 Elementos Trazas .....	64
3.4 GEOCRONOLOGÍA .....	66
4. DISCUSIÓN.....	70
4.1 COMPARACIÓN GEOQUÍMICA ENTRE LOS CUERPOS INTRUSIVOS DEL ÁREA Y OTROS CUERPOS INTRUSIVOS MUESTREADOS EN LA CUENCA CAUCA-PATÍA .....	70
4.2 ANÁLISIS GEOCRONOLÓGICO ENTRE LOS CUERPOS INTRUSIVOS DEL ÁREA Y OTROS CUERPOS INTRUSIVOS MUESTREADOS EN LA CUENCA CAUCA-PATÍA .....	75
4.3 PRIMERA APROXIMACIÓN SOBRE LA RELACIÓN DE LAS ROCAS VOLCÁNICAS Y PLUTÓNICAS EN EL ÁREA DE ESTUDIO .....	76
5. CONCLUSIONES y RECOMENDACIONES.....	80
5.1 RECOMENDACIONES.....	84
6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	85

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localización de la cuenca estratigráfica Cauca-Patía en el occidente colombiano. Modificado de Barrero <i>et al.</i> 2007.....	5
Figura 2. Localización del área de estudio en el departamento del Cauca. Modificado de INGEOMINAS-U. EAFIT. 2007.....	6
Figura 3. Diagrama ilustrativo sobre las planchas IGAC y líneas de vuelo empleadas en el área de estudio.....	6
Figura 4. Mapa de localización de los sitios de muestreo realizados en las planchas topográficas 342-IV-A, 342-IV-C y 342-IV-D, próximas a la ciudad de Popayán.....	9
Figura 5. Mapa de localización de los sitios de muestreo realizados en las planchas topográficas 343 IIC, 365-I-A, y 365-I-C próximas al municipio de Puracé. ....	10
Figura 6. Mapa de localización de los sitios de muestreo realizados en las planchas topográficas 364-II-C, 364-IV-A, 364-IV-C, 364-IV-D, próximas al municipio de Río Blanco. ....	10
Figura 7. Basamento metamórfico en el área de estudio y su relación con los principales rasgos estructurales del occidente colombiano. Compilado y Modificado de Nivia <i>et al.</i> , 2006; Sánchez <i>et al.</i> 2007. ....	15
Figura 8. Detalle de los límites estructurales del basamento en el área de estudio. Modificado de Sánchez <i>et al.</i> 2007. ....	15



Figura 9. Fallas presentes en el área de estudio. ....	20
Figura 10. Esquema estructural de Colombia. Se observan los principales sistemas de fallas y paleosuturas relacionadas con los episodios de acreción-subducción (Modificado de Aspden, <i>et al.</i> 1987) .....	26
Figura 11. Distribución de eventos plutónicos en Colombia desde el Triásico hasta el Terciario (Modificado de Aspden, <i>et al.</i> , 1987) .....	31
Figura 12. Configuración de la margen continental activa de los Andes del Norte. Modificado de Marin-Cerón, 2007.....	34
Figura 13. Cuña subducente de la Placa Nazca bajo el SW colombiano. (Compilado y modificado de Meissner <i>et al.</i> 1976, Marín-Cerón, 2007, Droux y Delaloye, 1996, Hernández-Pardo, 2006).....	35
Figura 14. Diagrama TAS de Cox <i>et al.</i> 1979. ....	52
Figura 15. Diagrama TAS de Middlemost, 1985 para rocas plutónicas. ....	53
Figura 16. Diagrama de discriminación de series magmáticas según sus contenidos de Si <sub>2</sub> O vs K <sub>2</sub> O (Pecerillo y Taylor, 1976).....	54
Figura 17. En la parte superior, Índice de saturación de Alúmina A/CNK vs A/NK según Shand, 1943 y en la parte inferior, diagrama B-A de Debon y Le Fort, 1983. I, II, III, dominio peraluminoso y IV, V, VI dominio metaluminoso. ....	56
Figura 18. Gráfica A-B de Debon y Le Fort, modificada por Villaseca, <i>et al.</i> 1998. I-P baja peraluminosidad, m-P moderada peraluminosidad y hF alta peraluminosidad.....	57

Figura 19. Diagrama de SiO <sub>2</sub> vs A/CNK de Chapell y White, 1974. La línea constante Y: 1.1 determina sobre ella los granitos tipo S y debajo los tipo I. ....	58
Figura 20. Diagrama FeO/FeO+MgO vs SiO <sub>2</sub> para rocas graníticas según Frost et al., 2001, en intrusivos muestreados. ....	59
Figura 21. Índice MALI Frost, et al. 2001. ....	60
Figura 22. Clasificación según el tipo de graniotoide cordillerano, leucogranito y tipo A, propuesta por Frost et al, 2001. I. Tipo cordillerano; II: Tipo Leucogranito peraluminoso; III: Tipo A. ....	61
Figura 23. Diagramas de Variación química tipo Harker. SiO <sub>2</sub> vs TiO <sub>2</sub> , Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , MgO, CaO, Na <sub>2</sub> O, K <sub>2</sub> O, P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , FeOt, en intrusivos muestreados en la Cuenca Cauca-Patía.....	63
Figura 24. Diagramas de Variación química tipo Harker. SiO <sub>2</sub> vs Rb, Sr, Ba, Zr, Ni, Co, Cr, Zn, Cu en intrusivos muestreados en la Cuenca Cauca-Patía.....	65
Figura 25. Diagrama en el que se evidencia la edad integrada (ti), la edad de meseta (tp) y la edad de isócrona (tc). Se determina como edad del intrusivo JLSW063 los valores de la edad meseta correspondiente a 5.40 ±0.09 Ma. ....	66
Figura 26. Mapa que muestra los puntos de muestreo empleados por Risnes, 1995. Nótese la ubicación de las poblaciones Popayán y Rosas. ....	68
Figura 27. Gráfica TAS de Cox et al, 1979 para rocas plutónicas muestreadas en la Cuenca Cauca-Patía.....	70

Figura 28. Gráfica Middlemost, 1985 para rocas plutónicas muestreadas en la Cuenca Cauca-Patía.....	71
Figura 29. Diagrama discriminatorio de series toleítica, calcoalcalina, y shoshonite de Peccerillo y Taylor, 1976 para cuerpos intrusivos muestreados en la Cuenca –Cauca-Patía.....	72
Figura 30. Diagrama A/CNK – A/NK de Shand 1943, para cuerpos intrusivos muestreado en la Cuenca Cauca-Patía.....	73
Figura 31. Tipo de granitoide según diagrama de Chapell y White, 1974. Sobre la línea 1.1 son graniotides tipo S (Intrusivos Santa Ana y La Playa Río-San Jorge; y bajo la línea tipo I).....	73
Figura 32. Tipo de granitoide según diagrama de Chapell y White, 1974. Sobre la línea 1.1 son graniotides tipo S (Intrusivos Santa Ana y La Playa Río-San Jorge; y bajo la línea tipo I).....	74
Figura 33. Diagrama discriminatorio de series toleítica, calcoalcalina y shoshonítica de Peccerillo y Taylor, 1976. Se señalan en rojo las dataciones realizadas a las muestras obtenidas en el área de estudio. (Toro <i>et al.</i> en preparación).....	78
Figura 34. Diagrama de Picerillo y Taylor (1976), mostrando en rosado los intrusivos de éste estudio. ....	79

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Coordenadas topográficas de las estaciones donde se tomaron muestras de los cuerpos intrusivos.....	9
Tabla 2. Eventos geológicos del occidente colombiano (Modificado de McCourt, 1984; Aspden, et al. 1987; Álvarez, 1983; Orrego y París, 1996).....	25
Tabla 3. Relación plutónica-volcánica asociada a cambios en la dinámica de subducción del occidente colombiano. ....	30
Tabla 4. Compilación de Intrusivos Terciarios descritos en el cuadrángulo N6 de INGEOMINAS, departamento del Cauca. Se resaltan en negrilla los cuerpos que se incluyen dentro del área de estudio y han sido muestreados en éste proyecto. ...	32
Tabla 5. Tipo de roca según clasificación Streckeisen, 1974 y tamaños de grano, en intrusivos muestreados de la Cuenca Cauca- Patía. (Le Maitre, 2002). ....	49
Tabla 6. Geoquímica de elementos mayores, menores (en % wt) y trazas (en ppm) en intrusivos de la Cuenca Cauca Patía, sin normalizar.....	51
Tabla 7. Datos geocronológicos de algunos cuerpos intrusivos datados que afloran dentro de la zona de estudio. El número de la muestra permite la ubicación de la muestra datada en la Figura 26. ....	67

## LISTA DE ANEXOS

Anexo 1: Mapas de localización de los puntos de muestreo .....	102
Anexo 2: Petrografía .....	107
Anexo 3: Composición normativa CIPW.. .....	153
Anexo 4: Resultados analíticos de la datación Argón-Argón .....	154
Anexo 5: Dataciones realizadas por Risnes, (1995) en la Cuenca Cauca-Patía ....	156

## **RESUMEN**

Al sur de la Cuenca Cauca-Patía, en el departamento del Cauca, Colombia, afloran once cuerpos intrusivos neógenos cuya composición varía de diorita, granodiorita a granito. La composición química de los granitoides muestreados presenta afinidad calcoalcalina, calcoalcalina alta en potasio y toleítica, dentro del rango de los granitoides cordilleranos tipo I. Según el análisis de datos geocronológicos se infieren tres eventos plutónicos que afectaron el área durante el Oligoceno-Mioceno inferior, Mioceno inferior-Mioceno medio y Mioceno superior, éste último correlacionable con el sector Norte de la Cuenca Cauca-Patía. Se observa a partir de relaciones de campo, que las rocas ígneas intrusivas coexisten con rocas volcánicas plio-pleistocenas, que aunque han sufrido diferentes procesos, presentan similitudes químicas y mineralógicas.

Palabras claves: Cuenca Cauca-Patía, granitoides, intrusivos.

## **ABSTRACT**

South of Cauca-Patía basin, in Cauca department, Colombia, was sampled eleven bodies of Neogene intrusive rocks whose composition varies from diorite, granodiorite to granite. According to geochemical analysis, the samples exhibit calc-alkaline high-potassium, calc-alkaline and tholeitic affinity associated to granitoids type I. Geochronological data infer three events that have affected the area during Oligocene-Miocene, Lower Miocene-Middle Miocene and Upper Miocene, the latter correlates with the northern part of Cauca-Patía Basin. Intrusive igneous rocks coexist with Plio-Pleistocene volcanic rocks, that have had undergone several processes, but present chemical and mineralogical similarities.

Key words: Cauca Patía Basin, granitoids; intrusive rocks.

## 1. INTRODUCCION

Durante el desarrollo del proyecto “Vulcanismo Neógeno y Cuaternario en el sur-occidente colombiano, departamento del Cauca: Sector Formación Popayán-Morales, sector poblaciones de Puracé-Coconucos, río San Francisco y sector población río Blanco-río Guachicono” realizado entre el INGEOMINAS y la Universidad EAFIT, se cartografiaron once cuerpos ígneos intrusivos en el área de estudio. Estos cuerpos tienen una relación espacial con las rocas volcánicas del área y en algunos casos presentan características mineralógicas similares. En este proyecto se sintetizan nuevos datos petrológicos, geoquímicos y geocronológicos de estos cuerpos ígneos y se comparan y discuten los resultados con la información disponible sobre las rocas volcánicas de la zona y de otros cuerpos intrusivos en el sector sur de la Cuenca Cauca-Patía.

### 1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Colombia se encuentra situada en el bloque norte de la cadena montañosa de los Andes, en un ambiente tectónico de margen continental activa, caracterizado por una zona de subducción entre la placas Nazca, Caribe y Sur América (Gansser, 1973; Meissner, et al, 1976; Hall y Wood, 1985; Kellogg y Vega, 1995; Taboada, *et al.* 2000; Rodríguez-Vargas *et al.* 2005; Hernández-Pardo, 2006). Bajo las condiciones de este ambiente tectónico, es común que se desarrolle un frente volcánico, caracterizado por rocas silíceas de afinidad calcoalcalina, shoshonítica, y en menor proporción por lavas alcalinas y adakíticas (Gansser, 1973; Wilson, 1989; Hall, *et al.*, 2008; Bryant *et al.*, 2006). Es por esto que una de las principales características en los Andes, es la estrecha relación genética entre el vulcanismo calcoalcalino y las rocas plutónicas de composición similar, aparentemente cogenéticas, que conforman provincias volcano-plutónicas (Roddick, 1983; Pilger, 1984; Wilson, 1989; Metcalf, 2004; Bachmann, *et al.* 2007).

Desde mediados del siglo 20, los petrólogos confirman las relaciones parentales existentes entre rocas granitoides y rocas volcánicas silíceas, ya que poseen similares fases minerales pero diferente abundancia modal, ocurren generalmente en los mismos sitios tectónicos, y suelen asociarse a fuentes caldéricas con depósitos de ignimbritas (Bachmann *et al.*, 2007; De Silva *et al.*, 2006; Pilger, 1984).

Por lo anterior, la presencia en la zona de trabajo de rocas volcánicas relacionadas espacialmente con cuerpos intrusivos y en algunos casos con composición mineralógica similar, permiten cuestionar la relación que existe entre estos cuerpos plutónicos con otros cuerpos de la región y con las rocas volcánicas. En este proyecto se avanzará en la caracterización de estas unidades.

## **1.2 OBJETIVOS**

### **1.2.1 Objetivo General**

Caracterizar a partir de datos petrológicos, geoquímicos y geocronológicos los cuerpos intrusivos muestreados en el área de estudio, que permitan correlacionarlos con las rocas volcánicas circundantes y otros cuerpos reportados en la Cuenca Cauca-Patía.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

- ✓ Reportar cartográficamente los afloramientos de cuerpos intrusivos en el área de estudio.
- ✓ Adquirir bibliografía específica sobre muestreo, dataciones y datos geoquímicos reportados en rocas ígneas de la Cuenca Cauca-Patía.
- ✓ Realizar la petrografía detallada de los cuerpos intrusivos muestreados.



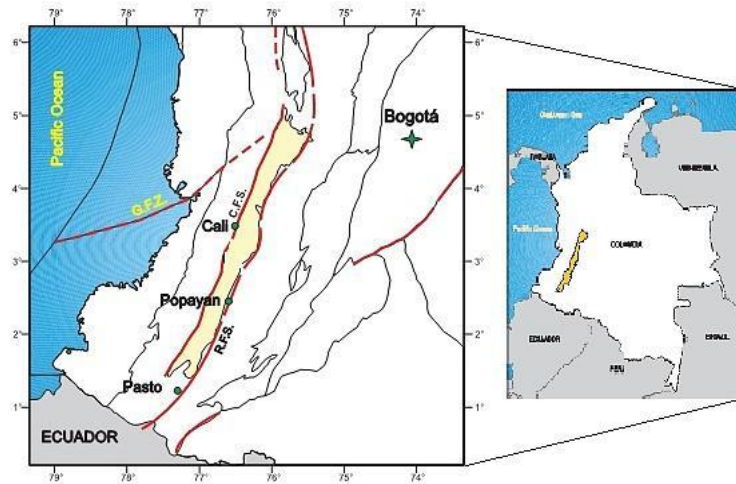
- ✓ Determinar las principales características geoquímicas de cada cuerpo intrusivo.
- ✓ Determinar la variabilidad, petrológica, y geoquímica existente entre los cuerpos intrusivos muestreados y otros cuerpos reportados en la Cuenca Cauca-Patía.
- ✓ Comparar los cuerpos intrusivos muestreados, con las rocas volcánicas circundantes.
- ✓ Establecer la relación geocronológica entre los cuerpos intrusivos muestreados y los eventos plutónicos del occidente colombiano.

### **1.3 LOCALIZACIÓN**

El área de estudio se encuentra localizada en el sector sur de la Cuenca Cauca-Patía, entre la Cordillera Central, al Este y la Cordillera Occidental al Oeste.

Esta cuenca es una depresión elongada en sentido norte-sur, que alcanza los 450 km de longitud y 40 km de ancho en promedio, la cual se ha desarrollado a partir de la colisión de un arco de isla intra-oceánico contra la margen continental del norte de Suramérica, generando depósitos de molasa plegados y fallados, que evidencian una colisión diacrónica desarrollada desde el Cretácico Superior hasta el Neógeno (Barrero *et al.* 2007). La Cuenca está enmarcada por los sistemas de Falla Cauca-Patía y el sistema de Fallas de Romeral (**Figura 1**), que restringen las secuencias de rocas oceánicas cretácicas, las rocas sedimentarias Terciarias y rocas volcánicas neógenas (Orrego y París, 1996; Rondón y Vega, 1990; Paris y Marín, 1976).

La zona de estudio está muy próxima a los volcanes activos Puracé y Sotará e incluye las poblaciones Popayán, Puracé, Coconucos, La Sierra y Río Blanco. Los principales drenajes que disectan el área, están asociados a los valles de los ríos Cauca, Palacé, San Francisco, Blanco y Guachicono (**Figuras 2 y 3**).

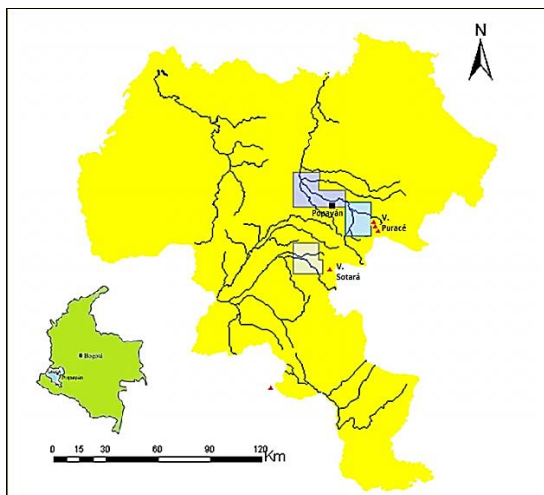


**Figura 1. Localización de la Cuenca estratigráfica Cauca-Patía en el occidente colombiano.** Modificado de Barrero et al.2007.

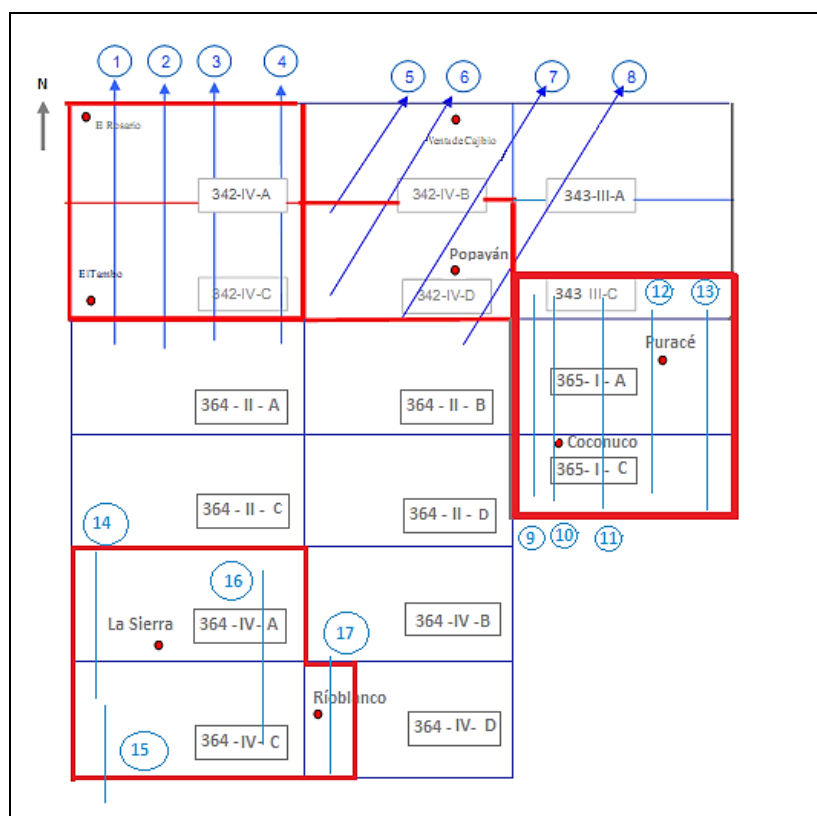
La cuenca está limitada por las siguientes coordenadas geográficas:

X: 780.000 Y: 1.035.000	X: 743.000 Y: 1.060.000
X: 770.000 Y: 1.047.500	X: 740.000 Y: 1.030.000
X: 762.000 Y: 1.075.000	X: 730.000 Y: 1.045.000
X: 760.000 Y: 1.035.000	X: 722.000 Y: 1.048.000

Enmarcadas dentro de las planchas topográficas del IGAC a escala 1:25000 (**Figura 2 y 3**): 342-IV-A, 342-IV-C, 342-IV-D, 343-III-C, 365-I-A, 365-I-C, 364-IV-A, 364-IV-C y 364-IV-D.



**Figura 2. Localización del área de estudio en el departamento del Cauca. Modificado de INGEOMINAS-U. EAFIT. 2007.**



**Figura 3. Diagrama ilustrativo sobre las planchas IGAC y líneas de vuelo empleadas en el área de estudio.**

(Se señalan con puntos rojos la localización de los principales centros urbanos. Líneas de vuelo: 1.M1049 (12588 – 12593)1961 INGEOMINAS; 2. M1370 (16561-12566) INGEOMINAS; 3. M1207 (22950– 22956)1962 INGEOMINAS; 4.M1049 (12547- 12555) 1961 INGEOMINAS; 5. C2089-30-83, S31776 (159-161) IGAC; 6. C2089-27-83, S31778 (206-212) IGAC; 7. C2089-28-83, S31775 (125-132); 8.C2089-27-83, S31777 (172-179) IGAC; 9. M7-M550 (7435- 7452) INGEOMINAS; 10. C 2401-28-89 S- 35434 (144- 153) IGAC; 11. C 2402-26-89 S- 35436 (33- 41) IGAC; 12. M5 - M550 (7370- 7381) INGEOMINAS; 13. C 2270-25-87, S-33768 (274- 285) IGAC; 14. C-2350-29-88, S-34767(140-133) IGAC; 15. C- 2318 (144-145) IGAC; 16. C- 2350-33-88, S-34766 (84-89) IGAC; 17. C-2350-31-88, S34765 (79-81) IGAC).

#### **1.4 METODOLOGÍA**

En las primeras etapas de éste proyecto, se realizó la compilación y análisis de información existente sobre geología, y el vulcanismo Neógeno-Cuaternario en el suroccidente colombiano, incorporando toda la información obtenida en la Base de Datos del software EndNote.

Posteriormente, se determinaron las áreas del proyecto en las planchas geográficas del IGAC, se realizó el estudio fotogeomorfológico como preparación para las actividades de campo, realizadas en dos campañas durante los meses de abril-mayo (20 días) y septiembre (12 días) de 2007. Como resultado se obtuvieron más de 1000 m de columnas estratigráficas, y se recolectaron alrededor de 300 muestras de lavas, ignimbritas, depósitos piroclásticos, cenizas de caída, y rocas ígneas intrusivas. Un total de once intrusivos fueron seleccionados para su caracterización petrográfica (**Tabla 1 y Figuras 4, 5, 6**). Luego de la descripción macroscópica, se realizaron 19 secciones delgadas, en las que se efectuó un análisis modal, con un conteo de 500 puntos. La

clasificación petrográfica se realizó siguiendo la metodología propuesta por Streckeisen (1974) y empleando el software libre QAFP\_12, versión 1999 de la Universidad Complutense de Madrid, de acuerdo con las recomendaciones de Le Maitre (2002).

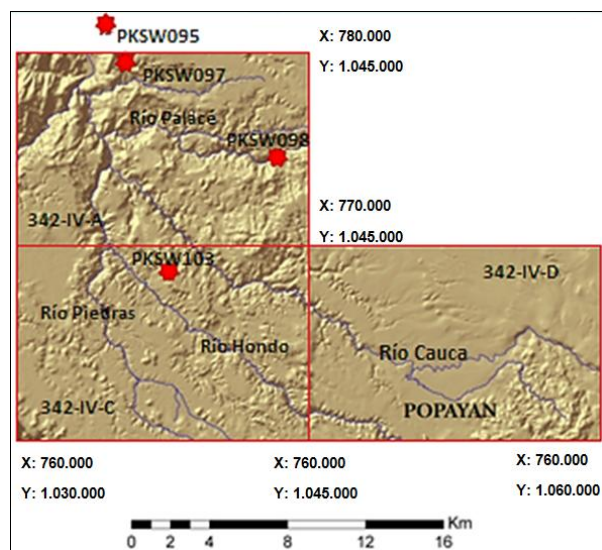
Para el análisis geoquímico, las muestras fueron trituradas con almadana y molino de quijada hasta alcanzar 1 a 3 cm. de diámetro. Luego de un lavado con alcohol, se trituraron manualmente 10 gr en un mortero de ágata hasta alcanzar un tamaño arcilla. Esta fracción se analizó en el laboratorio de INGEOMINAS seccional Bogotá, empleando técnicas como fluorescencia de rayos X (XRF) en la determinación de Ti, Sr, Zr, Ba, Rb; Absorción Atómica (A.A) para Fe total, Al, Mn, Ca, Mg, Na, K, Si, Cu, Zn, Ni, Co, Cr, V, Pb; Volumetría para calcular el Fe oxidado por meteorización de la roca y Gravimetría para determinar la humedad (LOI) y P, siguiendo los protocolos establecidos por Ingeominas durante el año 2008. Éstos datos fueron graficados y analizados empleando el software libre GCD toolkit 2.3 (Janoušek et al. 2006) y Petrograph (Petrelli *et al.*, 2005).

La selección de la biotita para la datación  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  de la muestra JLSW063, se realizó manualmente con ayuda de lupa binocular. Ésta muestra fue irradiada a una dosis de 30 MWH en el reactor nuclear de la Universidad de McMaster en Hamilton, Ontario, Canadá, y posteriormente analizada por la Dra. Margarita López Martínez, en el centro de investigación CICESE, en Baja California, México.

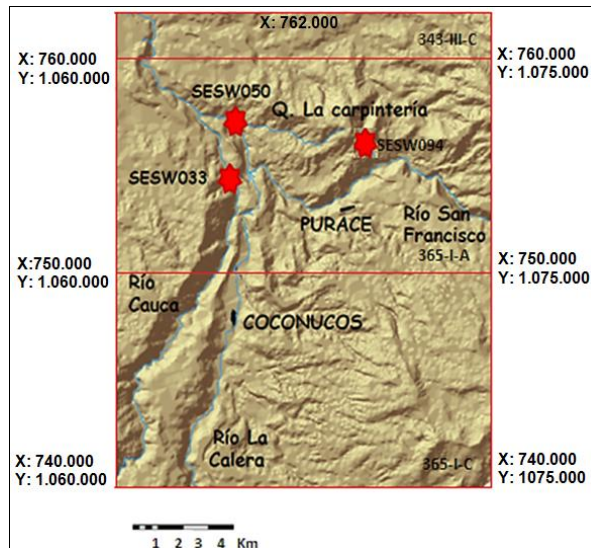
Finalmente, se incorporaron todos los datos bibliográficos, los obtenidos en campo, los análisis de los datos petrográficos, geoquímicos y geocronológicos, para la discusión final. Algunas recomendaciones para trabajos posteriores se incluyen en el capítulo de conclusiones.

**Tabla 1. Coordenadas topográficas de las estaciones donde se tomaron muestras de los cuerpos intrusivos.**

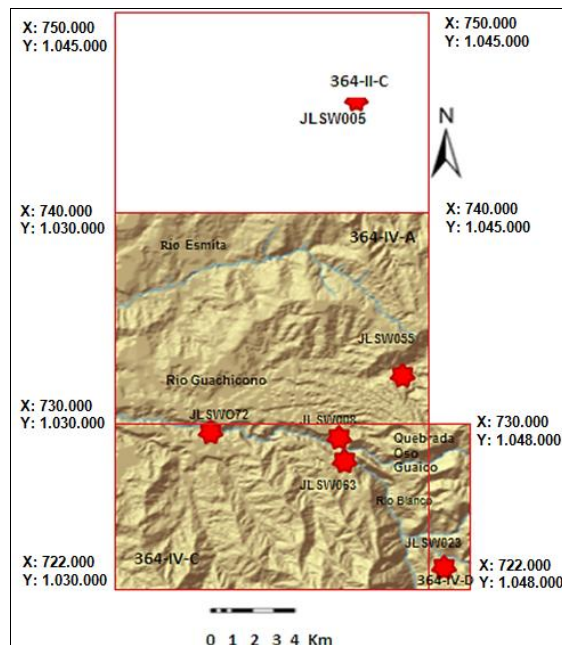
ESTACION	COORDENADAS			LOCALIZACION
	X	Y	Z	
PKSW103	768934	1037896	1710	Camino que de la vereda La Yunga conduce al valle del río Hondo
PKSW098	774826	1043275	1485	Vereda La Tetilla. Puente sobre el río Palacé.
PKSW097	779532	1035640	1710	Vereda La Balastrea. Corregimiento de El Rosario. Municipio de Cajibío, Vereda La Rioja
PKSW095	780778	1034519	1500	Vereda La Balastrea. Corregimiento de El Rosario. Municipio de Cajibío
SESW033	756463	1064487	2090	Vía Popayán-Puracé, Vueltas de Patico
SESW050	758593	1064776	2040	Quebrada La Carpintería
SESW094	757734	1069804	2800	Camino que conduce del Cerro Pusná al sector de Patía, por la Vereda El Rincón
JLSW005	745594	1041322	1700	El Encenillo. Vía Popayán – Rioblanco.
JLSW008	729162	1040975	1980	Sobre la vía La Sierra-Río Blanco. Quebrada Oso Guaico
JLSW023	722993	1045742	2550	Cantera El Pantano
JLSW063	728,097	1041002	2000	Camino del municipio de Río Blanco a La vereda el Tablón
JLSW072	729489	1034844	1470	Cauce río Guachicono



**Figura 4. Mapa de localización de los sitios de muestreo realizados en las planchas topográficas 342-IV-A, 342-IV-C y 342-IV-D, próximas a la ciudad de Popayán. (Se señalan en color azul los drenajes, con estrellas rojas el punto de muestreo y en negro el nombre de la estación correspondiente).**



**Figura 5. Mapa de localización de los sitios de muestreo realizados en las planchas topográficas 343 IIC, 365-I-A, y 365-I-C próximas al municipio de Puracé. (Se señalan en color azul los drenajes, con estrellas rojas el punto de muestreo y en negro el nombre de la estación correspondiente).**



**Figura 6. Mapa de localización de los sitios de muestreo realizados en las planchas topográficas 364-II-C, 364-IV-A, 364-IV-C, 364-IV-D, próximas al municipio de Río Blanco. (Se señalan en color azul los drenajes, con estrellas rojas el punto de muestreo y en negro el nombre de la estación correspondiente).**

## 1.5 CONTEXTO GENERAL Y LIMITACIONES

A mediados del siglo XX, los cuerpos plutónicos eran estudiados de manera aislada, asociando su formación a periodos orogénicos, tectónica localizada, o pulsos magmáticos, dado que se consideraban el producto de una única intrusión magmática que se emplazaba y enfriaba en la corteza terrestre (Huppert y Sparks, 1988; Barbosa y Bergantz, 1996).

Posteriormente y gracias al apoyo de herramientas como la geoquímica isotópica, las dataciones, y los métodos geofísicos, surgieron propuestas que soportan la relación volcano-plutónica, relacionada principalmente con el magmatismo cordillerano Circum-Pacífico. (Roddick, 1983; Wilson 1989; Miller y Miller, 2002; Metcalf, 2004; De silva *et al.*, 2006; Bachmann *et al.*, 2007; Lipman, 2007).

La génesis de cuerpos plutónicos, se asume ahora como la múltiple amalgamación de pequeñas cámaras magmáticas provenientes de numerosas intrusiones secuenciales durante millones de años; su proceso de crecimiento se compara con las múltiples erupciones en superficie que construyen los edificios volcánicos, y que en el ambiente de margen continental activa de los Andes está asociada a calderas y cámaras magmáticas someras (Glazner, *et al.*, 2004; Annen, 2011; De Silva *et al.*, 2006, 2008).

A partir de evidencias geológicas y datos radiométricos, en Colombia se han dado al menos cinco episodios de actividad plutónica desde el Triásico hasta el Terciario, influenciados por las variaciones en el ángulo de convergencia de la placa oceánica respecto a la placa continental y en los múltiples procesos de acreción en el occidente colombiano (Aspend *et al.*, 1987; Aspend y McCourt 1986; Droux y Delaloye 1996; Nivia, 1987 a y b, 1989; Grosser, 1989; Kerr *et al.*, 1997).



En la Cuenca Cauca-Patía, y en el área de estudio se reportan numerosos cuerpos intrusivos neógenos, con texturas principalmente porfídicas y tamaños que varían desde stocks hasta cuerpos menores a 1Km<sup>2</sup> de diámetro, controlados estructuralmente por el Sistema de Fallas Cauca–Patía (Álvarez, 1983; Acevedo y Cardozo, 1986; FUDESO, 2007; INGEOMINAS,1999; Risnes, 1995; López, *et al.*, 2006).

A partir de este marco general, los datos obtenidos sobre los cuerpos intrusivos estudiados complementarán la información existente sobre la actividad ígnea en el suroccidente colombiano. La principal limitación fue la falta de recursos para realizar estudios isotópicos que nos permitieran establecer con certeza estas correlaciones y la alteración hidrotermal de estas unidades para ser datadas por el método <sup>39</sup>Ar/<sup>40</sup>Ar.

## 2. GEOLOGÍA

En este capítulo se realiza un resumen sobre la geología del área de estudio, atendiendo sus características litológicas y estructurales.

Una síntesis, sobre la actividad volcánica y plutónica de la zona se presenta al final de éste numeral.

### 2.1 UNIDADES LITOLÓGICAS

El área de estudio corresponde a una cuenca de acumulación desarrollada sobre un basamento de rocas metamórficas paleozoicas y mesozoicas de afinidad oceánica acrecionadas, sobre las que se han depositado flujos piroclásticos, y volcano-sedimentarios provenientes principalmente de la Cadena Volcánica de los Coconucos y del Volcán Sotará. En menor proporción afloran rocas sedimentarias suprayacidas por depósitos aluviales y cenizas de caída, que cubren y suavizan el paisaje.

El basamento en la zona de estudio (**Figuras 7 y 8**), está constituido por rocas metamórficas del Complejo Cajamarca las cuales se encuentran en la Cordillera Central desde el este de la Falla San Jerónimo hasta la Falla Otú-Pericos (Maya y González, 1995; Gómez y Nuez, 2003; Nuñez *et al.* 1979; González, 1980; INGEOMINAS, 2002). Entre los tipos litológicos más comunes se destacan las pizarras, filitas, esquistos cuarzo-sericíticos, esquistos verdes, cuarcitas, neises, granulitas, anfibolitas y fajas de mármoles, considerados de edad Proterozoica (Hincapié y Camargo 2005; Gómez y Núez 2003). Al este de la Falla Cauca Almaguer y al oeste de la Falla Silvia-Pijao el basamento está constituido por rocas del Complejo Arquía (Maya y González, 1995; Nuñez, 1989), compuesto por

esquistos, cuarcitas y filitas de edad Paleozoico inferior que afloran en el flanco occidental de la Cordillera Central (Nivia, 2001).

Hacia el sur del área de estudio, el basamento corresponde a rocas metamórficas dispuestas a lo largo de una franja que limita hacia el este por la falla Las Estrellas y hacia el oeste con la falla El Crucero, que corresponden al Granitoide Cataclizado de Bellones, cuarcitas, neis (granodiorita cataclizada) y esquistos miloníticos de edad Juratriásico emplazados dentro del Complejo Arquía (Orrego, 1993; Orrego, *et al.* 1999; INGEOMINAS, 2002). El granitoide de Bellones, aflora sobre de la vía que conduce de La Sierra al municipio de Río-Blanco.

Hacia el oeste de la Falla San Jerónimo y hacia este de la Falla Silvia-Pijao, el basamento está representado por rocas volcánicas toleíticas metamorfizadas conformadas por basaltos, andesitas, liditas, shales y grawvacas del Complejo Quebradagrande (Botero, 1963; Maya y González 1995; González, 1980; Álvarez, 1983) cuyo origen se asocia con una meseta oceánica (Kerr, *et al.*, 1997). Su edad estimada bioestratigráficamente pertenece al Cretácico inferior, Aptiano- Albiano (Botero y González, 1983).

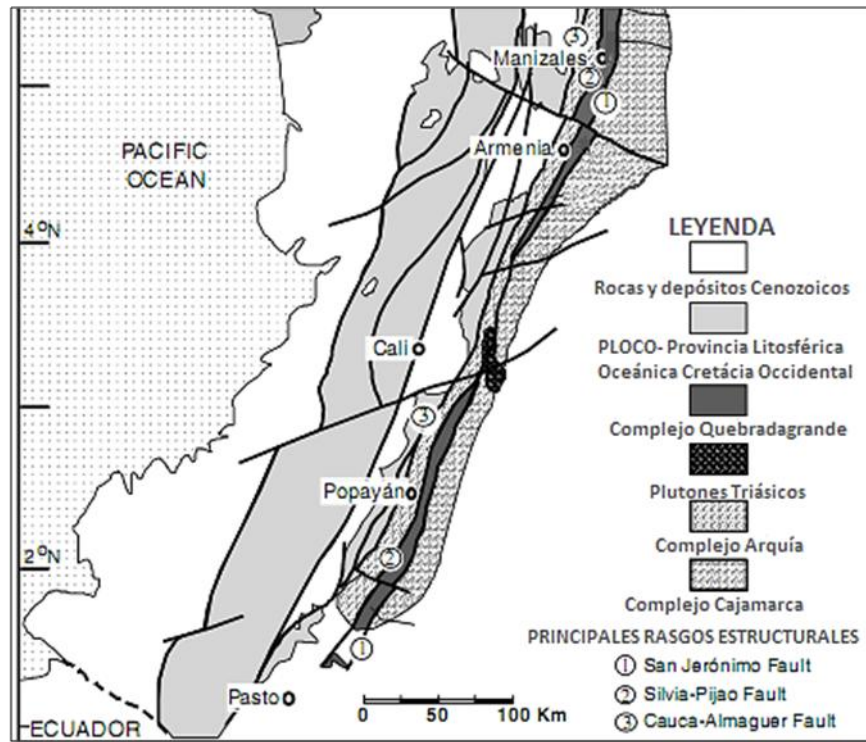


Figura 7. Basamento metamórfico en el área de estudio y su relación con los principales rasgos estructurales del occidente colombiano. Compilado y Modificado de Nivia et al., 2006; Sánchez et al. 2007.

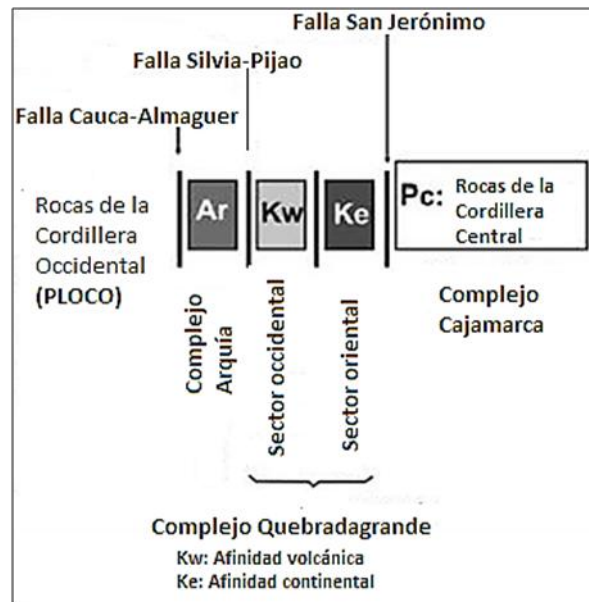


Figura 8. Detalle de los límites estructurales del basamento en el área de estudio. Modificado de Sánchez et al. 2007.

Suprayaciendo éste conjunto de rocas metamórficas, al occidente de la Falla Cauca-Almaguer, perteneciente al Sistema de Fallas Romeral, se presentan un bloque Mesozoico acrecionado, denominado Provincia Litosférica Oceánica Cretácica Occidental-PLOCO (Nivia, 1989, 1993; McCourt *et al.*, 1984). En este se diferencian rocas de afinidad oceánica como las Ofiolitas de La Tetilla (INGEOMINAS, 1999), el Complejo de rocas máficas y ultramáficas (Orrego *et al.*, 1999), y el Complejo Barroso-Amaime conformado por depósitos de flujos de lavas basálticas almohadilladas, diques diabásicos, brechas volcánicas y hacia la parte superior en menor proporción por diabasas con intercalaciones sedimentarias (Hubach y Alvarado 1934; Keizer 1954; Hubach 1957; Aspden y MacCourt, 1986). Esta unidad pertenece al Cretáceo superior que afloran a lo largo del flanco oeste de la Cordillera Central (Barrero 1979; McCourt *et al.*, 1984; Orrego *et al.*, 1976).

Sobre este basamento se depositaron en la cuenca un conjunto de rocas sedimentarias localizadas en el flanco oriental de la Cordillera Occidental en el departamento del Cauca, conocido como el Grupo Sedimentario del Cauca (Grosse y Alvarado, 1931; Orrego, *et al.*, 1999), compuesta por la Formación Chimborazo del Eoceno, la Formación Guachinte del Oligoceno, la Formación Ferreira del Oligoceno-Mioceno, la Formación Esmita del Mioceno y la Formación Mosquera del Eoceno-Oligoceno, representadas litológicamente por areniscas, arcillolitas, shales y conglomerados (Hubach, 1957; León, *et al.* 1973; Orrego, 1975; Orrego, *et al.* 1976; París y Marín, 1979; Orrego y París, 1996).

Posteriormente, se depositan las formaciones volcánicas y volcano sedimentarias denominadas Formación Galeón de edad neoterciaria (Grosse, 1935; De Porta, 1974; Hubach, 1957; Van der Hammen, 1955) y Formación Popayán (Alvarado y Hubach, 1932; Grosse, 1935; Orrego, 1975; Orrego *et al.*, 1976; Torres *et al.*, 1992). En el área de estudio la Formación Popayán aflora próxima a la ciudad de Popayán, en el cañón del río San Francisco y en el municipio de Coconucos y está

compuesta por ignimbritas, depósitos de flujos piroclásticos y cenizas de caída (Torres *et al.*, 1992). La génesis de estos depósitos se asocia posiblemente con el vulcanismo de la caldera del Paletará (Torres *et al.*, 1999).

Los depósitos volcánicos del Neógeno, son considerados los más recientes dentro del área de estudio, están asociados con el vulcanismo de la Caldera Chagartón que contiene el volcán Puracé, y se encuentra muy próxima a la Caldera Sotará con su actual foco activo el volcán Sotará (Monsalve, 2000; Monsalve y Pulgarín, 1995). Ambos centros eruptivos se encuentran localizados fuera del área de estudio pero muy próximos del extremo este y sureste de la zona.

Hacia el Este del área de estudio, se observan flujos de lavas andesíticas columnares, intercalados con flujos piroclásticos de ceniza y pómez, ceniza y bloques, ceniza y escoria; piroclastos de caída, proyectiles balísticos, cenizas líticas y depósitos plinianos; flujos de lodo y brechas de explosión pertenecientes a la Formación Coconucos (Monsalve, 2000; INGEOMINAS 2003), provenientes de los productos recientes de la Cadena Volcánica de Los Coconucos, la cual está conformada por quince centros eruptivos activos, que presentan comportamiento explosivo hacia el norte, donde se ubica el volcán Puracé, y efusivo hacia el sur, donde la Cadena Volcánica de los Coconucos finaliza con el volcán Pan de Azúcar (Monsalve y Pulgarín, 1995; Monsalve 1996; Monsalve y Pulgarín, 1999). La edad obtenida por el método K/Ar para ésta unidad es de  $2.9 \pm 0.1$  Ma, por lo que se consideran de edad pliocénica (Monsalve, 2000). Hacia el sur, asociado con los productos del volcán Sotará, se observa una secuencia de ignimbritas soldadas con textura fiammé rica en cristales de plagioclasas y hornblenda, lavas intercaladas con flujo piroclásticos y presencia de fluidos hidrotermales, principalmente encausadas y adosadas por los valles de los ríos Blanco y Guachicono (Téllez, 2011; Téllez, *et al.* 2008).

Varios depósitos fluvio-volcánicos y aluviales originan abanicos con suaves pendientes, relacionados con los cauces de los principales drenajes, como por ejemplo los depósitos de San Isidro (Arango y Gómez, 1990). Se observan también depósitos de coluviones asociados a eventos aluvio-torrenciales localizados hacia la zona de escarpes y valles empinados (INGEOMINAS, 1992).

En toda el área de estudio, como evidencia de la actual actividad volcánica, se observan cenizas de caída de color rojo pardo, caracterizadas por cuarzo bipiramidal, cristales de circones y pómez blanca meteorizada (INGEOMINAS-Universidad Eafit, 2007).

## **2.2. ESTRUCTURAS**

La continua actividad de la zona de subducción, junto a los múltiples procesos de acreción, favorecen el desarrollo de estructuras corticales en el área de estudio, representados por los grandes Sistemas de Fallas: Cauca-Patía y Romeral, los cuales tienen dirección preferencial noreste, y han actuado como facilitadores de la exhumación de los cuerpos intrusivos neógenos (París y Marín, 1979; Bohórquez *et al.*, 2005). Localmente y principalmente hacia el Norte del área, existen otros sistemas de fallas en sentido noroeste y en menor proporción en sentido este-oeste. La conjugación de todas estas estructuras, generan bloques tectónicos que alternan depresiones con altos topográficos, permitiendo que aflore basamento Cretáceo, y originando cuencas de relleno Terciario-Cuaternario (París y Marín, 1979). En la **Figura 9** se sintetizan las principales fallas de la zona de estudio.

El Sistema de Fallas Romeral se caracteriza por su gran extensión, ocupa todo el flanco occidental de la Cordillera Central, desde el valle del río Cauca hasta la

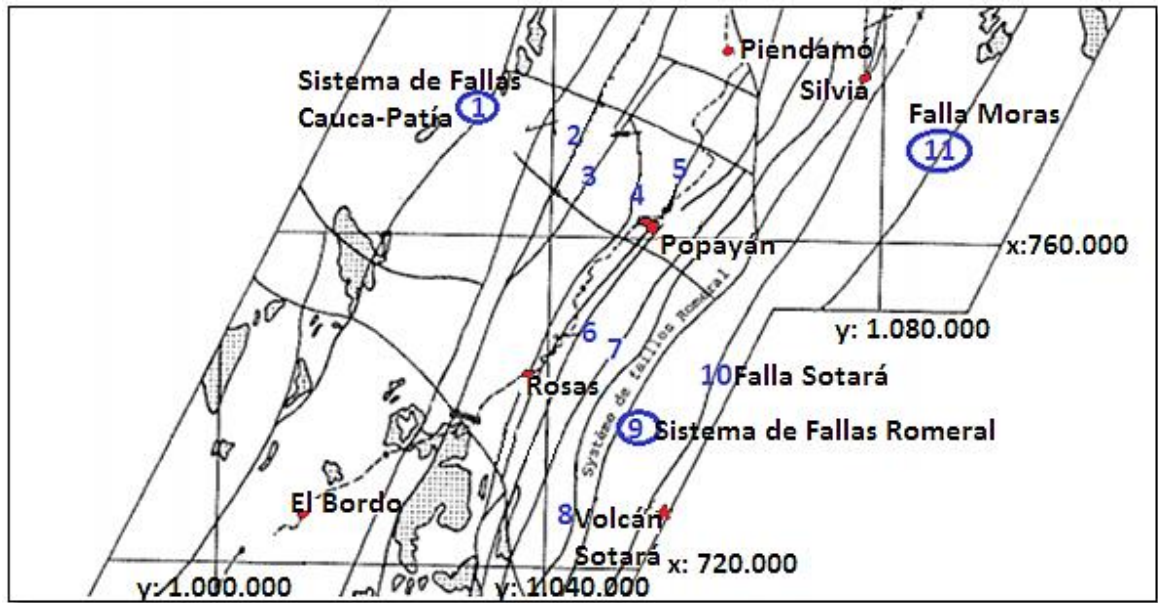
cima de la cordillera y desde su nacimiento en el Ecuador hasta su terminación en las llanuras del Caribe (Toussaint y Restrepo, 1976; Pennington, 1981; INGEOMINAS, 1999, 2003; McCourt, *et al.*, 1984); son fallas de tipo inverso, con componentes de movimiento dextralateral, y alto ángulo de buzamiento hacia el Oriente a las que se le asocian sismos de intensidad media a alta (Orrego *et al.*, 1992). En el área de estudio esta fallas tienen un rumbo general N30°E y comprende las fallas Moras, Coconucos, San Jerónimo, El Crucero, Popayán, Silvia-Pijao, Cauca-Almaguer y Rosas-Julumito (INGEOMINAS, 1996, 2002).

El Sistema de Fallas Cauca-Patía de dirección noreste, se localiza en el flanco este de la cordillera Occidental y representa el límite oeste de la Cuenca Cauca-Patía; se extiende desde el sur del departamento del Cauca, hasta el norte del país (INGEOMINAS, 1992, 1999). Este sistema se conoce regionalmente como un conjunto de fracturas, con pocos rasgos morfológicos de actividad cuaternaria que favorecen la formación de altos topográficos aislados conformados por rocas del basamento, tales como las fallas La Tetilla, Las Estrellas, y Guabas (París y Marulanda, 1985).

Existe un Sistema de Fallas del Río Cauca, de dirección noroeste, que controlan el drenaje y a las que se les asigna actividad cuaternaria (INGEOMINAS, 1992, FODESO, 2007). A este sistema pertenecen las Fallas de Torres, río Molino, río robles, y río Hondo entre otras.

Otro control del drenaje importante lo generan las fallas este-este de la zona de estudio, como la Falla Palacé (París, *et al.* 1989; FODESO, 2007;).





**Figura 9. Fallas presentes en el área de estudio.**

(Se señalan con números azules el trazo de cada falla, en sentido E-W. 1. Sistema de Fallas Cauca-Patía; 2. Fallas Mosquerillo-La Tetilla; 3. Falla la Tetilla; 4. Falla Rosas-Julumito; 5. Falla Bolivar-Almaguer; 6. Falla Popayán; 7: Falla El Crucero; 8. Falla la Estrella; 9: Sistema de Fallas Romeral; 10. Falla Sotará; 11. Falla Moras. (Modificado de Risnes, 1995).

### 2.3 EVOLUCIÓN DEL SUROCCIDENTE COLOMBIANO

La evolución de la Cuenca Cauca-Patía está ligada a la configuración y el desarrollo de las cordilleras Central y Occidental, relacionadas con el desarrollo del occidente colombiano (Acosta, 1978; Barrero, 1979; McCourt, *et al.* 1984; Nivia, 1987b; Rendón y Vega, 1990; Alfonso, 1993). Se describe a continuación su proceso de formación desde el Paleozoico hasta nuestros días, con énfasis en la evolución de la zona de subducción y por lo tanto, a la actividad ígnea. En la **Tabla 2** se sintetizan los principales eventos geológicos del occidente colombiano y en la **Figura 10** se presenta un esquema estructural de Colombia.

De acuerdo con los trabajos de Alvarez, (1983), McCourt, *et al.*, (1984) y Orrego y París, (1997) entre otros, desde el Devónico, se distingue una zona de subducción al occidente del Escudo de Guayana, caracterizada por la presencia de un arco oceánico muy próximo a la margen continental, donde comienzan a depositarse rocas meta-ígneas y sedimentos volcánicos en las cuencas el fore-arc/trench y back arc, al parecer con aporte turbidítico o volcanogénico de material del manto, que contrasta con los sedimentos ricos en cuarzo producto de la meteorización del Escudo de Guayana depositados en el flanco oriental de la proto-Cordillera Central.

En el Carbonífero, la secuencia de arco oceánico es acrecionada al bloque continental a lo largo de la mega sutura Palestina-Puerto Berrío; durante este evento toda la secuencia es metamorfoseada, generandose un cinturón metamórfico pareado de media y baja presión (Mccourt, *et al.* 1984). Después de esta acreción, se establece una nueva zona de subducción al occidente del bloque continental. Más tarde, en el Pérmico superior-Triásico, se produce un ciclo magmático en el que plutones intruyen el cinturón metamórfico, los cuales son sometidos a fuertes esfuerzos tectónicos que deforman estos cuerpos en un régimen pos-tectónico extensional (Vinasco, *et al.*, 2006; Vinasco, 2004, Alvarez, 1983; Bustamante, 2003).

A finales del Triásico la proto-Cordillera Central formaba un área parcialmente emergida y en proceso de erosión, por lo que comienzan a depositarse sobre una superficie Herciniana erosionada, sedimentitas triásico-jurásicas, al parecer con aporte de sedimentos del Macizo de Santander (Alvarez, 1983; Orrego y París, 1996). A finales del Triásico y comienzos del Jurásico, debido a la zona de subducción se crea un arco de islas bajo en potasio y surge un abundante pulso magmático localizado en el flanco oriental de la Cordillera Central, desarrollándose un arco volcánico intra-continental con productos de intermedio a ácido, lo que

genera la formación de cuerpos plutónicos jurásicos, como el Batolito de Ibagué (Alvarez, 1983). En el Jurásico medio, se depositan sobre el eje axial de la Cordillera Central, rocas de ambientes sublitorales, lo que indica intrusiones marinas del Océano Pacífico ancestral (Orrego y París, 1996; 1997).

En el Cretáceo inferior, se genera una segunda acreción del arco Mesozoico inferior, acrecionado a largo de la proto-Cordillera Central mediante la sutura de la Falla Romeral, que se debió formar hacia los 125 Ma (McCourt, *et al.* 1984; Nivia, 1989). Por esta misma época se definen dos dominios paleogeográficos separados parcialmente por la proto-Cordillera Central. Un dominio occidental caracterizado por un vigoroso volcanismo toleítico submarino (Formación Quebradagande y Grupo Diabásico), al parecer de arcos volcánicos asociados a cuencas marginales y un dominio oriental carente de él (McCourt, *et al.* 1984; Nivia, 1989; Orrego, *et al.* 1992). A finales del Cretáceo inferior, se produce nuevo arco toleítico bajo en potasio en el suroccidente colombiano (Feininger y Bristow, 1980) acompañado de plutonismo calco-alcalino como los actuales Batolitos de Antioquia y Buga, situados en el flanco occidental de la Cordillera Central.

Durante el Barremiano-Aptiano, una fuerte transgresión marina invade el occidente colombiano y el sector septentrional de la ancestral cordillera Central, dejando sólo algunas áreas emergidas (Alvarez, 1983; Orrego y París, 1996; Orrego, 1993). Mientras tanto, en la proto-Cordillera Occidental se efectúan intrusiones de rocas gabrómicas, con características de arcos interoceánicos (Alvarez, 1983).

En el Cretáceo superior, la proto-Cordillera Central presenta bien individualizados sus dos dominios, occidental y oriental, esta emergida y en proceso de erosión (Alvarez, 1983; Toussaint y Restrepo, 1976). En el occidente colombiano continúa la intensa actividad magmática básica, aflorando tanto rocas de corteza oceánica

como volcanitas de arcos de islas que se van acrecionando a los depósitos del Cretáceo inferior (Orrego y París, 1996; Alvarez, 1983; Toussaint y Restrepo, 1976).

En el periodo de transición que comprende finales del Cretáceo superior-Eoceno inferior, retrocede el mar Cretácico (Barrero, 1979). En el Paleoceno, del movimiento oblicuo de la placa oceánica respecto a la placa continental, resulta la acreción del arco Mesozoico superior (Pilger, 1981, 1983; Nivia, 1989). Ésta secuencia se aproximó al bloque continental desde el suroccidente como bloque alóctono, siendo deformada, localmente metamorfizada y fragmentada en una serie de bloques que se fueron acrecionando a lo largo de la actual zona de Falla Cauca-Patía, como el emplazamiento de un cinturón discontinuo N-S de ofiolitas que se emplazaron a lo largo de la cuña occidental del graben Cauca Patía (McCourt, et al. 1984). La actividad ígnea se restringe a la porción septentrional y central de la Cordillera Central, y en menor proporción en la Cordillera Occidental. Complejos máficos y ultramáficos y rocas metamórficas de alta presión fueron al parecer emplazadas durante este diastrofismo (Nuñez *et al.*, 1979).

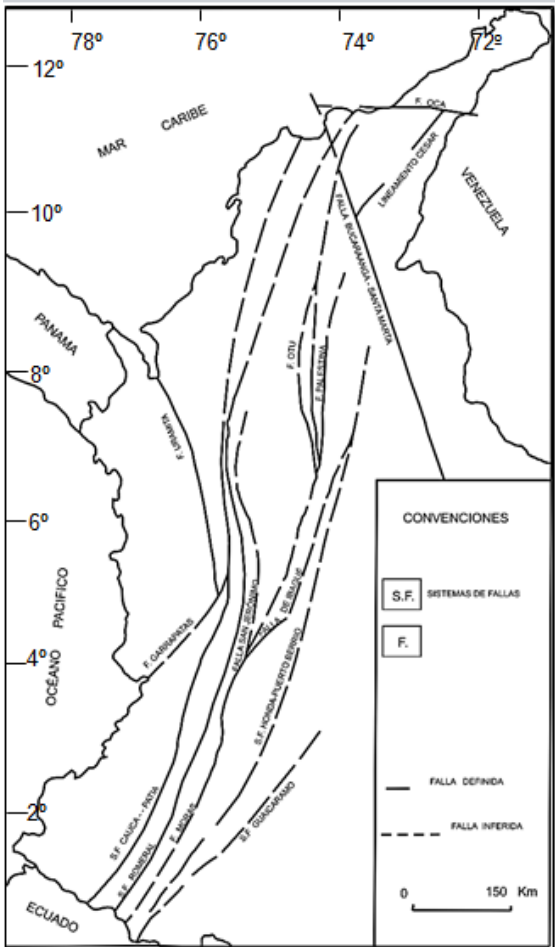
Durante el Eoceno medio-Mioceno inferior, inicia una nueva transgresión en el occidente andino, inundando la zona deprimida de Cauca-Patía, y generando sedimentación de ambiente marginal tranquilo, con mantos de carbón (Alvarez, 1983; Orrego y París, 1996; Toussaint y Restrepo, 1976). También toma lugar un importante cambio en la convergencia de placas oceánica y continental cambiando de noreste-suroeste a este-oeste, como respuesta al rompimiento de la placa Farallón hace 25 Ma (Pilger, 1983; McCourt, *et al.* 1984; Kellogg y Vega, 1995). En la Cordillera Occidental, se emplazan cuerpos plutónicos granitoides durante el Paleoceno inferior, finales del Oligoceno y principios del Mioceno (Alvarez, 1983).

En el Mioceno superior- Plioceno inferior, se inicia en los Andes colombianos la Orogenia Andina, generando el levantamiento de las proto-cordilleras ya existentes, lo que genera el plegamiento de las secuencias depositadas en la Cuenca Cauca-Patía, se individualiza la Cordillera Oriental y comienza la emersión de la Serranía Baudó.

Durante el Neógeno y el Plio-Pleistoceno, se inicia en la Cuenca Cauca-Patía, intensa actividad volcánica de composición ácida a intermedia, que está relacionada al origen de la depositación de gruesos depósitos volcano-clásticos acumulados sobre las rocas preexistentes (Álvarez, 1983; Taboada *et al.* 2000; Monsalve, 2000). Los centros volcánicos en ésta cuenca estuvieron controlados por fracturas profundas del Sistema de Fallas Cauca-Romeral; posteriormente, el plutonismo-vulcanismo se desplazó de la Cuenca Cauca-Patía al eje de la Cordillera Central, donde se localiza actualmente el vulcanismo colombiano (Murcia, 1982; Risnes, 1995; Monsalve, 1996; Téllez *et al.*, 2008).

**Tabla 2. Eventos geológicos del occidente colombiano (Modificado de McCourt, 1984; Aspden, et al. 1987; Álvarez, 1983; Orrego y París, 1996).**

EDAD (Ma)	EVENTOS
3-Presente	Definición de las tres cordilleras. Se establece la cadena volcánica cuaternaria sobre el eje de la Cordillera Central. Continúa la subducción, reflejada en la actividad sísmica actual.
3-4	Orogenia Andina y acreción de la Serranía de Baudó
7(?)	Disminuye la sedimentación y el plutonismo en el bloque continental. Continúa el desarrollo de la cuenca Cauca-Patía y aumento de magmatismo en respuesta a los cambios en la subducción.
25	Rompimiento de la placa Farallón, inicia nuevo régimen de subducción.
Acreción-subducción III del arco de islas Mesozoico superior. Evidenciada por la sutura Cauca-Patía con el emplazamiento del cinturón ofiolítico Norte-Sur.	
55(?) - 65	Desarrollo de arco oceánico toleítico bajo en K, en el suroccidente del bloque continental, junto con un plutonismo contemporáneo a lo largo del flanco occidental de la Proto-Cordillera Central. En el flanco este, continúa la sedimentación siálica. Tectónica caracterizada por fallas de rumbo dextrales.
120	Se establece al oeste del bloque continental una nueva zona de subducción caracterizado por secuencias de arcos de isla toleítico bajo en K (Grupo Amaime-Mesozoico inferior). Desarrollo de plutonismo calcoalcalino a lo largo del flanco oriental de la proto-Cordillera Central. Tectónica caracterizada por fallas de rumbo sinestrales
125 Acreción subducción II del arco Mesozoico inferior. Evidenciado por la sutura de la Falla Romeral con presencia de esquistos azules.	
195(?) - 200	Intrusión de cuerpos calcoalcalinos granitoides a lo largo del flanco occidental de la proto-Cordillera Central
Acreción-subducción I. Evidenciada por la sutura Palestina-Puerto Berrío y evento de metamorfismo regional.	
340 (?) - 350	Se presenta en el Devónico, el primer evento de subducción al oeste del escudo de Guayana, representada por rocas de arco oceánico.



**Figura 10. Esquema estructural de Colombia. Se observan los principales sistemas de fallas y paleosuturas relacionadas con los episodios de acreción-subducción. Modificado de Aspden, et al. 1987.**

**2.4 CARACTERÍSTICAS DEL PLUTONISMO Y VULCANISMO EN COLOMBIA**

Los pulsos plutónicos muestran cercana relación temporal y espacial con los pulsos volcánicos en Colombia (Alvarez, 1983). Están relacionados con la múltiple acreción de terrenos alóctonos y cambios en la geometría de subducción del occidente colombiano, lo que podría significar que algunos cuerpos plutónicos fueron formados en terrenos alóctonos y posteriormente integrados al continente (Álvarez, 1983; McCourt, et al. 1984; Risnes, 1995). A continuación se sintetiza la relación entre plutonismo y volcanismo, asociado a los cambios en la dinámica de

subducción del occidente colombiano, compilado y modificado de Aspden, *et al.*, (1987), McCourt, *et al.*, (1984), Álvarez, (1983), McCourt, *et al.*, (1984) y Vinasco, *et al.*, 2006 y 2004). En la **Tabla 3** se sintetiza ésta información y en la **Figura 11** se ilustra la distribución de los eventos plutónicos en Colombia desde el Triásico hasta el Terciario.

De manera general en Colombia se han determinado cinco episodios plutónicos durante el Triásico, Jurásico, Cretácico y dos de edad terciaria durante el Paleoceno-Eoceno y Oligoceno-Plioceno, que generaron el emplazamiento de granitos calcoalcalinos tipo I y en menor proporción tipo M (Pitcher, 1982; Álvarez, 1983; Aspden, *et al.* 1987; Chappel y White, 1974; González y Vasallo 2001; Frost *et al.*, 2001; Pompa, 2009; Budd, 2006). Por otra parte, los máximos pulsos del vulcanismo se registran durante el Jurásico-Cretácico, Mioceno medio-superior, y el Plio-Pleistoceno, generando lavas basálticas, dacíticas y rocas piroclásticas calcoalcalinas (Marriner y Millward, 1984; Murcia, 1982).

Durante el Mesozoico, la actividad magmática comienza con el plutonismo Triásico (Episodio A) (Hall y Wood, 1985; González, 1980; Brook, 1984); su distribución geográfica está restringida al este de la zona de Falla Romeral y al flanco occidental de la Cordillera Central. Composicionalmente los intrusivos varían de dioritas/monzonitas a tonalitas, con xenolitos de rocas paleozoicas del cinturón metamórfico pareado (Brook, 1984; Alvarez, 1983). Por lo general son pequeños stocks o cuerpos aislados que provienen al parecer de un magma isotópicamente primitivo (Alvarez, 1983).

El registro de la actividad volcánica se localiza en la actual Cordillera Occidental y en el flanco occidental de la Cordillera Central, y está representado por rocas jurásicas (Grupo Dagua) y cretácicas (Grupo Diabásico) de afinidad toleítica



(Barrero, 1979; Kerr *et al.* 1997; Nivia, 1987). En la Cordillera Oriental, se presentan lavas ácidas e intermedias de edad jurásica hacia el Valle medio y superior del Magdalena (Marriner y Millward, 1984; McCourt, *et al.* 1984; Campbell, 1974; Barrero, 1979; Grosser, 1989; Kerr *et al.* 1997; Nivia, 1987).

El evento plutónico denominado Episodio B, se registra durante el Jurásico como el evento mayor duración; consiste principalmente en batolitos divididos en dos cinturones, el occidental y el oriental (Alvarez, 1983). El cinturón occidental se localiza en el flanco oriental de la Cordillera Central y el cinturón oriental se localiza en el flanco occidental de la cordillera Oriental. El primero está conformado por tonalitas y granodioritas formados a partir de una fuente primitiva mantélica que generó cuerpos plutónicos emplazados rápidamente en altos niveles de la corteza por medio de zonas de falla y el segundo, lo conforman monzonitas, granodioritas y granitos de afinidad calcoalcalina y potásica (Álvarez, 1983; Aspden, *et al.* 1987; Tschanz *et al.*, 1974; Brook, 1984; Goldsmith *et al.*, 1971; París y Marín, 1979). Se destaca que los cuerpos jurásicos se ubican en su mayoría al este de los cuerpos triásicos y presentan mineralizaciones de cobre (Cu) y oro (Au).

Durante el Cretácico, la actividad plutónica del Episodio C, está concentrada en la Cordillera Central, como pequeños cuerpos al occidente del cinturón de los batolitos jurásicos (Alvarez, 1983; Goldsmith *et al.*, 1971; Brook, 1984; Toussaint y Restrepo, 1976). Litológicamente, están conformados por dioritas, cuarzo dioritas y tonalitas e intruyen rocas paleozoicas de la Cordillera Central (Alvarez, 1983; Toussaint y Restrepo, 1976). Algunos cuerpos plutónicos de composición gabrónica en la Cordillera Occidental, intruyen rocas volcánicas del Cretáceo superior y podrían ser cogenéticos con las rocas basálticas toleíticas que intruyen y que pertenecen a terrenos alóctonos (Aspden, *et al.*, 1987; Brook, 1984; Vesga y Barrero, 1978, Feininger y Botero, 1982).

En el Terciario, el magmatismo comienza con rocas plutónicas del Paleoceno-Eoceno, Episodio D, situadas a lo largo de la margen occidental de la Cordillera Occidental (Alvarez y Linares, 1979; Vesga y Barrero, 1978; Brook, 1984). Corresponden a tonalitas, granodioritas y cuarzodiorita, con mineralizaciones y asociaciones a pórfidos cupríferos (Aspend et al., 1987; Alvarez, 1983; Orrego y París, 1996; Orrego, 1975). En la Cordillera Central, el plutonismo Paleógeno está ubicado al oeste y este de la Falla Palestina y al oeste de la Falla de Ibagué; se presentan como pequeños cuerpos de tonalitas y granodioritas que intruyen esquistos Paleozoicos. (Álvarez y Linares, 1979; Gobel y Stibane, 1979; Aspden, *et al.*, 1987).

Durante el Mioceno el vulcanismo está asociado a los efectos de la Orogenia Andina y al rompimiento de la Placa Farallones en las Placas Cocos y Nazca, hacia los 25 Ma (Pilger, 1981; 1983). Este vulcanismo se localiza principalmente en tres zonas: La Cuenca Cauca-Patía, la Cordillera Occidental y la Cordillera Central; en la Cordillera Oriental aunque no se registra vulcanismo, si se presenta actividad hidrotermal y mineralizaciones asociadas a depósitos esmeraldíferos del Triásico superior (Marriner y Millward, 1984; Murcia, 1982; Mantilla, *et al.* 2003). El Plutonismo Neógeno, Episodio E, ocurre en los mismos lugares del vulcanismo miocénico (Aspden, *et al.*, 1987). La mayoría de los cuerpos y batolitos corresponden a dioritas y cuarzodioritas, que afloran en superficie en la Cordillera Occidental. En la Cordillera Central y Cuenca Cauca-Patía, este plutonismo está relacionado con cuerpos porfíricos de composición dacítica, que intruyen rocas sedimentarias miocénicas (Álvarez, 1983; Álvarez, *et al.*, 1978; Álvarez *et al.*, 1979; Brook 1984; López, *et al.*, 2006).

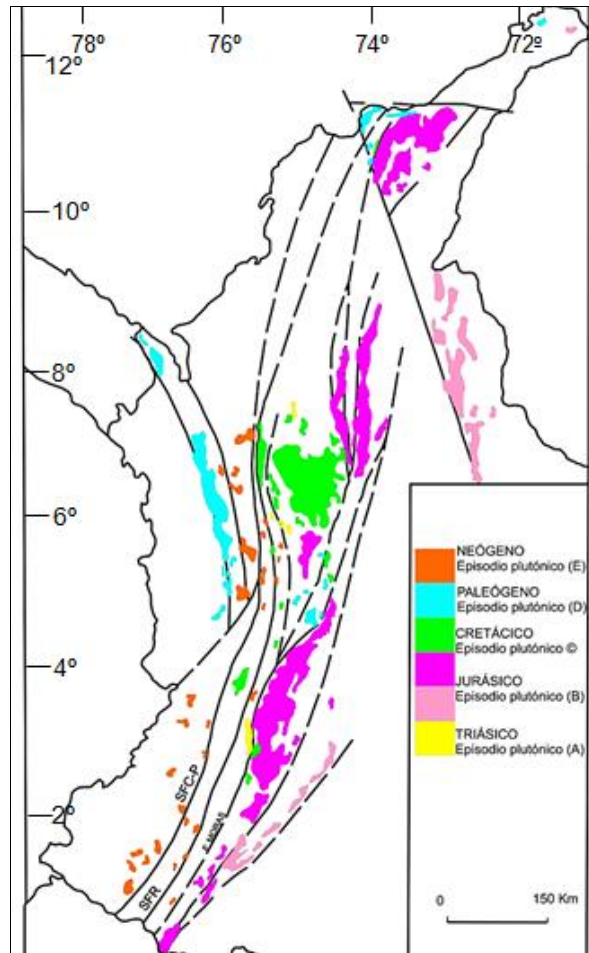
En el Plio-Pleistoceno, el vulcanismo se ubica en la Cordillera Central, en el sector sur de la Cordillera Occidental y la Cuenca Cauca-Patía (Alvarez, 1983; Orrego y París, 1996; Aspden *et al.*, 1987). Se desarrolla un cinturón volcánico activo que

abarca desde el volcán Chiles hasta el volcán Nevado del Ruiz, siendo el volcán de San Diego el más septentrional (Méndez, 1989). Hacia el Norte no se registra vulcanismo cuaternario debido posiblemente, a la horizontalidad en el ángulo de subducción, ya que el plano de Benioff se encuentra segmentado de Sur a Norte, y buza con diferentes ángulos hacia el oriente (Pennington, 1981; Murcia, 1982; Álvarez, 1983; McCourt, *et al.* 1984, Aspden, *et al.* 1987; Risnes, 1995).

**Tabla 3. Relación plutónica-volcánica asociada a cambios en la dinámica de subducción del occidente colombiano.**

Compilado y modificado de (Álvarez, 1983; McCourt, *et al.* 1984; Aspden, *et al.* 1987; Vinasco, *et al.*, 2006). CC: Cordillera Central; COC: Cordillera Occidental; CCP: Cuenca Cauca-Patía; SNSM: Sierra Nevada de Santa Marta. COR: Cordillera Oriental.

ERA	PERIODO	SUBDUCCIÓN	EVENTO PLUTÓNICO	EVENTO VOLCÁNICO
Cenozoico	Terciario	Neógeno	E-W  El episodio E ocurre en la CC, la COC y CCP.  En la COC, mayoría de los cuerpos y batolitos corresponden a dioritas y cuarzodioritas. En la CC y CCP, corresponde a cuerpos porfíricos de composición dacítica.  Este plutonismo debe relacionarse con el vulcanismo actual existente en el eje de la CC y el norte de Ecuador.	El vulcanismo de ácido a intermedio con productos de la serie andesítica que se ubican principalmente en la CC y en el sector sur de la COC y la CCP.  También se forma vulcanismo alcalino, alejado de la zona de subducción.
		Paleógeno	SW-NE  En el NW de Colombia se produce el episodio D, distribuido en la COC Y CC.  Tonalitas y granodioritas (CC y COC) y cuarzodioritas y granodioritas (SNSM)	Volcanismo fisural toleítico asociado con adelgazamiento de la corteza que evoluciona a vulcanismo explosivo calcoalcalino, en el NW de Colombia.
Mesozoico	Cretácico	SW-NE  Alto ángulo de subducción, y producción del episodio C.  Dioritas, cuarzo-dioritas y tonalitas intruyen rocas Paleozoicas de la CC.	Volcanismo toleítico. Grupo Diabásico.	
	Jurásico	NW-SE  Alto ángulo de subducción que genera el episodio B, situado en el flanco occidental de la Cordillera Oriental y en el flanco oriental de la Cordillera Central.  Tonalitas y granodioritas (Cordillera Central) Monzonitas, granodioritas y granitos (COR).	Arco volcánico toleítico. Grupo Dagua.	
	Triásico	NNW-SSE  Anatexia local que generó el episodio A. Se distribuye al este de la Falla Romeral y en el flanco occidental de la CC.  Dioritas Monzonitas y Tonalitas	Margen pasiva en la que no se registra actividad volcánica.	



**Figura 11. Distribución de eventos plutónicos en Colombia desde el Triásico hasta el Terciario.** Modificado de Aspden, et al., 1987.

Dado el objetivo de este trabajo, es importante sintetizar la información disponible sobre los cuerpos plutónicos del Neógeno en el área de estudio (Ver **Tabla 3**).

En el departamento del Cauca, se han reportado un gran número de cuerpos intrusivos de edad Terciaria y de composición intermedia, con textura que varía de fanerítica de grano medio a porfirítica, incluso dentro de un mismo cuerpo y que en tal caso, pueden corresponder a focos subvolcánicos tardíos o cuellos volcánicos (Orrego y París, 1996).

**Tabla 4. Compilación de Intrusivos Terciarios descritos en el cuadrángulo N6 de INGEOMINAS, departamento del Cauca.** Se resaltan en negrilla los cuerpos que se incluyen dentro del área de estudio y han sido muestreados en éste proyecto.

<b>NOMBRE DE INTRUSIVO</b>	<b>TIPO DE ROCA</b>	<b>MINERALOGÍA</b>
Stock de Santa Ana	Tonalita-Diorita	Plagioclasa (Andesina), hornblenda, cuarzo. Secundarios: Calcita, clorita, pirita, granate y saussurita.
Stock de La Chapa	Tonalita-Diorita	Plagioclasa, hornblenda, cuarzo. Secundarios: Clorita, biotita
Stock Garrapatero	Tonalita	Cuarzo, plagioclasa y anfíbol. Secundarios: Clorita, opacos, calcita y epidota
Stock del caserío La Teta	Diorita-Diorita cuarzosa	Plagioclasa, hornblenda y opacos
Stock de Santa Catalina	Tonalitas-Dioritas-Dacitas	Plagioclasa, cuarzo y anfíbol. Secundario: Biotita, clorita, epidota.
Stock de Timba	Tonalita	Cuarzo, plagioclasa y bajo contenido de opacos
Stock San Francisco Guayabal	Tonalita-Dacita	Cuarzo, plagioclasa, anfíboles y opacos
Stock de paso de Bobo-Damián (stock de Suarez)	Dioritas cuarzosas, tonalitas, tonalitas porfiríticas, pórfidos dacíticos y andesíticos	Cuarzo, plagioclasa (andesina) y anfíbol alterado a biotita y opacos. Accesorio: Pirita aurífera.
Stock de Betulia	Dacita porfirítica y pórfido dacítico	Plagioclasa, cuarzo, anfíbol
Stock de Santa Rosa	Pórfidos dacíticos, andesíticos y cuarzodioritas	Cuarzo, plagioclasa, anfíbol. Secundarios: Biotita, clorita.
Stock de Seguengue	Diorita-Diorita cuarzosa que pasa a Tonalita	Plagioclasa (andesina-oligoclasa), anfíbol, cuarzo, granate.
Stock del Rosario	Pórfido dacítico	Cuarzo y plagioclasa alterada a sericita
Stock de Munchique	Tonalitas, tonalitas porfiríticas, pórfidos dacíticos y andesíticos	Plagioclasa, cuarzo, anfíbol y opacos
Stock del Picacho	Tonalitas porfiríticas y dioritas cuarzosas	Plagioclasa, cuarzo, anfíbol y opacos
Stock de Pitayó	Pórfido andesítico	Plagioclasa, hornblenda y opacos
Cuerpos Intrusivos menores a 1Km <sup>2</sup> . <b>La Tetilla y la Yunga.</b>	Tonalita porfirítica. Pórfidos tonalíticos y dacíticos	Cuarzo, plagioclasa (andesina-oligoclasa) y máficos

De acuerdo con los trabajos de Orrego, *et al.*, (1976), Alvarez, (1983) y Orrego y París, (1996), la mayoría de estos cuerpos se observan fracturados y con venillas principalmente rellenas de sílice, asociados a zonas de debilidad como fallas, cauces de ríos y quebradas, entre los que se destacan el cauce del río Cauca y la Falla Cauca-Patía. Petrográficamente los cuerpos poseen composición mineralógica entre tonalita variando gradacionalmente a diorita. Se destacan como minerales secundarios saussurita, clorita, epidota y calcita al parecer por alteración hidrotermal. Como minerales accesorios los minerales opacos son los más abundantes y siempre están presentes, especialmente la pirita. Algunos cuerpos presentan mineralizaciones de oro (Alvarez, 1983).

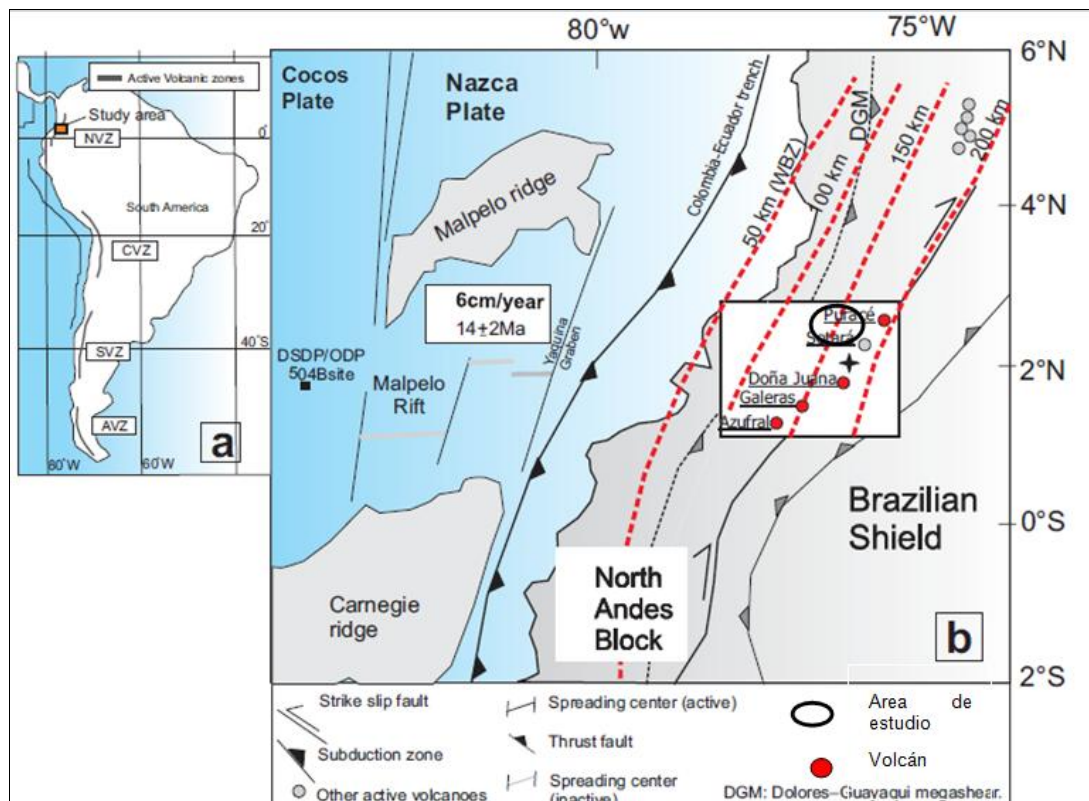
Los intrusivos muestreados en éste estudio se interpretan cronológicamente como de edad neógena, abarcando desde finales del Oligoceno hasta el Plioceno, correspondientes con el episodio plutónico E, caracterizándose principalmente por cuerpos de composición dacítica y texturas porfíricas, (Orrego y París, 1996; Aspdén, *et al.* 1987, Álvarez, 1983; Meissner, *et al.*, 1976; París y Marín, 1979).

## **2.5 MODELO DE GENERACIÓN DE MAGMAS**

A partir de datos y análisis petrográficos, geoquímicos, isotópicos, y geofísicos aplicado a los volcanes colombianos (Meissner *et al.* 1976, Kroonenberg, *et al.* 1982; Murcia, 1982; Marriner y Millwar 1984; Wilson, 1989; Droux y Delaloye, 1996; Marín-Cerón, 2007), se propone el siguiente modelo de generación de magmas. (Ver **Figuras 12 y 13**).

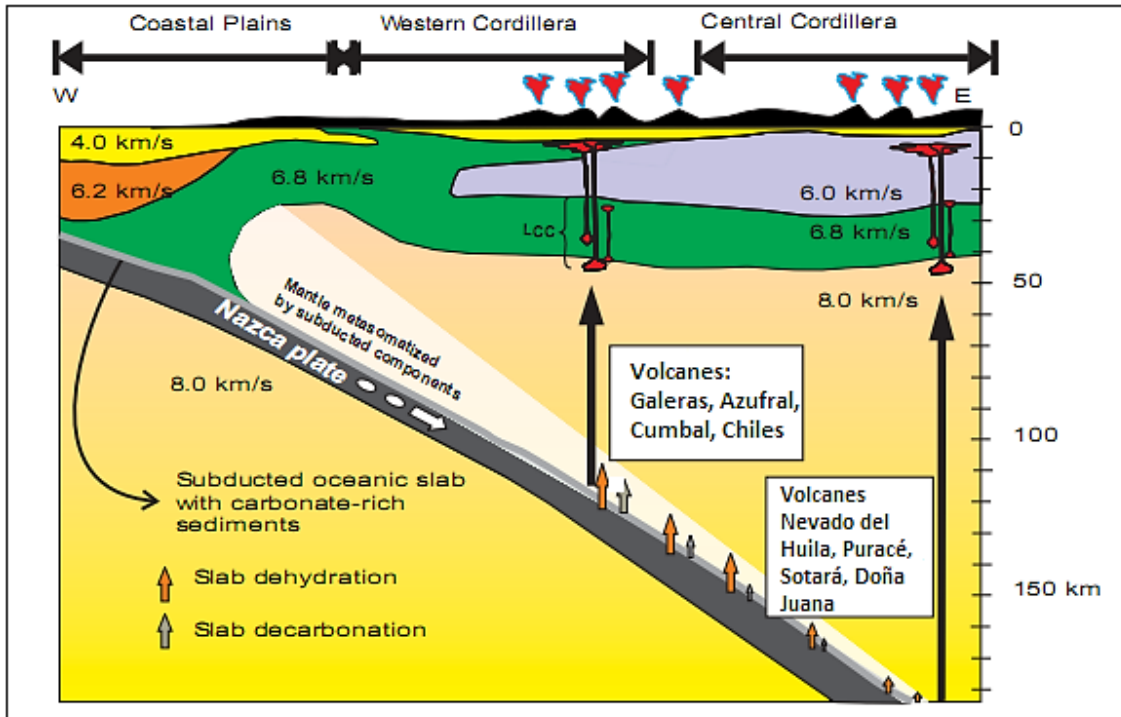
Según análisis geoquímicos e isotópicos, el modelo tectónico para la formación de los magmas corresponde a procesos asociados a la subducción de la Placa Nazca bajo el bloque Andino. La continua deshidratación y dcarbonatación de la placa

subducente, metasomatiza la cuña mantelica, induciendo magmas ricos en fluidos de origen manto-derivado, que se emplazan en la corteza inferior continental, donde sufren procesos de diferenciación magmática, cristalización fraccionada y contaminación cortical. El modelo de Marín-Cerón (2007), indica que es a este nivel de la corteza baja donde se podrían generar los diferentes magmas silicatados con signatura isotópica similar a la de la corteza que está asimilando. Posteriormente, la asimilación de las rocas encajantes de la corteza superior (tipo rocas metamórficas del Complejo Cajamarca) podría ser explicada con la presencia de xenolitos y enclaves metamórficos, generados por fusión parcial de rocas antiguas durante su ascenso a la corteza superior (Weber *et al.* 2002; Marín-Cerón, 2007; Rodríguez-Vargas *et al.*, 2005).



**Figura 12. Configuración de la margen continental activa de los Andes del Norte.** Modificado de Marín-Cerón 2007, Gutscher *et al.* 1999, Droux and Delaloye, 1996.

En línea roja discontinua se observan los límites de profundidad del plano de Benioff. En contorno azul se señala el área de estudio, próxima a los volcanes Sotará y Puracé señalados con puntos rojos.



**Figura 13. Cuña subducente de la Placa Nazca bajo el SW colombiano.** Modificado de Marín-Cerón, 2007.

Sección que muestra las diferentes velocidades y configuración de la corteza inferior. En color celeste: Basamento cristalino Precámbrico Paleozoico metamorfozido con rocas ígneas mesozoicas de la Cordillera Central; color verde: Rocas cretácicas acrecionadas que predominan como basamento en la Cordillera Occidental.



### 3. RESULTADOS

A continuación se presentan los resultados de los análisis petrográficos, geoquímicos y geocronológicos efectuados en los cuerpos intrusivos del sector sur de la Cuenca Cauca-Patía.

Se parte de las características macroscópicas y microscópicas, de la caracterización química de los intrusivos y al final se propone la relación de éstos cuerpos con los pulsos plutónicos, y las rocas volcánicas circundantes.

#### 3.1 DESCRIPCIÓN DE LOS CUERPOS INTRUSIVOS MUESTREADOS

Los afloramientos de estos cuerpos intrusivos son de poca extensión y la mayoría están cubiertos por depósitos cuaternarios. Durante las campañas de campo, se muestrearon 11 cuerpos intrusivos los cuales presentan diferentes grados de meteorización, poseen porcentajes mineralógicos variables de plagioclasa, anfíboles, biotita y cuarzo. La meteorización de estas unidades diaclasadas fue la principal dificultad para el muestreo. Se describen a continuación los cuerpos muestreados en sentido norte-sur dentro del área de estudio. Los detalles petrográficos y localización en mapa geológico se incluyen en los **Anexos 1y 2**.

##### 3.1.1 Stock El Rosario (Ngr)

Esta unidad aflora 2 Kilómetros al noroeste del corregimiento El Rosario, municipio de Cajibío; es un cuerpo alargado en dirección norte noreste, con cima redondeada y pendientes cóncavas. Esta cima constituye la divisoria de aguas entre las cuencas de la quebrada Puente Alto hacia el norte y del río Cajibío hacia el sur. Presenta en algunos sectores meteorización esferoidal, pero en general la

roca está fresca. En el área de estudio, aflora sobre la carretable que conduce de Popayán hacia la vereda La Balastrea (lugar de muestreo), La Troja y San Lorenzo.

Macroscópicamente presenta color gris azulado, textura fanerítica en la que se observan cristales de cuarzo, plagioclasa, anfíboles y piroxenos. Se destacan cristales euhedrales de granate con bordes de reacción y xenolitos de anfibolita masiva de color verde oscuro, aspecto masivo, forma tabular que superan el orden de 1 cm en longitud. Petrográficamente, la roca posee textura fanerítica inequigranular, conformada por fenocristales euhedrales bien desarrollados de plagioclasa, hornblenda, hiperstena, opacos, cuarzo y granate. Como minerales secundarios se presenta clorita, calcita, y epidota asociados a episodios de alteración hidrotermal.

Se destacan cristales euhedrales de plagioclasa tipo labradorita (69% An), con bordes de sobrecrecimiento reabsorbidos; textura sériate y zonación hexagonal. Su extinción es normal hacia el centro e inversa en los bordes. El Anfíbol presente es hornblenda euhedral, cloritizada, con textura esquelética y sieve con inclusiones de plagioclasa anhedral, granate, epidota y opacos. El ortopiroxeno es hiperstena, presente como inclusiones euhedrales de hábito tabular en cristales de hornblenda y plagioclasa. Los opacos se presentan como cúmulos e inclusiones en cristales de hornblenda.

A partir de éstas características petrográficas, se deducen dos etapas de cristalización en la plagioclasa. La primera etapa, nuclea cristales euhedrales con extinción normal, con centro cálcico que llega a ser sódico, conforme al orden de cristalización, alcanzando el desarrollo de cristales de hasta 2.44 mm de diámetro; ésto indica condiciones estables de cristalización con prolongados tiempos de

residencia, seguida por una etapa posterior que afecta el mismo cristal, generando bordes anhedrales de hasta que generaron los bordes de crecimiento de 0.1mm de espesor.

La extinción inversa en los bordes del cristal, revelan un cambio composicional de sódico a cálcico, tal vez debido a una inyección de magma que desestabilizó las condiciones de la cámara magmática. Según la composición labradorita en la plagioclasa, la presencia de granate y anfíboles, se revela una composición inicial más básica que fue variando a condiciones más hídricas evidenciado en la textura esquelética del anfíbol. La presencia de xenolitos ricos en hornblenda, y la presencia de granates confirman condiciones profundas de cristalización y contaminación con la roca encajante, que en éste caso corresponderían a rocas ultrabásicas, que infrayacen rocas sedimentarias del Grupo del Cauca.

### **3.1.2 Intrusivo La Tetilla (Ngpa)**

Aflora sobre la margen derecha del río Palacé, próximo al puente sobre el río, en la vereda San Rafael, al noroeste del cerro La Leticia también conocido como La Tetilla. Intruye rocas diabásicas moderadamente meteorizadas, pertenecientes a las ofiolitas de la Tetilla. Se observa diaclasado, meteorizado con diques caolinizados que se explotan localmente y de manera artesanal (Acevedo y Cardozo, 1986). Macroscópicamente es una roca de color gris con textura porfídica en la que sobresalen fenocristales euhedrales de plagioclasa, biotita cloritizada y cuarzo bipiramidal.

Petrográficamente se caracteriza por una textura de flujo marcada por la orientación de fenocristales tabulares de biotita que rodean megafenocristales de biotita, plagioclasa y cuarzo, embebidos en una matriz de grano muy fino,

equigranular, microlítica, conformada por cristales alotriomórficos de plagioclasa subhedral, calcita anhedral, opacos anhedrales, y sericita.

La plagioclasa es de tipo andesina 40% An y según su tamaño y forma se distinguen dos generaciones: una euhedral que abarca tamaños mayores a 1mm y una segunda generación subhedral de menor tamaño. Los cristales de biotita, presentan dos generaciones, la primera posee cristales euhedrales, cloritizados con bordes corroídos y sericitizados, que sobresalen por su tamaño, mayor a 1.5 mm de diámetro y la segunda generación, de menor tamaño pero mayor abundancia, donde los cristales varían de euhedrales a subhedrales están cloritizados y rodean megafenocristales de biotita, plagioclasa y cuarzo (textura de flujo). El cuarzo posee formas subherales con bordes redondeados y de reabsorción.

El buen desarrollo que poseen las primeras generaciones de fenocristales, asocia su desarrollo a condiciones ideales de cristalización dentro de la cámara magmática. La presencia de fenocristales piramidales de cuarzo, evidencia altas temperaturas, pero sus bordes reabsorbidos y redondeados inducen calentamientos posteriores, debidos tal vez a inyecciones de magma de similar composición o levemente más básica, que formaron bajo condiciones de enfriamiento más rápida las segundas generaciones de cristales en la matriz, con formas predominantemente subhedrales.

### **3.1.3 Intrusivo La Yunga (Ngy)**

Aflora sobre la vía que conduce de la vereda La Yunga hacia río Hondo. Esta meteorizado y en algunos sectores es difícil diferenciarlo de ignimbrita meteorizada que lo rodea. Es un cuerpo intrusivo de textura porfídica que se caracteriza por la presencia de fenocristales de plagioclasa, cuarzo y biotita. Se

destaca el cuarzo bipiramidal (cuarzo  $\beta$ ), euhedral, fracturado, quebradizos al tacto, que alcanzan los 2 cm de longitud. En algunos sectores sobre la carretable, afloran bloques redondeados de hasta 3m de diámetro, de aspecto fresco, producto de la meteorización esferoidal, y en otros sectores se encuentra alterado y cubierto por una capa de ceniza de aproximadamente 3m de espesor. Según relaciones de campo se observa en contacto directo con ignimbritas rosadas de la Formación Popayán, de aspecto muy similar al intrusivo meteorizado.

En sección delgada, los cristales de plagioclasa están sericitizados y calcificados. El cuarzo bipiramidal presenta extinción ondulatoria y la biotita esta cloritizada y sericitizada. La matriz es de grano fino, conformada principalmente por cristales subhedrales y anhedrales de cuarzo y plagioclasa sericitizada. Esta roca presenta alteración hidrotermal tipo propilítica representada por la asociación, calcita, clorita y epidota.

Este cuerpo es el de composición más ácida en el área de estudio y la plagioclasa es de composición Andesina (32% An). La textura de flujo es marcada por la orientación de la biotita, por lo que puede asociarse con cuerpos subvolcánicos. Se observa textura seriate con cristales de cuarzo de varios tamaños.

#### **3.1.4 Intrusivo Patico (Ngpa)**

Aflora sobre la vía que comunica la ciudad de Popayán con el municipio de Puracé, en el sector conocido como Vueltas de Patico. Este cuerpo presenta meteorizados moderada y fracturado e intruye las rocas del complejo Quebradagrande. Macroscópicamente es una roca porfídica, de color gris verdoso con fenocristales de cuarzo bipiramidal, plagioclasa y hornblenda bien desarrollados y clorita.

En sección delgada se observa una textura porfídica en la que sobresalen cristales de plagioclasa de euhedral a subhedral, cuarzo bipiramidal de subhedral a anhedral redondeado; hornblenda euhedral a subhedral cloritizada dentro en una matriz equigranular, holocristalina, de grano muy fino, conformada principalmente por cristales anhedrales y subhedrales de plagioclasa, cuarzo y opacos. Microscópicamente la plagioclasa sericitada es tipo andesina (34% An) con bordes redondeados reabsorbidos.

Se observan cristales de cuarzo redondeados y deformados con embahiamientos rellenos por la asociación prehnita-pumpellita. El anfíbol es de tipo hornblenda, está cloritizado y totalmente reemplazados por prehnita-pumpellita, posee formas euhedrales variando a subhedrales y anhedrales, con abundantes inclusiones de opacos subhedrales. En menor proporción se observan cristales de apatito en la matriz. La roca presenta alteración hidrotermal caracterizada por clinozoisita, prehnita-pumpellita y pennina, definida como alteración propilítica.

Se induce a partir de las texturas de bordes redondeados en los cristales de plagioclasa, cuarzo y anfíbol, que posterior a su desarrollo sufrieron sobrecalentamiento, debido tal vez a una nueva inyección de magma a mayor temperatura que la que poseía la cámara magmática para ése momento.

### **3.1.5 Intrusivo Quebrada La Carpintería (Ngca)**

Aflora como un cuerpo muy fracturado sobre el cauce de la quebrada La Carpintería, próximo a la confluencia con el río Cauca. Se localiza al oeste de la Falla San Jerónimo, intruyendo rocas del Complejo Quebradagrande. Macroscópicamente se describe como una roca maciza, porfídica en la que sobresalen fenocristales de plagioclasa, cuarzo y hornblenda dentro de una matriz microcristalina.

En sección delgada se observan los fenocristales de plagioclasas con zonación múltiple y bordes moderadamente redondeados. El cuarzo se encuentra totalmente redondeado con bordes reabsorbidos por el material de la matriz y la hornblenda se encuentra totalmente reemplazada por clorita tipo Pennina con inclusiones de prehnita-pumpellita, bordes redondeados y coronas de óxidos. Se destaca en la sección otra población de anfíboles euhedrales de aspecto más fresco. La matriz de grano fino, está compuesta principalmente por plagioclasa, cuarzo y opacos de forma anhedral y subhedral.

La textura de reacción en las plagioclasas con zonación, evidencia crecimientos concéntricos de hasta 4 anillos a partir de un núcleo euhedral, lo anterior sugiere por lo menos dos inyecciones magmáticas de similar composición que permitieron la generación de anillos en cuatro etapas. Su composición en la primera varía de cálcico a sódico, seguida por una segunda etapa de zonación también cálcica-sódica, que pudo generar los bordes redondeados y reabsorbidos en los cristales de cuarzo y anfíbol.

### **3.1.6 Intrusivo Pusná (Ngpu)**

Aflora sobre el camino que conduce del Cerro Pusná al sector de Patía, en el borde de la estructura caldérica de Paletará. Macroscópicamente es una roca fanerítica de color grisáceo, en la que se distinguen fenocristales euhedrales de plagioclasa, anfíboles y piroxenos, con alto contenido de ferromagnesianos. Según relaciones de campo y su localización al este de la Falla San Jerónimo, intruye rocas del Complejo Cajamarca.

En sección delgada se observa una textura fanerítica inequigranular, en la que se distinguen cristales euhedrales de plagioclasa, ortopiroxeno euhedral y subhedral, y cuarzo anhedral. La plagioclasa es tipo labradorita (54% An), con bordes de

reabsorción, zonación múltiple, con textura sieve hacia el núcleo, maclado albita–Carlsbad y albita, con múltiples inclusiones de opacos euhedrales y anhedrales. El ortopiroxeno tipo Hiperstena, se presenta en dos generaciones, la primera con núcleo de ortopiroxeno y bordes de oxihornblenda indicando un proceso de uralitización. La segunda generación, se caracteriza por su aspecto fresco, forma euhedral, de hábito octogonal, y tabular. Están fracturados, con inclusiones de opacos anhedrales. En menor proporción se observan cristales euhedrales de apatito y cuarzo anhedral.

La composición de la plagioclasa, la presencia de ortopiroxeno y el escaso porcentaje de cuarzo amorfo, confirman para éste cuerpo una fuente magmática más básica. Los anillos concéntricos de zonación normal en la plagioclasa y los bordes de reacción, inducen dos episodios de inyección magmática que permitieron también el desarrollo de dos generaciones de ortopiroxeno. Al parecer la primera etapa cristaliza siguiendo la serie de Bowen, pero es desestabilizada por la segunda etapa, generando los bordes de reacción y uralitización en los cristales ya formados en el ortopiroxeno, que indicaría llegada de agua al sistema, favoreciendo una segunda generación de hiperstena de aspecto más fresco y bordes de reacción en los cristales de plagioclasa. Se destaca que éste cuerpo no se observó alteración hidrotermal.

### **3.1.7 Intrusivo El Encenillo (Ngen)**

Este cuerpo se encuentra ubicado, fuera del área de estudio sobre la vía que conduce de Popayán hacia el municipio de Rosas. Macroscópicamente es una roca porfídica con fenocristales de plagioclasa y anfíbol, que intruye rocas del Complejo Arquía.



Microscópicamente se observa una textura porfirítica, en la que sobresalen cristales euhedrales de plagioclasa, anfíbol, y opacos dentro de una matriz microlítica, en la que se distinguen cristales tabulares de plagioclasa, cristales anhedrales de cuarzo y anfíbol con bordes de oxihornblenda.

La plagioclasa es tipo Andesina (37% An), euhedral con textura sériate y aspecto fresco, presenta bordes reabsorbidos, y zonación múltiple; con inclusiones de plagioclasa euhedral y subhedral, cuarzo anhedral y epídota euhedral. Los cristales euhedrales de anfíbol tipo hornblenda, presentan núcleo frescos y bordes de oxihornblenda. Se observan además cristales subhedrales opacos, apatito y epídota.

Se induce analizando la petrografía que los fenocristales euhedrales bien desarrollados, de aspecto fresco, tuvieron condiciones óptimas para su desarrollo. Posteriormente estos fenocristales exhiben características de reacción con el fundido circundante, como se observa en los bordes reabsorbidos de plagioclasa y en las coronas de bordes oxidados y opacos asociados en el anfíbol. Los múltiples anillos zonados en fenocristales de plagioclasa revelan continuas inyecciones magmáticas asimiladas dentro de la cámara durante largos tiempos de residencia, con posible asociación a un proceso de mezcla de magmas.

### **3.1.8 Intrusivo Oso Guaico (No)**

Aflora sobre la vía La Sierra - Rio Blanco, sobre el cauce de la quebrada Oso Guaico, e intruye rocas del Granitoide de Bellones. Macroscópicamente es una roca porfirítica, en la que sobresalen fenocristales euhedrales de plagioclasa, anfíbol tipo hornblenda, y biotita dentro de una matriz microlítica, conformada por plagioclasa y cuarzo anhedral.

Al Microscopio se observan bordes redondeados en los fenocristales euhedrales de plagioclasa; los anfíboles, tipo hornblenda, subhedrales, están rodeados por una fina corona de óxidos. La plagioclasa es tipo labradorita (An 63%), tiene zonación oscilatoria, fracturada, con inclusiones de anfíbol, apatito y biotita euhedral, cristales anhedrales de calcita, y opacos subhedrales. Existe una segunda generación de plagioclasa de menor tamaño con formas subhedrales, con bordes redondeados, reabsorbidos, y zonación oscilatoria. El anfíbol tipo hornblenda, se presenta como cristales euhedrales y subhedrales alcanzando formas redondeadas, bordes de reabsorción, y embahiamiento; una segunda generación de anfíbol se distingue por su aspecto un poco más fresco, de menor tamaño y forma más euhedral. En algunos sectores se observa la orientación de cristales tabulares alrededor de fenocristales de plagioclasa euhedral, marcando direcciones de flujo. La biotita se observa euhedral y subhedral con coronas de opacos, bordes corroídos y embahiamiento. Se observa un reemplazamiento por opacos y calcita anhedral. En la matriz de la roca se aprecian en menor proporción cristales euhedrales de circón y apatito. La matriz es fina y en ella se alcanzan a distinguir microlitos de plagioclasa anhedral y subhedral y cuarzo anhedral. Los cristales de grano más grueso suelen agregarse alrededor de fenocristales de anfíbol fresco y plagioclasa. Se observan múltiples fracturas en todos los fenocristales y algunas en algunos casos fragmentos de ellos.

Éste cuerpo presenta características composicionales más básicas e hídricas, por la composición de la plagioclasa y la presencia de anfíbol y biotita. Posiblemente durante el proceso de cristalización se dio una nueva inyección magmática que reaccionó con los fenocristales de plagioclasa, hornblenda y biotita y generó el redondeamiento y los bordes de reabsorción. Una segunda segunda generación de anfíbol marca unas texturas de flujo, lo que indicaría condiciones de emplazamiento subvolcánico.

### **3.1.9 Intrusivo El Pantano (Ngpt)**

Aflora en la cantera El pantano, sobre la carreteable que conduce al municipio de Río Blanco. Es una roca de color marrón claro, de textura fanerítica, en la que se distinguen cristales de plagioclasa y piroxenos que intruye rocas del Complejo Arquía.

Los cristales de plagioclasa subhedral y anhedral son de tipo andesina (An 43%), con maclado albita. Posee bordes de crecimiento reabsorbidos e inclusiones de epidota y ortopiroxeno anhedral. El ortopiroxeno tipo hiperstena, se presenta en cristales subhedrales y anhedrales cloritizados, con inclusiones de opacos. Se observan escasos cristales anhedrales de cuarzo.

La textura fanerítica de la roca, revela condiciones profundas de cristalización, para un magma básico que bajo procesos de cristalización fraccionada permite la cristalización de ortopiroxeno y plagioclasa, con formas subhedrales y anhedrales. La epidota y clorita tipo peninna, se asocian a eventos de fluidos hidrotermales que causaron inclusiones y reemplazamiento en la plagioclasa y el ortopiroxeno.

### **3.1.10 Intrusivo El Tablón (Ngt)**

Se localiza en la vertiente occidental del Cerro Punta Urco, en la vereda El Tablón, muy próximo al cauce del río Guachicono. Intruye rocas del Granitoide de Bellones y del Complejo Arquía. Es una roca porfídica en la que sobre salen fenocristales de plagioclasa, hornblenda, y biotita.

Al microscopio se describe una matriz de grano muy fino, de la misma composición de los fenocristales. Los fenocristales de plagioclasa presenta textura seriate, en cristales euhedrales, bien desarrollados, zonados, con bordes

reabsorbidos por la matriz. El Anfíbol es tipo Hornblenda, de forma euhedral, y aspecto fresco. La Biotita es euhedral, con bordes redondeados. Posee inclusiones de opacos anhedrales y subhedrales. Los minerales opacos suelen observarse distribuidos aleatoriamente en la sección.

La textura porfirítica revela condiciones someras de cristalización, al igual que las direcciones de flujo marcadas por los minerales de hábito tabular. La matriz de ésta roca es particularmente diferente a los otros cuerpos porfídicos analizados, ya que se observa con formas predominantes de los cristalitas alargadas y tabulares, debido tal vez a condiciones de enfriamiento confinadas y someras.

### **3.1.11 Intrusivo Guachicono (Nggc)**

Éste cuerpo se localiza sobre el cauce del río Guachicono, sobre la margen izquierda e intruye rocas del Complejo Arquía. Se presenta como un cuerpo con textura porfídica, en la que sobresalen fenocristales de plagioclasa, anfíbol, cuarzo, biotita.

En sección delgada, la roca se describe como una roca de textura porfídica en las que se destacan plagioclasas con múltiple zonación, biotitas bien desarrolladas, cuarzo bipiramidal, y opacos euhedrales con bordes levemente redondeados. Su matriz es equigranular, de grano muy fino, de la misma composición de los fenocristales, presenta además calcita anhedral, cuarzo anhedral y opacos euhedrales.

Los fenocristales de plagioclasa poseen composición Andesina, se observan con textura Sieve y contornos redondeados. El anfíbol es tipo hornblenda, y se observa cloritizado y el cuarzo es bipiramidal con bordes redondeados. Los

fenocristales de biotita presentan embahiamiento. La calcita se observa como inclusiones en plagioclasa, biotita y anfíbol.

A partir de la mineralogía, se puede inducir que el cuarzo bipiramidal con bordes redondeados indica condiciones iniciales de alta temperatura, que se vieron alteradas por inyecciones más calientes y de composición más básica a la que debía existir en ése momento dentro de la cámara magmática. Cristales anhedrales de calcita, epídota y clorita que se presenta como inclusiones o reemplazamientos parciales en cristales de plagioclasa, anfíbol y biotita muestran alteración hidrotermal.

### **3.2 ALTERACIÓN HIDROTERMAL**

La mayoría de cuerpos intrusivos descritos muestran asociación mineralógica tipo: clorita+calcita+epídota y minerales opacos. Según Meyer y Hemley, (1967) la alteración hidrotermal se clasifica en propilítica, argílica intermedia, argílica avanzada, sericítica y potásica.

Según la asociación mineral, la alteración predominante en estos cuerpos corresponde al tipo propilítica, que suele ser mesotermal, caracterizada por la presencia de calcita y/o epídota.  $H_2O$ ,  $CO_2$ , S, pueden agregarse a la roca y comúnmente se presentan también albita, calcita y pirita. Éste tipo de alteración presenta bajo grado de hidrólisis en los minerales, y por lo mismo tiende a localizarse en rocas marginales.

Según Corbet y Leach (1998), minerales del grupo de la clorita, y los calcosilicatos, se forman en condiciones de pH neutro a ligeramente alcalino, y en condiciones frías (150-200°C), y la epídota, de cristalización incipiente, suele

formarse alrededor de 180-200 °C. Según estas características, predomina un hidrotermalismo de baja temperatura, que debió aprovechar el múltiple fracturamiento presente en estos cuerpos para afectar las rocas en superficie.

**Tabla 5. Tipo de roca según clasificación Streckeisen, 1974 y tamaños de grano, en intrusivos muestreados de la Cuenca Cauca- Patía. (Le Maitre, 2002).**

<b>NOMBRE INTRUSIVO</b>	<b>TIPO DE ROCA (STRECKEISEN, 1974)</b>	<b>CARACTERÍSTICA TEXTURAL</b>
El Rosario	Gabro	Fanerítica
El Rosario	Cuarzogabro	Fanerítica
La Tetilla	MicroTonalita	Porfirítica
La Yunga	MicroTonalita	Porfirítica
Patico	MicroTonalita	Porfirítica
Carpintería	MicroCuarzodiorita	Porfirítica
Pusná	Gabro	Fanerítica
El Encenillo	MicroDiorita	Porfirítica
Oso Guaico	MicroGabro	Porfirítica
El Pantano	Diorita	Fanerítica
Guachicono	MicroGabro	Porfirítica
Guachicono	MicroCuarzodiorita	Porfirítica

### 3.3 GEOQUÍMICA

A continuación se sintetiza la información sobre la caracterización química de los once intrusivos muestreados en éste estudio. Se emplea la composición de elementos mayores, menores y trazas, descritos a continuación en la **Tabla 5**. Los análisis químicos de elementos mayores emplearon absorción atómica (A.A) para determinar Fe total, Al, Mn, Ca, Mg, Na, K, Si, gravimetría para determinar humedad (LOI) y el P y volumetría para FeO. Elementos traza analizados Ti, Sr, Zr, Ba, Rb se determinaron por fluorescencia de rayos X (XRF) y Cu, Zn, Ni, Co, Cr, V, Pb determinados por absorción atómica (A.A).

Durante la toma de muestras en campo y la preparación de muestras en laboratorio, se procuró tomar los fragmentos más frescos de roca, sin embargo algunas muestras presentan alteración hidrotermal, representada por la asociación calcita+epídota+clorita, que pueden alterar el resultado de los análisis geoquímicos.

En la interpretación de los datos y la construcción de diagramas se emplea el software libre con licencia pública, Geochemical Data Toolkit-GCDkit 3.0 beta versión 2011 disponible en el sitio web [www.gcdkit.org](http://www.gcdkit.org), el cual plotea concentraciones normalizadas y permite el análisis de datos geoquímicos a partir de gráficas específicas para rocas ígneas volcánicas y plutónicas (Janoušek et al., 2006).

**Tabla 6. Geoquímica de elementos mayores, menores (en % wt) y trazas (en ppm) en intrusivos de la Cuenca Cauca Patía, sin normalizar.**

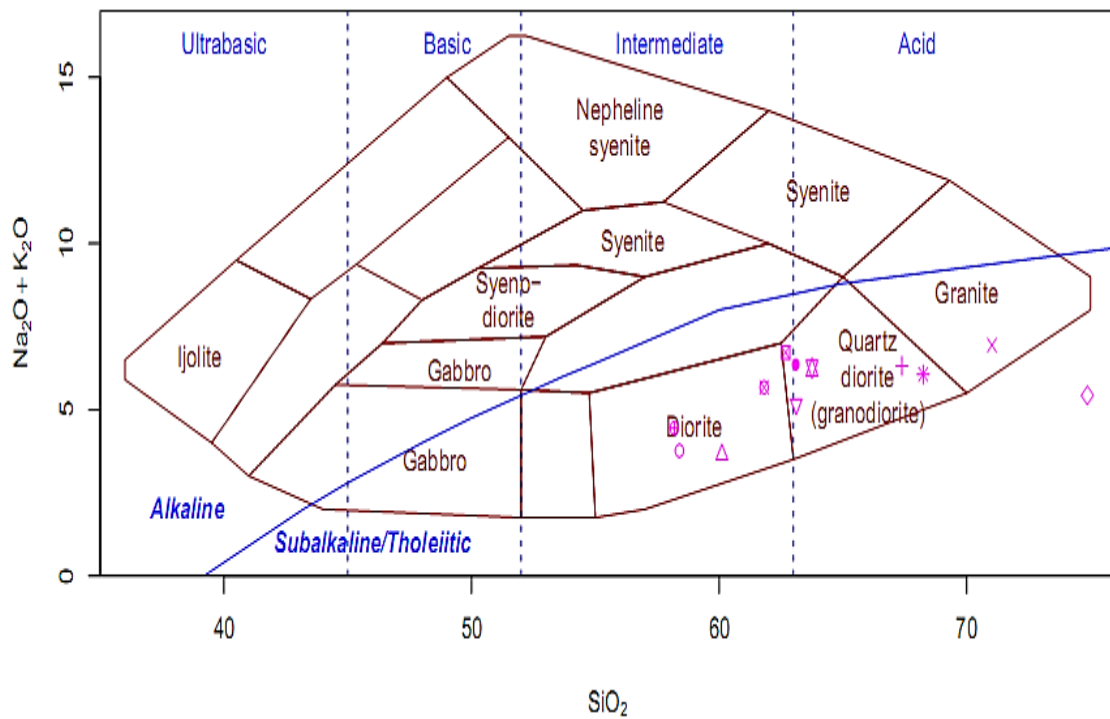
	Rosario PKSW095	Rosario PKSW097	Tetilla PKSW098	Yunga PKSW103	Patíco SESW033	Carpintería SESW050	Pusná SESW094	Encenillo JLSW005	Oso JLSW008	Pantano JLSW023	Tablón JLSW063	Guachicono JLSW072
Wt %	○	△	⊕	⊗	◇	▽	□	⬠	●	⊕	⬠	⊗
SiO <sub>2</sub>	58,4	60,11	67,38	71,02	74,87	63,11	62,68	68,24	63,11	58,19	63,75	61,82
TiO <sub>2</sub>	0,62	0,67	0,4	0,23	0,22	0,43	0,68	0,47	0,52	0,97	0,55	0,48
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	17,01	16,44	15,3	14,55	11,9	15,3	16,82	15,12	14,74	15,87	15,87	15,87
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (t)	7,35	7,36	2,87	1,34	2,92	4,8	5,03	3,03	5,55	8,62	4,47	4,49
MnO	0,17	0,15	0,08	0,05	0,06	0,09	0,06	0,05	0,12	0,14	0,09	0,09
MgO	2,85	3,4	1,29	0,38	0,86	2,74	1,33	1,26	3,28	3,22	2,89	2,39
CaO	9,23	7,14	3,36	2,38	1,4	5,32	5,46	4,2	4,48	5,88	4,62	4,9
Na <sub>2</sub> O	2,88	2,22	5,03	3,76	4,33	3,68	4,68	4,33	4,12	4,38	4,17	4,12
K <sub>2</sub> O	0,88	1,43	1,29	3,18	1,1	1,48	2,04	1,73	2,23	0,06	2,08	1,55
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	1,48	2	2,72	2,78	1,38	3,36	1,06	1,18	0,88	2,86	1,82	3,28
LiO	0,32	0,2	0,16	0,26	0,1	0,26	1,17	0,36	0,66	0,36	1	0,18
Sumatoria	99,36	100,51	99,99	101,13	101,03	99,99	100,85	99,97	99,68	100,54	101,31	99,18
FeO*	2,98	3,28	1,38	1,23	1,93	2,93	0,93	2,23	4,43	1,28	2,88	2,28
Elementos traza (ppm)												
Ba	692	1736	4085	3367	1246	1470	2081	1251	1801	N. D	1822	1746
Rb	13	33	32	84	15	26	37	33	57	6	35	29
Sr	449	406	1535	300	122	576	900	571	735	347	695	603
Zr	78	99	131	55	106	65	119	94	162	93	128	58
Ni	8	6	6	4	2	18	6	6	6	12	2	8
Co	18	16	14	8	8	14	12	8	12	24	8	14
Cr	12	10	4	1	4	54	6	8	14	4	16	28
Cu	22	6	1	1	10	8	190	12	14	78	12	14
Zn	38	56	32	66	44	52	72	46	44	62	34	68
V	68	52	26	4	18	80	82	38	56	106	36	92
Pb	<1	4,8	5,4	7,8	10,4	1,2	1,2	<1	5	2,8	1	3,4

### 3.3.1 Análisis de Elementos Mayores

Al plotear los análisis químicos de elementos mayores, en el diagrama de álcalis total (TAS) de Cox *et al.* 1979, a partir del cual se define el dominio alcalino o

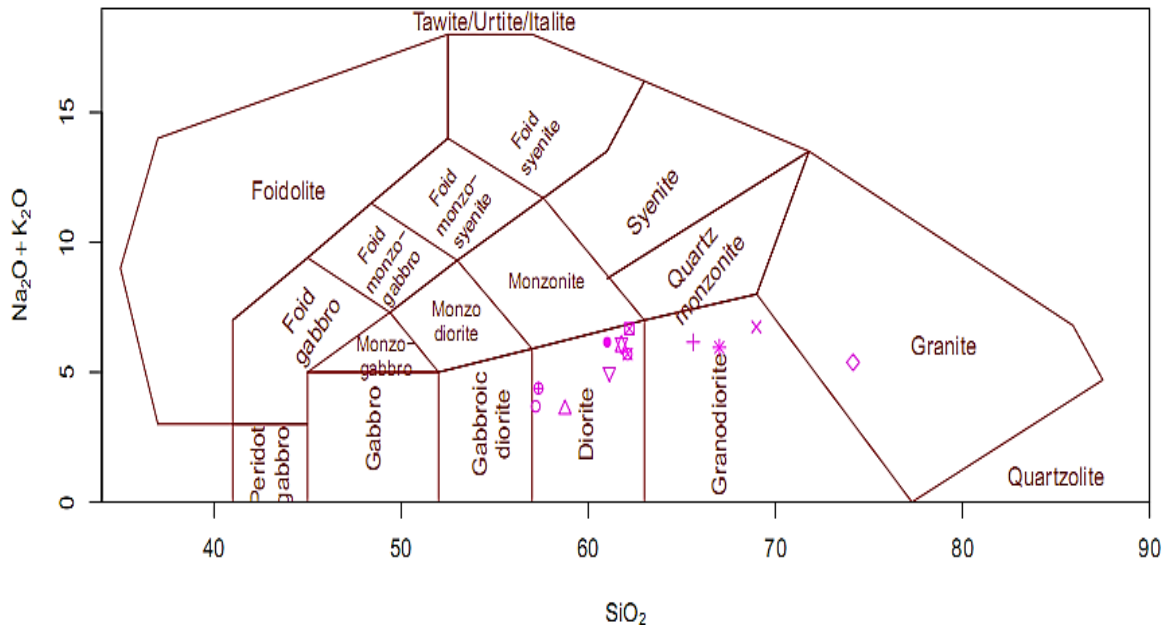


subalcalino/Toleítico de las rocas granitoides, su contenido de  $\text{SiO}_2$  y tipos de roca, en este caso varían de ácida a intermedia, entre granitos, granodioritas y dioritas, destacándose que el intrusivo Patico que sale del diagrama por su bajo contenido de álcalis y alto contenido de sílice. Los resultados arrojan que los intrusivos muestreados pertenecen a la serie subalcalina, ya que todas las muestras se ubican bajo la línea frontera propuesta por Irvine y Baragar en 1971. (Sheth et al., 2002; Wilson, 1989).



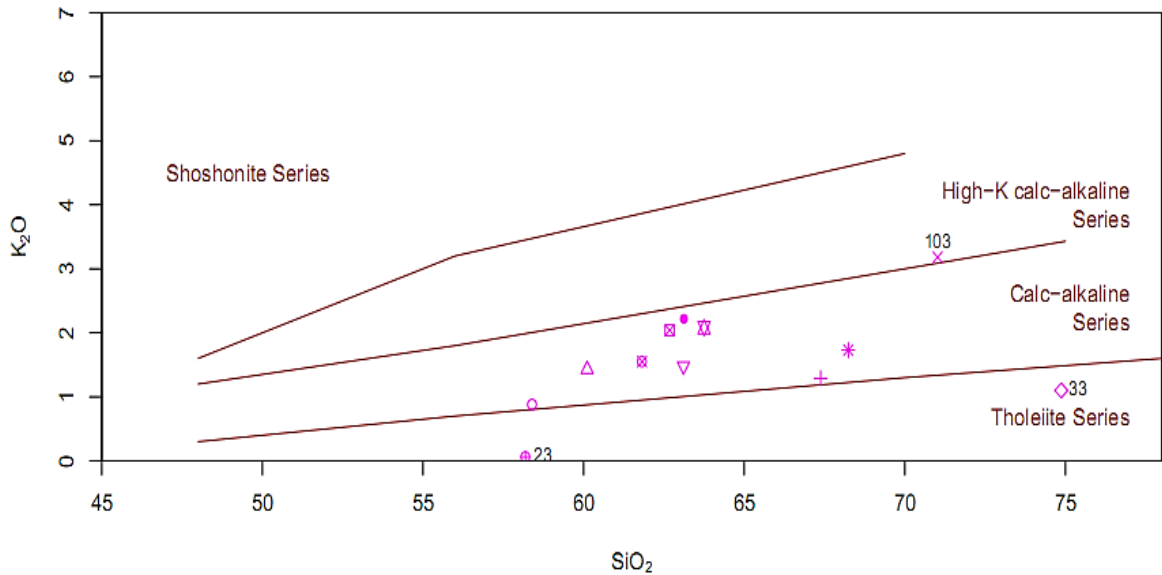
**Figura 14. Diagrama TAS de Cox et al. 1979.**

Buscando resolver la incertidumbre sobre el intrusivo Patico, se plotean los datos en el diagrama Middlemost, 1985, en el que se clasifica como granito y aunque varían levemente, se conservan los mismos tipo de roca entre granito, granodiorita y diorita para los intrusivos de la Cuenca Cauca-Patía.



**Figura 15. Diagrama TAS de Middlemost, 1985 para rocas plutónicas.**

La serie subalcalina puede dividirse a su vez en otras asociaciones magmáticas, que permiten diferenciar su contenido de potasio, y saturación de sílice (Sheth *et al.*, 2002). El Diagrama de discriminación de series magmáticas de Pecerrillo y Taylor 1976, permite clasificar éstas rocas dentro de 4 asociaciones magmáticas según su contenido de  $K_2O$ : Toleítica, calcoalcalina, calcoalcalina alta en potasio y shoshonítica, que aunque no son exclusivas de un ambiente tectónico particular, si prevalecen en ciertos ambientes tectónicos. (Cas y Wright, 1897; Sheth, *et al.* 2002). A partir del análisis de ésta gráfica, la mayoría de los intrusivos mustreados pertenecen a la serie calcoalcalina, excepto los intrusivos El Pantano y Patico, que pertenecen a la serie toleítica, por sus bajos contenidos de  $K_2O$  y el intrusivo la Yunga, que pertenece a la serie calcoalcalina alta en potasio.



**Figura 16. Diagrama de discriminación de series magmáticas según sus contenidos de SiO<sub>2</sub> vs K<sub>2</sub>O (Pecerillo y Taylor, 1976).**

La asociación calcoalcalina, impera en arcos magmáticos asociados a las zonas de subducción. Se distingue por una suite de rocas sobresaturadas en sílice, que poseen mayor contenido de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> que la asociación toleítica. Los ambientes tectónicos relacionados corresponden a arcos de islas y márgenes continentales activos (Sheth et al., 2002; González-Partida et al. 1987).

La mayoría de rocas granitoides, se pueden clasificar geoquímicamente según su contenido de alúmina, e inducir la composición de la región fuente, la naturaleza de los procesos de fundido, relaciones tectónicas y tipo de granitoide (Chappel y White, 1974; Frost, 2001; Budd, 2006; Cas y Wright, 1987; Clemens, et al. 1986, Whalen, 1993).

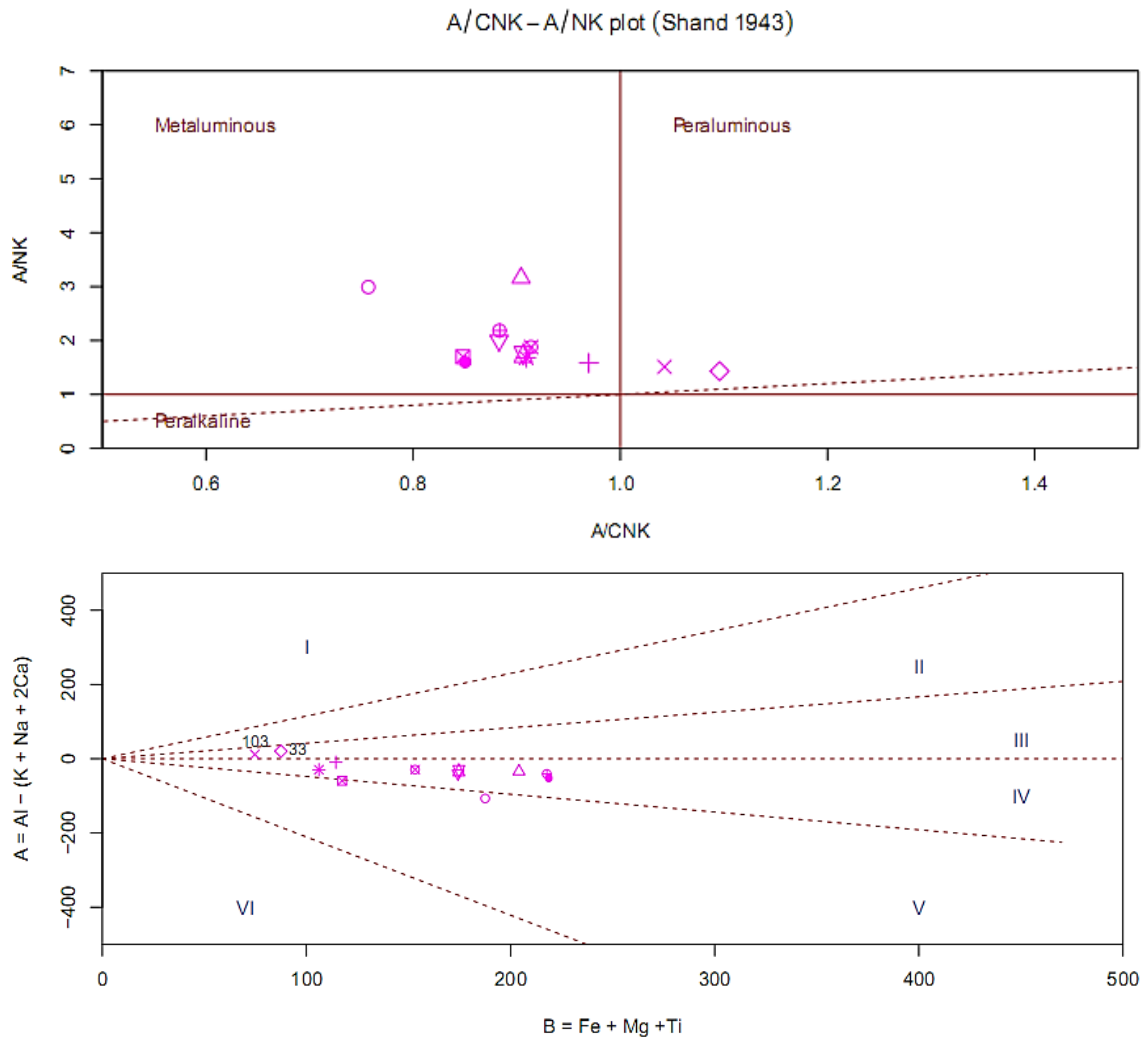
Para determinar el Índice de Alúmina, se emplea el diagrama de Shand 1943, que discrimina entre composiciones metaluminosas, peraluminosas y peralcalinas, a partir de la relación molecular (A/CNK): (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/CaO+Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O) vs. (A/NK):

$Al_2O_3/Na_2O+K_2O$ . Ésta expresión toma en cuenta la presencia de apatito, así cuando el  $A/CNK > 1$ , es llamado peraluminoso (saturado en alúmina), esto significa que poseen más aluminio del que pueden incorporar los feldespatos, y deben tener otra fase aluminosa presente (biotita aluminosa, muscovita, cordierita, granate o polimorfos de aluminio), y suelen provenir de una fuente sedimentaria (Frost, et al. 2001; Zen, 1988; Chappel y White, 1974).

Si el  $A/CNK < 1$  y la relación  $Na+K < A$ , la roca es metaluminosa. Ésta roca se caracteriza por exceso de Ca, después de que el aluminio ha sido incorporado en los feldespatos, como consecuencia se forman fases ricas en Ca, como Hornblenda y Augita, con escasa muscovita y ferromagnesianos sódicos (Frost et al, 2001; Pompa, 2009).

Si el  $A/CNK < 1$  y la relación  $Na+K > A$ , la roca es peralcalina, estas rocas poseen más álcalis del necesario para formar feldespatos. Lo que significa que especies como el Na, es incorporado en silicatos ferromagnesianos. En rocas débilmente peralcalinas, los elementos álcalis pueden estar presentes en hornblenda, pero en rocas fuertemente alcalinas predominan anfíboles sódicos y piroxenos. Involucra procesos como fusión cortical o fusión parcial en ambientes anorogénicos, tales como islas oceánicas, zonas de rift continental, cratones estables. (Frost, et al 2001; Pompa, 2009).

Estas diferencias composicionales, no son directamente equivalentes a otras clasificaciones que involucran álcalis, como las que diferencian series magmáticas. Es decir, una roca toleítica, calcoalcalina o calcoalcalina alta en potasio puede ser peraluminosa o metaluminosa, pero no peralcalinas. Igualmente rocas alcalinas pueden ser peralcalinas o metaluminosas, pero carecen del suficiente aluminio para ser peraluminosas. (Frost, et al, 2001).

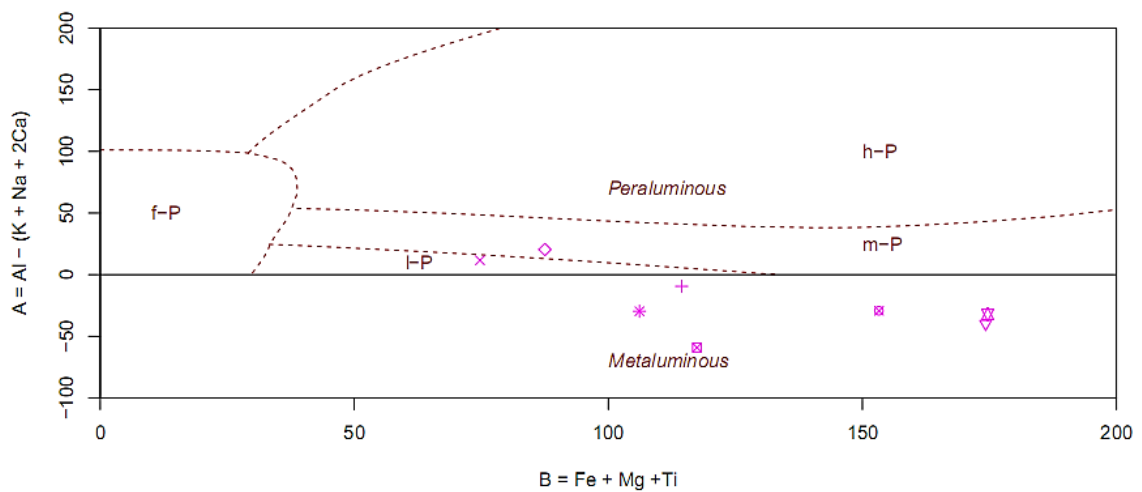


**Figura 17.** En la parte superior, Índice de saturación de Alúmina A/CNK vs A/NK según Shand, 1943 y en la parte inferior, diagrama B-A de Debon y Le Fort, 1983. I, II, III, dominio peraluminoso y IV, V, VI dominio metaluminoso.

Según los diagramas de Shand, 1943 y Debon y Le Fort, 1983, la mayoría de los intrusivos de la Cuenca-Patía son ploteados dentro del campo metaluminoso (subsaturados en alúmina), lo que puede relacionarse a procesos como fusión parcial y cristalización fraccionada de magmas provenientes del manto en zonas de subducción y/o fusión cortical (Frost *et al.*, 2001; Pompa, 2009). Sin embargo, los intrusivos La Yunga y Patico, pertenecen al dominio peraluminoso (saturados en alúmina), y son los cuerpos más ácidos, lo que sugiere que éstos fundidos,

puede formarse a partir de fusión de rocas félsicas metaluminosas ricas en biotita o por un fundido de rocas máficas con exceso de agua, en general procesos de anatexis cortical (Pompa, 2009; Miller, 1985; Ellis y Thompson, 1986; Pompa, 2009). La gráfica de Debon y Le Fort, 1983, los plotea en el campo III, que indica una composición con presencia de biotita sin muscovita y el campo IV presenta presencia de  $Bi \pm Hb \pm Opx \pm Cpx \pm Ol$ , tal como se observa en la mayoría de los análisis petrográficos realizados a intrusivos muestreados en la Cuenca Cauca-Patía (Ver detalle en **Anexo 2**) y el campo V, se caracteriza por  $Cpx \pm Hb$  (Debon y Le Fort, 1983; González-Partida y Vasallo, 2001) (**Figura 17**).

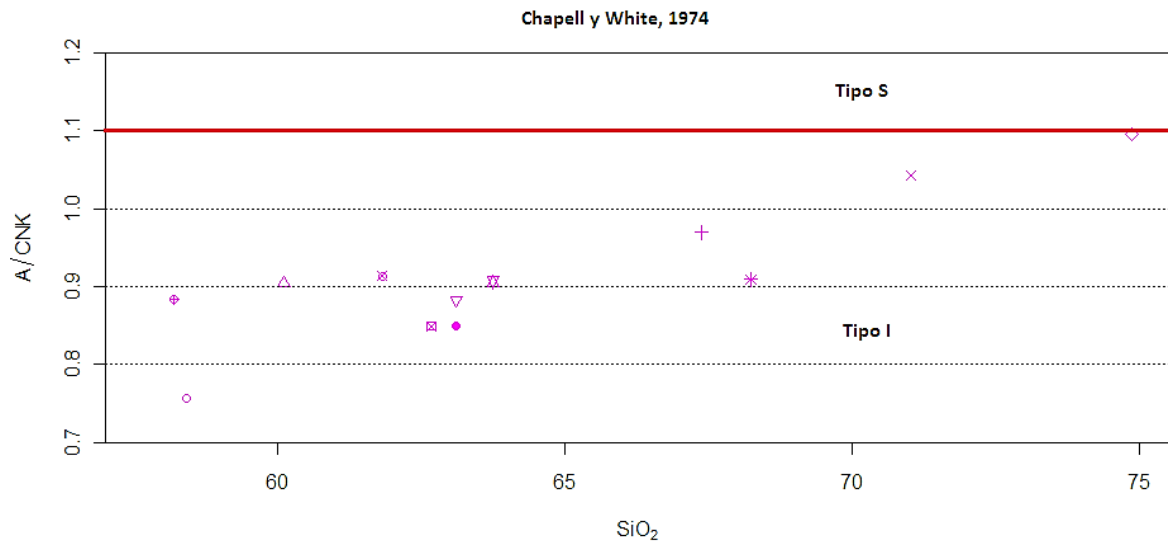
Para determinar el grado de saturación de alúmina en las rocas peraluminosas, se emplea la grafica A-B de Debon y Le Fort, modificada por Villaseca (ver **Figura 18**), que clasifica al granito Patico como moderadamente peraluminoso y el granito La Yunga como de baja peraluminosidad.



**Figura 18.** Gráfica A-B de Debon y Le Fort, modificada por Villaseca, et al, 1998. I-P baja peraluminosidad, m-P moderada peraluminosidad y hF alta peraluminosidad.

Buscando realizar un mayor análisis sobre el origen magmático de estas rocas plutónicas, el diagrama de Capell y White, 1974 (**Figura 19**), permite diferenciar el tipo de granitoide Igneo o Sedimentario (Dahlquist, *et al.*, 2005; Chapell y White, 1974).

Al analizar los resultados en la **Figura 19**, se observa que todas las muestras están bajo la línea frontera demarcada por la constante sobre el eje Y: 1.1, que delimita el campo de los granitoides tipo I. En ambos diagramas las muestras La Yunga y Patico, se observan próximas a la línea frontera con los granitos tipo S, son peraluminosas, y podrían relacionarse con procesos formadores de los granitoides tipo S (Pompa, 2009; Janoušek *et al.*, 2006; Frost, *et al.* 2001).



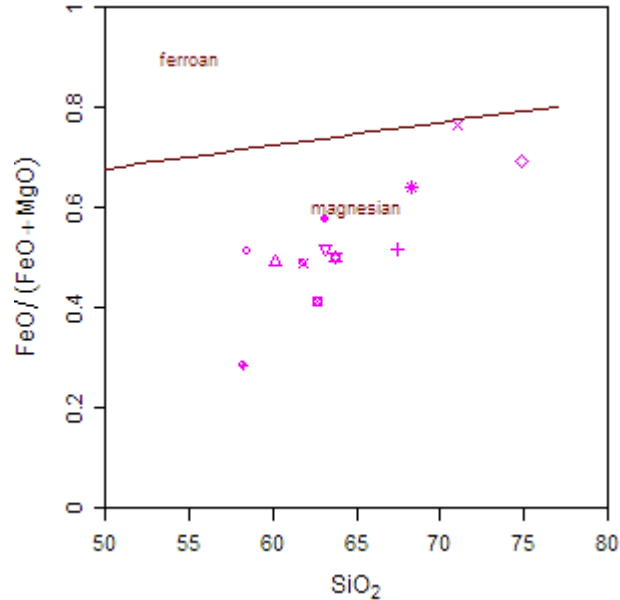
**Figura 19. Diagrama de SiO<sub>2</sub> vs A/CNK de Chapell y White, 1974. La línea constante Y: 1.1 determina sobre ella los granitos tipo S y debajo los tipo I.**

Buscando amplios rangos de clasificación que permitan clarificar el tipo de granitoide, se toma en cuenta la metodología propuesta por Frost, *et al.*, 2001, a

partir del cual se identifica el índice de hierro, el índice de MALI y se analiza de manera conjunta el Índice de Saturación de Alúmina (ASI) de Shand, 1943.

El índice Fe\*:  $\text{FeO} / \text{FeO} + \text{MgO}$  permite emplear FeO, si se ha determinado en el análisis químico, o  $\text{Fe}_2\text{O}_{3(t)}$  cuando no se ha diferenciado hierro ferroso de férrico. Para los intrusivos de la Cuenca Cauca-Patía se ha determinado FeO por volumetría y  $\text{Fe}_2\text{O}_{3(t)}$  por absorción atómica, según Frost et al., 2001, se debe emplear FeO (Frost y Frost, 2008) (**Figura 20**).

Posteriormente se procede a calcular el índice de MALI que de forma conjunta al ASI permiten identificar diferenciar granitoides cordilleranos o tipo Igneo, leucogrenito peraluminoso o tipo Sedimentario y granitos tipo A (Frost, et al., 2001).

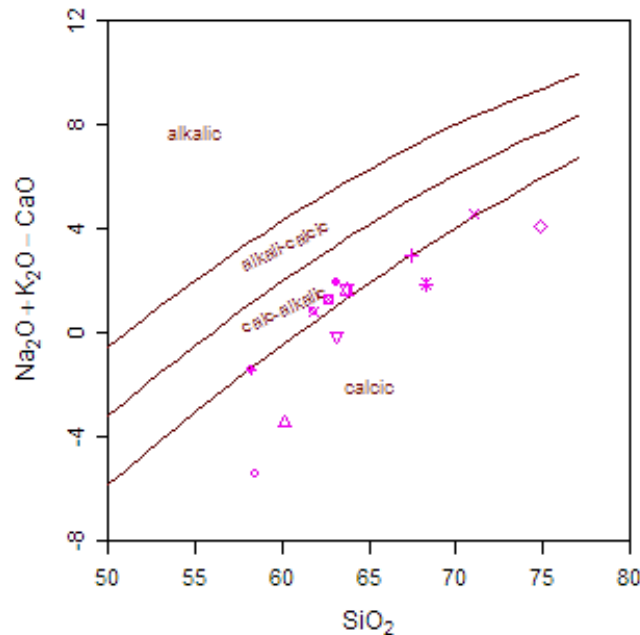


**Figura 20. Diagrama FeO/FeO+MgO vs SiO<sub>2</sub> para rocas graníticas según Frost et al., 2001, en intrusivos muestreados.**



La relación  $\text{FeO}/\text{FeO}+\text{MgO}$  vs  $\text{SiO}_2$ , que permite diferenciar plutones magnesianos y ferranos según la línea límite propuesta por Frost et al. 2001. Todos los intrusivos muestreados pertenecen al dominio de plutones magnesianos. Pero es a partir del índice de MALI, que se obtienen más evidencias para verificar el tipo de granitoide.

El índice de MALI (Índice calcalcalino modificado), se emplea a partir de contenidos de sílice mayores a 50%wt, y permite combinar tres variables  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{CaO}$ , generando cuatro suites: cálcica, cálcica-alcalina, alcalina-cálcica y alcalina, cuyos límites son paralelos (**Figura 21**). Su construcción estuvo basada en las suites plutónicas: Alcalinas, como la intrusión Bjerkreim-Sokndal; alcalina-cálcica: Batolito de Sherman; cálcica-alcalina: suite de Tuolumne y alcalina: Batolito del Sur de California (Frost, et al. 2001).

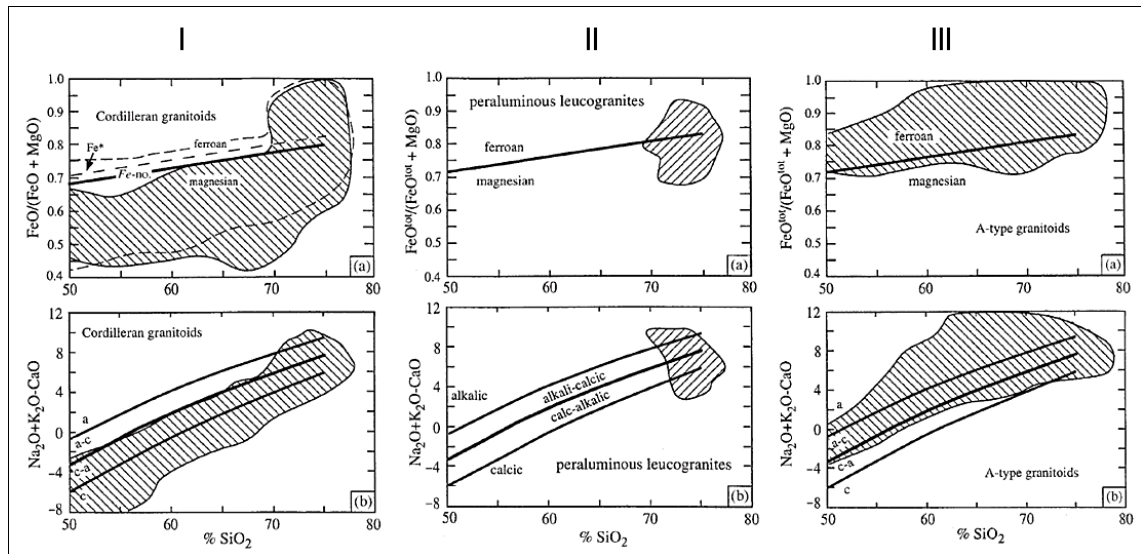


**Figura 21. Índice MALI Frost, et al. 2001.**

El índice de MALI, sugiere que las muestras El Rosario, Carpintería, Encenillo y Patíco, son cálcicas; las muestras Pantano, la Yunga y La Tetilla se encuentra

sobre la línea frontera, y se consideran cálcico- alcalinas por su cercanía al dominio cálcico-alcalinas; y las muestras Tablón, Pusná, Guachicono, y Oso Guaico son cálcico-alcalinas (**Figura 21**).

Basados en los esquemas de clasificación de Frost *et al.*, 2001 (**Figura 22**) los intrusivos de la Cuenca Cauca Patía, que pertenecen a los granitoides cordilleranos, caracterizados porque son el tipo de granitoide más abundante sobre la superficie terrestre, están bien definidos geoquímicamente, suelen presentar anfíboles, son típicos de arcos de isla y arcos continentales, son principalmente tipo I, predominantemente magnesianos, más cálcicos que calci- alcalinos, metaluminosos con baja peraluminosidad, suelen tener  $Fe^* < 0.6$ , y valores de  $SiO_2$  inferiores a 70% wt.



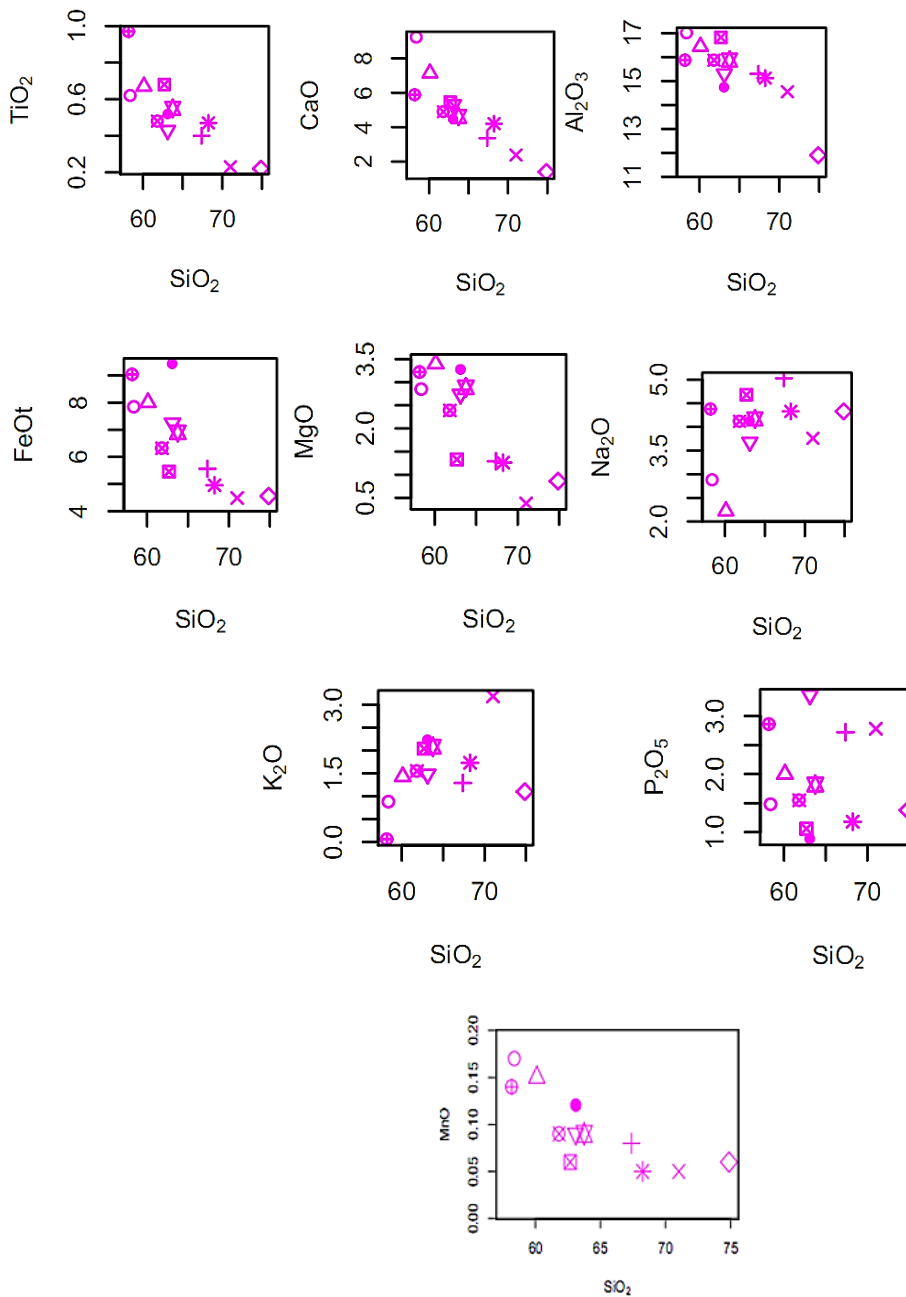
**Figura 22. Clasificación según el tipo de granitoide cordillerano, leucogranito y tipo A, propuesta por Frost et al, 2001. I. Tipo cordillerano; II: Tipo Leucogranito peraluminoso; III: Tipo A.**

Sin embargo las muestras La Yunga y Patico, presentan características y proximidad a los leucogranitos peraluminosos, que según Frost, *et al.*, 2001 se

caracterizan por valores altos en sílice, suelen ocurrir como granitos aislados principalmente en cinturones metamórficos, suelen poseer muscovita, y son formados a partir de fusión parcial de rocas metasedimentarias o como resultado de la relajación termal durante la exhumación del orógeno. Estos granitos poseen contenidos de sílice mayores a 70,  $Fe^* > 0.7$ , altos en potasio, pero son de bajo y medio grado de peraluminosidad, y no presentan muscovita por lo que se consideran granitos cordilleranos que debieron involucrar en su formación material sedimentario.

#### **3.3.1.1 Diagramas de Variación**

A partir del análisis de diagramas tipo Harker 1909 (Ver **Figura 23**), es posible relacionar procesos formadores a nivel de la cámara magmática para los cuerpos intrusivos de la Cuenca Cauca-Patía, como cristalización fraccionada, diferenciación magmática y abundancia de elementos según la presencia de fases minerales (Pompa, 2009; Duque, 2009, Rollinson, 1993; Wilson, 1989).



**Figura 23. Diagramas de Variación química tipo Harker. SiO<sub>2</sub> vs TiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO, CaO, Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, FeOt, en intrusivos muestreados en la Cuenca Cauca-Patía.**

La composición general de los óxidos respecto al SiO<sub>2</sub> desarrolla tendencias negativas en óxidos de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub>, FeOt, MnO, MgO, CaO a medida que aumenta

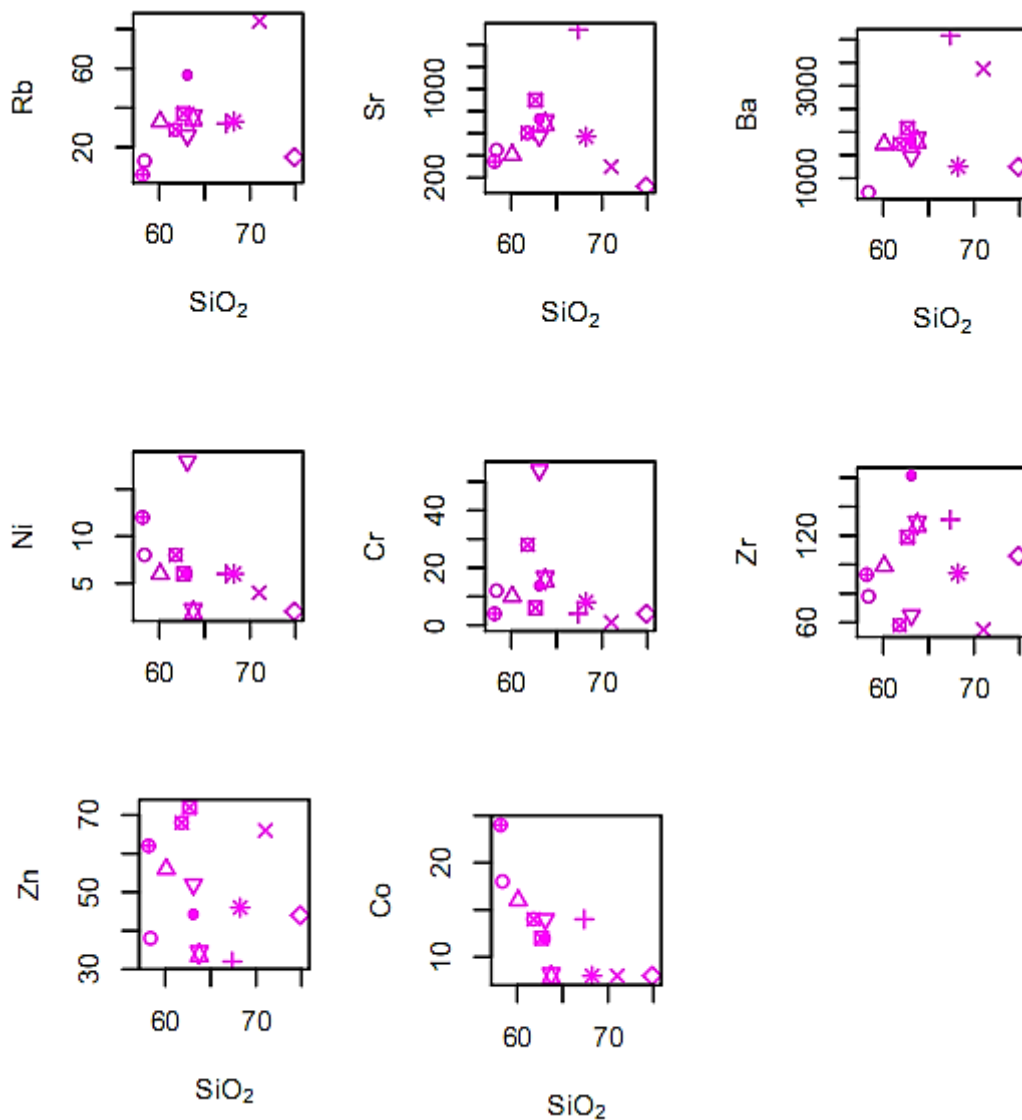
el contenido de sílice. Ésta tendencia prevalece en ambientes de margen continental activa, típica de las series calcoalcalinas con magmas bien diferenciados (Wilson, 1989; García 2009; Pantoja, 1994).

La disminución de  $\text{FeO}_t$  y  $\text{TiO}_2$  a medida que aumenta el  $\text{SiO}_2$ , se relaciona con la temprana cristalización y fraccionamiento de magnetita titanífera, resultando empobrecimiento del fundido en estos óxidos que siguen la serie de cristalización de Bowen (Wilson 1989; Alvarez 1983; Pantoja 1994).

Los análisis químicos de óxidos mayores muestran las mismas tendencias que las publicadas por Alvarez (1983), en intrusivos subvolcánicos post-miocénicos de la depresión Cauca-Patía. Están caracterizados por composiciones ácidas e intermedias concordantes con los comportamientos de rocas de las series calcoalcalinas en márgenes continentales.

### **3.3.2 Elementos Trazas**

Analizando los contenidos de Rb, Sr, Ba, Zr, Ni, Co, Cr, Zn, Cu vs  $\text{SiO}_2$ , se observan tendencias en los cuerpos intrusivos de la parte Sur de la Cuenca Cauca-Patía, muestreados en éste estudio (Ver **Figura 24**).



**Figura 24. Diagramas de Variación química tipo Harker. SiO<sub>2</sub> vs Rb, Sr, Ba, Zr, Ni, Co, Cr, Zn, Cu en intrusivos muestreados en la Cuenca Cauca-Patía.**

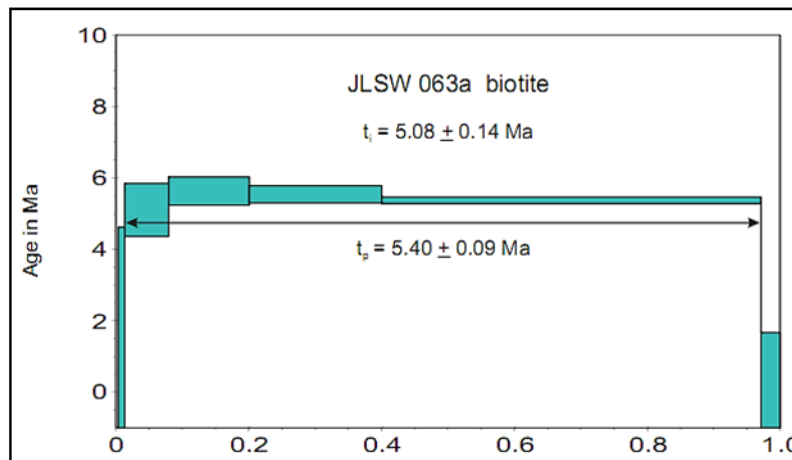
Se observa alta dispersión en los datos de los diagramas de Ba, Zr, Zn, sin embargo es posible observar una tendencia negativa en Ni, Cr, Co, que corresponden a elementos siderófilos que se caracterizan por su tendencia a formar compuestos con el hierro en fases minerales, son poco solubles e inmóviles (Rollinson, 1993; Shaw, 1964). En los intrusivos muestreados es normal

que disminuyan su contenido a medida que aumenta el grado de diferenciación magmática, hacia los cuerpos más ácidos y evolucionados.

### 3.4 GEOCRONOLOGÍA

Los datos geocronológicos reportados (**Tabla 6**), están conformados por la recopilación de datos bibliográficos del área de estudio, correspondientes a trabajos de Alvarez, et al. (1978, 1979); Risnes (1995) y la datación realizada en éste proyecto, del intrusivo el Tablón.

El proceso de datación de la diorita el Tablón, fue realizado con el método  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  en biotita, en el laboratorio de CICESE, México, en el que se obtuvo una edad meseta de  $5.40 \pm 0.09$  Ma (**Figura 25**).



**Figura 25.** Diagrama en el que se evidencia la edad integrada ( $t_i$ ), la edad de meseta ( $t_p$ ) y la edad de isócrona ( $t_c$ ). Se determina como edad del intrusivo JLSW063 los valores de la edad meseta correspondiente a  $5.40 \pm 0.09$  Ma.

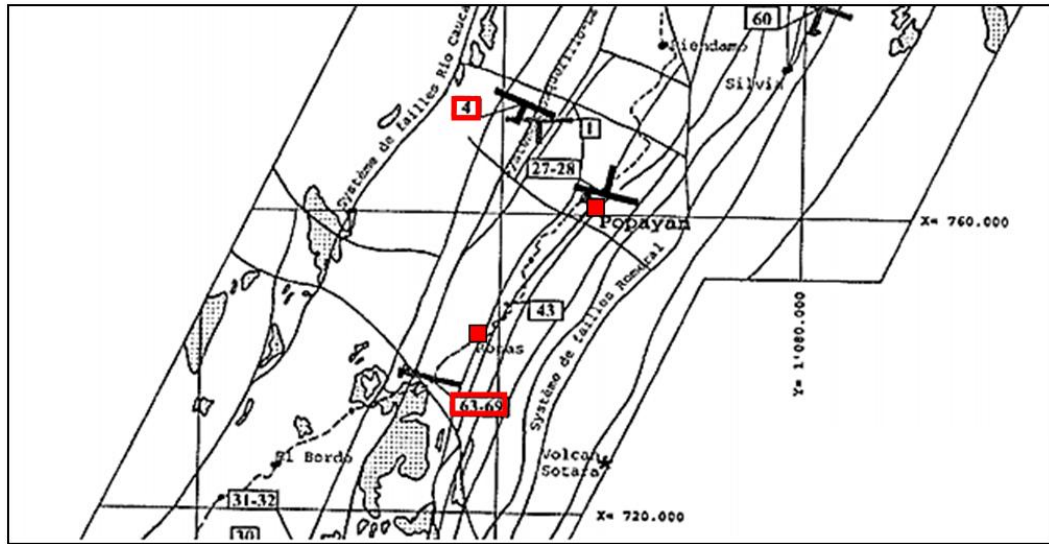
Muy próximo al área de estudio, Risnes (1995) reporta dataciones mediante el método K/Ar en cuerpos intrusivos de la depresión Cauca-Patía, abarcando los departamentos de Cauca y Nariño (Ver **Anexo 5**).

La edad de  $33.09 \pm 0.7$  Ma obtenida por Risnes (1995) para el intrusivo La Tetilla (Muestra N.4 en **Figura 26**), descrito en este trabajo, permite establecer la existencia de al menos un evento plutónico en el Oligoceno inferior a finales del Paleógeno. Las edades entre los 20 y 5.4 Ma, permiten establecer que para este sector existieron eventos plutónicos durante el Mioceno.

**Tabla 7. Datos geocronológicos de algunos cuerpos intrusivos datados que afloran dentro de la zona de estudio. El número de la muestra permite la ubicación de la muestra datada en la Figura 26.**

AUTOR (MÉTODO)	TIPO DE ROCA	LOCALIZACIÓN	EDAD Ma
Risnes N.4	Pórfido dacítico	A lo largo del río Palacé. Próximo a la Tetilla (Intrusivo La –Tetilla)	$33.9 \pm 0.7$ (K/Ar )
Risnes N. 64-68	Pórfidos andesíticos	Intersección vía panamericana-río Esmita	$20.1 \pm 0.2$ (K/Ar )
Álvarez y Linares 1979.	Pórfido andesítico	Municipio de la Vega	$8 \pm 3$ Ma (K/Ar )
Alvarez, et al, 1978	Cuarzodiorita/dacita	Localizado a 3 km al sur de la población del Suárez.	$6 \pm 1$ Ma (K/Ar )
Este trabajo	Diorita	Vereda El Tablón	$5.40 \pm 0.09$ (Ar/Ar)





**Figura 26. Mapa que muestra los puntos de muestreo empleados por Risnes, 1995. Nótese la ubicación de las poblaciones Popayán y Rosas.**

Las edades obtenidas sobre rocas volcánicas para el sector (Ver Capítulo 4), indican registros de actividad volcánica desde hace al menos 8 Ma en el sector. Por lo tanto, varios de estos cuerpos plutónicos son sincrónicos con la actividad volcánica en la zona de estudio.

Los trabajos realizados por Alvarez *et al.*, (1978), localizados en el extremo norte del área de estudio, datan el stock de Suárez (también llamado del paso del Bobo), localizado a 3 km al sur de la población del Suárez. Geográficamente, se encuentra ubicado en una zona de intenso fracturamiento sobre el valle del río Cauca, intruyendo rocas volcánicas básicas y sedimentarias del cretácico tardío. Se describe como una cuarzodiorita, y hacia el centro dacita, con mineralización de sulfuros de Cu y Au asociado a venillas de cuarzo. Las dataciones por el método K/Ar en hornblenda le asignan una edad  $6 \pm 1$  Ma. A finales del Mioceno, cercana a la edad del intrusivo JLSW063.

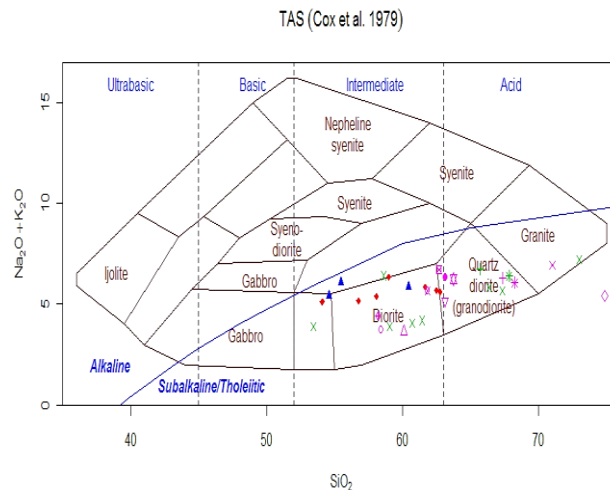
A nivel más regional se conoce otra datación sobre un cuerpo intrusivo localizado 6 km al noreste del municipio de La Vega a 140 Km al Sur de Popayán, fuera del área de estudio. Éste cuerpo es de composición andesítica, con una edad de  $8 \pm 3$  Ma, obtenida por el método K/Ar en Hornblenda, ubicando éste cuerpo en el Mioceno Superior, (Álvarez y Linares 1979).

## 4. DISCUSIÓN

En el siguiente capítulo se comparan los resultados obtenidos, con los estudios realizados por otros autores en la zona de estudio, principalmente los realizados por Alvarez, (1983), y Risnes, (1995) respecto a rocas plutónicas; y los realizados en el sector, durante el proyecto de vulcanismo (Ingeominas- Universidad Eafit, 2007), para rocas volcánicas.

### 4.1 COMPARACIÓN GEOQUÍMICA ENTRE LOS CUERPOS INTRUSIVOS DEL ÁREA Y OTROS CUERPOS INTRUSIVOS MUESTREADOS EN LA CUENCA CAUCA-PATÍA

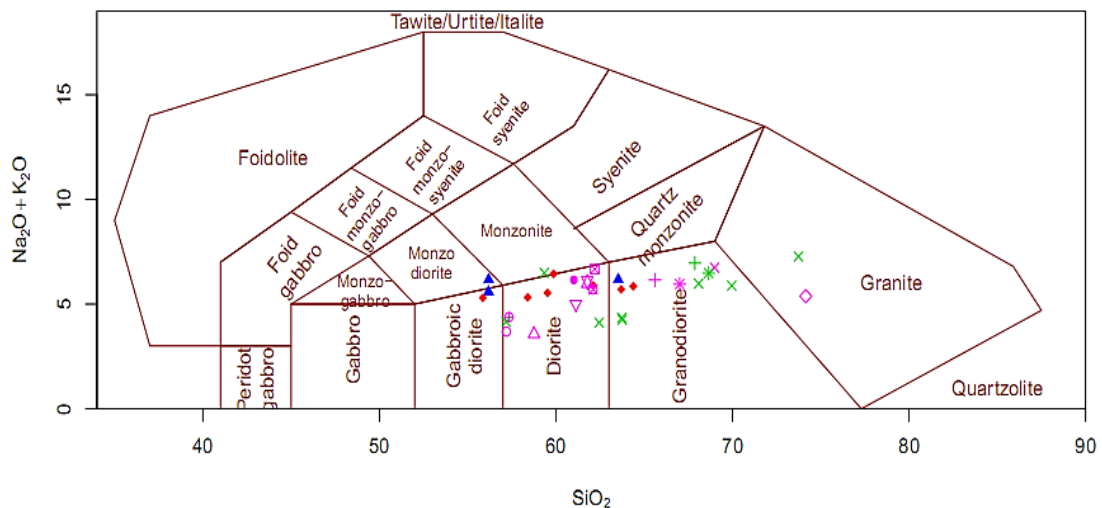
Los datos obtenidos durante este estudio, se correlacionan bien con los datos existentes para otros cuerpos intrusivos en la zona de estudio, como se observa en la **Figura 27**, en el diagrama TAS de Cox *et al.*, 1979. Todos los intrusivos se plotean en el campo de las rocas subalcalina/teolíticas, y su composición varía de intermedia a ácida.



**Figura 27. Gráfica TAS de Cox et al, 1979 para rocas plutónicas muestreadas en la Cuenca Cauca-Patía.**

Los análisis geoquímicos reportados por Risnes (1995), están ploteados en color verde; en azul se plotean intrusivos muestreados por Alvarez (1983), al norte de éste estudio, y en color rojo intrusivos muestreados por Alvarez (1983), al sur de éste estudio; y en color rosado intrusivos muestreados en éste estudio.

Una concordancia similar se observa al comparar los datos obtenidos durante este estudio con los datos existentes para la zona de estudio según la clasificación de Middlemost, 1985, donde los intrusivos de la zona de estudio corresponden a dioritas, granodioritas y granitos. Se destaca la variabilidad de los cuerpos localizados al norte y sur de éste estudio muestreados por Alvarez, (1983), como las dioritas gabróicas de Pitayá, y Santa Juana, que poseen bajos porcentajes de  $\text{SiO}_2$ , y Peñón que corresponde a una monzodiorita por su contenido de álcalis.

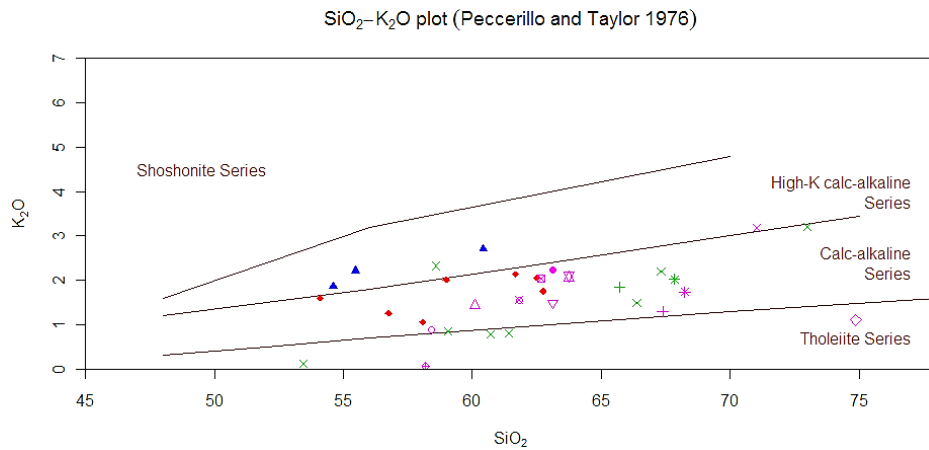


**Figura 28. Gráfica Middlemost, 1985 para rocas plutónicas muestreadas en la Cuenca Cauca-Patía.**

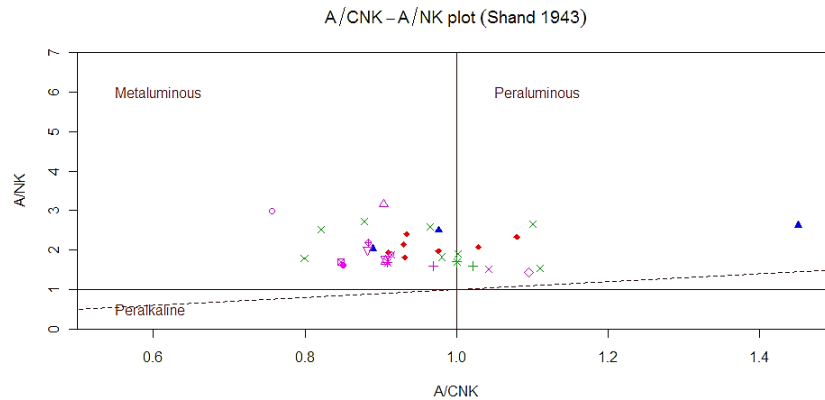
Los análisis geoquímicos reportados por Risnes (1995), están ploteados en color verde; en azul se plotean intrusivos muestreados por Alvarez (1983), al norte de

éste estudio, y en color rojo intrusivos muestreados por Alvarez (1983), al sur de éste estudio; y en color rosado intrusivos muestreados en éste estudio.

Igualmente, las rocas intrusivas de la Cuenca Cauca Patía, pertenecen en su mayoría a la serie calcoalcalina (**Figura 29**); a la serie de las rocas toleíticas pertenecen los intrusivos estudiados por Risnes (1995) sobre el cauce del río Esmita, y los intrusivos Patico y el Pantano, muestreado en éste estudio y localizados muy próximos al río Cauca, y al río Gauchicono. Las rocas calcoalcalinas altas en potasio, pertenecen a las rocas estudiadas por Alvarez (1983), localizadas al norte de la zona de estudio.

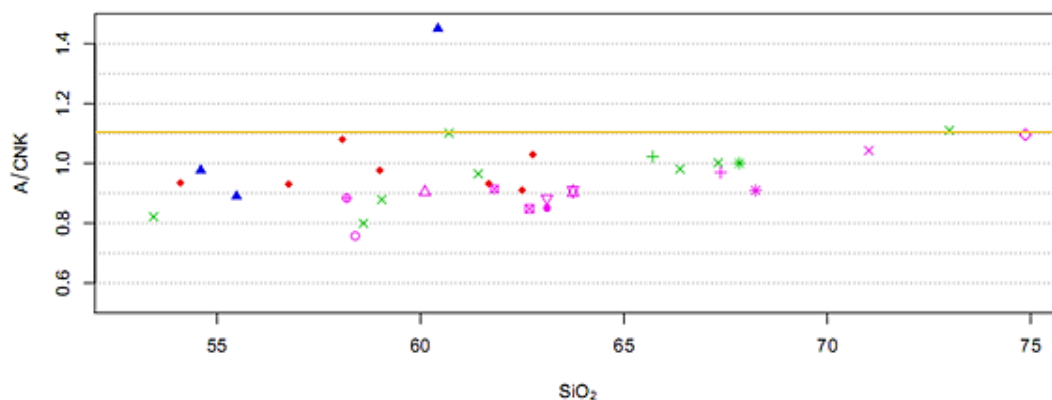


**Figura 29. Diagrama discriminatorio de series toleítica, calcoalcalina, y shoshonite de Peccerillo y Taylor, 1976 para cuerpos intrusivos muestreados en la Cuenca –Cauca-Patía.**



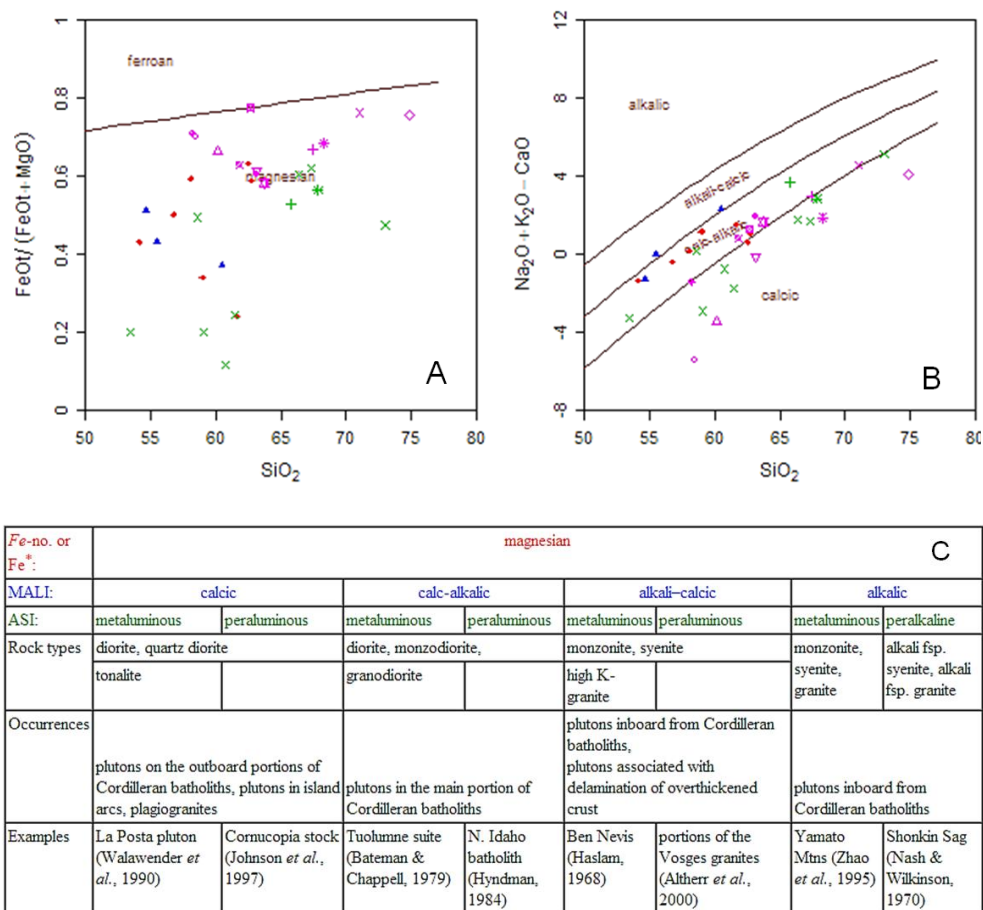
**Figura 30. Diagrama A/CNK – A/NK de Shand 1943, para cuerpos intrusivos muestreado en la Cuenca Cauca-Patía.**

Según el índice de alúmina de Shand, 1943, la mayoría de los cuerpos pertenecen al dominio metaluminoso, sin embargo los intrusivos de Santa Ana, San Pedro, La Monja, La Tetilla (Risnes, 1985), La Playa-río San Jorge, Río Esmita, Patico y La Yunga son peraluminosos. Por su alto contenido de alúmina, podrían relacionarse con procesos de anatexis cortical, aspecto soportado por la gráfica de Chapell y White, 1974 (**Figura 31**), que clasifica algunos intrusivos como tipos S, sin embargo es a partir de Frost *et al.*, 2001, que se determina en verdad su clasificación como granitoide (**Figura 32**).



**Figura 31. Tipo de granitoide según diagrama de Chapell y White, 1974. Sobre la línea 1.1 (en color amarillo) son granotides tipo S (Intrusivos Santa Ana y La Playa Río-San Jorge; y bajo la línea corresponden a tipo I).**

Teniendo en cuenta los parámetros de clasificación propuesta por Frost, et al. 2001, todos los cuerpos se clasifican como granitoides cordilleranos tipo I (**Figura 32**), aunque los cuerpos peraluminosos y tipo S (**Figuras 30 y 31**) podrían indicar procesos de contaminación cortical. Los intrusivos alcalino-cálcicos, según Frost, et al. 2001, podríann relacionarse a procesos de delaminación cortical, localizada al norte del área de estudio, bajo la influencia del Sistema de Fallas Romeral (Alvarez, 1983).



**Figura 32. Clasificación tipo de granitoide según Frost et al, 2001 en cuerpos intrusivos de la Cuenca Cauca-Patía.** A) Índice de  $Fe^{*}$ , donde se señalan todos los cuerpos intrusivos como magnesianos. B) Índice de MALI, que abarca cuerpos cálcicos, cálcico alcalinos y alcalino cálcicos en menor proporción. C) Tabla resumen sobre las características necesarias para clasificar plutones magnesianos según Frost et al, 2001).

## 4.2 ANÁLISIS GEOCRONOLÓGICO ENTRE LOS CUERPOS INTRUSIVOS DEL ÁREA Y OTROS CUERPOS INTRUSIVOS MUESTREADOS EN LA CUENCA CAUCA-PATÍA

El evento plutónico E es el evento más reciente en Colombia, abarca el Neógeno, desde el Oligoceno al Plioceno con dataciones entre 30 y 3.5 Ma (Aspden, *et al.*, 1987; 1983). Dentro de la Cuenca Cauca-Patía, puede subdividirse en tres etapas (**Tabla 7**); la primera abarca desde el Oligoceno inferior hasta el Mioceno inferior, se localiza al este del Sistema de Fallas Cauca- Patía y su formación se relaciona con la acreción de la Cordillera Occidental, dentro de la cual se puede ubicar el intrusivo de La Tetilla, con  $33.9 \pm 0.7$  Ma. Aunque éste dato es un poco más antiguo que el límite del episodio E, no alcanza a ingresar en el episodio volcánico anterior (Episodio D).

La segunda etapa comprende del Mioceno inferior hasta finales del Mioceno Medio, y según las dataciones K/Ar de Risnes, abarcan la mayoría de los cuerpos del sector, entre 22 y 11 Ma. Los cuerpos intrusivos localizados dentro del área de estudio, corresponden a los ubicados en el cauce del río Esmita ( $20.1 \pm 0.2$ ). Este evento se relaciona con la partición de la Placa Farallones hace 25 Ma (Pilger, 1983; McCourt, *et al.* 1984; Kellogg y Vega, 1995).

La tercera etapa comprendida entre el Mioceno Superior y el Plioceno, donde se ubican los cuerpos más recientes, comprenden el intrusivo El Tablón con  $5.40 \pm 0.09$  Ma, el stock del Suarez con  $6 \pm 1$  Ma (Alvarez, *et al.* 1978), La Vega con  $8 \pm 3$  Ma, y el intrusivo Silvia –Jambaló con edad de  $7.8 \pm 0.2$  Ma. Éste último evento es correlacionable con los intrusivos más septentrionales en la Cuenca Cauca-Patía, pertenecientes al vulcanismo-plutonismo de la Formación Combia, registrados entre los 10 y 6 Ma. (Grosse, 1926; González, 1980; 2001). Estos intrusivos son cuerpos subvolcánicos de composición andesítica y dacítica como



el Stock de la Pintada (8 Ma) (Restrepo et al., 1981); La Felisa (7 Ma) (González, 1976), El Corcovado (6-10 Ma) (MacDonald, 1980) (López, *et al.*, 2006; Aspden *et al.*, 1987; Alvarez, *et al.*, 1978).

**Tabla 8. Subdivisiones del episodio plutónico E en la cuenca Cauca-Patía.** (Compilado y modificado de López, 2006; Risnes, 1989; Aspden *et al.* 1987; Alvarez, *et al.* 1978).

SUBDIVISIONES DEL EPISODIO PLUTÓNICO E (Oligoceno al Plioceno)			INTRUSIVOS CUENCA CAUCA-PATÍA PARTE SUR
SERIE	ETAPA	EDAD (Ma)	
Mioceno Superior	Messinian-Tortonian	5.33 – 11.608	El Tablón. Stock de Suarez; NE de la Vega, vía Silvia –Jambaló (sincrónico con el vulcanismo Combia al Norte) (Alvarez, <i>et al.</i> , 1978; López, <i>et al.</i> 2006)
Mioceno medio- Mioceno inferior	Serravallian- Burdigalian	11.608 –22	Dataciones de Risnes, 1995 (cuerpos sobre el rio Esmita)
Mioceno inferior- Oligoceno	Aquitanian- Rupelian	22 33.9±0.1	La Tetilla (33.9 ±0.7 Ma)

#### 4.3 PRIMERA APROXIMACIÓN SOBRE LA RELACIÓN DE LAS ROCAS VOLCÁNICAS Y PLUTÓNICAS EN EL ÁREA DE ESTUDIO

Durante el desarrollo de este proyecto, simultáneamente se cartografiaron y caracterizaron depósitos ignimbríticos, depósitos de flujo de lava, depósitos de flujos de escombros y depósitos de ceniza y bloques, producto de la actividad volcánica de los diferentes centros eruptivos de la región relacionados con las Calderas del Paletará, Chagartón, Gabriel López, Cadena volcánica de los Coconucos y volcán Sotará entre otros (Monsalve y Pulgarín, 1995; Monsalve, 2000; Ingeominas-Universidad EAFIT, 2007, López, 2009; Torres *et al.*, 1999; Tellez, 2011;).

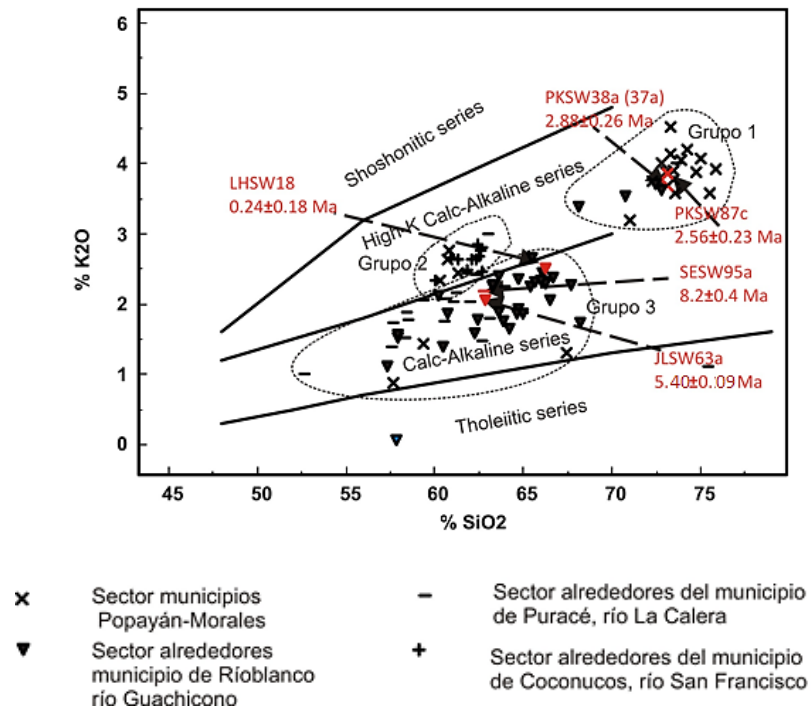
La **Figura 33**, corresponde al diagrama  $K_2O$  versus  $SiO_2$  de Pecerillo y Taylor (1976) que resume los resultados obtenidos en un total de 90 muestras analizadas por el método  $^{39}Ar/^{40}Ar$ , de las cuales nueve muestras fueron datadas, obteniendo resultados confiables en cinco de ellas, cuyos datos se señalan en rojo. El color rosado se deja para indicar las rocas plutónicas de este estudio (**Figura 34**).

Una primera aproximación permite plantear la existencia de tres grupos de rocas. El primer grupo, se caracteriza por rocas de afinidad calcoalcalina altas en potasio, cuyos contenido de sílice son mayores al 65%, predominantes en el sector de Popayán-Morales, caracterizado por flujos piroclásticos, principalmente de ignimbritas soldadas; el segundo grupo posee rocas calcoalcalinas altas en potasio con contenidos menores al 65% de  $SiO_2$ , caracterizada por las rocas colectadas en el sector Popayán-Morales y Puracé-Coconucos que como su nombre lo indica, están muy próximas al volcán Puracé y se caracteriza por lavas diferenciadas en riolitas, dacitas y traquiandesitas (López, 2009). El tercer grupo, es el más predominante, pertenece a la serie calcoalcalina, donde predominan lavas de andesitas y andesitas basálticas de los sectores Puracé-Coconucos y Río Blanco-Guachicono, en el sector mas Sur del área de estudio (Toro *et al.*, en preparación).

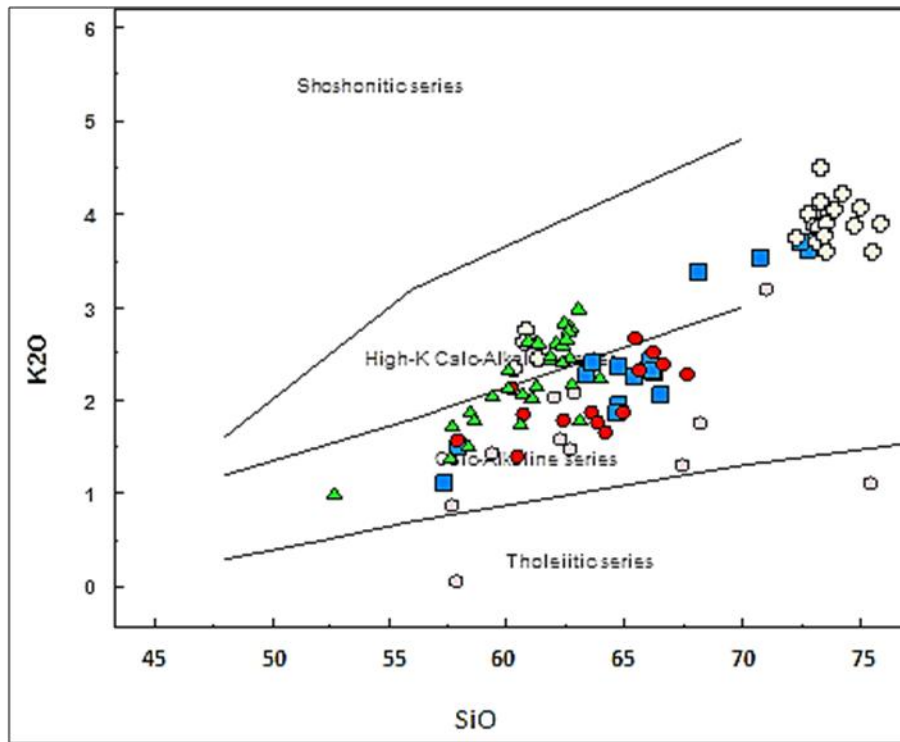
Los cuerpos intrusivos de éste estudio, son ploteados principalmente, dentro de la serie calcoalcalina, con características semejantes al grupo 3, ya que poseen mineralogía y composición química semejante a las rocas extrusivas de éste sector, por lo que la actividad magmática parece indicar un origen común, relacionado con la actividad caldérica y volcánica actual resurgente.

Se infiere según las dataciones disponibles sobre él área, que la mayoría de eventos plutónicos fueron predecesores a los eventos volcánicos (Oligoceno-

Mioceno medio) y sólo en la etapa más reciente del plutonismo (Mioceno superior), coexisten con las lavas más antiguas, que se reportan para productos del volcán Puracé (**Figura 33**).



**Figura 33. Diagrama discriminatorio de series toleítica, calcoalcalina y shoshonítica de Peccerillo y Taylor, 1976. Se señalan en rojo las dataciones realizadas a las muestras obtenidas en el área de estudio. (Toro et al. en preparación).**



**Figura 34. Diagrama de Picerillo y Taylor (1976), mostrando en rosado los intrusivos de éste estudio.**

Aunque se necesitan de estudios geoquímicos profundos y un mayor detalle en las dataciones, el anterior análisis indica de manera preliminar que hacia el norte del área estudiada, los productos volcánicos e intrusivos son más ácidos, y van gradando hacia el sur del área, en productos un poco más básicos, que reportan las lavas mas recientes del área (LHSW018). (**Figura 33**).

## 5. CONCLUSIONES y RECOMENDACIONES

- A partir del análisis petrográfico, se observa que la mayoría de los intrusivos muestreados, presentan textura porfirítica, y se caracterizan por embahiamientos, redondemientos, bordes de crecimiento, zonaciones concéntricas, y texturas esqueléticas, en sus fenocristales, por lo que se podrían relacionar con reinyecciones que desestabilizaron las condiciones del fundido dentro de la cámara magmática. La composición mineralógica predominante, es plagioclasa euhedral y subhedral, anfíbol tipo Hornblenda, biotita, cuarzo, y en menor proporción ortopiroxeno tipo hiperstena, granates, zircones y minerales opacos, que siempre están presentes en la mineralogía de éstos cuerpos y podrían asociarse con depósitos de oro y cobre. En menor proporción se presentan intrusivos con textura fanerítica de grano fino.
- Algunos cuerpos intrusivos exhiben similitud mineralógica y textural, por lo que podrían corresponder a un mismo cuerpo, si son espacialmente cercanos, como ocurre con el intrusivo Patico y Carpintería; o corresponder a cordones de intrusivos singenéticos como los intrusivos La Yunga y la Tetilla; y Oso Guaico y Guachicono, que están dentro de una misma localidad, asociados a bloques fallados y drenajes de ríos.
- La mayoría de cuerpos intrusivos descritos muestran asociación mineralógica tipo: clorita+calcita+epídota y minerales opacos, que corresponde al tipo de alteración propilítica, la cual suele ser mesotermal. Éste tipo de alteración presenta bajo grado de hidrólisis en los minerales, tiende a formarse en condiciones de pH neutro a ligeramente alcalino, y en condiciones de temperaturas frías (150-200°C). (Corbet y Leach 1998).

- Según los datos geoquímicos, los tipos de roca en los intrusivos muestreados corresponden a: dioritas, granodioritas y granito (Fig. 15), de la serie calcoalcalina, y en menor proporción toleítica y calcoalcalina alta en potasio.
- Se clasifican como granitoides cordilleranos, asociados con arcos continentales. Se caracterizan por ser metaluminosos, y en menor proporción peraluminosos (Intrusivos la yunga y Patico), magnesianos, suelen tener 70% en peso de SiO<sub>2</sub> y según el Índice de MALI, son cálcicos y cálcico-alcálicos. Su origen magmático se asocia con los intrusivos tipo I, lo que puede relacionarse con procesos como fusión parcial y cristalización fraccionada de magmas provenientes del manto en zonas de subducción y/o fusión cortical (Frost *et al.*, 2001; Pompa, 2009; Pearce, *et al.* 1984).
- Los intrusivos Patico y la Yunga, son peraluminosos, poseen contenidos de SiO<sub>2</sub> mayores a 70%, se ubican próximos al límite de los intrusivos tipo S, y poseen leve tendencia ferrana (Chapell y White, 1974; Frost *et al.*, 2001), (**Figuras. 19 y 20**). Lo que sugiere que éstos fundidos, podrían formarse a partir de fusión de rocas félsicas metaluminosas ricas en biotita o por un fundido de rocas máficas con exceso de agua, en general procesos de anatexis cortical (Pompa, 2009; Miller, 1985; Ellis y Thompson, 1986; Pompa, 2009).
- Los análisis químicos de óxidos mayores y trazas muestran las mismas tendencias que las publicadas por Alvarez (1983), en intrusivos subvolcánicos post-miocénicos en la depresión Cauca-Patía. Caracterizados porque la composición general de los óxidos respecto al SiO<sub>2</sub> desarrolla tendencias negativas en Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub>, FeO<sub>t</sub>, MnO, MgO, CaO a medida que aumenta el contenido de sílice, ésta tendencia prevalece en ambientes de margen continental activa, típica de las series calcoalcalinas

con magmas bien diferenciados que se relacionan con procesos de cristalización fraccionada especialmente de minerales ferromagnesianos y plagioclasas a partir de un magma basáltico parental (Wilson, 1989; García 2009; Pantoja, 1994).

- El evento plutónico E, es el evento más reciente reportado en Colombia, abarca el Neógeno, desde el Oligoceno al Plioceno con dataciones entre 30 y 3.5 Ma (Aspden, *et al.*, 1987; 1983). Aprovechando la bibliografía disponible sobre dataciones en Cuenca Cauca-Patía, se propone en éste trabajo la subdivisión del episodio E, en tres etapas (**Tabla 7**); la primera abarca desde el Oligoceno inferior hasta el Mioceno inferior, en el sector este del Sistema de Fallas Cauca- Patía y su formación se relaciona con la acreción del terreno de la Cordillera Occidental. La segunda etapa comprende del Mioceno inferior hasta finales del Mioceno Medio, que reportan la mayoría de los cuerpos del sector, entre 22 y 11.6 Ma, relacionados con la partición de la Placa Farallones y la acreción de la Serranía del Baudó; y la tercera etapa comprendida por el Mioceno Superior, donde se ubican los cuerpos más recientes entre 11.6 Ma y 5.33 Ma. para el sector sur de la Cuenca Cauca-Patía.
- El último sub-evento plutónico (Mioceno superior) es correlacionable con los intrusivos más septentrionales en la Cuenca Cauca-Patía, pertenecientes al vulcanismo-plutonismo de la Formación Combia, registrados entre los 10 y 6 Ma. (López, *et al.* 2006; Grosse, 1926; González, 1980; 2001; Aspden *et al.* 1987; Alvarez, *et al.*, 1978; MacDonald, 1980; González, 1976; Restrepo *et al.*, 1981).
- A partir de la comparación de datos geoquímicos en rocas ígneas intrusivas analizadas por Alvarez, (1983), y Risnes, (1995), en la zona de estudio, es

posible aplicar los parámetros de clasificación propuestos por Frost, et al. 2001. En el que todos los cuerpos se clasifican como granitoides cordilleranos tipo I, sin embargo los cuerpos peraluminosos podrían indicar procesos de contaminación cortical. Se destaca que los intrusivos cálcico-alcalinos, según Frost, *et al.* 2001, pueden relacionarse a procesos de delaminación cortical, localizada al norte del área de estudio, bajo la influencia del Sistema de Fallas Romeral (Alvarez, 1983).

- En el área de estudio coexisten rocas volcánicas e intrusivas. Una primera aproximación sobre esta relación plantea la existencia de tres grupos, el primero, son rocas calcoalcalinas altas en potasio, con contenidos de sílice mayores al 65%; el segundo grupo corresponde a rocas calcoalcalinas altas en potasio con contenidos menores al 65% de SiO<sub>2</sub>; ambos grupos próximos al volcán Puracé, y el tercer grupo pertenece a la serie calcoalcalina y posee los menores contenidos de K<sub>2</sub>O, donde predominan los productos próximos al volcán Sotará.
- Los cuerpos intrusivos de éste estudio, son ploteados principalmente, dentro de la serie calcoalcalina, con características semejantes al grupo 3, ya que poseen mineralogía y composición química semejante a las rocas extrusivas de éste sector, por lo que la actividad magmática parece indicar un origen común, relacionado con la actividad caldérica y volcánica actual resurgente.
- Se induce a partir del análisis de datos geoquímicos que hacia el norte del área estudiada, los productos volcánicos e intrusivos son más ácidos y próximos al volcán Puracé, y van gradando hacia el Sur, en productos un poco más básicos y próximos al volcán Sotará. (**Figura 33**).



## 5.1 RECOMENDACIONES

- Para futuras etapas de investigación sobre los intrusivos Neógenos de la Cuenca Cauca Patía, se recomienda el desarrollo de un muestreo sistemático en varios puntos dentro de un mismo cuerpo, para ver su variabilidad mineralógica y textural. Este procedimiento debe estar ligado a un trabajo de campo apoyado en perforaciones, y sísmica que permitan definir los contornos, obtener muestras frescas y dimensionar el volumen de éste último episodio plutónico.
- Los análisis geoquímicos, que se presenta en éste proyecto de grado, pueden profundizarse empleando geoquímica isotópica, análisis de Tierras Raras y elementos ferromagnesianos, que permita caracterizar y definir los procesos que conllevan a la generación de magmas generadores de éstos cuerpos y los productos volcánicos circundantes.
- Aprovechando las coordenadas de los puntos de muestreo de los intrusivos de aquí mencionados, los estudiados por Alvarez (1983), y Risnes (1995) es posible extender la zona de estudio hacia el norte y el sur, apoyándose en dataciones que permitan detallar las subdivisiones geocronológicas aquí propuestas.
- Se recomienda a futuro, realizar dataciones por huellas de fisión en éstas rocas plutónicas y volcánicas.

## 6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

**Acevedo, A.P; Cardozo, E.A. 1986.** Proyecto exploración geológica básica de caolines, cuarzo, feldespato, y arcillas en el departamento del Cauca. Informe de las labores de campo de la etapa II. INGEOMINAS. 5p.

**Acosta, C. E. A.1978.** El graben interandino colombo-ecuadoriano. Boletín de Geología.UIS, Bucaramanga. N. 26. 63-199.

**Alemán, A.; Ramos, V.A. 2000.** Northern Andes. In Tectonic evolution of South America (Cordani, U.G.; Milani, E.J.; Thomaz Filho, A.; Campos, D.A.; editors). International Geological Congress, Río de Janeiro. N. 31. 453-480.

**Alfonso, C. A. 1993.** Late Tertiary structure of the Valle del Cauca basin, colombian Andes. Ph.D. Thesis. University of South Carolina, USA. 55p.

**Alvarado, B.; Hubach, E. 1932.** Estudio geológico alrededor de Popayán. INGEOMINAS, Bogotá. Informe 205: 4-7p.

**Alvarez, A. J.1983.** Geología de la Cordillera Central y el Occidente colombiano y petroquímica de los intrusivos granitoides mesocenoicos. Boletín Geológico de INGEOMINAS. V. 26, N. 2:1 -175.

**Álvarez, J., Linares, E. 1979.** Edades del Batolito de Piedrancha y el Stock de Arboledas, departamento de Nariño. UNAL., Publicación. Especial de Geología. Departamento de Ciencias de la Tierra. Facultad de Ciencias. Medellín. N. 22. 6p.

**Alvarez, J., Orrego, A., Botero, G., Linares, E., 1978.** Determinación de edad K/Ar del Stock Suarez-Cauca.UNAL. Publicación Especial de Geología. Departamento de Ciencias de la Tierra. Facultad de Ciencias. Medellín. N. 11:1-7.

**Annen, C. 2011.** Implications of incremental emplacement of magma bodies for magma differentiation, thermal aureole dimensions and plutonism–volcanism relationships. Tectonophysics, N. 500: 1-3.

**Annen, C., Blundy, J.D., Sparks, S.J. 2006.** The genesis of intermediate and silicic magmas in deep crustal hot zones. *Journal of Petrology*. V.47, N. 3:505-539.

**Arango, M., Gómez, B. 1990.** Depósitos de Flujos de escombros de San Isidro, Popayán. (Departamento del Cauca). Tesis de Grado departamento de Geología. U.EAFIT, Medellín.153p.

**Aspend, J.A; McCourt, W.J; Brook, M. 1987.** Geometrical control of subduction-related magmatism: the Mesozoic and Cenozoic plutonic history of western Colombia. *Journal of the Geological Society*, V. 144: 893-905.

**Aspden, J.A; McCourt, W.J. 1986.** Mesozoic oceanic terrane in the central Andes of Colombia. *Geology*. Vol. 14:415-418.

**Bachmann, O., Miller, C.F., De Silva, S.L., 2007.** The volcanic-plutonic connection as a stage for understanding crustal magmatism. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Vol. 167:1-23.

**Barboza, S.A., Bergantz, G.W., 1996.** Dynamic model of dehydration melting motivated by a natural analogue: applications to the Ivrea–Verbano zone. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences*. N.87: 23–31.

**Barrero, D., 1979.** Geology of the Central Western Cordillera, west of Buga and Roldanillo, Colombia. *Publicaciones Geológicas Especiales*. N. 4. INGEOMINAS. Bogotá. 75p.

**Barrero D., Pardo, A., Vargas, C., Martínez, J. 2007.** Colombian Sedimentary Basins: nomenclature, boundaries and petroleum geology, a new proposal. *Agencia Nacional de Hidrocarburos*. Bogotá, Colombia. 91p.

**Bernal, J.P., Railsback, L. B. 2008.** Introducción a la Tabla Periódica de los Elementos y sus Iones para Ciencias de la Tierra. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, V. 25, N.2: 236-246.

**Bohórquez, O.P.; Monsalve, M.L.; Velandia, F.; Gil, F., Mora, H., 2005.** Marco tectónico de la cadena volcánica más septentrional de la Cordillera Central de Colombia. *Boletín de Geología, Bogotá*. V. 27, N. 44:55 – 79.

**Botero, G. 1963.** Contribución al conocimiento de la geología de la zona Central de Antioquia. Anales de la Facultad de Minas. Universidad Nacional de Colombia, Medellín. N. 57:1- 101.

**Botero, G.; Gonzalez, H., 1983.** Algunas localidades fosilíferas de la Cordillera Central, Antioquia y Caldas, Colombia. Geología Norandina, Bogotá. N.7:15-28.

**Bryant, J. A., Yogodzinski, G. M., Hall, M.L., Lewicki, J. L. Y Bailey, D. G., 2006.** Geochemical constraints on the origin of volcanic rocks from the Andean Northern Volcanic Zone, Ecuador. Journal of Petrology. V. 47. N. 6:1147-1175.

**Brook, M., 1984.** New radiometric age data from SW Colombia. INGEOMINAS-Misión británica (British Geological Survey), Cali Colombia. Reporte N. 10p.

**Budd, R. A., 2006.** A- and I-type subdivision of the Gawler Ranges-Hiltaba volcano-plutonic association. Goldschmidt Conference Abstracts. 1p.

**Bustamante, A., 2003.** Definição das trajetórias P-T-t em rochas metamórficas do flanco ocidental da Cordilheira Central da Colômbia nas regiões de Caldas e El Retiro. Master dissertation, University of São Paulo, Brasil.

**Campbell, C., 1974.** Colombian Andes. Geological Society, Special Publications. London. N. 4:705-724.

**Cas, R., Wright J.V., 1897.** Volcanic successions modern and ancient. Allen and Unwin. London. 528p.

**Chappel, B.W. y White, J.R., 1974.** Two contrasting granite type. Pacific Geology. Tokyo, Japón. N 8:174-174.

**Clemens, J.D., Holloway, J.R., White, A.J.R., 1986.** Origen on an A-type granite: experimental constraints. V.71:317-324.

**Corbett, G.J Y Leach, T.M., 1998.** Southwest Pacific Rim Gold-Copper System: Structure and mineralization. Society of Economic Geologist. Special Publication. N.6; 237p.

**Cox, K.G., Bell, J.D., Pankhurst, R.J., 1979.** The interpretation of igneous rocks. London. Allen and Unwin. 450p.

**Dahlquist, J.A., Rapela, C., Baldo, E., 2005.** Petrogenesis of cordierite-bearing S-type granitoids in Sierra de Chepes, Famatinian Orogen, Argentina. *Journal of South American Earth Sciences*. N. 20:231–251.

**Dahlquist, J.A., Alasino, P.H., Galindo, C., 2005.** Granitoides peraluminosos y su relación con las rocas fuentes. *Geogaceta* N.38:211-214.

**Debon, F.P., Le Fort, P., 1983.** A chemical mineralogical classification of common plutonic rocks and associations: *Transactions of the Royal Society of Edinburgh - Earth Science*, N. 73:135-149 .

**De Porta, J., 1974.** Lexique stratigraphique international Amerique latine. Volumen V. Fascículo 4B. Colombia. 689p.

**De Silva, S., 2008.** Arc magmatism, calderas, and supervolcanoes. *Geology*. V. 36; N. 8:671–672.

**De Silva, S., Zandt, G., Trumbul, R., Viramonte, J. G., Salas, G., Jiménez, N., 2006.** Large ignimbrite eruptions and volcanotectonic depressions in the Central Andes: a thermomechanical perspective. *Geological Society. Special Publications*. London. V. 269:47-63.

**Droux, A., Delaloye, M., 1996.** Petrology and geochemistry of plio-cuaternary cal-alkaline volcanoes of southwestern Colombia. *Journal of South American Earth Science*. V. 9: 27-41.

**Duhart, P.; McDonough, M.; Muñoz, J.; Martin, M.; Villeneuve, M., 2001.** El Complejo Metamórfico Bahía Mansa en la cordillera de la Costa del centro-sur de Chile (39°30'-42° 00'S): geocronología K-Ar, 40Ar/39Ar y U-Pb e implicancias en la evolución del margen suroccidental de Gondwana. *Revista Geológica de Chile*, V. 28. N. 2:179-208.

**Duque, J.F., 2009.** Geocronología (U/Pb y 40Ar/39 Ar) 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 Circun-Caribeño. Tesis de Maestría. UNAM. México. 187p.

**Ellis, D. J. y Thompson, A.B. 1986.** Subsolidus and partial melting reactions in the quartz-excess  $\text{CaO} + \text{MgO} + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiO}_2 + \text{H}_2\text{O}$  system under water excess y water deficient conditions to 10 Kb: some implications for the origin of peraluminous melts from mafic rocks. *Journal of Petrology*. N.27:91-121.

**Feininger, T., Bristow, C., 1980.** Cretaceous and Paleogene geologic history of coastal Ecuador. *Geological Research*. N.69:849-874.

**Feininger, T., Botero, G., 1982.** The Antioquia Batholith, Colombia. *Publicación Especial INGEOMINAS*. Bogotá. N. 12.

**Fettes, D., Desmonds, J. 2007.** *Metamorphic rocks: A Classification and Glosary of Terms*. Cambridge University Press, 243p.

**FUDES. 2007.** Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca Hidrográfica del Río Cajibío – Urbio y Puente Alto. Fundación para el desarrollo ambiental sostenible. Popayán. Cap. 5. 166p.

**Frost, R.B., Barnes, C.G., Collins, W.J., Arculus, R.J., Ellis, D.J., Frost, C.D. 2001.** A geochemical classification for granitic rocks. *Journal of petrology*. V.42. N. 11:2033-2043 .

**Frost, B.R., Frost, C.D., 2008.** A Geochemical Classification for feldspathic Igneous Rocks. *Journal of Petrology*. V. 49. N. 11:1955-1969.

**García, G.P., 2009.** Caracterización geológica, geoquímica e isotópica de las lavas del estratovolcán Telapón, Sierra Nevada, México. Tesis de Maestría. UNAM. 118p.

**Gansser, A., 1973.** Facts and theories on the Andes. *Journal of Geological Society of London*. V. 129:93-131.

**Geochemical Data Toolkit- GCDkit 3.0 beta versión 2011.** [www.gcdkit.org](http://www.gcdkit.org).

**Geoestudios-Colombia, 2008.** Levantamiento de columnas estratigráficas y Realización de análisis petrográficos, petrofísicos, Bioestratigráficos y geoquímicos en las áreas de Pasto, el Bordo, Cali-Buga y Buga-Cartago (Cuenca Cauca-Patía)". FONADE-ANH, Bogotá. 382p.

**Glazner, A.F; Bartley, J.M; Coleman, D.S; Gray, W; Taylor, R. 2004.** Are plutons assembled over millions of years by amalgamation from small magma chambers. GSA Today. V. 14. N. 4:4–11.

**Gobel, V., Stibane, F., 1979.** Edad K-Ar en hornblendas de plutones tonalitas, Cordillera Occidental Colombia. Universidad Nacional. Medellín. Publicación Especial Geología N. 19.

**Gómez, J., Nuez, A., 2003.** Las metasedimentitas de Santa Teresa y la edad del Complejo Cajamarca (Cordillera Central, Departamento del Tolima-Colombia): IX Congreso Colombiano de Geología: 35-36.

**González, H., 1980.** Geología de las planchas 167 (Sonsón) y 187 (Salamina) del mapa geológico de Colombia. Boletín Geológico. INGEOMINAS, N.23. Bogotá. 1-174.

**González, H., 1976.** Geología del Cuadrángulo J-8 Sonsón: Bogotá. INGEOMINAS. Informe 1704, 421p.

**González E., Vasallo, L., 2001.** Geoquímica de elementos mayores de los cuerpos intrusivos terciarios de Tierra Caliente, Edo. de México, México. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, tomo VII, 2001:1-9.

**González-Partida, E., Torres-Rodríguez, V., Stussi, J.M., Zimmermann, J.L., 1987.** Análisis geoquímico de los granitoides aflorantes en el sector Puerto Vallarta-Río de Santiago, México: Litósfera. N.1:33-49.

**Goldsmith, R., Marvin, R.F., Mehnert, H.H. 1971.** Radiometric ages in the Santander Massif Eastern Colombia, Colombian Andes. United States Geological Survey. N. 750:9-44.

**Grosse, E., 1926.** Estudio Geológico del Terciario Carbonífero de Antioquia en la parte occidental de la Cordillera Central de Colombia. Verlag Von Dietrich Reimer (Ernst Vohsen), Berlín, 361p.

**Grosse, E., 1935.** Acerca de la geología del sur de Colombia II. Compilación de los estudios oficiales en Colombia. INGEOMINAS, Tomo III. Bogotá:139-231.

**Grosser, J.R., 1989.** Geotectonic evolution of the Western Cordillera of Colombia: New aspects from geochemical data on volcanic rocks. Journal of South American Earth Sciences. V. 2: 59-369.

**Grosse, E, Alvarado, B, 1931.** Acerca de la Geología del sur de Colombia. II. Informe Rendido al Ministerio de Industrias sobre un viaje por la Cuenca del Patía y el Departamento de Nariño. INGEOMINAS, Informe Geológico 129, Bogotá. 105p.

**Gutscher M.A., Malavieille J., Lallemand S.Collot J.Y., 1999.** Tectonic segmentation of the North Andean margin: impact of the Carnegie Ridge collision. Earth and Planetary Science Letters, V. 168: 255–270.

**Hall, M.L., Wood. C.A., 1985.** Volcano tectonic segmentation of the northern Andes. Geology. V. 13:203-207.

**Hall, M. L., Samaniego, P., Le Pennec, J. L., Johnson, J.B., 2008.** Ecuadorian Andes volcanism: A review of Late Pliocene to present activity. Journal of volcanology and geothermal research. N. 176:1-6.

**Hernández-Pardo, O., 2006.** Crustal analysis of the colombian territory with support from potential field anomalies. Informe Sociedad Minera Kedahda S. A. 60p.

**Hervé, F.; Fanning, C.M., 2001.** Late Triassic detrital zircons in metaturbidites of the Chonos Metamorphic complex, southern Chile .Revista Geológica de Chile, V. 28, N. 1:91-104.



**Hincapié, G. y Camargo, G., 2005.** Formación de dos unidades de roca aflorantes en el flanco este de la Cordillera Central, sector de Padua. Memorias X Congreso Colombiano de Geología.

**Holtz, F. y Johannes, W., 1991.** Genesis of peraluminous granites I. Experimental investigation of melt composition at 3 to 5 Kb and various H<sub>2</sub>O activities. Journal of Petrology N 32:935-958.

**Hubach, E., 1957.** Contribución a las unidades estratigráficas de Colombia. INGEOMINAS, Informe N.1212. Bogotá: 3-9.

**Hubach, E., Alvarado, B., 1934.** Geología de los departamentos del Valle y Cauca, en especial del carbón. Informe N 87. Biblioteca INGEOMINAS. Bogotá. 99-117.

**Huppert, H.E., Sparks, S.J., 1988.** The generation of granitic magma by intrusion of basalt into continental crust. Journal of Petrology, V.29, N. 3:599–624.

**INGEOMINAS, 2011.** Informe de Actividad volcanes Nevado del Huila, Puracé y Sotará. Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Popayán. Popayán. 36p.

**INGEOMINAS-UNIVERSIDAD EAFIT., 2007.** Vulcanismo Neógeno y Cuaternario en el SW colombiano, sector formación Popayán, sector poblaciones Puracé-Coconucos, río San Francisco y sector Cañón del río Guachicono - población Río

**INGEOMINAS, 1992.** Microzonificación sismogeotécnica de Popayán. Publicación Especial de INGEOMINAS, realizada en convenio con la Comunidad Económica Europea-INGEOMINAS. Bogotá. N. 2. 224p.

**INGEOMINAS, 1996.** El sismo de Popayán del 31 de Marzo de 1983. Popayán. 320p.

**INGEOMINAS, 1999.** Compilación de la geología del cuadrángulo N-6. INGEOMINAS. Bogotá.

**INGEOMINAS, 2002.** Geología de la plancha 343 - Silvia. Escala 1:100.000. Bogotá.

**INGEOMINAS, 2003.** Geología de la plancha 365- Coconuco. Escala 1:100.000. Bogotá.

**Irvine, T.N., Baragar, W.R.A., 1971.** A guide to the chemical classification of the common rocks. Can. J. Earth Sci. V. 8:48-523.

**Janousek, V., Farrow, C. M., Erban, V., 2006.** Interpretation of whole-rock geochemical data in igneous geochemistry: introducing Geochemical Data Toolkit (GCDkit). Journal of Petrology N. 47:1255-1259.

**Keizer, J., 1954.** Estudios Geológicos en la Región de Jamundí entre los ríos Guachinte y Jordán, INGEOMINAS, Informe N.1064, 48p.

**Kellogg, J. N., Vega, V. 1995.** Tectonic development of Panamá, Costa Rica, and the Colombian Andes: Constraints from Global Positioning System geodetic studies and gravity. Geological Society of America. Special paper N. 295:75-90.

**Kerr, A. C., 2003.** Oceanic Plateaus. Treatise On Geochemistry, ISBN (set): 0-08-043751-6. V. 3: 537–565.

**Kerr, A. C; Marriner, G.F; Tarney, J; Nivia, A; Saunders, A.D; Thirlwall, M.F; Sinton, W.C., 1997.** Cretaceous basaltic terrains in western Colombia: Elemental, chronological and Sr-Nd isotopic constraints on petrogenesis. Journal of Petrology.V. 38. N.6: 677-702.

**Kroonenberg, S., Pichler, H., Diederix, H., 1982.** Cenozoic alkalibasaltic to ultrabasic volcanism in the uppermost Magdalena Valley, southern Huila department, Colombia. Geología Norandina N.5:19-26.

**León, L. A, Padilla, L. A, Marulanda, N., 1973.** Geología Recursos Minerales y Geoquímica de la Parte NE del Cuadrángulo O-5, El Bordo, Departamento del Cauca, INGEOMINAS, Popayán. Informe N. 1652. 125p.

**Le Maitre, R. W., 2002.** Igneous Rocks: a classification and glossary of terms. Recommendations of International Union of Geological Sciences Subcommission on the Systematics of Igneous Rocks. Second Edition. Cambridge University Press, New York. 59p.

**Lipman, P. W., 2007.** Incremental assembly and prolonged consolidation of Cordilleran magma chambers: Evidence from the Southern Rocky Mountain volcanic field. *Geosphere* V.3. N.1:42-70.

**Loewy, S. L., Connelly, J. N., Dalziel, I. W. D., 2004.** An orphaned basement block: The Arequipa-Antofalla Basement of the central Andean margin of South America. *Geological Society of America Bulletin*. V.116, N.1:171-187.

**López, A., Sierra, G., Ramirez, D. 2006.** Vulcanismo Neógeno en el suroccidente antioqueño y sus implicaciones tectónicas. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, N. 19:27-41.

**López, S. M., 2009.** Estratigrafía, petrología y geoquímica de las rocas volcánicas del flanco occidental del volcán Puracé, alrededores de Coconuco. Proyecto de grado Maestría. Universidad EAFIT. Medellín. 96 p.

**MacDonald, W. D., 1980.** Anomalous paleomagnetic directions in Late Tertiary andesitic intrusions of the Cauca Depression, Colombian Andes: *Tectonophysics*: 339-348.

**Mantilla L. C.; Cruz L. E. y Colegial, J. D., 2003.** Introducción a la geología del sector Vélez-Bolívar-Guavatá (Dpto. de Santander, Colombia) y su importancia para la exploración de depósitos hidrotermales. *Boletín De Geología*. Ediciones UIS. V.25, N.40:39-58.

**Maya, M., Gonzalez, H., 1995.** Unidades litodémicas en la Cordillera Central de Colombia. *Boletín Geológico INGEOMINAS*, Bogotá. V. 2-3, N.35:43-53.

**Marriner, G.F., Millward., 1984.** Petrochemistry of Cretaceous to recent Vulcanism in Colombia: *Journal of Geological Society of London*, V. 141:473-486.

**Meissner, R.O.; Flueh, E.R.; Stibane, F. y Berg, E., 1976.** Dynamics of the active plate boundary in southwest Colombia according to recent geophysical measurements. *Tectonophysics*. N. 35:115-136.

**Méndez, R.A., 1989.** Catálogo de los volcanes activos de Colombia. *Bol. Geol. Ingeominas*, Bogotá, V.30, N.3:1-75.

**McCourt, W.J; Aspend, J.A y Brook, M., 1984.** New geological and geochronological data from the Colombian Andes: continental growth by multiple accretion. *Journal of the Geological Society*. V. 141:831-845.

**Mccourt, W.; Mosquera, D.; Nivia, A. y Nuñez, A., 1984.** Mapa geológico de la plancha 234 Armenia. Escala 1:10000. INGEOMINAS. Bogotá.

**Metcalf, R.V., 2004.** Volcanic plutonic links, pluton as magma chambers and crust mantle interaction: a lithospheric scale view of magma systems. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh. Earth Sciences* N. 95:357-374.

**Meyer, C. y Hemley, J.J., 1997.** Wall rock alteration. En: *Geochemistry of Hydrothermal Ore deposits*. Primera edición, Hubert, L. Barnes (ed.). Holt, Rinehard and Winston Inc. Publication. 166-235.

**Middlemost, E.A.K., 1985.** Magmas and magmatic rocks. An introduction to igneous petrology. London. Ed. Longman. 266p.

**Miller, A., 1985.** Are strongly peraluminous magmas derived from pelitic sedimentary sources?. *Journal of Geology*. N 93:673-689.

**Miller, C. F. y Miller J. S., 2002.** Contrasting stratified plutons exposed in tilt blocks, Eldorado Mountains, Colorado River Rift, NV, USA. *Lithos* N. 61:209-224.

**Monsalve, M. L.,1991.** Geoquímica y episodios de episodios tipo San Vicente e el volcán Puracé. *Boletín geológico de INGEOMINAS*, Bogotá.N.33:3-16.

**Monsalve, M. L., 1996.** Depósitos piroclásticos asociados a la actividad explosiva del volcán Puracé actual. Informe interno INGEOMINAS. Unidad Operativa. Manizales. 23p.

**Monsalve, M. L. y Pulgarin, B., 1999.** Cadena Volcánica de los Coconucos, Colombia. Boletín geológico, Bogotá. N. 37:17-51.

**Monsalve, M. L., 2000.** Catálogo de las vulcanitas Neógenas de Colombia, Fascículo Formación Coconuco. Informe interno INGEOMINAS.

**Monsalve, M. L. y Pulgarin, B., 1995.** Cadena volcánica de los Coconucos (Colombia): Centros eruptivos y productos recientes: Boletín Geológico. Popayán. V. 37 (1-3):17– 51.

**Murcia, A., 1982.** El vulcanismo plio-cuaternario de Colombia: Depósitos piroclásticos asociados y mediciones isotópicas de  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ,  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  y  $\delta^{18}\text{O}$  en lavas de los volcanes Galeras, Puracé y nevado del Ruiz. Boletín Geológico de INGEOMINAS, Bogotá. N. 10:1- 17.

**Nivia, A., 1987.** Geochemistry and origin of the Amaime and volcanic sequence, southwestern Colombia. Thesis Magister University of Leicester, Leicester, UK. 163p.

**Nivia, A., 1987.** El complejo estructural Dagua, registro de la deformación de la provincia litosférica oceánica cretácica occidental en un prisma acrecionario. En: Memorias VII congreso colombiano de Geología. Tomo III: 54-67.

**Nivia, A., 1989.** El terreno Amaime volcánico una provincia acrecionada de basaltos de meseta oceánica. V Congreso Colombiano de Geología. Bucaramanga N.1: 1-30.

**Nivia, A., 1993.** Evidencias de obducción en el Complejo Ultramáfico de Bolivar. Memorias VI Congreso de Geología. N 1: 63-79.

**Nivia, A., 2001.** Mapa Geológico del Departamento del Valle. Memoria explicativa Escala 1:250.000. INGEOMINAS. Bogotá.

**Nivia, A., Marriner, G., Kerr, A. y Tarney, J., 2006.** The Quebradagrande Complex: A Lower Cretaceous ensialic marginal basin in the Central Cordillera of the Colombian Andes. *Journal of South American Earth Sciences*. N. 21:423-436.

**Nuñez, A., 1989.** Análisis de la nomenclatura estratigráfica del Complejo Arquía y unidades correlacionables (Cordillera Central y valle del río Cauca. Colombia). Informe interno, INGEOMINAS. Ibagué.

**Nuñez, T.A., Gonzalez, H. y Linares, E., 1979.** Nuevas edades K/Ar de los esquistos verdes del Grupo Cajamarca. *Publicaciones Especiales de Geología*. Universidad Nacional de Medellín, N. 23, 18p.

**Orrego, A., 1975.** Geología y Ocurrencias Minerales de la Parte Oeste del Cuadrángulo N-6 Popayán, INGEOMINAS, Popayán. Informe N. 1690, 124p.

**Orrego, A., 1993.** Geología de la Plancha 364-Timbío. Memoria. INGEOMINAS. 36p.

**Orrego, A. y Paris, Q., 1996.** Cuadrángulo N-6 Popayán: Geología, geoquímica y ocurrencias minerales (versión resumida). INGEOMINAS. Popayán. 51p.

**Orrego, A. y Paris, Q., 1997.** Cartografía del Cuadrángulo N-6 Popayán. Informe interno, INGEOMINAS. Popayán.

**Orrego, A., Agudelo, A., Bles, J., James, M. y Vasquez, E., 1992.** Microzonificación sismogeotectónica de Popayán. *Publicaciones especiales de INGEOMINAS*, Bogotá. N.2:28-49.

**Orrego, A.; Rossman, D. y Paris, G., 1976.** Geología del cuadrángulo N-6 Popayán. Informe 1711 INGEOMINAS, Popayán. 129p.

**Orrego, A.; Leon, L.; Padilla, L.; Acevedo, A. y Marulanda, N., 1999.** Geología de la Plancha 364 Timbío. Modelo geológico y zonas potenciales para la exploración de recursos minerales en la zona de Cauca Romeral sector Viterbo (Risaralda) - Pasto (Nariño). INGEOMINAS. Anexo 1P (mapa).

**Paris, G.; Marín, W., 1979.** Generalidades acerca de la geología del departamento del Cauca. INGEOMINAS-Regional, Popayán. Bogotá. 38p.

**Pearce, J.A., Harris N. B. y Tindle, A.G., 1984.** Trace element discrimination diagrams from the tectonic interpretation of granitic rocks. *Journal of Petrology* N.25:956-983.

**Pecerillo, A. y Taylor, T., 1976.** Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from Kastamonu area, Northern Turkey. *Contrib. Mineral. Petrol.* N.58:63-81.

**Pennington, W.D., 1981.** Subduction of the Eastern Panamá basin and seismotectonic of Northwester South America. *Journal of Geophysical Research*, V. 86, N. 10:753-770.

**Petrelli M.; Poli G.; Perugini D. y Peccerillo A., 2005.** Petrograph: New Software to Visualize, Model, and Present Geochemical Data in Igneous Petrology, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, V.6.

**Pilger, R. H., 1981.** Plate reconstruction, aseismic ridges, and low-angle subduction beneath the Andes. *Bull. Geol. Soc. Am.* N. 92:448-56.

**Pilger, R. H., 1983.** Kinematics of the South American subduction zone from global plate reconstructions. *Geodynamics of the Eastern Pacific Region, Caribbean and Scotia arcs.* *American Geophysics.* N 9:113-126.

**Pilger, R.H., 1984.** Cenozoic plate kinematics, subduction and magmatism: South American Andes. *Journal of Geological Society of London.* V. 141:793-802.

**Pitcher, W., 1982.** Granite type and tectonic environment, in: HSU, K.(Ed.), *Mountain Building Processes.* Academic Press, New York: 19–40.

**Pompa-Mera, V., 2009.** Geoquímica y geocronología de los complejos intrusivos en el sureste de Chiapas, México. Tesis de Maestría. UNAM. México. 160p.

**Riley, T.R. y Knight, K.B., 2001.** Age of pre-break up Gondwana magmatism. *Antarctic Science*, V.13:99-110.

**Risnes, K., 1989.** Muestreos de cuerpos intrusivos volcánicos terciarios en los departamentos de Nariño y del Cauca. Reporte de actividades II. INGEOMINAS. 11p.

**Risnes, K., 1995.** Géodynamique du sud-ouest des Andes colombiennes (dépression du Cauca-Patia) durant le Néogène. Approche paléomagnétique. Terre & Environnement, V. 2:169p.

**Restrepo, J. y Toussaint, J., 1974.** Obducción cretácea en el occidente colombiano. Informe 58 Anales Facultad de Minas, Medellín. 293p.

**Restrepo, J. J.; Toussaint, J.F. y González, H., 1981.** Edades Mio-Pliocenas del magmatismo asociado a la Formación Combia. Departamentos de Antioquia y Caldas, Colombia: Geología Norandina, V. 3:21-26.

**Roddick, J.A., 1983.** Circum -Pacific plutonic terranes: An overview. En: Circum pacific Plutonic Terranes. Geological Society of America. Memoria N.159:1-3.

**Rodriguez-Vargas, A., Koester, E., Mallmann, G., Conceicao, R.V.Kawashita, k. y Weber, M.B.I., 2005.** Mantle diversity beneath the Colombian Andes, Northern Volcanic zone: Constraints from Sr and Nd isotopes. Lithos N. 82:471-484.

**Rollinson H. 1993.** Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, Interpretation. Pearson Prentice Hall. United Kingdom, Longman, 352p.

**Rondón, G. y Vega, V. 1990.** Interpretación geoquímica regional del cuadrángulo N-6. INGEOMINAS-Popayán. Bogotá. 33p.

**Sánchez, M.; Gómez, A. y Toro, L., 2007.** Proveniencia del material clástico del Complejo Quebradagrande y su relación con los complejos estructurales adyacentes. Boletín Ciencias de la Tierra N. 22.

**Shand, S. J., 1943.** Eruptive Rocks; Their Genesis, Composition, Classification, and their Relation to Ore Deposits, with a chapter on Meteorites. Second edition, Hafner Publishing Co. New York. 444p.



**Shaw, D. 1964.**, Interpretation geochimique des elements en traces dans les roches cristallines. Mason Ed., París. 237p.

**Streckeisen, A.L., 1974.** Classification and Nomenclature of Plutonic Rocks. Recommendations of the IUGS Subcommission on the Systematics of Igneous Rocks. Geologische Rundschau. Internationale Zeitschrift für Geologie. Stuttgart. V.63:773-785.

**Taboada, A.; Rivera, L.; Fenzalida, A.; Cisterna, A.; Phillip, H.; Biijawaard, H.; Olaya J. y Rivera, C., 2000.** Geodynamics of the northern Andes: Subductions and intracontinental deformation (Colombia) Tectonic, V.5.N.19:787- 813.

**Taylor, S., 1965.** The application of trace element data to problems in petrology. En Physics and chemistry of the Earth. Ed. L.H. Arhens. V6:133-213.

**Tellez, L., 2011.** Aporte al conocimiento de la geología volcánica en las inmediaciones de la población de Río Blanco (Cauca). Proyecto de grado Maestría. Universidad EAFIT. Medellín. 73p.

**Tellez, L.; Marín-Cerón M.I.; Toro, G. y Pulgarin, B., 2008.** Preliminary petrological, geochemical and stratigraphical characterization of the Sotará volcano, SW Colombia. 7th International Symposium on Andean Geodynamics (ISAG 2008) Extended Abstracts: 538-541.

**Toro G.; Torres, P.; Jerez, K.; Tellez, L.; López,S.; Cañola. E.; Pulgarin, B.; Monsalve, M. y Marín, M. (En preparación).** Vulcanismo del suroccidente colombiano: nuevos datos geoquímicos y cronológicos en el Departamento del Cauca, Colombia. Universidad EAFIT. Medellín. 15p.

**Torres, M. P.; Monsalve. M. L.; Pulgarín, B. y Cepeda, H., 1999.** Caldera de Paletará: Aproximación a la fuente de las ignimbritas del Cauca y Huila: Boletín Geológico de INGEOMINAS, V. 37:1-15.

**Torres, M.P.; Ibañez, D. y Vasquez, E., 1992.** Geología y estratigrafía de la Formación Popayán. INGEOMINAS, Informe interno, Popayán. 85p.

**Tschanz, C.M.; Marvin, R.F.; Cruz, J., Mehnert, H.H. y Cebula G.T., 1974.** Geologic evolution of the Sierra Nevada de Santa Marta, Northeastern Colombia. Geological Society of America. N. 85:84-273.

**Toussaint, J. F. y Restrepo, J. J., 1976.** Modelos orogénicos de tectónica de placas en los Andes colombianos. Boletín Ciencias de la Tierra, U. Nal. Medellín. N.1:1-47.

**Turlan-Tristan, 1999.** Software libre QAPF\_12, versión 1999. Universidad Complutense de Madrid. [www.Christian.nicollet.free.fr](http://www.Christian.nicollet.free.fr).

**Vesga, J. y Barrero, D., 1978.** Edades K/Ar en rocas ígneas y metamórficas de la Cordillera Central de Colombia y su implicación geológica. Segundo Congreso Colombiano de Geología, Resumen. Bogotá. 19p.

**Vinasco, C., 2004.** Evolução crustal e história tectônica dos granitóides Permo-Triássicos dos Andes do Norte. Ph.D. Thesis, University of São Paulo, Brasil.

**Vinasco, C.J.; Cordani, U.G; González, H., Weber, M. y Peláez, C. 2006.** Geochronological, isotopic, and geochemical data from Permo-Triassic granitic gneisses and granitoids of the Colombian Central Andes. Journal of South American Earth Sciences. V. 21. N.4:355-371.

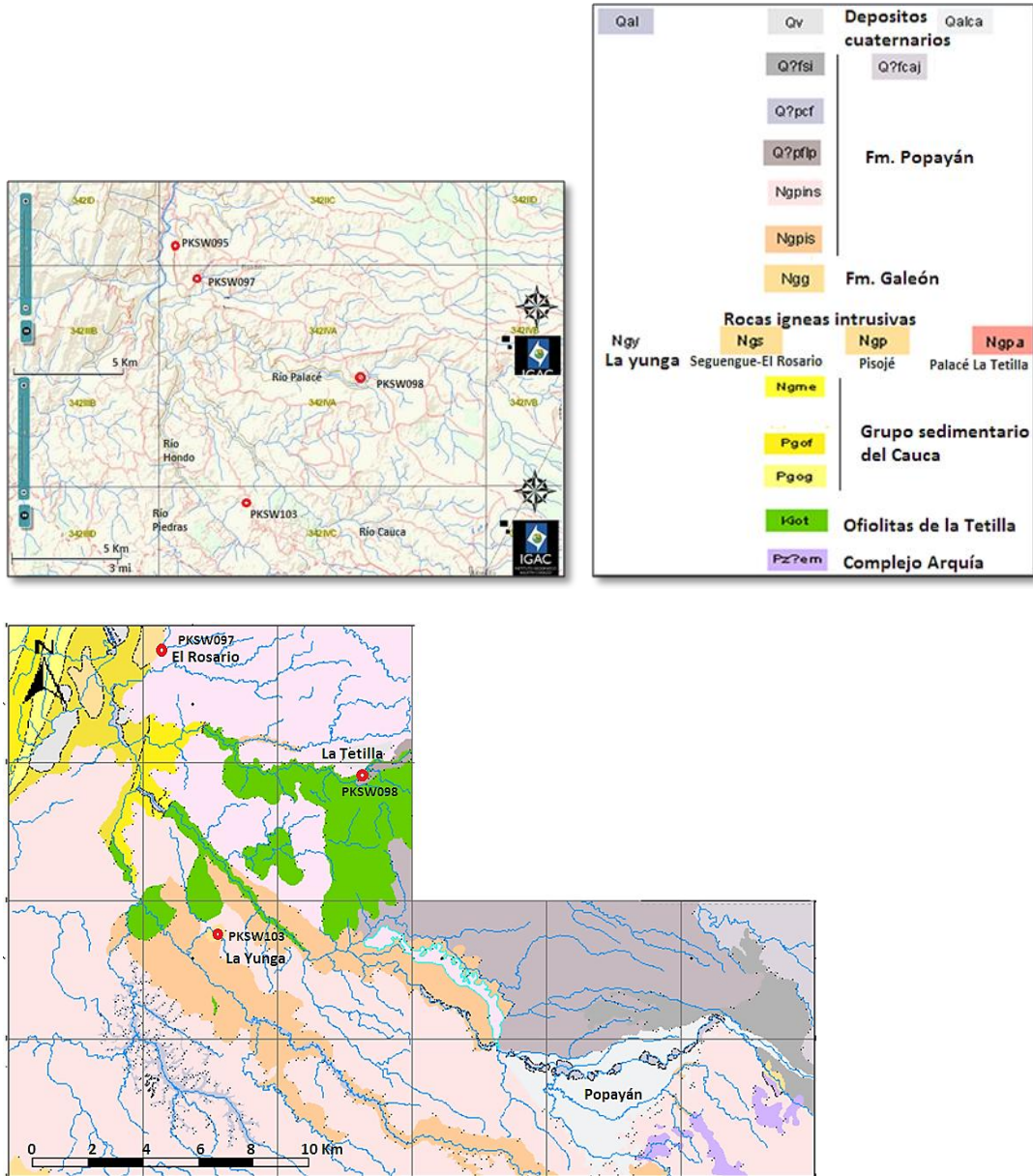
**Weber, M.B.I., Tarney, J., Kempton, P.D. and Kent, R. W., 2002.** Crustal make-up of the northern Andes: evidence based on deep crustal xenolith suites, Mercaderes, SW Colombia. Tectonophysics N. 345:49–82.

**Whalen, J.B., 1993.** A type granites; geochemical characteristics, discriminations, and petrogenesis; contributions to mineralogy and petrology. V.95:407-419.

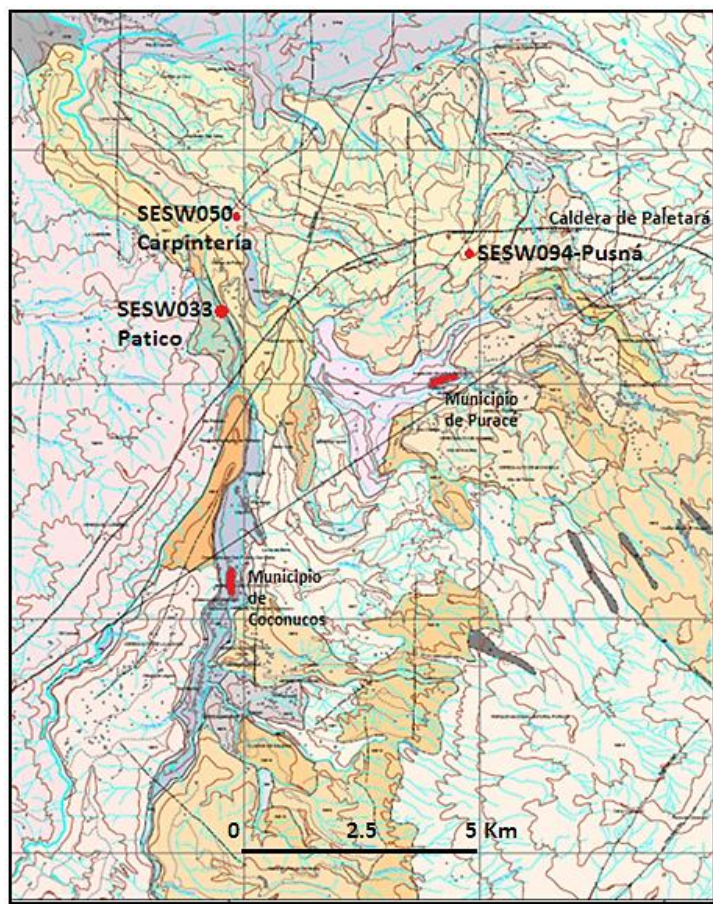
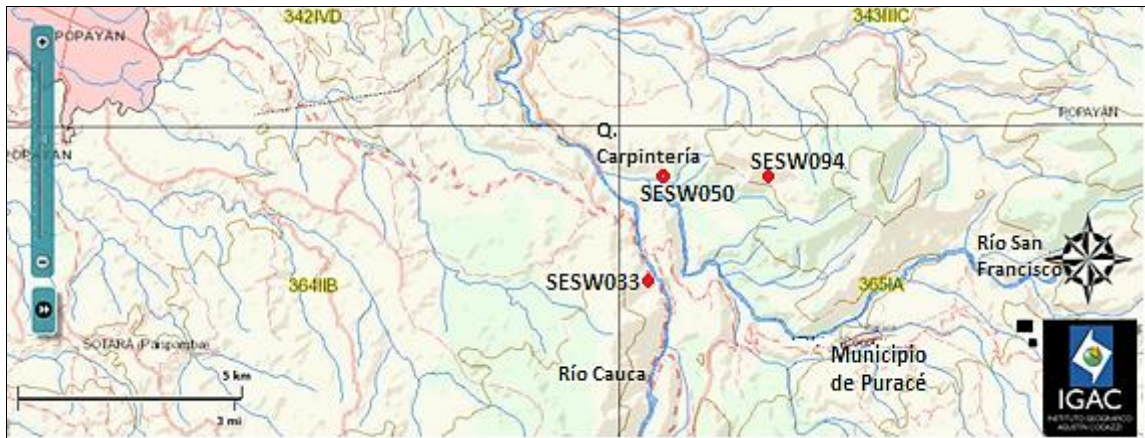
**Wilson, M., 1989.** Igneous petrogenesis. Harper Collins Academic. London. 466p.

**Zen, E. 1988.** Phase relations of peraluminous granitic rocks and their petrogenetic implications. Annual review of Earth and Planetary Sciences N.16:21-52.

## Anexo 1: Mapas de localización de los puntos de muestreo



**Localización y cartografía geológica de intrusivos El Rosario, La Yunga y La Tetilla. Próximos a Popayán hacia el norte de la zona de estudio. Modificado de [www.igac.gov.co](http://www.igac.gov.co) y U.EAFIT, 2007**

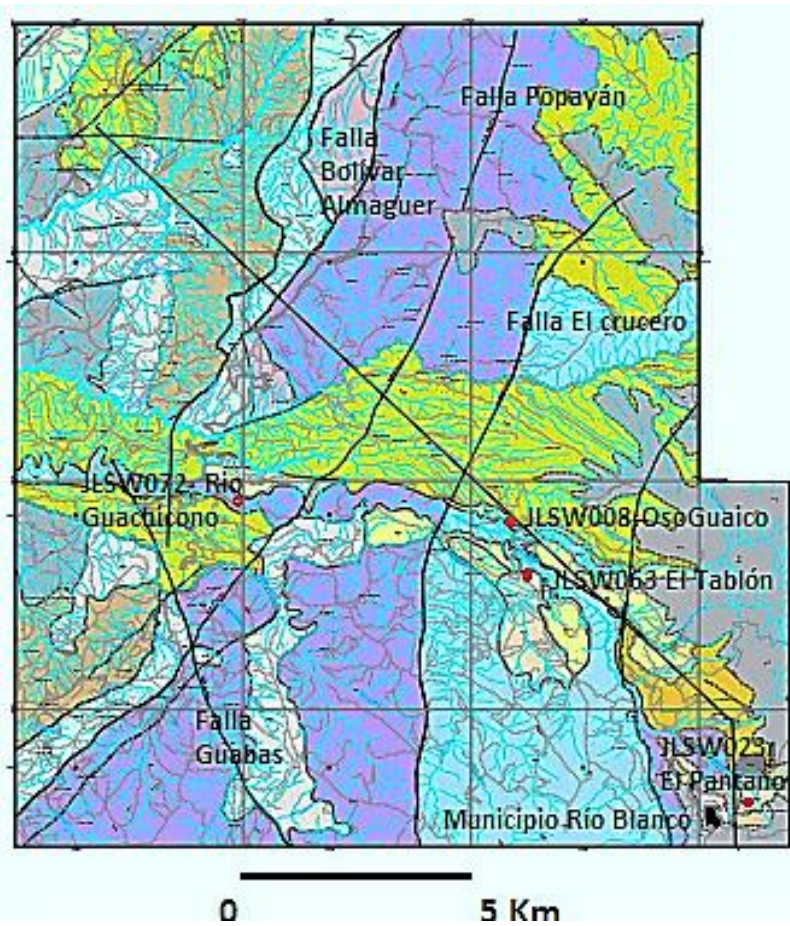
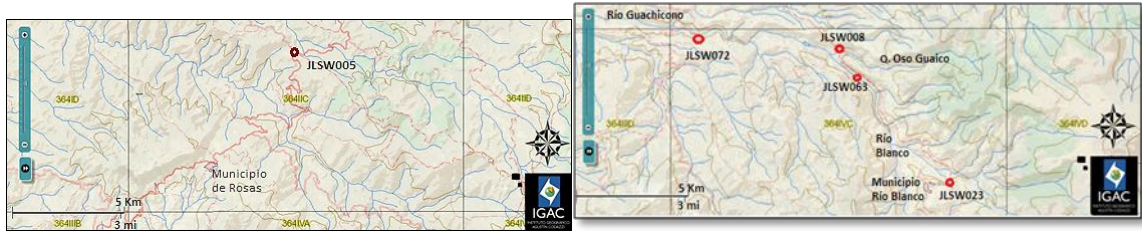


**Localización y cartografía geológica de intrusivos Carpintería, Pusná y Patico. Próximos a Puracé hacia el este de la zona de estudio. Modificado de [www.igac.gov.co](http://www.igac.gov.co) y U.EAFIT, 2007.**



## Leyenda Mapa Geológico Puracé-Coconucos

<div style="background-color: #d3d3d3; padding: 2px; display: inline-block;">Qal</div> Depósito aluvial	<div style="background-color: #d3d3d3; padding: 2px; display: inline-block;">Qdv</div> Depósitos de vertiente	<div style="background-color: #696969; padding: 2px; display: inline-block;">Qt</div> Tillita
<div style="background-color: #d3d3d3; padding: 2px; display: inline-block;">Q?fsi</div> Depósitos de flujo de San Isidro	<div style="background-color: #d3d3d3; padding: 2px; display: inline-block;">Q?fcaj</div> Depósito de flujo de Cajibío	<div style="background-color: #f0f0f0; padding: 2px; display: inline-block;">Qsf</div> Depósito de flujo de ceniza y escoria del Río San Francisco <div style="background-color: #f4a460; padding: 2px; display: inline-block;">Ndf1 9</div> Depósito de flujo de lava 9 con ignimbrita a la base
<div style="background-color: #f4a460; padding: 2px; display: inline-block;">Ndf1 9</div> Depósito de flujo de lava 9		
<div style="background-color: #f4a460; padding: 2px; display: inline-block;">Ndf1 8</div> Depósito de flujo de lava 8		
<div style="background-color: #f4a460; padding: 2px; display: inline-block;">Ndfcb</div> Depósito de flujo de ceniza y bloques		
<div style="background-color: #f4a460; padding: 2px; display: inline-block;">Ndfcp</div> Depósito de flujo de ceniza y pómez		
<div style="background-color: #f4a460; padding: 2px; display: inline-block;">Ndf1 7</div> Depósito de flujo de lava 7	<div style="background-color: #d3d3d3; padding: 2px; display: inline-block;">Ndf1 6</div> Depósito de flujo de lava 6	
<div style="background-color: #f4a460; padding: 2px; display: inline-block;">Ndf1 5</div> Depósito de flujo de lava 5	<div style="background-color: #f4a460; padding: 2px; display: inline-block;">Ndf1 4</div> Depósito de flujo de lava 4	
<div style="background-color: #f4a460; padding: 2px; display: inline-block;">Ndf1 3</div> Depósito de flujo de lava 3		
<div style="background-color: #f4a460; padding: 2px; display: inline-block;">Ndf1 2</div> Depósito de flujo de lava 2	<div style="background-color: #f4a460; padding: 2px; display: inline-block;">Ndf1 1</div> Depósito de flujo de lava 1	
<div style="background-color: #f4a460; padding: 2px; display: inline-block;">Nisc</div> Ignimbrita soldada de Coconuco	<div style="background-color: #f0f0f0; padding: 2px; display: inline-block;">Ngpins</div> Ignimbrita no soldada	
	<div style="background-color: #90ee90; padding: 2px; display: inline-block;">Kcq</div> Complejo Quebrada Grande	



**Localización y cartografía geológica de intrusivos El Encenillo (Fuera del área de estudio-JLSW005), Oso Guaico, El Pantano, El Tablón, y Guachicón. Próximos al municipio de Río Blanco hacia el sur de la zona de estudio. Modificado de [www.igac.gov.co](http://www.igac.gov.co) y U.EAFIT, 2007.**

## Leyenda Mapa Geológico Río Blanco

<b>Qal</b> Terrazas Aluviales	<b>Qp</b> Flujo Piroclastico
<b>Qco</b> Depósito Coluvial	<b>Qc</b> Ceniza de caída
	<b>Ngac</b> Ignimbrita Las Cabras
	<b>Ngqp</b> Ignimbrita Quinquina
	<b>Ngqdl</b> Depósito de flujo de lava Patena
	<b>Ngqb</b> Ignimbritas Barrial
	<b>Ngqv</b> Ignimbrita y lavas de la Virgen
	<b>Ngqa</b> Ignimbrita El Auca
<b>Dfva</b> Depósito fluvivolcánico antiguo	<b>Ngg</b> Formación Galeón
	<b>Nge</b> Formación Esmita
	<b>Nga</b> <b>Ngda</b> Pórfidos Andesíticos y Dacíticos
<b>Pgm</b> Formación Mosquera	
<b>Kiba</b> Complejo Barroso Amaime	
<b>Kiub</b> Complejo de Rocas Máficas y Ultramáficas	<b>Mzgb</b> Granitoide de Bellones
	<b>Pzm</b> Complejo Arquía

## Anexo 2: PETROGRAFÍA

### PKSW095-EL ROSARIO

Roca de textura fanerítica, conformada por fenocristales euhedrales, inequigranulares, bien desarrollados de plagioclasa, hornblenda y opacos. Se observa alteración hidrotermal tipo clorita, calcita, y epidota. (**Figura 4A**)

#### Descripción mineralógica:

**Plagioclasa:** Cristales euhedrales fracturados, de borde reabsorbido con núcleo euhedral, zonados hexagonalmente, su centro extingue normal (cálcico a sódico) y su borde inverso (sódico a cálcico), presenta bordes de sobrecrecimiento que alcanzan 0.1mm de espesor. Algunos cristales presentan extinción ondulatoria. Son frecuentes las inclusiones de opacos de 0.06 mm alargados de hábito tabular. El tamaño de los cristales de plagioclasa varía desde 0.36 mm hasta 1.44 mm, textura seriate. La composición de la plagioclasa según el método Michel-Levy es labradorita 69 %An.

**Anfíbol:** Tipo hornblenda. Cristales euhedrales de forma hexagonal, algunos de forma tabular cloritizados, que exhiben macla Carlsbad. Se observan inclusiones de plagioclasa anhedral, y granate. Presenta textura esquelética en todo el cristal, en algunos cristales se presenta textura sieve hacia zonas céntricas y redondeadas del cristal. Tamaño promedio de los cristales 0.35 mm.

**Ortopiroxeno:** Tipo hiperstena. Se observa como cristales euhedrales de hábito tabular en cristales de hornblenda y plagioclasa. Tamaño varía de 0.1 hasta 0.15 mm.

**Opacos:** Cúmulos de cristales de anhedrales a subhedrales, distribuidos aleatoriamente en la sección. Se presentan también como inclusiones anhedrales, dentro de fenocristales de hornblenda. Su tamaño varia de 0.04 a 0.3 mm.

**Cuarzo:** Cristales anhedrales con extinción ondulante con inclusiones de plagioclasa que alcanzan los 0.2 mm de diámetro. Se observa como los cristales de anfíbol intruyen los bordes del cristal. El tamaño promedio de los cristales de cuarzo es de 1 mm.



**Clorita:** Variedad Pennina. Se caracteriza por colores de interferencia azul Berlín anómalo, de forma anhedral, relleno de cavidades en anfíbol cloritizado. Tamaño promedio 0,55 mm de longitud.

**Calcita:** Cristales amorfos relleno de espacios entre cristales o cavidades dentro de ellos. Frecuentemente se observan como inclusiones dentro de la plagioclasa. Tamaño promedio 0.32 mm de longitud.

**Epídota:** Cristales de subhedrales a anhedrales, que frecuentemente se encuentran como inclusiones dentro de la plagioclasa, distribuidas principalmente en los sectores centrales del cristal. También se observan relleno de algunas cavidades en anfíboles. Tamaño varía desde 0.04 mm hasta 0.5 mm.

**Granate:** Cristales euhedrales que se observan como inclusiones dentro de cristales cloritizados de anfíbol. Su tamaño promedio es 0.1 mm.

**Observaciones:** Los bordes de crecimiento en la plagioclasa revelan dos etapas de cristalización, en las que el núcleo posee formas muy euhedrales y extinción normal, seguida por una etapa posterior que afecta el mismo cristal generando bordes que siguen el contorno del núcleo pero tienen formas anhedrales y extinción inversa. Lo anterior presume para la etapa más antigua un ambiente de largos tiempos de residencia y condiciones tranquilas y estables de cristalización dentro de la cámara magmática, lo que permitió las formas euhedrales y los tamaños de hasta 1.44 mm, y en la segunda etapa procesos más rápidos y desestabilizadores de la cámara magmática, que generaron los bordes de crecimiento de 0.1 mm de espesor. La presencia de hornblenda con textura esquelética, indica condiciones hídricas que entraron al sistema, y generaron la rápida cristalización del anfíbol. La composición de la plagioclasa es tipo Labradorita 69% An, asociada a la presencia de piroxeno, granate y anfíboles, lo que revela una composición más básica, y de condiciones profundas de cristalización.

**Nombre de la roca** (Streckeisen, 1974; Le Maitre 2002. Diagrama QAPF): Cuarzogabro teniendo en cuenta la composición de la plagioclasa. (Labradorita 69% An)

QAPF 1.2 UCM-GEOLOGICAS TURLAN Tristan 03 - 1999

quartz	5	!!
feldspath alc.		
albite		
sanidine		!
orthoclase		!
microcline		
orthose		
plagioclase		
oligoclase		
andésine		
labradorite	57	
bytownite		
anorthite		
foïdes		!!
néphéline		
leucite		
hauyne		
calcite	1	
olivine		
cordiérite		
hornblende	25	
biotite		
muscovite		
cpx		
aegirine		
opx	1	
apatite		
sphène		
zircon		
verre		!
opaques	11	
autres		!

Q 8.065  
A 0.000  
P 91.935  
F 0.000  
IC 37.000 !

calcul de QAPF

CLASSIFCACTON  
 Plut  Volc

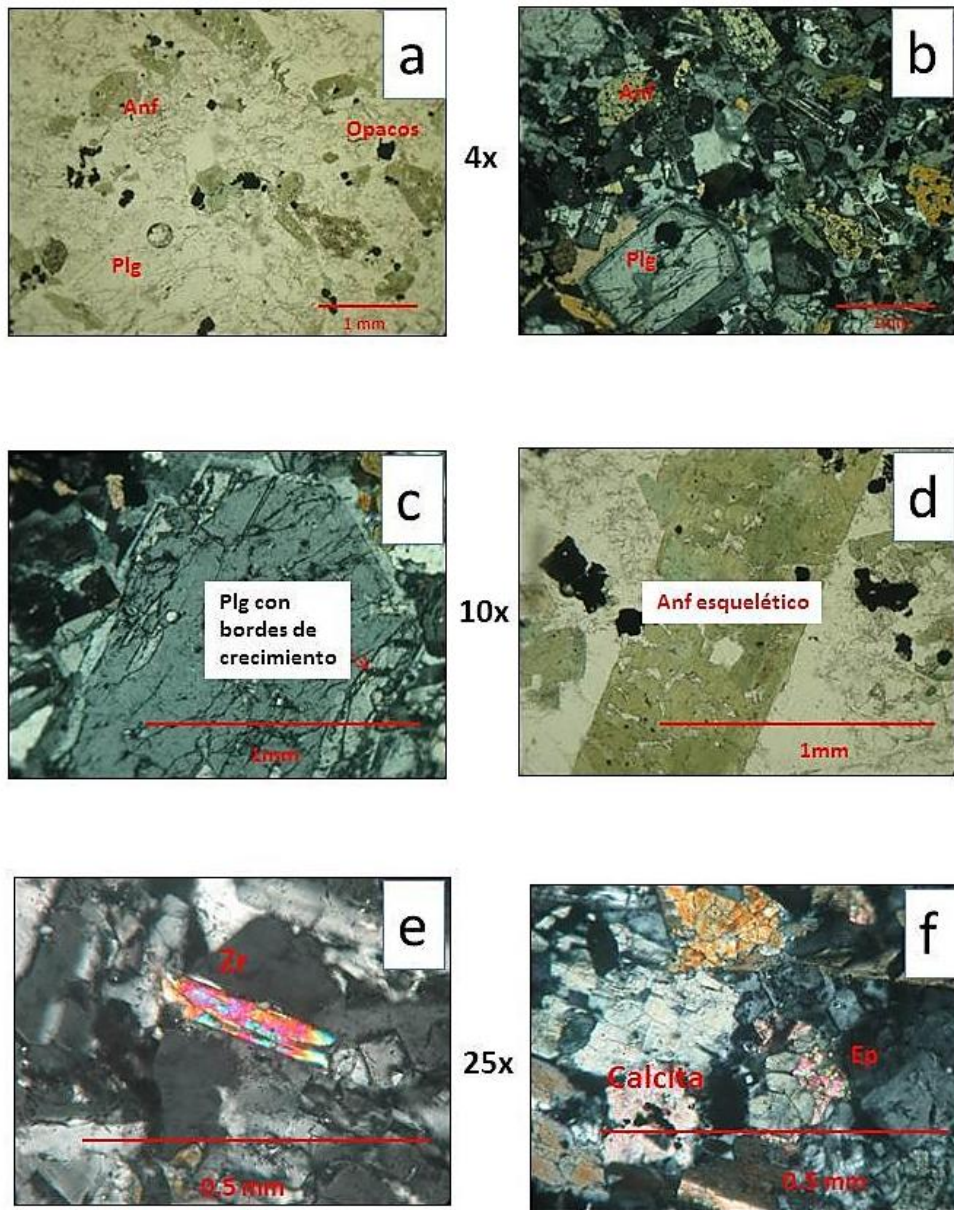
analyse modale totale :  
100.000

autre calcul

QUITTER

? IC>90  
T<sup>2</sup> à propos

Enfin... la roche est un(e) :  
quartzodiorite, quartzogabbro, quartzoanorthosite



Fotografías en sección delgada de la muestra PKSW095- intrusivo El Rosario. Fotografías a y b. Textura fanerítica, en la que se destacan anfíboles tipo hornbenda con textura esquelética y cristales bien desarrollados de plagioclasa, nicoles IIs y xs. c. y d. Detalle de plagioclasa y anfíbol vista con el objetivo 10x en nicoles xs e IIs. e y f. Detalle de minerales accesorios como circón, calcita y epídota, vista en nicoles xs con el objetivo 20x.

## PKSW097- EL ROSARIO

Roca de textura fanerítica, con cristales bien desarrollados, en la que sobresalen fenocristales de granate rosado.

### **Descripción mineralógica:**

**Plagioclasa:** Cristales de núcleo euhedral, bien definido y extinción normal, bordes de crecimiento con extinción ondulante, que le generan al cristal forma subhedral. Cristales altamente fracturados. Es posible observar en sus núcleos maclas de Carlsbad y albita. Sus cristales son inequigranulares, variando desde 0.12 mm hasta 2.4 mm. En los cristales de mayor tamaño (>1.2 a 2.4 mm), poseen inclusiones de anfíbol, se encuentran con mayor grado de fracturamiento que los pequeños (< 1.2 a 0.12 mm). La composición de la plagioclasa mediante el método Michel-Levy es Labradorita (An 68%).

**Biotita:** Cristales subhedrales, con bordes corroídos, y embahiamiento. Suelen presentarse como individuos distribuidos aleatoriamente en la sección. Presentan inclusiones de opacos anhedrales de tamaño muy fino. Posee alteración a clorita. Tamaño promedio 0.35 mm de longitud.

**Anfíbol:** Tipo hornblenda. Cristales subhedrales y anhedrales cuyos núcleos se observan frescos y sus bordes cloritizados. Se observa maclado tipo Carlsbad. Su tamaño promedio es de 0.7 mm.

**Cuarzo:** anhedral, se observan como cristales de bordes reabsorbidos, y extinción ondulante con inclusiones de plagioclasa. Tamaño 0.45 mm de diámetro promedio.

**Clorita:** Tipo Pennina. Expone un característico color de interferencia azul Berlín anómalo. Se presentan en cristales subhedrales y anhedrales con inclusiones de epídota. También se observan como producto de alteración distribuido hacia los bordes de los anfíboles y biotitas. Su tamaño promedio es de 0.2 mm.

**Epídota:** Se observa como inclusiones cristales anhedrales en cristales de clorita. También se observa formando agregados con cristales amorfos de calcita, epídota y opacos. Tamaño promedio 0.1 mm.

**Calcita:** Cristales anhedrales que se presentan aprovechando cavidades en el anfíbol. Su tamaño varía de 0,1 a 0,2 mm.

**Granate:** De forma subhedral, posee en nicoles paralelos color rosado, presenta bordes reabsorbidos y en algunos sectores se observa embahiamiento relleno por material de la matriz, su tamaño es de 6 mm de diámetro. Se observa fracturado, presenta inclusiones de opacos anhedrales de 0.2 a 0.3 mm de diámetro, calcita anhedral (0.05 mm), plagioclasa subhedral (0.3-0.1 mm), cuyos bordes presentan embahiamiento y están redondeados.

**Opacos.** Cristales que se presentan como individuos o como inclusiones. Se observan como inclusiones en granate, anhedrales, de bordes redondeados y embahiamiento. Tamaño promedio 0.24 mm de diámetro, pero alcanza tamaños mayores de hasta 0.4 mm de diámetro.

**Observaciones:** El contenido de cuarzo disminuye, respecto a la muestra PKSW095, sin embargo también se distingue en el conteo modal (2%). Esta roca presenta alteración hidrotermal propilítica manifestada por la asociación mineral clorita, calcita y epidota. La clorita tipo Pennina, se caracteriza por colores anómalos y al parecer es producto de anfíboles y biotitas.

**Nombre de la roca** (Clasificación Streckeisen, 1974; Le Maitre 2002. Diagrama QAPF para rocas plutónicas): **Gabro**, según composición de la plagioclasa (Labradorita An 68%, y máficos mayores al 10%).

QAPF 1.2 UCM-GEOLOGICAS TURLAN Tristan 03 - 1999

quartz	2	!!
<b>feldspath alc.</b>		
albite		
sanidine		!
orthoclase		!
microcline		
orthose		
<b>plagioclase</b>		
oligoclase		
andésine		
labradorite	60	
bytownite		
anorthite		
<b>foïdes</b>		!!
néphéline		
leucite		
haayne		
calcite		
olivine		
cordiérite		
hornblende	19	
biotite	16	
muscovite		
cpx		
aegirine		
opx		
apatite		
sphène		
zircon		
verre		!
opaques	3	
autres		!

Q 3.226  
A 0.000  
P 96.774  
F 0.000  
I C 38.000 !

calcul de QAPF

CLASSIFICTON  
Plut Volc

analyse modale totale :  
100.000

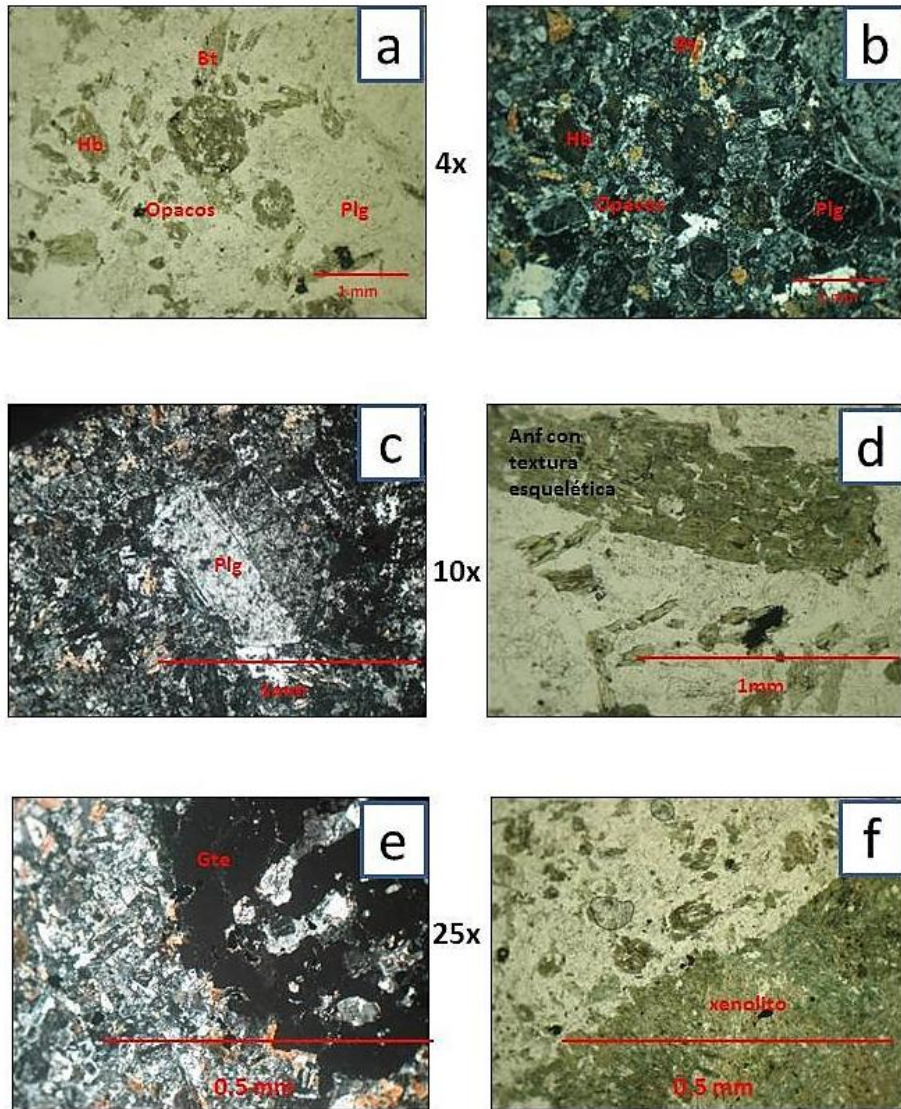
autre calcul

QUITTER

Enfin... la roche est un(e) :  
diorite (An<50), gabbro (An>50), anorthosita (M<10)

The diagram is a QAPF (Quartz, Alkali feldspar, Plagioclase, Felsic) diagram. The vertical axis is labeled 'Q' (Quartz) at the top and 'F' (Felsic) at the bottom. The horizontal axis is labeled 'A' (Alkali feldspar) on the left and 'P' (Plagioclase) on the right. The diagram is divided into several fields by lines. A red dot is plotted on the P axis, very close to the P vertex, indicating a high percentage of plagioclase. The value '96.774' is shown next to 'P', confirming this. The 'I C' value is 38.000, which is marked with an exclamation point, indicating it is outside the standard range for this diagram.





Fotografías en sección delgada de la muestra PKSW097- intrusivo El Rosario. Fotografías a y b. Textura fanerítica, en la que se destacan anfíboles tipo hornblenda, biotitas y plagioclasa seriate. Nícoles IIs y xs con el objetivo 4x. c y d. cristal de plagioclasa tabular subhedral, fracturado y con bordes de crecimiento y cristal de anfíbol con textura esquelética, en nícoles xs y objetivo 25x. e y f. Cristal de granate con bordes corroídos, embahiamiento e inclusiones de plagioclasa y calcita.

## PKSW097-XENOLITO

Se observa como un fragmento tabular corto, de bordes redondeados de color verdoso, con contornos que se observan reabsorbidos irregulares y con señales de embahiamiento y metamorfismo. Esta constituido principalmente por cristales de grano medio xenoblásticos y subidioblásticos de hornblenda cloritizada, hornblenda no cloritizada, y plagioclasa. Su diámetro alcanza los 12 mm.

### **Descripciones mineralógicas:**

**Hornblenda cloritizada:** Cristales de forma anhedral, y subhedral en menor proporción, se observan fracturados sin una dirección preferencial dentro del fragmento de roca. Tamaño variable entre 0.84 mm y 1.2 mm. Algunos cristales se observan deformados, doblados y fracturados.

**Hornblenda fresca:** Cristales anhedrales con inclusiones de plagioclasa (0.024 mm), y opacos (0.048 mm). El tamaño promedio de estos cristales varía entre 0.84 m hasta 0.96 mm. Se observan fracturados.

**Plagioclasa:** cristales anhedrales fracturados, que presentan textura Sieve en su núcleo, y bordes más frescos. Presenta extinción ondulante y maclado albita principalmente y en menor proporción Carlsbad. Puede observarse que cristales de hornblenda intruyen los cristales de plagioclasa. Alcanzan en tamaño promedio 2.9 mm. de diámetro. Su composición según el método Michel-Levy es Andesina (42%An).

**Opacos:** se observan como agregados o individuos. Su forma es anhedral, de bordes irregulares y suelen estar asociados a la hornblenda más fresca. Tamaño promedio 0.84 mm.

**Cuarzo:** Cristales anhedrales con bordes reabsorbidos cuyos bordes se incluyen están incluyendo cristales de hornblenda. Tamaño promedio 0.8 mm.

**Epídota:** Cristales anhedrales que se presenta como inclusiones en el anfíbol. Tamaño 0.2 mm de longitud.



**Observaciones:**

El Xenolito se aprecia en muestra de mano de color negro verdoso, contrastante con el color gris de la matriz, sin embargo en sección delgada se observa totalmente conformado por cristales con textura granoblástica y en algunos sectores nematoblástica.

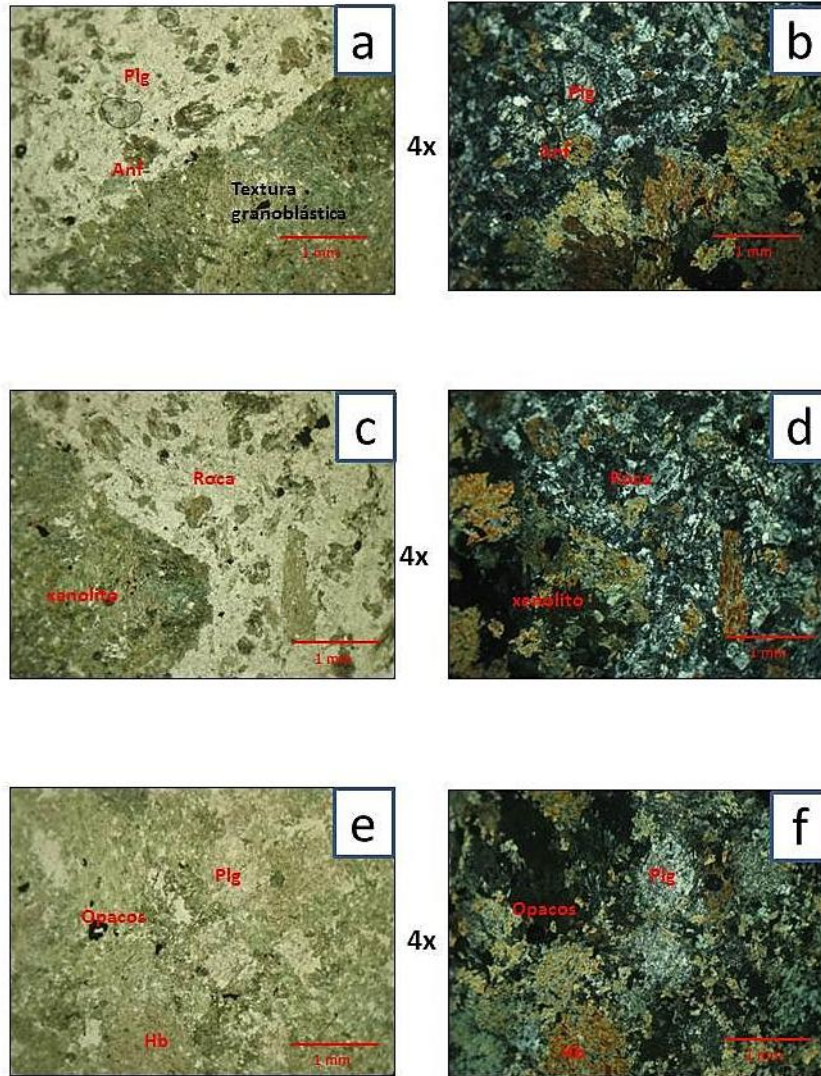
Las Plagioclasa de la roca se observan con bordes de crecimiento que no se observan en la plagioclasa del xenolito. La composición de la plagioclasa varía de más básica en la roca (labradorita), al xenolito que es más ácido. (Andesina). La plagioclasa del xenolito presenta textura Sieve, por desequilibrio en el xenolito.

Mineralógicamente la roca y el xenolito poseen la misma composición aumentando modalmente en el xenolito la cantidad de hornblenda.

Se observan xenocristales en la roca semejantes a los observados dentro del Xenolito.

**Nombre de la roca:** Anfibolita masiva según la plagioclasa entre An 25-40.

(Fettes y Desmonds, 2007)



Fotografías en sección delgada del xenolito anfibólico en PKSW097-intrusivo El Rosario. Fotografías a y b. Contacto entre la roca (cuarzogabro) y el xenolito, se destacan anfíboles tipo hornbenda, Niles y xs con el objetivo 4x. c y d. se observa embahamiento de los bordes del xenolito por material de la matriz. Niles y xs en objetivo 4x. e y f. Detalle anfibolita masiva que conforma el xenolito. Niles y xs en objetivo 4x.

## PKSW098-LA TETILLA

Roca de textura porfídica, en la que se observan direcciones de flujo marcadas por fenocristales de biotita tabulares que rodean megafenocristales de biotita, plagioclasa y cuarzo.

**Matriz:** De grano muy fino, equigranular, microlítica, conformada por cristales alotriomórficos de plagioclasa subhedral, calcita anhedral, opacos anhedrales, y sericita. Tamaño 0.02 mm.

### **Descripción mineralógica:**

**Plagioclasa:** Se presenta en mayor proporción en fenocristales subhedrales y en menor proporción en cristales euhedrales. En nicoles paralelos se observa la plagioclasa con un color pardo claro, aspecto corroído, sucio y textura tamiz o sieve hacia los bordes del cristal. Presentan maclado albita, Carlsbad y en menor proporción albita-Carlsbad. La plagioclasa se presenta tanto como individuos como conformando agregados de pocos cristales anhedrales y subhedrales, con bordes redondeados y reabsorbidos. En el centro de la mayoría de los cristales es posible observar relictos de plagioclasa fresca que expone maclado y extinción ondulante. Zonación inversa. (Su composición según el método Michel-Levy es Andesina 40% An).

Se observan diversos tipos de inclusiones: de biotita euhedral con bordes aciculares y completamente sericitizadas, de 1.5 mm de longitud. Las inclusiones de zircón se observan como cristales euhedrales, prismáticos, 0.06 mm de longitud. Cristales subhedrales de epidota de 0.1 mm de diámetro y esfena euhedral de 0,1 mm de longitud. Cristales de plagioclasa subhedral, tabular de bordes redondeados, alcanzan 0.16 mm de longitud. También son frecuentes las inclusiones de cristales de calcita, anhedral, que alcanzan 0.2 mm de longitud.

Según la clasificación de su tamaño y la forma de los cristales se distinguen dos generaciones: una euhedral que abarca tamaños entre 1.2 mm y 1.92 mm. La segunda generación es caracterizada por formas subhedrales que abarcan tamaños desde 0.3 mm hasta 0.7 mm.

**Biotita:** Cristales euhedrales hexagonales o tabulares totalmente cloritizados. Los bordes de los cristales suelen estar corroídos, sericitizados formando coronas, también siguiendo el clivaje paralelo a la longitud del cristal. Se

observan múltiples inclusiones de minerales opacos de forma anhedral y calcita anhedral relleno de espacios dentro de los cristales.

Se distinguen dos generaciones, la primera posee cristales de biotita que sobresalen por su tamaño, 1.7 mm-1.9 mm, se encuentran distribuidos en la sección aleatoriamente, y en menor proporción que los de la segunda generación.

La segunda generación, se observa rodeando megafenocristales de biotita, plagioclasa y cuarzo (textura de flujo). Se observan como fenocristales tabulares, elongados de forma euahedral y subahedral, cloritizados y en algunos casos es posible verles deformación reflejada por cristales curvos. Su tamaño promedio es de 0.74 mm.

**Cuarzo:** Fenocristales subherales de bordes redondeados y reabsorbidos. Altamente fracturados. En algunos cristales se observan embahiamientos rellenos con material de la matriz. Presenta inclusiones fluidas que forman lamelas a lo largo del cristal. Su tamaño varía de 2.4 a 2.9 mm.

**Epídota:** Mineral de alto relieve, muy fracturado. Se observa en cristales subahedrales y anhedrales de 0.84 mm de diámetro promedio. Aunque también es frecuente encontrarla como inclusiones anhedrales en fenocristales de plagioclasa y biotita, su tamaño promedio es de 0.3 mm. Posee inclusiones de opacos redondeados de 0.02 mm de diámetro.

**Calcita:** Se presenta como mineral hidrotermal, de forma subahedral, que rellena cavidades en cristales de biotita y plagioclasa. Tamaño 0.02 mm de diámetro.

**Clorita:** Tipo Pennina. Mineral que se observa reemplazando cristales de biotita. De forma anhedral. Tamaño 0.15 mm de diámetro.

**Apatito:** Se observa como cristales euahedrales distribuidos en la matriz. Algunas veces mostrando secciones transversales hexagonales. 0.4 mm de diámetro.

**Circón:** Se observa como inclusiones en la plagioclasa, posee formas anhedrales y euahedrales. Su tamaño promedio es de 0.04 mm.

**Opacos:** Se observan como cristales de varias formas, algunos euhedrales, otros alargados de bordes agudos y otros anhedrales, también como inclusiones en biotita, plagioclasa y aleatoriamente en la matriz. Su tamaño varía desde 0.048 mm hasta 0.072 mm.

**Granate:** Cristales euhedrales y subhedrales de forma hexagonal y octogonal, se observa como individuos distribuidos aleatoriamente en la matriz de la sección. Su tamaño varía desde 0.1 mm hasta 0.2 mm.

**Óxidos:** Cristales subhedrales de bordes poco definidos, asociados a cristales de biotita cloritizados y opacos. En nicoles paralelos presentan coloración rojiza. Su tamaño promedio es de 0.096 mm.

**Prehnita-Pumpellita:** Forma agregados radiales que suelen reemplazar el interior de los cristales de biotita, y rodearse por cristales de clorita. Alcanzan 0.15 mm de longitud.

**Observaciones:** La textura porfirítica indica condiciones someras de cristalización, al parecer con largos tiempos de residencia que favorecieron la formación de plagioclasas zonadas y los cristales euhedrales. Se observa en esta roca alteración hidrotermal de bajo grado, representada por la asociación mineralógica de clorita, calcita, epidota y prehnita-pumpellita.

**Nombre de la roca.** (Clasificación Streckeisen, 1974; Le Maitre 2002. Rocas plutónicas. Diagrama QAPF): **MicroTonalita**

QAPF 1.2 UCM-GEOLOGICAS TURLAN Tristan 03 - 1999

quartz	7	!!
feldspath alc.		
albite		
sanidine		!
orthoclase		!
microcline		
orthose		
plagioclase		
oligoclase		
andésine		
labradorite		
bytownite	20	
anorthite		
foïdes		!!
néphéline		
leucite		
hauyne		
calcite		
olivine		
cordiérite		
hornblende		
biotite	14	
muscovite		
cpx		
aegirine		
opx		
apatite		
sphène		
zircon		
verre	!	
opaques	2	
autres	!	57

Q 25.926  
 A 0.000  
 P 74.074  
 F 0.000  
 IC 73.000 !

calcul de QAPF

CLASSIFICATION  
 Plut  Volc

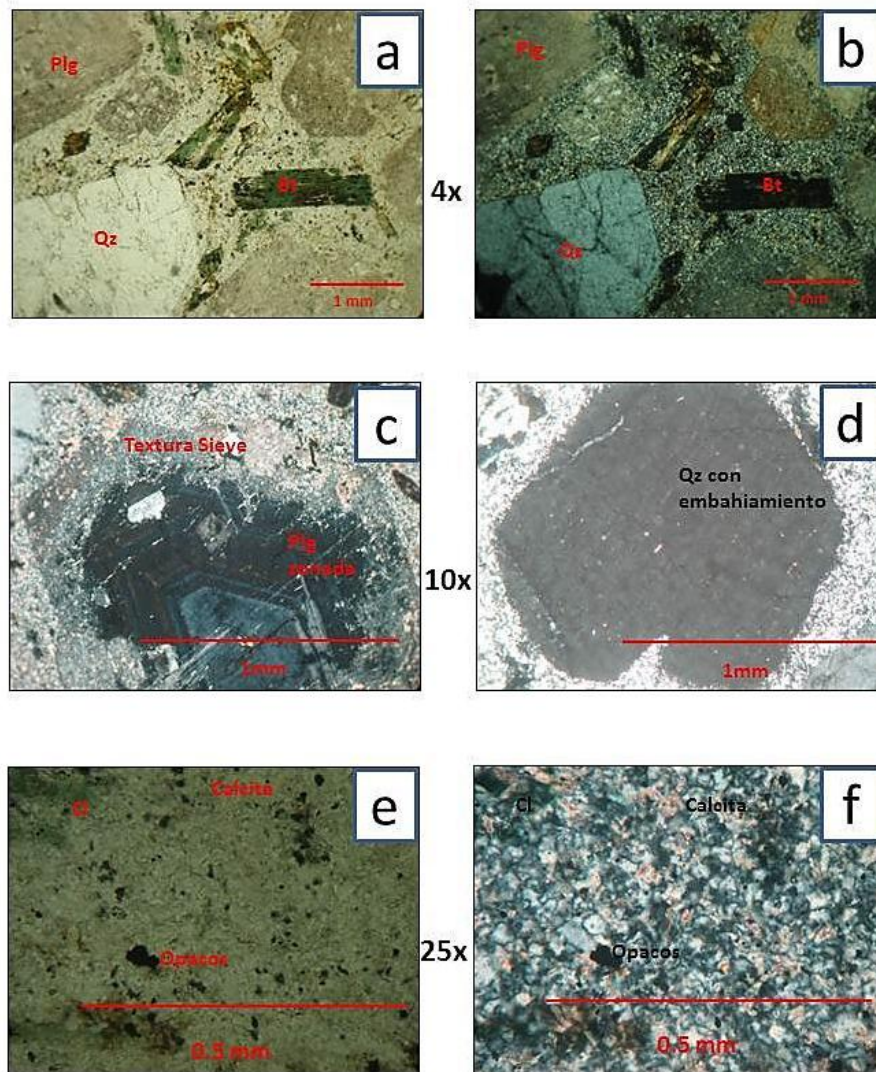
analyse modale totale :  
 100.000

autre calcul

QUITTER

Enfin... la roche est un(e) :

tonalite  
 tonalite



Fotografías en sección delgada de la muestra PKSW098- intrusivo La Tetilla. Fotografías a y b. Muestran la textura general de la roca con textura porfirítica y sus componentes mineralógicos principales plagioclasa, cuarzo y biotita. Nicoles IIs y xs, objetivo 4x. c. Plagioclasa euhedral zonada, cuyos bordes presentan textura sieve o tamiz. Nicoles cruzados, objetivo 10x. d. Cuarzo con bordes corroídos y embahiamientos. Nicoles cruzados, objetivo 10x. e y f. Detalle de la matriz fino granular. Nicoles IIs y xs. Objetivo 25x.



## PKSW103-LA YUNGA

Roca de textura porfídica en la que sobresalen fenocristales de plagioclasa, cuarzo y biotita. La plagioclasa se observa sericitizada y con calcificación. El cuarzo presenta extinción ondulante y la biotita esta cloritizada y sericitizada. Esta roca presenta alteración hidrotermal tipo propilítica representada por la asociación, calcita, clorita y epidota.

**Matriz:** De grano muy fino, conformada principalmente por cristales subhedrales y anhedrales de Cuarzo y plagioclasa sericitizada.

### **Descripción mineralógica:**

**Cuarzo:** Tipo cuarzo  $\beta$ . Se presenta como cristales euhedrales y subhedrales altamente fracturados, de contornos redondeados y corroídos. Poseen extinción ondulante. Según su tamaño, se distinguen tres poblaciones de cuarzo. Una población cuyos cristales observados en la sección presentan fractura concoidea, suelen presentarse en agregados que no exceden 3 o 4 cristales y su tamaño varía desde 1.1mm hasta 2.16 mm de diámetro, por lo que se consideran de grano medio. La segunda población se caracteriza por cristales de forma euhedral bipiramidal generalmente exhibiendo su forma cuadrada y anhedral en menor proporción, los bordes del cristal están reabsorbidos y con embahiamiento. Sus tamaños varían desde 0.1mm hasta 0.3mm de diámetro, grano fino. La tercera población se encuentra conformando la matriz de la roca. Se observan microlitos subhedrales y anhedrales cuyos tamaños son de aproximadamente 0.024 mm, tamaño de grano muy fino.

**Biotita:** se observa en cristales subhedrales, con núcleos cloritizados, de formas alargadas bordes sericitizados, y textura seriate. Se distinguen dos poblaciones clasificadas según su tamaño. Una población cuyos tamaños varían de 0.62mm hasta 1.1mm, por lo que se consideran fenocristales de grano medio. La segunda generación tiene formas subhedrales alargadas, casi aciculares, se observan cloritizados y sericitizados, puede apreciarse mejor su textura de flujo que en la generación 1, dispuestos generalmente alrededor de fenocristales de plagioclasa y cuarzo.

**Plagioclasa:** Cristales euhedrales de bordes reabsorbidos, en cuyo núcleo se distingue maclado tipo albita. Se encuentran sericitizados y calcificados. El tamaño promedio de sus cristales es de 2.16 mm. Tamaño de grano grueso. Según el método Michel-Levy esta plagioclasa se clasifica como Andesina (An 32%).



**Anfíbol:** cristales subhedrales que se observan totalmente reemplazado por clorita y cristales aciculares de rutilo. Puede observarse pequeños cristales de epídota como inclusiones. Tamaño promedio 0.6 mm.

**Calcita:** Cristales anhedrales que tienden a ser alargados, dispuestos generalmente hacia los bordes de los cristales de biotita y aprovechando cavidades en los cristales de plagioclasa. Tamaño 0.03 mm de diámetro.

**Clorita:** Se presenta como mineral secundario. Anhedral, que suele reemplazar el anfíbol y enmascarar el núcleo de los cristales de biotita. Tamaño 0.6 mm de diámetro.

**Epídota:** Se observa como inclusiones anhedrales en el anfíbol cloritizado. 0.02 mm es el tamaño promedio de sus cristales.

**Rutilo:** Cristales euhedrales de alto relieve, formas alargadas y habito acicular que alcanzan longitudes de 0.03 mm. Se observan reemplazando anfíbol, o como inclusiones en plagioclasa.

**Opacos:** Cristales euhedrales y subhedrales distribuidos homogéneamente en toda la sección. Su tamaño promedio es de 0.01mm.

**Observaciones:** Este cuerpo intrusivo, posee cuarzo Beta, indicador de altas temperaturas

**Nombre de la roca.** Clasificación Streckeisen, 1974; Le Maitre, 2002. Rocas plutónicas. Diagrama QAPF: **MicroTonalita**

QAPF 1.2 UCM-GEOLOGICAS TURLAN Tristan 03 - 1999

quartz	20	!!
feldspath alc.		
albite		
sanidine		!
orthoclase		!
microcline		
orthose		
plagioclase		
oligoclase		
andésine	17	
labradorite		
bytownite		
anorthite		
foïdes		!!
néphéline		
leucite		
hauyne		
calcite		
olivine		
cordiérite		
hornblende	2	
biotite	21	
muscovite		
cpx		
aegirine		
opx		
apatite		
sphène		
zircon		
verre		!
opaques		
autres	40	!

Q 54.054  
A 0.000  
P 45.946  
F 0.000  
I C 63.000 !

calcul de QAPF

CLASSIFIACTON  
 Plut  Volc

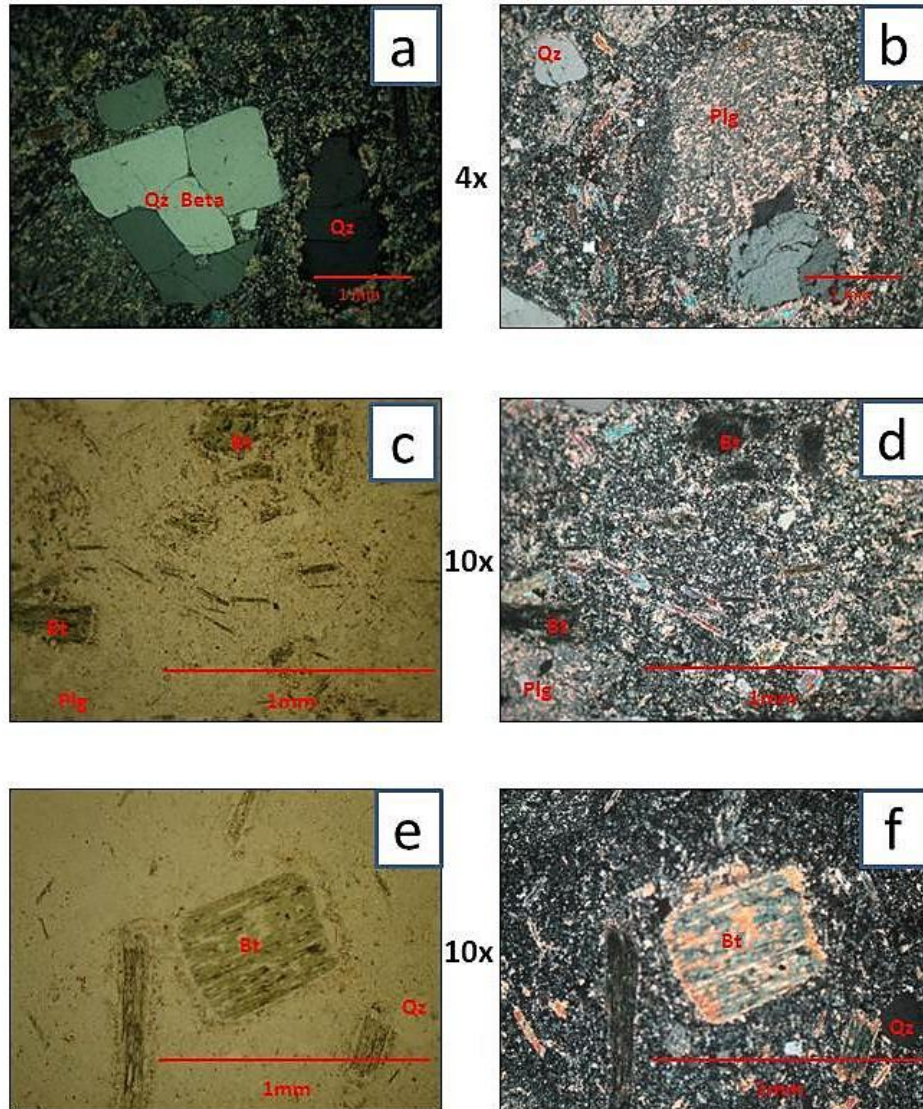
analyse modale totale :  
100.000

autres calcul

QUITTER

? IC>90  
T² à propos

Enfin... la roche est un(e) :  
tonalite



Fotografías en sección delgada de la muestra PKSW103-Intrusivo La Yunga. Fotografías a y b. Muestran la textura general de la roca, porfírica con fenocristales de cuarzo beta y plagioclasa. Nícoles xs, objetivo 4x. c y d. Cristales de biotita de diferente tamaño, mostrando direcciones de flujo en la matriz. Nícoles IIs y xs y objetivo 10x. e y f. Detalle de fenocristales de biotita cloritizada, rodeada por finos cristales de la matriz. Nícoles IIs y xs y objetivo 10x.

## SESW033-PATICO

Roca de textura porfídica, en la que se observan fenocristales de cuarzo bipiramidal y cuarzo redondeado, plagioclasa euhedral y subhedral y anfíbol subhedral embebidos en una matriz de grano fino, equigranular, conformada principalmente por cristales anhedrales y subhedrales de plagioclasa y cuarzo. Se observa alteración hidrotermal.

### **Descripción mineralógica:**

**Plagioclasa:** Cristales euhedrales y subhedrales fracturados, bien desarrollados, de bordes rectos, aunque algunos se observan levemente redondeados, se presentan como fenocristales y como microlitos en la matriz. Poseen bordes reabsorbidos por el material de la matriz y maclado tipo albita. Se encuentran sericitizados. Dentro de los cristales se observan múltiples inclusiones fluidas. Algunas veces y en poca proporción en la sección se observan agregados de plagioclasa sericitizada, junto a un anfíbol totalmente reemplazado por óxidos y prehnita-pumpellita. Su tamaño varía de 0.24 mm a 2.4 mm. Su composición según el método Michel-Levy es Andesina 34% An).

**Cuarzo  $\beta$ :** Cristales subhedrales de extinción ondulante que se observan muy fracturados, sus bordes están redondeados y presentan embahamiento. El tamaño varía de 2.88 a 3.6mm.

Se observa una segunda población de menor tamaño, cuyos cristales están totalmente redondeados, extinción ondulante, que sobresalen de la matriz. Sus bordes se observan corroídos con embahamiento. El tamaño de estos cristales varía de 0.48 a 0.96mm.

La tercera población de cuarzo está conformando la matriz, su forma varía de subhedral a anhedral. Extinción ondulante. Algunos bordes que presentan embahamiento se encuentran rellenos por prehnita-pumpellita. Tamaño varía de 0.24mm a 0.048.

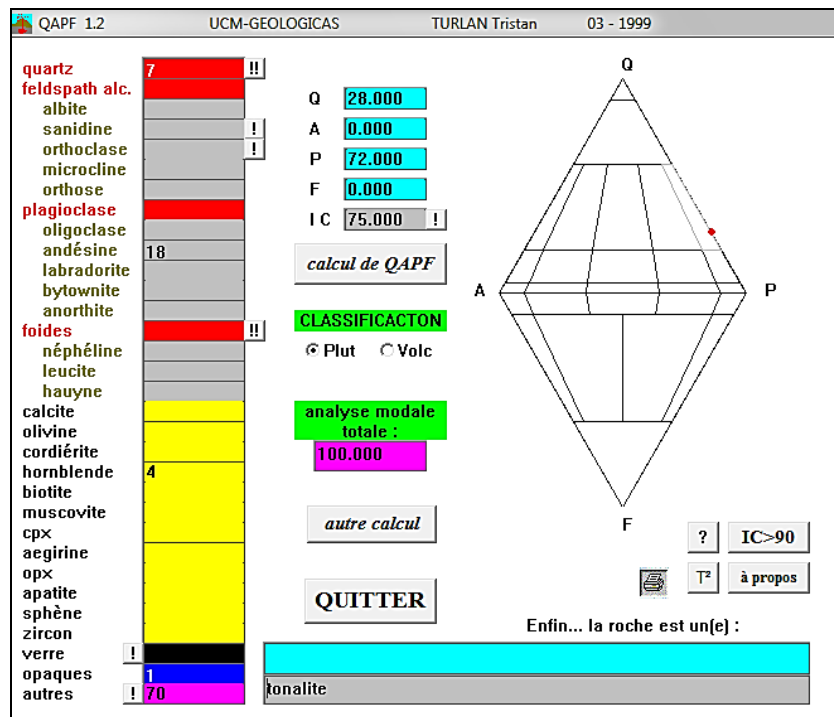
**Anfíbol:** cristales subhedrales totalmente reemplazados por prehnita-pumpellita, pennina, minerales opacos de forma subhedral, y óxidos de hierro. Sus bordes están reabsorbidos por material de la matriz. Algunas veces se observan cristales de anfíbol intruyendo cristales de plagioclasa. El tamaño promedio es de 0.72 mm.

**Clinzoisita:** Se observa como inclusiones subhedrales de forma tabular, dentro de los fenocristales de plagioclasa. Tamaño 0.06 mm de longitud.

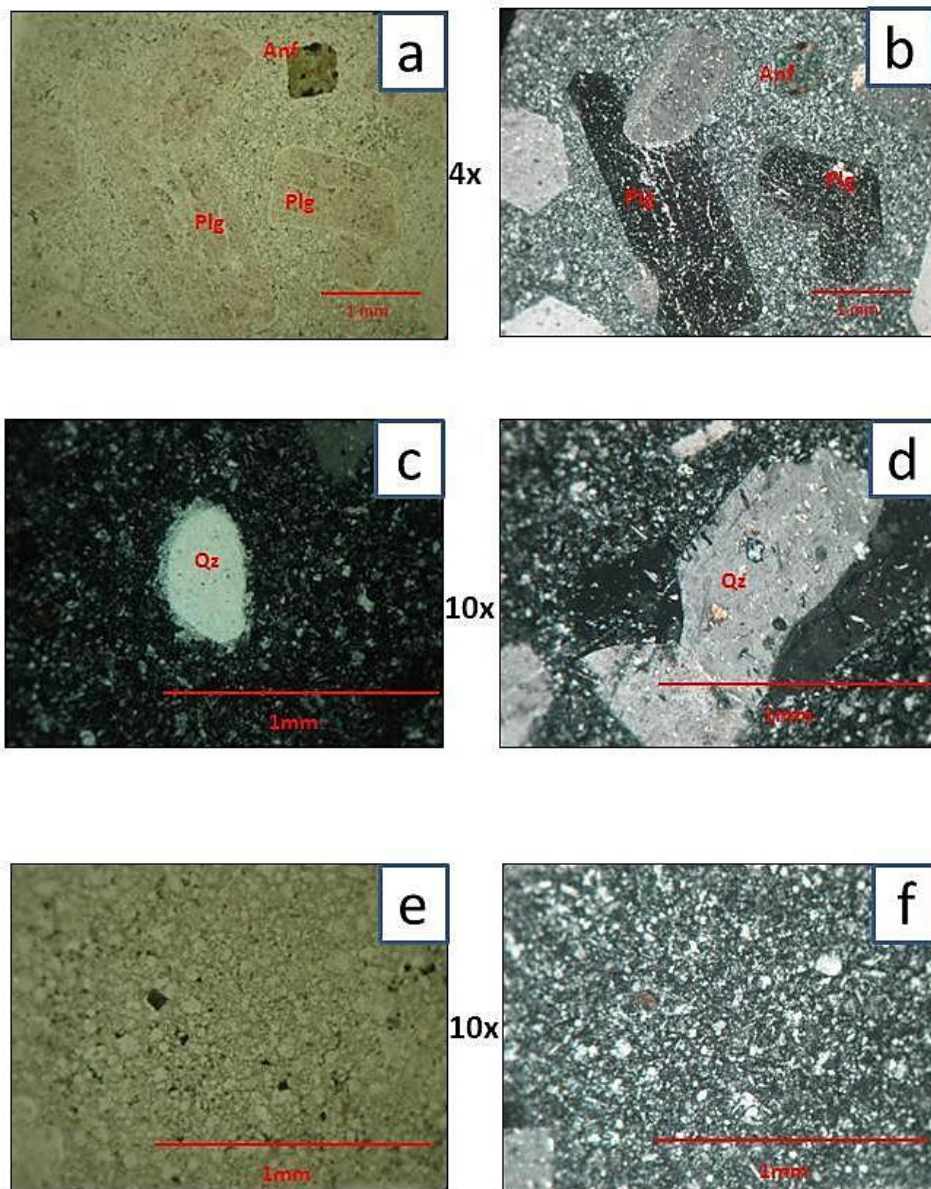
**Opacos:** Cristales subhedrales, algunas formas se observan cuadradas, están distribuidos homogéneamente en la sección, son equigranulares con la matriz (0.048 mm) aunque pueden estar como cristales individuales que intruyen generalmente bordes de los cristales de plagioclasa alcanzando tamaños de 0.24mm a 0.4mm, se observan en estos opacos inclusiones subhedrales de plagioclasa, de 0.05 a 0.1 mm. Se presenta también como inclusiones anhedrales de aspecto redondeado en los cristales de anfíbol (0.048 mm).

**Observaciones.** La textura porfírica indica condiciones más someras de cristalización, en las que se evidencia contornos redondeados en los fenocristales, al parecer relacionados con inyecciones de magma a mayor temperatura dentro de la cámara magmática. Presenta alteración hidrotermal. Esta se caracteriza por clinzoisita, prehnita-pumpellita y pennina. Alteración propilítica.

**Nombre de la roca.** Clasificación Streckeisen, 1974. Rocas plutónicas. Diagrama QAPF: **MicroTonalita**







Fotografías en sección delgada de la muestra SESW033- intrusivo Patico. Fotografías a y b. Muestran la textura general de la roca en la que se destacan cristales subhedrales sericitizados de plagioclasa y anfíbol cloritizados. Nícoles IIs y xs. Objetivo 4x. c y d. cuarzo redondeado y plagioclasa con inclusiones de clinozoisita, sericita e inclusiones fluidas. Nícoles xs. Objetivo 10x. e y f. Detalle de la matriz finogranular conformada por plagioclasa y cuarzo. Nícoles IIs y xs. Objetivo 25x.

## PKSW050- LA CARPINTERÍA

Roca de textura porfídica. Se observan fenocristales de plagioclasa muy fresca, zonada (Se pueden distinguir hasta 5 anillos de zonación), cuarzo redondeado con bordes de reacción muy marcados, hornblenda euhedral cloritizada, también se observan opacos distribuidos aleatoriamente en toda la sección.

**Matriz:** equigranular, holocristalina, de grano muy fino, compuesta por cristales de plagioclasa, cuarzo y opacos principalmente, sus formas varían de euhedral a subhedral, los bordes de los cristales se observan corroídos, el tamaño de grano es en promedio de 0.02mm, con contactos poligonales, en la que sobresalen fenocristales de plagioclasa, anfíbol y calcita y microfenocristales de cuarzo, epidota, apatito y opacos.

### **Descripción mineralógica:**

**Plagioclasa:** Se presenta como inclusiones anhedrales en anfíbol con maclado albita. Su tamaño varía de 0.22 a 0.25 mm. También se presenta como cristales diferenciados en dos generaciones, la primera generación se caracteriza por sus fenocristales de forma euhedral con tamaños que varían de 1.32mm hasta 4.56mm de longitud, bordes levemente reabsorbidos, maclado tipo albita, con zonación muy marcada, se distinguen claramente de núcleo a borde cinco límites de zonación, suelen presentar inclusiones de anfíbol tipo hornblenda tabular con forma que varía desde subhedral a anhedral (Su tamaño varía desde 0.24mm hasta 0.6mm) , e inclusiones anhedrales de calcita (0.19 mm de diámetro).

La segunda generación, se caracteriza por presentar un menor tamaño que la primera, su forma varia de subhedral predominantemente a pocos cristales euhedrales, sus cristales alcanzan longitudes de 0.24mm hasta 1mm, presentan maclado albita, bordes altamente reabsorbidos, presentan bordes redondeados, y son frecuentes las inclusiones de calcita amorfa.

En algunas áreas de la sección se observan cristales euhedrales, hexagonales de anfíbol intruyendo cristales euhedrales de plagioclasa de la generación 2, generando un patrón de fracturas radiales a partir de la inclusión del cristal de anfíbol.

Según el método Michel-Levy, la composición de los cristales de Plagioclasa es Andesina (43% An).

**Anfíbol:** Tipo hornblenda. Cristales euhedrales que alcanzan los 0.9mm de diámetro, sus bordes se observan reabsorbidos. Presenta alteraciones a clorita tipo Pennina que reemplaza la mayoría del cristal, se observan relictos frescos en menor proporción. Posee inclusiones de cristales anhedral de epidota de 0.03mm de diámetro, asociadas alrededor de cristales anhedral de calcita de 0.2mm de diámetro, cristales anhedral de opacos, que se observan distribuidos preferiblemente hacia los bordes del cristal. Inclusiones de Prehnita-pumpellita, se presentan en menor proporción, se caracterizan por su hábito radial, formando cúmulos junto a cristales de epidota y opacos. Se destaca que en algunos cristales se observan sombras de presión, conformadas por "melt inclusions" orientadas que forman bandeamientos en el cristal.

Se observa en la sección otra población de anfíboles, tipo hornblenda, que aunque presenta los mismos tipos de alteración, y distribución de opacos hacia los bordes, poseen forma que varía de anhedral a subhedral, de bordes redondeados y su tamaño máximo alcanza los 0.65mm de diámetro.

Otra generación del anfíbol se presenta como inclusiones en cristales de plagioclasa, poseen forma euhedral a subhedral, de aspecto fresco y sin minerales de alteración, aunque se observan opacos demarcando sus bordes. Alcanza los 0.1 mm de diámetro.

**Cuarzo:** Cristales anhedral, totalmente redondeados cuyo tamaño varía de 0,1 a 0,18 mm de diámetro, en el que se observan incipientes lamelas de deformación, y algunas inclusiones se observan orientadas. Los bordes del cristal se observan muy reabsorbidos que alcanzan los 0.02 mm de espesor, presenta embahiamiento y maclado tipo Carlsbad.

**Calcita:** Cristales que generalmente se observan como inclusiones anhedral en cristales de anfíbol y plagioclasa. Alcanza 0,35mm de diámetro.

**Epidota:** Cristales que se observan en como inclusiones anhedral en anfíbol. En menor proporción se observan cristales de forma subhedral hábito tabular. Su tamaño varía de 0.05mm a 0.08mm de longitud.

**Opacos:** Cristales anhedral que se observan como inclusiones en anfíbol y plagioclasa y distribuidos en la matriz. En algunos de ellos se observan óxidos de hierro como manchas alrededor del cristal. En algunos sectores de la sección se

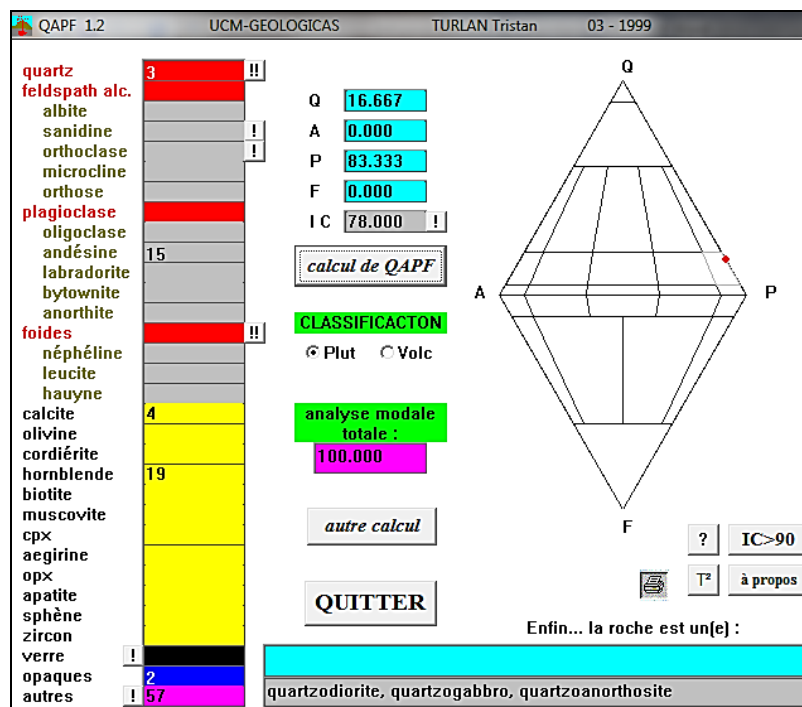


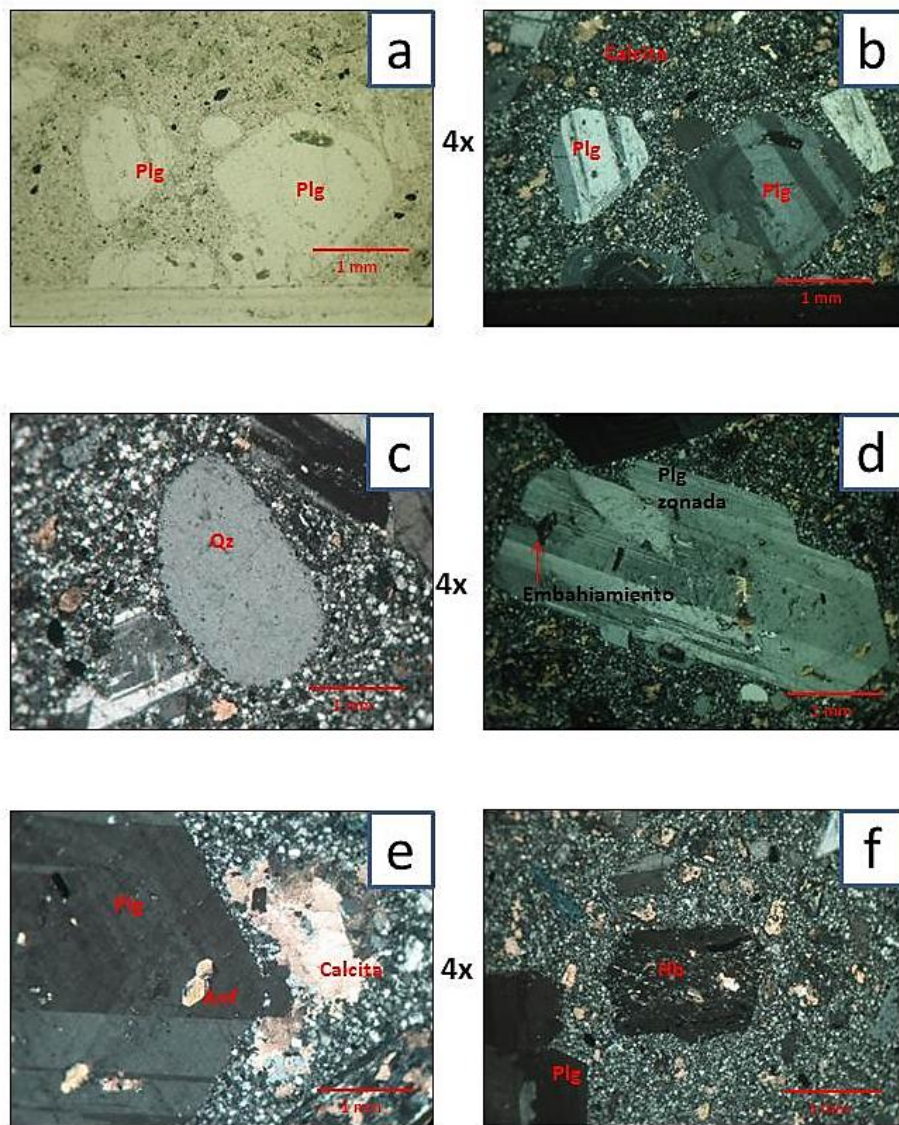
observan agregados de cristales de hasta 0,1mm de diámetro conformados por calcita, óxidos de hierro y opacos.

**Apatito:** Cristales euhedrales, tabulares, prismáticos, que suelen estar rodeados por opacos anhedrales en la matriz. Su tamaño promedio es 0.18mm a 0.22mm de longitud.

**Observaciones.** Presenta alteración hidrotermal manifestada por presencia de calcita, anfíbol de forma hexagonal euhedral, totalmente reemplazado por calcita y clorita magnésica.

**Nombre de la roca.** Clasificación Streckeisen, 1974; Le Maitre, 2002. Rocas plutónicas. Diagrama QAPF: **MicroCuarzodiorita**





Fotografías en sección delgada de la muestra SESW050- intrusivo La Carpintería. Fotografías a y b. Muestran fenocristales de plagioclasa redondeada en matriz finogranular. Nícoles IIs y xs. Objetivo 4x. c y d. cristal de cuarzo redondeado y plagioclasa exhibiendo anillos de zonación y embahamiento. Nícoles xs, objetivo 4x. e. Anfíbol como inclusión en plagioclasa y cristal anhedral de calcita. Nícoles xs, objetivo 4x. f. Cristal de anfíbol cloritizado con múltiples inclusiones orientadas de epidota y opacos. Nícoles xs, objetivo 4x.

## SESW094-PUSNÁ

Roca de textura fanerítica, en la que se distinguen cristales euhedrales de plagioclasa, con textura seriate. Se observan en menor proporción cristales de ortopiroxeno en dos generaciones, la primera caracterizada por ortopiroxenos subhedrales uralitizados y la segunda caracterizada por ortopiroxenos euhedrales de aspecto más fresco.

### **Descripción mineralógica:**

**Plagioclasa:** Cristales euhedrales y en menor proporción subhedrales, con bordes de crecimiento reabsorbidos que alcanzan 0.01mm de espesor, en los que se observan hasta cinco bordes de zonación(zonación normal), maclado tipo Albita–Carlsbad y albita en menor proporción. Algunos cristales se observan fracturados perpendicularmente a la longitud del cristal. Presenta textura seriate, variando en tamaño desde 0.05 mm hasta 1.7 mm de longitud. Según el método Michel-Levy es de tipo Labradorita (54% An).

En algunas plagioclasas se observa textura sieve en el centro del cristal coloreada por óxidos de hierro, sus bordes se observan muy frescos, con inclusiones de opacos euhedrales y anhedrales, de hábito tabular, que alcanzan los 0.05mm de longitud.

**Ortopiroxeno:** Tipo Hiperstena. Se presenta en dos generaciones: La primera generación se caracteriza por formas subhedrales, de hábito octogonal, bordes reabsorbidos, núcleo de ortopiroxeno y bordes de anfíbol tipo oxihornblenda (Uralitización) alcanzan tamaños de grano que varían ente 0.48 mm a 0.96 mm. Se observan inclusiones de opacos euhedrales de 0.024 mm de diámetro. En algunos sectores se observan intruyendo cristales de plagioclasa

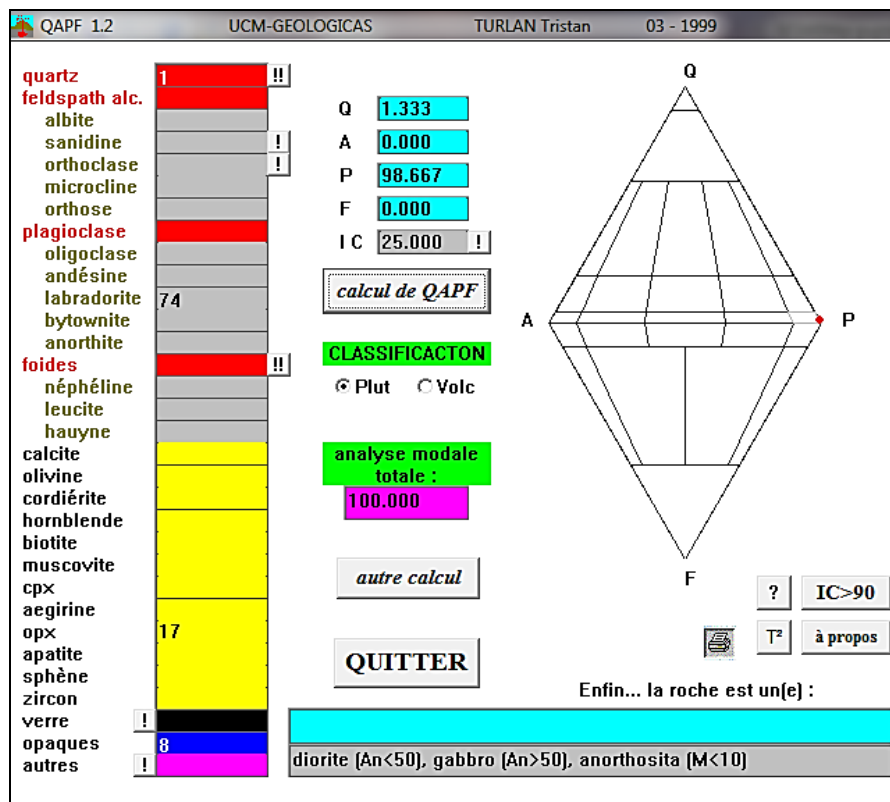
La segunda generación de piroxeno, se caracteriza por su aspecto fresco, forma euhedral, de hábito octogonal, y tabular. Se observan altamente fracturados, algunos fragmentados, con inclusiones de opacos anhedrales. Su tamaño varía de 0.12 mm a 0.4 mm de diámetro.

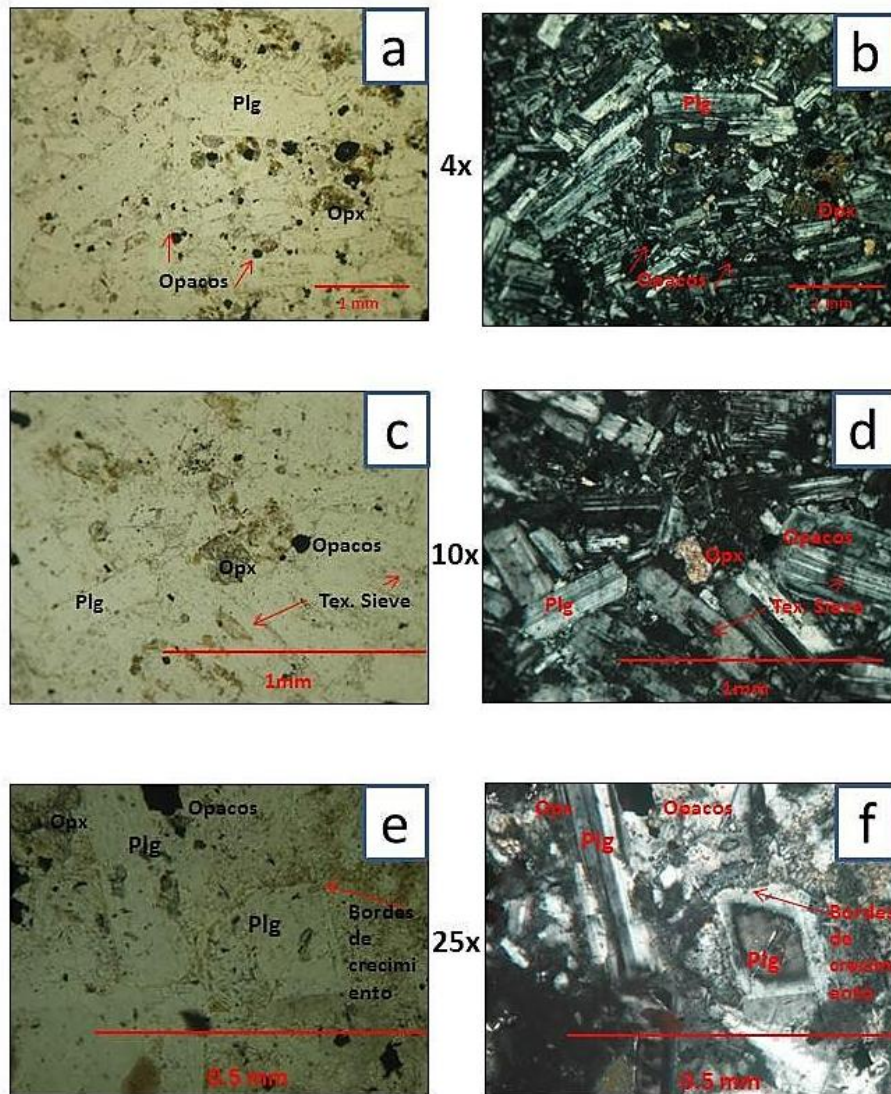
**Opacos:** Se observan distribuidos en toda la sección como cristales que varían de euhedrales a anhedrales, rodeados por óxidos de hierro, su tamaño promedio es 0.05 mm de longitud. También suelen presentarse como inclusiones anhedrales en plagioclasa, y como agregados redondeados que alcanzan los 0,24mm de diámetro con textura gráfica junto a cristales de ortopiroxeno y plagioclasa.

**Apatito:** cristales euhedrales de hábito tabular, distribuidos aleatoriamente en la sección. También se presentan como inclusiones en cristales de plagioclasa. Alcanzan tamaños de 0.048 mm de longitud.

**Cuarzo:** Cristales anhedrales distribuidos aleatoriamente en la sección.

**Nombre de la roca.** (Clasificación Streckeisen, 1974, Le Maitre, 2002. Rocas plutónicas. Diagrama QAPF): **Gabro.**





Fotografías en sección delgada de la muestra SESW094- intrusivo La Carpintería. Fotografías a y b. Muestran textura fanerítica, en la que se distinguen plagioclasas macladas bien desarrolladas, opacos y ortopiroxenos. Nícales IIs y xs. Objetivo 4x. c y d. Detalle de ortopiroxeno subhedral y plagioclasas con bordes de crecimiento y textura sieve. Nícales IIs y xs, objetivo 10x. e y f. Detalle de plagioclasas con múltiple zonación y bordes de crecimiento. Nícales IIs y xs, objetivo 25x.



## JLSW005-EL ENCENILLO

Roca con textura porfírica, en la que sobresalen cristales euhedrales de plagioclasa, anfíbol de bordes oxidados, y opacos con asociación de óxidos de hierro.

La matriz es microlítica. Se distinguen cristales tabulares de plagioclasa, biotita, cristales anhedrales de cuarzo y anfíbol oxidado cuyo tamaño varía de 0.02 a 0.04mm.

### **Descripción mineralógica:**

**Plagioclasa:** Cristales euhedrales de aspecto muy fresco con bordes ligeramente reabsorbidos por la matriz, maclado tipo albita, múltiple zonación normal, y textura seriate, el tamaño de sus cristales varía desde 0.05mm hasta 6.5mm de longitud. Posee inclusiones de otros cristales de plagioclasa tabulares de forma euhedral a subhedral cuyo tamaño varía de 0.1mm a 0.3mm de longitud. También posee inclusiones de cuarzo anhedral de 0.12 a 0.15mm de diámetro y epidota subhedral de hábito tabular. Según el método Michel-Levy, la composición de la plagioclasa es Andesina (37% An).

**Anfíbol:** Tipo Hornblenda. Cristales euhedrales, de hábito tabular y hexagonal, con múltiples fracturas transversales a la longitud del cristal. El tamaño de los cristales varía de 0.62 mm hasta 2.4 mm de longitud, la mayoría presenta bordes que alcanzan los 0.05 mm de espesor. Los cristales euhedrales de anfíbol, se observan con núcleos muy frescos y bordes bien demarcados de oxihornblenda.

**Biotita:** Se observan como fenocristales tabulares euhedrales y subherales fragmentados perpendicularmente a su longitud. Alcanzan los 0.9 mm de longitud.

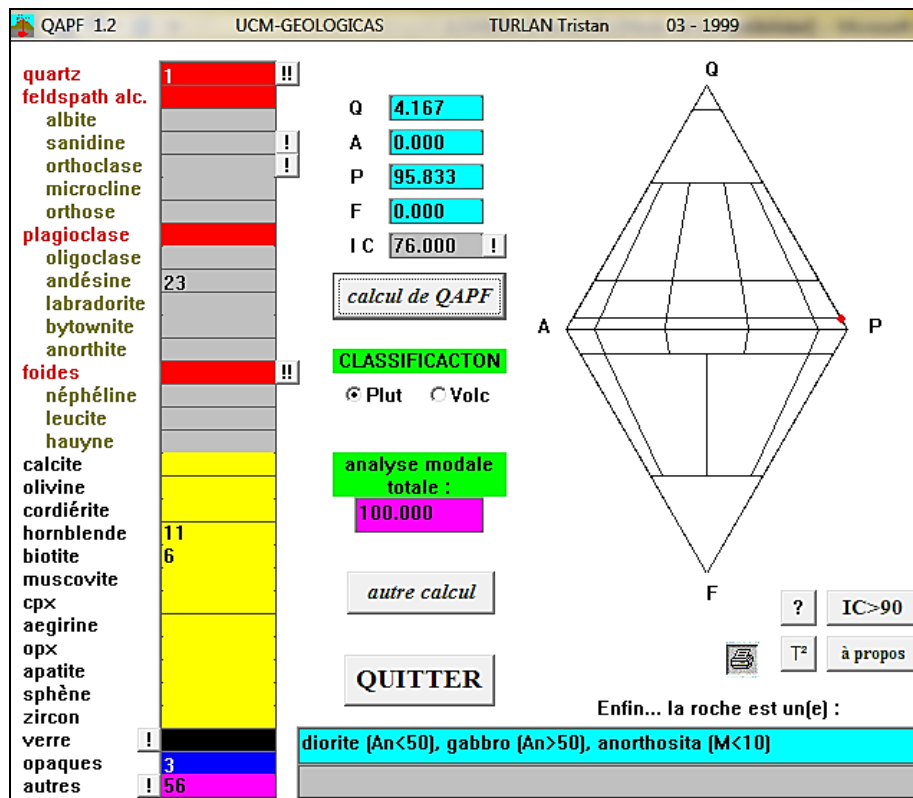
**Opacos:** Cristales subhedrales asociados a la serpentinita. Su tamaño promedio es 0.1 mm de diámetro.

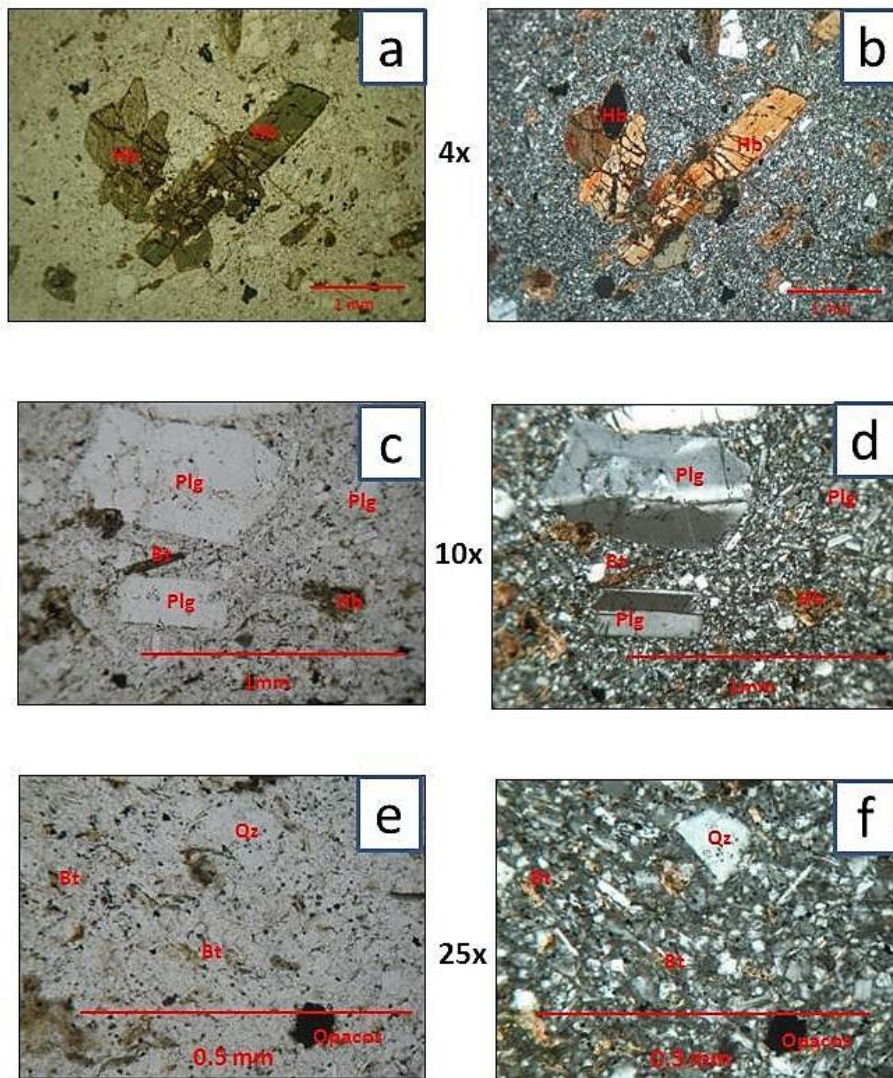
**Cuarzo:** Cristales anhedrales de bordes reabsorbidos y formas ovaladas, que alcanzan los 0.2 mm de diámetro. Se presenta como inclusiones y cristales individuales en la matriz.

**Apatito:** Cristales euhedrales que se observan tabulares y en secciones hexagonales en la matriz. También se observan como inclusiones en anfíbol. Alcanzan los 0.03 mm de diámetro, y 1.2 mm de longitud.

**Epídota:** se observa como inclusiones anhedrales en plagioclasa euهدral, y como cristales tabulares en la matriz. Su tamaño promedio es 0.05 mm de diámetro.

**Nombre de la roca** (Clasificación Streckeisen, 1974, Le Maitre, 2002. Rocas plutónicas. Diagrama QAP): **MicroDiorita.**





Fotografías en sección delgada de la muestra JLSW005- Intrusivo El Encenillo. Fotografías a y b. Muestran cristales de anfíbol tipo hornblenda muy fracturada en matriz microlítica. Nicoles IIs y xs, con el objetivo 4x. c y d. Detalle en cristales euhedrales de plagioclasa. Nicoles IIs y xs, con el objetivo 10x. e y f. Cuarzo anhedral, opacos anhedrales y biotita microlítica. Nicoles IIs y xs, con el objetivo 25x.



## JLSW008-OSO GUAICO

Roca de textura porfírica, en la que sobresalen fenocristales euhedrales de plagioclasa, anfíbol tipo hornblenda, de forma subhedral con bordes redondeados, y con corona de opacos. Otra generación de anfíbol se distingue por su aspecto un poco más fresco, menor tamaño y forma más euhedral.

Matriz muy fina en la que se alcanzan a distinguir microlitos de plagioclasa anhedral y subhedral, cuarzo anhedral. Se observa que los cristales de grano más grueso suelen agregarse alrededor de fenocristales de anfíbol fresco y plagioclasa. Se observan múltiples fracturas en todos los fenocristales y algunos de ellos en fragmentos dispersos.

### **Descripción mineralógica:**

**Plagioclasa:** Cristales euhedrales cuyos tamaño grano varían de 2.4mm a 5mm de longitud, sus bordes se observan moderadamente reabsorbidos y levemente redondeados, presenta maclado tipo albita-Carlsbad y albita, zonación oscilatoria, múltiple fracturamiento, posee inclusiones de anfíbol euhedral (0.05 mm de longitud), apatito euhedral, de hábito tabular (0.02 mm de longitud), cristales anhedrales de calcita (0.05 mm de longitud), biotitas euhedrales (0,03 mm de longitud) y opacos de forma subhedral (0.05 mm de diámetro).

Se presenta otra generación caracterizada por su menor tamaño, formas subhedrales, maclado albita y albita Carlsbad, bordes redondeados, y reabsorbidos, y zonación oscilatoria. Su tamaño promedio varía entre 0.92mm y 1.2mm de longitud. Según el método Michel –Levy, la plagioclasa posee composición Labradorita (An 63%).

**Anfíbol:** Tipo Hornblenda. Se presenta como cristales individuales y como inclusiones en plagioclasa. Los fenocristales son de formas euhedrales a anhedrales, alcanzando formas redondeadas, presentan bordes reabsorbidos, y embahamiento. Se encuentran rodeados por coronas de opacos (0,062mm de espesor), presentan zonación normal y se encuentran fracturados. Maclado tipo Carlsbad. En algunos sectores de la sección se observa la orientación de cristales tabulares alrededor de fenocristales de plagioclasa euhedral, marcando direcciones de flujo. Poseen inclusiones de cristales opacos (0.048 mm de diámetro). El tamaño de estos cristales varía de 0.24 mm a 0.96 mm de longitud.

**Biotita:** Cristales euhedrales y subhedrales, de hábito tabular corto, posee coronas de opacos, bordes corroídos, redondeados y embahamiento. Se

observan inclusiones de opacos y calcita anhedral (de 0.2 mm de diámetro). Sus tamaños varían de 0.36 mm a 1.1 mm de longitud.

**Zircón:** Se presenta como un cristal euhedral, bien desarrollado, prismático, que sobresale en la matriz. Su tamaño promedio es 0.4mm de longitud.

**Opacos:** Se presenta como coronal alrededor de cristales de hornblenda y biotita (0.01 mm a 0.06 mm de espesor), como cristales aislados anhedrales (0.06 mm de longitud) y como inclusiones en anfíbol y biotita (0.05 mm de diámetro).

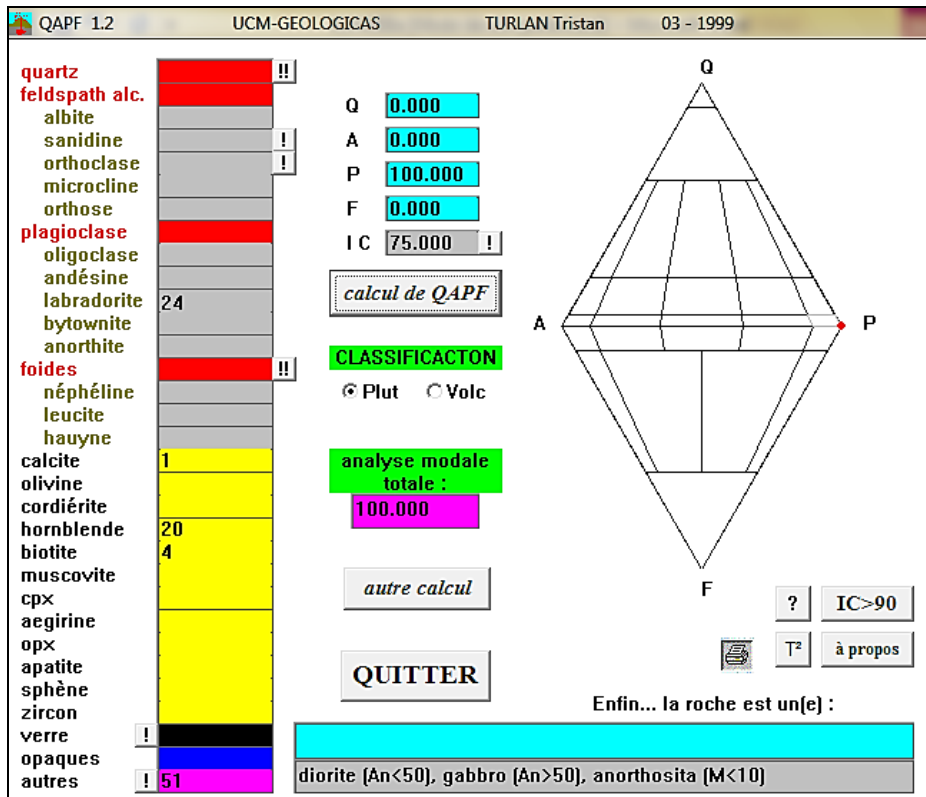
**Calcita:** Cristales subhedrales rodeados por coronas de opacos, algunos de ellos se observan fracturados. También se presenta como inclusiones en anfíbol. Su tamaño promedio es 0.2 mm de longitud.

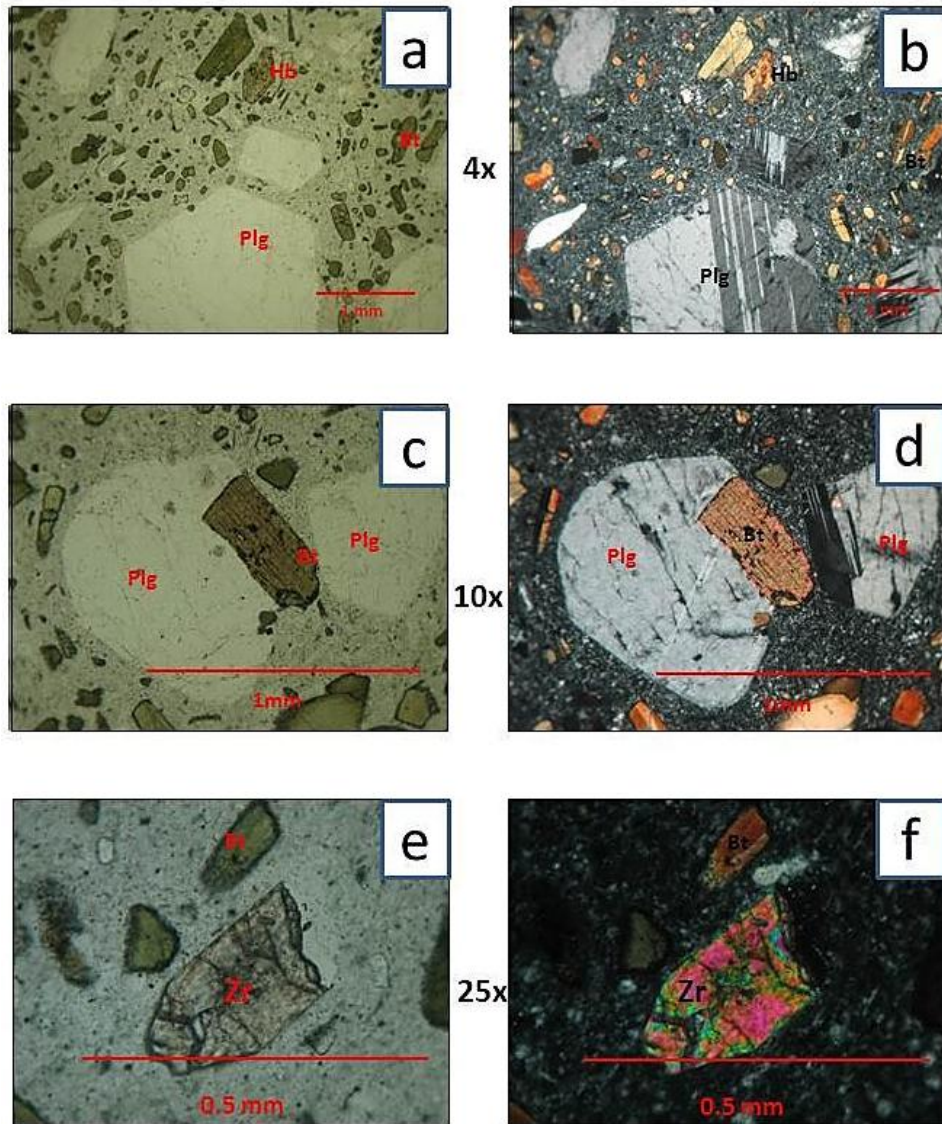
**Cuarzo:** Se observa como microlitos en la matriz de formas subhedrales y anhedrales.

**Apatito:** Cristales euhedrales de hábito tabular, se observan fracturados de manera perpendicular a la longitud del cristal, su tamaño promedio es de 0.5mm de longitud.

**Observaciones:** El redondeamiento en plagioclasa, anfíbol y biotita, bordeados por opacos evidencia que los fenocristales reaccionaron con un fundido de mayor temperatura que redondeo los cristales y de una composición diferente a la de la cámara magmática inicial. La plagioclasa se observa afectada en menor grado por lo que los minerales ferromagnesianos, rodeada por cristales de anfíbol de menor tamaño, mostrando direcciones de flujo. Las coronas de óxidos indican largos tiempos de residencia en la cámara magmática.

**Nombre de la roca** (Clasificación Streckeisen, 1974. Le Maitre, 2002 para rocas plutónicas QAPF): **MicroGabro**





Fotografías en sección delgada de la muestra JLSW008- Intrusivo Oso Guaico. Fotografías a y b. Se observa la textura general de la roca y sus componentes principales como plagioclasa euédral, anfíbol tipo hornblenda y biotita. Nicols IIs y xs, con el objetivo 4x. c y d. Cristal de biotita intruyendo un cristal de plagioclasa con bordes redondeados. Se destaca textura de flujo en los microlitos de biotita. 10x. Nicols IIs/xs. e y f. Detalle de cristal fracturado de zircon. Nicols IIs y xs, con el objetivo 25x.

## JLSW023-EL PANTANO

Roca de textura fanerítica, holocristalina inequigranular. Predominan formas anhedrales y subhedrales en los cristales.

### **Descripción mineralógica:**

**Plagioclasa:** Cristales anhedrales y subhedrales, tabulares, con maclado tipo albita principalmente, que poseen contactos intrusivos de cristales anhedrales y subhedrales de ortopiroxeno. Poseen bordes de crecimiento, reabsorbidos, por lo que se observan límites de cristales poco definidos. Posee inclusiones de epídota anhedral (0.12 mm de diámetro). Según el método Michel-Levy, la composición de la plagioclasa es andesina (An 43%). Tamaño 0.53 mm de longitud.

**Ortopiroxeno:** Tipo hiperstena. Cristales subhedrales y anhedrales cloritizados, de formas alargadas, distribuidos aleatoriamente en toda la sección, poseen inclusiones de opacos (0,02 mm de diámetro), alcanzan los 0,5 mm de longitud. Se observan también como inclusiones anhedrales en plagioclasa.

**Epídota:** Se observan como inclusiones anhedrales en plagioclasa. Su tamaño promedio es de 0.27 mm de diámetro.

**Clorita:** Tipo Peninna. Cristales anhedrales que se observan reemplazando cristales de ortopiroxenos. Su tamaño promedio es de 0.5 mm de diámetro.

**Nombre de la roca** (Clasificación Streckeisen, 1974; Le Maitre, 2002 para rocas plutónicas QAFP): **Diorita.**

QAPF 1.2 UCM-GEOLOGICAS TURLAN Tristan 03 - 1999

quartz	!!
<b>feldspath alc.</b>	
albite	
sanidine	!
orthoclase	!
microcline	
orthose	
<b>plagioclase</b>	
oligoclase	
andésine	44
labradorite	
bytownite	
anorthite	
<b>foïdes</b>	!!
néphéline	
leucite	
hauyne	
calcite	
olivine	
cordiérite	
hornblende	
biotite	
muscovite	
cpx	
aegirine	
opx	22
apatite	
sphène	
zircon	
verre	!
opaques	3
autres	! 31

Q 0.000  
 A 0.000  
 P 100.000  
 F 0.000  
 IC 56.000

calcul de QAPF

**CLASSIFICTON**

Plut  Volc

analyse modale totale : 100.000

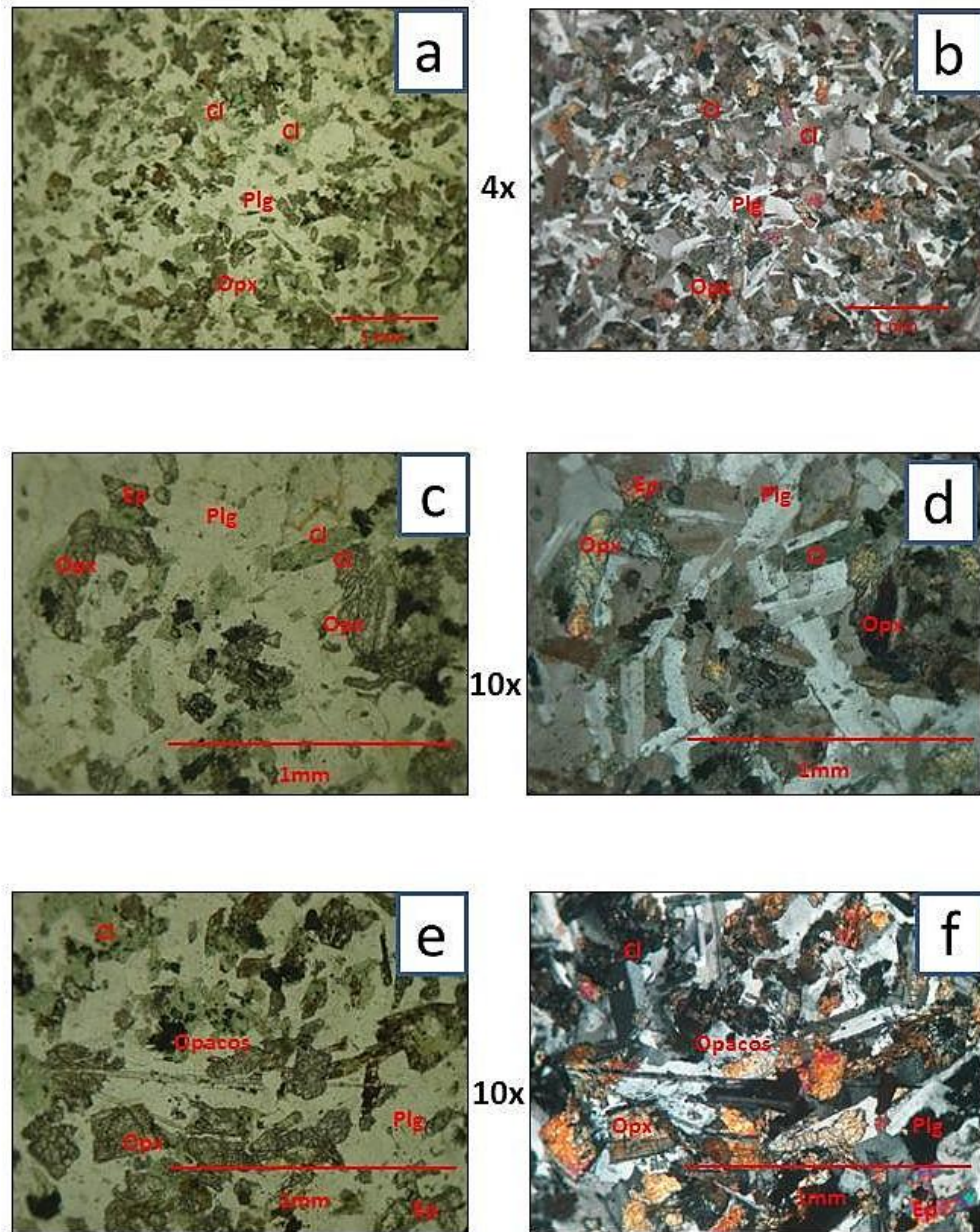
autre calcul

QUITTER

Enfin... la roche est un(e) :

diorite (An<50), gabbro (An>50), anorthosita (M<10)





Fotografías en sección delgada de la muestra JLSW023- Intrusivo El Pantano. Fotografías a y b. Se observa la textura fanerítica de la roca. Nícales IIs y xs. Objetivo 4x. c y d. Detalle de los componentes principales de la roca: plagioclasa, ortopiroxeno, clorita y epidota Nícales IIs/xs. Objetivo 10x. e y f. Detalle de ortopiroxenos y plagioclasas. Nícales IIs/xs. Objetivo 10x.

## JLSW063-EL TABLÓN

Roca holocristalina con textura porfídica. Posee fenocristales cristales euhedrales de plagioclasa, biotita y cristales tabulares euhedrales y subhedrales de anfíbol tipo hornblenda y minerales opacos anhedrales.

La matriz de grano más fino está compuesta por microlitos de plagioclasa y anfíboles de hábito tabular y acicular, y minerales anhedrales de biotita y opacos.

### **Descripción mineralógica:**

**Plagioclasa:** Se presenta en fenocristales euhedrales inequigranulares de aspecto fresco con múltiple zonación concéntrica y bordes reabsorbidos por la matriz microcristalina. Poseen maclado tipo albita y albita Carlsbad. Los fenocristales pueden dividirse en dos poblaciones de tamaño 30 a 15  $\mu\text{m}$  y de 7 a 5  $\mu\text{m}$ . Una tercera población de plagioclasa se encuentra en la matriz con un tamaño de 0,5  $\mu\text{m}$ . La composición de la plagioclasa según el método Michel-Levy es Bytownita (76% An).

**Anfíbol:** Tipo Hornblenda, cristales euhedrales y subhedrales de aspecto fresco, forma hexagonal y tabular, cuyos tamaños varían de 0.5 a 3  $\mu\text{m}$ . Los cristales de menor tamaño y forma tabular se observan con direcciones de flujo rodeando fenocristales. También se presenta anfíbol como inclusiones en fenocristales de plagioclasa.

**Biotita:** Fenocristales con textura seriate, subhedrales con bordes redondeados e inclusiones de opacos anhedrales, apatitos euhedrales y clonozoisita euedral. Se presenta también en cristales tabulares en los que se observan direcciones de flujo alrededor de megafenocristales de plagioclasa.

**Opacos:** Se presentan como cristales anhedrales distribuidos aleatoriamente en la matriz o como inclusiones en biotita. El tamaño promedio es 0.20 mm de diámetro.

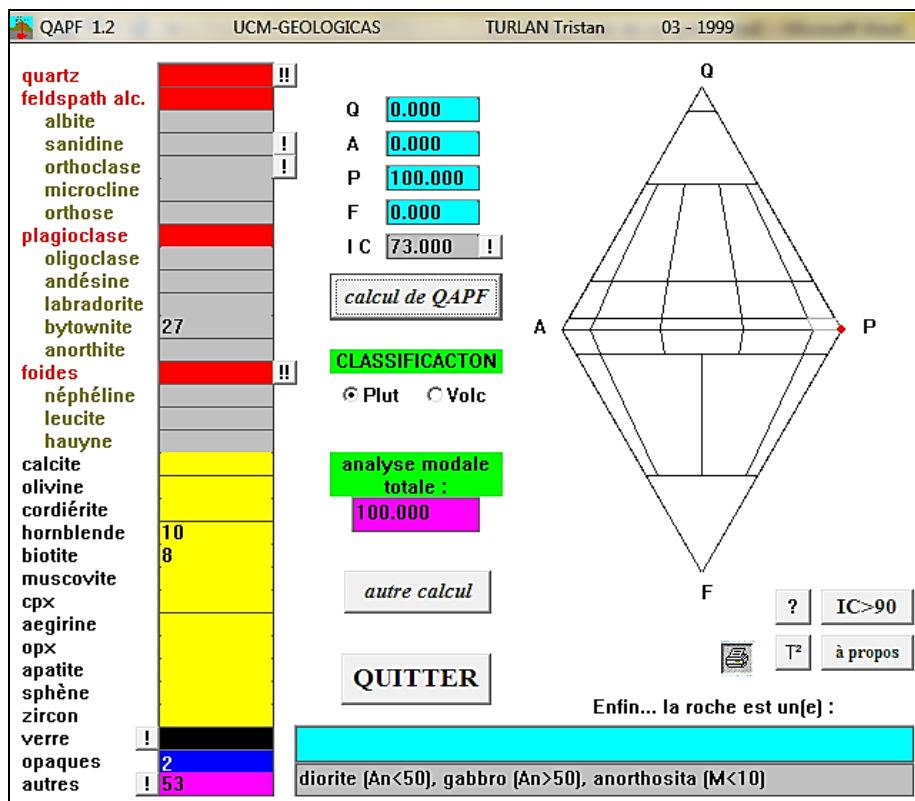
**Apatitos:** cristales euhedrales que se observan como inclusiones en biotita y aleatoriamente en la matriz.

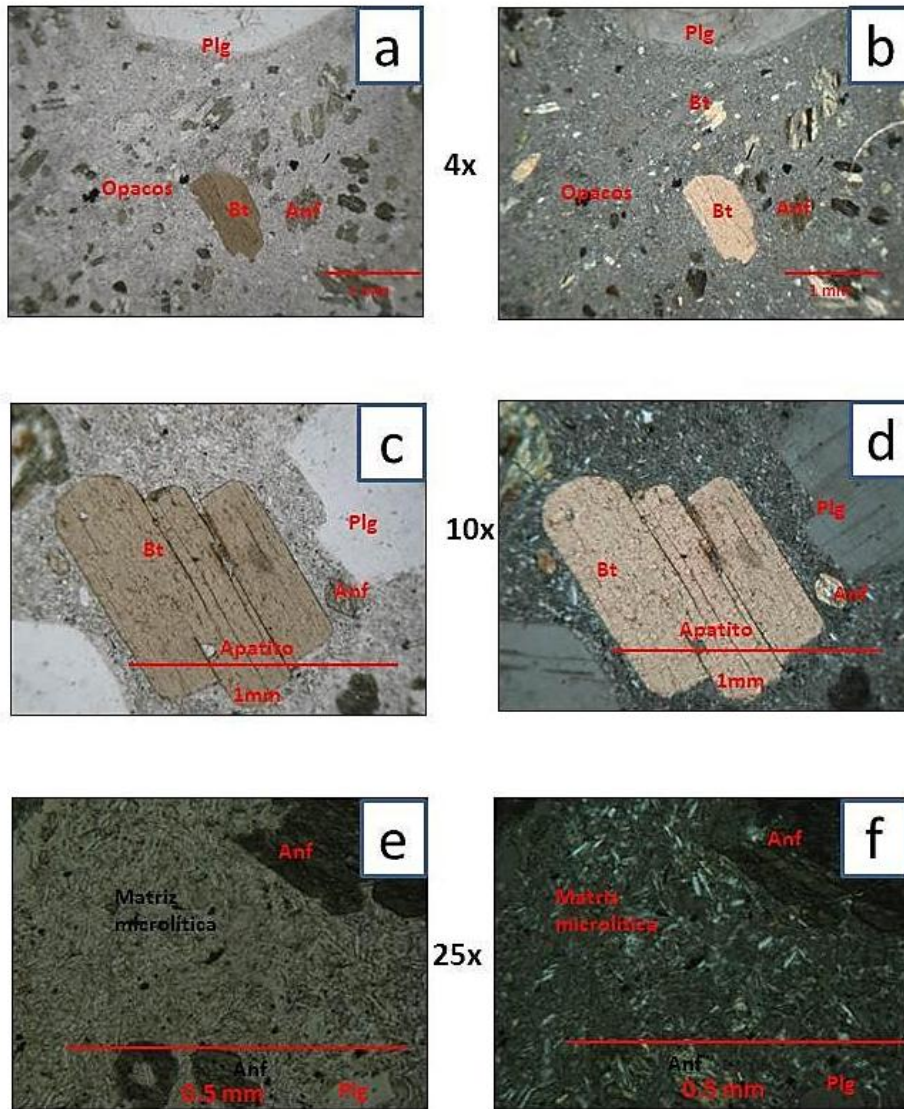


**Observaciones:** Los microlitos tabulares de biotita, muestran textura de flujo alrededor de los megafenocristales de plagioclasa sin una dirección preferencial dentro de la sección.

Se observan en sectores muy escasos, muy próximos a los fenocristales de Plagioclasa burbujas de vidrio que indican desgasificación. La presencia de plagioclasa con bordes levemente corroídos indica reacción de los fenocristales probablemente por una entrada de magma al sistema.

**Nombre de la roca.** (Clasificación Streckeisen, 1974; Le Maitre, 2002 para rocas plutónicas. Diagrama QAPF): **MicroGabbro.**





Fotografías en sección delgada de la muestra JLSW063- Intrusivo El Tablón. Fotografías a y b. Se observa la textura porfirítica de la roca, en la que se destaca la textura de flujo marcada por finos cristales de biotita y microlitos de la matriz. Nícoles IIs y xs. Objetivo 4x. c y d. Detalle de fenocristal de biotita con bordes redondeados e inclusiones de apatito. Nícoles IIs/xs. Objetivo 10x. e y f. Detalle de la matriz microlítica en la que se destacan cristales aciculares de plagioclasa. Nícoles IIs/xs. Objetivo 25x.

## JLSW072-GUACHICONO

Roca de textura porfídica en la que se destacan plagioclasas con múltiple zonación, biotitas bien desarrolladas, cuarzo bipiramidal, y opacos euhedrales con bordes levemente redondeados.

La matriz es equigranular, de grano muy fino, conformada por cristalitos, en la que sobresalen fenocristales de plagioclasa euhedral, biotita euhedral, calcita anhedral, cuarzo anhedral y opacos euhedrales. Tamaño promedio 0.02 mm de diámetro.

### **Descripción mineralógica:**

**Plagioclasa:** Megafenoristales subhedrales bien desarrollados, se observan fracturados, con textura sieve presente en formas de coronas internas, zonación oscilatoria, los bordes de los cristales presentan embahiamiento, reabsorción y contornos redondeados. Posee inclusiones de calcita anhedral (0.36mm de diámetro). Se observan dos tamaños predominantes, 0,36mm de diámetro y 0,96mm de longitud. Según el método Michel-Levy la composición es de Tipo Andesina (32% An).

**Anfíbol:** Tipo hornblenda, de forma euhedral, se observa cloritizado. Con inclusiones de cuarzo, calcita, epídota y opacos (Cuyo tamaño promedio es 0,2mm), el tamaño promedio de estos cristales es 0.84 mm de longitud.

**Cuarzo:** Cristales subhedrales, bipiramidales, de bordes reabsorbidos, y redondeados. Su tamaño promedio es de 0.36 mm de diámetro.

**Biotita:** Cristales euhedrales, con embahiamiento, de bordes redondeados y textura esquelética. Posee inclusiones de opacos anhedral y subhedrales, calcita anhedral y plagioclasa anhedral (Inclusiones de tamaño promedio 0.15 mm de diámetro). El tamaño promedio de estos cristales es 2.16 mm de diámetro.

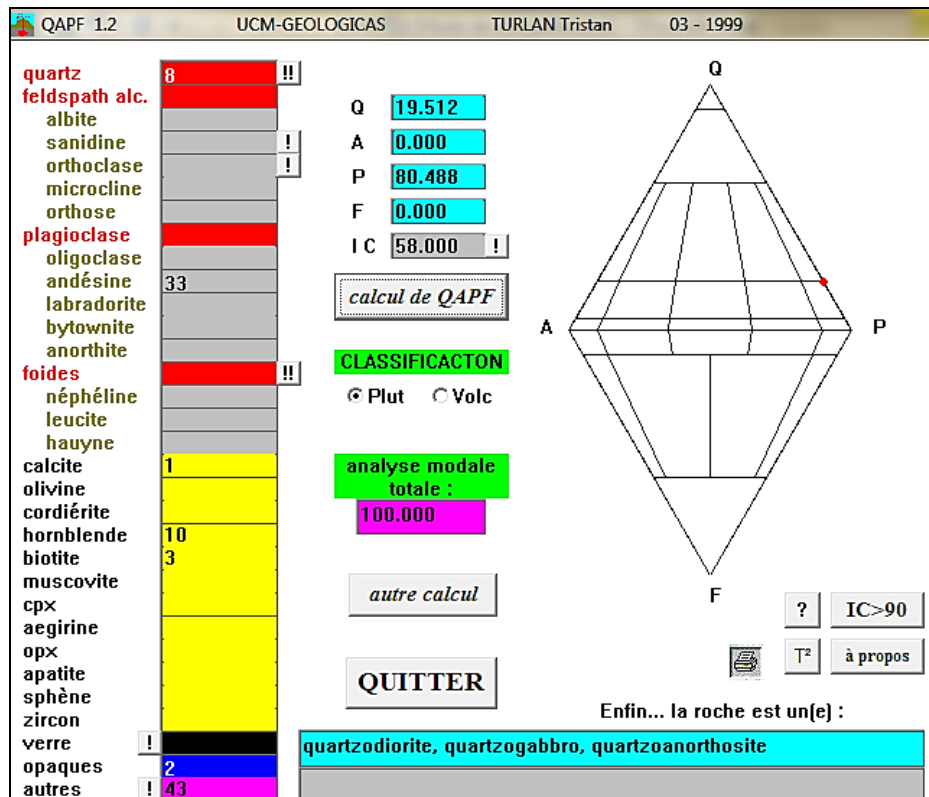
**Opacos:** Cristales euhedrales. Los bordes se observan con embahiamiento aprovechado por el material de la matriz. Se observan inclusiones anhedral de plagioclasa (0.4 mm de longitud). En algunos sectores de la sección se observan

cristales de opacos intruyendo el borde de un cristal de biotita. Suelen observarse rodeados por óxidos de hierro. Su tamaño promedio es 0.7mm de longitud.

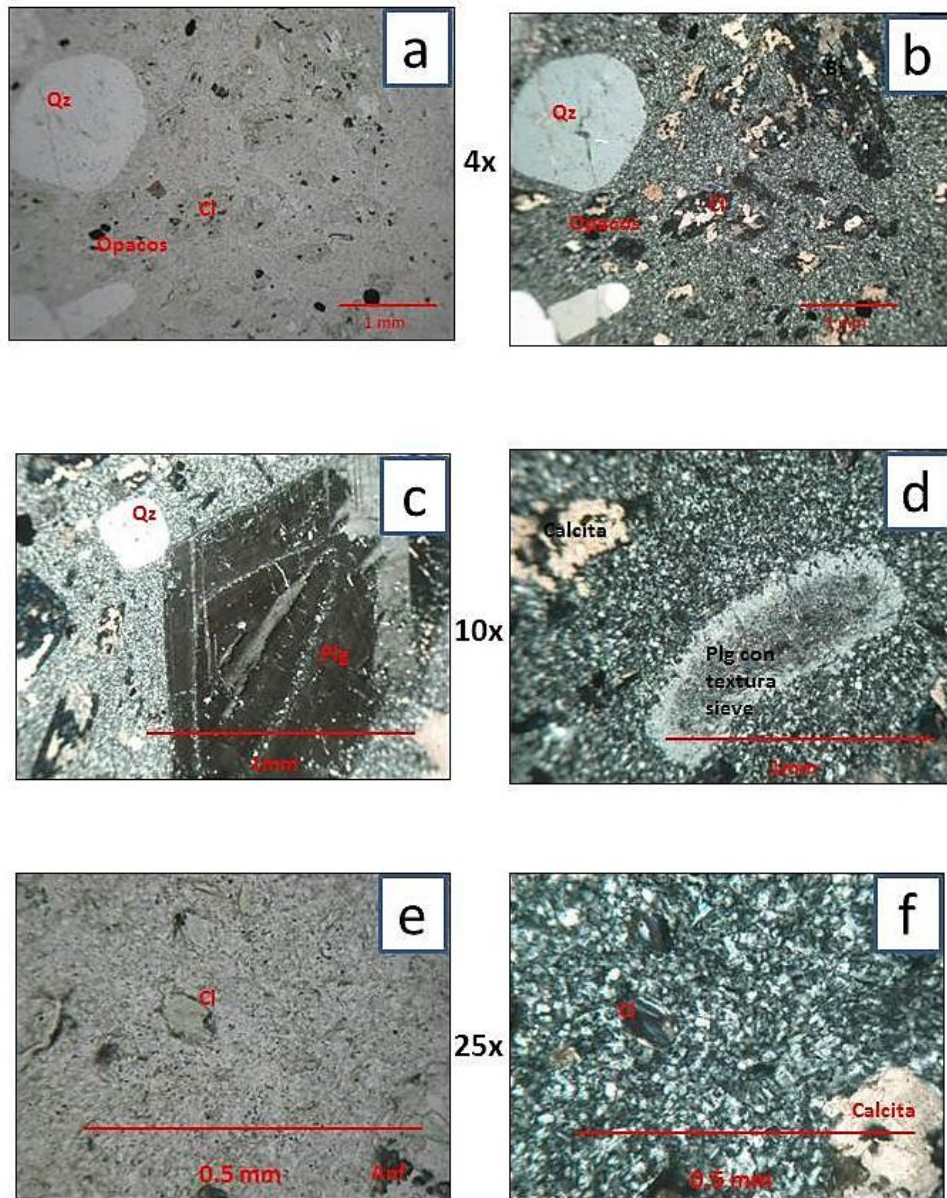
**Calcita:** Cristales anhedrales que se observan como inclusiones en plagioclasa, biotita y anfíbol, y como cristales individuales en la matriz, que en algunos sectores se observan intruyendo cristales de anfíbol, su tamaño promedio es de 1.25mm de longitud.

**Epídota:** Cristales anhedrales que se presentan como inclusiones en cristales de anfíbol. Tamaño promedio es 0.2 mm.

**Nombre de la roca** (Clasificación Streckeisen, 1974; Le Maitre, 2002 para rocas plutónicas QAPF): **MicroCuarzodiorita.**







Fotografías en sección delgada de la muestra JLSW072- intrusivo Guachicono. Fotografías a y b. Se observa la textura porfírica de la roca, junto a cuarzos redondeados, anfíboles y biotitas cloritizadas, que conservan las formas cristalinas. Nícoles IIs y xs. Objetivo 4x. c y d. Detalle de plagioclasa con coronas de textura sieve y plagioclasa con textura sieve y bordes redondeados y reabsorbidos. Nícoles IIs/xs. Objetivo 10x. e y f. Detalle de matriz y calcita reemplazando un cristal de anfíbol. Nícoles IIs/xs. Objetivo 25x.

**Anexo 3: Composición normativa CIPW. Q: cuarzo; C: corindón; Or: ortoclasa; Ab: albita; An: anortita; Di: diópsido; Hy: hiperstena; Mt; magnetita; il: ilmenita; Hm: hematita; Ap: apatito; Sum: sumatoria. Obtenida empleando el software GCDkit-2.3.**

COMPOSICIÓN NORMATIVA CIPW-Intrusivos CCP												
	Q	C	Or	Ab	An	Di	Hy	Mt	Il	Hm	Ap	Sum
	43.814				0.000							
SESW033a	29.646	3.599	6.478	36.615	4.426	0.000		4.229	0.412	0.000	2.517	
SESW050a	17.274	6.025	8.756	31.140	18.876	0.000	3.044	6.965	0.824	0.000	7.959	100.707
SESW094a	19.533	0.000	12.031	39.580	30.855	0.989	7.678	1.225	1.299	4.188	2.511	103.419
PKSW094a	26.973	0.000	5.197	24.410	22.336	4.118	2.845	8.362	1.173	1.581	3.506	100.819
PKSW095a	31.277	3.042	8.471	18.821	0.000	0.000	5.195	9.142	1.268	1.058	4.737	103.930
PKSW097a	36.015	5.638	7.617	42.546	0.000	0.000	8.467	3.540	0.761	0.432	6.040	104.314
PKSW098a	28.472	4.920	18.794	31.824	0.000	0.000	3.222	1.949	0.444	0.000	4.278	101.073
PKSW103a		1.313	10.251	36.615	13.116	0.000	1.809	4.395	0.887	0.000	2.795	100.031
JLSW005a	17.542				15.116		4.054					101.898
JLSW008a	23.155	0.000	13.170	34.904	10.470	1.082		8.043	0.983	0.000	2.084	
JLSW023a	22.097	4.762	0.356	37.071	11.017	0.000	10.573	1.784	1.838	7.391	6.774	103.497
JLSW023a	27.085	2.726	12.316	35.246	2.867	0.000	8.013	6.488	1.046	0.000	4.311	101.614
JLSW063a		6.353	9.183	34.904		0.000	8.037	6.240	0.919	0.185	7.769	103.283
JLSW072a							5.948					101.453

#### Anexo 4: Resultados analíticos de la datación Argón-Argón

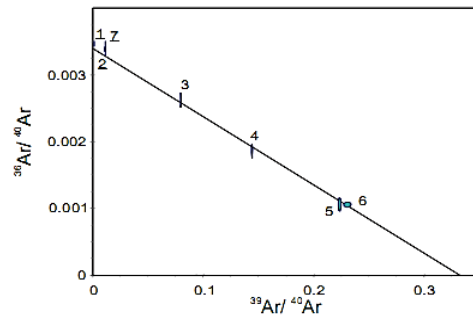
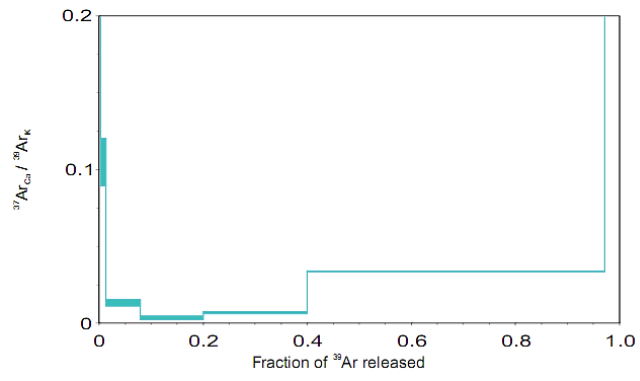
Durante éste estudio fue posible datar el cuerpo JLSW063- El Tablón por el método  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  en biotita. Se presentan a continuación los resultados obtenidos en los concentrados de biotita. Los archivos adjuntos contienen los espectros de edad, diagramas  $^{37}\text{Ar}_{\text{Ca}}/^{39}\text{Ar}_{\text{K}}$  (equivalente a la razón Ca/K de la muestra) y los diagramas de correlación:  $^{36}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$  versus  $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$  de donde se calcula la edad de isócrona.

La muestra recibe una dosis de 30 MWh en el reactor nuclear de la Universidad de McMaster. Las muestras se irradiaron junto con el monitor de irradiación Biotita CATAV 7-4 que es un estándar interno de  $88.53 \pm 0.39$  Ma. Se reporta el valor de J en la tabla de resultados.

En la tabla se reportan las edades individuales de cada fracción colectada, la edad integrada ( $t_i$ ), la edad de meseta ( $t_p$ ) y la edad de isócrona ( $t_c$ ). Los experimentos de calentamiento se realizan en etapas con un horno de Ta de Modification Ltda, equipado con un sistema de control de temperatura. Las temperaturas a las que se colectó cada fracción de argón se reportan en la tabla. La composición isotópica del argón se midió con un espectrómetro de masas tipo MS-10. La extracción del argón de los monitores de irradiación se realizó en una sola etapa a  $1350^\circ\text{C}$ . El tamaño de muestra utilizado se reporta en gramos en la tabla. La mejor estimación de la edad de la muestra se resalta en negrilla.

**Tabla de temperaturas empleadas en la datación de la muestra JLSW063 – Guachicono, realizada en biotita por el método Ar-Ar.**

Summary of $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$ data: MS-10 temperature controlled step-heating experiments											
JLSW 063a biotite 0.2644 g											
Temp °C	F $^{39}\text{Ar}$	$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}_{\text{K}}$	Age in Ma	% $^{40}\text{Ar}$	$^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$	$^{37}\text{Ar}_{\text{Ca}}/^{39}\text{Ar}_{\text{K}}$	$t_i$ in Ma	$t_p$ in Ma	$t_c$ in Ma	( $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ )	SumS+(n-2) / n
600	0.0036	$-5.10 \pm 2.32$	$-30.4 \pm 13.9 \uparrow$	-2.42	288.53	0.85					
700	0.0093	$-0.11 \pm 0.89$	$-0.6 \pm 5.3 \uparrow$	-0.41	294.31	0.10					
800	0.0660	$0.87 \pm 0.13$	$5.1 \pm 0.7 \S$	22.56	381.57	0.01					
900	0.1220	$0.95 \pm 0.07$	$5.6 \pm 0.4 \S$	45.03	537.53	<0.01					
1050	0.1993	$0.94 \pm 0.04$	$5.5 \pm 0.2 \S$	68.64	942.31	<0.01					
1200	0.5713	$0.91 \pm 0.01$	$5.4 \pm 0.1 \S$	68.75	945.50	0.03					
1350	0.0286	$0.01 \pm 0.27$	$0.1 \pm 1.6 \uparrow$	0.04	295.81	0.51	<b><math>5.08 \pm 0.14</math></b>	<b><math>5.40 \pm 0.09</math></b>	<b><math>5.42 \pm 0.18</math></b>	<b><math>295.5 \pm 13</math></b>	<b>0.41 / 4</b>



$t_c = 5.42 \pm 0.18 \text{ Ma}$   
 $(^{40}\text{Ar} / ^{36}\text{Ar})_i = 295 \pm 13$   
 $\text{SumS} / (n-2) = 0.41, n = 4$



### Anexo 5: Dataciones realizadas por Risnes, (1995) en la Cuenca Cauca-Patía

Se adjuntan a continuación listado de dataciones K/Ar, realizadas por Risnes dentro y fuera del área de estudio. Cada una de las muestras, se encuentra designada con un número y ubicada respectivamente en el mapa de localización y formaciones geológicas.

Listado de muestras datadas en el estudio de Risnes, 1995. Se destaca la edad de cada una en millones de años.

Sites	Roche	N	Age	(Ma)
04	Dacite	1	33.9	± 0.7
05	Tonalite	1	19.2	± 0.4
11 12 26	Granodiorite	4	16.9	± 0.7
13	Granodiorite	1	19.3	± 0.4
15 16 17	Dacite	5	17.1	± 0.4
20 21	Dacite	2	16.3	± 0.3
27	Ignimbrite	1	2.4	± 0.2
30	Granodiorite	1	16.1	± 0.4
34 38	Dacite	2	17.8	± 0.1
42	Dacite	1	14.3	± 0.3
43	Dacite	1	13.2	± 0.3
44	Andésite	1	19.9	± 0.5
45	Andésite	2	15.6	± 0.3
46 47	Dacite	4	15.3	± 0.8
48	Dacite	1	12.1	± 0.3
53	Andésite	1	15.9	± 0.4
54	Andésite	1	21.5	± 0.4
55	Dacite	1	21.1	± 1.1
56	Dacite	1	13.2	± 3.5
57	Andésite	1	11.5	± 0.3
60	Andésite	1	7.8	± 0.2
59	Andésite	1	22.6	± 0.6
61	Andésite	1	10.9	± 0.2
62	Andésite	1	10.9	± 0.3
64 66 68	Andésite	3	20.1	± 0.2

Mapa geológico mostrando localización de puntos de muestreo realizado por Risnes, 1989,1995.

