

Petrografía y Geoquímica del Grupo Villa de Cura

**Caracterización Petrográfica y Geoquímica de las Rocas Metamórficas de Alta P/Baja T
del Grupo de Villa de Cura, Venezuela**

María Juliana Gutiérrez López

Trabajo de Grado para Optar el Título de Geóloga

Director:

Carlos Alberto Ríos Reyes

Ph.D. en Geología

Codirector:

Carlos Augusto Zuluaga Castrillón

Ph.D. en Geología

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físicoquímicas

Escuela de Geología

Bucaramanga

2017

Dedicatoria

A Dios.

A mis padres, abuelos y hermana por su amor y apoyo a lo largo de mi vida, por enseñarme a no darme por vencida a pesar de las circunstancias, a soñar en grande y a hacer todo con amor.

Agradecimientos

A mi Director Carlos Alberto Ríos Reyes por su colaboración y orientación a lo largo de la realización del trabajo.

A mi Co-Director Carlos Augusto Zuluaga Castrillón por su colaboración, por el suministro de la geoquímica y la oportunidad de trabajar en la microsonda electrónica de la Universidad Nacional de Colombia.

A mi compañero y consejero Julián por motivarme y brindarme su todo su apoyo y conocimiento en esta etapa de mi vida.

A Oscar Castellanos por haberme dado la posibilidad de trabajar con rocas metamórficas de alta presión-baja temperatura al suministrarme las muestras para la realización de este trabajo.

A la Geóloga MSc Carolina Jiménez por su acompañamiento en la obtención de los datos de química mineral en la microsonda electrónica de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá,

Al Físico MSc Carlos Chacón por su apoyo en el análisis y obtención de los datos en el microscopio electrónico de barrido del laboratorio de microscopía de la Universidad Industrial de Santander, sede Guatiguará.

A los docentes por hacer parte de mi proceso de formación profesional.

A mis amigos, compañeros y futuros colegas.

Tabla de Contenido

1	Introducción.....	16
2	Planteamiento del problema	18
3	Justificación.....	19
4	Objetivos.....	20
4.1	Objetivo general	20
4.2	Objetivos específicos.....	20
5	Localización.....	21
6	Antecedentes.....	22
7	Geología regional	24
8	Grupo Villa de Cura.	27
9	Metodología.....	29
9.1	Fase revisión bibliográfica	29
9.2	Trabajo de laboratorio	29
9.3	Generación del libro final.....	31
10	Petrografía.....	31
10.1	Formación Santa Isabel	32
10.1.1	Esquistos con pumpellyita.	32
10.1.2	Esquisto anfibólico fengítico.....	34
10.1.3	Cuarcita con estilpnomelana.....	37
10.2	Formación El Carmen	40
10.2.1	Esquistos con Fengita y Lawsonita.	40
10.2.2	Cuarcita con clorita.....	42
10.2.3	Metalava con piroxenos.....	44
10.2.4	Esquistos con Lawsonita	47
10.3	Formación El Chino y El Caño	50
10.3.1	Metatobas anfibólicas	50
11	Química mineral.....	53
11.1	Anfíboles.....	53
11.2	Fengita.....	59
11.3	Clorita.....	60
11.4	Piroxeno	61
12	Geoquímica.....	62
13	Condiciones de metamorfismo	67
14	Discusión y conclusiones.....	69

Petrografía y Geoquímica del Grupo Villa de Cura

15	Bibliografía	72
----	--------------------	----

Lista de Figuras

- Figura 1. a) Mapa de la región Caribe, la zona enmarcada es la región que aparece en b. b) Mapa tectónico generalizado de la zona norte de Venezuela, donde se encuentra la zona de estudio en Villa de Cura con la localización de las muestras. Modificado de Smith et al. (1999). ... 21
- Figura 2. Rasgos tectónicos de los Andes del Norte y la zona del Caribe, donde se observa las zonas de la Placa Suramericana que por procesos de subducción sufrieron metamorfismo de alta presión con edades del Cretácico Temprano. Tomado de Ramos (2009). 26
- Figura 3. Aspectos generales de las formaciones que constituyen al Grupo Villa de Cura en el área de estudio a) Afloramiento de la Formación Santa Isabel, ubicado en San Sebastián de los Reyes (Cambural), estado de Aragua. b) Afloramiento Formación El Carmen, ubicado entre el Pao de Zarate y San Sebastián, estado de Aragua. c) y d) Afloramiento de la Formación El Caño-El Chino, evidencia el plegamiento asimétrico en la roca, ubicada en el río El Pao, estado de Aragua. 28
- Figura 4. Microsonda electrónica, Departamento de Geociencias de la Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá. Tomado de Jimenez (2016). 31
- Figura 5. Muestra HPV-27A esquisto con pumpellyita, con una foliación (S_{n+1}) y algunos lentes de qz+pmp y pmp. 32
- Figura 6. Imágenes en PPL (izquierda) y PPX (derecha) de la muestra HPV-27A donde se muestran los agregados mineralógicos de pumpellyita y los porfidoblastos de piroxeno. La foliación de la roca está definida por la orientación de los cristales de pumpellyita. 34
- Figura 7. Muestra HPV-27B esquisto con glaucofana y epidota, zonas enriquecidas en epidota y fracturas aprovechadas por carbonatos. 35
- Figura 8. Microfotografías de la muestra HPV-27B. a) y b) PPL (izquierda) PPX (derecha) donde se observan anfíboles (winchita y glaucofana) creciendo junto a cristales de cuarzo y plagioclasa. c) y d) PPL (izquierda) PPX (derecha) donde se observa la foliación de la roca definida por fengita y una fractura rellena por carbonatos que corta la foliación de la roca. 37
- Figura 9. Muestra HPV-27C cuarcita con estilpnomela, con zonas enriquecidas en cuarzo y actinolita y otras con estilpnomelana, óxidos de hierro y rutilo. 38
- Figura 10. Microfotografías PPL (izquierda) PPX (derecha), donde se observa la orientación preferente de la estilpnomelana (mineral que define la foliación de la roca) y del cuarzo. .. 39
- Figura 11. Muestra HPV-28A esquistos con fengita y lawsonita, esta roca presenta una foliación que localmente se encuentra microplegada, también tiene estructuras lenticulares constituidas de cuarzo+carbonatos. 40

Petrografía y Geoquímica del Grupo Villa de Cura

- Figura 12. Microfotografías PPL (izquierda) PPX (derecha) de la muestra HPV-28A donde se observa una estructura lenticular compuesta de cuarzo+carbonato que se encuentra rodeada por los minerales que definen la foliación de la roca (fengita y clorita). 42
- Figura 13. Muestra HPV-28B cuarcita con foliación difusa dada por la clorita..... 43
- Figura 14. Microfotografías en PPL (izquierda) y PPX (derecha) de la muestra HPV-28B donde se observa la foliación discontinua de la roca definida por la clorita..... 44
- Figura 15. Muestra HPV-28C, metalava con textura de flujo compuesta por porfidoblastos de piroxeno (diópsido-augita) en una matriz de pumpellyita-actinolita..... 45
- Figura 16. Microfotografía en PPL (izquierda) y PPX (derecha) de la muestra HPV-28C donde se observan porfidobláastos de piroxeno alterando glaucofana y/o barrosita en una matriz compuesta por actinolita y pumpellyita. 47
- Figura 17. Muestra HPV-28D esquisto con lawsonita, roca presenta una foliación principal (Sn+1), donde se observan unas estructuras lenticulares de cuarzo y carbonatos, también se observan algunas venillas de carbonatos cortando la foliación. 48
- Figura 18. Microfotografías en PPL (izquierda) y PPX (derecha) de la muestra HPV-28D en las que se observan una venilla de carbonatos que cortan la foliación de la roca que está definida por la clorita en la que se encuentran embebidos cristales de lawsonita. 50
- Figura 19. Muestra HPV-29 metatoba anfibólica plegada con una zona rica en pumpellyita y actinolita. 51
- Figura 20. Microfotografías de la muestra HPV-29. En a) (PPL) y b) (PPX) se observa que la roca presenta localmente crenulación y en las fotografías c) (PPL) y d) (PPX) se observa que la roca presenta una foliación definida por los anfíboles. 53
- Figura 21. Imágenes BSE. a) y b) corresponden a la muestra HPV-27B, c) y d) corresponden a la muestra HPV-28C, e) y f) corresponden a la muestra HPV-29C..... 56
- Figura 22. Diagrama para la clasificación de anfíboles Ca (Locock, 2014). En este diagrama podemos ver que las tres muestras analizadas presentan este tipo de anfíboles donde HPV-27B de la Formación Santa Isabel y HPV-28C de la Formación El Carmen solo tienen anfíboles que caen en el campo de la actinolita y HPV-29C de la Formación El Caño y El Chino tiene anfíboles que caen en los campos de tremolita- manesi-hornblenda y tchermakita. 56
- Figura 23. Diagrama para la clasificación de anfíboles Na-Ca (Locock, 2014). Donde los anfíboles analizados en las muestras HPV-27B que corresponde a la Formación Santa Isabel y HPV-28C de la Formación el Carmen caen en los campos de winchita y barrosita. 57
- Figura 24. Diagrama para la clasificación de anfíboles Na (Locock, 2014). Donde los anfíboles analizados en las muestras HPV-27B de la Formación Santa Isabel y HPV-28C de la Formación El Carmen caen en el campo de la glaucofana. 57

Petrografía y Geoquímica del Grupo Villa de Cura

- Figura 25. Mapas composicionales anfíboles y plagioclasas de la muestra HPV-27B esquistos con anfíbol y fengita de la Formación Santa Isabel..... 58
- Figura 26. Mapas composicionales de anfíboles presentes en la muestra HPV-29C, metatoba anfibólica de la Formación El Caño y El Chino. 58
- Figura 27. Imagen BSE y perfil composicional de anfíbol correspondiente a la muestra HPV-29C, metatoba anfibólica de la Formación El Caño y El Chino..... 59
- Figura 28. Diagrama de clasificación de micas blancas basado en el origen metamórfico, donde se pueden diferenciar fengitas de alta presión-baja temperatura, las cuales ocurren en el campo que corresponde a la Zona de Glaucofana. Miyashiro (1973). De Cloritas analizadas de la muestra HPV-27B, esquisto con anfíbol y fengita de la Formación Santa Isabel. 59
- Figura 29. Composición química de cloritas donde se diferencian cloritas de la muestra HPV-27B, esquisto con anfíbol y fengita de la Formación Santa Isabel según Hey (1954). 60
- Figura 30. Mapa composicional de un piroxeno de la muestra HPV-28C, metalava con piroxeno de la Formación El Carmen, donde los elementos analizados son Fe, Mg y Ca. 62
- Figura 31. Diagramas de discriminación tectónica de las metabasitas del Grupo Villa de Cura de (Pearce & Cann, 1973). a) Diagrama para la discriminación de basaltos a partir de las variaciones de Ti-Zr que se divide en varios campos: A, toleitas de arco de islas; B, basaltos calco-alcalinos, toleitas de arco de islas y MORB; C, basaltos calco-alcalinos; D, MORB. b) Diagrama de discriminación para basaltos donde los campos son: A, toleitas de arco de islas; B, basaltos calco-alcalinos y C, MORB. 64
- Figura 32. Diagrama araña multi-elemento NMORB en metabasitas del Grupo Villa de Cura de (Sun & McDonough, 1989). Los símbolos son iguales a los de la Figura 31. 64
- Figura 33. Diagrama araña multi-elemento REE Chondrite en metabasitas del Grupo Villa de Cura de (Nakamura, 1974). Símbolos iguales a los de la Figura 31. 65
- Figura 34. Diagrama de Na(B)-AlIV de composiciones representativas de anfíboles. Editado de (Tsai, Iizuka, & Ernst, 2013). 68
- Figura 35. Trayectorias de presión y temperatura para las rocas del Grupo Villa de Cura, donde la trayectoria roja corresponde a la muestra HPB-27B de la Formación Santa Isabel. Modificado de Tsai & Ernst (2013)..... 69

Lista de Tablas

Tabla 1. Datos de geoquímica de las rocas que constituyen el Grupo Villa de Cura..... 65

Lista de apéndices

**(Ver apéndices adjuntos en el CD y pueden visualizarlos en la Base de Datos de la
Biblioteca UIS)**

Apéndice a. Datos de química mineral.

Resumen

Título: Caracterización petrográfica y geoquímica de las rocas metamórficas de alta p/baja t del grupo de villa de cura, venezuela*

Autor: María Juliana Gutiérrez López **

Palabras clave: Villa de Cura, Esquistos Azules, Metamorfismo de alta P- baja T, Serranía del Interior.

Descripción: En este trabajo se presenta el resultado de un estudio petrográfico y geoquímico de las rocas que conforman el Grupo Villa de Cura, en la zona ubicada entre el Pao de Zarate y San Sebastián de los Reyes sobre el Río Caramate, Estado de Aragua, Venezuela.

El Grupo Villa de Cura está constituido por tres formaciones las cuales han sido denominadas como Formación Santa Isabel, Formación El Carmen, Formación El Caño y El Chino, siendo en orden estratigráfico más antigua y con mayor grado de metamorfismo la Formación Santa Isabel y la más joven y con menor grado de metamorfismo la Formación El Caño y El Chino. Estas rocas han sido afectadas por un metamorfismo de alta presión/baja temperatura donde se formaron rocas de facies pumpellyita-actinolita, lawsonita-albita y esquistos azules.

A partir del análisis geoquímico se obtuvo que las rocas que corresponden a este grupo tienen composición basáltica con bajo contenido en potasio lo que define que la afinidad de la roca es toleítica y composición basáltica con afinidad calco-alcalina, por la composición de las rocas se puede pensar que el ambiente de formación es de un arco que posteriormente se adosó al continente por un proceso de convergencia en el que estas rocas sufrieron la transformación metamórfica.

*Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Geología. Director: Msc. PhD. Carlos Alberto Ríos Reyes

Abstract

Title: Petrographic and geochemical characterization of the metamorphic rocks of high p / low of the villa de cura group, venezuela*

Author: María Juliana Gutiérrez López**

Keywords: Villa de Cura, Blueschist, High pressure/Low temperature.

Description: This work presents the results of a petrographic and geochemical study of the rocks that make up the Villa de Cura Group, in the field area between Pao de Zarate and San Sebastián de los Reyes on the Caramate River, Aragua State, Venezuela.

The Villa de Cura Group consists of three formations which have been denominated as Santa Isabel Formation, El Carmen Formation, El Caño Formation and El Chino, being in the oldest stratigraphic order and with a higher degree of metamorphism the Santa Isabel Formation and the more young and with less degree of metamorphism El Caño and El Chino Formation. These rocks have been affected by a high pressure / low temperature metamorphism where rocks-pumpellyite-actinolite, lawsonite-albite and blueschists were formed.

From the geochemical analysis it was obtained that the rocks that correspond to this group have basaltic composition with low content in potassium which defines that the affinity of the rock is toleitic and basaltic composition with calco-alkaline affinity, for the composition of the rocks is can think that the environment of formation is of an arc that later were attached to the continent by a process of convergence in which these rocks underwent the metamorphic transformation.

*Bachelor Thesis

** Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Geología. Director: MSc. PhD. Carlos Alberto Ríos Reyes.

1 Introducción

La caracterización petrológica de rocas metamórficas, mediante la descripción del registro mineralógico y microestructural de la historia de enterramiento / calentamiento y exhumación / enfriamiento, ya sea por procesos de subducción, acreción, orogénesis y colapso colisional (Brown, 2014, pág. 554), es una importante herramienta para la reconstrucción de las diferentes perturbaciones asociadas con los procesos que operan márgenes continentales.

Los esquistos azules son rocas metamórficas de alta presión que se forman en zonas de subducción o colisión entre placas litosféricas convergente, las cuales en conjunto con eclogitas definen antiguas zonas de límite de placas convergente (Smith, Sisson, Avé Lallemant, & Copeland, 1999). En el mundo existen varias zonas en las que se encuentran expuestas rocas metamórficas de alta P/T, dentro de las que el Complejo Franciscano (Berkland, Raymond, Kramer, Moores, & O'Day, 1972, pág. 2296), ubicado al oeste de California, es un referente que representa el producto de la subducción litosférica hacia el este bajo la margen occidental de la Placa Norteamericana (Platt, 1975, pág. 1337).

En Centroamérica y Suramérica se encuentra un cinturón de alta P/T, el cual se extiende desde Guatemala hasta Cuba, Jamaica e Hispaniola hasta Venezuela, hacia el sur se extiende hasta los Andes (Case, Holcombe, & Matin, 1984). Este cinturón marca una zona de subducción fósil de edad Cretácico, la cual une sistemas equivalentes en América del Norte y del Sur (Pindell & Dewey, 1982; Burke et al., 1984). En esta zona se encuentra el Sistema Montañoso del Caribe de Venezuela, el cual es una continuación del arco insular de la Región Oriental del Caribe, que a su vez se encuentra dividido en los tramos central y oriental, separados por la Depresión Tectónica de la Cuenca de Río Unare y la Fosa de Cariaco. Este se divide en

Petrografía y Geoquímica del Grupo Villa de Cura

diferentes cinturones tectonoestratigráficos de rumbo aproximadamente E-W, los cuales se denominan de norte a sur como Islas Holandesas y Venezolanas, Cordillera de la Costa, Cinturón Tectónico de Caucagua - El Tinaco, Cinturón Tectónico de Paracotos, Cinturón Tectónico de Villa de Cura, y Frente de Montañas de Guárico (Ostos et al., 2001).

El Cinturón Tectónico de Villa de Cura (Navarro, 1993; Navarro et al., 1988), está constituido principalmente por rocas metavolcanoclásticas y metasedimentarias, volcánicas interpretadas como de arcos de islas, e intrusivas máficas a ultramáficas, de posible edad Cretácico Temprano (Navarro, 1983), las cuales fueron afectadas por un evento metamórfico de alta P/baja T, evidenciado por el desarrollo de esquistos azules y eclogitas, sobreimpuestas posteriormente por un metamorfismo de intermedia P/T. Este cinturón metamórfico está constituido por el Grupo de Villa de Cura y la Formación de Las Hermanas (Smith et al., 1999), los cuales forman parte de la Serranía del Interior de la Cordillera de la Costa, extendiéndose desde la región oriental del estado Carabobo hasta el sureste de Miranda (Navarro 1993; Navarro et al., 1988).

El objetivo del proyecto es llevar a cabo la caracterización petrográfica y geoquímica de las unidades que forman parte del Grupo de Villa de Cura aflorantes entre Pao de Zarate y San Sebastián de Los Reyes, Estado de Aragua (Venezuela). Este trabajo es un aporte al conocimiento geológico de cinturones de alta presión/baja temperatura en el contexto geodinámico del borde noroccidental de Suramérica.

2 Planteamiento del problema

Las rocas que conforman la margen continental venezolana, localizada en la parte septentrional del continente suramericano, han sido catalogadas como el producto de la interacción entre las placas Caribe, Suramericana, el Arco de Panamá y el Bloque Continental de Maracaibo (Bermúdez et al. 2010), dicha interacción, da lugar a la generación de bloques tectónicos que han sido relacionados con la acreción de terrenos de origen oceánico al continente. El Grupo de Villa de Cura es un conjunto litológico de posible edad Cretácica (Navarro, 1983), el cual aflora en una franja ubicada en la Serranía del interior de la Cordillera de la Costa y se extiende desde la región oriental del estado de Carabobo y el sureste de Miranda y se encuentra constituido por rocas metavolcanoclásticas y metasedimentarias (Navarro, 1983). Adicionalmente, las rocas del Grupo de Villa de Cura han sido reportadas como un conjunto de rocas metamórficas de alta presión/ baja temperatura con protolitos que asociados con un arco de islas oceánico (Unger, 2005).

A partir de una revisión bibliográfica se pueden establecer las siguientes preguntas de investigación: ¿Cuál es el protolito de las rocas que conforman el Grupo de Villa de Cura?, ¿Cuáles fueron las condiciones de presión y temperatura en las que se formaron estas rocas?, ¿Cómo fue el mecanismo de emplazamiento de las rocas de Villa de Cura a la margen continental?

3 Justificación

El presente trabajo se justifica en la necesidad de generar conocimiento geológico en torno a la génesis de cinturones metamórficos de alta presión, particularmente de la secuencia metavolcánica del Grupo Villa de Cura (Venezuela) a partir del uso del análisis petrográfico para identificar asociaciones minerales, texturas, reacciones, microestructuras y mecanismos de deformación y la geoquímica (química de roca total y química mineral) de estas rocas que permitan dilucidar su ambiente tectónico-metamórfico de formación.

4 Objetivos

4.1 Objetivo general

Caracterizar petrográfica y geoquímicamente las rocas de la secuencia metavolcánica del Grupo Villa de Cura, Cordillera de la Costa, Venezuela, con el fin de contribuir al conocimiento geológico de cinturones de alta presión.

4.2 Objetivos específicos

- Realizar la petrografía de las unidades litológicas del Grupo Villa de Cura, Venezuela.
- Determinar petrográficamente las paragénesis minerales, asociaciones minerales de equilibrio y condiciones de deformación de las rocas que conforman el Grupo Villa de Cura.
- Determinar a partir de la geoquímica el protolito y el ambiente tectónico de la sucesión metavolcánica de Villa de Cura.
- Establecer las condiciones de presión y temperatura en las que se formaron estas rocas.

5 Localización

El área de estudio está ubicada en la Serranía del Interior entre el Pao de Zarate y San Sebastián de los Reyes sobre el Río Caramate, Estado de Aragua, Venezuela (Figura 1).

Las muestras tomadas para este trabajo se sacaron de tres puntos específicos los cuales corresponden cada uno a una formación con las siguientes coordenadas:

- Formación Santa Isabel (HPV-27). N: 1°107.120; E: 695.174.
- Formación El Carmen (HPV-28): N. 1°108.412; E: 695.825.
- Formación El Caño y El Chino (HPV-29). N: 1°112.090; E: 695.205.

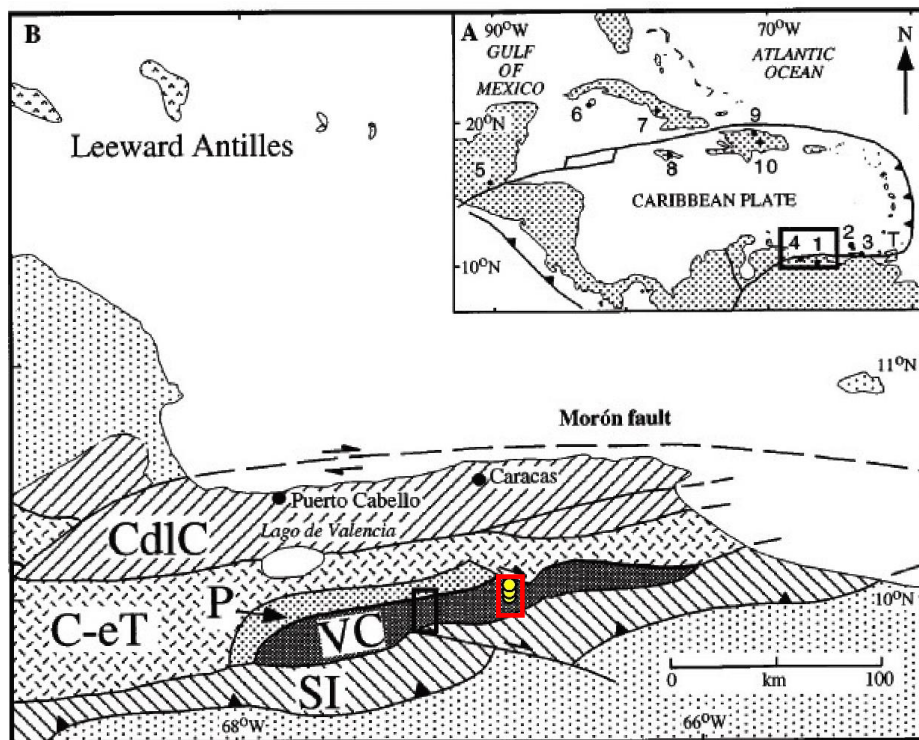


Figura 1. a) Mapa de la región Caribe, la zona enmarcada es la región que aparece en b. b) Mapa tectónico generalizado de la zona norte de Venezuela, donde se encuentra la zona de estudio en Villa de Cura con la localización de las muestras. Modificado de Smith et al. (1999).

6 Antecedentes

El Cinturón tectónico de Villa de Cura (Navarro 1993; Navarro et al., 1988) es uno de los cinturones tectonoestratigráficos con rumbo E-W que conforman el Sistema Montañoso del Caribe de Venezuela (Ostos et al., 2001), el cual está constituido principalmente por rocas metavolcánicas y metasedimentarias, volcánicas de arcos de islas, e intrusivas máficas a ultramáficas, de posible edad Cretácico Temprano (Navarro, 1983). Estas litologías fueron afectadas por un evento metamórfico de alta P/baja T, evidenciado por el desarrollo de esquistos azules y eclogitas, y el cual fue sobreimpuesto por un metamorfismo de P/T intermedia. Este Cinturón está compuesto por dos unidades (Smith et al., 1999); el Grupo Villa de Cura, conformado por rocas metamórficas de alta presión y por la Formación Las Hermanas, rocas metamórficas de bajo grado.

El Grupo de Villa de Cura aflora en la Serranía del Interior de la Cordillera de la Costa y se extiende desde el oriente del estado de Carabobo hasta el sureste de Miranda (Navarro, 1993) y es considerado como una secuencia metavolcánica conformado por las formaciones El Caño (zona pumpelita-actinolita), El Chino (zona galucofana-lawsonita), El Carmen (zona glaucofana-epidota) y Santa Isabel (zona de la barroisita) donde las primeras tres son producto de un periodo volcánico y la última está formada por rocas metasedimentarias (Shagam, 1960; Smith et al., 1999) de posible edad Cretácico Temprano (Navarro, 1983).

Estas rocas hacen parte del Cinturón de Esquistos Azules de Villa de Cura (Smith et al., 1999) y han sido relacionadas a ambientes de subducción con afinidades de arcos de islas (Smith et al., 1999; Lallemand, 2005).

Petrografía y Geoquímica del Grupo Villa de Cura

En esta zona ya se han hecho varios estudios previos donde los principales aportes fueron los siguientes:

Aguerrevere & Zuloaga (1937) estudió la zona entre Caracas, Tinaquillo y San Juan de los Morros donde se diferencian dos unidades estratigráficas principales: Grupo Caracas (rocas sedimentarias metamorfizadas) y el Grupo Villa de Cura (aparente secuencia de rocas volcánicas y sedimentarias metamorfizadas).

Shagam (1960) divide al Grupo Villa de Cura en cuatro formaciones: El Caño, El Chino, El Carmen (generadas en un periodo volcánico) y Santa Isabel (conformado por rocas metasedimentarias).

Seiders (1965) propone un origen alóctono al Grupo Villa de Cura.

Jarvis (1966) reportó rocas parecidas a las descritas por Shagam (1960) en la región de los ríos Pao y Tiznados, estado de Cojedes, Guaricó y Carabobo, y postula un origen alóctono a la Faja de Villa de Cura considerando su formación al norte de la Cordillera de la Costa, la cual posteriormente sufre un deslizamiento gravitacional hacia el sur.

Menéndez (1966) define al Grupo de Villa de Cura como una faja tectónica de la Cordillera de la Costa.

Navarro (1983) propone un modelo evolutivo de origen autóctono del Grupo Villa de Cura a partir del estudio petrológico de las rocas.

Urbani, Chirinos, & Marquina (1990) describen al Grupo Villa de Cura estableciendo el grado de metamorfismo que alcanza.

Pindell, Higgs, & Dewey (1998), Pindell et al. (2005) y Pindell, Lorcan, Wright, & Erikson (2009) relacionan el emplazamiento de los terrenos de Villa de Cura y San Sebastián al

Petrografía y Geoquímica del Grupo Villa de Cura

desplazamiento de la Placa Caribe desde el NW hacia el SE, donde la unidad son restos del proto-Caribe emplazándose en el continente.

7 Geología regional

El Sistema Montañoso del Caribe de Venezuela se formó por una interacción geodinámica compleja entre la Placa Caribe y la Placa Suramericana, los patrones de convergencia de estas placas generan la obducción de terrenos oceánicos (Kennan and Pindell, 2009). Esta convergencia oblicua da lugar a un evento compresivo el cual causa una deformación en la Placa Suramericana la cual es evidenciada en rocas que conforman al Grupo Villa de Cura en la Serranía del Interior, Venezuela.

El Sistema Montañoso del Caribe de Venezuela es una continuación estructural del Arco Insular de la Región Oriental del Caribe y se encuentra dividida en dos cadenas montañosas: la Serranía del Litoral y la Serranía del Interior (Figuerola, 1995), separados por la Depresión Tectónica de la Cuenca del Río Unare y la Fosa de Cariaco. La Cordillera de la Costa de Venezuela se extiende entre la Depresión de Yaracuy al oeste y el Océano Atlántico al este. Representa un complejo sistema integrado por formaciones montañosas, colinas, valles y depresiones, al norte por el Mar Caribe y al sur por la Depresión Central Llanera (Giunta & Oliveri, 2009, pág. 62).

Este cinturón está constituido por unidades tectónicas imbricadas muy afectado por deformación frágil y dúctil-frágil relacionada con fallas de rumbo dextrales (E-W) con fallas sintéticas y antitéticas relacionadas (Giunta & Oliveri, 2009, págs. 62-63).

Petrografía y Geoquímica del Grupo Villa de Cura

La región centro norte de Venezuela tiene una estructural muy compleja, razón por la que Ostos et al. (2001) ha dividido el Sistema Montañoso del Caribe de Venezuela en diferentes cinturones tectonoestratigráficos de rumbo aproximadamente noroeste-sureste, los cuales desde el norte hacia el sur se denominan: Islas Holandesas y Venezolanas, Cordillera de la Costa, Cinturón Tectónico de Caucagua - El Tinaco, Cinturón Tectónico de Paracotos, Cinturón Tectónico de Villa de Cura y Frente de Montañas de Guárico. Estructuras regionales como las fallas de La Puerta y Guaricó son transcurrente dextrales con rumbo noroeste-sureste donde la Falla La Puerta pone en contacto a la Faja de Villa de cura y la Faja Piemontina (Bell, 1968).

La Serranía del interior es una franja monstañosa que extiende en una dirección este-oeste y se encuentra conformado por los Grupo Villa de Cura y el Terreno San Sebastián del Cretácico Temprano. El Grupo de Villa de Cura (Navarro 1993; Navarro et al., 1988) está constituido principalmente por rocas metasedimentarias y metavolcanoclásticas, volcánicas de arcos de islas, e intrusivas máficas a ultramáficas, de posible edad Cretácico Temprano (Navarro, 1983), las cuales fueron afectados por un evento metamórfico de alta P/baja T, evidenciado por el desarrollo de esquistos azules y eclogitas, y el cual fue sobreimpuesto por un metamorfismo de intermedia P/T.

Actualmente la Faja de Villa de Cura está conformada por el Grupo Villa de Cura y la Formación San Sebastián y su cobertura sedimentaría (Díaz & Pedrinar, 2014, pág. 21).

Las rocas del Grupo Villa de Cura son parte de un complejo de arco de isla oceánico. Este grupo hace parte de la Serranía del Interior de la Cordillera de la Costa y se extiende desde la región oriental del estado de Carabobo hasta el sureste de Miranda (Navarro, 1983; Navarro et

al., 1988) localizado al norte de Suramérica donde interactúan las placas Suramericana y Caribe (Figura 2).

El Grupo Villa de Cura está conformado por las formaciones Santa Isabel, El Carmen y El Caño-El Chino, estas unidades fueron subducidas a profundidades aproximadas de 30 km donde se produjo un metamorfismo de alta presión/ baja temperatura, confirmado por los minerales como glaucofana, lawsonita y fengita encontrados en las rocas de este grupo (Navarro, 1983).

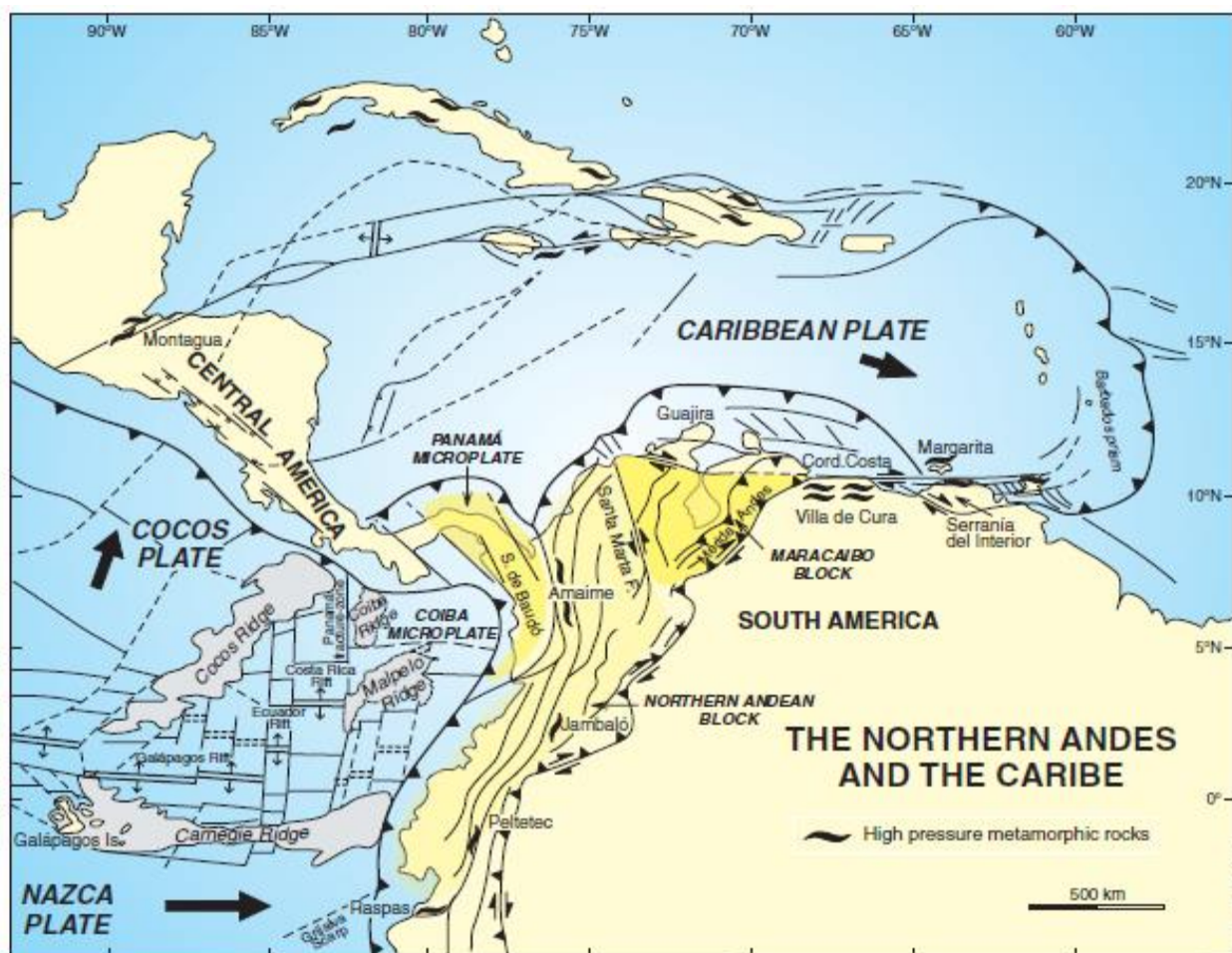


Figura 2. Rasgos tectónicos de los Andes del Norte y la zona del Caribe, donde se observa las zonas de la Placa Suramericana que por procesos de subducción sufrieron metamorfismo de alta presión con edades del Cretácico Temprano. Tomado de Ramos (2009).

8 Grupo Villa de Cura.

El Grupo Villa de Cura aflora en la Serranía del Interior ubicada desde el estado de Carabobo hasta el sureste de Miranda. En este trabajo la zona de estudio se encuentra ubicada entre el Pao de Zarate y San Sebastián de los Reyes, estado de Aragua donde afloran las unidades que conforman al Grupo Villa de Cura de norte a sur aumentando su edad así: Formación El Chino y El Caño, Formación El Carmen, Formación Santa Isabel .

Formación El Caño y el Chino: Constituida por metatobas máficas y cristalinas intercaladas con metalavas piroxénicas (Figura 3, a y b). Por el tamaño de los clastos estas metatobas se han clasificado como metatobas de cenizas (masivas, bandeadas o laminadas) pero por la recristalización metamórfica es difícil determinar si estas rocas son piroclásticas o se trata de rocas epiclásticas. Por el tamaño de grano y la naturaleza del protolito se podría pensar que proviene de la actividad volcánica de un arco (Navarro, 1983, pág. 191).

Formación el Carmen: Constituida por metalavas piroxénicas (Figura 3d) que se caracterizan por la presencia de fenocristales de piroxeno (augita-diópsido) en una matriz constituida por productos de la transformación metamórfica de la matriz del protolito (pumpellyita, actinolita). Esta matriz presenta textura de flujo.

También hay esquistos con lawsonita, fengita y clorita que presentan algunas estructuras lenticulares formadas por carbonatos y cuarzo.

Formación Santa Isabel ubicada al sur está constituida por granofelsas cuarzo-feldespático-epidóticos, con estilpnomelana, clorita, clinozoisita, glaucofana, barroisita y actinolita se encuentran intercalados con esquistos feldespato-epidóticos. Además tiene estructuras

Petrografía y Geoquímica del Grupo Villa de Cura

esquistosas constituidas mineralógicamente por con pumpellyita, glaucofana, epidota y lawsonita y cuarcitas con estilpnomelana (Figura 3c).

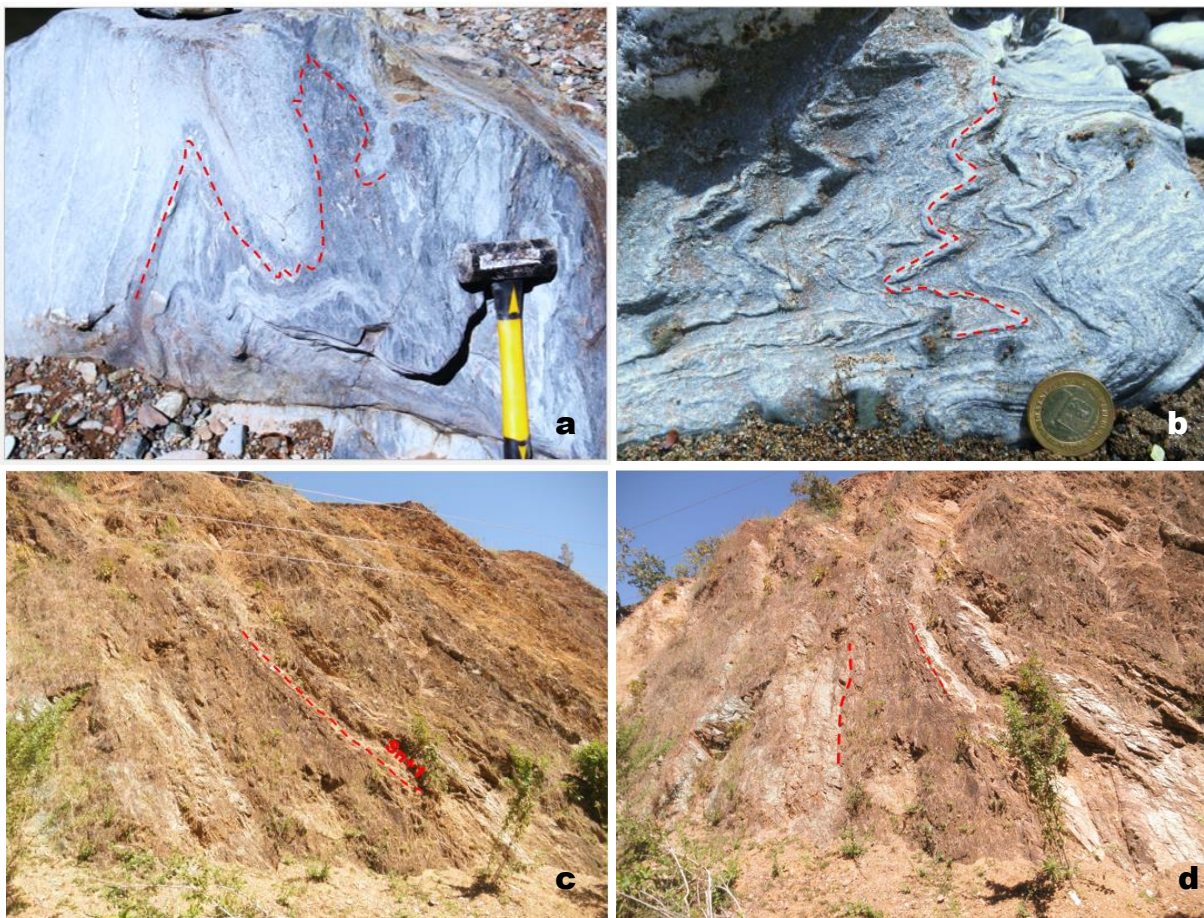


Figura 3. Aspectos generales de las formaciones que constituyen al Grupo Villa de Cura en el área de estudio **a)** Afloramiento de la Formación Santa Isabel, ubicado en San Sebastián de los Reyes (Cambural), estado de Aragua. **b)** Afloramiento Formación El Carmen, ubicado entre el Pao de Zarate y San Sebastián, estado de Aragua. **c)** y **d)** Afloramiento de la Formación El Caño-El Chino, evidencia el plegamiento asimétrico en la roca, ubicada en el río El Pao, estado de Aragua.

9 Metodología

Para la realización de este trabajo de investigación son necesarias las siguientes fases:

9.1 Fase revisión bibliográfica

En esta fase se realizó la recopilación bibliográfica y el análisis a partir de diversas fuentes sobre aspectos geológicos, petrográficos y geoquímicos del Grupo Villa de Cura y del Cinturón tectónico Villa de Cura al cual pertenece este Grupo, de manera que se permita contextualizar geológicamente las técnicas y los métodos a utilizar. Para este propósito, se cuenta con la información de la base de datos de la Universidad Industrial de Santander (Science Direct, ELSEVIER, Science OnLine) así como revistas especializadas (Journal of Structural Geology, Journal of Metamorphic Geology, Journal of Petrology), y boletines nacionales (Boletín de Geología), también se hará uso de manuales petrográficos, y demás información que sirva de apoyo al análisis petrográfico y de interpretación de los datos.

9.2 Trabajo de laboratorio

En esta fase se inició con una descripción macroscópica y caracterización de muestras de mano con superficies pulidas de las rocas metamórficas pertenecientes al Grupo Villa de Cura con el fin de establecer sus rasgos estructurales. Estas rocas fueron recolectadas a lo largo de transecta realizadas en la Serranía del Interior entre el Pao de Zarate y San Sebastián de los Reyes sobre el Río Caramate, Estado de Aragua, Venezuela.

Posteriormente, se realizaron las secciones delgadas en el laboratorio de la Universidad de Pamplona sede Villa del Rosario de estas muestras para llevar a cabo su análisis petrográfico con un microscopio de luz transmitida marca LEICA modelo DM750P del laboratorio del Grupo de

Petrografía y Geoquímica del Grupo Villa de Cura

Investigación de Geología Básica y Aplicada GIGBA de la escuela de Geología de la Universidad Industrial del Santander, sede Guatiguará con el fin de determinar rasgos microestructurales y texturales, así como las paragénesis minerales.

Para la geoquímica de roca total (elementos mayores) se seleccionaron 3 muestras de roca fresca, una de cada formación que fueron procesadas y analizadas en el laboratorio de ALS Global en Medellín. La muestra de roca se pesó, secó y trituró, el 70% pasa por una malla de 2 mm (malla Tyler 9, US Std. N° 10) y una fracción de 250 g se toma y se pulveriza para que más del 85% pase a una malla de 75 micras (200 N° Tyler de malla 200, US Std.. A la muestra de aproximadamente 200 mg se le añade un fundente de metaborato / tetraborato de litio (0,90 g) bien mezclado y se funde en un horno a 1000 °C, la masa fundida resultante se enfría y se disuelve en 100 ml de ácido nítrico al 4 y clorhídrico al 2, esta solución se analiza por los métodos de plasma acoplado inductivamente a un espectrometro de emisión atómica (ICP-AES) y a un espectrometro de masas (ICP-MS), la concentración de óxido se calcula a partir de la concentración elemental determinada (Taggart, 2002).

La química mineral por análisis de microsonda electrónica Superprobe JEOL JXA-8230 (Figura 4) con tres espectrómetros WDS perteneciente al Laboratorio de caracterización litológica del Departamento de Geociencias de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá. Las condiciones establecidas para la medición fueron: aceleración de voltaje 15kV; 20nA de corriente del haz; diámetro del haz entre 1 μm - 10 μm ; tiempo de medida de cada elemento de 30 s para el pico y de 15 s para el fondo. Las correcciones se realizaron a partir del método ZAF. También se realizaron mapas de rayos X WDS y EDS con una aceleración de voltaje de 20 Kv, 85nA y un dwell time 10-50 ms. La microsonda fue calibrada con

Petrografía y Geoquímica del Grupo Villa de Cura

concentraciones naturales de concentraciones conocidas. Finalmente, se establecieron las condiciones de presión y temperatura de metamorfismo.



Figura 4. Microsonda electrónica, Departamento de Geociencias de la Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá. Tomado de Jimenez (2016).

9.3 Generación del libro final

Una vez obtenidos los resultados a partir de la aplicación de técnicas y análisis de la información, se genera el libro final.

10 Petrografía

El Grupo Villa de Cura constituido por tres formaciones presentan una variedad composicional, textural y estructural. La clasificación se realizó siguiendo las recomendaciones de la Subcomisión sobre Nomenclatura de Rocas Metamórficas- SCMR (Fettes, et al., 2007). A

continuación se presentaran los resultados petrográficos teniendo en cuenta los diferentes litotipos de cada formación.

10.1 Formación Santa Isabel

Esta roca presenta tres litotipos diferentes que son característicos por la presencia de minerales como pumpellyita, fengita, lawsonita, estilpnomelana, anfíboles sódicos (glaucofana) y sódico cálcicos (barroisita-winchita).

10.1.1 Esquistos con pumpellyita.

Roca de color gris oscuro con una foliación (S_{n+1}) definida por dominios de pumpellyita y cuarzo también presenta algunas estructuras lenticulares de color blanco compuestas principalmente por cuarzo y de color verde oscuro de pumpellyita, estas estructuras siguen la dirección de la foliación (Figura 5).

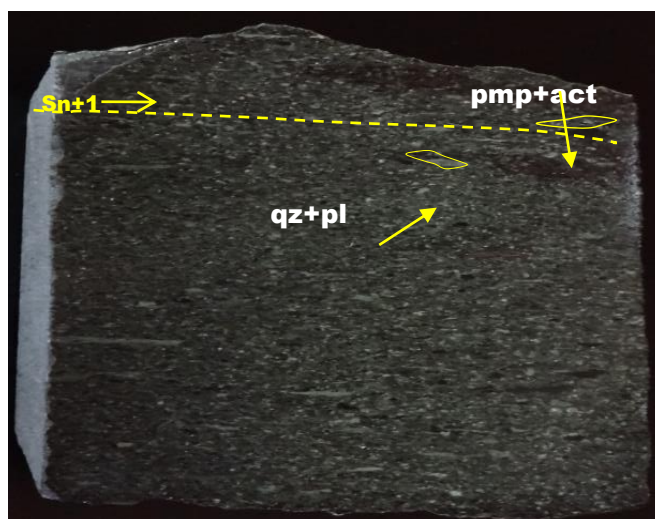


Figura 5. Muestra HPV-27A esquivo con pumpellyita, con una foliación (S_{n+1}) y algunos lentes de qz+pmp y pmp.

Petrografía y Geoquímica del Grupo Villa de Cura

Microscópicamente la roca está constituida principalmente por pumpellyita y cuarzo, donde estos minerales son los que definen la foliación de la roca ya que muestran una orientación preferente, la roca presenta algunas estructuras lenticulares alargadas constituidas por agregados minerálicos de pumpellyita y poliminerálicos de cuarzo pumpellyita. La roca presenta porfidoblastos de clinopiroxenos (augita+diópsido) que se encuentran rodeados por los dominios de pumpellyita y cuarzo. La textura de la roca es granoblástica con porfidoblástos de piroxeno, donde la paragénesis de la roca es pumpellyita+cuarzo+plagioclasa+diópsido+augita+sericita.

Pumpellyita: Cristales de forma acicular, color pardo verdoso con alto pleocroísmo y colores de interferencia amarillos del primer orden y naranja, fucsia y azul del segundo orden. Este mineral se presenta principalmente siguiendo una dirección preferencial la cual define la foliación de la roca y en agregados poliminerálicos radiales o con forma de corbatín alargados hacia la dirección de la foliación (Figura 6).

Cuarzo: Cristales anhedrales que se presentan formando agregados policristalinos, y listones donde los cristales presentan bordes rectos o levemente curvados, extinción ondulante, formación de subgranos lo cual evidencia que la roca sufrió un proceso de deformación.

Plagioclasa: Cristales subhedrales a anhedrales, algunos de estos se encuentra dentro de los agregados poliminerálicos, otros están presentes en la roca como porfidoblastos aislados de mayor tamaño (1cm de largo) con alto porcentaje de sericitización. Los cristales son incoloros con colores de interferencia grises de primer orden estas plagioclasas presentan macla simple o polisintética.

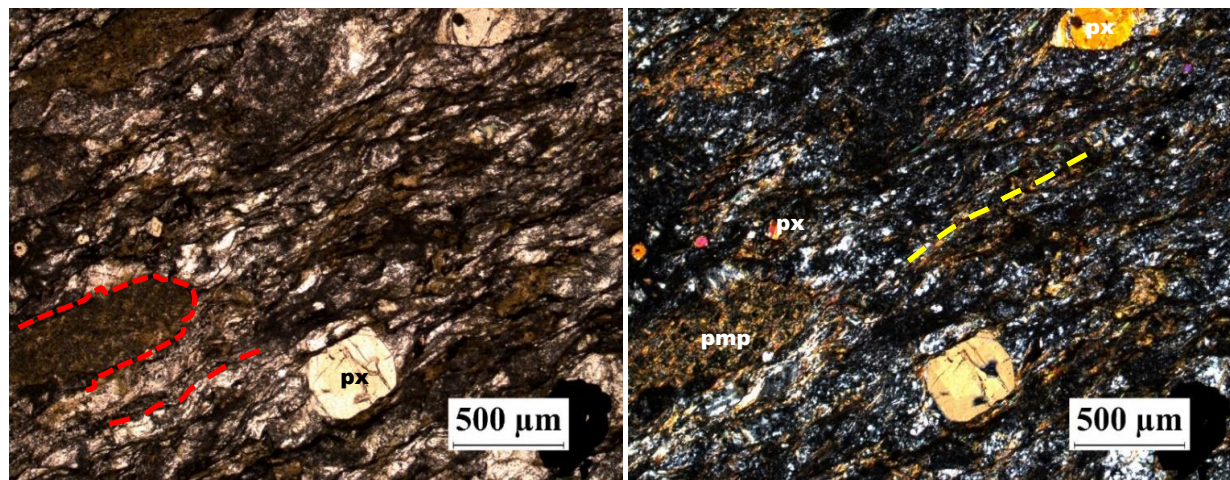


Figura 6. Imágenes en PPL (izquierda) y PPX (derecha) de la muestra HPV-27A donde se muestran los agregados mineralógicos de pumpellyita y los porfidoblastos de piroxeno. La foliación de la rica está definida por la orientación de los cristales de pumpellyita.

Piroxenos (augita-diopsido): Cristales incoloros de alto relieve, con colores de interferencia desde amarillo de primer orden hasta azules y fucsias de segundo-tercer orden, algunos presentan macla simple. Estos porfidoblastos se encuentran en la roca de forma aleatoria y se encuentran rodeados por los dominios de cuarzo y pumpellyita mostrando origen pre-tectónico, estos cristales tienen un tamaño aproximado de 0.2 a 0.6 mm (Figura 6).

10.1.2 Esquisto anfibólico fengítico.

Este esquisto presenta una foliación (S_{n+1}) bien marcada y definida por bandas claras de cuarzo, plagioclasa y bandas oscuras constituidas por fengita con epidotas y anfíboles, se observan unas estructuras lenticulares de color verde constituidas principalmente por epidota. La roca presenta algunas fracturas que los carbonaros han aprovechado para penetrar la roca (Figura 7).

Microscópicamente se evidencia la foliación (S_{n+1}) de la roca que está marcada principalmente por el dominio de clivaje (fengita+clorita) con textura lepidoblástica en el cual

Petrografía y Geoquímica del Grupo Villa de Cura

también se observa una pequeña crenulación en la roca (Sn+2). La roca también tiene un dominio granoblástico que define el dominio de microlitones constituido por cuarzo, plagioclasa, epidota y en menor proporción lawsonita (Figura 8).

Localmente la roca presenta un crecimiento aleatorio de los cristales de plagioclasas y anfíboles sódicos y sódico-cálcicos constituyendo una textura granonematoblástica en esta zona.

La paragénesis de la roca es anfíboles+epidota+fengita+cuarzo+lawsonita+plagioclasa+carbonatos.

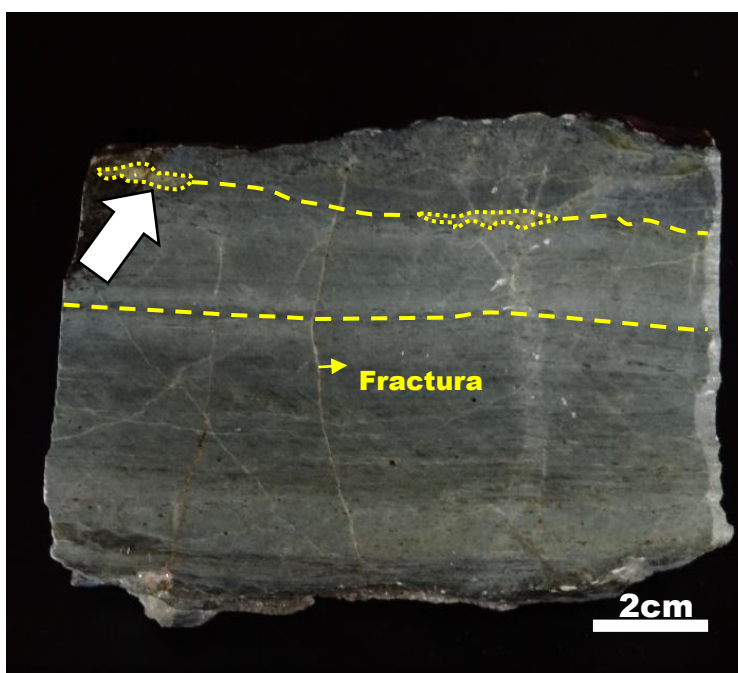


Figura 7. Muestra HPV-27B esquisto con glaucofana y epidota, zonas enriquecidas en epidota y fracturas aprovechadas por carbonatos.

Cuarzo: Cristales incoloros de bajo relieve con colores de interferencia grises de primer orden, el tamaño de los cristales es fino orientados siguiendo la foliación. También se presentan formando algunos agregados policristalinos alargados en la dirección de la foliación. Estos

Petrografía y Geoquímica del Grupo Villa de Cura

cristales presentan bordes rectos o levemente curvados, extinción ondulante, pequeños agregados en forma de listones, evidenciando que la roca sufrió un proceso de deformación.

Epidota: Cristales euhedrales a subhedrales de color verde claro con alto relieve y colores de interferencia altos que van desde amarillo a fucsia y azul del tercer orden. La mayoría de las epidotas están orientados siguiendo la dirección de la foliación, en algunas zonas se observa a la epidota creciendo a partir de los carbonatos.

Fengita: Agregados minerales ojerosos incoloros de bajo relieve con colores de interferencia amarillo a naranja de segundo orden. Este mineral define la foliación de la roca junto a la clorita.

Lawsonita: Cristales rectangulares, incoloros de relieve alto y con colores de interferencia amarillos y naranjas de segundo orden donde la mayoría siguen la dirección de la formación. Estos cristales se encuentran principalmente en el dominio de clivaje junto a las micas.

Carbonatos: Cristales anhedrales incoloros de bajo relieve con colores de interferencia muy altos de gris perla a rosa y celeste, estos cristales presentan una exfoliación de 60-120°. Estos minerales se encuentran rellenando las fracturas de las rocas que cortan la foliación de la roca (Figura 8c,8d).

Plagioclasa: Cristales incoloros tabulares con colores de interferencia grises de primer orden, presentan macla simple y polisintética, estos cristales crecen de forma aleatoria y no siguen la foliación de la roca (Figura 8a, 8b), el crecimiento de este mineral se da localmente junto a los anfíboles sódicos y sódico-cálcicos.

Anfíboles: Cristales subhedrales a anhedrales aciculares, rectangulares, idiomorfos y rómbicos, de color verde, azul y violeta lo que evidencia la variedad de la composición de estos, tienen colores de interferencia desde grises fucsias y amarillos de segundo y tercer orden, estos

Petrografía y Geoquímica del Grupo Villa de Cura

crisales crecen de forma aleatoria en la roca presentan de manera aleatoria y sin una orientación creciendo junto las plagioclasas (Figura 8a, 8b).

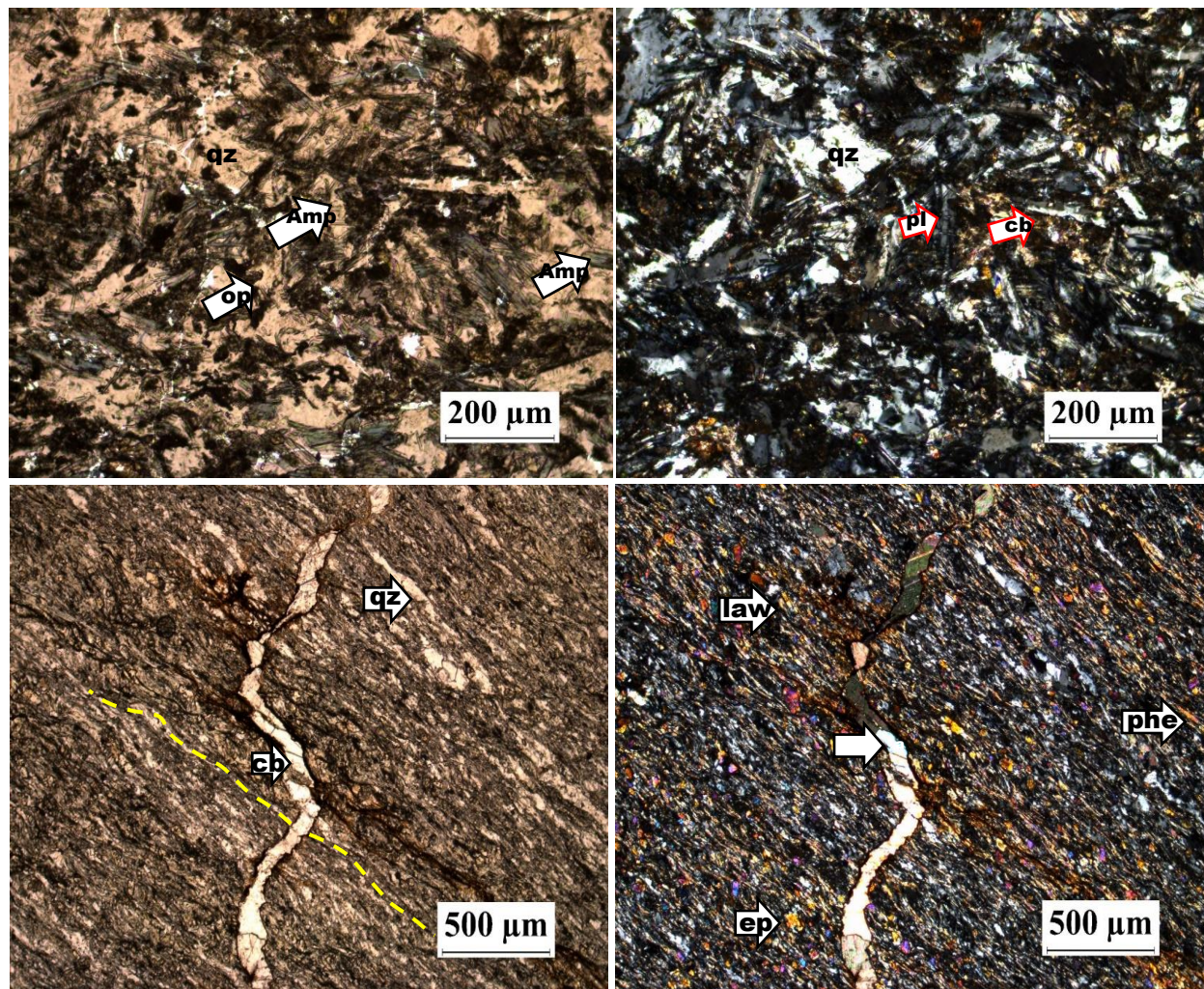


Figura 8. Microfotografías de la muestra HPV-27B. **a)** y **b)** PPL (izquierda) PPX (derecha) donde se observan anfíboles (winchita y glaucofana) creciendo junto a cristales de cuarzo y plagioclasa. **c)** y **d)** PPL (izquierda) PPX (derecha) donde se observa la foliación de la roca definida por fengita y una fractura rellena por carbonatos que corta la foliación de la roca.

10.1.3 Cuarzita con estilpnomelana

Esta roca presenta un bandeamiento composicional con bandas claras y oscuras, donde las bandas oscuras pardo constituidas principalmente con estilpnomelana y óxidos de hierro y las zonas claras definidas principalmente por cuarzo y anfíboles de tamaño muy fino (Figura 9).

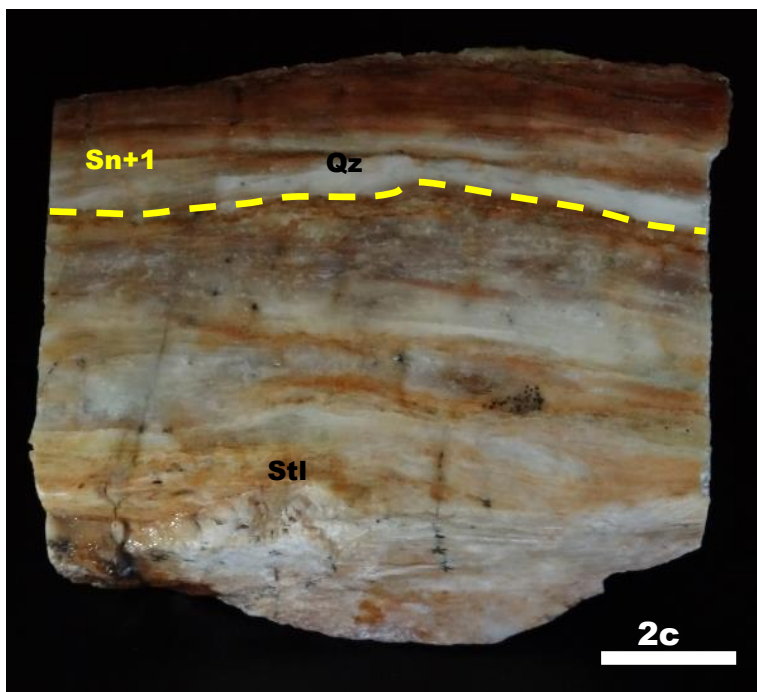


Figura 9. Muestra HPV-27C cuarcita con estilpnomela, con zonas enriquecidas en cuarzo y actinolita y otras con estilpnomelana, óxidos de hierro y rutilo.

Microscópicamente la roca presenta una orientación preferente dada principalmente por los dominios de clivaje dados por la estilpnomelana con una textura lepidoblástica y los anfíboles (tremolita-actinolita) con textura nematoblástica, el cuarzo que es el mayor constituyente de la roca se encuentran orientados siguiendo la dirección de foliación y estos estarían definiendo los dominios de microlitones. La roca presenta una foliación espaciada difusa (Figura 10) con una textura principal lepidogranoblástica y su paragénesis es cuarzo+actinolita+estilpnomelana+rutilo.

Cuarzo: Cristales incoloros subhedrales a anhedrales con colores de interferencia grises de primer orden, estos cristales están orientados siguiendo la foliación formando listones de tamaño

Petrografía y Geoquímica del Grupo Villa de Cura

de grano grueso y otros tamaño de grano fino, también forman algunos agregados poliminerálicos en forma lenticular. Algunos cristales de cuarzo presentan extinción ondulante y bordes rectos evidenciando que la roca sufrió un evento de deformación.

Estilpnomelana: Agregados minerales con relieve medio de color café poco pleocroico con colores de interferencia amarillos y azules de segundo orden. Altera a óxidos de hierro.

Actinolita: Cristales aciculares subhedrales a anhedrales de relieve alto, color verde poco pleocróicos, con colores de interferencia amarillos y naranjas de segundo orden.

Rutilo: Cristales euhedrales a subhedrales cuadrados o aciculares de color negro rojizo no pleocróicos con relieve alto, sus colores de interferencia son enmascarados por el color del mineral. Se encuentran en la roca de manera aleatoria, cerca de las bandas de óxido de hierro.

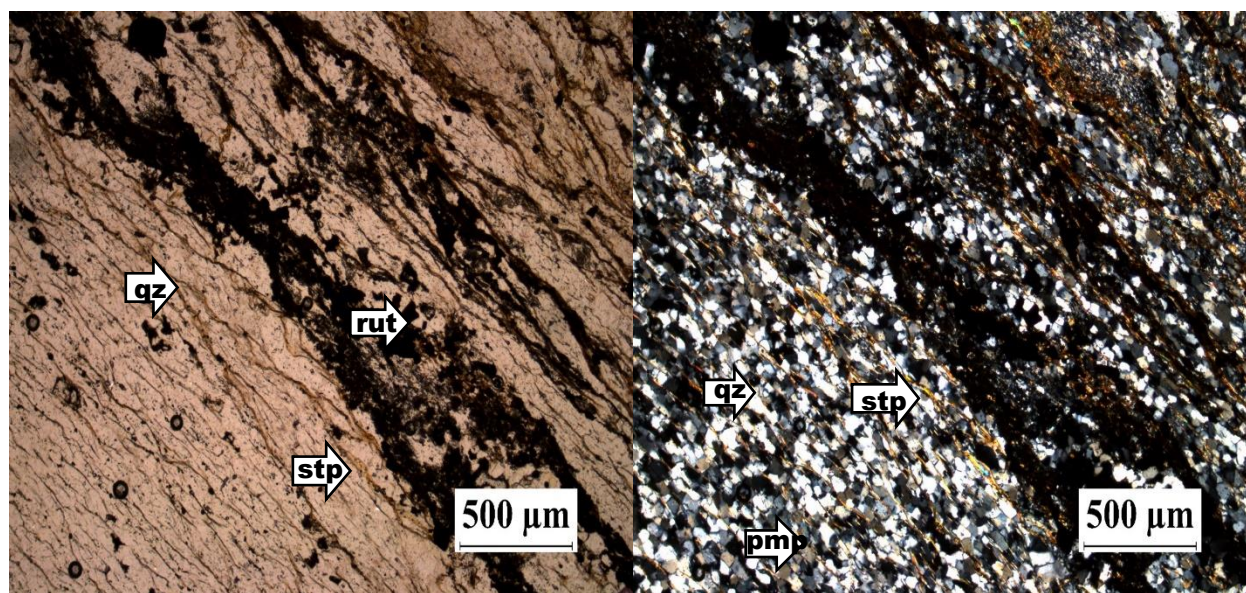


Figura 10. Microfotografías PPL (izquierda) PPX (derecha), donde se observa la orientación preferente de la estilpnomelana (mineral que define la foliación de la roca) y del cuarzo.

10.2 Formación El Carmen

Esta roca presenta cuatro litotipos diferentes como esquistos, metalavas y cuarcitas que son característicos por la presencia de minerales como piroxeno (augita-diópsido), pumpellyita, fengita, lawsonita, anfíboles cálcicos (actinolita), sódicos (glaucofana) y sódico cálcicos (barroisita-winchita).

10.2.1 Esquistos con Fengita y Lawsonita.

Estos esquistos se caracterizan por presentar un bandeamiento composicional definido por bandas oscuras de fengita cloritizada y bandas claras de cuarzo, plagioclasas y carbonatos, donde este bandeamiento también corresponde a la foliación de la roca. Además entre este bandeamiento se observan unas estructuras lenticulares alargados formados por carbonatos y cuarzo (Figura 11).

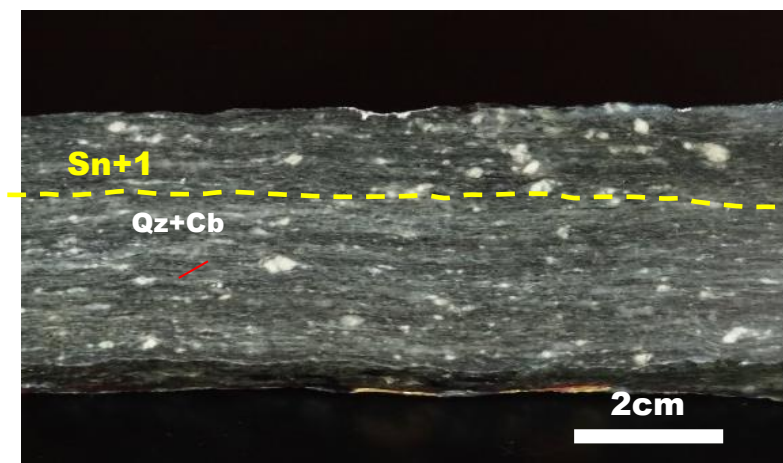


Figura 11. Muestra HPV-28A esquistos con fengita y lawsonita, esta roca presenta una foliación que localmente se encuentra microplegada, también tiene estructuras lenticulares constituidas de cuarzo+carbonatos.

Microscópicamente presenta una orientación preferente dada por los dominios de clivaje de textura lepidoblástica que están constituidos por fengita-clorita donde se encuentran embebidos

Petrografía y Geoquímica del Grupo Villa de Cura

unos cristales de lawsonita, los dominios de microlitones con textura granoblástica están constituidos por bandas de cuarzo orientado siguiendo la dirección de la foliación y en estructuras lenticulares compuestas por carbonatos y cuarzo, estas estructuras están siendo rodeadas por los dominios de clivaje (Figura 12). La roca tiene una textura granolepidoblástica y su paragénesis es cuarzo+fengita+clorita+lawsonita+plagioclasa+carbonatos.

Fengita: Agregados minerales hojosos incoloros de relieve medio y colores de interferencia amarillos y azules del tercer orden, extinción característica de ojo de pájaro. Este mineral define la foliación (S_{n+1}) (Figura 12). La distribución de la fengita en la roca es homogénea.

Clorita: Agregados minerales hojosos verdes pleocroicos de relieve medio-alto, con colores de interferencia grises azulosos a amarillos de primero orden.

Cuarzo: cristales de bajo relieve incoloro con colores de interferencia grises de primer orden y se presentan en la roca como cristales orientados, desarrollando algunas estructuras en listones y como agregados mono y poliminerálicos en forma lenticular. Los cristales muestran algunas evidencias de deformación como bordes rectos, desarrollo de subgranos y extinción ondulante.

Carbonatos: cristales incoloros de bajo relieve con su exfoliación característica a $60-120^\circ$ y macla de colores de interferencia anómalos que se encuentran como agregados poliminerálicos junto al cuarzo, formando estructuras lenticulares rodeadas de las micas

Lawsonita: cristales rectangulares incoloros de alto relieve de con un tamaño aproximado de 0,1 a 0,3 mm de largo, con colores de interferencia amarillos, naranjas y fucsias de primer orden. La mayoría de estos cristales están orientados en la dirección de la foliación de la roca y se encuentran embebidos en el dominio de clivaje.

Plagioclasa: cristales incoloros con relieve bajo con colores de interferencia grises a negros de primer orden, con macla polisintética se presentan en la roca como porfidoblastos de 0.1 a 0.4 mm de largo, estos cristales son pre-tectónicos y están altamente sericitizados.

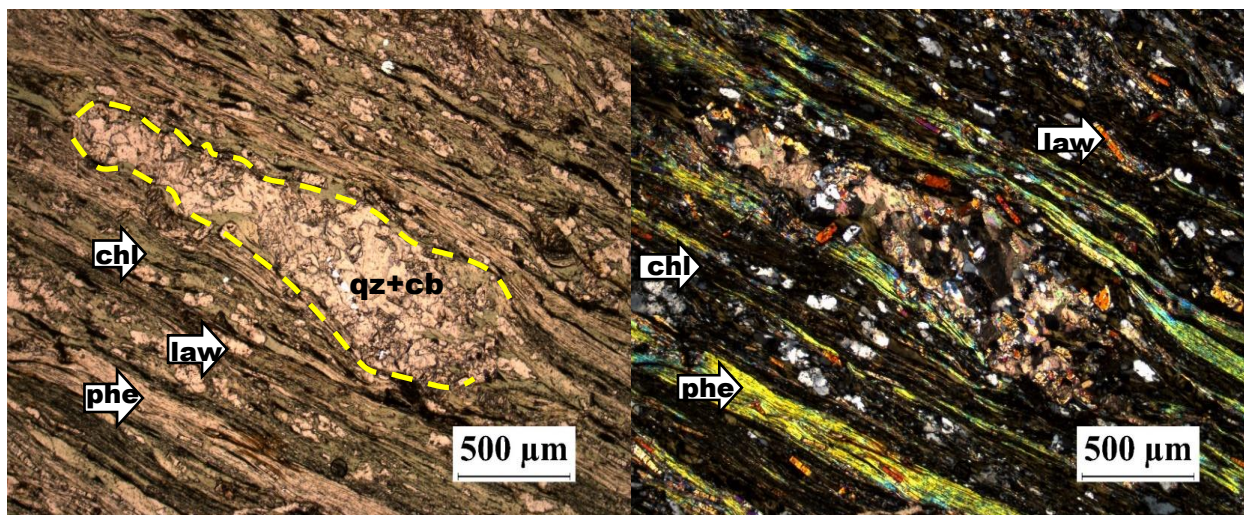


Figura 12. Microfotografías PPL (izquierda) PPX (derecha) de la muestra HPV-28A donde se observa una estructura lenticular compuesta de cuarzo+carbonato que se encuentra rodeada por los minerales que definen la foliación de la roca (fengita y clorita).

10.2.2 Cuarcita con clorita.

Estos esquistos son de color gris oscuro que presentan un tipo de bandeo composicional poco definido donde se pueden diferenciar zonas oscuras constituidas por clorita+opacos y zonas claras de cuarzo+plagioclasa (Figura 13).

Microscópicamente la roca presenta una foliación difusa (Sn+1) dada por la clorita donde este mineral conforma los dominios de clivaje con textura lepidoblástica y define la foliación de la roca. Algunos cristales de cuarzo siguen la foliación pero en su mayoría esta no es muy clara, en algunas zonas se forman unos agregados policristalinos de cuarzo y plagioclasa con inclusiones de actinolita formando los dominios de microlitones con una textura nematogranoblástica, pero en general la roca tiene una textura lepidogranoblástica (Figura 14).

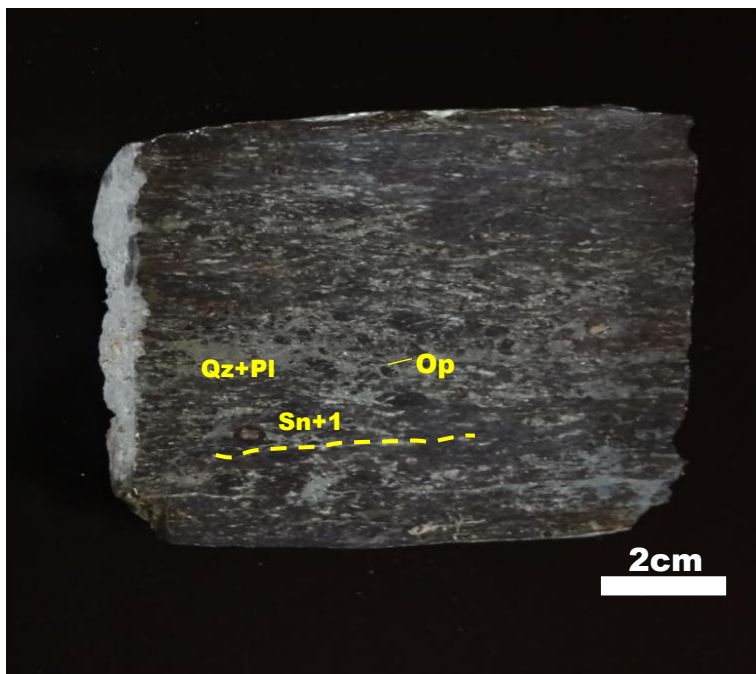


Figura 13. Muestra HPV-28B cuarcita con foliación difusa dada por la clorita.

Cuarzo: Cristales incoloros de bajo relieve con colores de interferencia grises de primer orden, se encuentran en la roca como agregados poliminerálicos junto a las plagioclasas. Los cristales son anhedrales con extinción ondulante, crecimiento de subgranos y en algunas ocasiones bordes de cristales rectos.

Minerales opacos: Cristales de color negro, de formas tabulares alargadas de tamaño fino (0.2 mm de largo), de manera general estos cristales tienen una orientación preferente que coincide con la dirección de la foliación. Hacen parte de toda la roca y generalmente se encuentran en los agregados minerales junto al cuarzo y la plagioclasa.

Clorita: Agregados minerales ojerosos de color verde pálido a pardo, pleocroico, con colores de interferencia grises azulosos a amarillos de primer orden. El tamaño de los cristales es muy fino (0.05mm de largo) se encuentran orientados marcando la foliación de la roca (Figura 14).

Petrografía y Geoquímica del Grupo Villa de Cura

Plagioclasa: Cristales incoloros anhedrales con colores de interferencia grises de primer orden, presenta macla polisintética y se encuentra asociado al cuarzo formando agregados polimineralicos en la roca.

Actinolita: Cristales subhedrales a anhedrales color verde claro, de alto relieve y con colores de interferencia amarillos y naranjas de segundo orden. Este mineral se encuentra como inclusiones en los cuarzos.

Rutilo: Cristales euhedrales a subhedrales cuadrados o aciculares de color pardo rojizo no pleocróicos con relieve muy alto, sus colores de interferencia son enmascarados por el color del mineral.

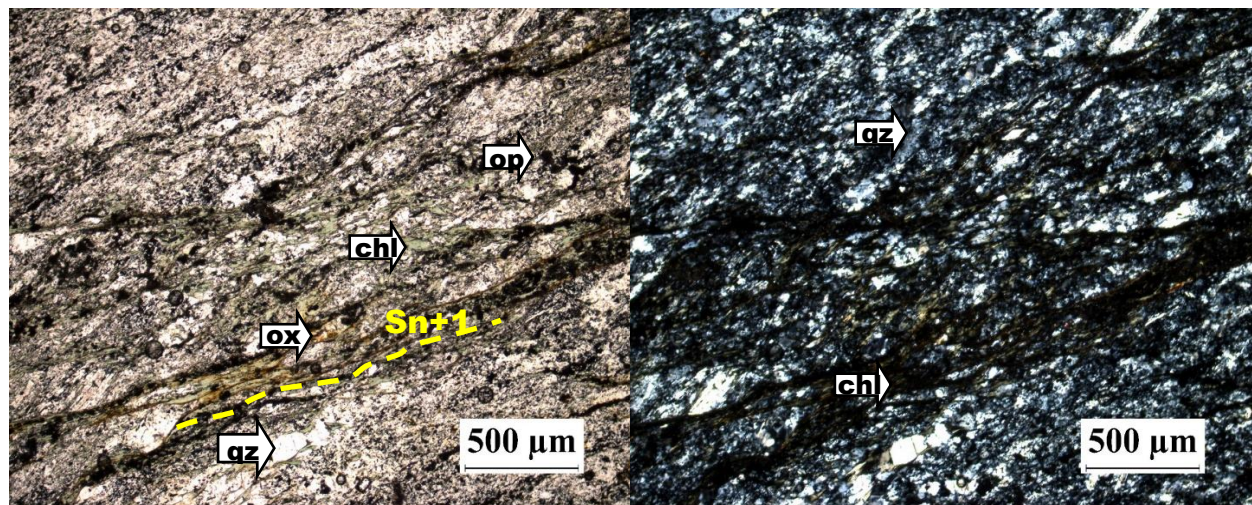


Figura 14. Microfotografías en PPI (izquierda) y PPX (derecha) de la muestra HPV-28B donde se observa la foliación discontinua de la roca definida por la clorita.

10.2.3 Metalava con piroxenos.

Roca de color gris oscura masiva con cristales grandes de piroxeno de color verde oscuro (0.2-0.8mm de ancho) en una matriz que presenta una textura de flujo definida por cristales de pumpellyita, anfíboles y clorita (Figura 15).

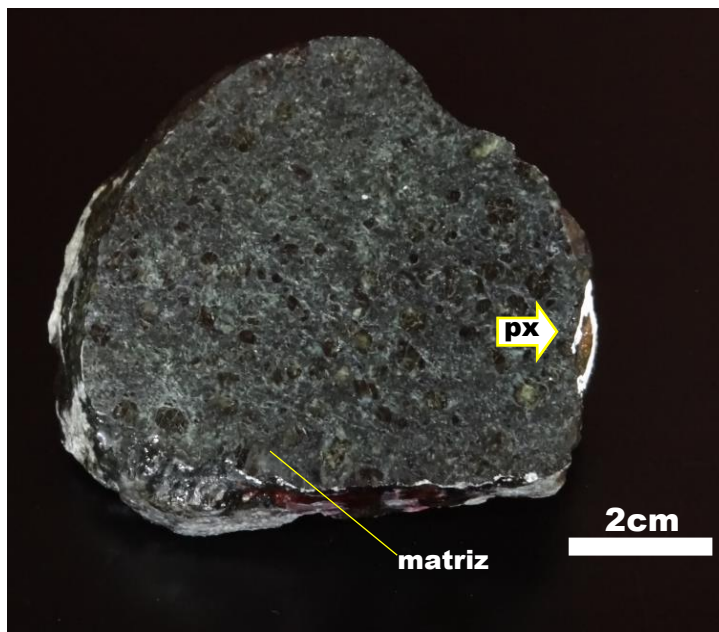


Figura 15. Muestra HPV-28C, metalava con textura de flujo compuesta por porfidoblastos de piroxeno (diópsido-augita) en una matriz de pumpellyita-actinolita.

Microscópicamente se observa en la roca una textura de flujo (traquitica) definida por actinolita, pumpellyita y clorita, esta textura corresponde en la roca al dominio de clivaje el cual define la foliación de la roca, además la roca está compuesta por grandes porfidoblastos de piroxeno (augita-diópsido) los cuales según su relación estructural con los minerales que definen la foliación son pretectónicos y otros porfidoblastos de anfíboles (actinolita-hornblenda) sintectónicos. Los porfidoblastos de piroxeno presentan un cambio mineralógico hacia los bordes que pasan a ser anfíboles como glaucofana, barroisita y winchita. A anfíboles (glaucofana, winchita y barroisita) (Figura 16).

Pumpellyita: Cristales de forma acicular, color verde claro pleocroico y colores de interferencia amarillos del primer orden y naranja, fucsia y azul del segundo orden. Este mineral se presenta principalmente siguiendo una dirección preferencial la cual define la foliación de la roca.

Petrografía y Geoquímica del Grupo Villa de Cura

Clorita: Agregados minerales de color verde pálido, pleocroico, con colores de interferencia grises azulosos a amarillos de primer orden. El tamaño de los cristales es muy fino (0.05mm de largo) se encuentran orientados marcando la foliación de la roca.

Actinolita: Cristales euhedrales a subhedrales color verde claro, de alto relieve y con colores de interferencia amarillos y naranjas de segundo orden. Este mineral hace parte de la matriz de la roca y como inclusiones en los cuarzos.

Diópsido: Cristales (0.8-8 mm de largo) subhedrales a anhedrales de alto relieve incoloros, con colores de interferencia naranjas y azules de segundo orden, exfoliación a 90°, algunos presentan zonación o macla simple. En los bordes se observa una alteración a anfíboles Na-Ca y Na.

Augita: Cristales (0.2-0.8 mm de largo) subhedrales a anhedrales con alto relieve, presenta colores de interferencia amarillos de primer orden, exfoliación a 90° muy clara, en algunos cristales se observa zonación o macla simple. La mayoría...

Cuarzo: Cristales (0.4 mm de largo) anhedrales incoloros, bajo relieve, con colores de interferencia grises del primer orden, extinción normal. Estos cristales presentan inclusiones de actinolita.

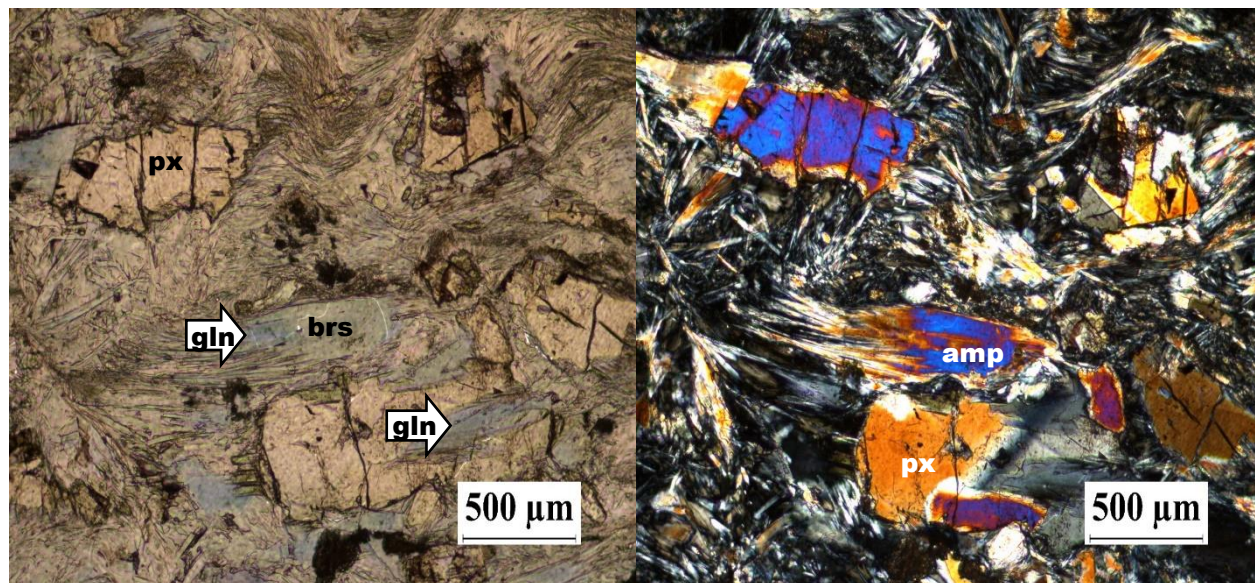


Figura 16. Microfotografía en PPL (izquierda) y PPX (derecha) de la muestra HPV-28C donde se observan porfidobláastos de piroxeno alterando glaucofana y/o barrosita en una matriz compuesta por actinolita y pumpellyita.

10.2.4 Esquistos con Lawsonita

Estos esquistos tienen un color gris oscuro y presenta un bandeamiento composicional con bandas oscuras constituidas por clorita y bandas claras constituidas principalmente por cuarzo y carbonatos donde estos representan la foliación definida como S_{n+1} que localmente encuentra microplegada. También se observan unos lentes de color blanco compuestos por dominios de carbonatos y cuarzo (Figura 17).

Microscópicamente se observa una orientación preferente de los minerales está dada por el dominio de clivaje el cual está conformado por la clorita. El cuarzo y los carbonatos conforman estructuras lenticulares alargadas en la dirección de la foliación y la lawsonita está embebida en la clorita y tiene la misma orientación que esta (Figura 18). Los dominios de microlitones estas

Petrografía y Geoquímica del Grupo Villa de Cura

constituidos por cuarzo, plagioclasa y carbonatos principalmente. Con lo anterior se determina que la textura general de la roca es granolepidoblástica.

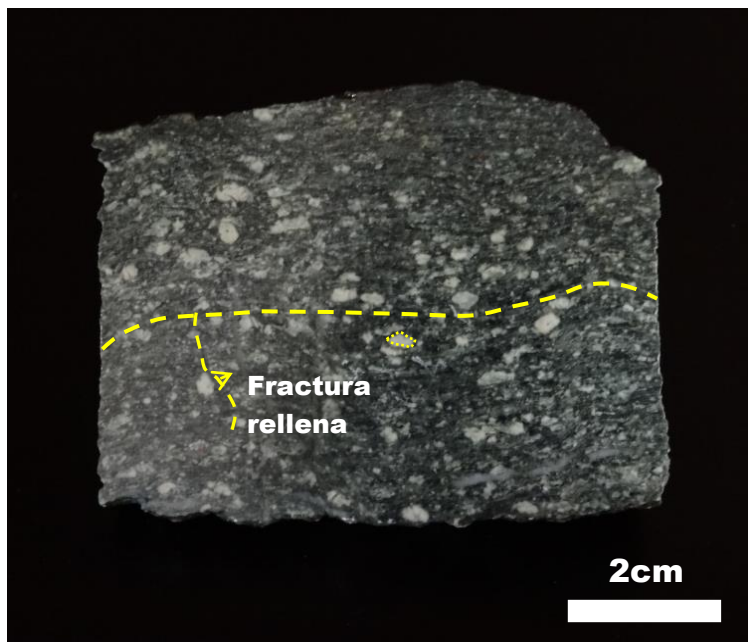


Figura 17. Muestra HPV-28D esquistos con lawsonita, la roca presenta una foliación principal (S_{n+1}), donde se observan estructuras lenticulares de cuarzo y carbonatos, también se observan algunas venillas de carbonatos cortando la foliación.

Cuarzo: Cristales subhedrales a anhedrales incoloros de bajo relieve, con colores de interferencia grises del primer orden, presenta extinción normal, ondulante y en algunos cristales se observa intercrecimiento de granos. En algunos sectores los cuarzoes forman una estructura alargada en forma de listón donde los cristales son de forma rectangular con bordes rectos. También forman agregados poliminerálicos de forma lenticular y están orientados en la misma dirección de la foliación.

Petrografía y Geoquímica del Grupo Villa de Cura

Clorita: Agregados minerales hojosos de color verde oliva tenue bastante pleocroico, con colores de interferencia grises azulosos a amarillos de primer orden. Este mineral define el dominio de clivaje de la roca.

Lawsonita: Cristales rectangulares incoloros de alto relieve de con un tamaño aproximado de 0,01 a 0,1 mm de largo, con colores de interferencia amarillos, naranjas y fucsias de primer orden. La mayoría de estos cristales están orientados en la dirección de la foliación de la roca y se encuentran embebidos en el dominio de clivaje.

Carbonatos: Cristales anhedrales incoloros de bajo relieve con su exfoliación característica a 60-120° con colores de interferencia anómalos (rosa-celeste-blanco) que se encuentran como agregados poliminerálicos junto al cuarzo, formando estructuras lenticulares.

Fengita: Agregados minerales hojosos incoloros de relieve medio y colores de interferencia amarillos y azules del tercer orden, extinción característica de ojo de pájaro. Este mineral define la foliación (S_{n+1}) junto a la clorita.

Opacos: Cristales subhedrales a anhedrales de alto relieve de forma alargada, estos minerales en general siguen la foliación de la roca. Se encuentran homogéneamente en la roca.

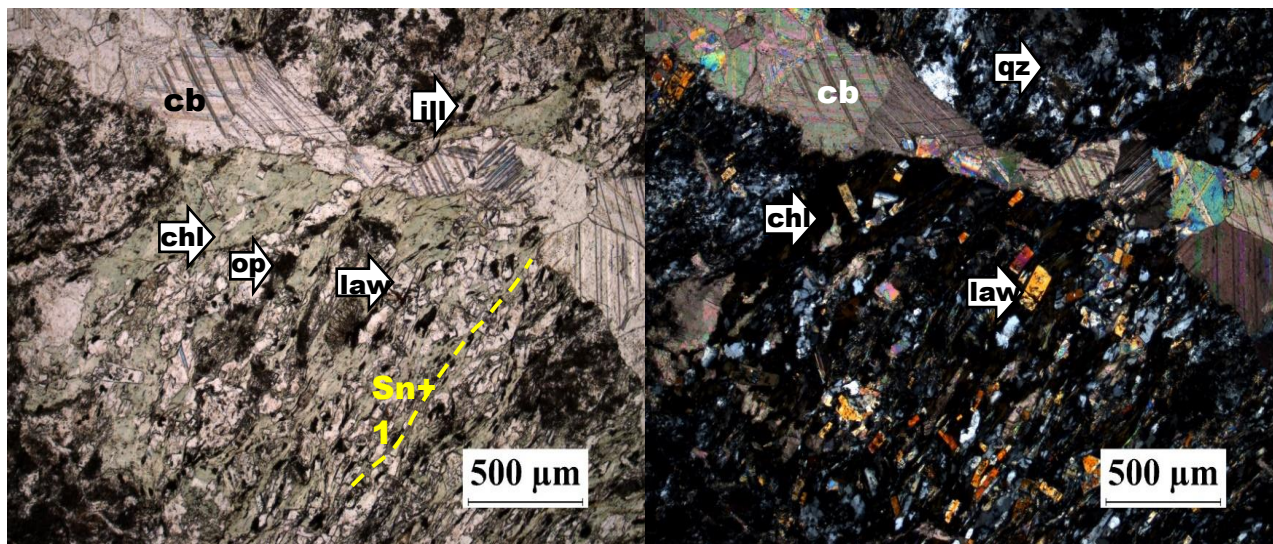


Figura 18. Microfotografías en PPL (izquierda) y PPX (derecha) de la muestra HPV-28D en las que se observan una venilla de carbonatos que cortan la foliación de la roca que está definida por la clorita en la que se encuentran embebidos cristales de lawsonita.

10.3 Formación El Chino y El Caño

Esta roca presenta un litotipo que es característico por ser metatobas con una matriz rica en anfíboles diferentes que son característicos por la presencia de minerales como pumpellyita, fengita, lawsonita, anfíboles sódicos (glaucofana) y sódico cálcicos (barroisita-winchita).

10.3.1 Metatobas anfibólicas

El color de estos esquistos presenta un bandeamiento composicional con bandas oscuras compuestas por anfíboles y bandas claras constituidas por cuarzo y carbonatos y bandas oscuras compuestas principalmente por anfíboles y pumpellyita con tamaño de grano muy fino. La roca muestra gran evidencia de deformación pues está bastante plegada (Figura 19), en la parte superior de las rocas se encuentran unas estructuras de lavas almohadilladas lo que sugiere que estas rocas fueron originadas por actividad volcánica submarina.

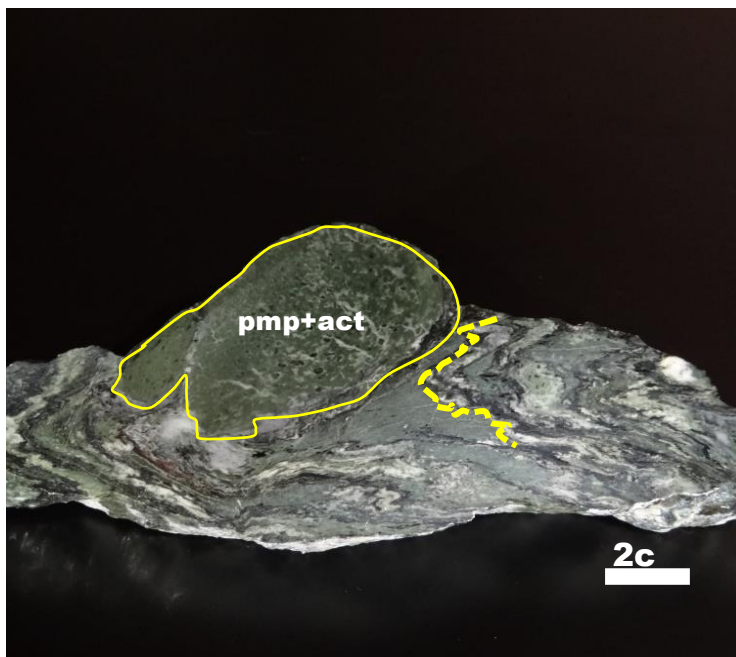


Figura 19. Muestra HPV-29 metatoba anfibólica plegada con una zona rica en pumpellyita y actinolita.

Microscópicamente la roca presenta plegamiento de bandas de cuarzo carbonatos y pumpellyita+actinolita (Figura 20a, 20b), localmente la roca no se encuentra plegada y se puede observar la foliación de la roca definida por la orientación de los anfíboles, por lo que la textura de la roca es granonematoblástica (Figura 20c, 20d)

Cuarzo: Cristales anhedrales incoloros de bajo relieve con colores de interferencia grises de primer orden. En su mayoría estos cristales hacen parte de la matriz y son de tamaño muy fino y unos pocos se presentan como fenocristales de tamaño 0,2 a 0,5 mm de ancho, estos cristales presentan extinción ondulante. En algunas zonas se encuentran como agregados poliminerálicos junto a carbonatos.

Anfibol: Cristales aciculares de tamaño muy fino de color verde pálido de alto relieve y colores de interferencia naranja del segundo orden, se encuentran conformando la matriz de la

Petrografía y Geoquímica del Grupo Villa de Cura

roca y en algunas zonas se forman fenocristales que se encuentran zonados, con centros de hornblenda y bordes de actinolita (Figura 20c).

Pumpellyita: Cristales aciculares subhedrales de color pardo verdoso muy pleocroicos, de relieve medio, presenta colores de interferencia azules y naranjas de segundo ordenm estos se encuentran conformando la matriz de la roca junto al cuarzo y los anfíboles.

Carbonatos: Cristales anhedrales de 0,5 a 1 mm de largo, incoloros de bajo relieve con colores de interferencia anómalos. Se encuentran conformando agregados poliminerálicos en la roca junto al cuarzo formando un tipo de bandas que se intercalan con las zonas enriquecidas en anfíboles y pumpellyita (Figura 20a, 20b).

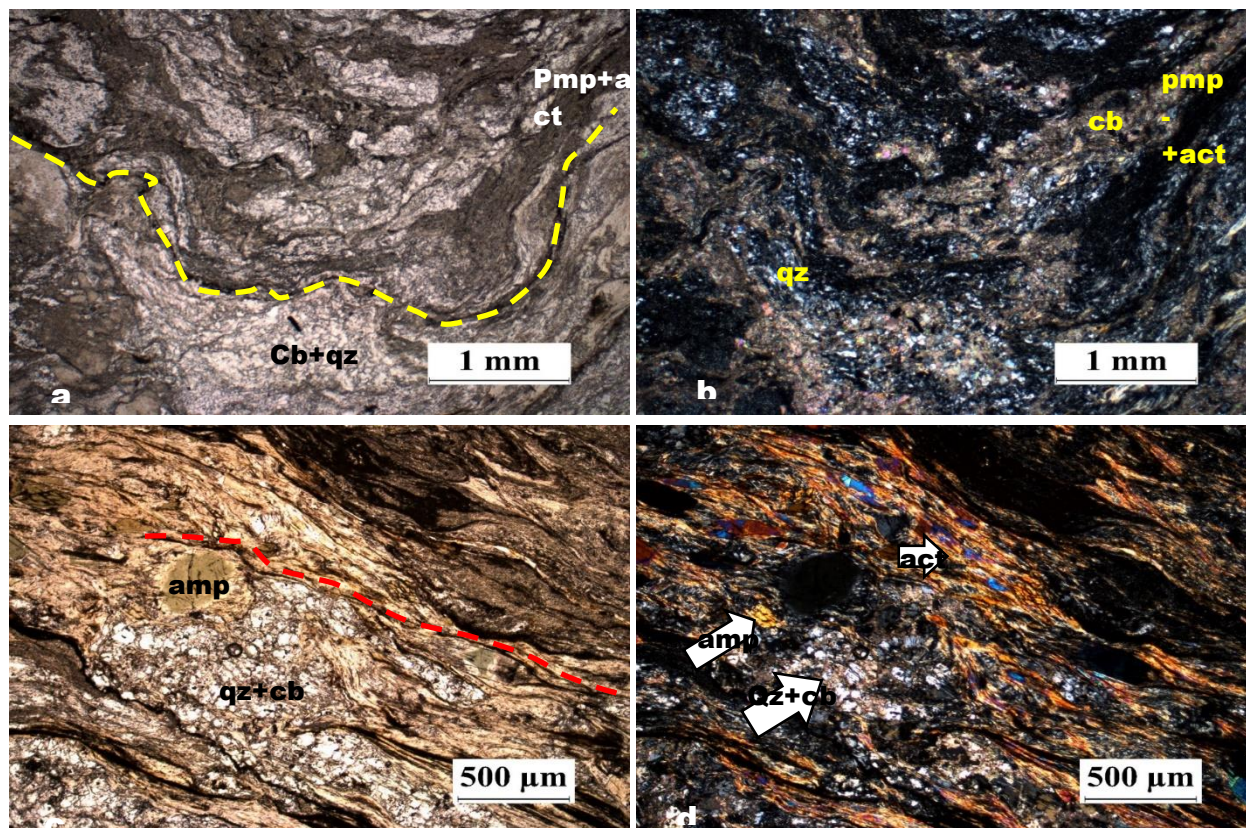


Figura 20. Microfotografías de la muestra HPV-29. En **a)** (PPL) y **b)** (PPX) se observa que la roca presenta localmente crenulación y en las fotografías **c)** (PPL) y **d)** (PPX) se observa que la roca presenta una foliación definida por los anfíboles.

11 Química mineral

La química mineral se realizó en la microsonda electrónica Superprobe JEOL JXA-8230 con tres espectrómetros WDS perteneciente al Laboratorio de caracterización litológica del Departamento de Geociencias de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá. Las condiciones establecidas para la medición fueron: aceleración de voltaje 15kV; 20nA de corriente del haz; diámetro del haz entre 1 μm - 10 μm ; tiempo de medida de cada elemento de 30 s para el pico y de 15 s para el fondo. Las correcciones se realizaron a partir del método ZAF.

Para este trabajo se analizaron las muestras HPV-27B, HPV-28C y HPV-29C y las fases analizadas fueron: anfíbol, fengita, clorita y clinopiroxeno, donde los datos representativos se pueden ver en el apéndice a.

11.1 Anfíboles.

Para la clasificación de anfíboles se utilizó la hoja de cálculo de Excel según las recomendaciones del IMA 2012 (Locock, 2014) y los resultados fueron clasificados en los grupos de anfíboles Ca, Na-Ca, y Na, cayendo en los campos de actinolita y hornblenda para anfíboles Ca (Figura 22), winchita, barroisita para anfíboles Na-Ca (Figura 23) y glaucofana para anfíboles Na (figura 24).

En la Muestra HPV-27B se observan cristales subhedrales a anhedrales con formas rectangulares y rómbicas que presentan zonaciones composicionales donde los cristales pasan de tener en su núcleo glaucofana a winchita en el borde o de ser winchita en el núcleo a ser

Petrografía y Geoquímica del Grupo Villa de Cura

actinolita en el borde (Figura 21a,21b). Estos cristales se encuentran junto a unos cristales de plagioclasa, cuarzo y epidota. Según los diagramas de Locock (2014) los anfíboles de esta muestra se clasifican como tremolita (anfíbol Ca), winchita (anfíbol Na-Ca) y glaucofana (anfíbol Na).

En la muestra HPV-28C los anfíboles son causa de la transformación metamórfica de los piroxenos, ya que los piroxenos se encuentran alteándose en sus bordes a anfíboles Na y Na-Ca principalmente (Figura 21c) y se encuentran en una matriz rica en actinolita (anfíbol Ca) (Figura 21d).

Según los diagramas de Locock (2014) los anfíboles de esta muestra se clasifican como tremolita (anfíbol Ca), winchita, barroisita (anfíboles Na-Ca) y glaucofana (anfíbol Na).

En la muestra HPV-29C los cristales de anfíboles analizados corresponden a cristales con una zonación composicional donde estos presentan una alteración de los bordes hacia el núcleo donde cambian de ferri-hornblenda en el núcleo a actinolita en los bordes (Figura 21e) por lo que se realizó una línea composicional para determinar la variación composicional en el borde y el núcleo del cristal donde se observa que hacia el borde hay un empobrecimiento en Na y Fe y un enriquecimiento en Ca y Mg contrario a lo que pasa en el núcleo del cristal donde hay un empobrecimiento en Ca y Mg y un enriquecimiento en Na y Fe lo que puede mostrar un aumento de temperatura en el sistema (Figura 27). Además se analizaron algunos anfíboles que hacen parte de la matriz de la roca, clasificándose como actinolitas que corresponde al grupo de los anfíboles Ca (Figura 21f).

Según los diagramas de Locock (2014) los anfíboles que constituyen esta roca corresponden a tremolita, manesi-hornblenda y tschermakita todos anfíboles Ca.

Petrografía y Geoquímica del Grupo Villa de Cura

Se realizaron dos mapas composicionales en anfíboles en las muestras HPV-27B (Figura 25) y HPV-29C (Figura 26), donde en la primera muestra se observan unas variaciones composicionales de Ca, Na, Al, Fe y Mg (Figura 25) y en la segunda muestra se observan variaciones composicionales de Na, Ca y Mg (Figura 26).

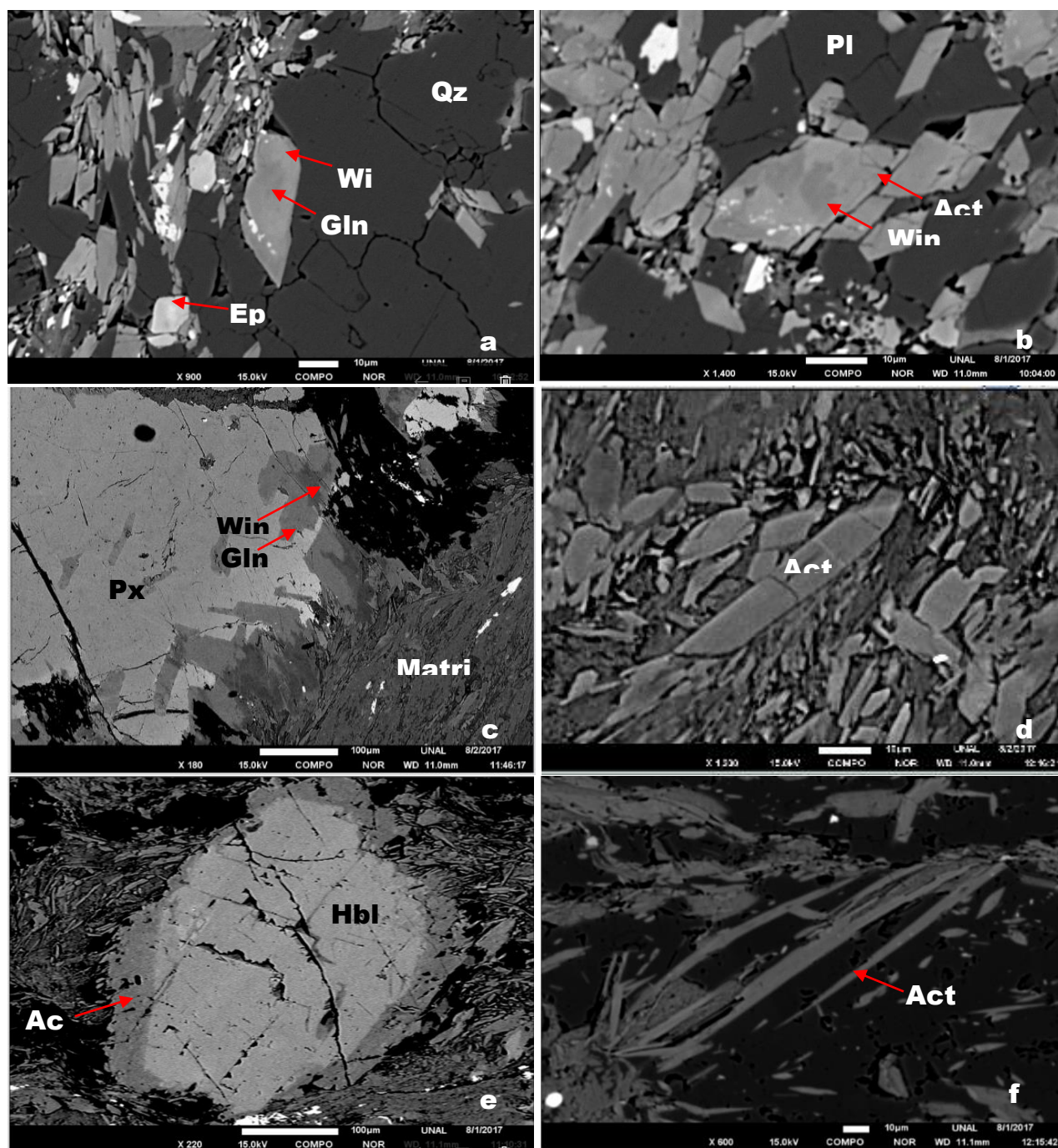


Figura 21. Imágenes BSE. **a) y b)** corresponden a la muestra HPV-27B, **c) y d)** corresponden a la muestra HPV-28C, **e) y f)** corresponden a la muestra HPV-29C.

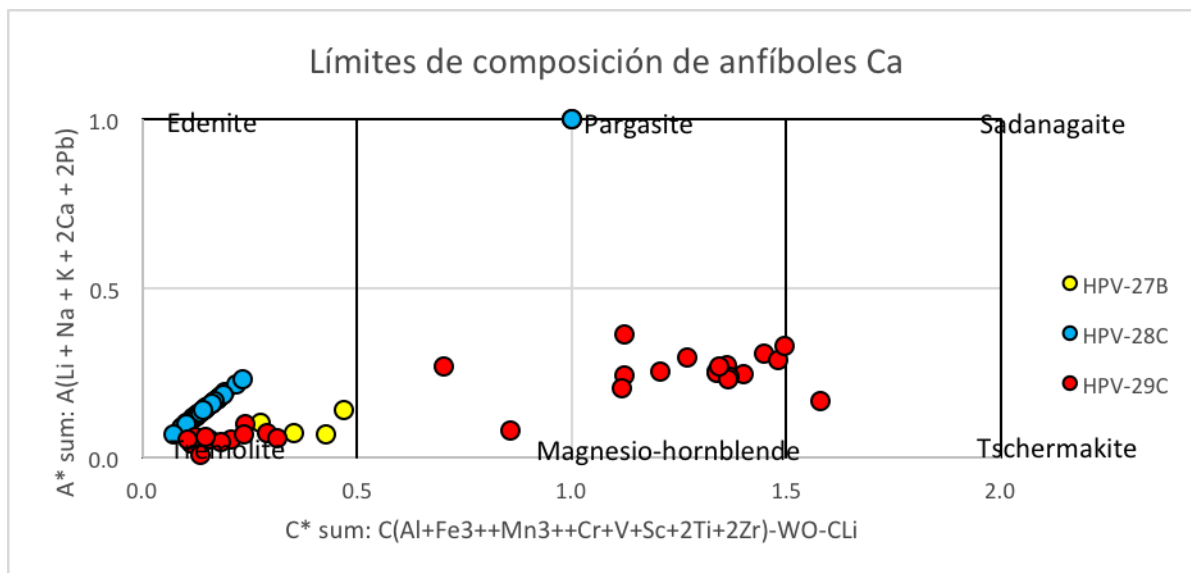


Figura 22. Diagrama para la clasificación de anfíboles Ca (Locock, 2014). En este diagrama podemos ver que las tres muestras analizadas presentan este tipo de anfíboles donde HPV-27B de la Formación Santa Isabel y HPV-28C de la Formación El Carmen solo tienen anfíboles que caen en el campo de la actinolita y HPV-29C de la Formación El Caño y El Chino tiene anfíboles que caen en los campos de tremolita- manesi-hornblenda y tchermakita.

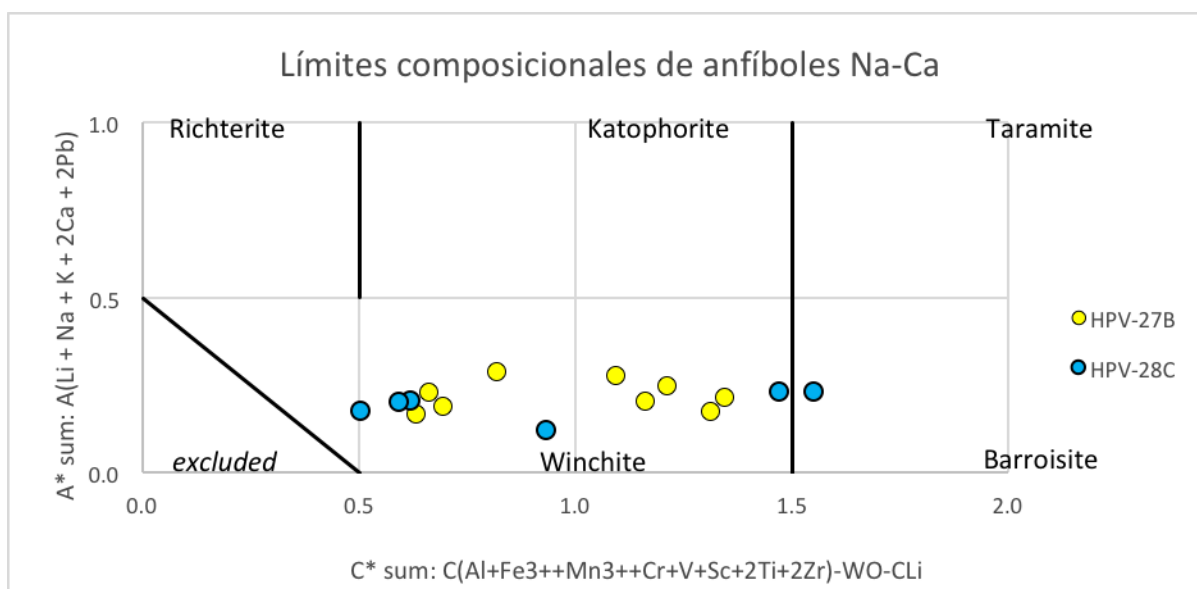


Figura 23. Diagrama para la clasificación de anfíboles Na-Ca (Locock, 2014). Donde los anfíboles analizados en las muestras HPV-27B que corresponde a la Formación Santa Isabel y HPV-28C de la Formación el Carmen caen en los campos de winchita y barroisita.

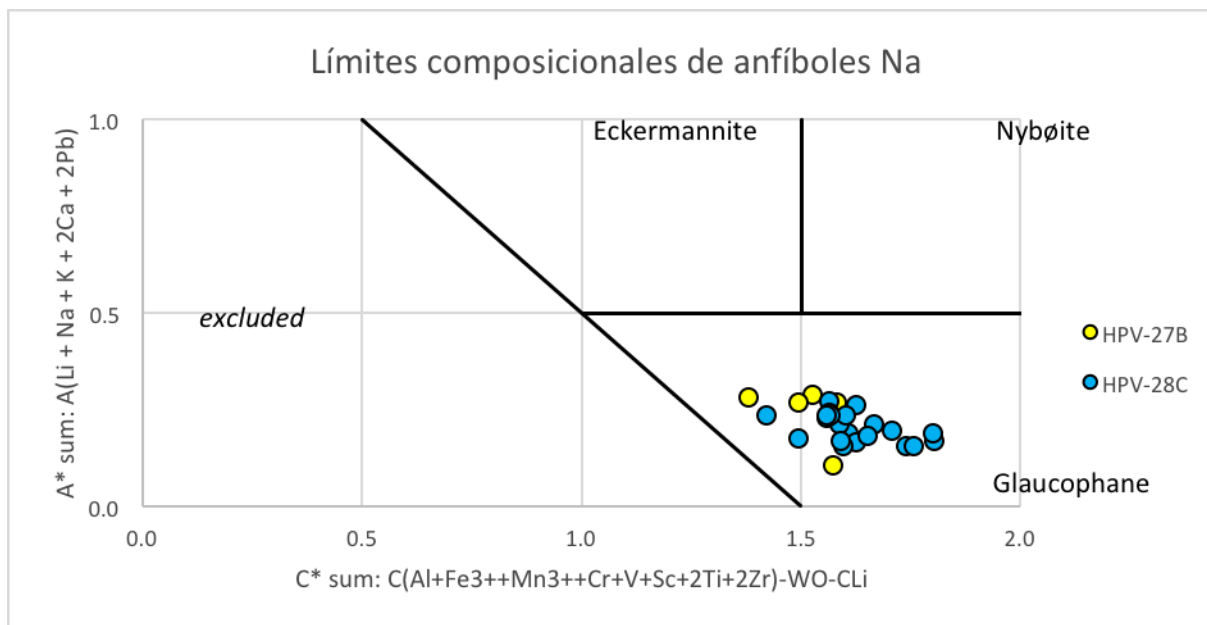


Figura 24. Diagrama para la clasificación de anfíboles Na (Locock, 2014). Donde los anfíboles analizados en las muestras HPV-27B de la Formación Santa Isabel y HPV-28C de la Formación El Carmen caen en el campo de la glaucofana.

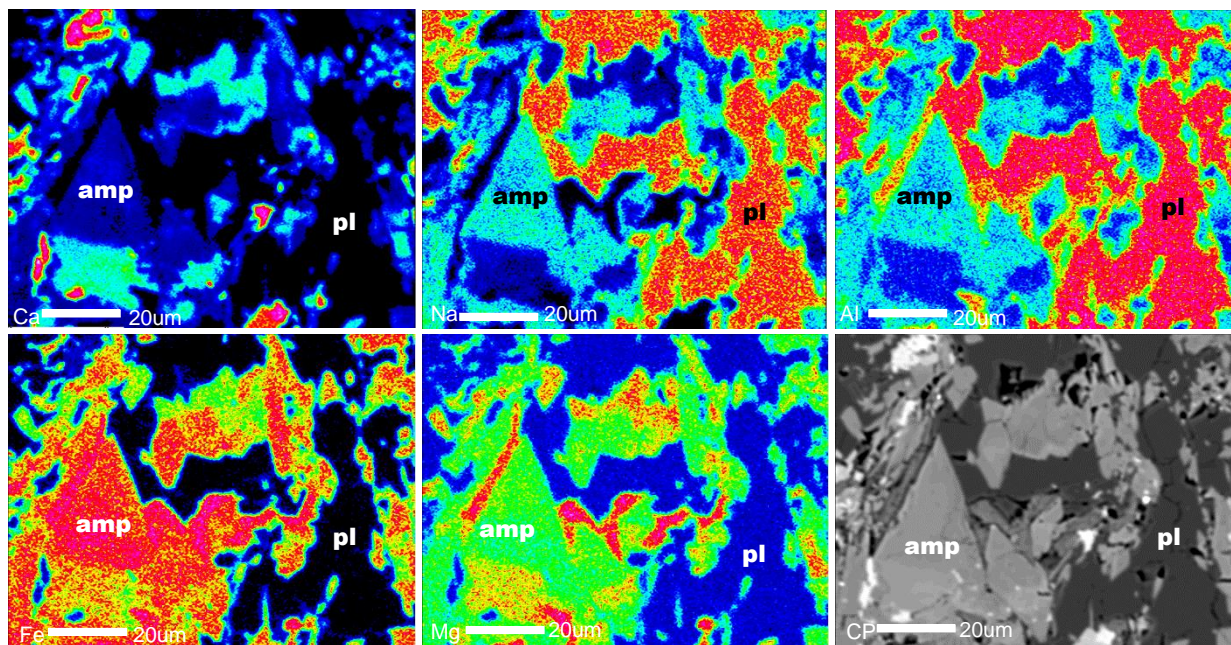


Figura 25. Mapas composicionales anfíboles y plagioclasas de la muestra HPV-27B esquistos con anfíbol y fengita de la Formación Santa Isabel.

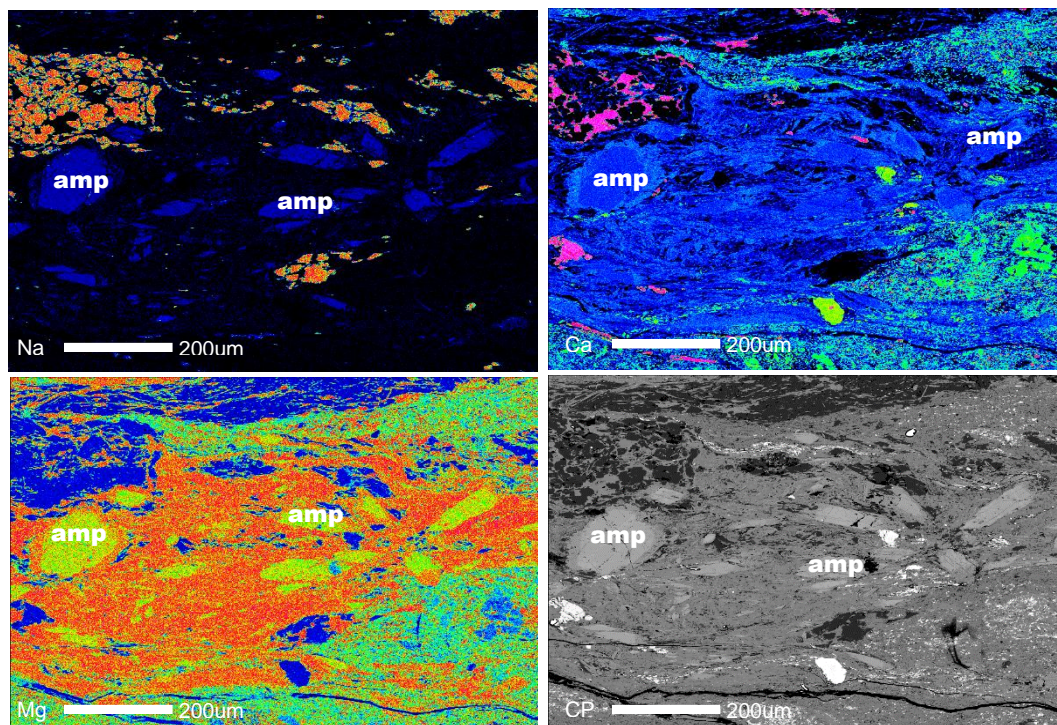


Figura 26. Mapas composicionales de anfíboles presentes en la muestra HPV-29C, metatoba anfibólica de la Formación El Caño y El Chino.

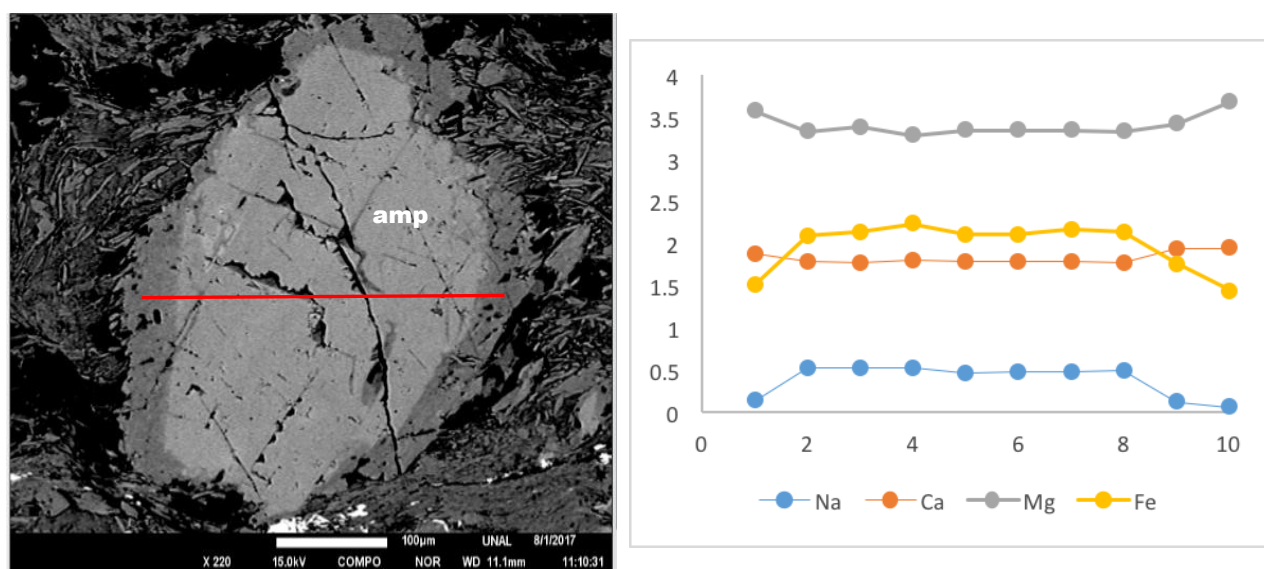


Figura 27. Imagen BSE y perfil composicional de anfíbol correspondiente a la muestra HPV-29C, metatoba anfibólica de la Formación El Caño y El Chino.

11.2 Fengita

La fengita es una mica blanca que se caracteriza porque tiene un contenido alto de sílice. Los análisis realizados para este mineral se hicieron en la muestra HPV-27B. La fengita se encuentra como agregados minerales con una orientación preferente que define la foliación de la roca.

Para la clasificación de las fengitas se usó el diagrama de (Miyashiro, 1973), basado en el origen metamórfico donde clasificaron fengitas de alta presión baja temperatura ya que están en la zona de la glaucofana (Figura 28).

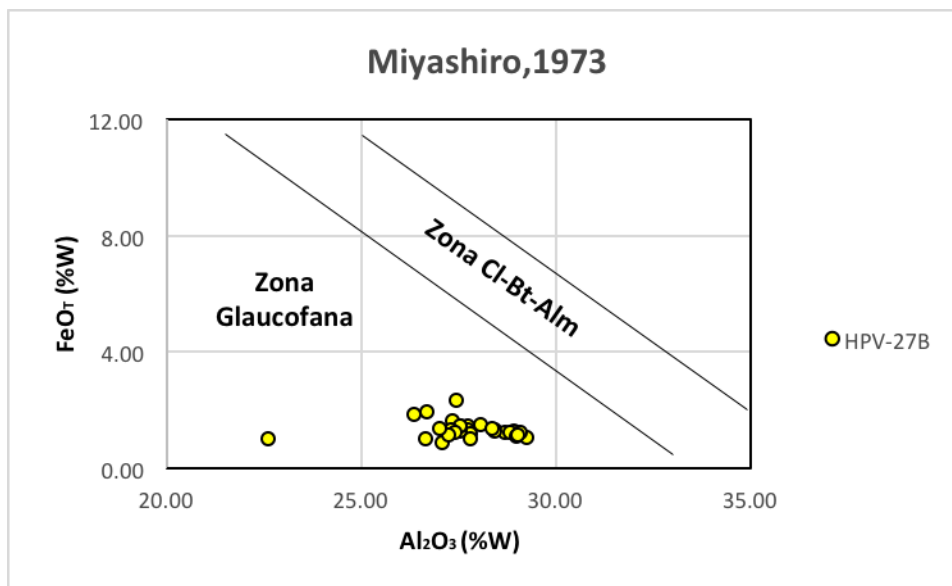


Figura 28. Diagrama de clasificación de micas blancas basado en el origen metamórfico, donde se pueden diferenciar fengitas de alta presión-baja temperatura, las cuales ocurren en el campo que corresponde a la Zona de Glaucofana. Miyashiro (1973). De Cloritas analizadas de la muestra HPV-27B, esquisto con anfíbol y fengita de la Formación Santa Isabel.

11.3 Clorita.

Los análisis de clorita se hicieron en la muestra HPV-27B donde este mineral se encuentran como agregados minerales hojosos con una orientación preferente y define la foliación de la roca junto a la fengita.

Se usó el diagrama de Hey (1954) para la clasificación de las cloritas analizadas, donde éstas cayeron en los campo de ripidolita y pycnoclorita (Figura 29).

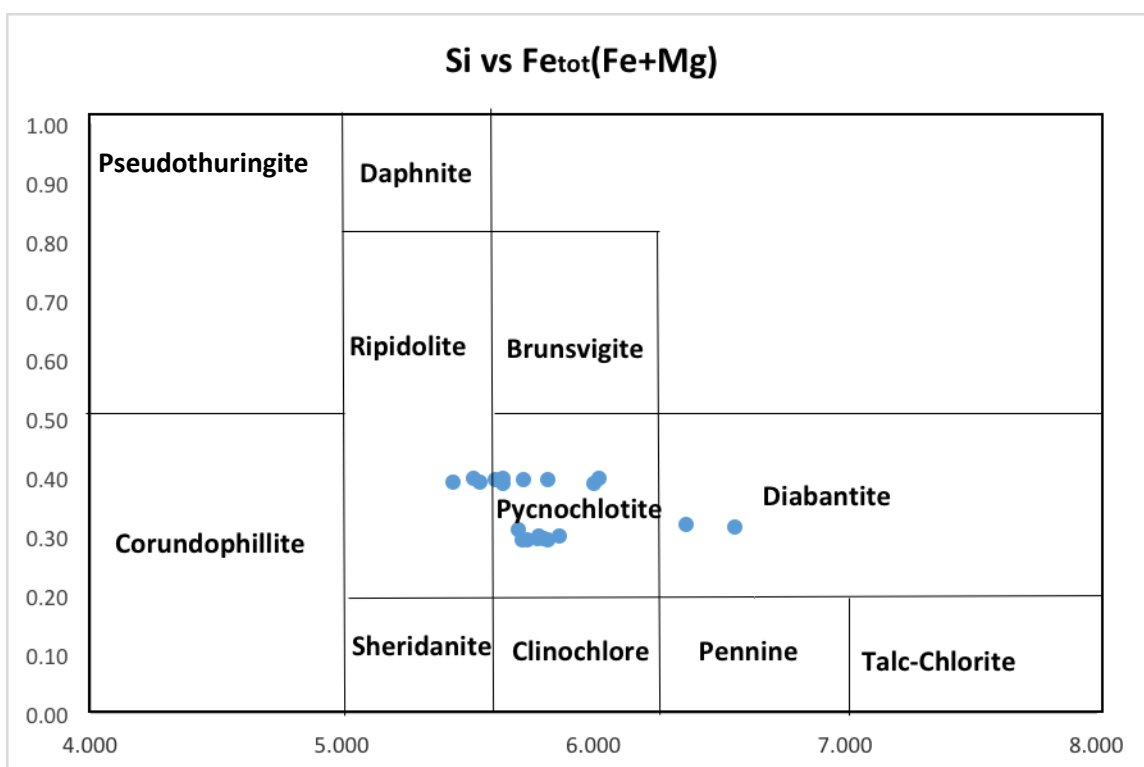


Figura 29. Composición química de cloritas donde se diferencian cloritas de la muestra HPV-27B, esquistos con anfíbol y fengita de la Formación Santa Isabel según Hey (1954).

11.4 Piroxeno

Los análisis de piroxenos se realizaron en la muestra HPV-28C que corresponde a una metalava piroxénica. Se realizaron mapas composicionales a un piroxeno con zonación oscilatoria evidenciada por la alternancia en zonas enriquecidas y empobrecidas en Fe y Mg (núcleo pobres en Fe y con alto contenido de Mg), interpretados en el hierro con azules que varían en la intensidad del color donde las partes más claras muestran un enriquecimiento en el elemento y en el mapa de magnesio la variación se observa en el cambio de color rojo a amarillo, donde el rojo muestra enriquecimiento y el amarillo empobrecimiento. Igual para el Ca y Na se determinó que la concentración tiende a ser homogénea (Figura 30).

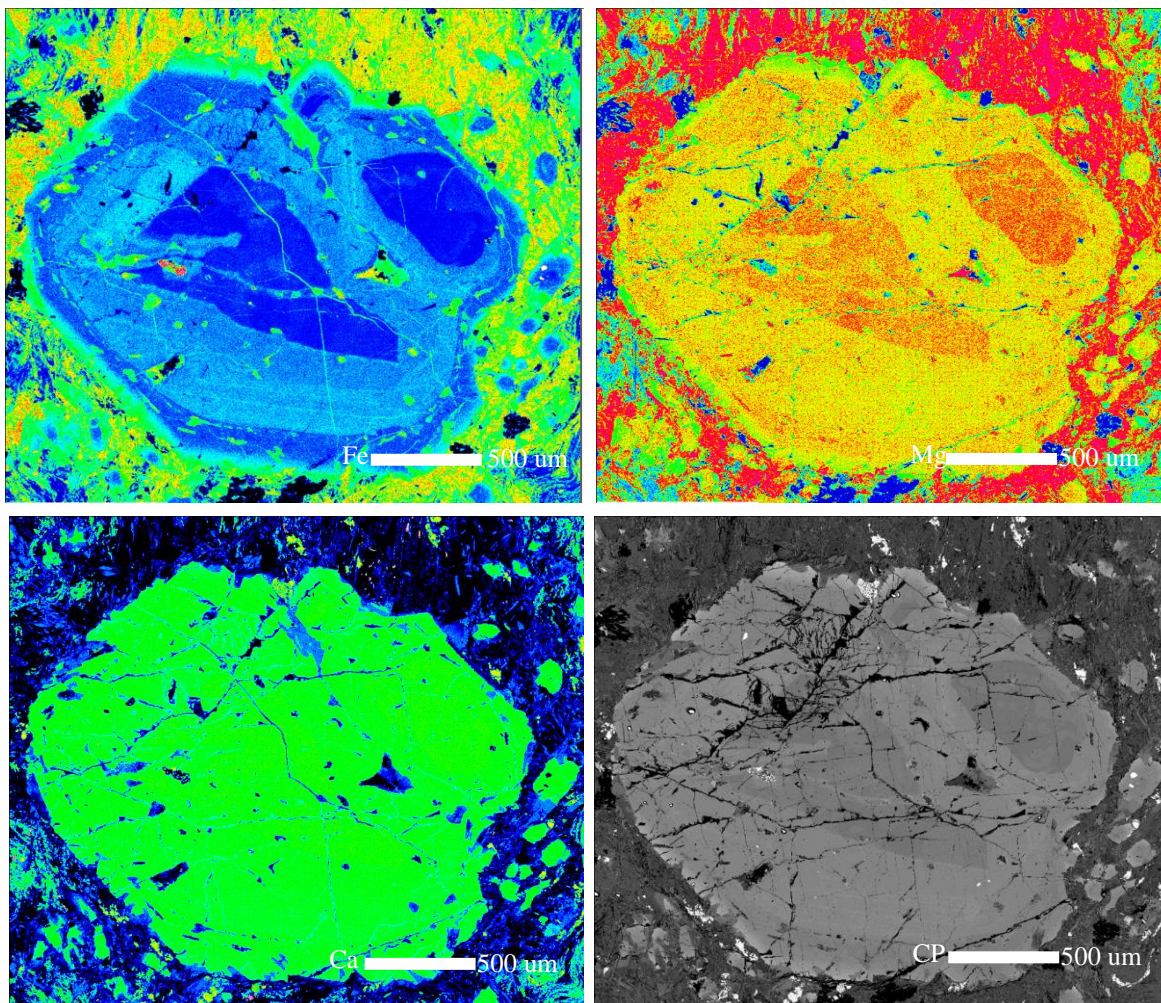


Figura 30. Mapa composicional de un piroxeno de la muestra HPV-28C, metalava con piroxeno de la Formación El Carmen, donde los elementos analizados son Fe, Mg y Ca.

12 Geoquímica

Los análisis geoquímicos se realizaron en las muestras HPV-27A (esquisto con pumpelliya de la Formación Santa Isabel), HPV-27B (esquisto anfibólico-fengítico, de la Formación Santa Isabel), HPV-28C (metalava piroxénica de la Formación El Carmen) y HPV-29E (metatoba anfibólica de la Formación El Caño y El Chino), estos datos se pueden observar en la Tabla 1. Estas rocas son clasificadas como metabasitas que según los diagramas de discriminación

Petrografía y Geoquímica del Grupo Villa de Cura

tectónica (Pearce & Cann, 1973) y son clasificadas como toleitas de arcos de islas (HPV-27B y HPV-28C) y basaltos calco-alcalinos (HPV-27A y HPV-29E) (Figura 31).

En el diagrama multielemento NMORB se observa que las firmas de las rocas analizadas son muy similares y en la zona derecha del gráfico muestra una composición muy cercana a la del MORB (Figura 32). Se observan algunas anomalías negativas en Rubidio, Torio, Niobio y Circonio, donde la anomalía de niobio indica un ambiente de subducción, además se observa un enriquecimiento en plomo.

En el diagrama multielemento de REE para condrito (Figura 33) se puede observar un leve enriquecimiento en los HREE respecto a los LREE. En los LREE se observan unas pequeñas anomalías en Disprosio (negativa), Erblio (negativa) y Tulio (positiva).

De acuerdo con lo anterior y las características encontradas y junto a la distribución de elementos traza se puede sugerir que estas litologías fueron desarrolladas en un ambiente de arco.

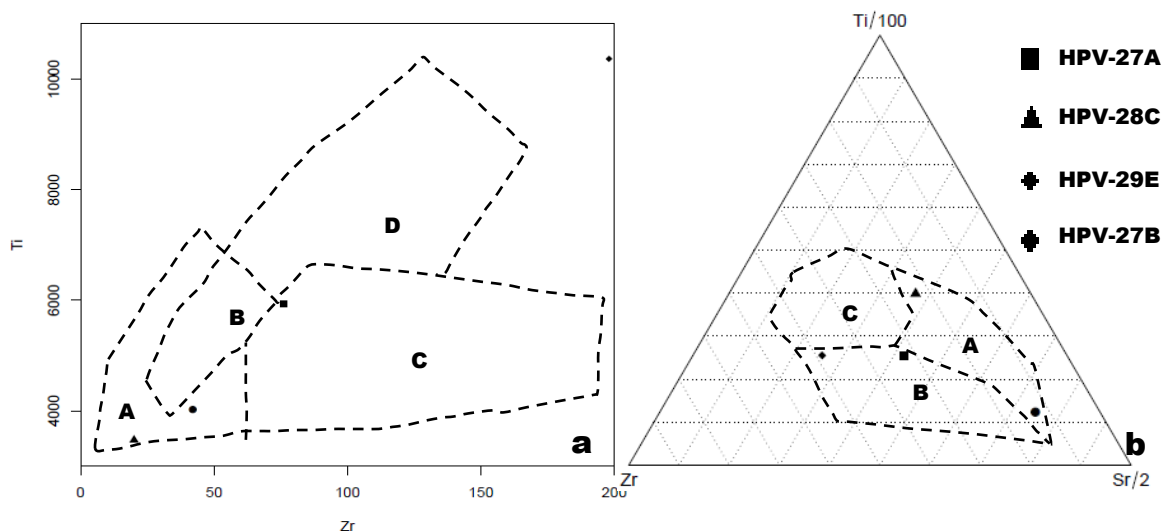


Figura 31. Diagramas de discriminación tectónica de las metabasitas del Grupo Villa de Cura de (Pearce & Cann, 1973). **a)** Diagrama para la discriminación de basaltos a partir de las variaciones de Ti-Zr que se divide en varios campos: A, toleitas de arco de islas; B, basaltos calco-alcalinos, toleitas de arco de islas y MORB; C, basaltos calco-alcalinos; D, MORB. **b)** Diagrama de discriminación para basaltos donde los campos son: A, toleitas de arco de islas; B, basaltos calco-alcalinos y C, MORB.

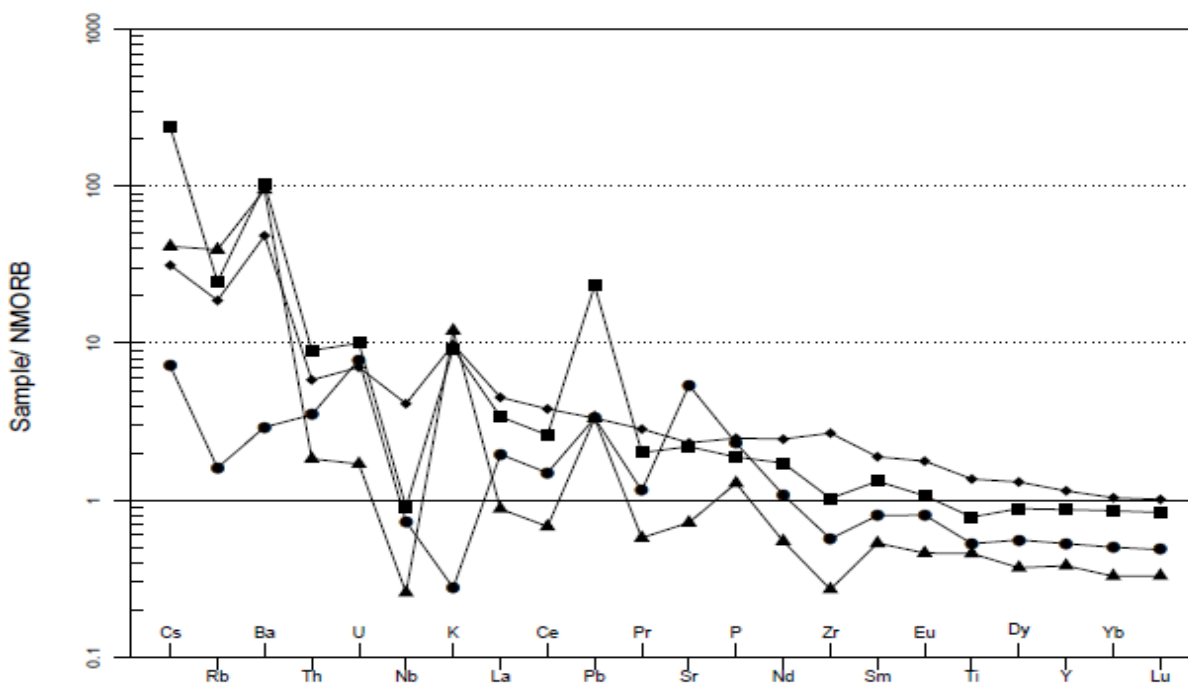


Figura 32. Diagrama araña multi-elemento NMORB en metabasitas del Grupo Villa de Cura de (Sun & McDonough, 1989). Los símbolos son iguales a los de la Figura 31.

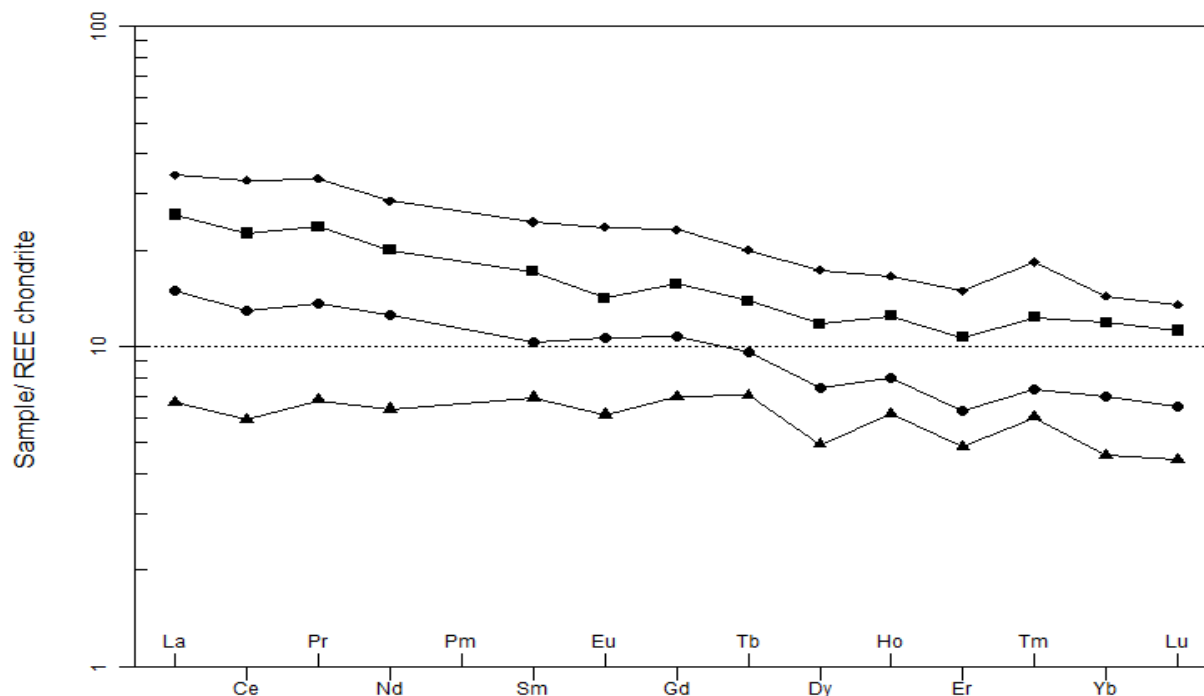


Figura 33. Diagrama araña multi-elemento REE Chondrite en metabasitas del Grupo Villa de Cura de (Nakamura, 1974). Símbolos iguales a los de la Figura 31.

Tabla 1

Datos de geoquímica de las rocas que constituyen el Grupo Villa de Cura.

Muestra	HPV-27A	HPV-27B	HPV-28C	HPV-29E
Litología	Esquisto con pumpellyita	Esquisto con anfíbol y fengita	Metalava con piroxeno	Metatoba anfibólica
SiO ₂	52,3	49,1	45,3	43,1
TiO ₂	0,99	1,73	0,58	0,67
Al ₂ O ₃	16,05	14,4	12	10,65
FeO	11	8,1	10,7	11,4
MnO	0,18	0,22	0,16	0,17
MgO	4,27	5,63	10,9	12,35
CaO	5,58	9,16	13	12,5
Na ₂ O	5,03	4,04	1,25	0,55
K ₂ O	0,67	0,71	0,87	0,02
P ₂ O ₅	0,22	0,29	0,15	0,27
LOI	4,2	5,84	3,77	7,28
Cr ₂ O ₃	0,01	0,04	0,06	0,09

Petrografía y Geoquímica del Grupo Villa de Cura

Total	100,58	99,31	98,8	99,08
Mo	<1	<1	<1	<1
Ni	17	182	138	211
Zn	103	75	62	91
Cu	141	47	117	114
As	<5	<5	6	<5
Cd	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
Ag	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
Tl	<10	<10	<10	<10
Ga	20,1	20,7	13,8	15,4
Sc	27	27	55	39
V	325	238	346	311
W	1	1	2	2
Co	30	43	49	52
Cs	1,66	0,22	0,29	0,05
Ba	651	305	598	18,4
Rb	13,8	10,5	22,1	0,9
Sn	1	2	<1	1
Th	1,08	0,7	0,22	0,42
Nb	2,1	9,6	0,6	1,7
Ta	0,2	0,5	0,1	0,2
Sr	197,5	209	64,8	486
Zr	76	198	20	42
Hf	2,2	4,5	0,7	1,3
Y	24,4	32,1	10,7	14,8
Pb	7	<2	<2	<2
U	0,47	0,33	0,08	0,37
La	8,5	11,3	2,2	4,9
Ce	19,5	28,6	5,1	11,2
Pr	2,65	3,75	0,76	1,52
Nd	12,6	17,9	4	7,9
Sm	3,47	4,97	1,4	2,1
Eu	1,09	1,81	0,47	0,82
Gd	4,33	6,39	1,92	2,95
Tb	0,65	0,94	0,33	0,45
Dy	4,02	5,94	1,69	2,54
Ho	0,87	1,16	0,43	0,56
Er	2,4	3,35	1,09	1,41
Tm	0,37	0,55	0,18	0,22
Yb	2,61	3,16	1	1,53
Lu	0,38	0,46	0,15	0,22
Cr	30	270	430	700

13 Condiciones de metamorfismo

La presencia de minerales como pumpellyita, lawsonita, glaucofana, winchita, barroisita, epidota, fengita, clorita y estilpnomelana indica que las rocas del Grupo Villa de Cura han sufrido un metamorfismo de bajo grado, además estos minerales en forma combinada son indicadores de condiciones metamórficas de alta presión-baja temperatura.

Hay asociaciones mineralógicas que son estables a ciertas presiones y temperaturas en estos tipos de roca como por ejemplo la asociación de pumpellyita+actinolita es estable a presiones del orden de 10Kb y temperaturas superiores a 200°C (Hinrichsen & Schurmann, 1969), la lawsonita en presencia de cuarzo y una fase fluida es estable a presiones superiores a los 3Kb y temperaturas inferiores a los 300-40°C (Nitsch, 1968), la glaucofana requiere presiones superiores a los 4Kb (Maresch, 1977), la barroisita y winchita requiere de presiones parecidas a las de la glaucofana pero mayores temperaturas (Ernst, 1979).

A partir de los datos obtenidos de la composición de los anfíboles se pudieron determinar las presiones a las cuales estos minerales se formaron a partir del diagrama Na (B)–Al IV (Figura 34) donde las líneas de presión del diagrama usado están basadas en la figura 10 de (Brown, 1977).

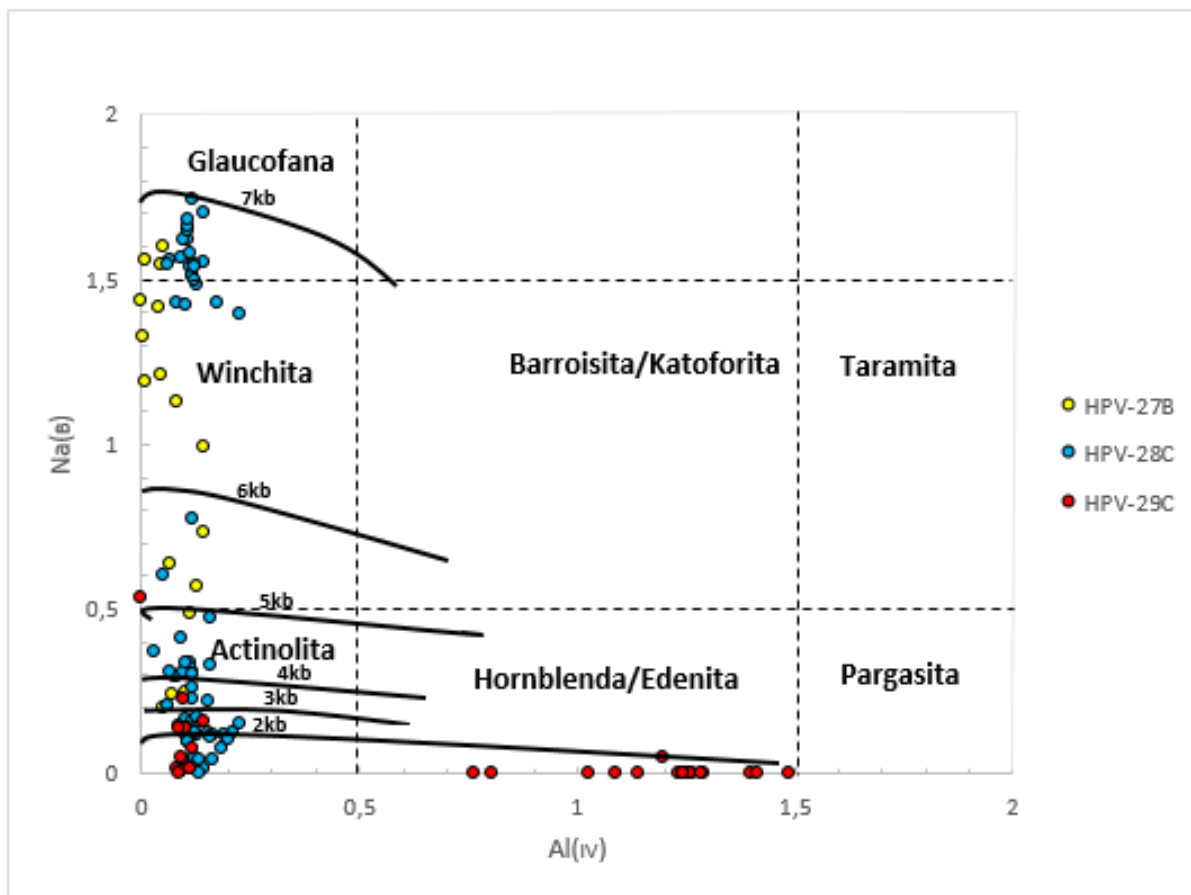


Figura 34. Diagrama de Na(B)-AlIV de composiciones representativas de anfíboles. Editado de (Tsai, Iizuka, & Ernst, 2013).

Las muestras que se usaron para el análisis de estos anfíboles son las HPV-27B, HPV-28C y HPV-29C en las que se determinaron las presiones a las que fueron sometidas estas rocas (Figura 34).

En el diagrama se observa que las muestras analizadas fueron afectadas por presiones desde 2Kb hasta 7Kb, debido al metamorfismo retrogrado que han sufrido estas rocas ya que la variabilidad de anfíboles se debe a que los anfíboles de alta presión como la glaucofana están cambiando a minerales que se forman a menores presiones como la barroisita y la actinolita, en el caso de la muestra HPV-29C la mayoría de los minerales son minerales de presiones menores como la actinolita y la hornblenda donde se observa una zonación en algunos anfíboles con hornblenda en el núcleo y actinolita a los bordes.

Petrografía y Geoquímica del Grupo Villa de Cura

A partir de lo anterior puede ser trazada una trayectoria hipotética seguida durante el proceso que dio lugar a estas rocas (Figura 35).

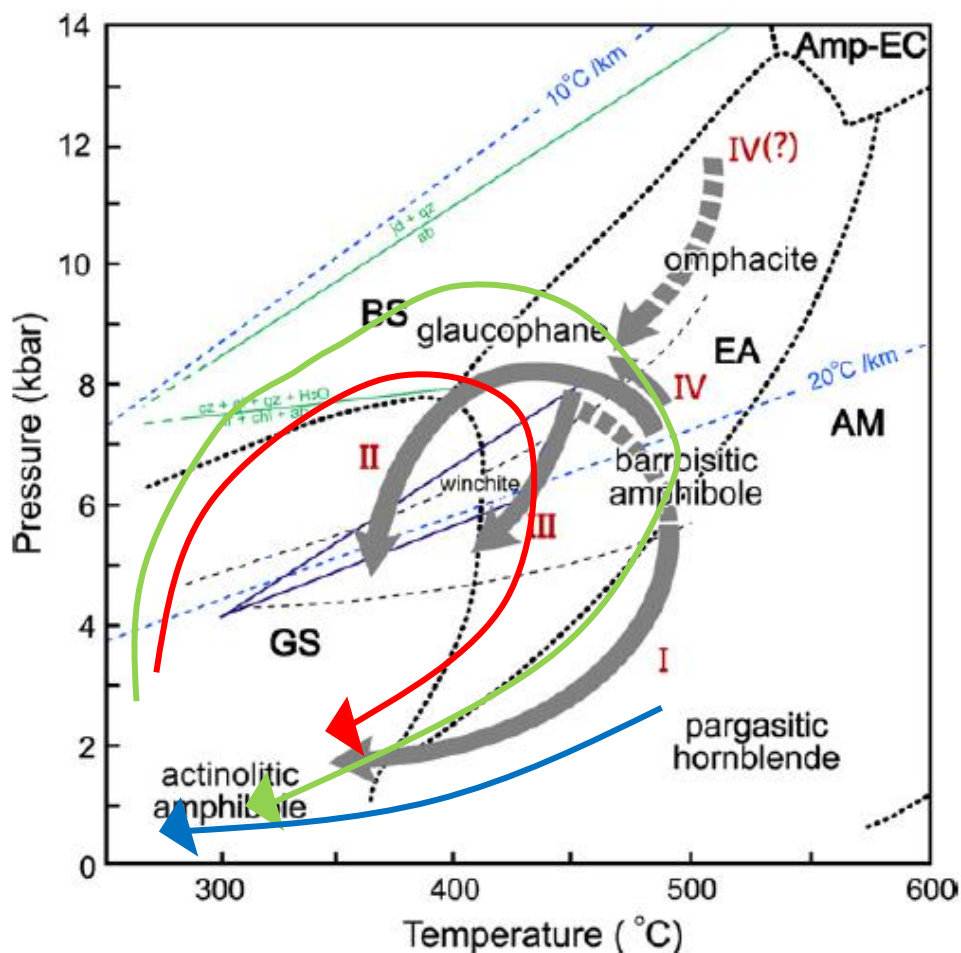


Figura 35. Trayectorias de presión y temperatura para las rocas del Grupo Villa de Cura, donde la trayectoria roja corresponde a la muestra HPB-27B de la Formación Santa Isabel. Modificado de Tsai & Ernst (2013).

14 Discusión y conclusiones

Para el Grupo Villa de Cura en la Serranía del interior de Venezuela se realizaron análisis petrográficos, geoquímicos y de química mineral con los cuales se pudieron definir las características petrológicas, composicionales y metamórficas de este grupo.

Petrografía y Geoquímica del Grupo Villa de Cura

A partir de las observaciones petrográficas se determinaron diferencias litológicas y composicionales en las distintas unidades que conforman el Grupo Villa de Cura, donde los cambios se observan de Sur a Norte.

En San Sebastián de Los Reyes (Cambural), estado de Aragua afloran unos esquistos ricos en pumpellyita, glaucofana, epidota y lawsonita con algunos niveles curazo-feldespáticos con estilnomelana que por su paragénesis mineral evidencian un metamorfismo de alta presión, principalmente por la presencia de glaucofana y lawsonita con una foliación bien definida donde localmente se puede observar microplegado.

Entre el Pao de Zarate y San Sebastián, estado de Aragua se observan unas rocas foliadas de color verde que varía de esquistos con fengita y lawsonita, esquistos curazo-feldespáticos a zonas donde hay presencia de metalavas con porfidoblastos de piroxenos pre-tectónicos que se encuentran alterando en sus bordes a anfíboles Na-Ca y anfíboles Na en una matriz rica en actinolita y pumpellyita, esta roca se caracteriza por tener textura de flujo. Por la presencia de glaucofana y actinolita se puede concluir que son rocas correspondientes a esquistos azules o rocas formadas en condiciones de alta presión.

En el Río El Pao, estado de Aragua se observan unas metatobas de grano muy fino ricas en anfíboles muy plegadas, se observan algunos cristales de anfíboles que se están alterando y pasan de hornblenda en el núcleo a actinolita en el borde. Esta zona está definida por Navarro (1983) como la zona de la lawsonita-glaucofana, pero que según los datos obtenidos las muestras obtenidas no hacen parte de esta zona ya que no presentan estos minerales.

Con la química mineral se pudieron determinar la composición de los anfíboles con lo que se lograron clasificar y se pudo observar cual era la variación composicional de estos. Los anfíboles

Petrografía y Geoquímica del Grupo Villa de Cura

de la muestra HPV-29C presentaban una zonación óptica y a partir de datos de química composicional se pudo observar esa variación y se obtuvo que los anfíboles hacia el núcleo eran hornblendas ricas en Na, Fe y en los bordes se enriquecimiento en Ca y Mg. Donde lo anterior se puede interpretar como una disminución en la presión y un aumento de la temperatura.

A partir de los datos de química mineral de lo anfíboles y temperaturas teóricas se pudieron determinar las presiones y temperaturas (teóricas) a las que estos minerales se formaron, dando presiones muy variables, desde 2Kb a 7Kb con temperaturas 200 a 500°C, datos con lo que se puede sugerir unas trayectorias hipotéticas para el metamorfismo para cada formación que conforma al Grupo Villa de Cura.

A partir de la geoquímica de roca total se clasificaron las muestras analizadas como toleítas de arco de islas y basaltos calco-alcalinos con lo que se puede sugerir que estas litologías se formaron en un ambiente de arco y que estas rocas posteriormente fueron adosadas al continente en un ambiente convergente por su anomalía negativa en niobio que junto a la pequeña anomalía negativa en titanio se puede pensar que estas rocas sufrieron un proceso de subducción.

15 Bibliografía

- Aguerrevere, S. E., & Zuloaga, G. (1937). Observaciones geológicas en la Cordillera de la Costa, Venezuela. *Bol. Geol. y Min.*, 8-22.
- Bell, J. S. (1968). Geología del área de Camatagua, Estado Aragua, Venezuela. *Bol. Geol. Min. Minas Hidrocarburos Venezuela*, 291-440.
- Berkland, J. O., Raymond, L. A., Kramer, J. C., Moores, E. M., & O'Day, M. (1972). What is Franciscan? *AAPG Bulletin*, 2295-2302.
- Bermúdez, M. A., Kohn, B. P., Van Der Beek, P. A., Bernet, M., O'Sullivan, P. B., & Shagam, R. (2010). Spatial and temporal patterns of exhumation across the Venezuelan Andes: Implications for Cenozoic Caribbean geodynamics. *Tectonics*, 29(5).
- Blake, M. C., Irwin, W. P., & Coleman, R. G. (1969). Blueschist-facies metamorphism related to regional thrust faulting. *Tectonophysics*, 8(3), 237-246.
- Brown, E. H. (1977). The crossite content of Ca-amphibole as a guide to pressure of metamorphism. *Journal of Petrology* 18, 53-72.
- Brown, M. (2014). The contribution of metamorphic petrology to understanding lithosphere evolution and geodynamics. *Geoscience Frontiers*, 553-569.
- Case, J. E., Holcombe, T. L., & Matin, R. G. (1984). Map of geologic provinces in the Caribbean region. *Geological Society America Memoir* 162, 1-31.
- Cawood, P. A., Kröner, A., Collins, W. J., Kusky, T. M., Mooney, W. D., & Windley, B. F. (2009). Accretionary orogens through Earth history. *Geological Society, London, Special Publications*, 318(1), 1-36.
- Copeland, C. A. (1999). Two contrasting pressure-temperature-time paths in the Villa de Cura blueschist belt, Venezuela: Possible evidence for Late Cretaceous initiation of subduction in the Caribbean. *GSA Bulletin*, 831-848.
- Díaz, G., & Pedrinar, L. (2014). Geología de la región de Belén, San Juan de Los Morros y San Sebastián de los Reyes, en los estados Carabobo, Guárico y Aragua. Venezuela.
- Ellero, A., Marroni, M., Padoa, E., Pandolfi, L., & Urbani, F. (2001). Deformation history of the blueschist-facies sequences from the Villa de Cura unit (Northern Venezuela). *Ofioliti*, 26(2b), 479-482.
- Ernst, W. G. (1979). Coexisting sodic and calcic amphiboles from high-pressure metamorphic belts and the stability of barroisitic amphibole. *Miner. Mag.*, (43), 269-278.
- Escalona, A., & Mann, P. (2011). Tectonics, basin subsidence mechanisms, and paleogeography of the Caribbean-South American plate boundary zone. *Marine and Petroleum Geology*, 28(1), 8-39.

Petrografía y Geoquímica del Grupo Villa de Cura

- Fettes, D., Desmons, J., Árkai, P., Brodie, K., Bryhni, I., Callegari, E., . . . Zharikov, V. (2007). *Metamorphic rocks: a classification and glossary terms: recommendations of the International Union of Geological Sciences Subcommission on the Systematics of the Metamorphic Rocks*. Cambridge University Press.
- Figuroa, R. (1995). *Agenda Geográfica de Venezuela*. Caracas, Venezuela: Alfa Grupo.
- Giunta, G., & Oliveri, E. (2009). Some remarks on the Caribbean Plate kinematics: facts and remaining problems. *Geological Society, London, Special Publications*, 57-75.
- Hey, M. H. (1954). A new review of the chlorites. *Mineral. Mag.* 25, 277-292.
- Hinrichsen, T. V., & Schurmann, K. (1969). Untersuchungen zur stabilitat von pumpellyit. *Neues Jahrb. Mineral. Monatsh.*, (10), 441-445.
- Jarvis, H. A. (1966). Geología de la región río Pao - río Tiznados, estados Cojedes y Guárico, Venezuela. *Bol. Geol., Caracas* 13, 73-115.
- Lallemant, H. G., & Sisson, V. B. (2005). Exhumation of eclogites and blueschists in northern Venezuela: constraints from kinematic analysis of deformation structures. *Geological Society of America Special Papers*, 394, 193-206.
- Locock, A. J. (2014). An Excel spreadsheet to classify chemical analyses of amphiboles following the IMA 2012 recommendations. *Computers & Geosciences*, 62, 1-11.
- Maresch, W. V. (1977). Experimental studies on glaucophane. An analysis of present knowledge. *Tectonophysics*, 109-125.
- Menéndez, V. (1966). Tectónica de la parte central de las montañas occidentales del Caribe, Venezuela. *Bol. Geol., Caracas* 8(15), 116-139.
- Miyashiro, A. (1973). *Metamorphism and metamorphic belts*. London: Allen and Unwin Publications.
- Nakamura, N. (1974). Determination of REE, Ba, Fe, Mg, Na and K in carbonaceous and ordinary chondrites. *Geochemical and Cosmochemical Acta*, 39, 757-773.
- Navarro, E., Ostos, M., & Yoris, F. G. (1988). Revisión y redefinición de unidades litoestratigráficas y síntesis de un modelo tectónico para la evolución de la parte norte-central de Venezuela durante el Jurásico-medio Paleogeno. *Acta Científica Venezolana*, v. 39, no. 5-6, 427-436.
- Navarro, F. (1983). Petrología y petrogénesis de las rocas metavolcánicas del Grupo Villa de Cura. *Geos* 28, 170-304.
- Nitsch, K. H. (1968). Die stabilitat von lawsonit. *Naturwissenschaften*, (8), 388-389.
- Ostos, M., Yoris, F., & Ave Lallemant, H. (2001). Overview of the Geology in the southeast Caribbean/South America plate boundary zone. *G.S.A. Special Paper, Caribbean/South America plate interaction*, 51.

Petrografía y Geoquímica del Grupo Villa de Cura

- Pearce, J. A., & Cann, J. R. (1973). Tectonic setting of basic volcanic rocks determined using trace element analyses. *Earth Planetary Science Letters*, 19(2), 290-300.
- Pindell, J. L., Higgs, R., & Dewey, J. F. (1998). Cenozoic palinspastic reconstruction, paleogeographic evolution and hydrocarbon setting of the northern margin of South America. . *Society for Sedimentary Geology (SEPM) Special Publication*, 45-86.
- Pindell, J. L., Kennan, W. V., Maresch, K. P., Stanek, G., Draper, & Higgs, R. (2005). Plate-kinematics and crystal dynamics of Circum-Caribbean arc-continent interactions: Tectonic controls on basin development in Proto-Caribbean margins. *Geol. Soc. America, Spec*, 7-52.
- Pindell, J. L., Lorcan, K., Wright, D., & Erikson, J. (2009). Clastic domains of sandstones in central/Eastern Venezuela, Trinidad and Barbados: heavy mineral and tectonic constraints on provenance and paleogeography. *Geological Society, London, Special Publications*, 739-793.
- Platt, J. P. (1975). Metamorphic and deformational processes in the Franciscan Complex, California: Some insights from the Catalina Schist terrane. *GSA Bulletin*, 1337-1347.
- Ramos, V. A. (2009). Anatomy and global context of the Andes: Main geologic features and the Andean orogenic cycle. *The Geological Society of America Memoir 204*, 31-65.
- Seiders, V. M. (1965). Geología de Miranda central, Venezuela. *Bol. Geol., Caracas*, 6(12), 289-416.
- Shagam, R. (1960). Geología de Aragua central (Venezuela). *Bol. Geol. publicación especial*, 574-675.
- Simon, R. M. (1971). aAspectos metalotectonicos del Grupo Villa de Cura Venezuela Central; metallotectonic aspects of the Villa de Cura Group, Central Venezuela in spanish.
- Smith, C. A., Sisson, V. H., Avé Lallemant, H. G., & Copeland, P. (1999). Two contrasting pressure-temperature-time paths in the Villa de Cura blueschist belt, Venezuela: Possible evidence for Late Cretaceous initiation of subduction in the Caribbean. *GSA Bulletin*, 831-848.
- Sun, S. S., & McDonough, W. F. (1989). Chemical and isotopic Systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. In: Magmatism in the Ocean Basins, Saunders, A.D. and Norry, M.J., eds. *Geological Society of London, Special Publications*, 42, 313-345.
- Tsai, C.-H., Iizuka, Y., & Ernst, W. G. (2013). Diverse mineral compositions, textures, and metamorphic P–T conditions of the glaucophane-bearing rocks in the Tamayen mélange, Yuli belt, eastern Taiwan. *Journal of Asian Earth Sciences*, vol.63, 218-233.

Petrografía y Geoquímica del Grupo Villa de Cura

- Unger, L. M., Sisson, V. M., & Lallemand, H. G. (2005). Geochemical evidence for island-arc origin of the Villa de Cura blueschist belt, Venezuela. *Geological Society of America Special Papers*, 394, 223-249.
- Urbani, F. (2002). El río Miguelena de Camurí Grande, estado Vargas: Una ventana a la geología de la Cordillera de la Costa-Guía de excursión. *Excursiones Geológicas N°02*, 1.
- Urbani, F. (2002). Geología del área de la autopista y carretera vieja Caracas–La Guaira, Distrito Capital y estado Vargas. *Guía de excursión. Geos* 35.
- Urbani, F., Chirinos, A., & Marquina, M. (1990). Geología del área de Guatopo - El Guapo. Estado Miranda y Guárico. Parten 1: Grupo Villa de Cura. *Revista de la facultad de ingeniería, UCV, Caracas*, 5(1), 96-124.