

CARACTERIZACIÓN PETROLÓGICA Y ESTRUCTURAL DE LA AUREOLA DE  
CONTACTO DEL STOCK DEL HATILLO

JOHAN ALEXANDER ACEVEDO VALDERRAMA

JULIANA IZABEL HERRERA RUÍZ

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOQUÍMICAS  
ESCUELA DE GEOLOGÍA  
BUCARAMANGA

2017

CARACTERIZACIÓN PETROLÓGICA Y ESTRUCTURAL DE LA AUREOLA DE  
CONTACTO DEL STOCK DEL HATILLO

JOHAN ALEXANDER ACEVEDO VALDERRAMA  
JULIANA IZABEL HERRERA RUÍZ

Trabajo de grado para optar al título de Geólogo (a)

Director:

Julián Andrés López Izasa  
Geólogo MSc.

Co-director:

Carlos Augusto Zuluaga Castrillón  
Geólogo Ph.D.

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOQUÍMICAS  
ESCUELA DE GEOLOGÍA  
BUCARAMANGA

2017

## CONTENIDO

INTRODUCCIÓN .....	16
1. OBJETIVOS .....	17
1.1 OBJETIVO GENERAL .....	17
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	17
2. METODOLOGÍA.....	18
3. GENERALIDADES DEL ÁREA DE ESTUDIO .....	25
3.1 LOCALIZACIÓN.....	25
3.2 VÍAS DE ACCESO.....	26
4. ANTECEDENTES .....	27
4.1 MARCO GEOLÓGICO REGIONAL .....	27
4.2 MARCO GEOLÓGICO LOCAL .....	30
4.2.1 Complejo Cajamarca (T-Mbg3).....	31
4.3 STOCK DEL HATILLO (E2-PM) .....	32
4.3 MARCO TECTÓNICO.....	33
4.4.1 Modelo evolutivo tectonomagmático.....	34
4.4.2 Geología estructural.....	36
5. ANÁLISIS ESTRUCTURAL.....	42
5.1 PROCESAMIENTO DE DATOS ESTRUCTURALES .....	45
5.1.1 Diaclasas .....	45
5.1.2 Foliaciones.....	49
5.1.3 Diques.....	53
6. PETROGRAFÍA.....	54
6.1 HORNFELSAS.....	57
6.1.1 Hornfelsa Ab/Ep.....	63
6.1.2 Hornfelsa Anfibólica.....	66
6.1.3 Hornfelsa piroxénica .....	71
FIGURA 40. Anfíboles con textura granoblástica. (A y C) en PPL y objetivo de 20X y (B y D) misma anterior en XPL.....	91

6.2	STOCK DEL HATILLO.....	91
6.3	DIQUES Y SILOS .....	106
7.	EQUILIBRIO MINERAL.....	111
7.1	ELEMENTOS MAYORES, MENORES Y TRAZA.....	111
7.2	MINIMIZACIÓN DE ENERGÍA LIBRE DE GIBBS.....	115
7.2.1	Muestra CSH_2_1 .....	118
7.2.2	Muestra CSH_4_5 .....	118
7.2.3	Muestra CSH_12_1 .....	119
7.3	CONSTRUCCIÓN DE PSEUDOSECCIONES PT .....	125
7.3.1	Pseudosección CSH_2_1 .....	128
7.3.2	Pseudosección CSH_4_5.....	129
7.3.3	Pseudosección CSH_12_1 .....	130
8.	DISCUSIÓN .....	132
8.1	STOPING.....	132
8.2	BALLOONING.....	134
8.3	DOMING .....	138
9.	CONCLUSIONES.....	142
	BIBLIOGRAFIA.....	143

## LISTA DE FIGURAS

- FIGURA 1. Espectrómetro secuencial de Fluorescencia de Rayos X de longitud de onda dispersiva de 4KW, marca BRUKER modelo S8 TIGER. 4
- FIGURA 2. Localización geográfica de la zona de estudio (recuadro rojo). Tomado y modificado de Google Earth. 14
- FIGURA 3. Vías de acceso por carretera a la vereda El Hatillo. Tomado y modificado de Google Earth. 24
- FIGURA 4. Regiones fisiográficas del departamento del Tolima. Tomado de INGEOMINAS (2001). 34
- FIGURA 5. Mapa geológico de la zona de estudio (recuadro rojo). Tomado y modificado del mapa Geológico de Colombia realizado por el Servicio Geológico Colombiano. 44
- FIGURA 6. Esquema tectónico de Colombia. Tomado de Mejía, 2012 que lo tomó de Trenkamp et al., 2002. 44
- FIGURA 7. A) Dique cortando casi perpendicularmente las estructuras S1. B) Dique cortando oblicuamente las estructuras S1. C) Silo cortando paralelamente las estructuras S1. D) Estructura “dique–silo–dique”. 14
- FIGURA 8. Afloramientos exhibiendo venas plegadas intruyendo tanto la roca caja como el cuerpo ígneo. 54
- FIGURA 9. Evidencias de stoping, en donde fragmentos de la roca caja fueron engullidos por el cuerpo ígneo. Además se observa el contacto neto entre las hornfelsas y el cuerpo intrusivo. 74
- FIGURA 10. Diagrama de rosas mostrando las principales tendencias (izquierda) e inclinaciones (derecha) de los datos trabajados. 54
- FIGURA 11. Diagrama de contornos mostrando un plegamiento asimétrico de las estructuras (foliación) presentes en una de las estaciones trabajadas. 44

FIGURA 12. Esquema del método de diedros rectos, mostrando las principales zonas de compresión (flechas azules) y de tensión (flechas rojas) de los datos trabajados.	14
FIGURA 13. Esquematación del control estructural regional que presenta la zona de estudio. Tomado y modificado de Google Earth.	24
FIGURA 14. Diagramas de rosa y de compresión de los datos medidos por estaciones a lo largo de la poligonal abierta de la vía.	54
FIGURA 15. Comportamiento de las foliaciones a lo largo de la zona de estudio, donde son apreciables los plegamientos sufridos por la roca caja recristalizada a causa del emplazamiento del cuerpo ígneo.	84
FIGURA 16. Corte estructural de la zona de estudio	24
FIGURA 17. Diagrama de Rosas mostrando la tendencia en el rumbo de los planos de diques que se encuentran cortando la roca caja.	34
FIGURA 18. Triángulo de Streckeisen (1976) indicando el área que corresponde a la sección CSH_6_1.	74
FIGURA 19. Hornfelsas. (A, C, E y G) alternancia de bandas máficas y félsicas de algunas de las muestras, PPL con aumento de 5X. (B, D, F y H) misma anterior en XPL.	14
FIGURA 20. Textura nematoblástica en anfíbol, también se puede observar la fase de deformación perteneciente a S1 presente en los mesosomas. (A y C) en PPL con objetivo de 10X. (C y D) misma anterior en XPL.	34
FIGURA 21. Hornfelsa perteneciente a la facie de menor temperatura. Se puede observar la fase de deformación perteneciente a S1 y cristales de andalucita que no siguen necesariamente la misma tendencia. Fotografías tomadas con el objetivo 5X.	54
FIGURA 23. Fotografías tomadas con objetivo de 5X.	64
FIGURA 24. Fotografías tomadas con el objetivo 5X	24
FIGURA 25. Fotografías tomadas con el objeto 5X	14

- FIGURA 26. Ortopiroxenos con textura granoblástica. (A y C) en PPL y objetivo de 20X. (B y D) Misma anterior en XPL. (E y G) en PPL con objetivo de 40X y (F y H) misma anterior en XPL. 24
- FIGURA 27. Ortopiroxeno y clinopiroxeno con textura granoblástica. (A, C y G) en PPL y objetivo de 20X. (B, D y H) misma anterior en XPL. (E) en PPL y objetivo de 40X y (F) misma anterior e XPL. 74
- FIGURA 30. Megacristemas de Bt y Amp (en comparación con el resto de la misma sección), en donde se aprecia la textura random causada por la biotita. (A y C) en PPL con objetivo de 5X y (B y D) misma anterior en XPL. 74
- FIGURA 31. Piroxenos (Cpx y Opx) con textura granoblástica. (A, C, E y G) en PPL y objetivo de 20X y (B, D, F y H) misma anterior en XPL. 84
- FIGURA 32. Clinopiroxeno con textura granoblástica. (A, C y E) en PPL y objetivo de 20X y (B, D y F) misma anterior en XPL 84
- FIGURA 33. Anfíboles con textura lepidoblástica. (A, C, E y G) en PPL y objetivo de 20X y (B, D, F y H) misma anterior en XPL. 94
- FIGURA 34. Anfíboles con textura lepidoblástica. (A, C y E) en PPL y objetivo de 20X; (B, D, F y H) misma anterior en XPL. 14
- FIGURA 36. Clinopiroxenos con textura granoblástica. (A, C, E y G) en PPL y objetivo de 20X y (B, D, F y H) misma anterior en XPL. 24
- FIGURA 37. Ortopiroxenos con textura granoblástica. (A) en PPL y objetivo de 20X. (B) misma anterior en XPL. (C) en PPL y objetivo de 40X y (D) misma anterior en XPL. 64
- FIGURA 38. Anfíboles (Hbl y Act) con textura lepidoblástica. (A) en PPL y objetivo de 20X. (B) misma anterior en XPL. (C, E y G) en PPL y objetivo de 10X y (D, F y H) misma anterior en XPL. 34
- FIGURA 39. Piroxenos (Opx y Cpx) con textura granoblástica. (A, C y E) en PPL y objetivo de 20X y (B, D y F) misma anterior en XPL. (G) Plagioclasa asociada con actinolita en variedad fibrosa, en PPL y objetivo de 20X y (H) misma anterior en XPL. 54

FIGURA 40. Anfíboles con textura granoblástica. (A y C) en PPL y objetivo de 20X y (B y D) misma anterior en XPL.	44
FIGURA 41. Asociación mineral	54
FIGURA 42. Pl exhibiendo maclas tipo Ab y periclina, además de zonaciones (p. ej. F). (A, C y E) en PPL y objetivo de 5X. (B, D y F	84
FIGURA 43. Triángulo de Streckeisen (1976) indicando el área que corresponde a la sección CSH_6_1.	54
FIGURA 44. Triángulo de Streckeisen (1976) indicando el área que corresponde a la sección CSH_6_2.	14
FIGURA 45. Fotografía tomada con objetivo de 5X.	44
FIGURA 46. Triángulo de Streckeisen (1976) indicando el campo al que corresponde la sección CSH_29_1.	34
FIGURA 47. (A y C) Feldespatos con macla de carlsbad en PPL	74
FIGURA 48. (B–D) plagioclasas con maclado polisintético y (F–H) periclina.	84
FIGURA 50. Triángulo de Streckeisen (1976) indicando el campo al que corresponde la sección CSH_29_2.	84
FIGURA 51. Fotografías tomadas con el objetivo de 5X.	74
FIGURA 52. Triángulo de Streckeisen (1976) indicando el campo al que corresponde la sección CSH_3_4.	54
FIGURA 53. Grandes cristales de plagioclasas y biotita embebidos en una matriz fanerítica rica en cuarzo	44
FIGURA 55. Fenocristales de biotita, anfíbol y plagioclasa embebidos por una matriz fanerítica de cuarzo principalmente.	14
FIGURA 56. Fenocristales de feldespato, biotita y anfíbol	4
FIGURA 57. Composición química, utilizando el método de Fluorescencia de Rayos X (FRX), de tres muestras de hornfelsa (una por cada facies metamórfica).	14
FIGURA 58. Gráficas de elementos mayores, menores y traza presentes en cada una de las muestras.	24

FIGURA 59. Interfaz del software Thermocalc de Powell & Holland v 3.33.	34
FIGURA 60. Graficas de rangos de equilibrio para las fases minerales sensibles a cambios de presión y temperatura de la muestra CSH_2_3	74
FIGURA 61. Graficas de rangos de equilibrio para las fases minerales sensibles a cambios de presión y temperatura de la muestra CSH_4_5.	74
FIGURA 62. Graficas de rangos de equilibrio para las fases minerales sensibles a cambios de presión y temperatura de la muestra CSH_12_1, con feldespatos.	84
FIGURA 63. Graficas de rangos de equilibrio para las fases minerales sensibles a cambios de presión y temperatura de la muestra CSH_12_1, sin feldespatos.	74
FIGURA 64. Pseudosección PT de la muestra CSH_2_1 construida en el sistema MnNCKFMASH empleando el software Theriak/Domino v 5.9.6 (De Capitani & Petrakakis, 2010).	74
FIGURA 65. Pseudosección PT de la muestra CSH_4_5 construida en un sistema MnNCKFMASH empleando el software Theriak/Domino v 5.9.6 (De Capitani & Petrakakis, 2010).	54
FIGURA 66. Pseudosección PT de la muestra CSH_12_1 construida en el sistema MnNCKFMASH empleando el software Theriak/Domino v 5.9.6 (De Capitani & Petrakakis, 2010).	34
FIGURA 67. Perspectiva esquemática de los procesos de emplazamiento de un plutón en la corteza.	74
FIGURA 68. Esquema generalizado para el ascenso y emplazamiento de magma.	24

## LISTA DE TABLAS

TABLA 1. Abreviaturas de minerales usadas para el presente estudio. Tomado de Whitney & Evans (2010).	4
TABLA 2. Estereograma y diagramas de rosa y diedros rectos para los datos recolectados en campo, analizados por estación.	4
TABLA 3. Composición mineralógica y su respectivo porcentaje para la sección CSH_6_1.	14
TABLA 4. Recalculo mineralógico necesario para determinar la litología correspondiente a la sección CSH_6_1.	14
TABLA 5. Composición mineralógica y su respectivo porcentaje para la sección CSH_2_3.	14
TABLA 6. Composición mineralógica y respectivo porcentaje para la sección CSH_4_2.	24
TABLA 7. Composición mineralógica y su respectivo porcentaje para la sección CSH_4_4.	24
TABLA 8. Composición mineralógica y su respectivo porcentaje para la sección CSH_4_5.	34
TABLA 9. Composición mineralógica y su respectivo porcentaje para la sección CSH_12_1.	34
TABLA 10. Composición mineralógica y su respectivo porcentaje para la sección CSH_12_2.	34
TABLA 11. Composición mineralógica y su respectivo porcentaje para la sección CSH_12_3.	44
TABLA 12. Composición mineralógica y su respectivo porcentaje para la sección CSH_13_1	44
TABLA 14. Composición mineralógica y su respectivo porcentaje, también se aprecia el recálculo hecho para conocer el tipo de litología de la sección CSH_6_2.	44

TABLA 15. Composición mineralógica y su respectivo porcentaje, también se aprecia el recálculo hecho para conocer el tipo de litología de la sección CSH_29_1.	54
TABLA 16. Composición mineralógica y su respectivo porcentaje, también se aprecia el recálculo hecho para conocer el tipo de litología de la sección CSH_29_2.	54
TABLA 17. Composición mineralógica y su respectivo porcentaje, también recálculo hecho para conocer el tipo de litología de la sección CSH_3_4.	74
TABLA 19. Concentración en %molar de los principales óxidos	84
TABLA 20. Principales características presentes en diversos plutones félsicos durante y posterior al emplazamiento.	84

## RESÚMEN

**TÍTULO:** CARACTERIZACIÓN PETROLÓGICA Y ESTRUCTURAL DE LA AUREOLA DE CONTACTO DEL STOCK DEL HATILLO.<sup>1</sup>

**AUTOR(ES):** JOHAN ALEXANDER ACEVEDO VALDERRAMA  
JULIANA IZABEL HERRERA RUIZ\*\*

**PALABRAS CLAVE:** Fluorescencia de Rayos X, equilibrio mineral, minimización de energía libre de Gibbs, pseudosección.

### DESCRIPCIÓN:

Durante la intrusión este cuerpo ígneo generó una aureola de contacto de aproximadamente 600 metros de longitud (en la zona), en donde la roca caja, conformada por esquistos cuarzo biotíticos y grafitosos pertenecientes a la facies esquistos verdes del Complejo Cajamarca, sufrió recristalización a causa del aumento de temperatura, formando así, tres facies de hornfelsas. Así mismo, la intrusión causó que la roca caja este altamente deformada y plegada formando estructuras sinformes y antifformes con ejes de charnela paralelos al contacto con el stock, además se observaron fragmentos de la roca caja embebidos en el intrusivo.

A partir de los resultados obtenidos por el método de Fluorescencia de Rayos X hechos a tres muestras de hornfelsa (una por cada posible facies encontrada), se realizó la minimización de energía libre de Gibbs buscando evidenciar las facies minerales que podrían coexistir en equilibrio para cada una de las tres muestras, para así continuar con la generación y el análisis de las pseudosección, obteniendo que para la facies uno (Facies Ab-Ep) que tiene la asociación mineral  $Bt + Ms + And + Pl + Qz + Chl$  es estable a unas condiciones de temperatura entre 455 y 500 [°C]. Para la facies dos (Facies hornfelsa anfibólica) que tiene la asociación mineral  $Amp + Bt + Pl + Chl \pm Qz \pm Px$  está en equilibrio a unas condiciones de temperatura entre 480 y 520 [°C]. Y para la facies tres (Facies hornfelsa piroxénica) que tiene la asociación mineral  $Cpx + Opx + Bt + Qz + Pl + Amp$  está en equilibrio a unas condiciones de temperatura entre 490 y 560 [°C]. Todas a un rango de presión entre 1 y 3.5 [Kbar].

---

<sup>1</sup> Trabajo de Grado

\*\* Facultad de ingenierías fisicoquímicas Escuela de geología. Director Julián Andrés López Izasa Geólogo MSc. Codirector Carlos Augusto Zuluaga Castrillón Geólogo Ph.D.

## SUMMARY

**TITLE:** PETROLOGICAL AND STRUCTURAL CHARACTERIZATION OF THE CONTACT AUREOLA OF STOCK OF HATILLO.<sup>2</sup>

**AUTHOR (S):** JOHAN ALEXANDER ACEVEDO VALDERRAMA

JULIANA IZABEL HERRERA RUIZ \*\*

**KEY WORDS:** X-ray fluorescence, mineral balance, Gibbs free energy minimization, pseudo-section.

### DESCRIPTION:

During the intrusion this igneous body generated a contact aura of approximately 600 meters in length (in the area), where the box rock, formed by biotite and graphite quartz schists belonging to the green schist facies of the Cajamarca Complex, was recrystallized because of the increase of temperature, thus forming, three facies of hornfelsas. Also, the intrusion caused that the rock is highly deformed and folded forming nonformal and antiform structures with hinged shafts parallel to the contact with the stock, in addition were observed fragments of the box rock embedded in the intrusive.

From the results obtained by the X-ray Fluorescence method made to three samples of hornfelsa (one for each possible facies found), the Gibbs free energy minimization was carried out in order to show the mineral facies that could coexist in equilibrium for each (Facies Ab-Ep) that has the mineral association  $Bt + Ms + And + Pl + Qz + Chl$  is stable to one of the three samples, in order to continue the generation and analysis of the pseudosection, temperature conditions between 455 and 500 [° C]. For facies two (Facies hornfelsa amphibolica) having the mineral association  $Amp + Bt + Pl + Chl \pm Qz \pm Px$  is in equilibrium at temperature conditions between 480 and 520 [° C]. And for the facies three (Facies hornfelsa pyroxénica) that has the mineral association  $Cpx + Opx + Bt + Qz + Pl + Amp$  is in equilibrium at temperature conditions between 490 and 560 [° C]. All at a pressure range between 1 and 3.5 [Kbar].

---

<sup>2</sup> Bachelor Thesis

\*\* Facultad de ingenierías fisicoquímicas Escuela de geología. Director Julián Andrés López Izasa Geólogo MSc. Codirector Carlos Augusto Zuluaga Castrillón Geólogo Ph.D.

## INTRODUCCIÓN

El entendimiento científico de un territorio es de vital importancia para el avance de la nación. Debido a esto se hace necesario aportar a dicho entendimiento nueva información con constante actualización bien sea de zonas previamente exploradas o no; pues permitirá tener una mejor comprensión sobre recursos naturales, amenazas, sitios de expansión, entre otros, que permitirán el crecimiento socioeconómico de la nación.

El presente trabajo busca caracterizar un segmento que comprende la aureola de contacto y zona de borde causada por la intrusión del Stock del Hatillo en esquistos negros grafitosos del Complejo Cajamarca, a lo largo de una parte de la transecta Mariquita–Fresno en el norte del departamento de Tolima

El presente estudio, desarrollado bajo la modalidad trabajo de grado de investigación, busca caracterizar la zona de borde de la aureola de contacto generada por la intrusión del Stock del Hatillo en el Complejo Cajamarca, identificando los mecanismos de emplazamiento que estuvieron presentes durante la intrusión, para lo cual se analizan tanto las relaciones de campo como la geología estructural. También se busca identificar las posibles facies ígneas y/o metamórficas alcanzadas durante el evento (emplazamiento–metamorfismo de contacto) y el equilibrio mineral presente en las fases minerales de cada una de las rocas analizadas. Este es el primer reporte realizado sobre de esta aureola.

## **1. OBJETIVOS**

### **1.1 OBJETIVO GENERAL**

Caracterizar petrográfica, geoquímica y estructuralmente la aureola de contacto del Stock del Hatillo.

### **1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- ✓ Evaluar las características estructurales de las fábricas relacionadas con la aureola de contacto generada durante la intrusión y su relación con los mecanismos de emplazamiento.
- ✓ Caracterizar las facies ígneas de borde del Stock del Hatillo.
- ✓ Determinar facies de metamorfismo de contacto generadas durante la intrusión del Stock del Hatillo.
- ✓ Modelar las condiciones P–T de las hornfelsas generadas por el Stock del Hatillo.
- ✓ Determinar la profundidad de emplazamiento del Stock del Hatillo.

## 2. METODOLOGÍA

Para la realización de los objetivos propuestos en este proyecto se llevaron a cabo unas series sucesivas de cinco fases descritas a continuación:

**Fase 1:** Incluye la consulta bibliográfica de trabajos técnicos, artículos y/o mapas geológicos realizados sobre o en torno a la zona de estudio, así como la revisión de diferentes documentos relacionados con temas que apoyan la resolución de los principales objetivos del proyecto.

**Fase 2:** Trabajo de campo de reconocimiento y recolección de muestras presentes a lo largo de la transecta que comprende la zona de borde de la aureola de contacto del Stock del Hatillo, además de la observación y descripción de las relaciones de campo entre el plutón y la roca caja. Así mismo se efectuó la toma de datos estructurales de foliaciones, diaclasas, diques y contactos.

**Fase 3:** Fase de laboratorio en la cual se llevaron a cabo los siguientes análisis sobre las muestras recolectadas en campo:

- Descripción petrográfica de catorce secciones delgadas mediante el uso del microscopio óptico Nikon ECLIPSE E200 del laboratorio de petrografía óptica de la Escuela de Geología, con el fin de determinar las facies mineralógicas (tanto ígneas como las alcanzadas por el metamorfismo de contacto) y las características texturales y microestructurales que permiten diferenciar las rocas aflorantes en la aureola de contacto.
- Procesamiento de los datos estructurales tomados en campo mediante el uso de los softwares libres Stereonet versión 9.8.6 y WinTensor versión 5.0.1.

Estos son programas diseñados como una herramienta geológica para la graficación, procesamiento y visualización de diferentes datos estructurales.

- Análisis de espectrometría de Fluorescencia de Rayos X (FRX).

Este análisis fue realizado con el propósito de conocer la composición química elemental de las facies metamórficas encontradas en el transecto que comprende la aureola de contacto del Stock del Hatillo. Se efectuó mediante el método QUANT-EXPRESS utilizando un espectrómetro secuencial de Fluorescencia de Rayos X de longitud de onda dispersiva de 4KW marca BRUKER modelo S8 TIGER del Laboratorio de Difracción de Rayos X de la Universidad Industrial de Santander (FIGURA 1).

La técnica de FRX consiste en irradiar la muestra mediante una fuente de “rayos x” excitando los electrones que se encuentran en su estado fundamental y producir así una señal de radiación que es característica para cada elemento independiente de sus enlaces. La longitud de onda y la intensidad de la misma permiten identificar el elemento y su concentración en la muestra.

**FIGURA 1.** Espectrómetro secuencial de Fluorescencia de Rayos X de longitud de onda dispersiva de 4KW, marca BRUKER modelo S8 TIGER.



**Fase 4:** A partir de los resultados obtenidos con FRX se procesaron los datos geoquímicos obtenidos de las muestras objeto del presente estudio usando los softwares Thermocalc y Theriak/Domino. En la TABLA 1 se visualizan las abreviaturas de Whitney & Evans (2010) usadas para la representación de las asociaciones obtenidas durante el modelamiento termodinámico.

**TABLA 1.** Abreviaturas de minerales usadas para el presente estudio. Tomado de Whitney & Evans (2010).

<b>MINERAL</b>	<b>ABREVIATURA</b>
Ab	Albita
Act	Actinolita
Ade	Andesina
Afs	Feldespatos alcalinos
Amp	Anfíbol
And	Andalucita
Ap	Apatito
Aug	Augita
Bt	Biotita
Chl	Clorita
Cpx	Clinopiroxeno
Di	Diópsido
Ep	Epidota
Hbl	Hornblenda
Hed	Hedenberguita
Hyp	Hiperstena
Oli	Oligoclasa
Opq	Opaco

Opx	Ortopiroxeno
Pl	Plagioclasa
Qz	Cuarzo
Rt	Rutilo
Ser	Sericita
Ttn	Titanita
Zr	Zircon

- Software Theriak/Domino

Este software consiste en una colección de programas escritos en lenguaje C, para calcular y graficar funciones termodinámicas, asociaciones en equilibrio y diagramas de asociaciones en equilibrio de rocas específicas (también llamadas pseudosecciones). Esta colección incluye los siguientes programas:

*Theriak* que es el corazón de la colección, calcula la asociación mineral estable y fase de composiciones para una roca dada, bajo condiciones específicas de presión y temperatura.

*Domino* que puede calcular: (a) Diagramas de asociación en equilibrio con ejes seleccionables (presión, temperatura, actividad de componentes y logaritmos de actividad de componentes), (b) Diagramas de fase pseudo-binarios o pseudo-ternarios, (c) Isoplejas de fase composicional así como de densidad, distribuciones modales o volumétricas y (d) Distribuciones de parámetros de roca mayor.

*Therbin* y *Therter* calculan diagramas de fase binarios y ternarios a presión y/o temperatura.

*Thalia* y *Thermo* calculan la fase o asociación, dependientes de parámetros en temperatura y presión o composición (binaria).

*Guzzler* y *Explot* son usados para transformar la información gráfica de los programas anteriores a archivos PostScript “listos para usar” que permiten la visualización de los resultados.

- Software Thermocalc

Thermocalc versión 3.2.6 es un convincente paquete de programas desarrollado por Powell y Holland (1994) usado para cálculos termodinámicos, ampliamente utilizado para llevar a cabo una variedad de cálculos termobarométricos y graficar diagramas de fase para rocas metamórficas, tales como proyecciones P–T, pseudosecciones (P–T, P–X y T–X), diagramas de compatibilidad y diagramas  $\mu$ – $\mu$ , en función de bases de datos agrupadas y asociadas a diferentes sistemas químicos.

Sus tipos de cálculos incluyen: (a) Generación de tabla de datos termodinámicos de miembros externos, (b) Generación de diagramas de fase, (c) Cálculo de promedio de presión y temperatura, (d) Cálculo de reacciones entre miembros extremos, (e) Lista de miembros extremos y composiciones y (f) Generación de tabla de datos termodinámicos referente a la minimización de energía libre de Gibbs para su posterior graficación.

**Fase 5:** Esta fase comprende la revisión e interpretación de los datos obtenidos en los estudios estructurales, petrográficos y geoquímicos, con el fin de definir las

condiciones de emplazamiento y de la misma manera su contexto tectónico y geodinámico de formación.

**Fase 6:** Corresponde con la fase de realización y entrega del informe final de los estudios realizados, discusión y conclusión del análisis de los resultados obtenidos.

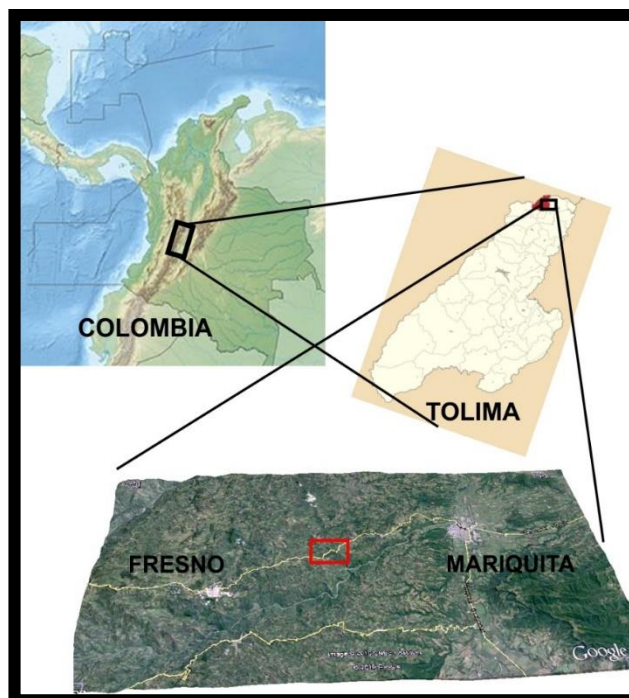
### 3. GENERALIDADES DEL ÁREA DE ESTUDIO

#### 3.1 LOCALIZACIÓN

La zona de estudio se encuentra geográficamente ubicada sobre el flanco oriental de la Cordillera Central al norte del departamento de Tolima en la vía que comunica los municipios Mariquita y Fresno (FIGURA 2). Esta zona se encuentra enmarcada entre las coordenadas:

$X_1: 74^{\circ}53' W$        $Y_1: 5^{\circ}12' N$   
 $X_2: 75^{\circ}25' W$        $Y_2: 4^{\circ}34' N$

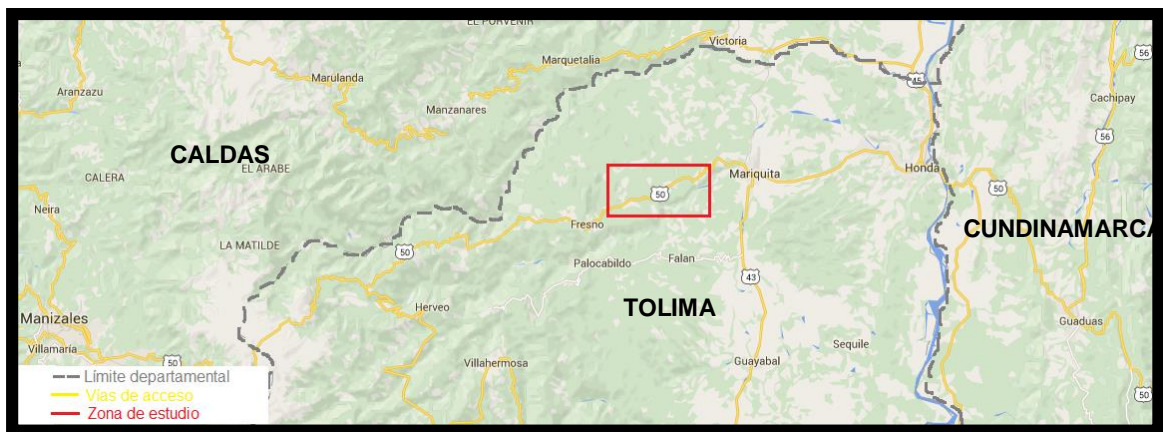
**FIGURA 2.** Localización geográfica de la zona de estudio (recuadro rojo). Tomado y modificado de Google Earth.



### 3.2 VÍAS DE ACCESO

Fresno y Mariquita junto con Honda son los municipios que hacen limitar al norte de Tolima con los departamentos de Caldas y Cundinamarca. Para acceder a la zona de estudio, que se ubica sobre la vía que conduce desde Mariquita hasta Fresno (misma vía que lleva a Manizales), se debe seguir la ruta 50 de la red nacional de carreteras (FIGURA 3), la cual tiene unión con importantes vías como la ruta 43 (Ibague-Manizales) y con la ruta 45, la cual es la que se debe tomar si se desea llegar desde Bucaramanga hasta la zona de estudio.

**FIGURA 3.** Vías de acceso por carretera a la vereda El Hatillo. Tomado y modificado de Google Earth.



## **4. ANTECEDENTES**

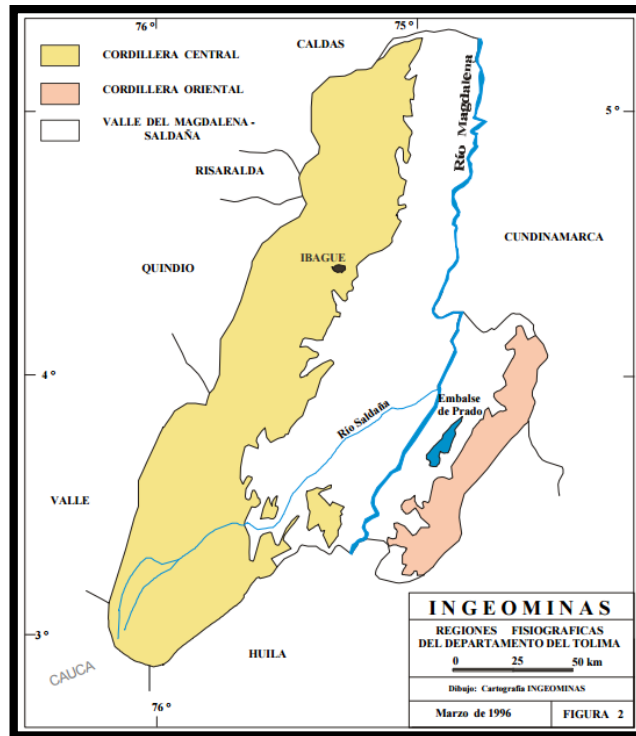
### **4.1 MARCO GEOLÓGICO REGIONAL**

Orográficamente Colombia se identifica por la ramificación producida de la Cordillera de los Andes en su territorio. Como consecuencia la región andina colombiana se caracteriza por la existencia de una serie de cordilleras conocidas como Cordillera Occidental, Central y Oriental, cada una con características geológicas y estructurales propias, separadas por los valles interandinos del Cauca y Magdalena.

La Cordillera Central, elemento geotectónico importante del sistema andino en Colombia, adquirió su actual configuración estructural durante un evento orogénico del Oligoceno–Mioceno. Con su superficie de erosión post-Oligoceno, la Cordillera Central define fisiográficamente un antiforame amplio (pero marcadamente asimétrico) con el flanco oriental suavemente inclinado y el flanco occidental relativamente abrupto (Kammer y Mojica, 1996).

Gran parte del territorio Tolimense se ubica sobre el flanco oriental de la cordillera central, en donde a su vez encontramos nuestra zona de estudio. Además de esta zona la constitución geológica del departamento se caracteriza por otras dos zonas (INGEOMINAS, 2001), que de E-W son:

**FIGURA 4.** Regiones fisiográficas del departamento del Tolima. Tomado de INGEOMINAS (2001).



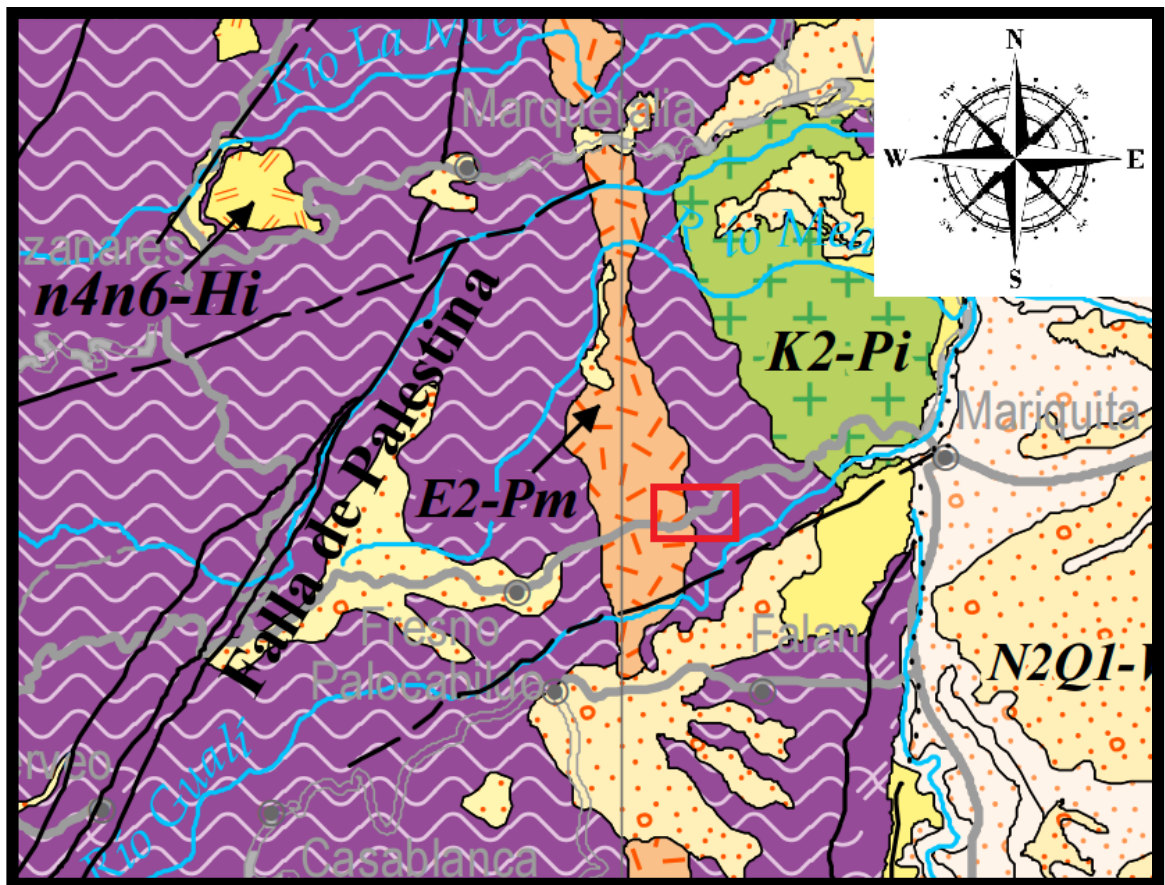
1. *El flanco occidental de la Cordillera Oriental de Colombia*, aquí son comunes las unidades sedimentarias del Cretácico y Cenozoico, así como algunos afloramientos de vulcanitas de la Formación Saldaña y pequeñas exposiciones de rocas intrusivas del Jurásico (INGEOMINAS, 2001).
  
2. *El Valle Superior del Magdalena*, que está conformado por rocas sedimentarias marinas del Cretácico y continentales del Cenozoico, así como por abundantes depósitos sedimentarios del Cuaternario, especialmente aluviones y abanicos de origen volcanoclástico. En el límite con la Cordillera Central estas unidades sedimentarias recubren las rocas más antiguas. (INGEOMINAS, 2001).

3. *El flanco oriental y la cima de la Cordillera Central de Colombia*, la cual según Nivia (1989) tiene un basamento constituido por rocas Precámbricas metamórficas, sobre las cuales yace un cinturón de rocas Paleozoicas ígneas y metamórficas de bajo grado, buzantes al oriente, el cual se interpreta como una secuencia de borde continental y arco de islas (Nivia et al., 1989). Las que se asignan, según Gómez y Núñez (2003), al Complejo Cajamarca con una edad Paleozoica. Maya (1992), mencionó con dataciones isotópicas U–Pb en circones heredados alrededor de 280 Ma y edades de magmatismo U–Pb en circones neo-formados alrededor de 250 Ma un marcado evento metamórfico Pérmico para el norte del Complejo Cajamarca, que se relaciona con la amalgamación de Pangea según Vinasco et al., (2006). Villagómez et al., (2011) presenta una edad  $236 \pm 6$  Ma por el método U–Pb en un circón procedente de un ortogneis mapeado como parte del Complejo Cajamarca al este de la falla de Palestina, mostrando otro evento metamórfico regional para el Complejo Cajamarca de edad Triásico. Durante el Jurásico tuvo lugar un importante evento magmático en todo el país y en el Tolima se refleja por el emplazamiento del Batolito de Ibagué y otros plutones menores; mientras en las estribaciones de la cordillera se acumularon, en el Triásico–Cretácico, formaciones de origen continental (Luisa), marino (Payandé) y depósitos de lavas y piroclastos (Saldaña). (INGEOMINAS, 2001). A finales del Mesozoico un evento magmático permitió el emplazamiento de intrusivos sin-orogénicos (p.ej. Batolito Antioqueño). Barrero (1969) menciona que una actividad Cenozoica caracterizada por fases de subsidencia, plegamiento, fracturación y solevantamiento final de la Cordillera Central permitió el emplazamiento de algunos pequeños plutones de composición granodiorítica a tonalítica, expuestos hacia ambos flancos de la Cordillera Central, en donde según Mosquera et al., (1978) hacia el flanco oriental se destacan el Stock de Mariquita, el Batolito de El Bosque, el Stock de Santa Isabel y el Stock del Hatillo.

## 4.2 MARCO GEOLÓGICO LOCAL

La zona de estudio está comprendida por dos unidades litológicas (FIGURA 4), siendo estas el Complejo Cajamarca y el Stock del Hatillo propiamente dicho, las cuales se describirán a continuación:

**FIGURA 5.** Mapa geológico de la zona de estudio (recuadro rojo). Tomado y modificado del mapa Geológico de Colombia realizado por el Servicio Geológico Colombiano.



**4.2.1 Complejo Cajamarca (T-Mbg3).** El Complejo Cajamarca está conformado por un conjunto de unidades metamórficas ubicadas entre la falla San Jerónimo al Oeste y la falla Otú Pericos al Este, estas conforman el núcleo de la Cordillera Central (Maya y González, 1995). Su litología está compuesta por pizarra, filita, esquisto cuarzo–moscovítico, esquisto verde, cuarcita, gneis, granulita, anfíbolita y fajas de mármol (Moreno–Sánchez et al., 2008). De acuerdo con la memoria explicativa del mapa geológico del departamento del Tolima, el Complejo Cajamarca es descrito principalmente como esquistos de clorita-albita-epidota, clorita-albita-actinolita, cuarzo-sericita-grafito, cuarcitas y cuarcitas biotíticas.

Diferentes autores han propuesto edades para el Complejo Cajamarca que se extienden entre el Proterozoico y el Cretácico–Paleógeno, en estudios más recientes se plantea una edad Paleozoica para dicho Complejo (Gómez y Núñez, 2003). Las dataciones isotópicas disponibles para el norte del Complejo Cajamarca, a pesar de la dispersión de fechas, exhiben un marcado evento metamórfico Pérmico con dataciones por el método U/Pb SHRIMP en zircones heredados alrededor de 280 Ma y edades de magmatismo por el método U/Pb SHRIMP en zircones neoformados de alrededor de 250 Ma en granitos gnéisicos sintectónicos de origen predominantemente cortical, lo que se relaciona con la amalgamación de Pangea (Vinasco et al., 2006) y sugieren que el principal evento de colisión en el norte de los Andes se produjo aproximadamente a 280 Ma. Más tarde la ruptura empezaría en el Triásico (Condie, 2000). Villagómez et al. (2011), presenta una edad  $236 \pm 6$  Ma por el método de U/Pb en zircón procedente de un ortogneis mapeado como parte del Complejo Cajamarca al este de la falla de Palestina, mostrando otro evento metamórfico regional para el Complejo Cajamarca de edad Triásico. Recientemente, Blanco–Quintero et al. (2014), propone una cuenca volcanosedimentaria en un ambiente marino extensional como el origen del protolito de estas rocas.

### 4.3 STOCK DEL HATILLO (E2-PM)

El Stock del Hatillo es el nombre dado por Barrero y Vesga (1976) a un cuerpo intrusivo de forma elongada, que aflora en el flanco oriental de la Cordillera Central de Colombia, al oriente del Municipio de Fresno. Uno de los mejores afloramientos de esta intrusión se encuentra sobre la carretera Mariquita–Fresno correspondiente al área objeto de estudio en este proyecto.

La composición del Stock del Hatillo es muy homogénea, dominada por una cuarzodiorita biotítica a granodiorita de grano medio. Presenta textura holocristalina, fanerítica, equigranular e índice de color de mesocrático a leucocrático; con variaciones locales a diorita. Mineralógicamente está constituida por cuarzo, plagioclasa y biotita o anfíbol principalmente. Este plutón intruye rocas metamórficas del Complejo Cajamarca, generando una zona de borde compuesta por diques y hornfelsas de aproximadamente 600 m de extensión. Sobre esta unidad reposan discordantemente sedimentitas del Grupo Honda.

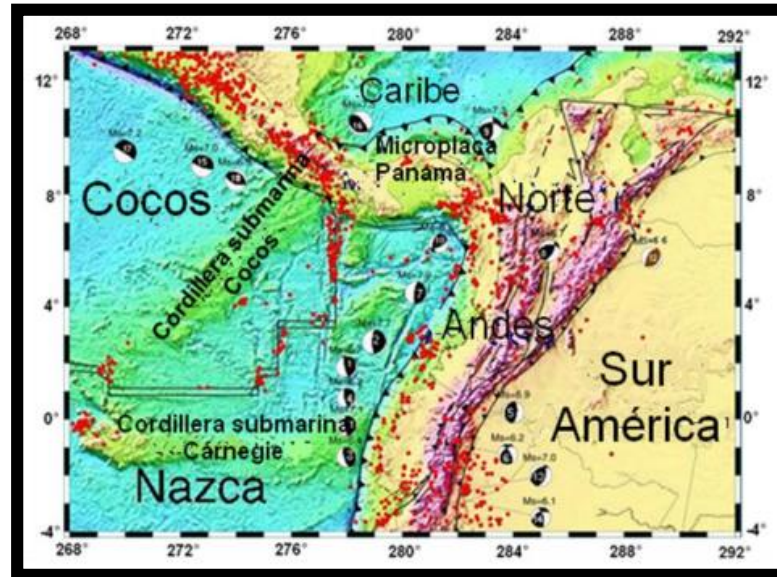
Las escasas dataciones realizadas dan como resultado edades radiométricas de  $53 \pm 1,8$  Ma por el método K–Ar (Vesga y Barrero, 1978) sobre una muestra tomada en la carretera Mariquita–El Hatillo y  $54.6 \pm 0.7$  Ma por el método U–Pb en zircón (Bayona et al., 2012) correspondiendo ambas al lapso Paleoceno–Eoceno.

### 4.3 MARCO TECTÓNICO

El territorio colombiano es dominado por la convergencia de las placas tectónicas Nazca y Caribe de afinidad oceánica y la Suramérica de carácter continental. La interacción entre estas placas constituye la principal fuente generadora de esfuerzos que se propagan hacia el continente, dando lugar a diversos estilos estructurales y complejos fallamientos, desarrollando de esta manera un ambiente geológico muy complejo.

La región Colombiana está sometida a un estado de esfuerzos compresivos a causa de la convergencia oblicua entre las placas Nazca y Suramérica, que ocasionan que el vector de convergencia de la placa Nazca se descomponga en dos vectores de acuerdo a su relación geométrica con la dirección de la fosa y originan tensores de esfuerzos que regionalmente varían según esta relación (FIGURA 5) (Mejía, 2012). El primer vector es ortogonal a la margen y favorece el acortamiento e inversión de las estructuras NE–SW en el continente (vector de deformación) y el segundo, paralelo a la margen (vector de desplazamiento), es transferido dentro del continente y genera nuevas estructuras de cizalla ENE–WSW además de facilitar la reactivación de fallas NW–SE pre-existentes (Mejía, 2012).

**FIGURA 6.** Esquema tectónico de Colombia. Tomado de Mejía, 2012 que lo tomó de Trenkamp et al., 2002.



**4.4.1 Modelo evolutivo tectonomagmático.** Los mayores rasgos morfotectónicos del Tolima son las cordilleras Central y Oriental y el Valle del Río Magdalena, estos corresponden con accidentes relacionados con posibles fenómenos distensivos en el Jurásico y compresivos en el Cenozoico (Oligoceno–Mioceno), a los que se asocia el levantamiento de las Cordilleras y la depresión del Magdalena (INGEOMINAS, 2001).

Durante el Triásico–Jurásico se desarrollan una serie de cuerpos intrusivos con características de batolito y stock, principalmente de composición granodiorítica y cuarzomonzonítica, que fueron seguidas por erupciones de material félsico (riodacita). Posteriormente, a la actividad ígnea, se originó un sistema de fallas cuya dirección predominante es NW y que fue cubierto por

sedimentos marinos del Cretácico. Posterior reactivación y reorientación han obscurecido en gran parte éste fenómeno (Barrero, 1969).

Con la apertura del Océano Atlántico Sur a comienzos del Cretácico hubo una nueva transgresión marina. Al oriente de la Cordillera Central se depositaban extensas capas de sedimentos provenientes de la erosión de esta misma, mientras al occidente continuaba la sedimentación de mar abierto y vulcanismo diabásico submarino. Desde el Cretácico Inferior hasta la actualidad han ocurrido diversos eventos tectono–magmáticos sobre la Cordillera Central, los cuales se han podido agrupar en cinco fases (Barrero, 1969):

- Erupción de lavas predominantemente básicas. Durante la fase de levantamiento del ciclo, este vulcanismo inicial (de fisura) está íntimamente relacionado con el nacimiento de la Falla de Romeral.
- Aparece una fractura de enorme longitud, la Falla de Romeral, que corre a lo largo del flanco occidental de la Cordillera Central desde el Golfo de Guayaquil en el sur, hasta Carmen de Bolívar en el norte. En esta época también nace el sistema de Fallas de Palestina, una importante estructura tectónica, al lado oriental de la Cordillera Central, que separa las rocas del arco de islas de las continentales.
- Inyección de plutones ultrabásicos y básicos durante el estado inicial del plegamiento, a partir de este momento la Cordillera Central evoluciona, de área emergida, a un alto ridge sobre el cual se depositan por primera vez sedimentos Cretácicos (Aptiano) en la Cordillera.
- Posteriormente se desarrolla un importante sistema de fallas, con dirección predominante NE y NW (Fallas de Palestina y Otú-pericos).
- Desarrollo de batolitos cuarzodioríticos en la parte central de la Cordillera. Como consecuencia se origina un intenso fracturamiento y se produce reactivación y reorientación tectónica de las fallas existentes.

- Erupciones superficiales de basaltos, andesitas y riolitas, posteriores al plegamiento pero contemporáneas al solevamiento final de la Cordillera. Esta serie volcánica a diferencia de la primera ocurre en la zona axial de la Cordillera y se empiezan a formar durante el Oligoceno–Mioceno, época en la cual la placa oceánica de Nazca inició el proceso de subducción bajo la placa Sudamericana generando los Andes Colombianos, con desarrollo de grandes sistemas de fallas.

**4.4.2 Geología estructural.** La zona de estudio se encuentra estructuralmente influenciada por los sistemas de fallas con dirección NNE–SSW (Falla de Palestina N30°E), los sistemas transversales de direcciones ENE–WSW (Falla Santa Rosa N60°E) y la falla Mulatos con dirección N–S. A continuación se describirán cada una de estas fallas:

- **Falla de Palestina:** Pertenece al Sistema de Fallas de Palestina, considerado por algunos autores como un producto de la subducción oblicua de la placa Nazca bajo Suramérica, cuyas características estructurales están relacionadas con mecanismos tipo “desgarre”, clásicos en la mecánica de partición de la deformación en condiciones de subducción oblicua (Barrero, 2000; Cediel et al., 2002).

Definida por Feininger (1970) como una falla de rumbo dextralateral, de más de 300 Km de longitud, localizada en el noroccidente del Tolima, sobre la Cordillera Central. A ella están asociados los focos volcánicos del Complejo Ruiz–Tolima. Según Collins et al. (1981), tienen evidencias de desplazamiento sinistral en el Cuaternario, contrarios al movimiento dextral, del Paleógeno, que indican, en su concepto, reorientaciones importantes en algún momento del Cenozoico Tardío (INGEOMINAS, 2001).

- **Falla Santa Rosa:** Definida por Guzmán et al. (1998) como una falla inversa dextral por su paralelismo con la Falla Ibagué. Se encuentra localizada al norte de Pereira–Dosquebradas, pasa por Santa Rosa de Cabal y cruza la Cordillera Central al norte del Volcán Nevado del Ruiz, antes de unirse con la Falla Palestina en vecindad del municipio de Herveo (Mejía, 2012). De acuerdo con rasgos morfológicos, esta estructura es continua hasta el sitio donde se encuentra con el segmento principal de la Falla de Palestina. La Falla Santa Rosa, ha influido en la evolución de los valles de los ríos San Eugenio, Campoalegre y Molinos, también controla el cauce del río Gualí (Mejía, 2012).
- **Fallas de Mulatos:** Definida por Feininger et al., (1972), con desplazamiento dextral lateral de más de 15 km. Algunos autores consideran que el desplazamiento inicial fue de tipo inverso y cambió a normal después de la deposición de la Formación Mesa, a finales del Neógeno e inicios del Cuaternario.

## RELACIONES DE CAMPO

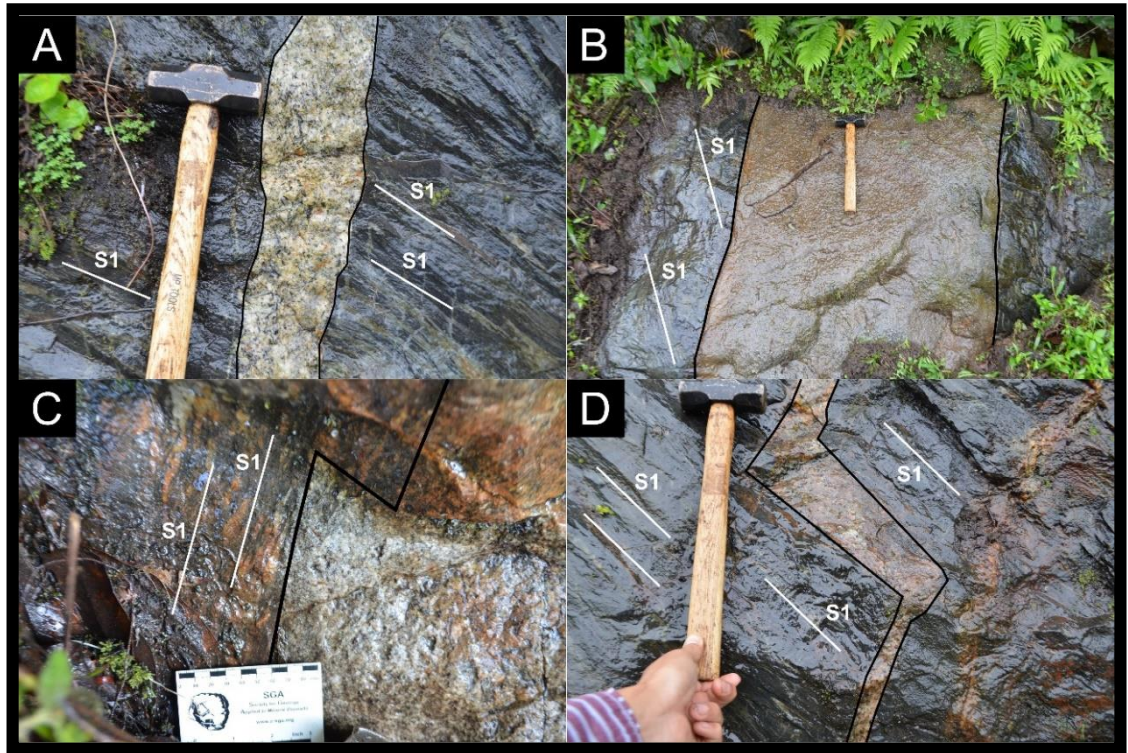
El Stock del Hatillo se encuentra intruyendo un conjunto de esquistos cuarzo biotíticos y esquistos negros grafitosos pertenecientes al Complejo Cajamarca. Los principales afloramientos donde es posible observar la aureola de contacto se encuentran en un transecto de la vía entre los municipios Mariquita y Fresno; esta aureola presenta un espesor de aproximadamente 600 metros (en la zona de estudio). Allí es posible determinar la zona de borde generada por el contacto intrusivo, donde la interface entre el granito y las unidades que componen la roca caja es gradacional, pasando a través de una aureola de contacto conformada por un grupo de rocas en donde el metamorfismo termal está sobreimpuesto al

metamorfismo regional; en estas rocas (de la aureola termal) se evidencia la interacción térmica, física y química entre el magma y las rocas encajantes.

El plutón consiste en cuarzo–diorita biotítica equigranular, de tamaño de grano grueso que disminuye hacia la zona de contacto con la roja caja, donde además son identificables a escala mesoscópica algunos cristales de anfíboles. El contacto es neto de manera general y en ocasiones se evidencian contactos de inyección fusión *in-situ*. Un tipo de interacción física entre el intrusivo y la roca caja es evidenciada por la penetrativa inyección de: a) diques, que se presentan perpendiculares y/u oblicuos respecto a la dirección de foliación (FIGURA 6 A–B), b) sills, que son casi paralelos a las direcciones de foliación (FIGURA 6 C–D) y c) venas, donde varias de estas estructuras están plegadas o cizalladas (FIGURA 7). Estas tres estructuras intruyen la roca caja a lo largo de la aureola a través de las zonas de debilidad. Las fábricas magmáticas tales como lineamientos y foliaciones son observadas localmente en afloramientos cercanos al borde del contacto, dichas estructuras son escasamente encontradas y cuando lo son muestran una clara textura con una débil orientación preferencial, además no es posible identificar una tendencia estadísticamente consistente.

Las litologías aflorantes vistas dentro de la zona cercana al contacto son las hornfelsas, que aparecen en la parte más interna de la aureola. La fábrica de la roca caja inicial está, en su gran mayoría, completamente borrada, estas hornfelsas se caracterizan a nivel mesoscópico por un tamaño de grano muy fino y su alta tenacidad principalmente, debido muy posiblemente a la recristalización de los componentes en los minerales que conforman las rocas esquistosas del Complejo Cajamarca. Estas rocas exhiben pliegues con planos de charnela aproximadamente verticales que son de manera general paralelos al contacto entre la unidad metamórfica (hornfelsas) y la unidad ígnea (Stock del Hatillo) (FIGURA 7).

**FIGURA 7.** A) Dique cortando casi perpendicularmente las estructuras  $S_1$ . B) Dique cortando oblicuamente las estructuras  $S_1$ . C) Silo cortando paralelamente las estructuras  $S_1$ . D) Estructura “dique–silo–dique”.



**FIGURA 8.** Afloramientos exhibiendo venas plegadas intruyendo tanto la roca caja como el cuerpo ígneo.



En la zona de borde, muy cerca al contacto con el plutón (FIGURA 8) fragmentos de la roca caja recristalizada se observan embebidos dentro del plutón, estos xenolitos presentan formas poligonales, irregulares y angulares; algunos de estos comenzaban a presentar fusión parcial.

**FIGURA 9.** Evidencias de stoping, en donde fragmentos de la roca caja fueron engullidos por el cuerpo ígneo. Además se observa el contacto neto entre las hornfelsas y el cuerpo intrusivo.



## 5. ANÁLISIS ESTRUCTURAL

El análisis estructural contempla un fuerte seguimiento y adquisición de datos de estructuras geológicas a escala de afloramiento. Dicho análisis se compone de tres fases: el *Análisis geométrico* que se encarga de describir el estado deformado de las estructuras (localización, forma, tamaño y orientación); el patrón de movimientos y/o desplazamientos dentro del material que producen las estructuras (traslación y deformación) llamado *Análisis cinemático*; y por último, el *Análisis dinámico* que se refiere al patrón de fuerzas dentro del material y la relación entre esfuerzo y deformación durante el desarrollo de las estructuras (Marrett & Peacock, 1999).

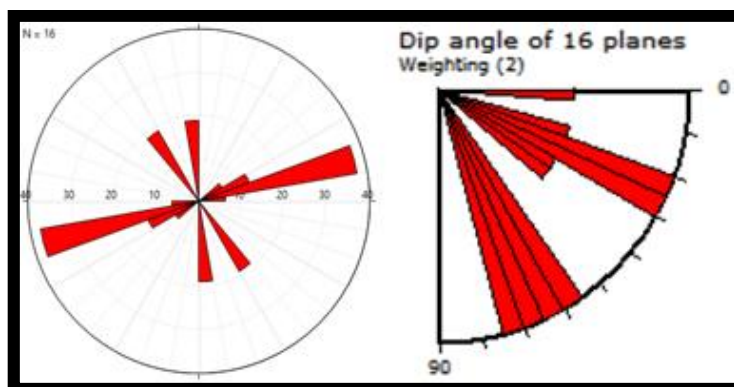
En general los datos requeridos para un análisis estructural corresponden tanto a datos planares (azimut de rumbo o de buzamiento e inclinación) como a datos lineales (Pitch, Plunge y sus direcciones). Para el presente trabajo sólo se utilizaron datos planares, correspondientes a foliación, diaclasas y diques.

La toma e interpretación de datos planares es de suma importancia a la hora de caracterizar estructuralmente una zona geológica, pues ayudan a definir la dirección de los tensores de esfuerzos relacionados con la deformación que se está caracterizando. Para ello mediante el uso de softwares especializados se generaron distintos gráficos que muestran dichas direcciones, descritos a continuación:

- **Diagrama de rosas:** Es un diagrama sencillo para visualizar las direcciones de los rumbos de estructuras tabulares (diques) y de planos tectónicos (diaclasa, fallas). Se podría describir como un histograma redondo, lo que significa que los rangos se ubican al margen del círculo desde arriba (Norte o 0°) hacia abajo (Sur o 180°) en sentido horario. La cantidad de datos respecto a un rango se representan en el eje, desde el centro (0% de datos en dicho rango) hacia el margen (como 100% de datos en dicho rango).

Solamente es necesario calcular la mitad de los rangos (el medio círculo) porque el rumbo es un elemento bidireccional y automáticamente cubre el rango opuesto (FIGURA 10).

**FIGURA 10.** Diagrama de rosas mostrando las principales tendencias (izquierda) e inclinaciones (derecha) de los datos trabajados.

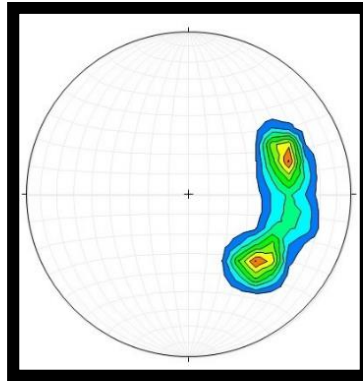


- **Diagrama de Contornos:** si se quiere obtener una representación más precisa de las variaciones en orientación, hay que cuantificar el número de puntos por unidad de área de la proyección. Esta cuantificación debe efectuarse en una falsilla que conserve el área, para de esta manera reconocer variaciones en la orientación preferente del elemento estructural medido. La mejor manera de representar estas variaciones en la concentración de puntos, es dibujando líneas de contornos que delimitan áreas determinadas (Vich y Gómez, 2010).

Una línea de contorno en una proyección que conserva el área, separa zonas dentro de la proyección en las que las densidades de puntos se mantienen dentro de la misma área. Estas densidades se miden como porcentajes del número total de puntos por 1% del área del estereograma y se dibujan las líneas de contornos separando zonas en las que el porcentaje de puntos

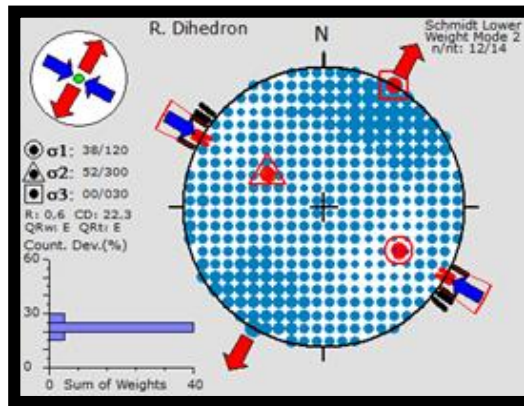
totales por 1% de área tenga un valor específico. Así obtenemos lo que se denomina *Diagrama de Contornos* (Vich y Gómez, 2010) (FIGURA 11).

**FIGURA 11.** Diagrama de contornos mostrando un plegamiento asimétrico de las estructuras (foliación) presentes en una de las estaciones trabajadas.



- **Diedros Rectos:** Este análisis se basa en limitar para cada plano las zonas del espacio compatibles en compresión y distensión, superponiendo estos campos en una proyección estereográfica (Vich y Gómez, 2010). El esfuerzo principal ( $\sigma_1$ ) queda contenido en los diedros de compresión y el menor ( $\sigma_3$ ) en los diedros de distensión, los cuales son diferenciados por colores según cada software, en este caso serían azul  $\sigma_1$ , verde  $\sigma_2$  y rojo  $\sigma_3$  (FIGURA 11).

**FIGURA 12.** Esquema del método de diedros rectos, mostrando las principales zonas de compresión (flechas azules) y de tensión (flechas rojas) de los datos trabajados.



## 5.1 PROCESAMIENTO DE DATOS ESTRUCTURALES

Este procesamiento se realizó a partir de los datos recolectados en campo de planos de diaclasas, foliaciones y diques por estaciones (ANEXO 1) utilizando el software Stereonet 9.8.6 con el cual se graficaron estereogramas, diagramas de contorno y rosetas y, el software WinTensor 5.0.1 que se utilizó para graficar los diagramas de diedros rectos.

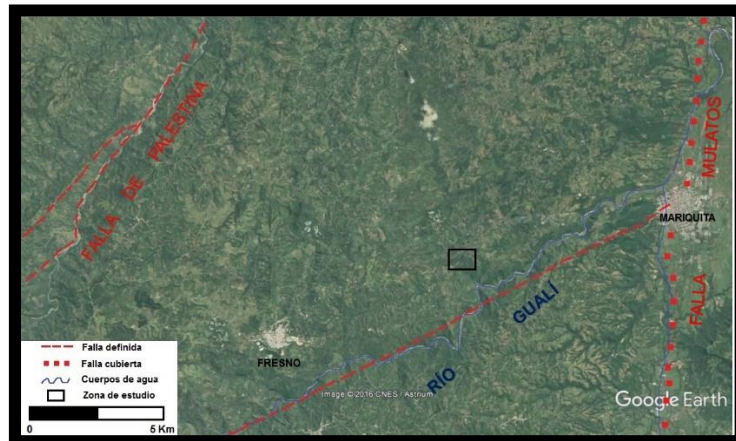
**5.1.1 Diaclasas.** Las diaclasas son arreglos regulares de fracturas a lo largo de las cuales ha habido poco o ningún desplazamiento a la escala de observación, son las estructuras frágiles más comunes (McClay, 1987), se forman como resultado de esfuerzo externo (tectónica) o interno (termal o residual) (Fossen, 2010).

Teniendo en cuenta la importancia de las diaclasas debido a su origen por deformación frágil, se elaboró un muestreo sistemático de las mismas (en las estaciones donde fue posible) con el fin de determinar direcciones preferenciales de fracturamiento y los esfuerzos asociados.

En el procesamiento de los datos de diaclasas, se ingresaron los datos de cada plano como fracturas de tensión y a partir de estos se generaron los estereogramas, diagramas de rosa y diedros rectos. Los resultados del

procesamiento se muestran en la TABLA 2, aquí se aprecia que existe un patrón principal de diaclasamiento en dirección NE–SW, donde se pueden diferenciar patrones con actitudes NNE–SSW paralelos a la orientación de la Falla de Palestina y patrones ENE–WSW paralelos con la orientación de la Falla Santa Rosa que controla el cauce del Río Gualí (FIGURA 12). También se pueden diferenciar dos patrones secundarios (?), uno con dirección N–S paralelo a la Falla Mulatos y otro con dirección promedio NW–SE (que es perpendicular a los ejes de charnela de los sinformes y antiformes, y a su vez casi paralelo a los planos de foliaciones), posiblemente desarrollado durante la inflación *in-situ* (Ballooning) del plutón. Por otra parte las gráficas de diedros rectos exhiben, principalmente, una dirección de compresión promedio en sentido casi NW–SE.

**FIGURA 13.** Esquematzación del control estructural regional que presenta la zona de estudio. Tomado y modificado de Google Earth.

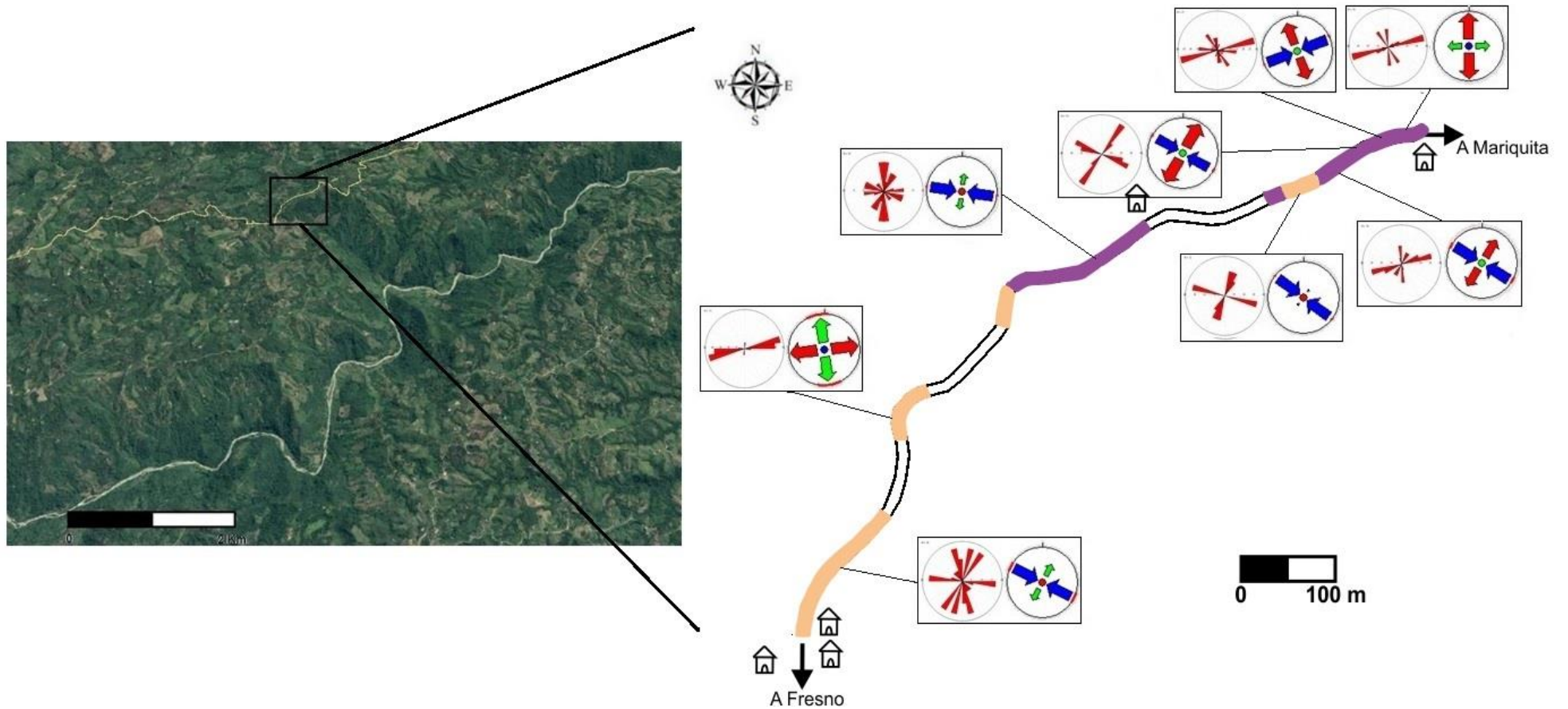


Al ubicar tanto los diagramas de rosa como los de compresión sobre la poligonal abierta realizada durante el proyecto (FIGURA 13) se tiene una mejor visualización del sentido del esfuerzo principal de compresión  $\sigma_1$ , el cual presenta una dirección de deformación promedio casi NW–SE.

**TABLA 2.** Estereograma y diagramas de rosa y diedros rectos para los datos recolectados en campo, analizados por estación.

ESTACIÓN	N° DE DATOS	ESTEREOGRAMA	DIAGRAMA DE ROSAS	DIEDROS RECTOS
D2-D3	16			
D3-D4	21			
D4-D5	14			
D5-D6	16			
D6-D7	12			
D13-D14	20			
D24-D25	13			
D29-D30	18			

**FIGURA 14.** Diagramas de rosa y de compresión de los datos medidos por estaciones a lo largo de la poligonal abierta de la vía.



**5.1.2 Foliaciones.** Las foliaciones son una estructura planar homogéneamente distribuida en una roca, que hacen que las rocas se rompan a lo largo de éstas estructuras aproximadamente paralelas (Mead, 1940). Según el Léxico Tectónico Internacional (IGCP) las foliaciones corresponden a una anisotropía planar cerradamente espaciada, tanto primaria como secundaria de las rocas. Existen tres tipos de foliación:

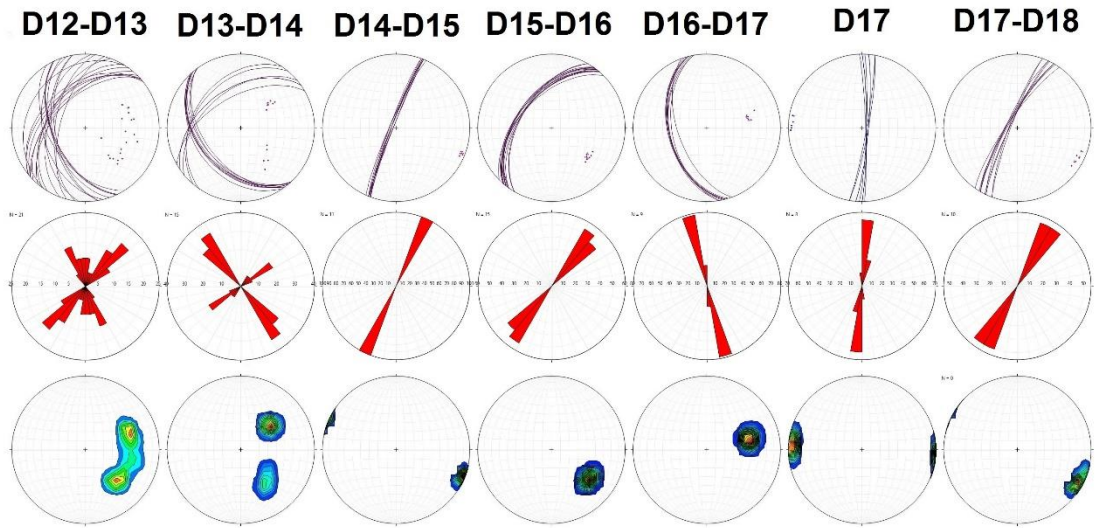
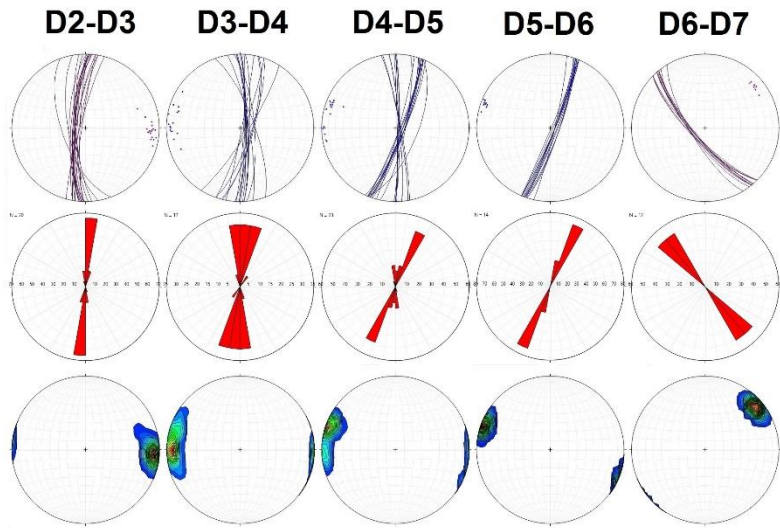
- **Primaria:** Estructura relacionada al proceso original formador de la roca, por ejemplo la estratificación o las láminas que muestran el flujo en rocas ígneas.
- **Diagenética:** Por paralelismo de granos de mica debido a la compactación diagenética por carga litostática.
- **Secundaria:** Debido a la deformación posterior a la formación de la roca, por ejemplo el clivaje, la esquistosidad y/o el bandeamiento.

La elaboración de un muestreo sistemático de las foliaciones presentes en la zona, en las estaciones donde fue posible hacerlo, fue necesario para visualizar el sentido de los planos de foliación y el posible plegamiento (antiformes y sinformes) presente en el área.

En el procesamiento se ingresaron los datos de cada plano de foliación para generar los estereogramas y diagramas de polos, para luego, en base a estos, generar los diagramas de rosa y de contornos, respectivamente. Los resultados del procesamiento se muestran en la FIGURA 14A. En la FIGURA 14B se puede observar que la roca caja, dentro de la zona de borde, se presenta altamente deformada exhibiendo sinformes y antiformes localmente isoclinales o apretados. Las foliaciones  $S_1$  con actitudes en rumbo NNE–SSW e inclinaciones abruptas se curvan casi paralelamente al contacto con el cuerpo ígneo.

En los diagramas de rosa y contornos de la FIGURA 14A se aprecia que dentro de los antiformes y sinformes descritos anteriormente se presenta un “replegamiento”, mejor observado en las estaciones cercanas al contacto con el cuerpo ígneo, aquí es común que los diagramas de rosa exhiban dos orientaciones opuestas (a diferencia de las estaciones donde no hay “replegamiento” que solo se presenta una orientación), mientras que los contornos se distribuyen de forma alargada mostrando así que la zona está plegada (replegada en este caso). Por otro lado los contornos también nos muestran que hubo rotaciones principalmente en  $\Delta 6-\Delta 7$ ,  $\Delta 14-\Delta 15$  y  $\Delta 16-\Delta 17$ .

**FIGURA 15.** Comportamiento de las foliaciones a lo largo de la zona de estudio, donde son apreciables los plegamientos sufridos por la roca caja recristalizada a causa del emplazamiento del cuerpo ígneo.



{ DOMINIO ESTRUCTURAL 1 }

DOMINIO ESTRUCTURAL 2

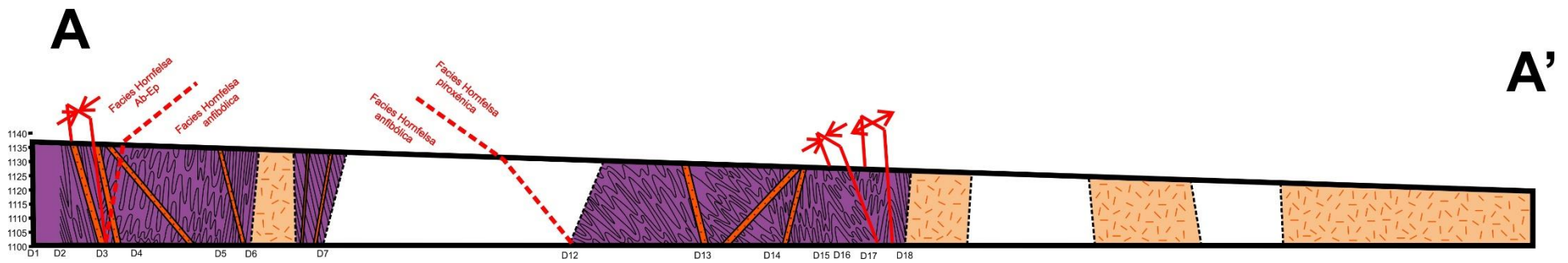
{ DOMINIO ESTRUCTURAL 3 }

{ DOMINIO ESTRUCTURAL 4 }

DOMINIO ESTRUCTURAL 5

{ DOMINIO ESTRUCTURAL 6 }

{ DOMINIO ESTRUCTURAL 7 }

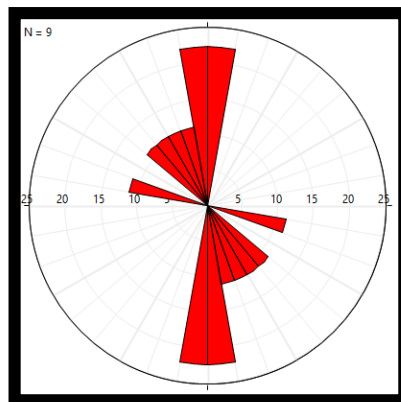


**FIGURA 15.** Corte estructural de la zona de estudio

**5.1.3 Diques.** Los diques son estructuras tabulares formadas por el ascenso y posterior cristalización del magma por zonas de debilidad presentes en la roca caja causadas principalmente por esfuerzos tectónicos.

Sobre la vía que comunica a los municipios Mariquita y Fresno, se realizó la toma de datos de orientación de los planos de diques y venas. Estos datos fueron plasmados en un diagrama de rosa (FIGURA 15), en el cual a pesar de que hay una pequeña dispersión en los datos, se resalta una orientación principal de los planos diques en dirección casi NW–SE. Tentativamente se corrobora que la dirección del tensor de esfuerzo principal  $\sigma_1$  (TABLA 2 y FIGURA 13) podría estar contenida en el mismo sentido del juego de venas dominante, a modo más preciso entre los ángulos  $325^\circ$ –  $335^\circ$ .

**FIGURA 17.** Diagrama de Rosas mostrando la tendencia en el rumbo de los planos de diques que se encuentran cortando la roca caja.



## 6. PETROGRAFÍA

Para cada una de las unidades litológicas presentes en la zona se recolectaron muestras de mano a lo largo de la transecta establecida y se definió cuáles de estas eran las más apropiadas para realizar el análisis petrográfico, mediante secciones delgadas, con el fin de precisar items como la clasificación litológica, las texturas y microestructuras. En total se recolectaron treinta muestras distribuidas a lo largo de treinta y cinco estaciones de las cuales se realizaron catorce secciones delgadas, pulidas y sin cubre objetos, cuyo análisis petrográfico se efectuó utilizando el método de conteo de puntos (470 puntos en promedio) y para algunas de ellas el diagrama QAPF de Streckeisen (1976) para la clasificación de rocas plutónicas con contenido de minerales máficos menor al 90% del total de la muestra, siguiendo la metodología mostrada a continuación:

- *Ejemplo para muestra CSH\_6\_1:*

Se realizó un conteo de 487 puntos a la lámina delgada CSH\_6\_1 y en base a estos se obtuvieron los siguientes resultados:

**TABLA 3.** Composición mineralógica y su respectivo porcentaje para la sección CSH\_6\_1.

CONTEO		
MINERAL	PUNTOS	PORCENTAJE
Qz	197	40.5 %
Pl	173	35.5 %
Bt	64	13.1 %
Afs	26	5.3%
Opq	20	4.1 %
Ser	7	1.4 %
TOTAL	487	99.9 %

El porcentaje mineralógico presente en la sección se obtuvo aplicando una regla de tres sencilla, sabiendo que 487 (total de puntos) equivalen al 100%:

$$\begin{array}{l} 487 \text{ puntos} \qquad \qquad \qquad \rightarrow \qquad \qquad \qquad 100\% \\ 197 \text{ puntos Qz} \rightarrow \qquad X \qquad . \end{array}$$

$$X = 40.5\% \text{ Qz}$$

Luego se realizó un recálculo de los porcentajes de cuarzo (Q), feldespato alcalino (A) y plagioclasa (P) (TABLA 4); haciendo, nuevamente, una regla de tres simple pero esta vez el equivalente a 100% es 396 puntos.

$$\begin{array}{l} 396 \text{ puntos} \qquad \qquad \qquad \rightarrow \qquad \qquad \qquad 100\% \\ 197 \text{ puntos Qz} \rightarrow \qquad X \qquad . \end{array}$$

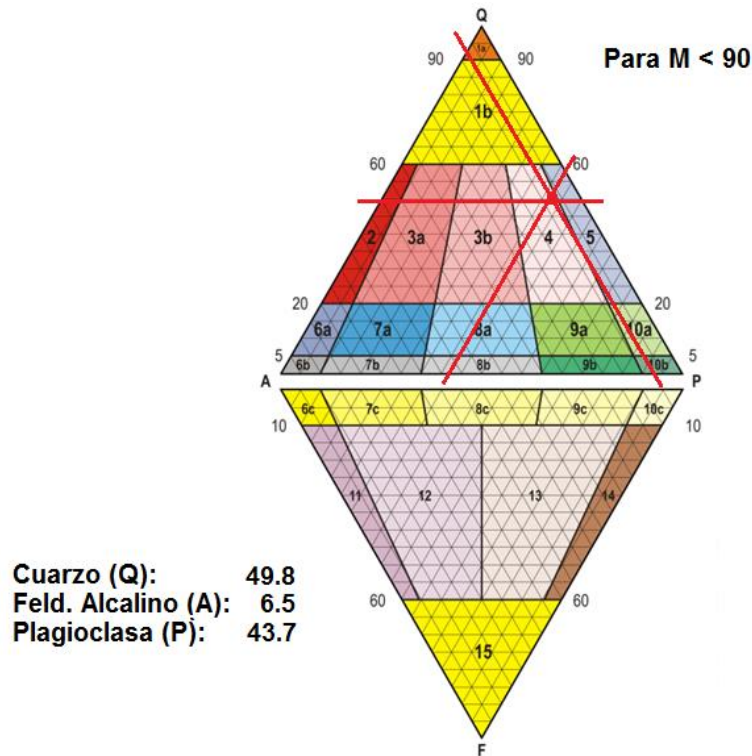
$$X = 49.8\% \text{ Qz}$$

**TABLA 4.** Recalculo mineralógico necesario para determinar la litología correspondiente a la sección CSH\_6\_1.

RECALCULO	
MINERAL	PORCENTAJE
Q	49.8 %
A	6.5 %
P	43.7 %
TOTAL	100%

Posteriormente se ubican, los porcentajes del recálculo, sobre el diagrama de Streckeisen (1976) (FIGURA 16). De esta manera se determinó que la muestra de roca corresponde a una *Granodiorita*.

**FIGURA 18.** Triángulo de Streckeisen (1976) indicando el área que corresponde a la sección CSH\_6\_1.

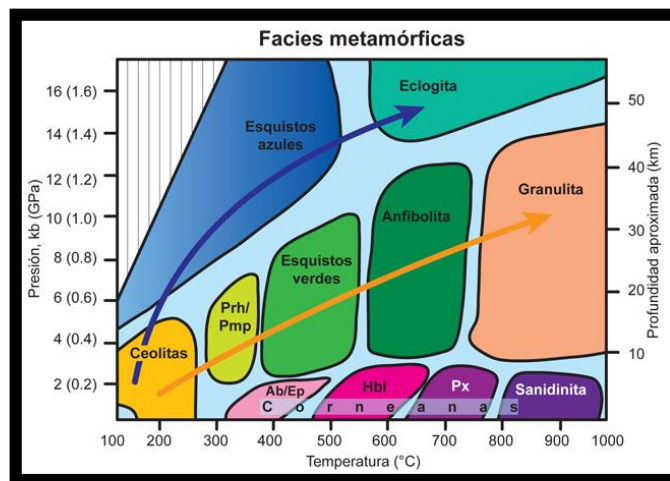


En la zona de trabajo afloran, a grandes rasgos, dos unidades litológicas de carácter ígneo–metamórfico, que se distribuyen gradualmente a lo largo de la zona. Desde el NE y en sentido SW nos encontraremos primeramente con la unidad metamórfica correspondiente a las hornfelsas, que fueron generadas a causa del metamorfismo de contacto sobre esquistos negros–grafitosos del Complejo Cajamarca, luego de estas hornfelsas nos encontramos con la unidad ígnea (Stock del Hatillo) causante del metamorfismo térmico, esta unidad corresponde de forma general a una cuarzo–diorita que varia a granodiorita; además de estas dos unidades, son frecuentes inyecciones de diques y silos de espesores variables, localmente se desarrollan venas plegadas por cizalla debidos a la acción de la foliación de transposición ( $S_2$ ).

## 6.1 HORNFELSAS

Roca metamórfica de alta temperatura y baja presión (FIGURA 17), foliada con tamaño de grano fino a muy fino. Se caracterizan por presentar texturas nematoblásticas en presencia de anfíbol, al azar (*random*) en biotita y moscovita y granoblástica en presencia de cuarzo, plagioclasa, epidota y piroxeno, los cuales también pueden presentarse como microlitones. En términos generales pueden ser nematogranoblásticas, granonematoblásticas o lepidogranoblásticas. Casi todas las muestras de esta litología presentan una alternancia de bandas paralelas, unas máficas ricas en Amp y otras félsicas compuestas por Qz, Pl, Ep, Opx y Cpx, principalmente (FIGURA 18). Cabe resaltar que en la mayoría de las muestras, las bandas máficas presentan una marcada orientación mineral a causa de los anfíboles (FIGURA 19).

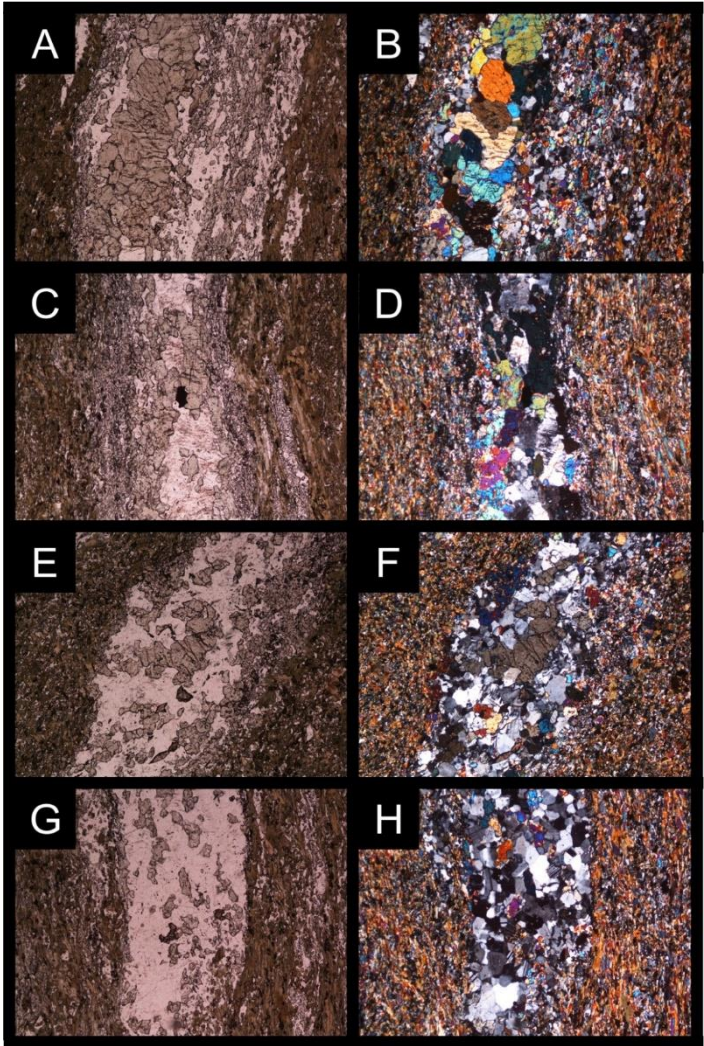
**FIGURA 19.** Facies metamórficas



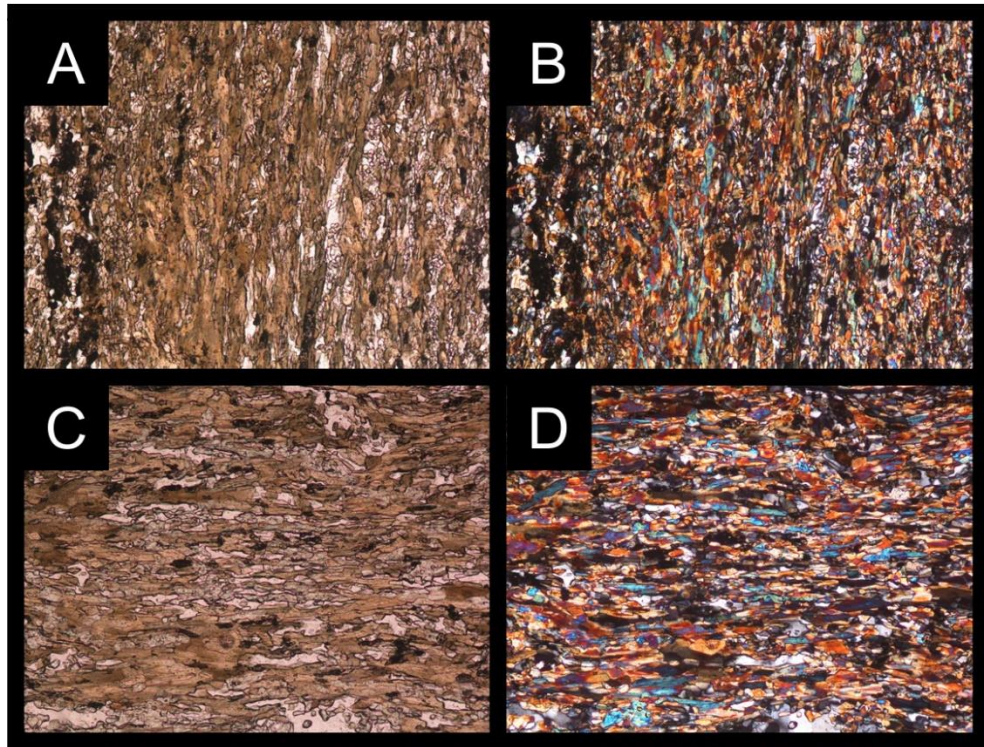
El metamorfismo predominante en la zona es de tipo regional, pero cerca al lugar donde aparece la unidad ígnea hay sobreimposición de metamorfismo de contacto, apreciable por las hornflesas generadas en aproximadamente 600 metros de

extensión. Las hornfelsas a lo largo del transecto estudiado pueden dividirse en tres facies composicionales de acuerdo con su proximidad al plutón (descritas más adelante)

**FIGURA 19.** Hornfelsas. (A, C, E y G) alternancia de bandas máficas y félsicas de algunas de las muestras, PPL con aumento de 5X. (B, D, F y H) misma anterior en XPL.



**FIGURA 20.** Textura nematoblástica en anfíbol, también se puede observar la fase de deformación perteneciente a  $S_1$  presente en los mesosomas. (A y C) en PPL con objetivo de 10X. (C y D) misma anterior en XPL.



A continuación se describirán las principales características mineralógicas de los cristales presentes en las secciones delgadas realizadas para ésta litología:

*ANDALUCITA (And):* Se presenta con forma euhedral–idiomórfica principalmente, y hábito prismático, algunos cristales presentan bordes irregulares y/o inclusiones de otros minerales (opacos y biotita por lo general). No exhibe pleocroísmo. Presenta relieve medio. Sus colores de interferencia van hasta grises de primer orden.

*ACTINOLITA (Act):* Se presentan con forma euhedral–idiomórfica y mayoritariamente con hábito prismático largo, en algunos casos los cristales (pocos) se presentan con hábito granular. El pleocroísmo que exhiben es débil,

variando desde amarillo pálido casi incoloro hasta un verde pálido o verde esmeralda. Presenta un relieve medio, con tamaño de grano muy fino a fino (de largo). Sus colores de interferencia llegan hasta azul–magenta de principios de segundo orden.

*BIOTITA (Bt)*: Se presenta en formas subhedrales como individuos tabulares elongados y terminaciones irregulares o dentadas, el tamaño de cristal varia de muy fino a medio (de largo). Presenta un fuerte pleocroísmo que varía desde castaño casi incoloro, hasta unas tonalidades rojizas–marronáceas y el relieve es medio. Además algunos cristales se encuentran alterados a clorita.

*CLINOPIROXENO (Cpx)*: Se presenta con forma alotriomórfica granular aunque algunos cristales exhiben por su sección longitudinal un hábito prismático. El pleocroísmo que exhiben los cristales es muy débil variando desde un pardo–rosado o verdosa para algunos o un pardo casi incoloro hasta verde–azulado muy pálido para otros. La exfoliación no es muy clara pero en algunos cristales se pueden apreciar dos sistemas intersectándose a ángulos próximos a 90°. Presenta un relieve alto, con tamaño de grano fino a medio. Para el caso del diópsido–hedenberguita los colores de interferencia llegan hasta la mitad del segundo orden, siendo generalmente azules; mientras para la augita llega hasta finales del primer orden.

*CLORITA (Chl)*: Su presencia se observó en las muestras con contenido de biotita y anfíboles, por ende se dice que su presencia es debido al producto de la alteración de estos. Cuando se forma a partir de la biotita se encuentra en cristales de tamaño muy fino, presenta un relieve moderado y colores de interferencia azules oscuro de segundo orden; mientras que cuando lo están por alteración de los anfíboles, principalmente en la facie hornblenda corneana, varios cristales de clorita estan enmascarados por los colores de interferencia de los

mismos, sin embargo el resto de propiedades es el característico de este mineral de alteración.

*CUARZO (Qz)*: Agregados granulares incoloros con formas subhedrales y bordes irregulares. No presenta pleocroísmo, su relieve es bajo y el tamaño de grano es fino a muy fino. El ángulo de extinción es oblicuo y algunos cristales presentan una extinción ondulosa como respuesta a deformaciones.

*EPIDOTA (Ep)*: Se presenta mayoritariamente como agregados granulares. El pleocroísmo es muy débil, yendo desde casi incoloro hasta unas tonalidades verde–amarillentas pálidas y algunos rosa pálido. Presenta un relieve muy alto, con tamaño de grano fino a medio. Sus colores de interferencia, en tonos muy brillantes, pueden llegar hasta finales del tercer orden.

*HIPERSTENA (Hyp u Opx)*: Se presenta mayormente en sección basal con forma subhedral y hábito de cuadrado biselado. El pleocroísmo que exhiben estos cristales es muy débil variando desde casi incoloro hasta un verde muy pálido. En algunos cristales la exfoliación es apreciable como dos sistemas intersectándose a un ángulo cercano a 90°. Presenta un relieve alto, con tamaño de grano fino a medio. Sus colores de interferencia llegan hasta grises y/o amarillos de primer orden y su característico ángulo de extinción recto.

*HORBLENDA (Hbl)*: Se presenta mayoritariamente como agregados granulares pero algunos cristales presentan forma euhedral–idiomórfica y hábito prismático corto. El pleocroísmo más común que exhiben los cristales varía desde amarillo pálido pasando por verde hasta llegar a un verde–castaño oscuro o café, aunque hay otros cristales del mismo mineral que lo presentan solo hasta el verde, posiblemente debido al inicio de una alteración. Los cristales con hábito prismático corto muestran dos direcciones de exfoliación a un ángulo de 120°. Presenta un relieve moderado a alto, con tamaño de grano muy fino a fino. Sus

colores de interferencia llegan hasta amarillo–naranja de mitad de segundo orden.

*MOSCOVITA (Ms)*: Se presenta en formas subhedrales como individuos tabulares elongados y terminaciones irregulares o dentadas, el tamaño de cristal varía de muy fino a medio (de largo). No presenta pleocroísmo y el relieve es medio. Sus colores de interferencia van hasta azul muy brillante de segundo orden. Adicionalmente, este mineral solo se observa en las rocas corneanizadas en la periferia de la aureola de contacto, o las zonas más alejadas del contacto con el Stock y por lo general junto a biotita.

*PLAGIOCLASA (Pl)*: Se presenta como agregados granulares y tamaños de cristal fino a muy fino. No presenta pleocroísmo y el relieve es bajo, además muestra un maclado polisintético con extinción oblicua y no es visible zonación alguna.

*RUTILO (Rt)*: Se observa como agregados granulares, y tamaños de cristal muy fino. Su pleocroísmo varía de amarillo a marrón. Relieve muy alto o extremo. Presenta colores de interferencia altos, sin embargo son ocultados por el color del mineral.

*SERICITA (Ser)*: Al igual que la clorita, su presencia es producto de alteración de minerales, principalmente de la Pl. Se encuentra comúnmente en formas anhedrales con tamaños de cristal muy fino, pero en masas algo considerables.

*SILIMANITA (Sil)*: Se observa de forma acicular (variedad fibrolítica), también puede observarse como inclusiones en cuarzo de tamaño muy fino, no presenta pleocroísmo y su relieve es de moderado a alto. Sus colores de interferencia llegan hasta amarillo de segundo orden. La presencia de este mineral es notable hasta las facies hornfelsa anfibólica.

*TITANITA (Ttn)*: Se presenta como mineral accesorio con forma euedral idiomórfico, de aspecto lenticular que confieren sección de rombo agudo. No presenta pleocrísmo y su color es marrón con relieve muy alto. Sus colores de interferencia son de órdenes elevados con tonalidades algo cremosas.

Como ya se había mencionado anteriormente las hornfelsas pueden dividirse en tres facies composicionales de acuerdo con su proximidad al plutón, desde la más lejana a la más cercana son:

**6.1.1 Hornfelsa Ab/Ep.** Las rocas pertenecientes a esta denominación corresponden con las hornfelsas de facies de más baja temperatura, se encuentran en la zona más periférica dentro de la aureola metamórfica (FIGURA 17), presentan tamaño de grano que varía de muy fino a fino (0,1 mm – 1 mm). Su composición mineralógica está constituida por cuarzo, plagioclasa, andalucita, biotita, moscovita, titanita, rutilo y opacos (grafito y pirita). La paragénesis mineral que determina la facies hornfelsa Ab/Ep está dada por:

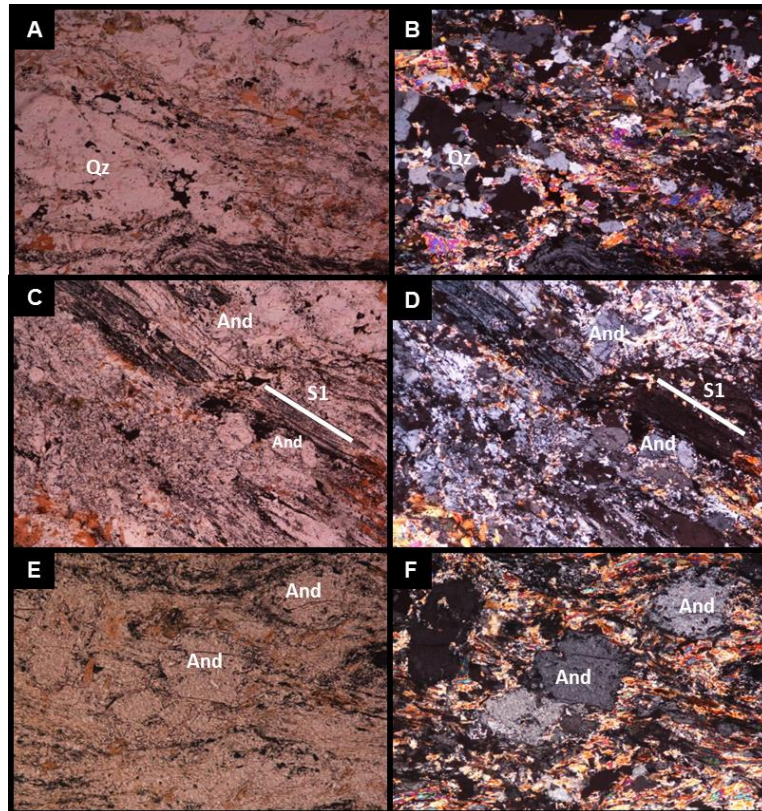


Para caracterizar esta zona se realizó una sección delgada a partir del total de las muestras de mano recolectadas entre las estaciones  $\Delta 1-\Delta 2$  y  $\Delta 2-\Delta 3$ , las principales características petrográficas que la describen son:

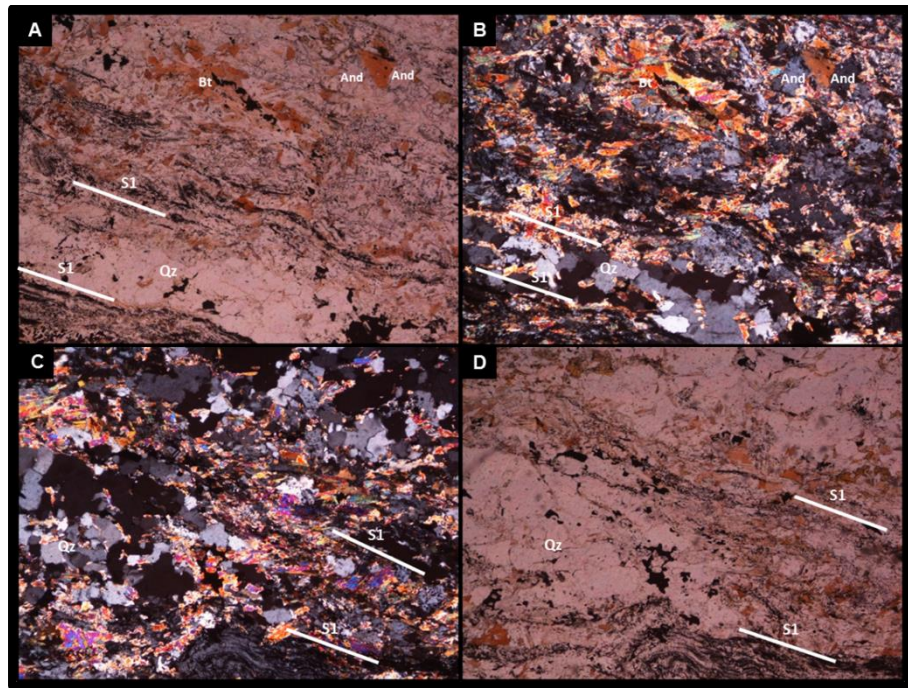
- **SECCIÓN CSH\_2\_3:** Se trata de una roca metamórfica de contacto que corresponde con la facie hornfelsa albita-epidota, es decir la facie de menor temperatura encontrada en la periferia de la aureola de contacto estudiada,

con textura granoblastica principalmente (definida por la presencia de cuarzo andalucita, plagioclasa y minerales opacos), se observa además texturas lepidoblastica y tipo random en biotita y moscovita. Adicionalmente en esta muestra se observan micropliegues (formados por grafito) que sugieren procesos de deformación, así como también transformaciones mineralogicas evidenciadas por los bordes bastantes irregulares de cristales de andalucita principalmente en donde su forma original ha ido desapareciendo.

**FIGURA 21.** Hornfelsa perteneciente a la facie de menor temperatura. Se puede observar la fase de deformación perteneciente a S1 y cristales de andalucita que no siguen necesariamente la misma tendencia. Fotografías tomadas con el objetivo 5X.



**FIGURA 22.** Hornfelsa perteneciente a la facie de menor temperatura, aun se pueden observar los minerales orientados en función de S1. (A–B) cristales de andalucita postectónica. Fotografías con el objetivo 5X.

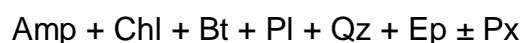


Para esta sección se realizó un conteo de 384 puntos, los porcentajes mineralógicos se presentan en la TABLA 5 mostrada a continuación:

**TABLA 5.** Composición mineralógica y su respectivo porcentaje para la sección CSH\_2\_3.

CONTEO		
MINERAL	PUNTOS	PORCENTAJE
Qz	135	35,2
And	98	25,5
Bt	53	13,8
Ms	47	12,2
Opq	38	9,9
Pl	8	2,1
Rt	5	1,3
TOTAL	384	100

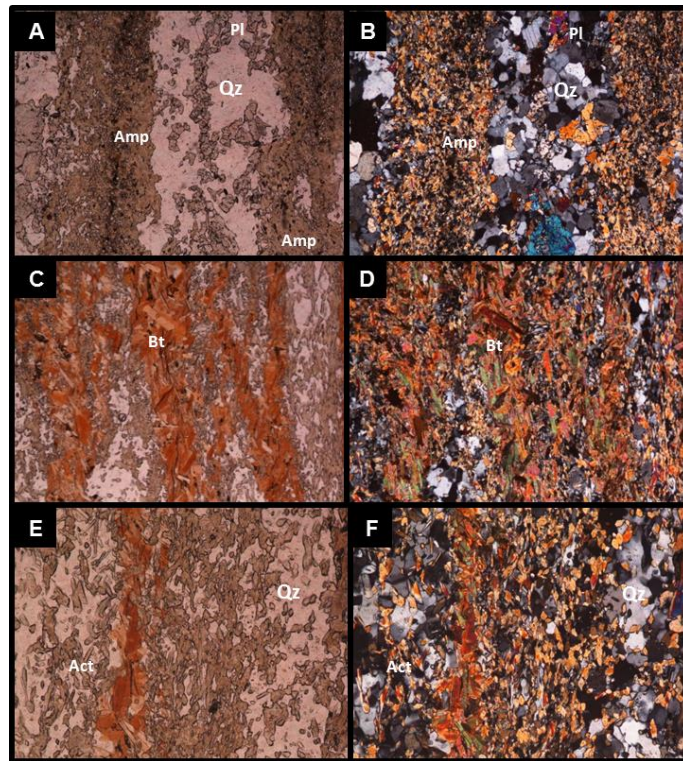
6.1.2 **Hornfelsa Anfibólica.** Corresponden a las hornfelsas de facies intermedia (FIGURA 17), las rocas pertenecientes a esta facie presentan tamaño de grano que varía de muy fino a fino (0,1 mm – 1 mm). Mineralógicamente se caracterizan por una ausencia marcada de moscovita, además de estar constituidas por anfíboles (hornblenda y actinolita), cuarzo, plagioclasa y epidota; en menor proporción por piroxenos (diópsido e hiperstena), silimanita, clorita (como alteración de biotita y anfíbol) y titanita, ocasionalmente también presentan biotita. La paragénesis mineral que determina la facies hornfelsa anfibolica está dada por:



Para caracterizar esta zona se realizaron tres secciones delgadas a partir del total de las muestras de mano recolectadas entre las estaciones  $\Delta 3$ – $\Delta 4$ ,  $\Delta 4$ – $\Delta 5$  y  $\Delta 5$ – $\Delta 6$ . Las principales características petrográficas se muestran a continuación:

- **SECCIÓN CSH\_4\_2:** Es descrita como una roca metamórfica de contacto con textura granonematoblástica (granoblástica en presencia de cuarzo, plagioclasa, epidota, además de algunos piroxenos, y nematoblástica en presencia de anfíbol, a pesar de que gran cantidad de cristales en este último no han desarrollado completamente sus caras). Se observan intercalaciones de bandas de minerales máficos y félsicos agrupados respectivamente. Localmente, se aprecia textura tipo random en biotitas.

**FIGURA 23.** Fotografías tomadas con objetivo de 5X.



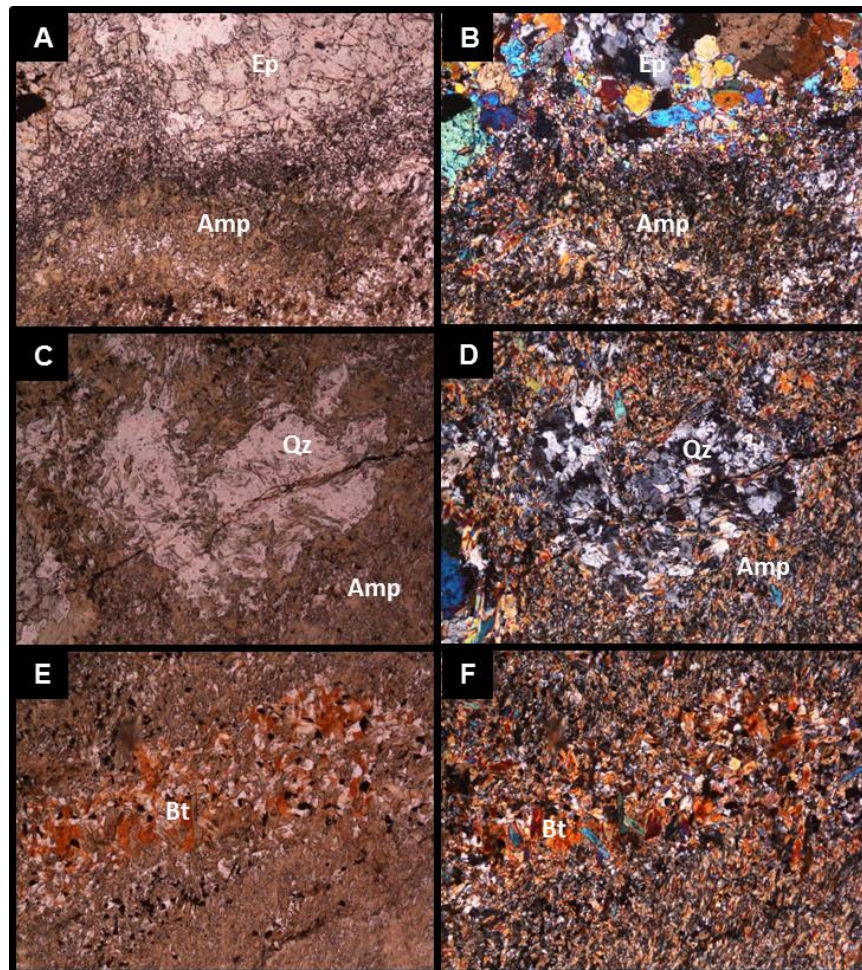
Para esta sección se realizó un conteo de 416 puntos, los porcentajes mineralógicos se presentan en la TABLA 6 mostrada a continuación:

**TABLA 6.** Composición mineralógica y respectivo porcentaje para la sección CSH\_4\_2.

CONTEO		
MINERAL	PUNTOS	PORCENTAJE
Amp	202	48,5
Qz	70	16,8
Ep	34	8,2
Pl	28	6,7
Chl	26	6,2
Bt	20	4,8
Hyp	14	3,4
Di	10	2,4
Tnt	8	1,9
Opq	4	0,9
TOTAL	416	99,8

- **SECCIÓN CSH\_4\_4:** Es descrita como una hornfelsa hornblendica con textura granonematoblastica mayormente (granoblastica en agregados de cuarzo, epidota además de plagioclasa y, nematoblastica en anfíboles), localmente se observan biotitas tipo random (al azar), algunas alterando a clorita. Se observa una significativa diferencia en la variación del tamaño entre epidotas y anfíboles.

**FIGURA 24.** Fotografías tomadas con el objetivo 5X



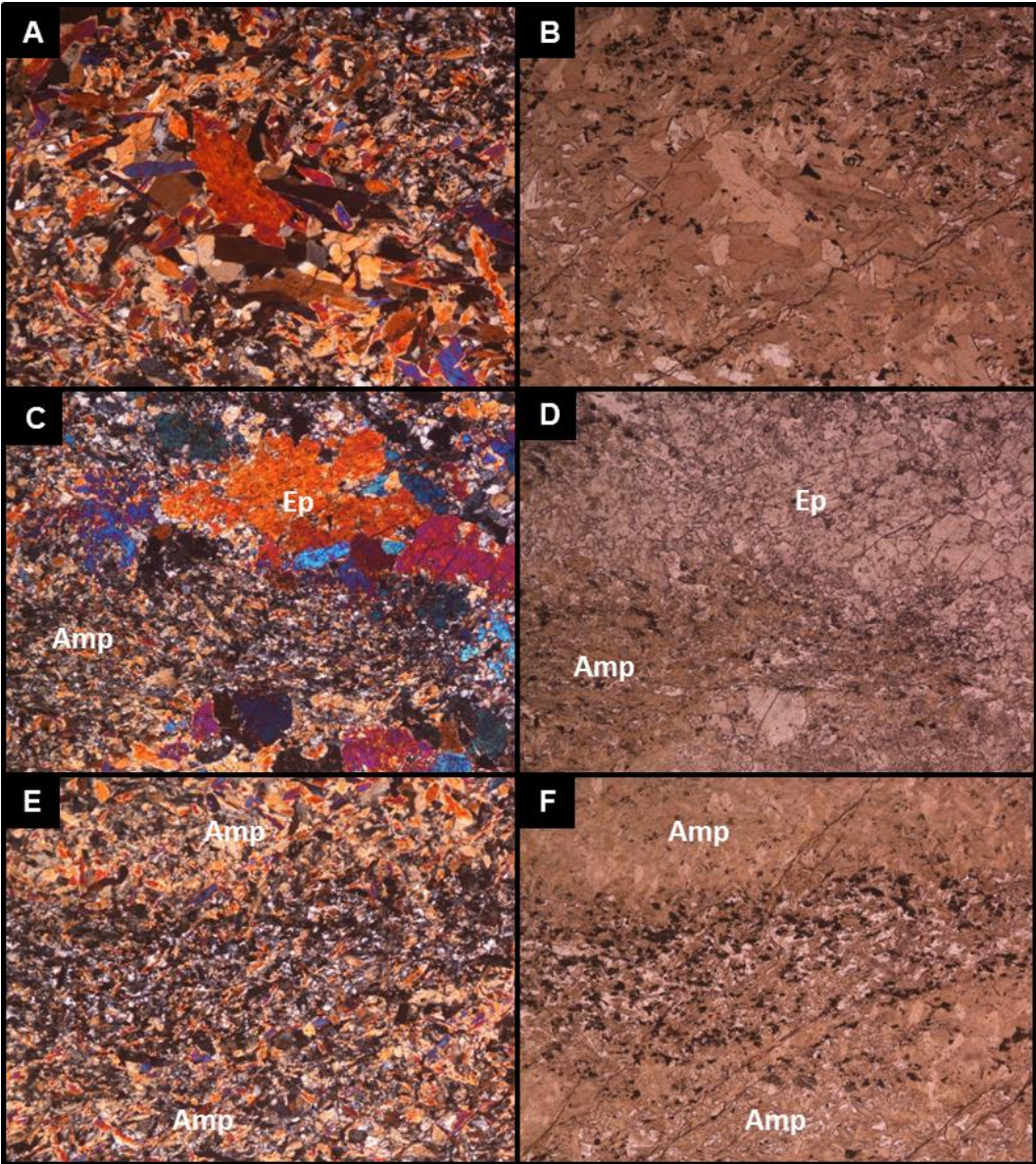
Para esta sección se realizó un conteo de 469 puntos, los porcentajes mineralógicos se presentan en la TABLA 7 mostrada a continuación:

**TABLA 7.** Composición mineralógica y su respectivo porcentaje para la sección CSH\_4\_4.

CONTEO		
MINERAL	PUNTOS	PORCENTAJE
Amp	195	41,5
Ep	90	21,6
Qz	75	16
Chl	45	9,6
Pl	25	5,3
Bt	20	2,2
Di	6	1,2
Hyp	2	0,2
Tnt	5	1
Opq	6	1,3
TOTAL	469	99,9

- **SECCIÓN CSH\_4\_5:** Esta sección es definida como una hornfelsa hornblendica con textura nematoblastica predominantemente, localmente se pueden apreciar texturas granoblasticas y lepidoblasticas (granoblastica en agregados de cuarzo, epidota además de plagioclasa y, nematoblastica en anfíboles), localmente se observan biotitas tipo random (al azar), gran cantidad de hornblendas se encuentran alterando a clorita, mostrando un anomalo color azul en sus colores de interferencia.

**FIGURA 25.** Fotografías tomadas con el objetio 5X

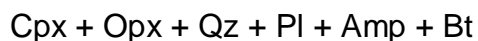


Para esta sección se realizó un conteo de 428 puntos, los porcentajes mineralógicos se presentan en la TABLA 8 mostrada a continuación:

**TABLA 8.** Composición mineralógica y su respectivo porcentaje para la sección CSH\_4\_5.

CONTEO		
MINERAL	PUNTOS	PORCENTAJE
Amp	198	46,2
Chl	112	26,2
Qz	45	10,51
Ep	25	5,8
Opq	18	4,2
Pl	15	3,5
Bt	8	1,8
Di	2	0,46
Hyp	2	0,46
Tnt	3	0,7
TOTAL	428	99,8

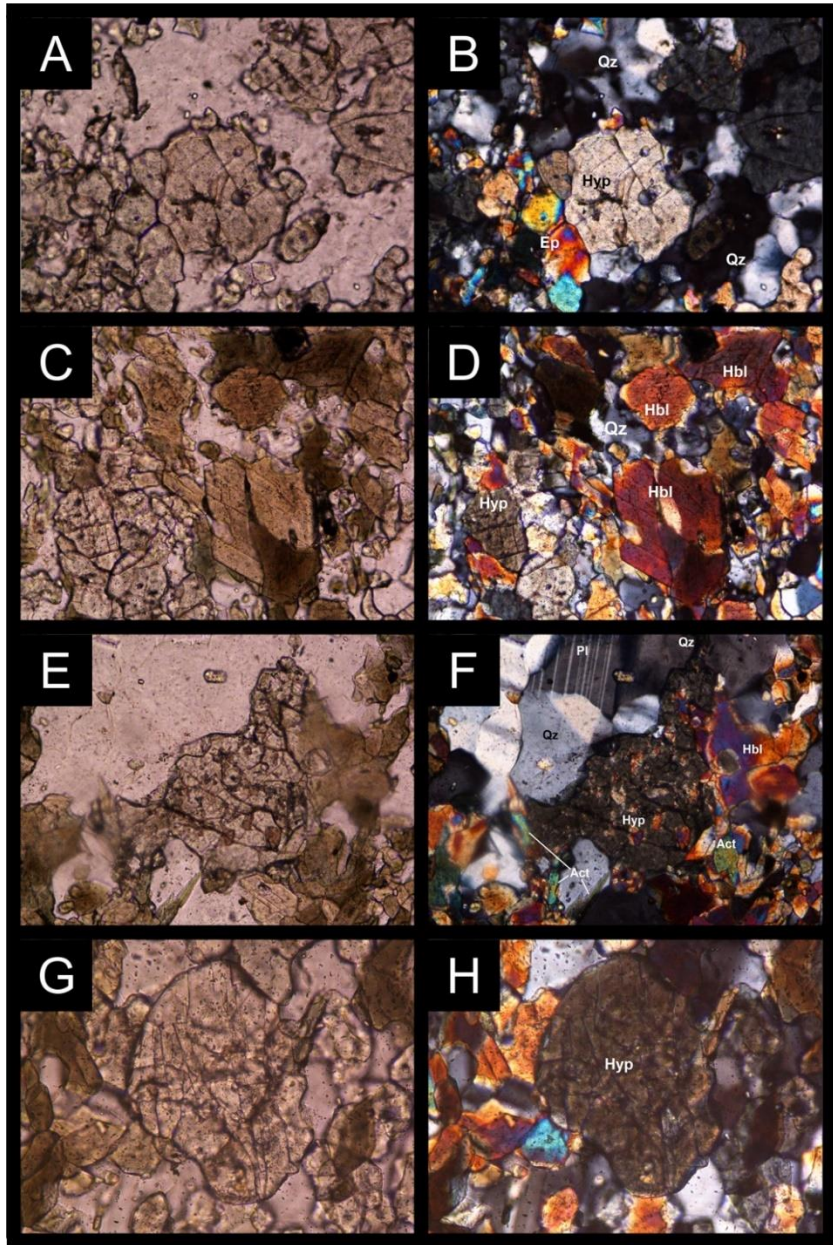
**6.1.3 Hornfelsa piroxénica.** Las rocas presentes corresponden con las hornfelsas de facies de más alta temperatura encontradas en la zona (FIGURA 17), presentan de forma general textura nematogranoblástica con tamaño de grano que varía de muy fino a fino (0,1 mm – 1 mm), localmente puede llegar ha medio (6 mm). Su composición mineralógica está dominada por ortopiroxeno (hiperstena), clinopiroxeno (diópsido–hedenberguita y augita), anfíbol (hornblenda y actinolita), cuarzo, plagioclasa, epidota, titanita y opacos (pirita), ocasionalmente biotita. La asociación mineralógica que determina las facies hornfelsa piroxénica está dada por:

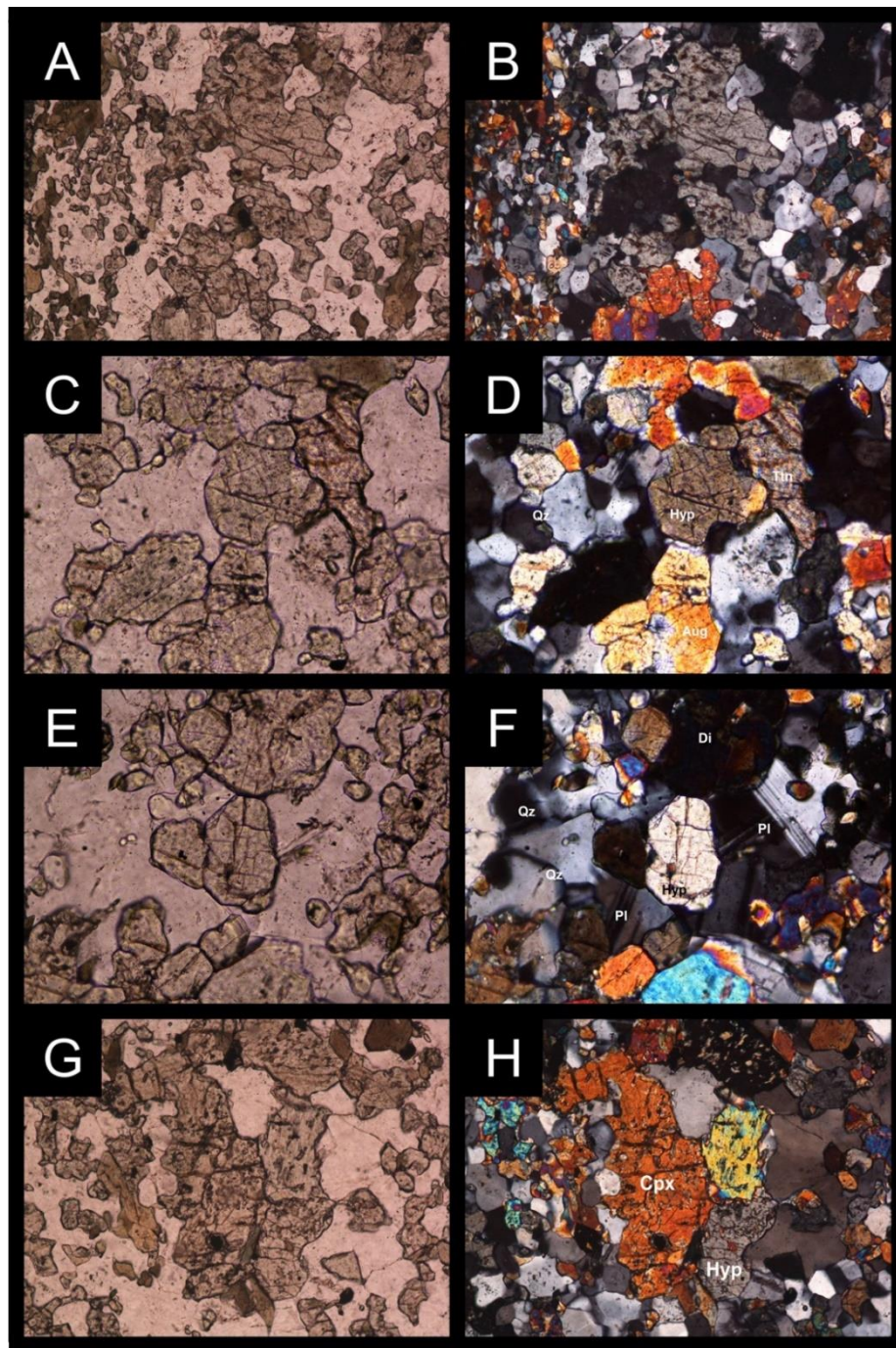


Para caracterizar esta zona se realizaron cuatro secciones delgadas a partir del total de las muestras de mano recolectadas entre las estaciones  $\Delta 12$ – $\Delta 13$  y  $\Delta 13$ – $\Delta 14$ , las principales características petrográficas se muestran en seguida:

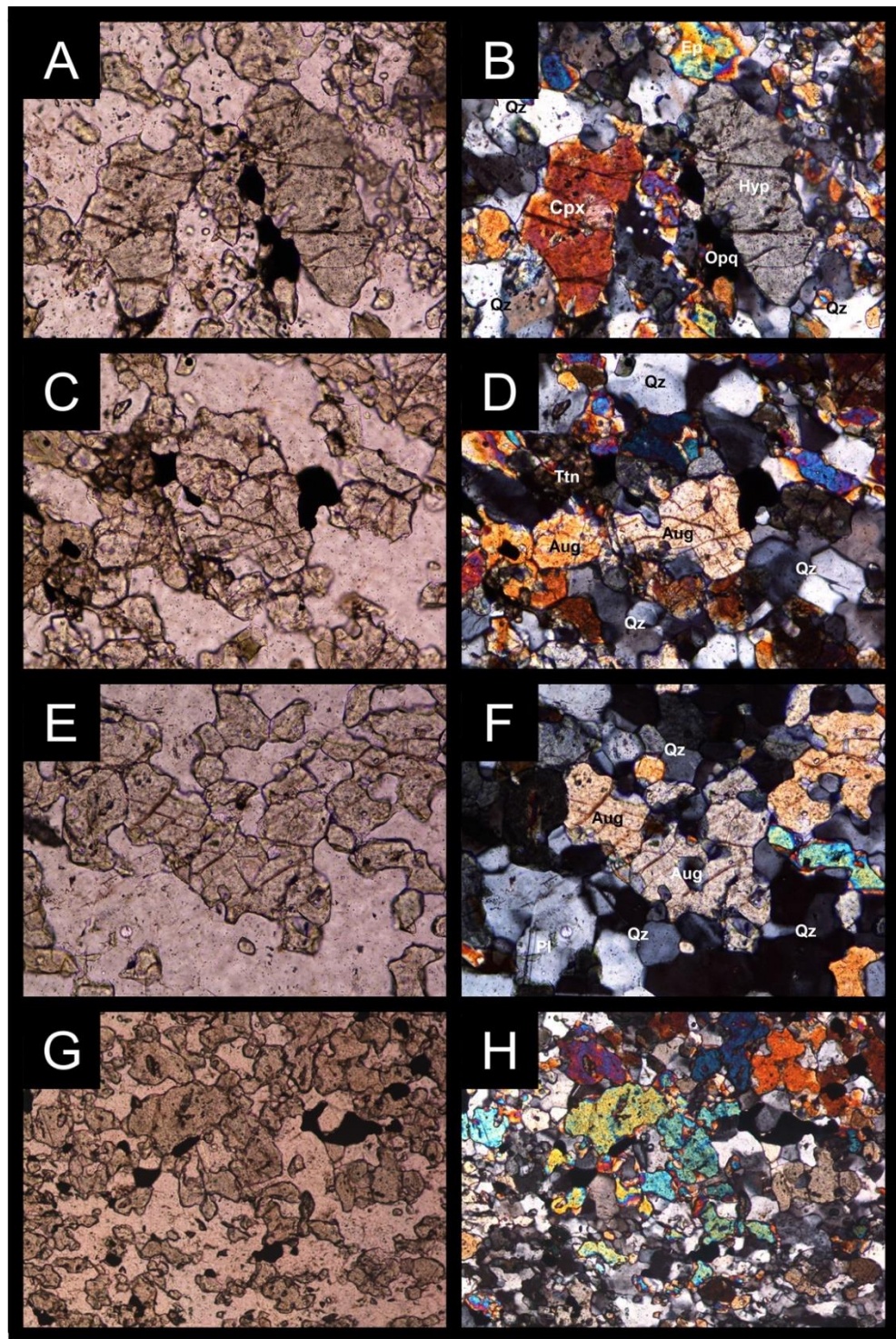
- **SECCIÓN CSH\_12\_1:** Roca metamórfica de contacto en la facies hornfelsa piroxénica con textura predominantemente granoblástica en presencia de piroxeno (FIGURAS 25, 26 y 27), plagioclasa, cuarzo, epidota y varios anfíbles con hábito granular (FIGURAS 28 y 29). Es posible apreciar intercalaciones, bien diferenciadas, de las bandas de minerales felsicos y maficos (FIGURA 18).

**FIGURA 26.** Ortopiroxenos con textura granoblástica. (A y C) en PPL y objetivo de 20X. (B y D) Misma anterior en XPL. (E y G) en PPL con objetivo de 40X y (F y H) misma anterior en XPL.

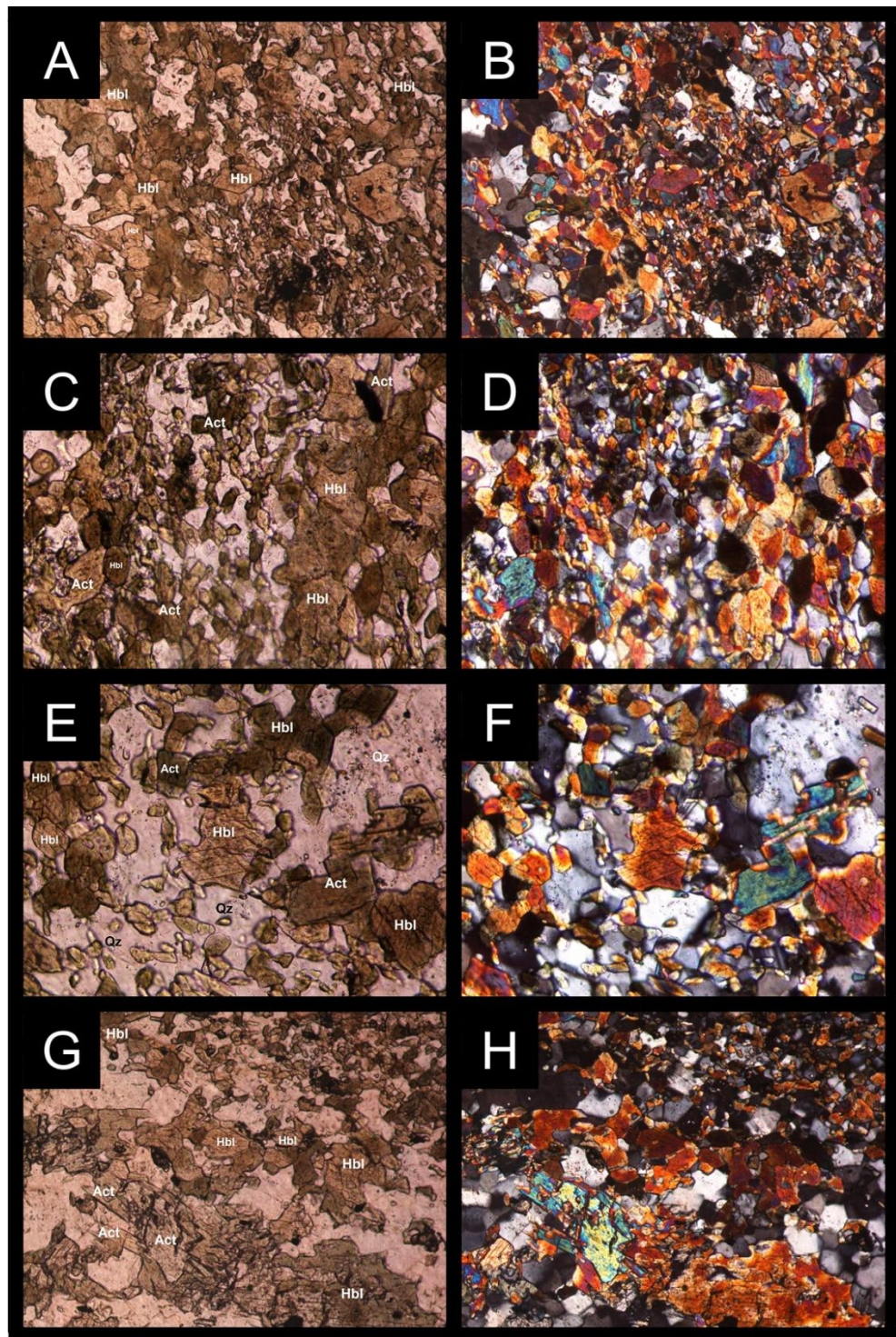




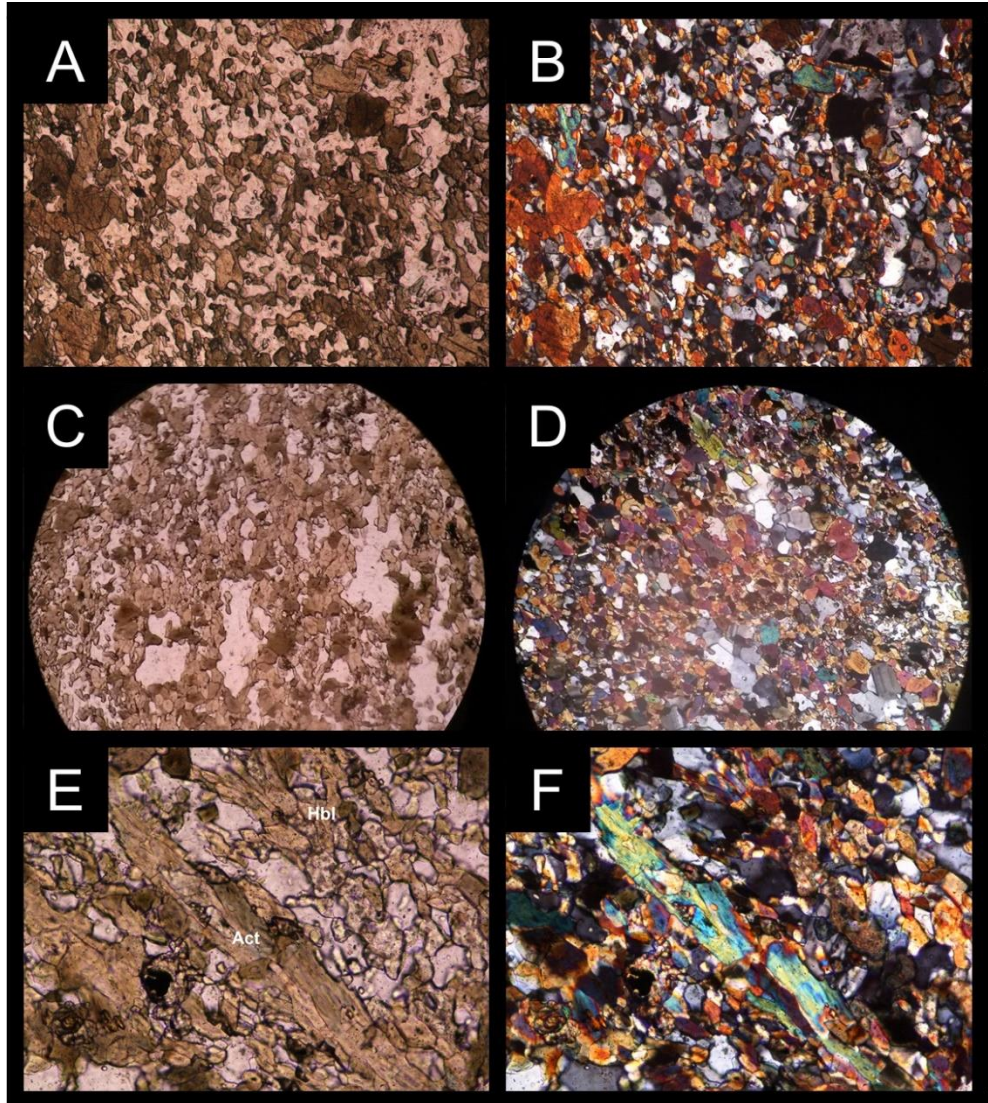
**FIGURA 27.** Ortopiroxeno y clinopiroxeno con textura granoblástica. (A, C y G) en PPL y objetivo de 20X. (B, D y H) misma anterior en XPL. (E) en PPL y objetivo de 40X y (F) misma anterior e XPL.



**FIGURA 28.** Anfíboles con textura granoblástica. (A, C, E y G) en PPL y objetivo de 20X y (B, D, F y H) misma anterior en XPL.



**FIGURA 29.** Anfíboles con textura granoblástica. (A y C) en PPL y objetivo de 20X. (B y D) misma anterior en XPL. (E) en PPL y objetivo de 40X y (F) misma anterior en XPL.



Para esta sección se realizó un conteo de 420 puntos, los porcentajes mineralógicos se presentan en la TABLA 9.

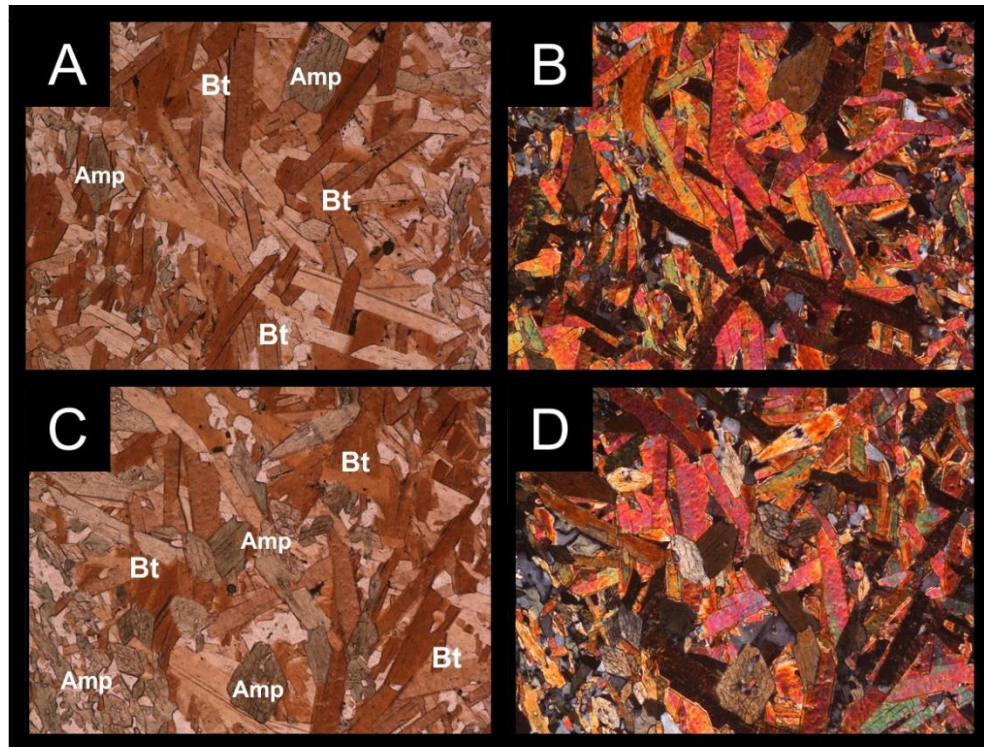
**TABLA 9.** Composición mineralógica y su respectivo porcentaje para la sección CSH\_12\_1.

CONTEO		
MINERAL	PUNTOS	PORCENTAJE
Amp	147	35,0
Qz	118	28,1
Cpx	52	12,4
Opx	39	9,3
Pl	24	5,7
Ep	18	4,3
Ttn	13	3,1
Opq	9	2,1
TOTAL	420	100,0

- **MUESTRA CSH\_12\_2:** Roca metamórfica de contacto en la facie hornfelsa piroxénica, con textura holocristalina, hipidiomórfica, inequigranular trimodal y granonematoblástica (nematoblástica en presencia de anfíbol y granoblástica en presencia de cuarzo, epidota y piroxeno).

En un sector se destaca la aparición de grandes (en comparación con el resto de la sección) cristales de biotita en conjunto con anfíboles (FIGURA 30). La biotita en el resto de la sección (pero cerca a donde empiezan aparecer los grandes cristales) se presenta como bandas finas, además presentan textura *decusada* (FIGURAS 30 y 33A–B).

**FIGURA 30.** Megacrystalos de Bt y Amp (en comparación con el resto de la misma sección), en donde se aprecia la textura random causada por la biotita. (A y C) en PPL con objetivo de 5X y (B y D) misma anterior en XPL.

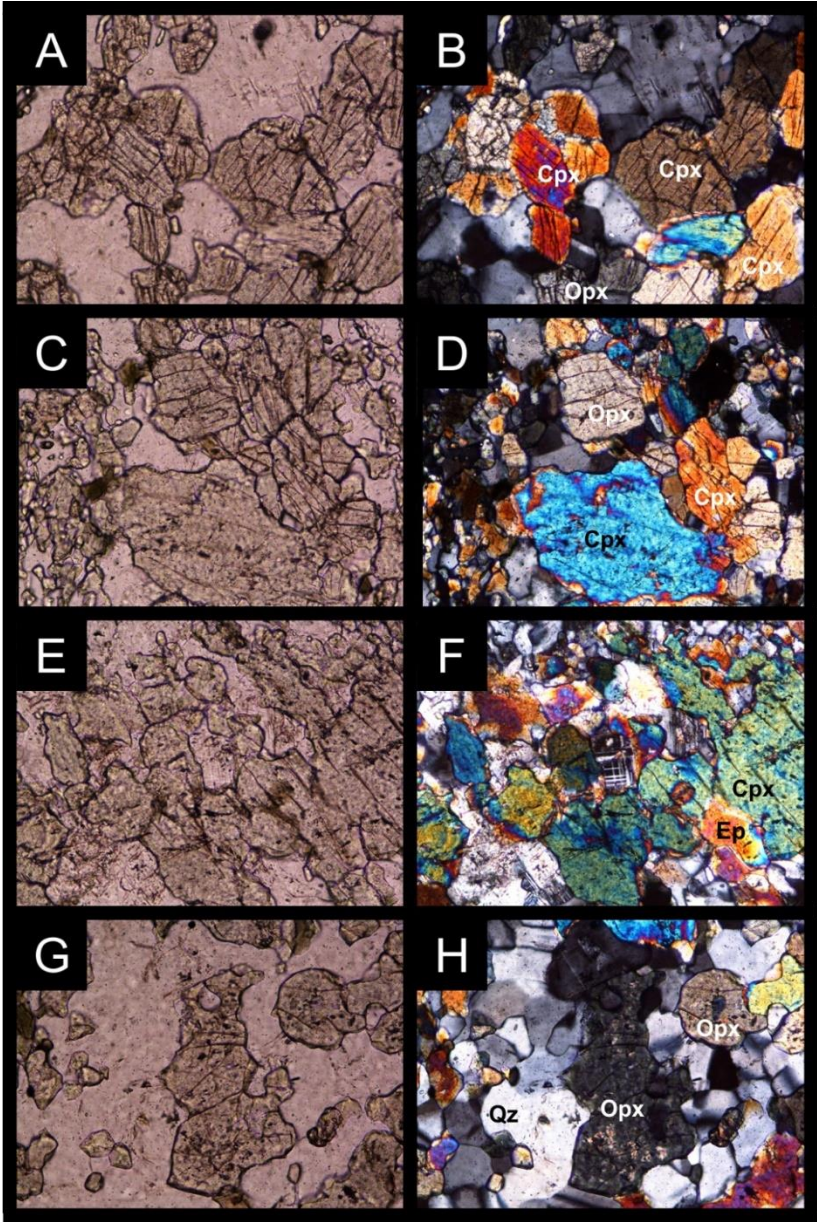


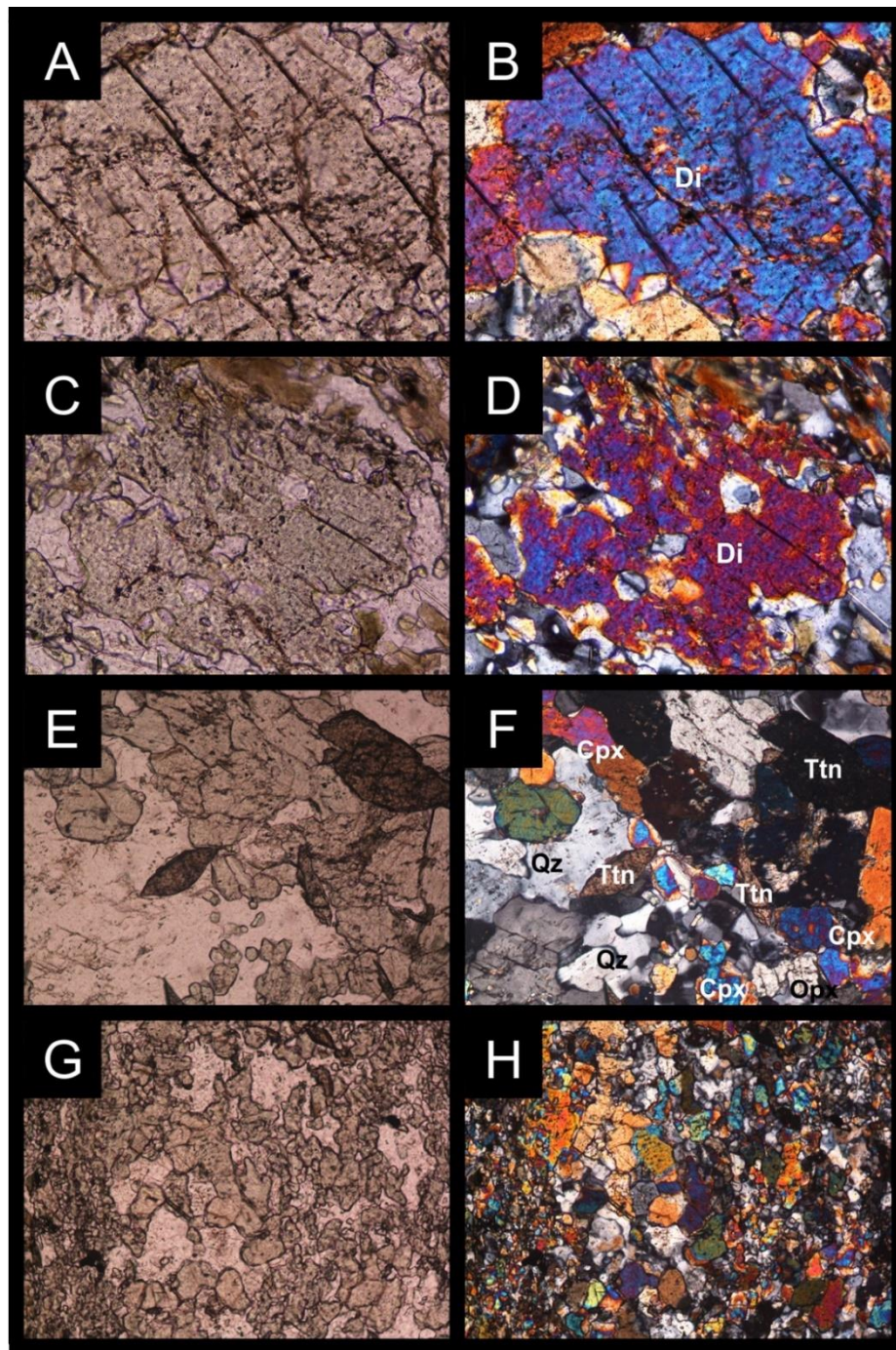
Para esta sección se realizó un conteo de 469 puntos, los porcentajes mineralógicos se presentan en la TABLA 10.

**TABLA 10.** Composición mineralógica y su respectivo porcentaje para la sección CSH\_12\_2.

CONTEO		
MINERAL	PUNTOS	PORCENTAJE
Amp	168	35,8
Qz	77	16,4
Bt	55	11,7
Cpx	46	9,8
Opx	34	7,2
Ep	31	6,6
Pl	30	6,4
Opq	17	3,6
Ttn	9	1,9
Chl	2	0,4
TOTAL	469	100

**FIGURA 31.** Proxenos (Cpx y Opx) con textura granoblástica. (A, C, E y G) en PPL y objetivo de 20X y (B, D, F y H) misma anterior en XPL.





**FIGURA 32.** Clinopiroxeno con textura granoblástica. (A, C y E) en PPL y objetivo de 20X y (B, D y F) misma anterior en XPL.

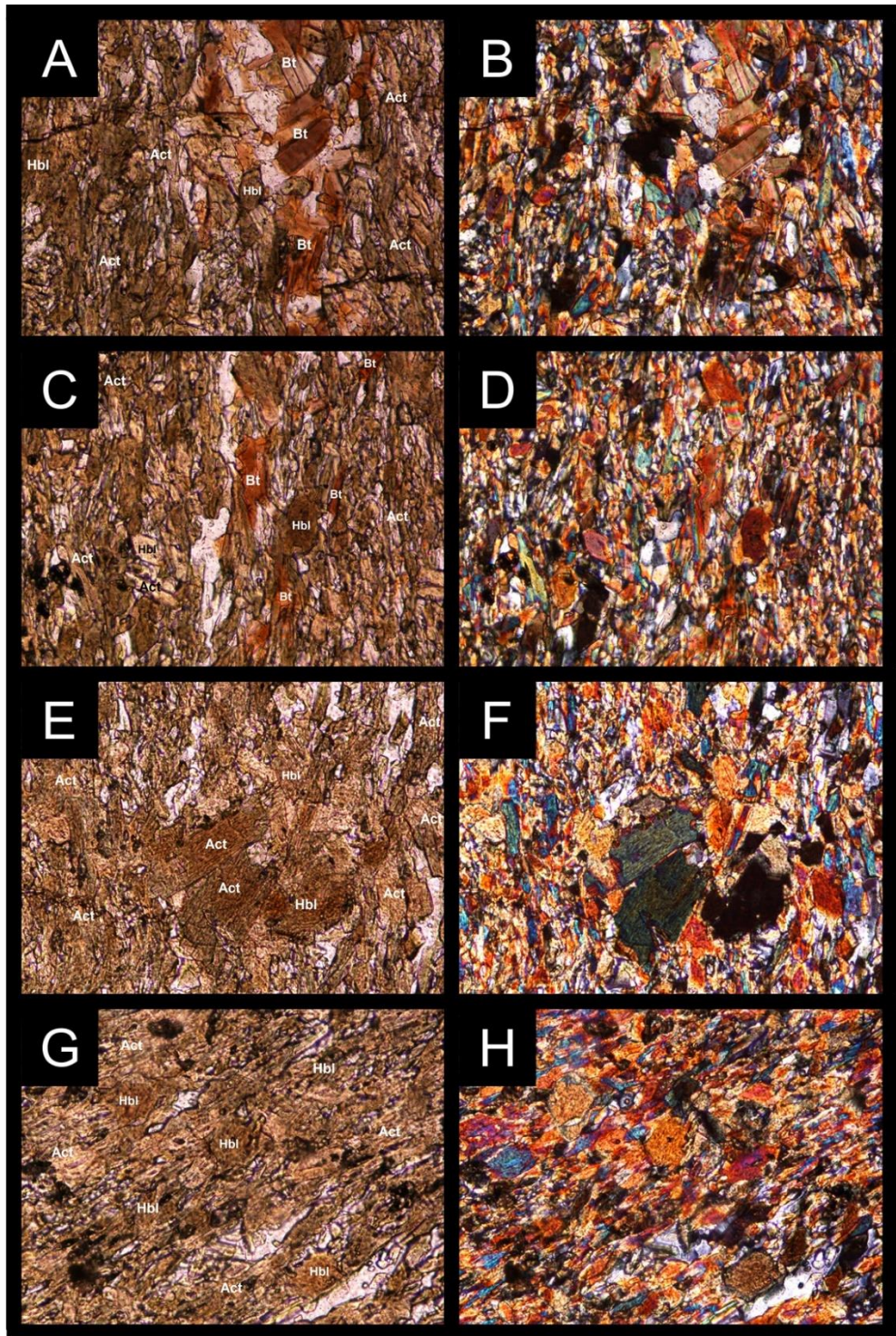


FIGURA 33. Anfíboles con textura lepidoblástica. (A, C, E y G) en PPL y objetivo de 20X y (B, D, F y H) misma anterior en XPL.

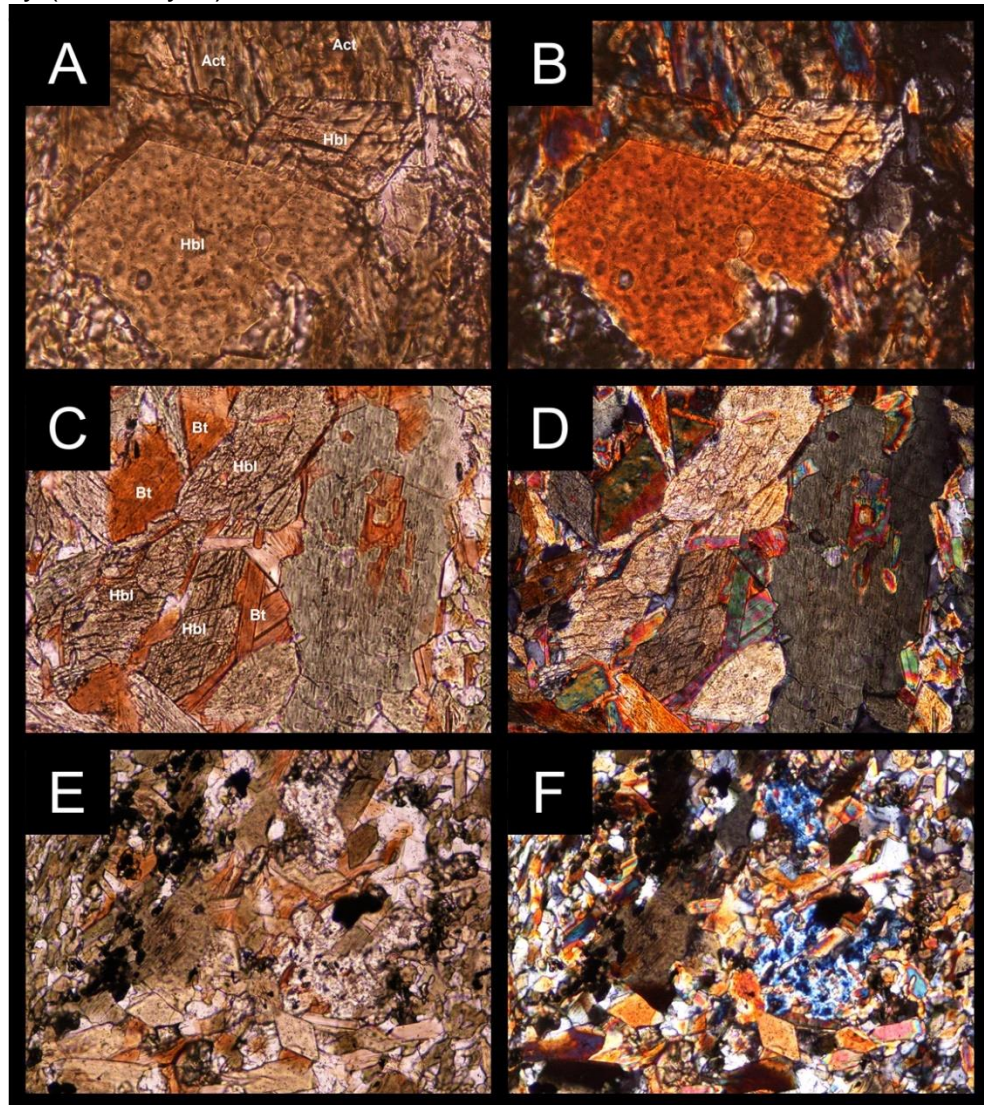


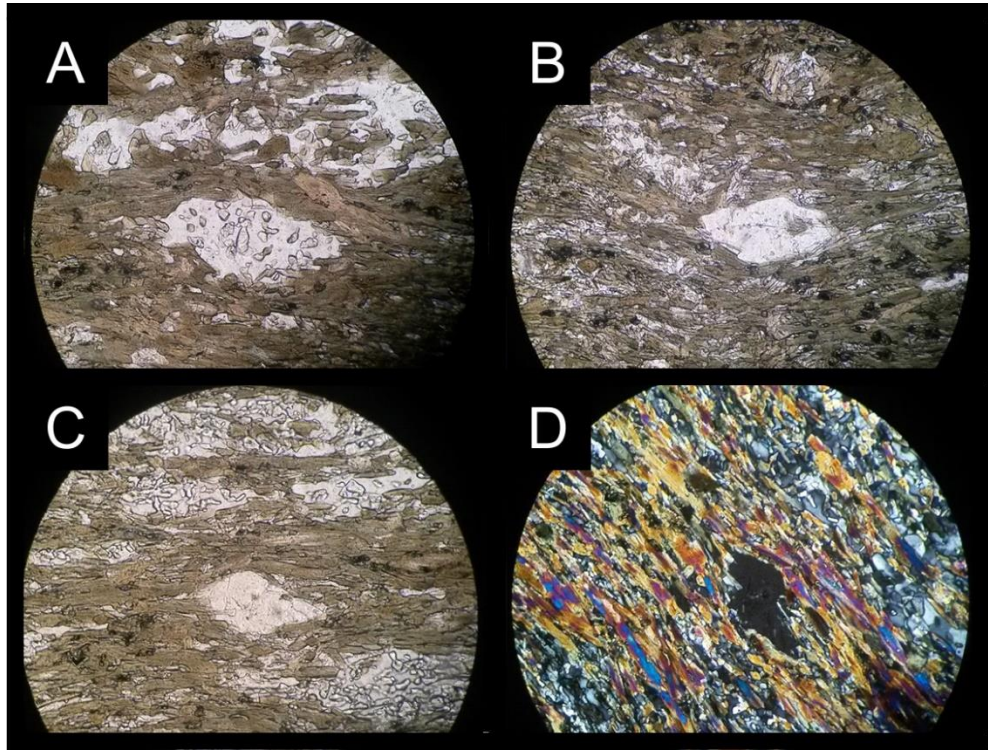
FIGURA 34. Anfíboles con textura lepidoblástica. (A, C y E) en PPL y objetivo de 20X; (B, D, F y H) misma anterior en XPL.

- **MUESTRA CSH\_12\_3:** Roca metamórfica de contacto en la facie hornfelsa piroxénica, con textura granonematoblástica (nematoblástica en presencia de anfíbol y granoblástica en presencia de cuarzo, epidota y piroxeno, estos últimos suelen presentarse en microlitones (FIGURA 35)).

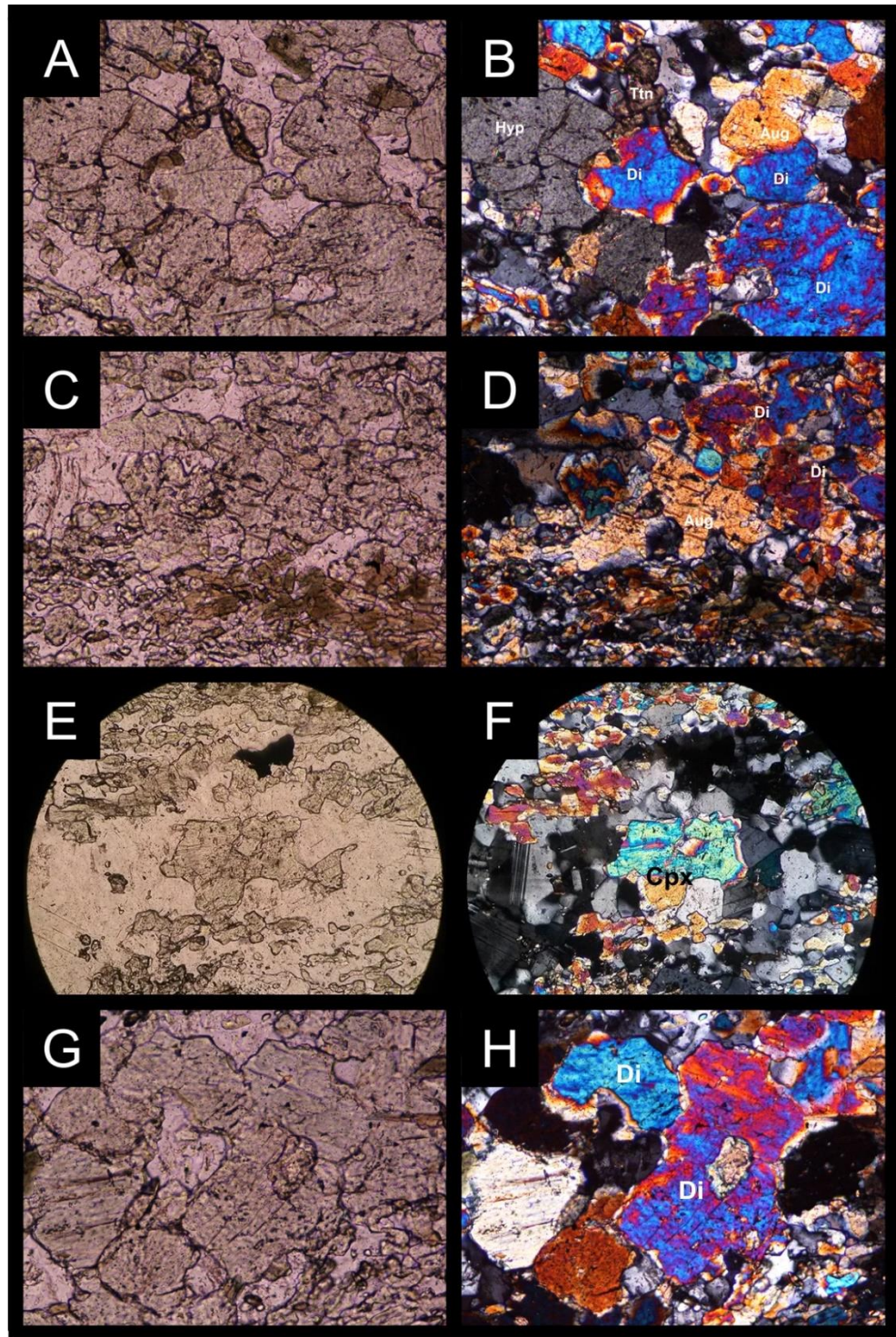
Para esta sección se realizó un conteo de 434 puntos, los porcentajes de minerales se presentan en la TABLA 11.

CONTEO		
MINERAL	PUNTOS	PORCENTAJE
Amp	205	45,6
Qz	81	18,0
Cpx	61	13,6
Opx	49	10,9
Pl	18	4,0
Ep	14	3,1
Ttn	12	2,7
Opq	10	2,2
TOTAL	450	100

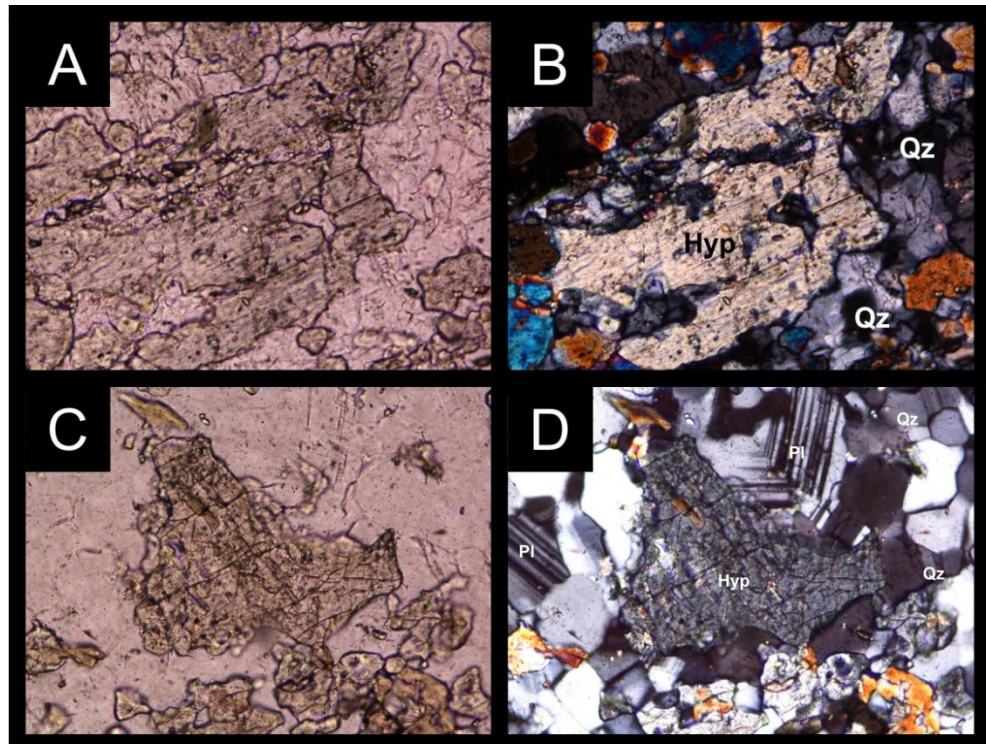
**TABLA 11.** Composición mineralógica y su respectivo porcentaje para la sección CSH\_12\_3.



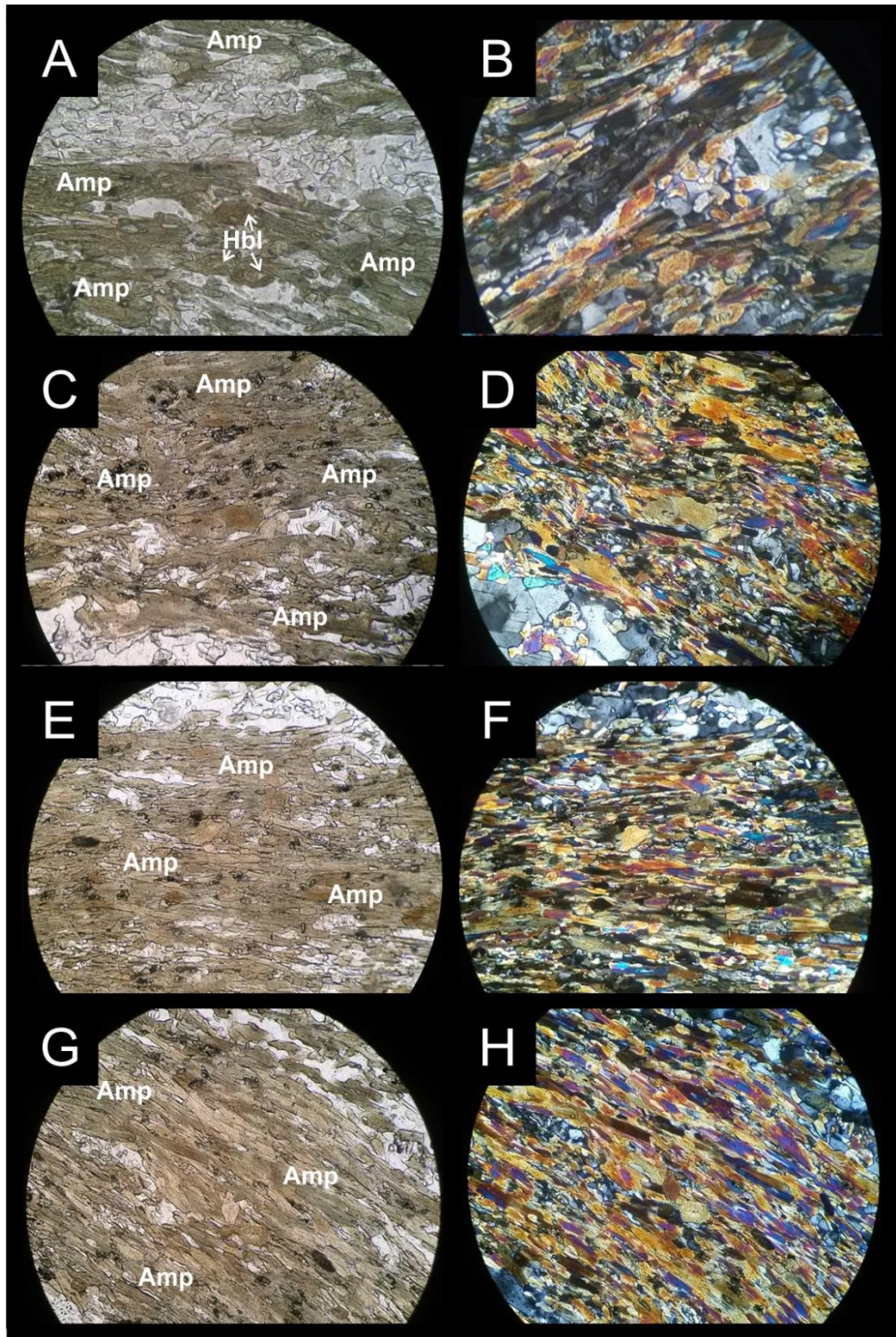
**FIGURA 35.** Microlitones. (A, B y C) en PPL y (D) en XPL. Fotografías tomadas con el objetivo de 20X.



**FIGURA 36.** Clinopiroxenos con textura granoblástica. (A, C, E y G) en PPL y objetivo de 20X y (B, D, F y H) misma anterior en XPL.



**FIGURA 37.** Ortopyroxenos con textura granoblástica. (A) en PPL y objetivo de 20X. (B) misma anterior en XPL. (C) en PPL y objetivo de 40X y (D) misma anterior en XPL.



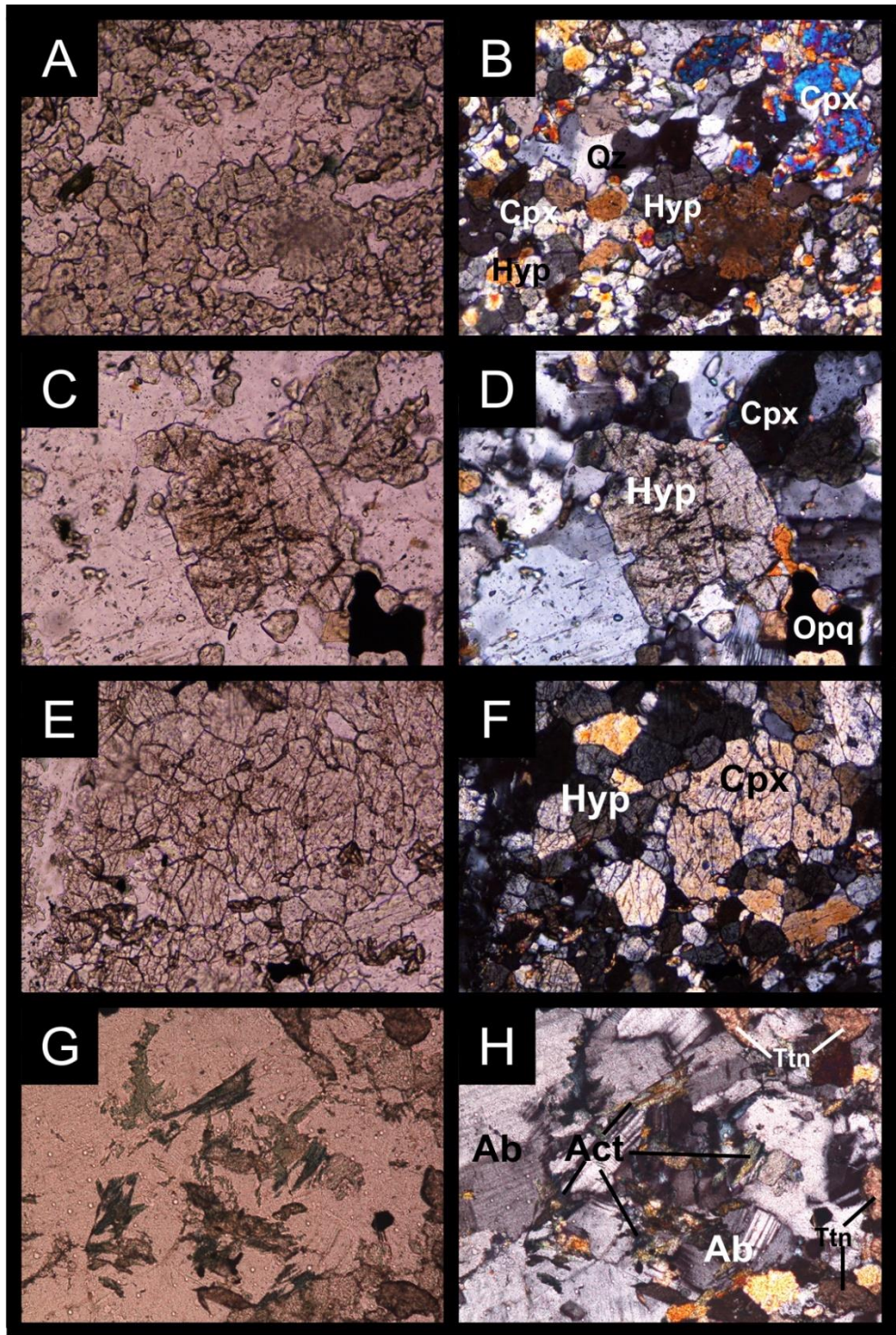
**FIGURA 38.** Anfíboles (Hbl y Act) con textura lepidoblástica. (A) en PPL y objetivo de 20X. (B) misma anterior en XPL. (C, E y G) en PPL y objetivo de 10X y (D, F y H) misma anterior en XPL.

- **MUESTRA CSH\_13\_1:** Roca metamórfica de contacto en la facie hornfelsa piroxenica, con textura granoblástica en presencia de piroxeno (FIGURA 39), cuarzo, plagioclasa y anfíbol (FIGURA 40). Es posible apreciar intercalaciones, bien diferenciadas de minerales félsicos y máficos (FIGURA 18), y aunque los anfíboles se encuentran concentrados en las bandas máficas estos no se alargan en una dirección preferencial, debido principalmente a su hábito granular (FIGURA 40).

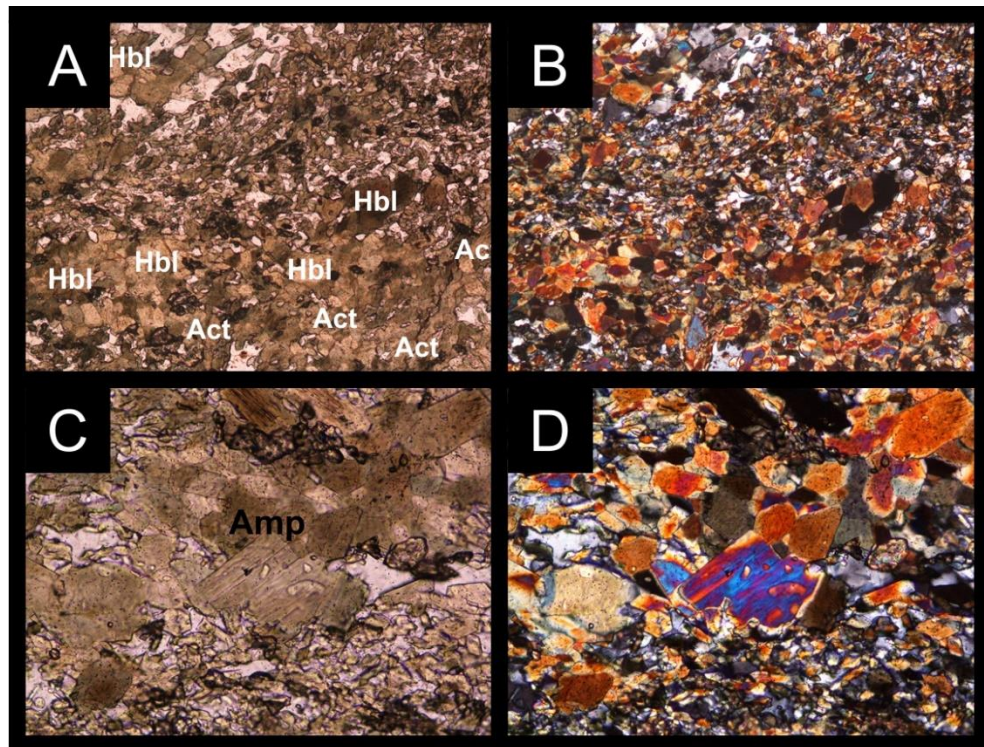
Para esta sección se realizó un conteo de 465 puntos, los porcentajes de minerales se presentan en la TABLA 12.

**TABLA 12.** Composición mineralógica y su respectivo porcentaje para la sección CSH\_13\_1.

CONTEO		
MINERAL	PUNTOS	PORCENTAJE
Amp	119	25,6
Qz	102	21,9
Cpx	92	19,8
Opx	79	17,0
Pl	37	8,0
Ttn	16	3,4
Ep	14	3,0
Opq	6	1,3
TOTAL	465	100



**FIGURA 39.** Piroxenos (Opx y Cpx) con textura granoblástica. (A, C y E) en PPL y objetivo de 20X y (B, D y F) misma anterior en XPL. (G) Plagioclasa asociada con actinolita en variedad fibrosa, en PPL y objetivo de 20X y (H) misma anterior en XPL.



**FIGURA 40.** Anfíboles con textura granoblástica. (A y C) en PPL y objetivo de 20X y (B y D) misma anterior en XPL.

## 6.2 STOCK DEL HATILLO

Roca ígnea plutónica que presenta textura holocristalina, fanerítica, hipidiomórfica e inequigranular bimodal con tamaño de grano grueso a fino; en algunas secciones el cuarzo, en forma de vetilla, alcanza a tener tamaño de grano muy fino. Unas muestras se presentan, por mucho, más ricas en cristales de plagioclasa en comparación con el cuarzo, mientras en otras este balance es más equivalente

(como se apreciará más adelante); además de estos dos minerales también hay feldespato alcalino, biotita y anfíbol como minerales principales, opacos como minerales menores, apatito y zircón (?) en contenidos traza y sericita y clorita como minerales secundarios. Los anfíboles (Hbl) sólo están presentes en las muestras ricas en cristales de plagioclasa.

Para caracterizar esta litología se tomaron muestras de dos cuerpos ígneos diferentes que corresponden: uno al intrusivo principal y el otro a un cuerpo ígneo de dimensiones considerables y características (a escala macro) diferentes. Estos cuerpos se trataron de muestrear, donde fue posible, desde el centro hacia el borde, con el objetivo de determinar las diferentes facies ígneas que puedan llegar a presentar. A partir de las muestras de mano recolectadas entre las estaciones  $\Delta 6$ – $\Delta 7$ ,  $\Delta 28$ – $\Delta 29$ ,  $\Delta 29$ – $\Delta 30$ ,  $\Delta 30$ – $\Delta 31$  y  $\Delta 31$ – $\Delta 32$  se realizaron cuatro secciones delgadas para los dos cuerpos ígneos (dos tomadas del centro y las otras cerca al contacto con la unidad metamórfica). A continuación se describirán las principales características mineralógicas de los cristales presentes en las secciones:

*ANFÍBOL (Amp)*: Se presenta mayoritariamente con hábito prismático corto con forma euédral–idiomórfica; aunque algunos cristales se presentan con hábitos tabulares elongados. Presentan un tamaño de cristal medio, relieve moderado a alto y el pleocroísmo más común que exhiben los cristales varía desde amarillo pálido a verde. Los cristales con hábito prismático corto suelen mostrar dos direcciones de exfoliación a un ángulo de  $120^\circ$ . Los colores de interferencia llegan hasta amarillo–naranja de la mitad del segundo orden. Muchos cristales se presentan alterados, por los bordes y/o por el centro, a biotita y algunos otros a clorita. Por otro lado, muchos de los cristales que lucen hábito tabular se presentan maclados (macla de carlsbad).

*BIOTITA (Bt)*: Se presenta en formas euédrales a subédrales como individuos tabulares elongados y terminaciones irregulares o dentadas, el tamaño de cristal

es grueso a lo largo. Presenta pleocroísmo que varía desde un castaño claro hasta unas tonalidades marrón-rojizas, el relieve es medio. Suele presentarse como producto de alteración del anfíbol (Hbl).

*CUARZO (Qz)*: Agregados granulares incoloros con formas subhedrales y bordes irregulares. No presenta pleocroísmo, su relieve es bajo y el tamaño de grano varia de medio a fino. Además hay evidencia de triple punto que indica mezcla de magamas o solamente refleja que hubo intrusión magmática. También, en algunas secciones, hay presencia de vetillas de este mineral (con tamaño de grano considerablemente inferior al presente en el resto de Qz) atravesando de borde a borde la sección.

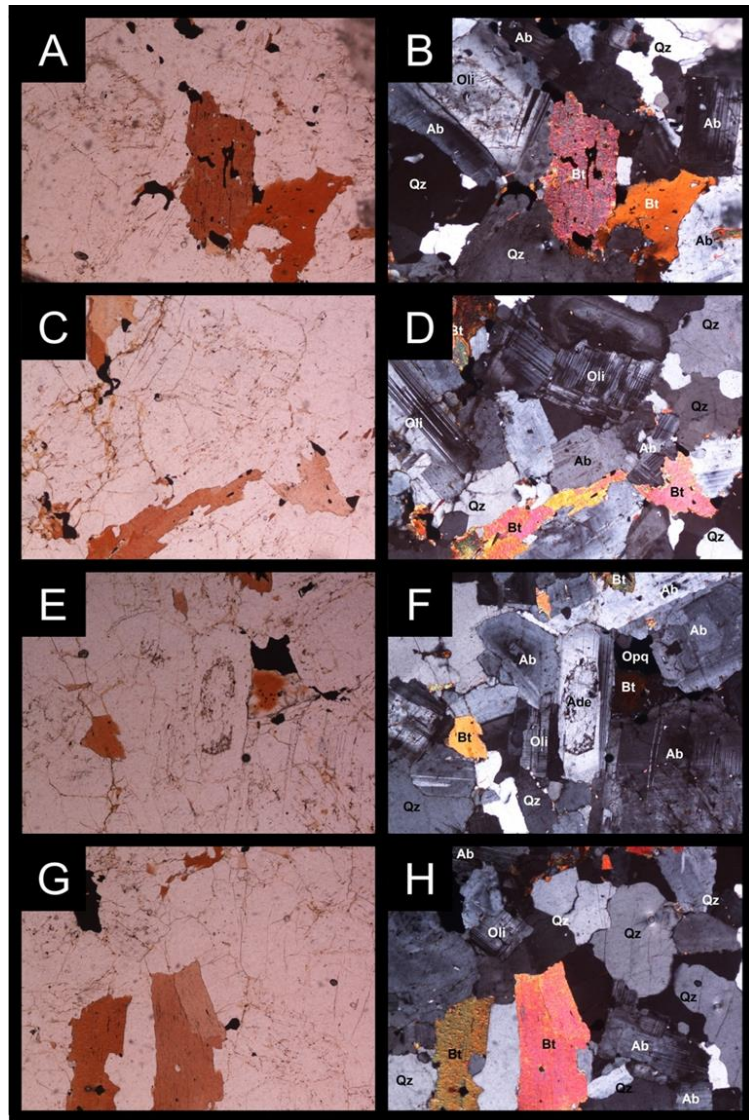
*PLAGIOCLASA (Pl)*: Se presenta en formas euhedrales a subhedrales como individuos tabulares elongados y tamaño de grano medio. No presenta pleocroísmo y el relieve es bajo, además muestra un variado maclado como es el caso de las maclas tipo albita y tipo periclina, también se observan en algunos cristales diferentes tipos de zonación (continua (normal e inversa) y oscilatoria (normal e inversa)) generadas por una variación composicional, esta variación se origina durante el enfriamiento y hace que las propiedades ópticas del mineral varíen generando diferentes ángulos de extinción mineral (Mantilla, 2003). Suele observarse alterada a clorita y/o sericita.

*CLORITA (Chl)*: Su presencia es producto de la alteración de minerales como la plagioclasa principalmente, aunque también suele presentarse como alteración de los anfíboles. Se presenta en formas de cristales anhedrales de tamaño de grano muy fino, principalmente en los bordes de los cristales del que provienen. Presenta relieve moderado y los colores de interferencia típicos (azul oscuro-marrónáceo).

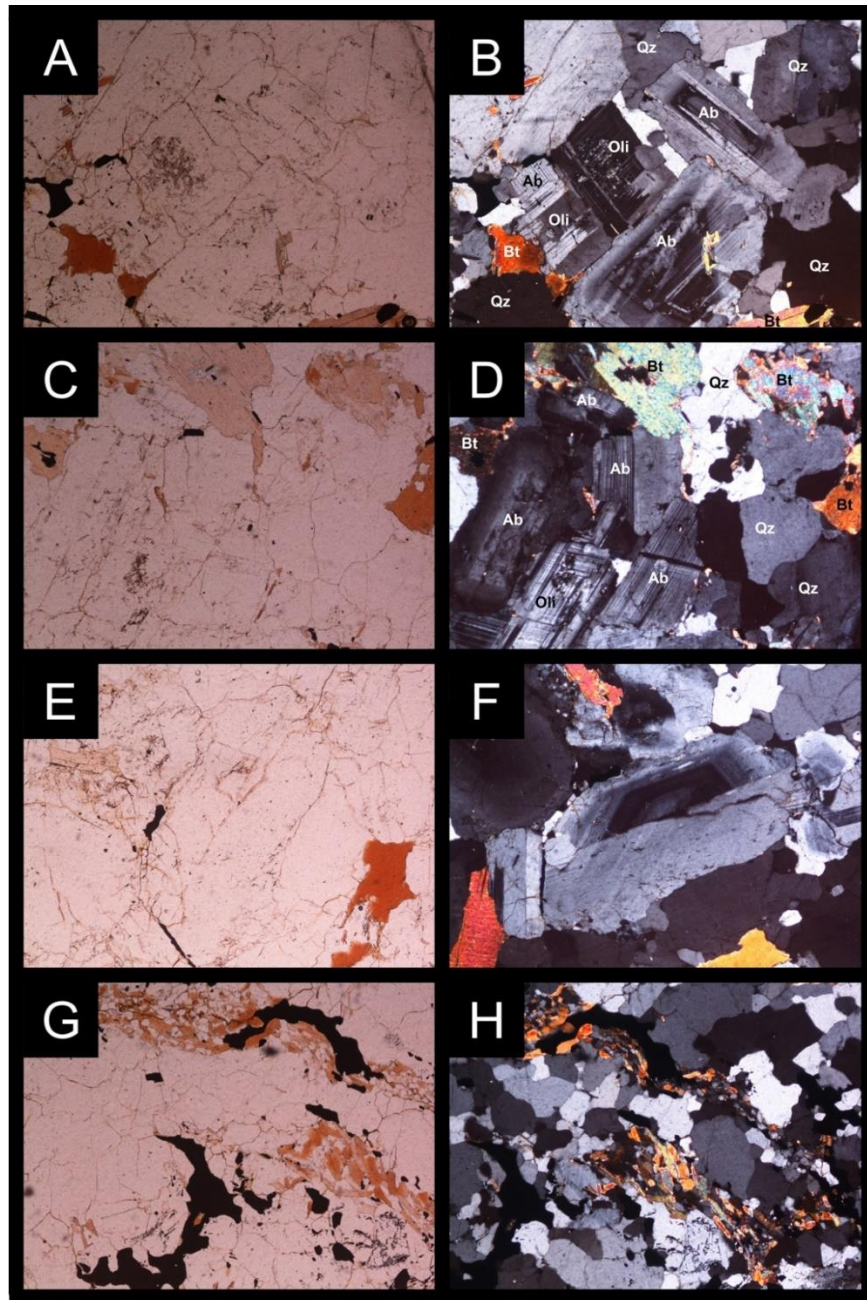
*SERICITA (Ser)*: Al igual que la clorita su presencia es producto de la alteración de minerales, principalmente de plagioclasa, aunque puede verse también como alteración en los feldespatos alcalinos. Se encuentra comunmente en formas anhedrales con tamaños de cristal muy fino, pero en grandes masas.

Ahora se procederá a la descripción e ilustración de las secciones correspondientes a la litología descrita

- **MUESTRA CSH\_6\_1**: roca ígnea plutónica con textura holocristalina–fanerítica–hipidiomórfica–inequigranular bimodal con tamaños de grano fino a medio, en donde los cristales de biotita son los que alcanzan las dimensiones más grandes (6 mm de largo). El cuarzo en esta sección se presenta también como vetilla cortando la estructura de la roca, aquí los tamaños del mineral son menores a 1 mm. Mineralógicamente está compuesta por cuarzo, plagioclasa, biotita y feldespato alcalino como minerales principales, opacos (pirita) como minerales menores y sericita como mineral secundario.



**FIGURA 41. Asociación mineral**



**FIGURA 42.** Pl exhibiendo maclas tipo Ab y periclina, además de zonaciones (p. ej. F). (A, C y E) en PPL y objetivo de 5X. (B, D y F

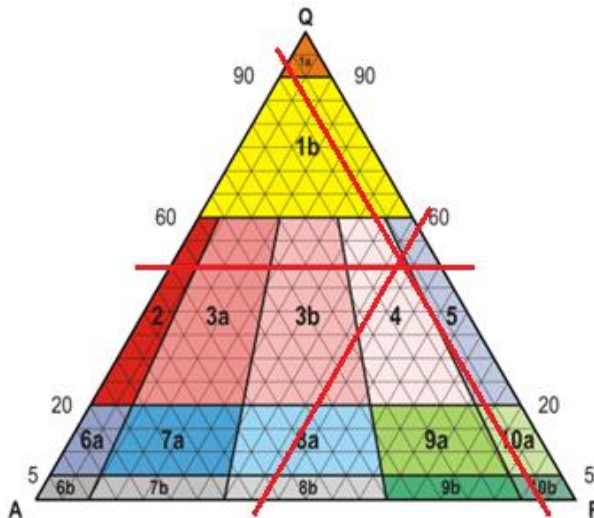
Para esta sección se realizó un conteo de 487 puntos, en la TABLA 13 se muestran los porcentajes minerales.

CONTEO			RECALCULO	
MINERAL	PUNTOS	PORCENTAJE	MINERAL	PORCENTAJE
Qz	197	40.5 %	Q	49.8 %
Pl	173	35.5 %	A	6.5 %
Bt	64	13.1 %	P	43.7 %
Afs	26	5.3 %	TOTAL	100 %
Opq	20	4.1 %		
Ser	7	1.4 %		
TOTAL	487	99.9 %		

**TABLA 13.** Composición mineralógica y su respectivo porcentaje, también se aprecia el recálculo hecho para conocer el tipo de litología de la sección CSH\_6\_1.

En base a los datos del recálculo y utilizando el triángulo de Streckeisen (1976) se halla la litología que corresponde a la sección analizada, siendo esta una *Granodiorita* (FIGURA 43).

**FIGURA 43.** Triángulo de Streckeisen (1976) indicando el área que corresponde a la sección CSH\_6\_1.



- **MUESTRA CSH\_6\_2:** Esta roca es descrita como ígnea plutónica con textura holocristalina–fanerítica–hipidiomórfica–inequigranular bimodal con tamaños de grano fino a medio. Esta muestra presenta cristales de plagioclasa en mayor cantidad, siendo estos mismos los de tamaños más considerables y caras bien desarrolladas, seguidamente el cuarzo y la biotita se presentan en menor proporción, se observan algunos minerales opacos con oxidación, así mismo se observan pequeños cristales de anfíboles.

Para esta sección se realizó un conteo de 439 puntos, en la TABLA 14 se muestran los porcentajes de minerales y el recalcu respectivo.

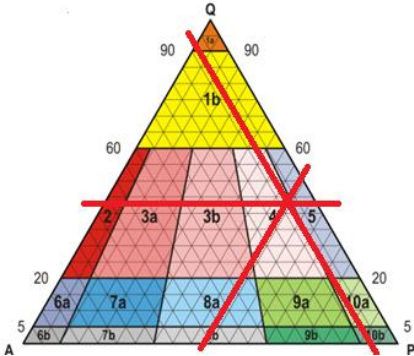
CONTEO		
MINERAL	PUNTOS	PORCENTAJE
Pl	164	37,4%
Qz	139	31,6%
Bt	75	17,1%
Afs	25	5,7%
Amp	12	2,7%
opq	18	4,1%
Ser	6	1,3%
TOTAL	439	99,7

RECALCULO	
MINERAL	PORCENTAJE
Q	42,3
A	7,6
P	50
TOTAL	100%

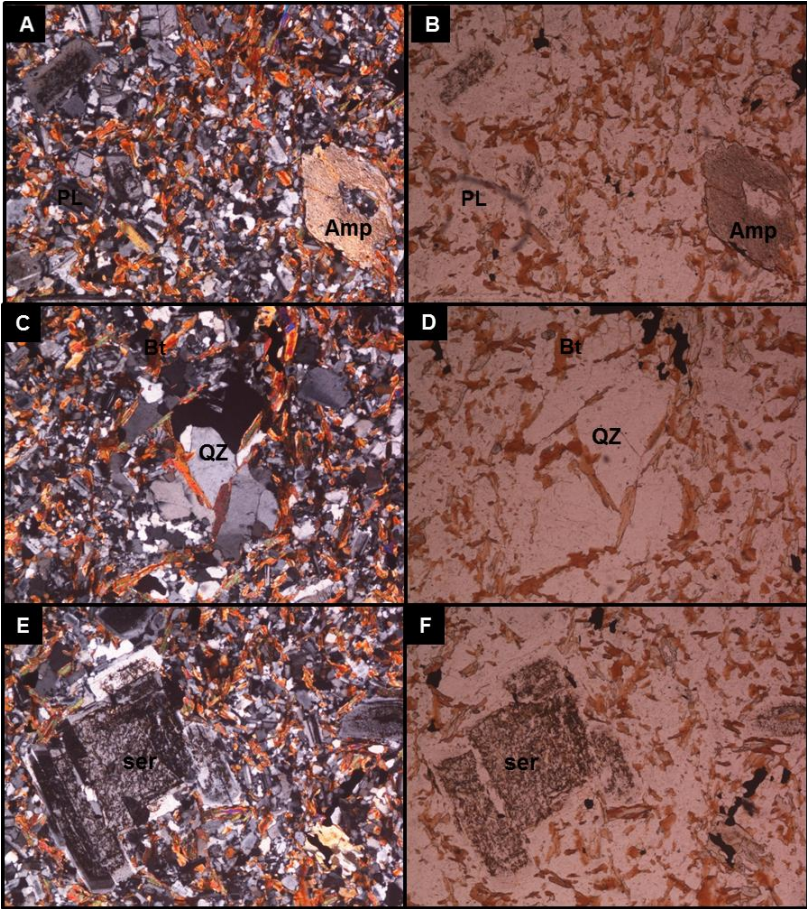
**TABLA 14.** Composición mineralógica y su respectivo porcentaje, también se aprecia el recálculo hecho para conocer el tipo de litología de la sección CSH\_6\_2.

En base a los datos del recalcu y utilizando el triángulo de Streckeisen (1976) se halla la litología que corresponde a la sección analizada, siendo esta una *Granodiorita* (FIGURA 44).

**FIGURA 44.** Triángulo de Streckeisen (1976) indicando el área que corresponde a la sección CSH\_6\_2.



**FIGURA 45.** Fotografía tomada con objetivo de 5X.



- **MUESTRA CSH\_29\_1:** roca ígnea plutónica con textura holocristalina–fanerítica–hipidiomórfica–inequigranular bimodal con tamaños de grano grueso a medio, en donde los cristales de biotita son los que alcanzan las dimensiones más grandes (7 mm de largo). Mineralógicamente está compuesta por cuarzo, plagioclasa, biotita, anfíbol y feldespato alcalino como minerales principales, opacos (pirita) como minerales menores, apatito y zircón (?) en contenidos traza y sericita y clorita como minerales secundarios producto de fuerte alteración de algunas plagioclasas.

Para esta sección se realizó un conteo de 486 puntos, en la TABLA 15 se muestran los porcentajes minerales junto al recalcu.

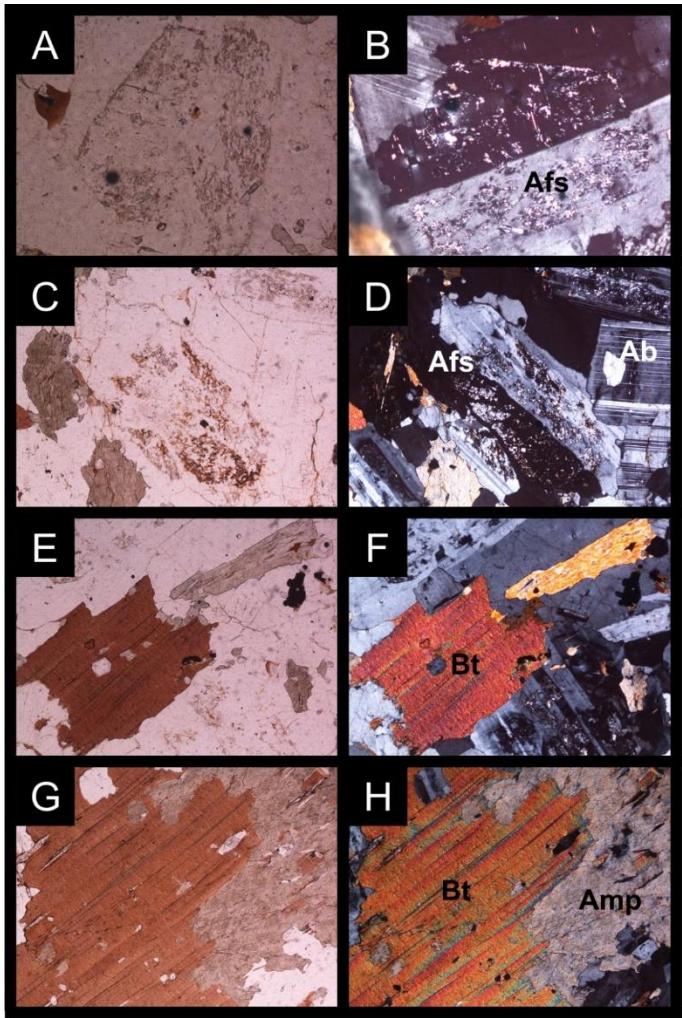
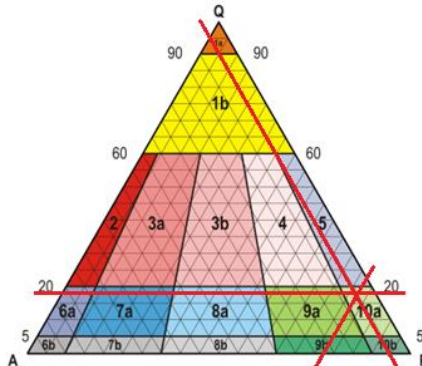
CONTEO		
MINERAL	PUNTOS	PORCENTAJE
Pl	270	55,5
Qz	62	12,7
Bt	57	11,7
Amp	45	9,2
Ser	23	4,7
Afs	18	3,7
Opq	9	1,9
Chl	2	0,4
TOTAL	486	99,8

RECALCULO	
MINERAL	PORCENTAJE
Q	17,70%
A	5,20%
P	77,10%
TOTAL	100%

**TABLA 15.** Composición mineralógica y su respectivo porcentaje, también se aprecia el recálculo hecho para conocer el tipo de litología de la sección CSH\_29\_1.

En base a los datos del recalcu y utilizando el triángulo de Streckeisen (1976) se halla la litología que corresponde a la sección analizada, siendo esta una *Cuarzo-diorita* (FIGURA 46).

**FIGURA 46.** Triángulo de Streckeisen (1976) indicando el campo al que corresponde la sección CSH\_29\_1.



**FIGURA 47.** (A y C) Feldespatos con macla de carlsbad en PPL

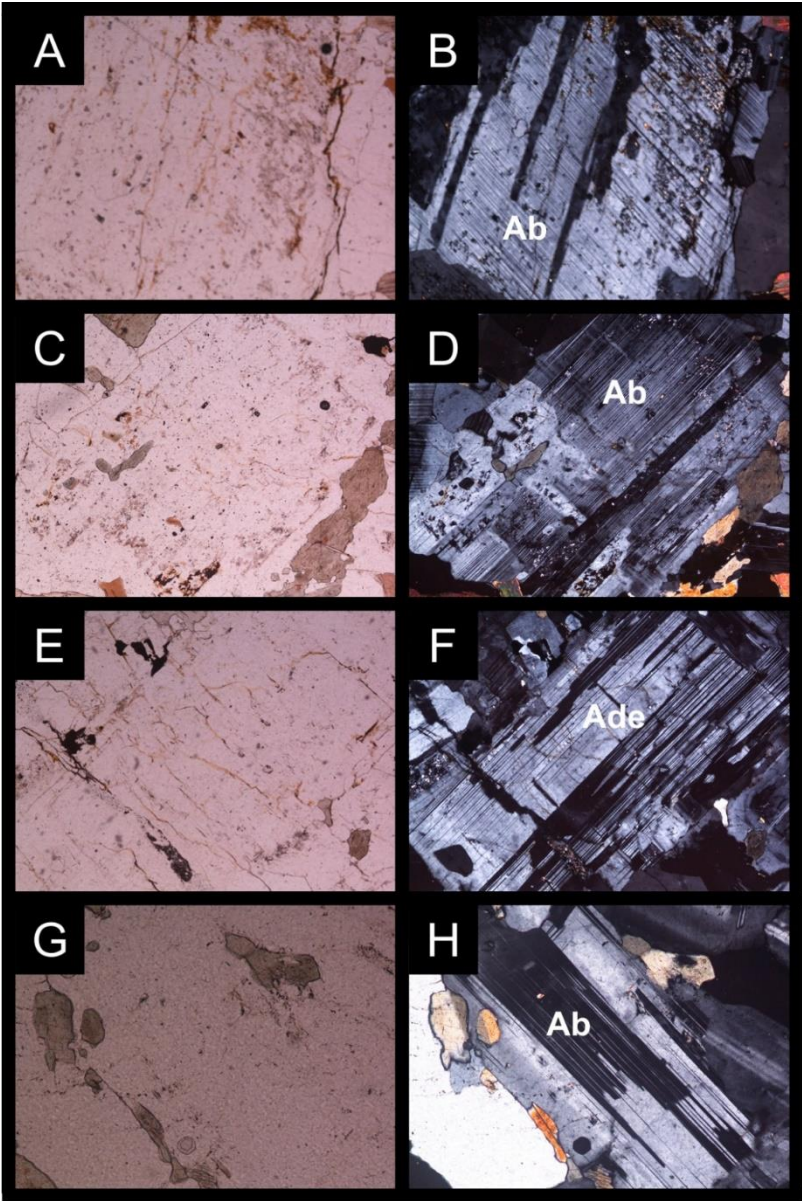


FIGURA 48. (B–D) plagioclasas con maclado polisintético y (F–H) periclina.

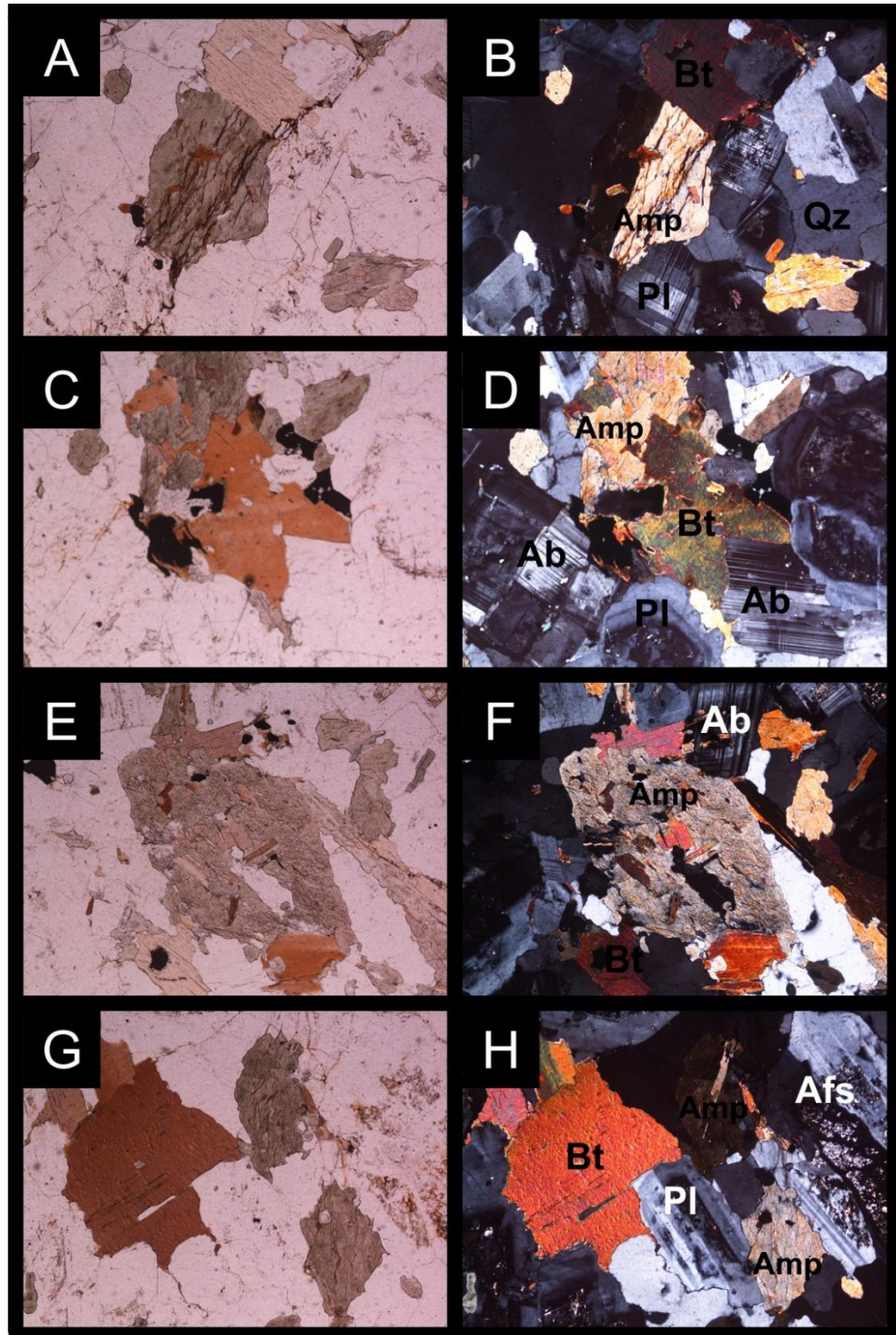


FIGURA 49. Anfíboles

- **MUESTRA CSH\_29\_2:** Esta sección es descrita como una roca ígnea plutónica con textura holocristalina–fanerítica–hipidiomórfica–inequigranular bimodal con tamaños de grano grueso a medio, los cristales de mayor tamaño corresponden a plagioclasa y biotita, en menor proporción se observan anfíboles, siempre asociados con biotitas de foliación muy bien marcada.

Para esta sección se realizó un conteo de 440 puntos, en la TABLA 16 se muestran los porcentajes minerales junto al recalcu.

CONTEO		
MINERAL	PUNTOS	PORCENTAJE
Pl	251	57%
Qz	52	12%
Bt	48	11%
Amp	43	10%
Ser	20	4,5%
Afs	16	3,6%
Opq	7	1,59%
Chl	3	0,68%
TOTAL	440	100

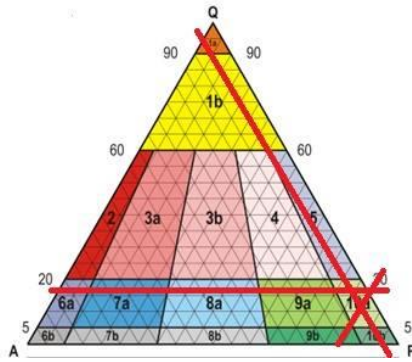
  

RECALCULO	
MINERAL	PORCENTAJE
Q	16,3
A	5
P	78,68
TOTAL	100%

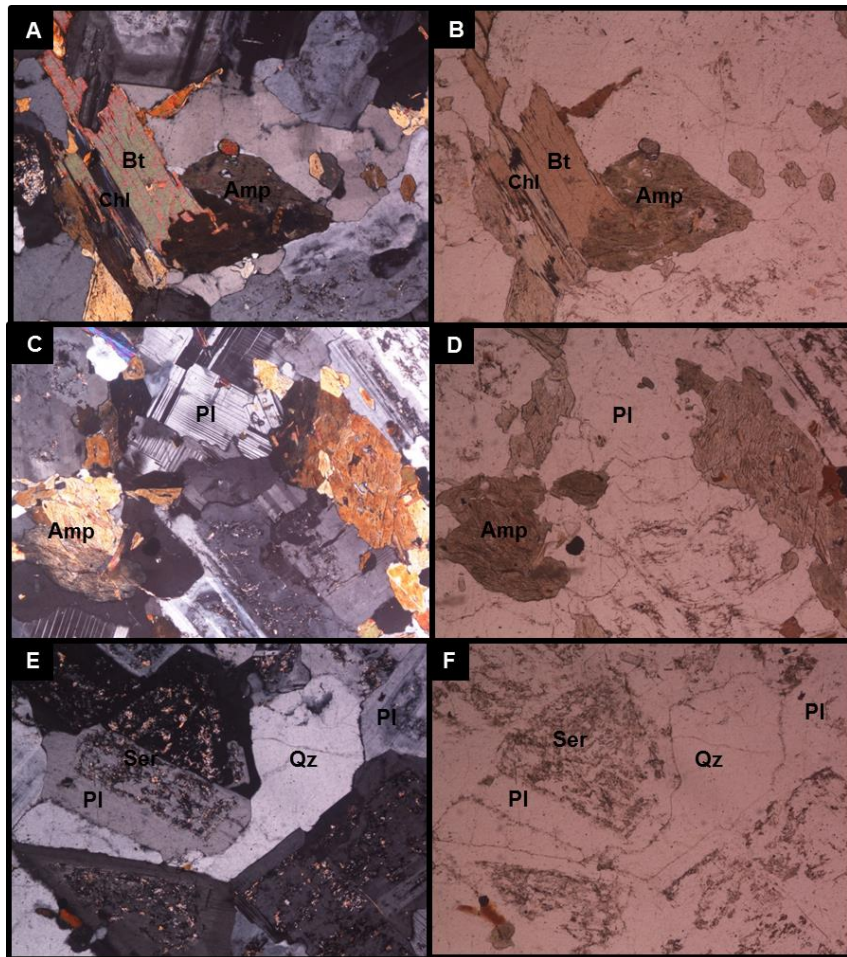
**TABLA 16.** Composición mineralógica y su respectivo porcentaje, también se aprecia el recálculo hecho para conocer el tipo de litología de la sección CSH\_29\_2.

En base a los datos del recalcu y utilizando el triángulo de Streckeisen (1976) se halla la litología que corresponde a la sección analizada, siendo esta una *Cuarzo-diorita*.

**FIGURA 50.** Triángulo de Streckeisen (1976) indicando el campo al que corresponde la sección CSH\_29\_2.



**FIGURA 51.** Fotografías tomadas con el objetivo de 5X.



### 6.3 DIQUES Y SILOS

Como ya se había mencionado anteriormente en la zona es frecuente la presencia de inyecciones de diques y silos de espesores variables, como también el desarrollo local de venas plegadas por cizalla debidas a la acción de la foliación de transposición ( $S_2$ ).

Para caracterizar esta litología se realizaron dos secciones delgadas a partir de las muestras de mano recolectadas de varios de los diques y silos presentes a lo largo de la aureola.

- **MUESTRA CSH\_3\_4:** Esta sección es descrita como una roca ígnea plutónica, exhibe una textura predominantemente porfirítica (se observan fenocristales principalmente de plagioclasa euhedral, además algunos de biotita), con matriz fanerítica compuesta principalmente por cuarzo.

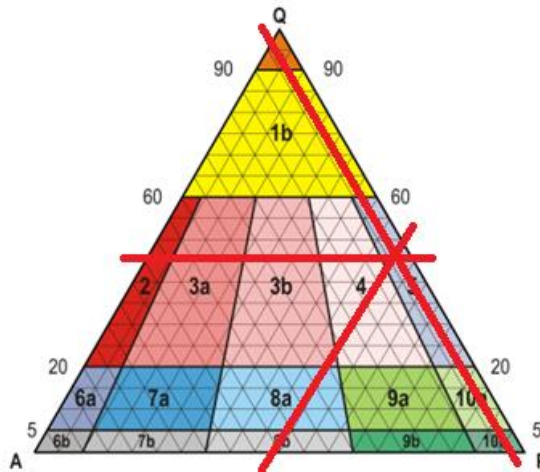
Para esta sección se realizó un conteo de 394 puntos, en la TABLA 17 se muestran los porcentajes minerales junto al recalcu

CONTEO		
MINERAL	PUNTOS	PORCENTAJE
Pl	151	37,3
Qz	136	33,6
Bt	60	14,8
Ser	20	4,9
Afs	13	3,2
Amp	10	2,5
Opq	10	2,5
Chl	5	1,2
TOTAL	405	100

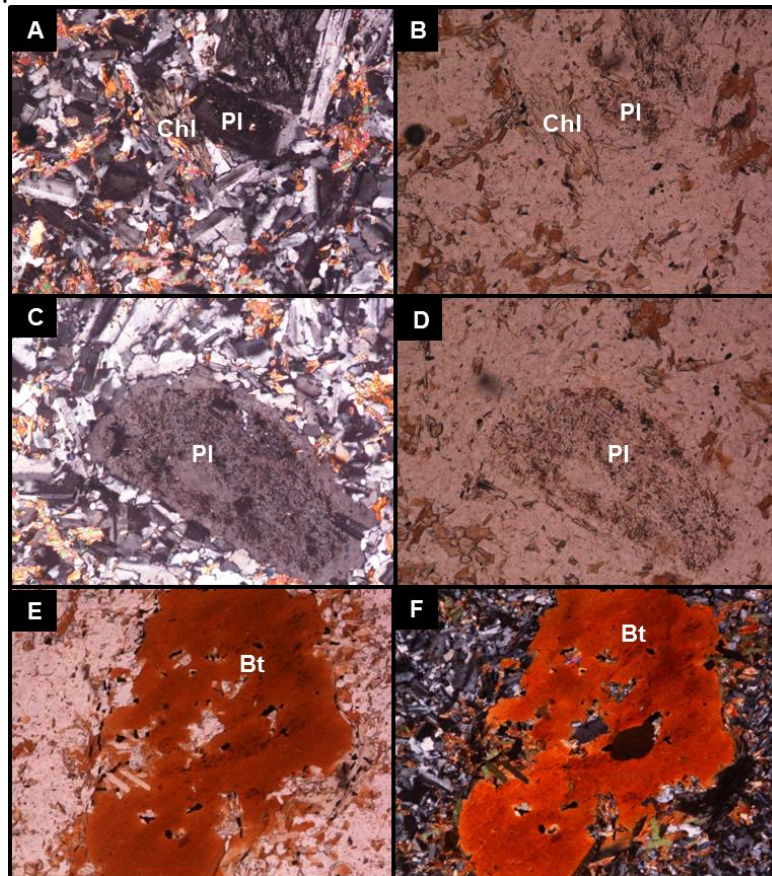
RECALCULO	
MINERAL	PORCENTAJE
Q	45,3%
A	50,3%
P	4,3%
TOTAL	100%

**TABLA 17.** Composición mineralógica y su respectivo porcentaje, también recálculo hecho para conocer el tipo de litología de la sección CSH\_3\_4.

En base a los datos del recalcu y utilizando el triángulo de Streckeisen (1976) se halla la litología que corresponde a la sección analizada, siendo esta una *Tonalita* (FIGURA 52).



**FIGURA 52.** Triángulo de Streckeisen (1976) indicando el campo al que corresponde la sección CSH\_3\_4.



**FIGURA 53.** Grandes cristales de plagioclasas y biotita embebidos en una matriz fanerítica rica en cuarzo

- **MUESTRA CSH\_12\_4:** roca ígnea plutónica con textura holocristalina–fanerítica–hipidiomórfica–inequigranular bimodal con tamaños de grano grueso y fino, en donde los cristales de biotita son los que alcanzan las dimensiones más grandes (7 mm de largo). Mineralógicamente están compuestos por cuarzo, plagioclasa, feldespato alcalino, biotita y anfíbol como minerales principales, opacos y titanita como minerales menores, apatito en contenidos traza y sericita y clorita como minerales secundarios producto de fuerte alteración de algunas plagioclasas.

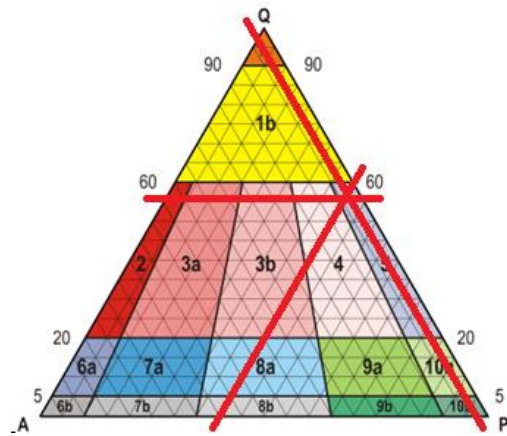
Para esta sección se realizó un conteo de 470 puntos, en la TABLA 18 se muestran los porcentajes minerales junto al recalcu.

CONTEO		
MINERAL	PUNTOS	PORCENTAJE
Qz	169	35,9
Pl	124	26,4
Amp	82	17,4
Bt	55	11,7
Afs	10	2,1
Ser	9	1,9
Chl	8	1,7
Ttn	7	1,5
Opq	6	1,3
TOTAL	470	99,9

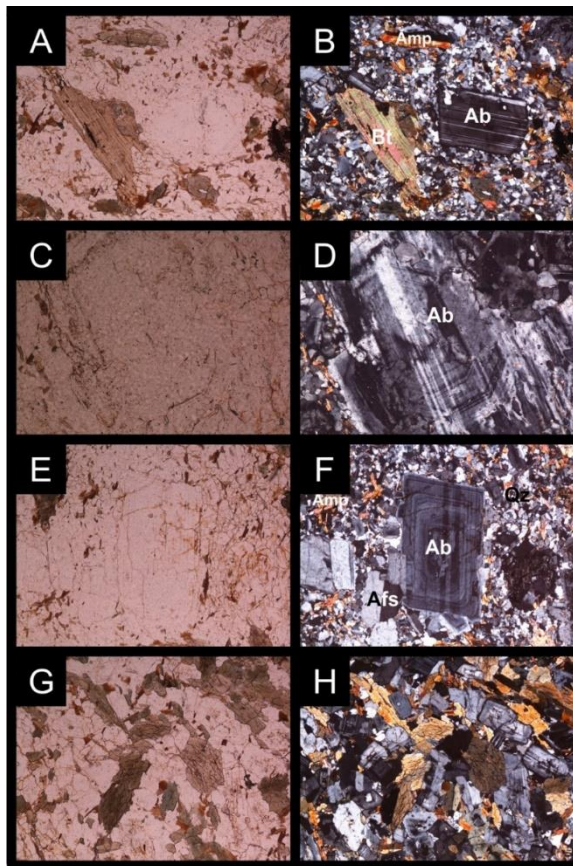
RECALCULO	
MINERAL	PORCENTAJE
Q	56.1 %
A	3.3 %
P	40.6 %
TOTAL	100%

**TABLA 18.** Composición mineralógica y su respectivo porcentaje, también recálculo hecho para conocer el tipo de litología de la sección CSH\_3\_4.

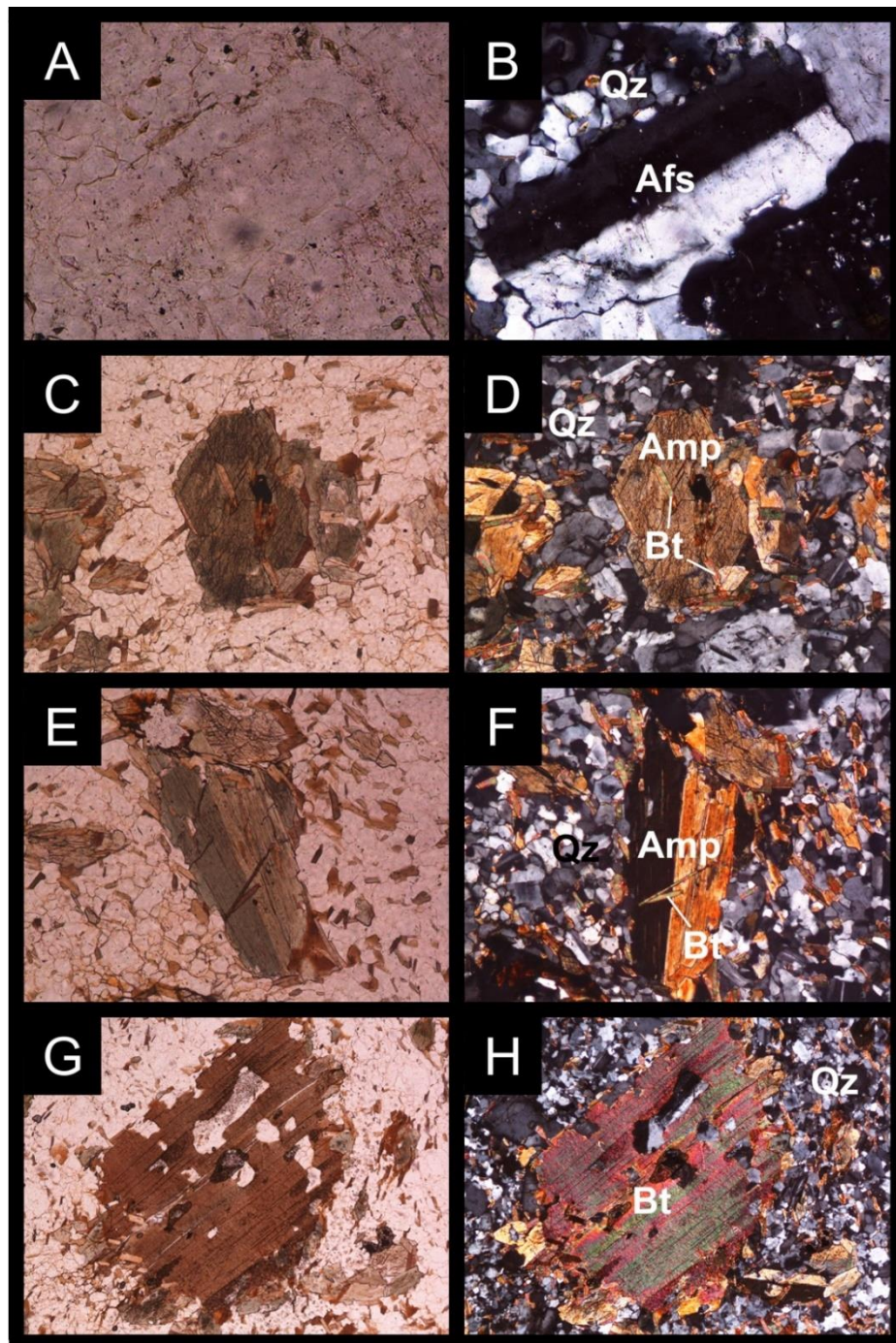
En base a los datos del recalcu y utilizando el triángulo de Streckeisen (1976) se halla la litología que corresponde a la sección analizada, siendo esta una *Tonalita* (FIGURA 54).



**FIGURA 54.** Triángulo de Streckeisen (1976) indicando el campo al que corresponde la sección CSH\_12\_4.



**FIGURA 55.** Fenocristales de biotita, anfíbol y plagioclasa embebidos por una matriz fanerítica de cuarzo principalmente.



**FIGURA 56.** Fenocristales de feldespato, biotita y anfíbol

## 7. EQUILIBRIO MINERAL

### 7.1 ELEMENTOS MAYORES, MENORES Y TRAZA

En la FIGURA 57 se revela la composición química elemental en las tres hornfelsas analizadas por el método de espectrometría de Fluorescencia de Rayos X, a partir de la cual se realizan una serie de gráficas donde se comparan las proporciones de elementos mayores, menores y traza de las tres hornfelsas (FIGURA 58).

De acuerdo a la FIGURA 58 se obtienen las siguientes observaciones:

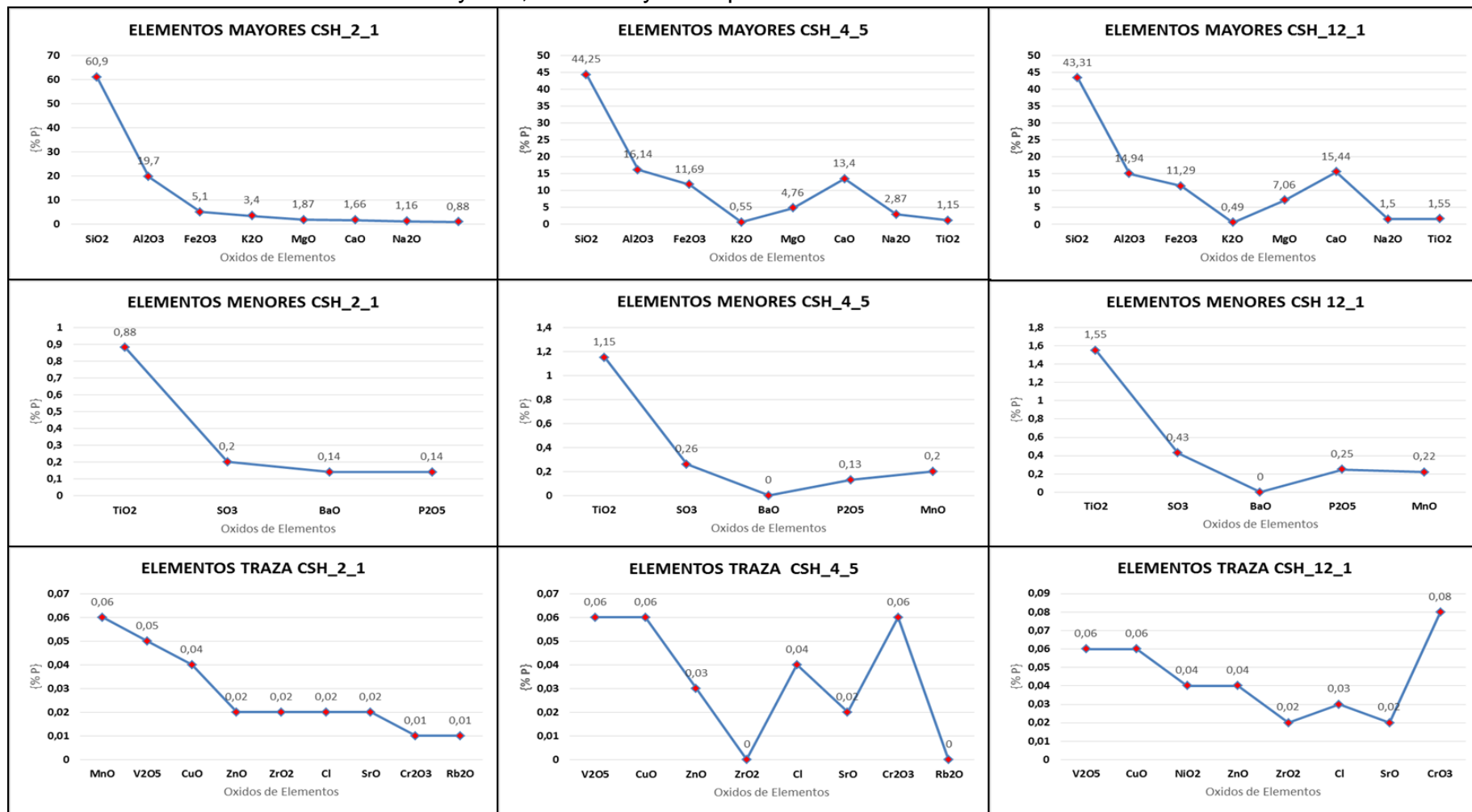
- Según la comparación de las proporciones graficadas de óxidos de elementos mayores entre las tres hornfelsas analizadas se notan disminuciones relativas de silicio, aluminio y potasio, mientras que hay un gran aumento en la cantidad de óxidos de hierro, magnesio, calcio, sodio y titanio, este último, clasificándose en la hornfelsa de menor temperatura como un elemento menor.
- En los elementos menores, se observan cambios químicos más sutiles pero posiblemente importantes, entre CSH\_2\_1 y CSH\_12\_12 hay un aumento progresivo del porcentaje de óxido de azufre y fósforo. Adicionalmente el óxido de bario se encuentra presente solo en la muestra CSH\_2\_1 y así mismo el manganesio que hace parte de los elementos traza, estando en menor proporción en relación con las muestras de mayor temperatura de metamorfismo.
- De los elementos traza se puede ver la ausencia de dióxido de zirconio en la muestra CSH\_4\_5 y manteniendo la misma proporción en las demás muestras, también se nota la disminución casi total de rubidio a medida que

las rocas están más cercanas al contacto. El níquel aparece curiosamente solo en la muestra CSH\_12\_1.

**FIGURA 57.** Composición química, utilizando el método de Fluorescencia de Rayos X (FRX), de tres muestras de hornfelsa (una por cada facies metamórfica).

CSH_2_1						CSH_4_5						CSH_12_1					
Elemento	Número atómico (Z)	Concentración	Óxido	Concentración	**Porcentaje de error	Elemento	Número atómico (Z)	Concentración	Óxido	Concentración	**Porcentaje de error	Elemento	Número atómico (Z)	Concentración	Óxido	Concentración	**Porcentaje de error
Si	14	28,47%	SiO <sub>2</sub>	60,90%	0,17%	Si	14	20,68%	SiO <sub>2</sub>	44,25%	0,21%	Si	14	20,24%	SiO <sub>2</sub>	43,31%	0,21%
Al	13	10,43%	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	19,70%	0,31%	Ca	20	9,58%	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16,14%	0,38%	Ca	20	11,03%	CaO	15,44%	0,18%
Fe	26	3,57%	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,10%	0,13%	Al	13	8,54%	CaO	13,40%	0,19%	Al	13	7,91%	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14,94%	0,39%
K	19	2,82%	K <sub>2</sub> O	3,40%	0,37%	Fe	26	8,17%	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11,69%	0,10%	Fe	26	7,89%	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11,29%	0,10%
Ca	20	1,19%	MgO	1,87%	1,10%	Mg	12	2,87%	MgO	4,76%	0,71%	Mg	12	4,25%	MgO	7,06%	0,57%
Mg	12	1,13%	CaO	1,66%	0,55%	Na	11	2,13%	Na <sub>2</sub> O	2,87%	1,86%	Na	11	1,11%	TiO <sub>2</sub>	1,55%	0,60%
Na	11	0,86%	Na <sub>2</sub> O	1,16%	2,80%	Ti	22	0,69%	TiO <sub>2</sub>	1,15%	0,69%	Ti	22	0,93%	Na <sub>2</sub> O	1,50%	2,67%
Ti	22	0,53%	TiO <sub>2</sub>	0,88%	0,71%	K	19	0,46%	K <sub>2</sub> O	0,55%	0,92%	K	19	0,41%	K <sub>2</sub> O	0,49%	0,96%
Ba	56	0,13%	SO <sub>3</sub>	0,20%	2,26%	Mn	25	0,16%	SO <sub>3</sub>	0,26%	1,95%	Mn	25	0,17%	SO <sub>3</sub>	0,43%	1,48%
S	16	0,08%	BaO	0,14%	2,91%	S	16	0,10%	MnO	0,20%	0,90%	S	16	0,17%	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,25%	2,68%
P	15	0,06%	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,14%	3,77%	P	15	0,06%	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,13%	3,94%	P	15	0,11%	MnO	0,22%	0,86%
Mn	25	0,05%	MnO	0,06%	1,60%	Cu	29	0,05%	CuO	0,06%	1,11%	Cr	24	0,06%	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,08%	1,93%
Cu	29	0,04%	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,05%	7,00%	Cr	24	0,04%	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,06%	7,56%	Cu	29	0,04%	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,06%	7,50%
V	23	0,03%	CuO	0,05%	1,02%	Zn	30	0,02%	ZnO	0,03%	1,60%	V	23	0,03%	CuO	0,06%	1,21%
Zn	30	0,03%	ZnO	0,04%	1,09%	Cl	17	0,04%	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,06%	2,38%	Ni	28	0,03%	NiO	0,04%	1,71%
Cl	17	0,02%	ZrO <sub>2</sub>	0,02%	0,71%	V	23	0,03%	Cl	0,04%	5,02%	Zn	30	0,03%	ZnO	0,04%	1,43%
Zr	40	0,02%	Cl	0,02%	7,39%	Zn	30	0,02%	ZnO	0,03%	1,60%	Cl	17	0,03%	Cl	0,03%	6,44%
Sr	38	0,02%	SrO	0,02%	0,92%	Sr	38	0,02%	SrO	0,02%	1,26%	Sr	38	0,02%	SrO	0,02%	1,09%
Rb	37	0,01%	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,01%	4,68%	Ni	28	0,01%	NiO	0,02%	3,34%	Zr	40	0,01%	ZrO <sub>2</sub>	0,02%	1,15%
Cr	24	0,01%	Rb <sub>2</sub> O	0,01%	1,40%	---	---	---	*L.O.I	4,32%	---	---	---	---	*L.O.I	3,19%	---
---	---	---	*L.O.I	4,53%	---	<i>Elementos minoritarios</i>						<i>Elementos minoritarios</i>					
<i>Elementos minoritarios</i>						<i>Elementos minoritarios</i>						<i>Elementos minoritarios</i>					
Elemento	Número atómico (Z)	Concentración	Óxido	Concentración	**Porcentaje de error	Elemento	Número atómico (Z)	Concentración	Óxido	Concentración	**Porcentaje de error	Elemento	Número atómico (Z)	Concentración	Óxido	Concentración	**Porcentaje de error
Ni	28	76 mg/Kg	NiO	97 mg/Kg	3,81%	Zr	40	78 mg/Kg	ZrO <sub>2</sub>	105 mg/Kg	1,60%	Pb	82	76 mg/Kg	PbO	82 mg/Kg	7,44%
Pb	82	32 mg/Kg	PbO	34 mg/Kg	12,90%	Pb	82	37 mg/Kg	PbO	40 mg/Kg	14,90%	Y	39	24 mg/Kg	Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	30 mg/Kg	6,18%
Y	39	27 mg/Kg	Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	34 mg/Kg	2,71%	Y	39	30 mg/Kg	Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	38 mg/Kg	5,42%	Nb	41	15 mg/Kg	Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	21 mg/Kg	9,12%
Ga	31	20 mg/Kg	Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	27 mg/Kg	9,00%	Ga	31	17 mg/Kg	Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	22 mg/Kg	14,50%	Rb	37	10 mg/Kg	Rb <sub>2</sub> O	11 mg/Kg	14,50%

**FIGURA 58.** Gráficas de elementos mayores, menores y traza presentes en cada una de las muestras.



## 7.2 MINIMIZACIÓN DE ENERGÍA LIBRE DE GIBBS

Las condiciones de presión y temperatura, bajo las cuales se forman las rocas metamórficas, son definidas bajo observaciones que reflejen condiciones de equilibrio; estas condiciones son apreciables en las características petrográficas, cambios texturales y asociaciones minerales de las muestras (Will, 1998).

Los cambios en la presión y temperatura involucran procesos termodinámicos, procesos que se basan en los cambios que sufren las variables de estado. Las variables de estado pueden ser *intensivas*: definidas como aquellas que no cambian así se divida el sistema y son independientes de la cantidad de material (p. ej. la presión y temperatura) o *extensivas*: que sí cambian cuando el sistema se divide pues dependen de la cantidad de material (p. ej. la entalpía, entropía y energía libre de Gibbs) (SERC, 2014). La entropía es definida como la medida de la uniformidad con respecto a la cantidad de energía dentro de un sistema (Best, 2003). La entalpía está relacionada con los deltas de energía calorífica que se presentan en un proceso a presión constante en el cual se ha transferido parte de esta energía (Best, 2003). La energía libre de Gibbs, a grandes rasgos, indica el equilibrio y espontaneidad que llegó a alcanzar una reacción química a presiones y temperaturas constantes, entre menor sea la energía libre de Gibbs más estable es el sistema.

Cuando un volumen de roca ha acomodado sus componentes a las condiciones a las que está siendo sometido, por medio de cambios físicos (generación de nuevas texturas y estructuras y formación de nuevos minerales), se dice que ha alcanzado un estado de equilibrio (Gómez, 2006). Este estado de equilibrio puede ser estable (menor configuración de energía libre de Gibbs) o metaestable (no tiene la menor configuración de energía libre de Gibbs pero puede llegar a un estado estable) (Spear, 1995).

Los diagramas de minimización de energía libre de Gibbs (equilibrio mineral) se generan a partir de la reducción al sistema mineral escogido, transformando los porcentajes minerales de los óxidos principales obtenidos con la FRX a %molar (TABLA 19). Los datos de los óxidos de la TABLA 19 se utilizan junto con el software Thermocalc versión 3.33 y la base de datos tc-ds55, además de dos scripts (debidamente enlazados): uno donde se realiza la configuración para que los resultados a obtener sean lo que queremos, es decir, la minimización de energía libre de Gibbs y el script del sistema mineral escogido, en donde se encuentran las bases termodinámicas que utilizará el software (MnNCKFMASH, para este caso); ya luego se procede a realizar los cálculos tal y como se muestra en la FIGURA 59, asignando rangos de temperatura entre 350–850 [°C] y presión entre 1–5 [Kbar] a intervalos de 50 [°C] y 400 [bar].

**TABLA 19.** Concentración en %molar de los principales óxidos

MUESTRA \ ÓXIDO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	FeO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	MnO
CSH_2_1	72,28	13,78	2,11	3,31	4,56	2,57	1,33	0,06
CSH_4_5	50,68	10,89	16,44	8,13	10,08	0,40	3,19	0,19
CSH_12_1	48,32	9,82	18,46	11,74	9,48	0,36	1,62	0,20

**FIGURA 59.** Interfaz del software Thermocalc de Powell & Holland v 3.33.

```
D:\THERMOCALC1\tc333.exe
THERMOCALC 3.33 (Free Pascal version)

calculation type :
  0 = table of thermodynamic data of end-members
  1 = phase diagram calculations
  2 = average pressure-temperature calculations
  3 = calculations on all reactions between end-members
  4 = list end-member names and compositions
control code : 1
the main output is in the file, "tc-ptpseudo-o.txt"
other (eg drawpd) output is in the file, "tc-ptpseudo-dr.txt"

calcs use:

reading a-x datafile, "tc-MnNCKFMASHp.txt"...
ged anth liq cd st g px ctd chl bi mu pa ksp pl sp and
sill ru ky q H2O
choose from: ged anth liq cd st g px ctd chl bi mu pa ksp pl sp #
which phases : chl bi mu ksp pl and q
chl bi mu ksp pl and q
in excess: names :
max variance of equilibria to be looked at : 6

specification of PT window:
P range over which equilibria to be calculated
P window: P low,high : 1 5
T range over which equilibria to be calculated
T window: T low,high : 350 850
T window : 350 <-> 850°C :T interval : 50
P window :1 <-> 5 kbar :P interval : 0.4
```

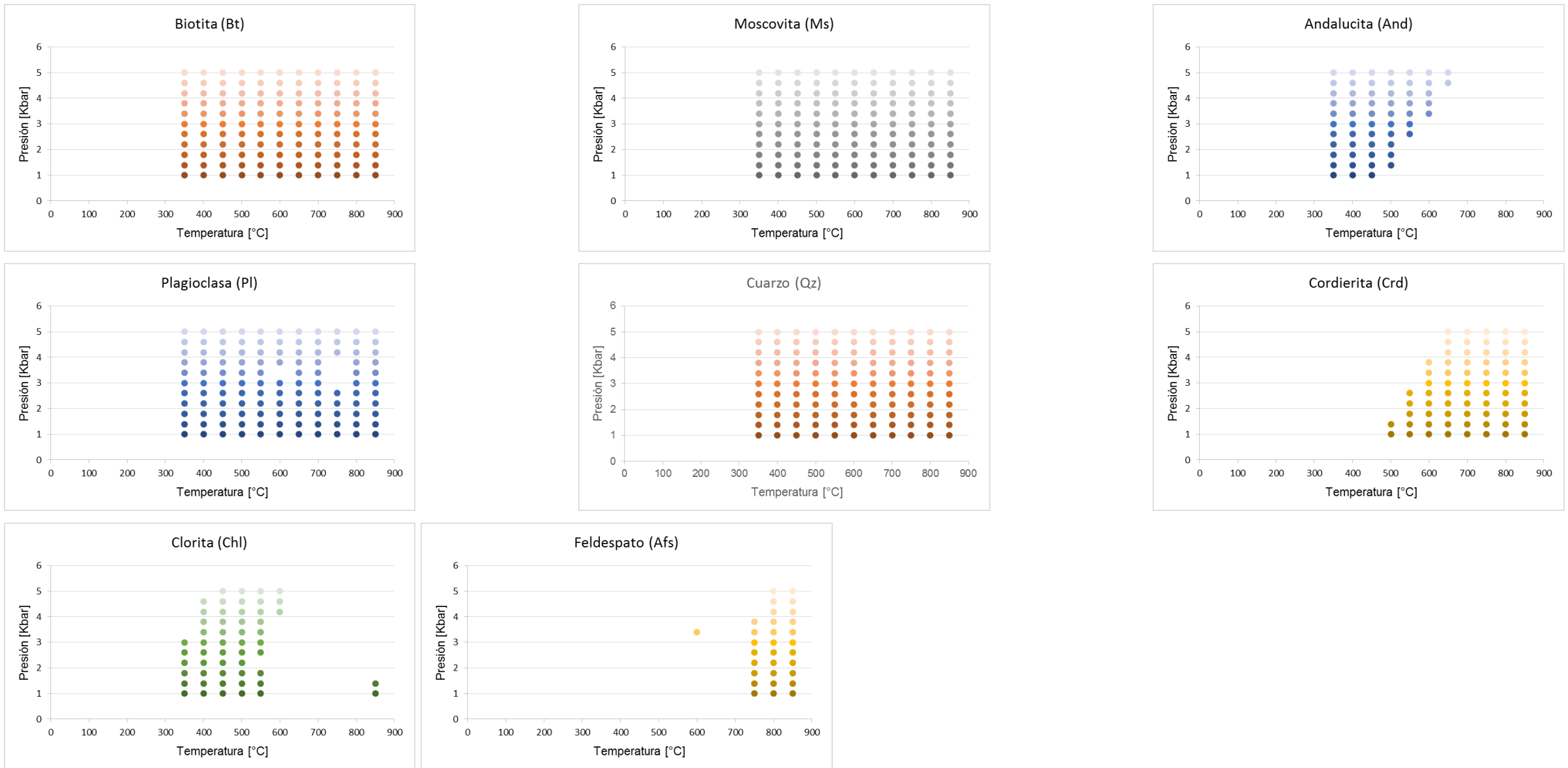
Partiendo del conocimiento de las paragénesis minerales establecidas para cada muestra en la petrografía, se procede a realizar la minimización de energía libre de Gibbs para así tener una idea de cuáles son las fases minerales que probablemente estarán en equilibrio (en cierto intervalo PT), introduciendo en el software la mayor cantidad de fases minerales como sea posible (siempre y cuando el software lo permita) y que se piense que puedan ser estables para esta muestra (p.ej. usar cordierita o feldespato con la composición química de la roca CSH\_2\_3 que aunque no se observaron claramente en la paragénesis pueden tener un equilibrio mineral en ciertos intervalos PT).

**7.2.1 Muestra CSH\_2\_1.** Los rangos de equilibrio de fase mineral para la asociación Bt + Ms + And + Pl + Qz + Chl + Crd + Afs (FIGURA 60) muestran una completa estabilidad para la biotita, moscovita, plagioclasa y cuarzo; mientras que la andalucita aun sin ser estable en toda la ventana PT lo es en el intervalo de 350–600 [°C], la cordierita, por otro lado, es estable en rangos PT diferentes u opuestos a los necesarios para generar andalucita. Los feldespatos, con esta química mineral, serán estables sólo si se alcanzan temperaturas muy elevadas. Por lo anterior se dice que la cordierita y el feldespato son inestables en las condiciones necesarias para tener andalucita estable (mineral característico de la muestra por petrografía) por lo cual son automáticamente descartados para las pseudosecciones.

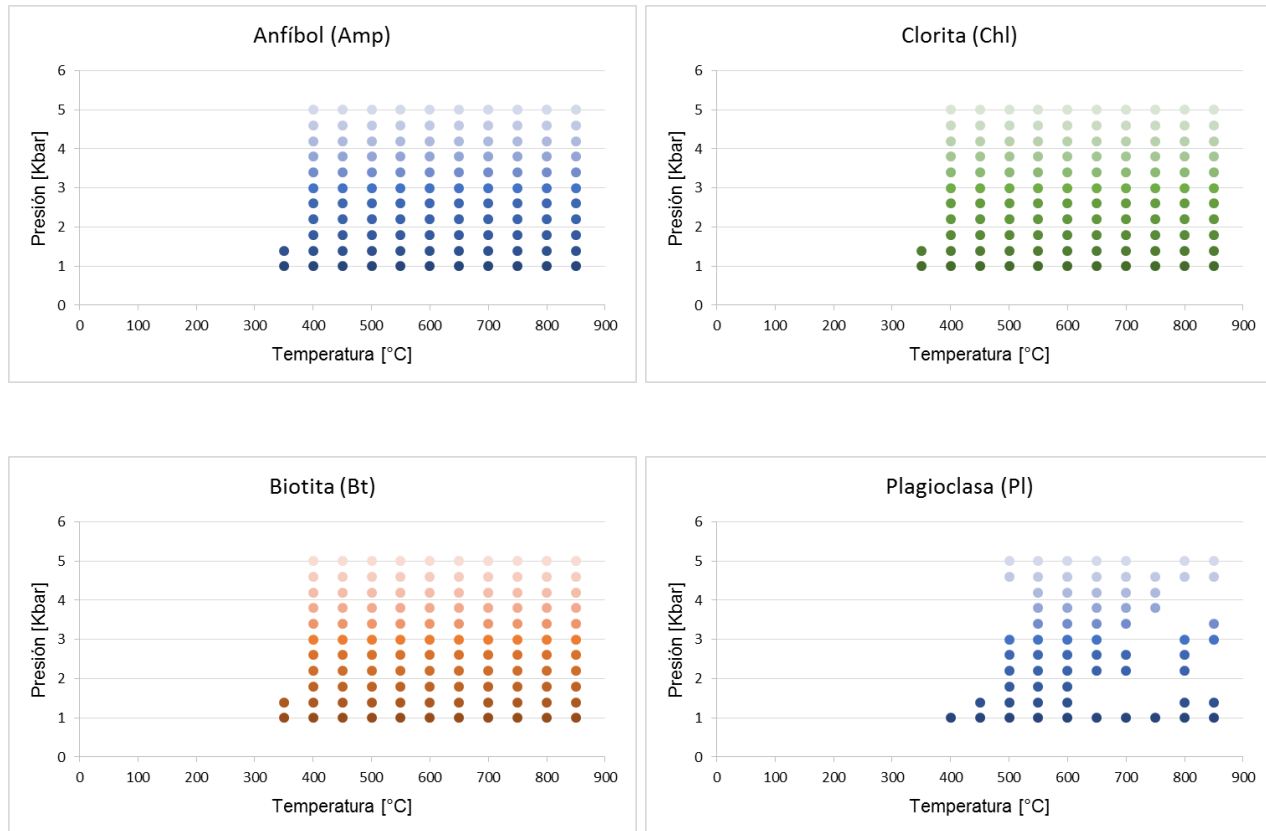
**7.2.2 Muestra CSH\_4\_5.** Los rangos de equilibrio de fase mineral para la asociación Amp + Chl + Bt + Pl ± Qz ± Px (FIGURA 61) muestran que el anfíbol, la biotita y clorita son totalmente estables, mientras que el cuarzo (350–500 [°C] y 650–850 [°C]) y el piroxeno (450–500 [°C], 650 [°C] y 750–850 [°C]) presenta equilibrio a diferentes presiones y temperaturas. Por otro lado, la plagioclasa aun siendo estable en todo el intervalo, lo es más hacia temperaturas inferiores (400–650 [°C]), ya luego de 650 [°C] se presenta en equilibrio a diferentes intervalos de presión.

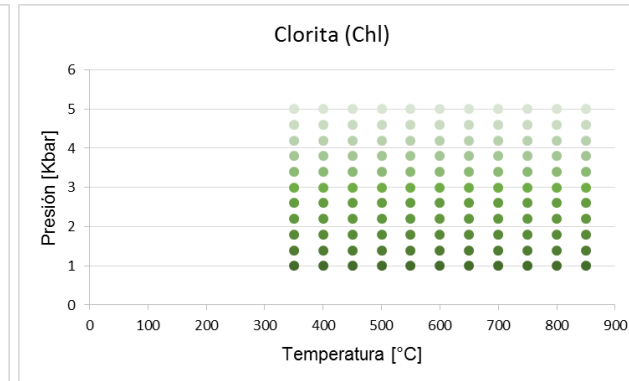
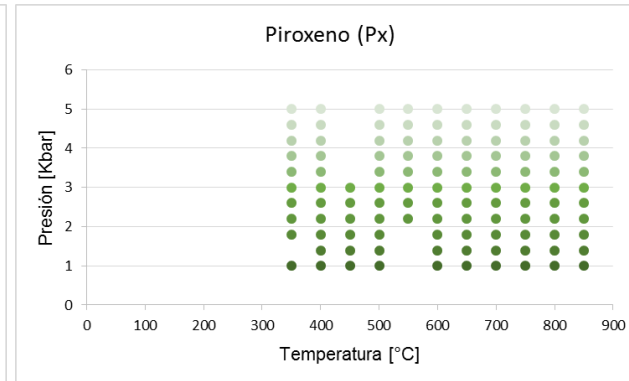
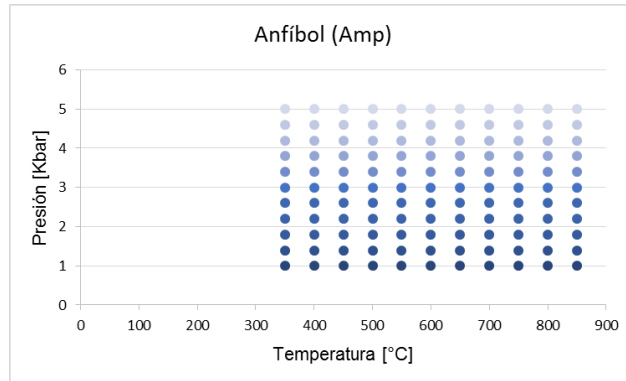
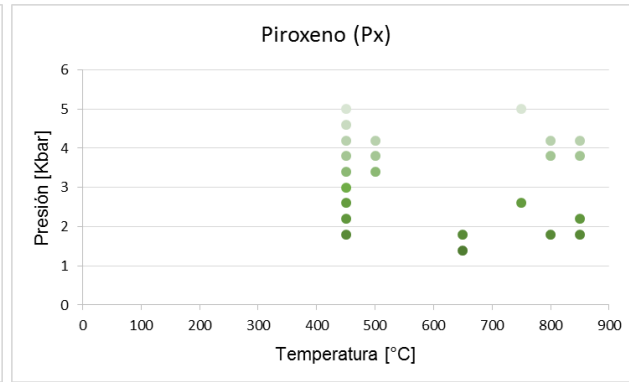
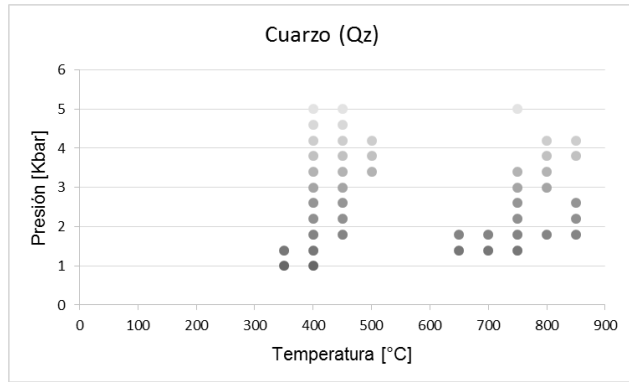
**7.2.3 Muestra CSH\_12\_1.** Los rangos de equilibrio de fase mineral para la asociación Amp + Px + Bt + Chl + Pl + Qz + Afs, (FIGURA 62A) muestran que el anfíbol, piroxeno y la clorita son totalmente estables, mientras que la biotita (350–650 [°C] y 750–800 [°C]), la plagioclasa (350–400 [°C] y 550–650 [°C]) y el cuarzo (350–500 [°C]), presentan equilibrio a diferentes presiones y temperaturas. El feldespato es estable a muy altas temperaturas (650–850 [°C]), aunque en sección delgada no se evidenció muy bien su existencia, estos resultados indican que de haber feldespato en la roca, esta debió alcanzar temperaturas más altas para así recristalizar este mineral y poder alcanzar la facies sanidina. Por este motivo, anteriormente descrito, se decidió graficar la fase mineralógica sin Afs, los resultados de estos cálculos se muestran en la FIGURA 62B, aquí se muestra que el anfíbol, biotita y la clorita siguen estando en total estabilidad, mientras el piroxeno se vuelve un poco inestable pues a altas temperaturas su equilibrio se presenta a diferentes intervalos de presión. Por otra parte, la plagioclasa y el cuarzo mantienen un equilibrio similar al anteriormente expuesto.

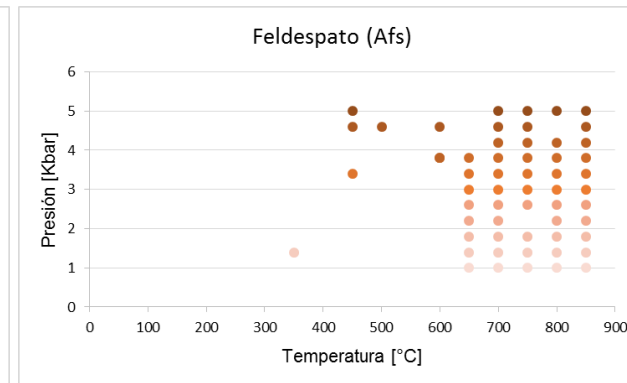
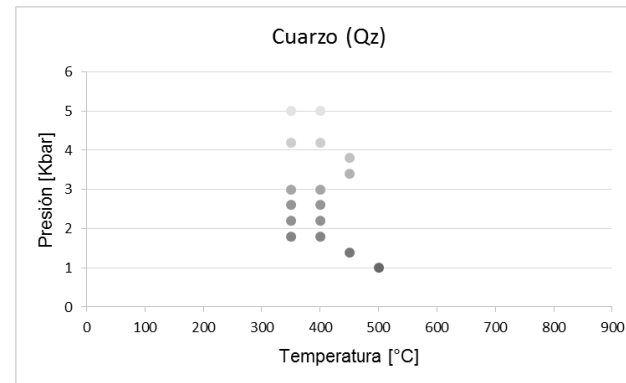
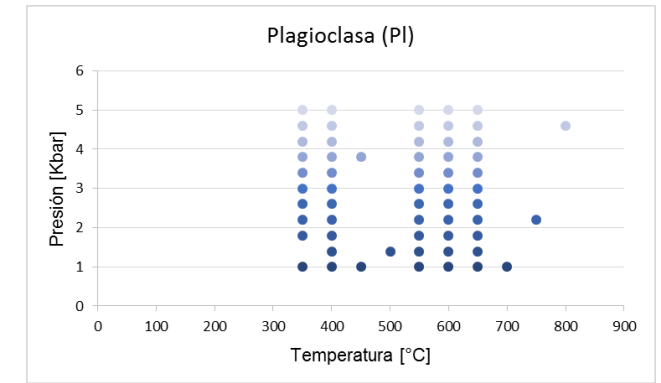
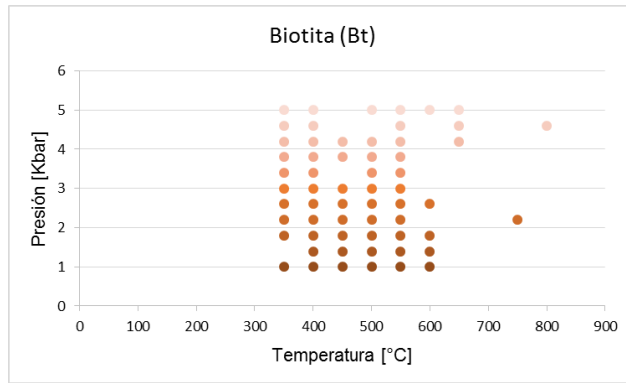
**FIGURA 60.** Graficas de rangos de equilibrio para las fases minerales sensibles a cambios de presión y temperatura de la muestra CSH\_2\_3.



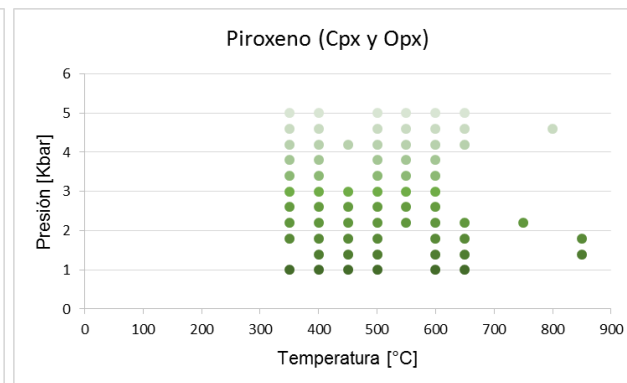
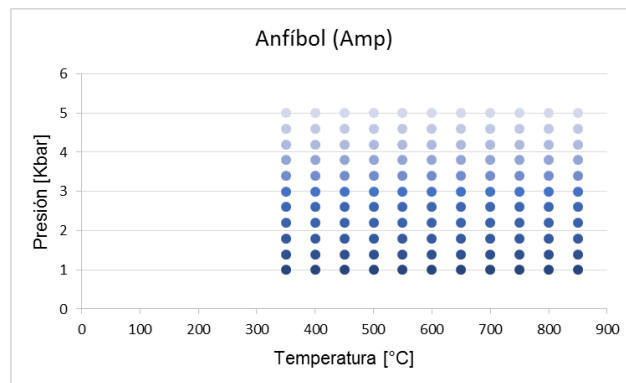
**FIGURA 61.** Graficas de rangos de equilibrio para las fases minerales sensibles a cambios de presión y temperatura de la muestra CSH\_4\_5.



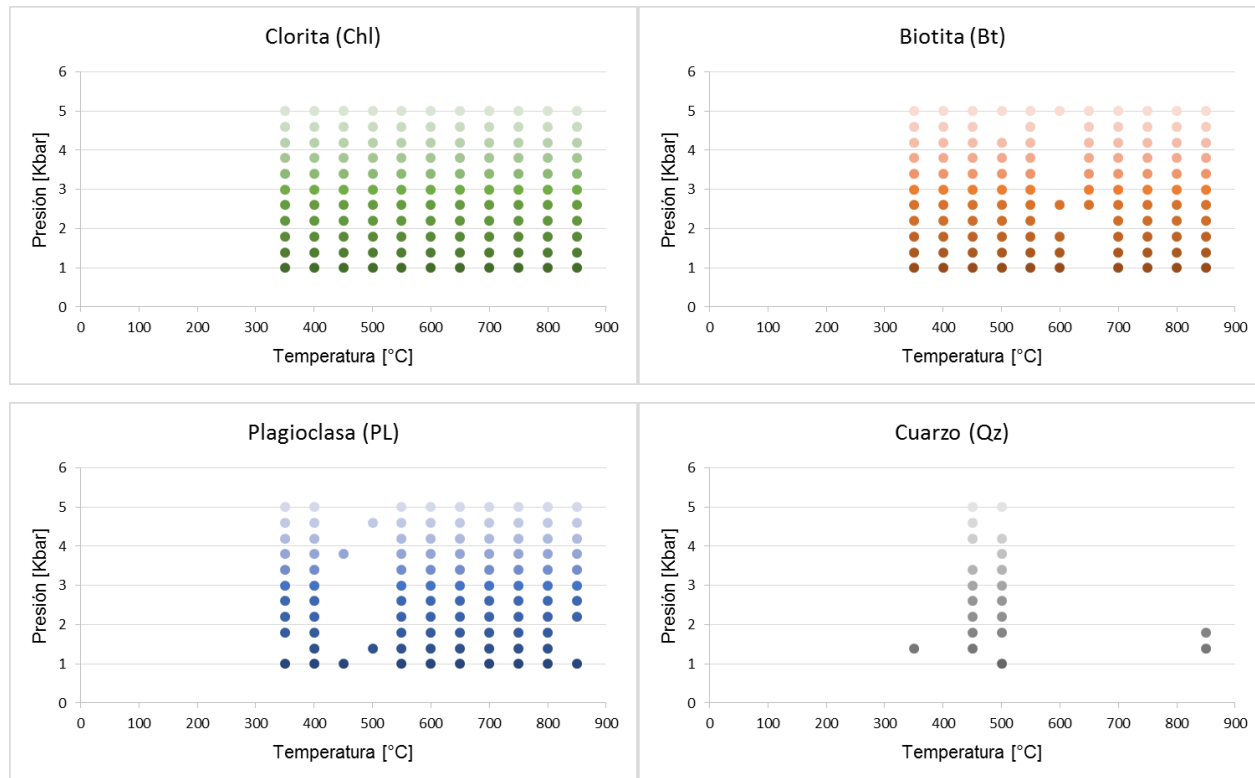




**FIGURA 62.** Graficas de rangos de equilibrio para las fases minerales sensibles a cambios de presión y temperatura de la muestra CSH\_12\_1, con feldespato.



**FIGURA 63.** Graficas de rangos de equilibrio para las fases minerales sensibles a cambios de presión y temperatura de la muestra CSH\_12\_1, sin feldespatos.



### 7.3 CONSTRUCCIÓN DE PSEUDOSECCIONES PT

El proceso de metamorfismo se basa en la transformación de cuerpos de roca involucrando cambios de presión y temperatura. En un contexto geológico estos cuerpos podrían ser desde pequeños volúmenes de roca, hasta llegar a ser la totalidad de la corteza terrestre (Best, 2003).

La determinación de las condiciones de PT para asociaciones minerales en equilibrio, mediante el uso de programas computacionales, ha tenido gran auge en los últimos años, debido al incremento en la capacidad de procesamiento computacional y a la creación de bases termodinámicas exhaustivas y consistentes (p. ej., Holland & Powell, 1998; Berman, 1988).

Una de las maneras de apreciar dichas condiciones, de presión y temperatura, es mediante la representación gráfica de pseudosecciones, las que corresponden a secciones de diagramas de fases para la composición química específica de una roca y donde se pueden ver las relaciones existentes entre las asociaciones minerales. Según Connolly (2005), las pseudosecciones son secciones (P–T, P–X, T–X, etc.) que se componen de diversos campos de fases caracterizados por una asociación mineral particular, donde dentro de cada uno de estos campos la composición química y las propiedades físicas de las fases estables puede variar continuamente, pero están inequívocamente determinadas en cada punto (Amaya, 2012). En otras palabras, muestran campos multivariantes de asociaciones mineralógicas en los cuales se asume que las fases involucradas están en equilibrio químico, a determinados rangos PT.

En la actualidad las pseudosecciones pueden ser calculadas utilizando diversos programas, que difieren en el método de cálculo pero, para procesar los datos, dependen de los mismos factores: calidad de las bases de datos termodinámicos,

seguridad de que la composición química elegida represente una composición en equilibrio de la roca (composición efectiva) y confiabilidad de las suposiciones de equilibrio termodinámico (Stüwe, 1997). Por otra parte, en la aplicación de cálculos computacionales para el desarrollo de los diagramas de asociaciones minerales en equilibrio, muestra que la mayor fuente de problemas y dificultades tiene que ver con las suposiciones de equilibrio y la composición efectiva de la roca por sobre la elección de la base de datos termodinámicos (de Capitani y Petrakakis, 2010).

Las muestras que se seleccionaron para los análisis corresponden a diferentes hornfelsas nombradas como CSH\_2\_1, CSH\_4\_5 y CSH\_12\_1. Los resultados de las pseudosecciones se presentan en las FIGURAS 62, 63 y 64. La primera fue tomada sobre la facies Hornfelsa Ab/Ep, la segunda sobre la facies Hornfelsa Anfibólica y la tercera sobre la facies Hornfelsa Piroxénica.

El diagrama de equilibrio de fases se realizó utilizando el software libre Theriak/Domino versión 5.9.6, con la base de datos JUN92.bs, tal y como se muestra en la FIGURA 61, asignando rangos de temperatura entre 350–850 [°C] y presión entre 1–5 [Kbar]. Los diagramas de variación PT se generaron considerando el sistema químico MnNCKFMASH, introduciendo la información de estos nueve componentes a considerar (MnO, Na<sub>2</sub>O, CaO, K<sub>2</sub>O, FeO total, MgO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O) en forma de porcentaje molar (TABLA 19) para así obtener los diagramas.

```

J:\US\TheriakDominoWIN\Programs\domino.exe
-----
database definition
Enter [ "?" | CR | "files" | "script" | database filename ] <JUN92.bs>

-----
definition of X-axis
-----
X-variable may be: TC, TK, P, A(abc), LNA(abc), LOGA(abc), BIN, TER
Enter [ "?" | "list" | CR | X-variable X-min X-max (X-Grid) (width) (ptdist)] <TC 350 850>?

-----
definition of Y-axis
-----
Y-variable may be: TC, TK, P, PT, THG, A(abc), LNA(abc), LOGA(abc), BIN
Enter [ "?" | CR | "list" | Y-variable Y-min Y-max (Y-Grid) (height)] <P 1000 5000>?

-----
definition of calculation type
-----
to calculate          enter
-----
equilibrium phase diagram      "." (dot)
isolines:
  special funtions:             Key      min  max  step
  non-solution phases:         Name    Key   min  max  step
  solution phases:             Name    Key  Nr   min  max  step

For help with isoline definition type "i".

Enter [ "?" | CR | "point" | "list" | "i" | "." |
      | "pix" ix iy | (Phase) Key (Nr) min max step ] <.>?

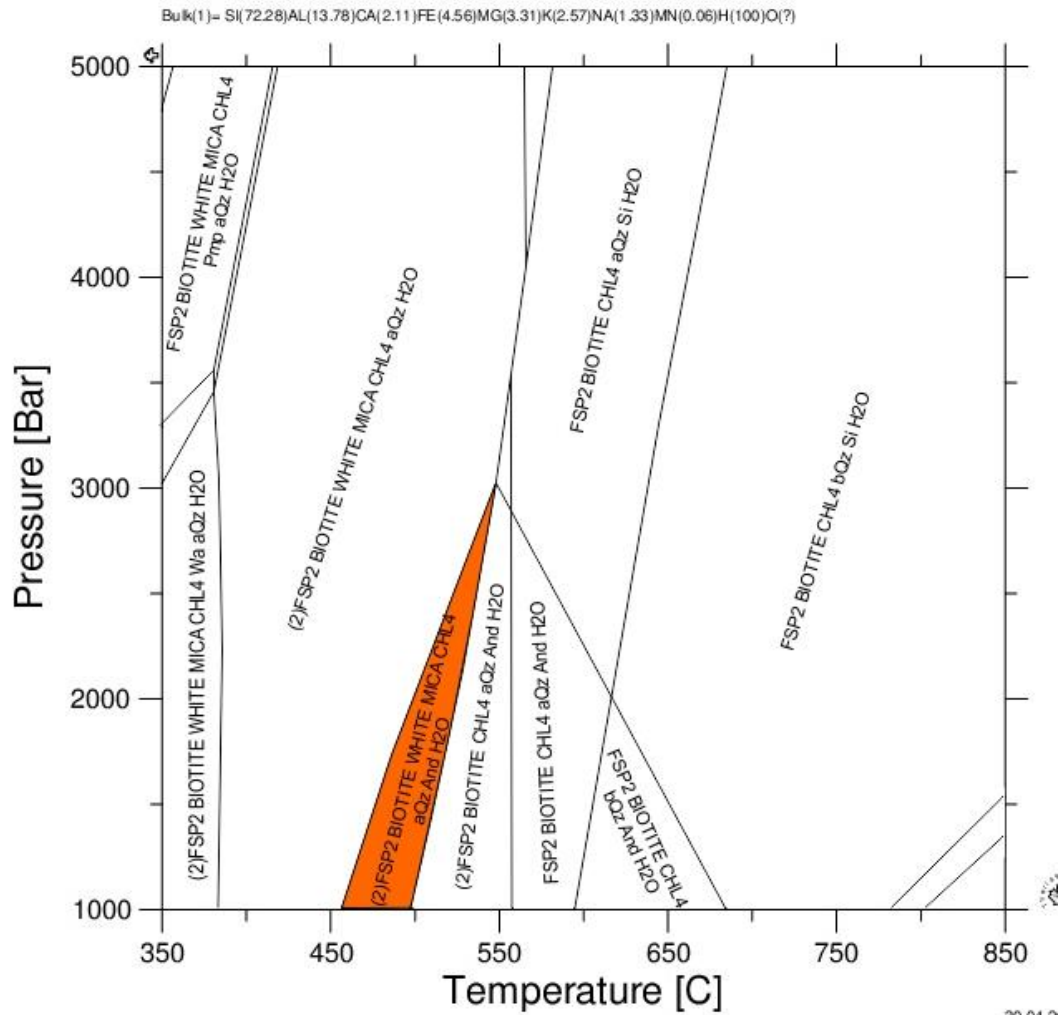
-----
labeling of reactions
-----
Labels: 1=assemblages, 2=new phases, 3=reactions, -1=special
Enter [ "?" | CR | Label (prec smooth) ] <1>?

```

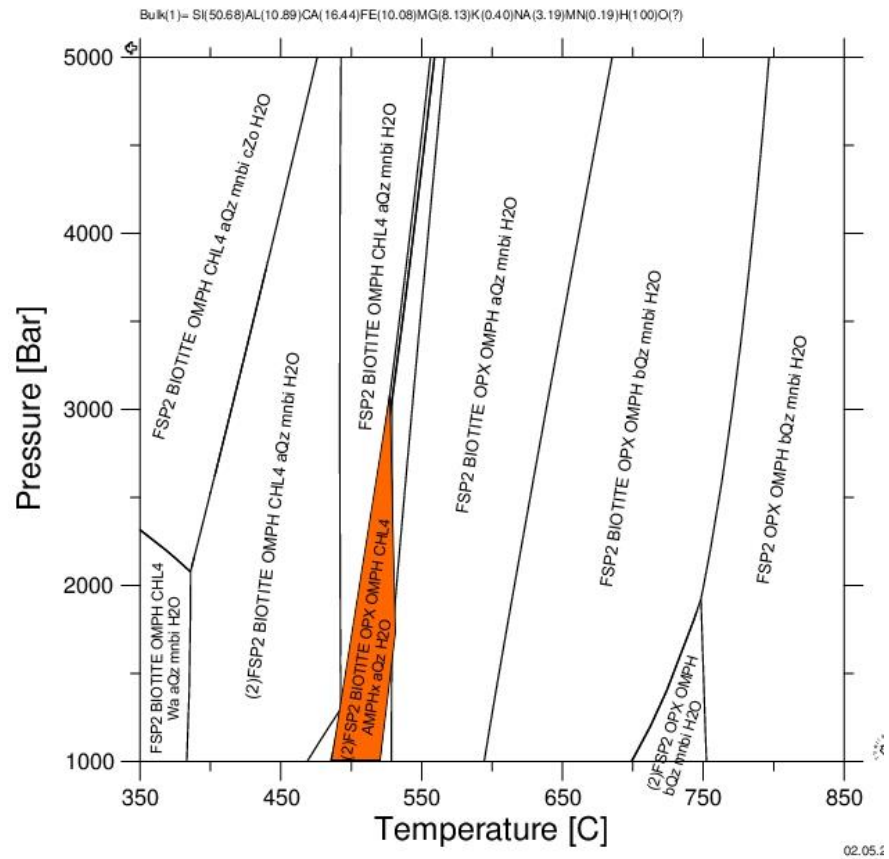
**FIGURA 63.** Interfaz del software Theriak/Domino de De Capitani & Petrakakis (2010) v 5.9.6

7.3.1 **Pseudosección CSH\_2\_1.** El equilibrio de fases minerales calculado a partir del sistema MnNCKFMASH para la pseudosección CSH\_2\_1 (FIGURA 62), la cual presenta la siguiente paragénesis: Bt + Ms + And + Pl + Qz + Chl, es coexistente en el campo de estabilidad dada por la asociación (2)Pl + Bt + Ms + Chl + Qz + And + H<sub>2</sub>O, definido por la presencia de biotita, moscovita, andalucita, cuarzo, plagioclasa y clorita. Esta asociación mineralógica está en equilibrio a unas condiciones de temperatura entre 455 y 500 [°C] y a un rango de presión entre 1 y 3 [Kbar].

**FIGURA 64.** Pseudosección PT de la muestra CSH\_2\_1 construida en el sistema MnNCKFMASH empleando el software Theriak/Domino v 5.9.6 (De Capitani & Petrakakis, 2010).



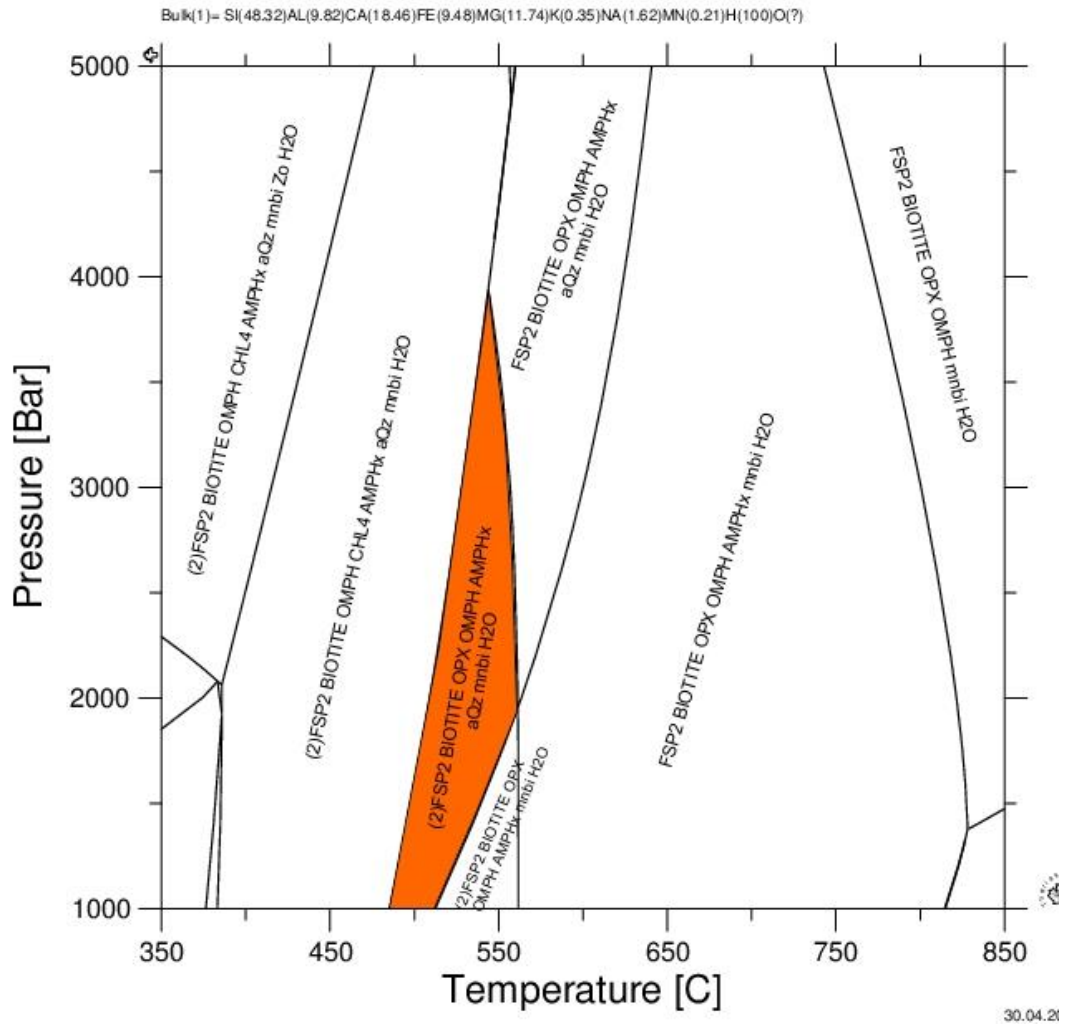
**7.3.2 Pseudosección CSH\_4\_5.** El equilibrio de fases minerales calculado a partir del sistema MnNCKFMASH para la pseudosección CSH\_4\_5 (FIGURA 63), la cual presenta la siguiente paragénesis: Amp + Bt + Pl + Chl ± Qz ± Px, es coexistente en el campo de estabilidad dada por la asociación Pl + Bt + Opx + Cpx (OMPH → Di–Hed) + Chl + Amp + Qz + mnbi + H<sub>2</sub>O, definido por la presencia de anfíbol, biotita (dos tipos), clorita, plagioclasa, cuarzo y piroxenos (Cpx y Opx). Esta asociación mineralógica está en equilibrio a unas condiciones de temperatura entre 480 y 520 [°C] y a un rango de presión entre 1 y 3 [Kbar].



**FIGURA 65.** Pseudosección PT de la muestra CSH\_4\_5 construida en un sistema MnNCKFMASH empleando el software Theriak/Domino v 5.9.6 (De Capitani & Petrakakis, 2010).

**7.3.3 Pseudosección CSH\_12\_1.** El equilibrio de fases minerales calculado a partir del sistema MnNCKFMASH para la pseudosección CSH\_12\_1 (FIGURA 64), la cual presenta la siguiente paragénesis: Cpx + Opx + Bt + Pl + Amp ± Qz, es coexistente en el campo de estabilidad dada por la asociación Pl + Bt + Opx + Cpx (OMPH → Di-Hed) + Amp + Qz + mnbi + H<sub>2</sub>O, definido por la presencia de clinopiroxeno (Di-Hed) ortopiroxeno, biotita, anfíbol, plagioclasa y cuarzo. Esta asociación mineralógica está en equilibrio a unas condiciones de temperatura entre 490 y 550 [°C] y a un rango de presión entre 1 y 3.7 [Kbar].

**FIGURA 66.** Pseudosección PT de la muestra CSH\_12\_1 construida en el sistema MnNCKFMASH empleando el software Theriak/Domino v 5.9.6 (De Capitani & Petrakakis, 2010).



## 8. DISCUSIÓN

### MECANISMOS DE EMPLAZAMIENTO

Esta sección tiene como principal objetivo describir los procesos de emplazamiento, los cuales han sido identificados por algunos autores como Marsh (1982), Castro (1987), Hatcher (1995) y Best (2003). El entendimiento de dichos procesos permite explicar los elementos que posiblemente dieron lugar a la generación de un espacio adecuado para la acomodación cortical del Stock del Hatillo. Estos procesos son: *Stoping* (piezas de la roca caja que son físicamente incorporadas dentro del magma), *Doming* (flexión y levantamiento de rocas del techo) y *Ballooning* (fuerte abultamiento de magma que empujan a un lado dúctil de la roca pared y asenso de la roca techo).

#### 8.1 STOPING

Las primeras ideas sobre stoping fueron introducidas por Daly (1903) e inicialmente propuestas a partir de observaciones de campo, este proceso implica aplastamiento termal inducido por un magma caliente sobre la roca caja y por la invasión de fracturas por el magma con hundimiento de los bloques aplastados. Posteriormente, en 1982, Marsh revisó extensivamente los principales mecanismos de emplazamiento (p.ej. diapirismo, stoping y zona de fusión) y fue quien racionalizó las antiguas ideas sobre diapirismo y stoping bajo un punto de vista estrictamente mecánico.

El stoping se caracteriza por la inmersión o engullimiento de fragmentos de roca caja por el magma. En el caso usual, bloques de la roca caja más densa limitados por fracturas, desprendidos del techo o pared, se hunden en el magma (Best 2003). Adicionalmente, nuevas fracturas en la roca caja pueden ser creadas por el magma adyacente a través de deformación térmica de la roca caja inicialmente fría y por

fracturación hidráulica. Marsh (1982) enfatiza en la importancia de esfuerzos termales desarrollados como consecuencia de la diferencia de temperatura entre el magma y la roca pared. Estos esfuerzos pueden ser asombrosamente grandes ( $4\text{Kb}/100^\circ\text{C}$ ) y pueden producir aplastamiento que precede la intrusión por stoping como lo previsto por Daly. Dicho proceso es de alta energía, lo cual requiere un suplemento de calor del magma, favoreciendo de esta manera el enfriamiento del plutón.

El stoping es un ejemplo de emplazamiento pasivo del magma, donde la roca intrusiva tiende a tener una fábrica anisotrópica que refleja dominancia de la cristalización sobre la deformación, además la roca caja también se muestra un poco deformada (Best, 2003).

Sin embargo, el stoping es un proceso muy limitado para el ascenso de magma, debido a que el aplastamiento produce caída de grandes bloques de las paredes de la roca caja, los que a su vez congestionan el conducto de ascenso y de este modo limitando la distancia de ascenso (Marsh, 1982). Adicionalmente, los esfuerzos termales pueden ser absorbidos por una deformación plástica de la roca pared previniendo aplastamiento marginal y stoping. El magma puede ascender a través de fracturas envolviendo bloques de la roca caja, aunque estas fracturas son generalmente originadas por esfuerzos regionales y no por aplastamiento termal. Las evidencias de campo muestran que el stoping es un fenómeno local usualmente asociado a plutones discordantes.

De acuerdo a lo anteriormente descrito, en algunos sectores pertenecientes a la aureola de contacto generada por el Stock del Hatillo es posible observar piezas de la roca caja recristalizada dentro de cuerpos ígneos, lo que se interpreta como el resultado de un proceso de stoping durante el emplazamiento.

## 8.2 BALLOONING

El Ballooning es un concepto propuesto y analizado por Ramsay (1981) para el emplazamiento del batolito de Chindamora. Dicho proceso puede resolver el clásico “problema de espacio” para emplazamiento de granitos, es decir, la mayoría del volumen para el acomodamiento de un plutón puede ser suministrado por la deformación de la aureola termal durante la inflación radial in-situ de la cámara magmática. La inflación de la cámara magmática tiene dos posibles orígenes: (1) Continua alimentación de la cámara magmática a través de diques y (2) La caliente “cola” continúa subiendo mientras la parte superior del sistema ha cesado su ascenso.

Muchos plutones félsicos, incluyendo el Stock del Hatillo, presentan las siguientes características:

**TABLA 20.** Principales características presentes en diversos plutones félsicos durante y posterior al emplazamiento.

Best 2003	Castro 1987	Recopilación
1. Formas aproximadamente circulares a elípticas en vista de mapa.	1. Forma circular o elíptica en sección horizontal.	1. Forma circular o elíptica en secciones horizontales.
2. Folioles magmáticas más o menos concéntricas entre el plutón, (concordante con el contacto) y las	2. Zonación concéntrica de facies plutónicas, las facies centrales generalmente siendo más	2. Zonación concéntrica de facies plutónicas, las facies centrales generalmente siendo más
	ácidas en composición	ácidas en composición

foliaciones de la roca con respecto a las facies con respecto a las facies  
pared. marginales. marginales.

3. Aumento en la defor- 3. Una fábrica plana 3. Una fábrica plana  
mación hacia el contacto paralela al contacto y paralela a los contactos  
plutón-roca caja, princi- más intensamente desa- y más intensamente  
palmente evidente en la rrollada en las zonas de desarrollada en las  
roca pared, pero borde donde aparece zonas de borde donde  
también localmente visto como una foliación aparece como una  
en la roca intrusiva. Las néisica. foliación néisica en  
rocas de la pared son estado sólido.

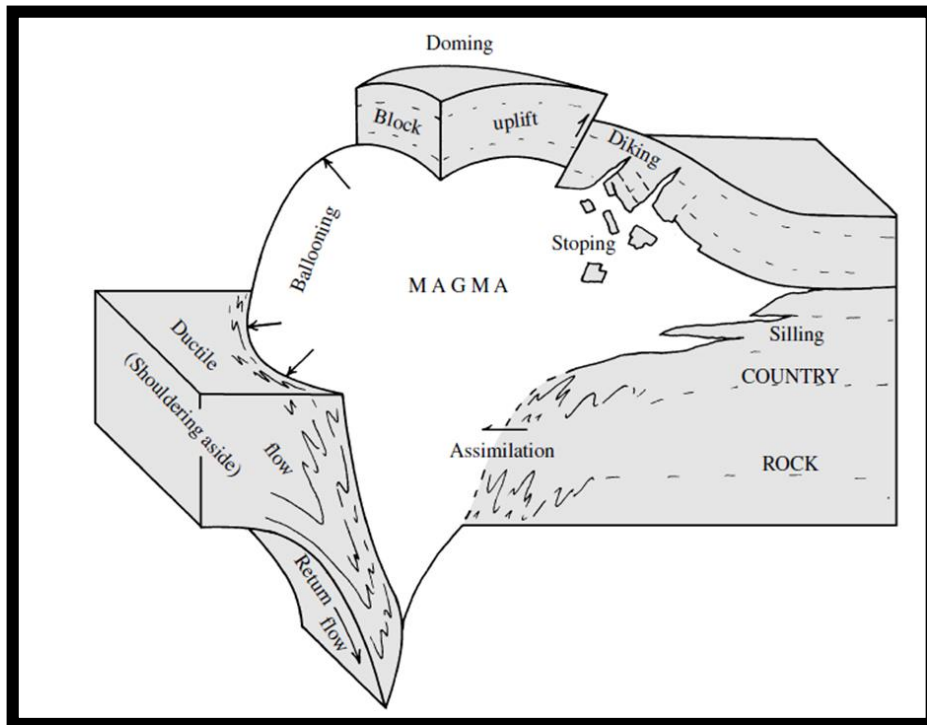
aplas-tadas  
perpendicular al  
contacto y tienen una  
lineación de  
estiramiento  
abruptamente inclinada  
y paralela al mismo.

4. Zonación compo- 4. Una fábrica planar 4. Una fábrica plana  
sicional concéntrica en paralela a los contactos paralela a los contactos  
el plutón. en la roca caja. en la roca caja. Esto es  
debido al incremento de  
la cizalla pura hacia el  
contacto del plutón  
desde zonas no  
afectadas

5. Crecimiento syn-cinemático de minerales metamórficos en la aureola de contacto.

Una explicación recurrente para las anteriores características es el ballooning o proceso de expansión de la cámara magmática, una inflación radialmente dirigida de una cámara de magma a medida que magma adicional es intruido. Cuando un diapiro de magma ascendente se detiene, su “cola” continua elevándose, inflando la refrigerada circundante masa cristalina, produciendo, de esta manera, una foliación concéntrica y una deformación por aplastamiento entre el plutón y la roca pared calentada. Una importante faceta del modelo de ballooning es un flujo descendente de retorno de las rocas de pared en estado dúctil mientras que el diapiro ascendente de magma se detiene e infla (FIGURA 67) (Best 2003). Este flujo de retorno puede acomodar parte de la expansión lateral y aplastamiento de la roca pared, que proporcionan espacio para el plutón (Best 2003).

**FIGURA 67.** Perspectiva esquemática de los procesos de emplazamiento de un plutón en la corteza.



En una variante del mecanismo de ballooning, el magma inyectado fuertemente a lo largo de superficies de foliación en esquistos puede acumularse en un volumen tal como el de un domo, sobreponiéndose de forma discordante a los estratos. El ballooning es un ejemplo de emplazamiento forzoso de magma (Best 2003). Tanto la roca caja como la intrusiva, pero especialmente la primera, muestran efectos de deformación, tal y como se observa en la roca caja cercana al contacto con el Stock del Hatillo. La ausencia de una fuerte foliación y/o lineamiento magmático puede ser debido a que durante el proceso de expansión partes de las rocas que se encontraban en los bordes del contacto fueron arrancadas o desprendidas durante el proceso.

De acuerdo a las anteriores consideraciones se propone un origen tectónico para el Stock del Hatillo, partiendo desde la idea de que los plutones que incluyen el ballooning durante sus procesos de emplazamiento son siempre sin-cinemáticos

con cualquier evento de deformación regional, aunque tal evento de deformación puede ser irrelevante para el desarrollo de nuevas estructuras regionales en la roca caja. Solo un acortamiento local horizontal, resultante de un acortamiento regional o una gran zona de cizalla, es requerido para producir el cierre en forma de embudo, induciendo la propagación lateral de la parte superior del plutón, el cual se convierte en un balloon o en este caso en una variante del mecanismo.

Acorde con el análisis estructural de la aureola de contacto del Stock del Hatillo, se puede reconocer una zona de replegamiento por al menos 600 m, donde se identifican sinformas y antiformalas con ejes de charnela paralelos al contacto intrusivo, lo cual sugiere que la génesis de estas estructuras están estrechamente relacionadas al emplazamiento del magma en la corteza, además se observan venas de cuarzo plegadas, de lo cual se infiere que primero hubo una etapa de inyección de magma en la roca caja que rellenó las fracturas y posteriormente ocurrió un evento de compresión que deformó y plegó la misma, indicando un proceso de expansión de la cámara magmática.

### **8.3 DOMING**

Clara evidencia para magmas sobre-presionados que hace espacio por sí mismo es vista en un bloque fallado levantado de la roca techo superponiendo intrusiones corticales poco profundas. Indiscutible doming ha ocurrido sobre los lacolitos clásicos inicialmente descritos en 1877 por G.K. Gilbert en las Montañas Henry, Utah (ver también Corry, 1988; Jackson y Pollard, 1988).

El núcleo del domo es menos denso que las rocas suprayacentes, sin embargo, la inestabilidad gravitacional solo implica la existencia de una energía potencial, esto significa que, si la capa (menos densa) no es reactivada y permanece rígida el doming no puede ser desarrollado (Castro, 1987). La energía gravitacional actúa cuando la capa flotante potencialmente se convierte en plástica debido a un evento

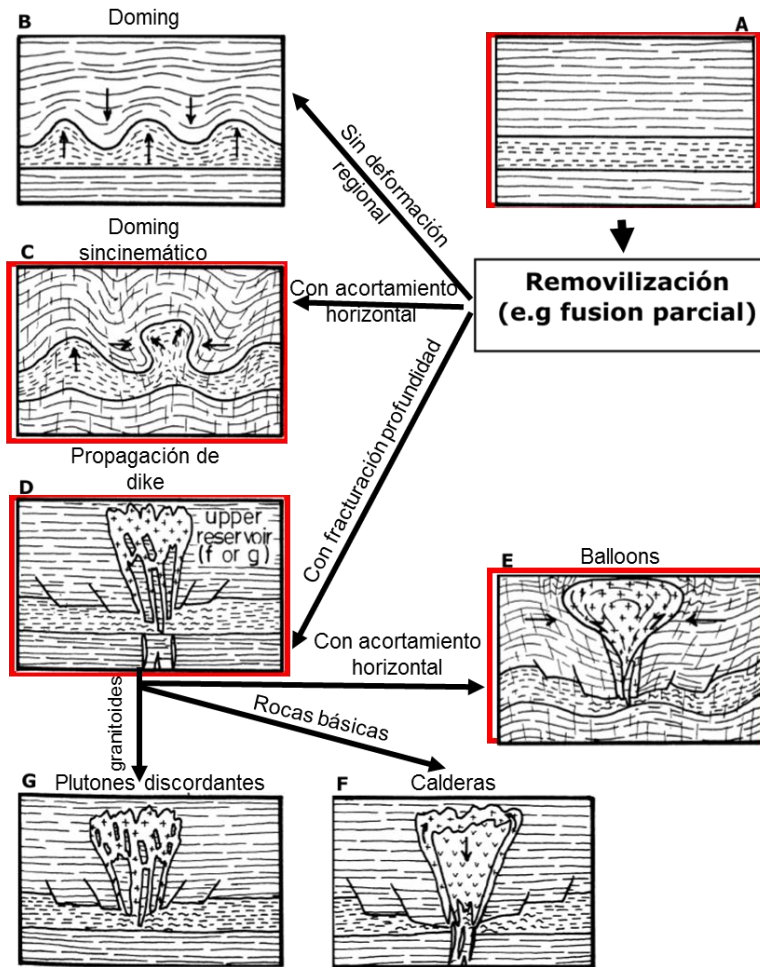
metamórfico. Si en el curso del domo hay una deformación regional, el proceso es altamente favorecido y el domo puede evolucionar en un diapiro néisico. Por ejemplo, el acortamiento horizontal favorece el ascenso de materiales flotantes en el núcleo de anti-formas verticales. Evidencia estructural existe en el ascenso de materiales boyantes (cuarzo-feldespáticos) intruyendo una sobre carga más densa (pelítica). Este es el caso del domo néisico de Bercimuelle donde zonas de cizalla, actuando como fallas normales, aparecen a los bordes del domo. Otras estructuras gravitacionales similares han sido descritas por López-Plaza (1982) en el domo granítico El Tormes y en el diapiro Ledesma (oeste de España). El ascenso del diapiro de Ledesma desarrollo fábricas horizontales en su zona apical y zonas de cizalla normales en sus bordes (López-Plaza 1980, 1982). La fábrica horizontal es debido al aplastamiento puro, como evidencia por la presencia de zonas de cizalla conjugadas formando ángulos dihedrales de alrededor de  $160^\circ$  e indicando una posición vertical para el mayor acortamiento. Ambas, zonas de cizalla normal (gravitacional) y fábricas horizontales debido a aplastamiento son típicas estructuras resultantes exclusivamente debido a la flotabilidad y empuje vertical de materiales menos densos.

De los mecanismos de Marhs (1982), el diapirismo es un proceso altamente energético que requiere la existencia de una zona parcialmente fundida alrededor del cuerpo ascendente. La energía necesaria para tal proceso debe ser suplida por el magma ascendente. Estos requerimientos termales limitan al diapirismo a zonas profundas en el manto cuando el magma asciende sin actividad sísmica asociada. A estos niveles profundos del manto, el diapirismo tiene implicaciones petrológicas fuertes en la composición de la capa fuente para magmas basálticos. Algunos plutones de granitoide considerados originalmente como diapiros no son verdaderos diapiros sino más bien definidos por Bateman (1984) como plutones ballooning. La mayoría de las estructuras referidas o denominadas como diapíricas en la literatura geológica son domos néisicos evolucionados, no totalmente desarraigados, y plutones ballooning supra corticales. Estos han sido llamados algunas veces

“diapiros ballooning”, aunque el diapirismo es un fenómeno ascensional y el ballooning es desarrollado durante el emplazamiento final (Bateman 1984); es así como el término “diapiro ballooning” entonces debería ser rechazado.

Adicionalmente a los mecanismos citados, discutidos y propuestos como los procesos involucrados en el emplazamiento del Stock del Hatillo, Castro en 1987 propuso un esquema generalizado para el ascenso y emplazamiento de magma mostrado en la FIGURA 68, donde dos principales procesos cinemáticos están involucrados: (1) movimientos verticales debido a la existencia de una capa menos densa y (2) movimientos horizontales debidos a un campo de esfuerzos anisotropicos regional, el cual condiciona la formación de fracturas extensionales por una parte y por otro lado favorece el ballooning. El punto de partida de este esquema es una porción de la litosfera con una capa menos densa intercalada a profundidad (FIGURA 68A). Esta situación puede permanecer estable hasta que un proceso de alta energía (p. ej. la fusión parcial) causa su re-movilización y consecuentemente la energía potencial gravitacional actúa hasta que una nueva situación de equilibrio isostático es alcanzada. Este proceso gravitatorio, implicando el ascenso de la capa menos densa y el consecuente hundimiento de la corteza más densa, puede ser alcanzado de varias maneras en función del campo de esfuerzos regional. Se pueden asumir tres diferentes situaciones: (1) Un estado no cinemático, (2) Una situación cinemática con acortamiento horizontal (sugerida para el proceso de emplazamiento del Stock del Hatillo) y (3) Una situación cinemática con extensión horizontal.

**FIGURA 68.** Esquema generalizado para el ascenso y emplazamiento de magma.



## 9. CONCLUSIONES

- La deformación, plegamiento y flujo dúctil de la roca caja a lo largo de la aureola de contacto sugiere que durante el emplazamiento del Stock del Hatillo operaron los mecanismos de empuje y levantamiento vertical (Doming), inflación lateral in-situ (Ballooning), y arranque y asimilación de fragmentos de la roca caja (Stoping magmático).

Dichos procesos, en conjunto con la temperatura, favorecieron el flujo dúctil de la roca caja como mecanismo de emplazamiento asociado, dando lugar a la presencia de synformes, antiformes y fallas de deslizamiento en rumbo de bajo ángulo, en la zona de borde del plutón.

- La minimización de energía libre de Gibbs establece el equilibrio de cada fase mineral a determinada presión y temperatura para cada roca.
- Se diferenciaron tres tipos de hornfelsas en las facies Ab–Ep, anfibolita y piroxénica de acuerdo con su proximidad al plutón, estas fases se encuentran en equilibrio en los campos de estabilidad (realizados con el software Theriak/Domino) de temperatura entre 455–525 °C, 490–525 °C y 490–550 °C, respectivamente y, presiones de 1 – 3.5 [Kbar]. Así mismo se deduce que la transferencia de calor alcanzó hasta 600 m desde la margen del plutón.
- De acuerdo con los procesos involucrados en el emplazamiento del Stock del Hatillo se sugiere una profundidad de formación mesozonal, iniciando con un cambio reológico de la corteza de dúctil a frágil, luego propagación del magma a través de fracturas seguido de un acortamiento horizontal que generará el ballooning. Adicionalmente en base a los rangos de presión (1–3.5 Kbar) alcanzados en campos de estabilidad de la roca caja, se propone una profundidad máxima de 10.5 Km para el emplazamiento del Stock.

## BIBLIOGRAFIA

AMAYA, S. 2012. Caracterización Petrográfica y Petrológica de los Neises, Migmatitas y Granulitas del Neis de Bucaramanga, en el Macizo de Santander, Departamento de Santander. Tesis de maestría.

BARRERO, D. y Vesga, C., 1976. Mapa geológico del cuadrángulo K 9, Armero y mitad sur del J9, La Dorada. Escala 1:100.000. INGEOMINAS. Bogotá.

BARRERO, D. 2000. Tectonostratigraphic sequences of Colombia origin and evolution of sedimentary basins. Curso preparado para INGEOMINAS. Bogotá.

BLANCO-QUINTERO, I.F., García-Casco, A., Toro, L.M., Moreno, M., Ruiz, E. C., Vinasco, C.J., Cardona, A., Lázaro, C., and Morata, D. 2014. Late Jurassic terrane collision in the northwestern margin of Gondwana (Cajamarca Complex, eastern flank of the Central Cordillera, Colombia), *International Geology Review*, 56.

BEST, M. 2003. *Igneous and metamorphic petrology* second edition. Brigham Young University.

CASTRO, A. 1987. On granitoid emplacement and related structures. A review. *Revista Rundschau* – 76.

CEDIEL, F., Shaw, R. y Cáceres, C. 2002. Tectonic assembly of the Northern Andean Block. In C. Bartolini, R. T. Buffler y J. Blickwede (eds), *The Cicum-Gulf of Mexico and the Caribbean: Hydrocarbon habitats, basin formation, and plate tectonics: AAPG Memoir*, p. 815-848.

CONDIE, K., 2000. Plate tectonics and crustal evolution. Butterworth Heinemann, Boston, 282p.

CONNOLLY, J. 2005. Computation of phase equilibria by linear programming: A tool for geodynamic modeling and its application to subduction zone decarbonation. *Earth and Planetary Science Letters* 236: 524-541.

DE CAPITANI, C. and Petrakakis, K. 2010. The computation of equilibrium assemblage diagrams with Theriak/Domino software. *American Mineralogist* 95: 1006-1016.

DUEÑAS, H., and Castro, G., 1981, Asociación palinológica de la Formación Mesa en la región de Falán, Tolima, Colombia: *Geología Norandina*, v. 3, p. 27-63.

FEININGER, T., 1970. The Palestina Fault, Colombia. *Geological Society American*, V81: 1201 – 1216.

FESTA, V., Caggianelli, A., Langone, A., Prosser, G. 2012. Time-space relationships among structural and metamorphic aureoles related to granite emplacement: a case study from the serre Massif ( southern Italy). *Cambridge Journals*.

FOSSSEN, H., 2010. *Structural Geology*. Cambridge: Cambridge University.

GÓMEZ, J. *Metamorfismo, Apuntes de la asignatura Petrología Endógena*. 1ª Edición. Universidad de Zaragoza, España. 2006, pp. 193.

GÓMEZ, J., y Núñez, A. 2003. Las metasedimentitas de Santa Teresa y la edad del Complejo Cajamarca (Cordillera Central, Departamento del Tolima-Colombia). En: IX Congreso Colombiano de Geología, Medellín, Resúmenes, 35–36.

GUERRERO, J., 1993. Magnetostratigraphy of the upper part of the Honda Group and Neiva Formation. Miocene uplift of the Colombian Andes. An abstract of a dissertation submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of doctor of philosophy in the Department of Geology in the Graduate School of Duke University.

GUZMÁN, G., Franco, G. y Ochoa, M. 1998. Proyecto para la mitigación y el riesgo sísmico de Pereira, Dosquebradas y Santa Rosa. Evaluación Neotectónica. CARDER.

HAYASHIDA, A., 1994. Paleomagnetic study of the Miocene Continental deposits in La Venta badlands, Colombia, Kyoto University Overseas Research Reports of the New World Monkeys, IV: 77-83. Kyoto.

HETTNER, A., 1892. Die Kordillere von Bogotá. Peterm. Mitt. Erg-Bd 22 (104): 131p. Bogotá.

HOLLAND, T.; Powell, R. 1998: An internally consistent thermodynamic data set for phases of petrological interest. *J. metamorphic Geol.*, v. 16. p. 309-343.

MARRETT, R. Peacock, D. Strain and stress. *Journal of structural Geology*. 1999 Vol. 21, pp. 1057-1063.

MARKO, W., Yoshinobu, A. 2011. Using restored cross sections to evaluate magma emplacement, White Horse Mountains, Eastern Nevada, U.S.A. *The international journal of integrated solid earth sciences*.

MARSH 1983

MAYA, M. 1992. Catálogo de dataciones isotópicas en Colombia. Boletín Geológico, 32: 127-187.

MAYA, M., y González, H. 1995. Unidades litodémicas en la Cordillera Central de Colombia. Boletín Geológico, 35: 43-57.

MCCLAY, K., 1987. The Mapping of Geological Structures. London: John Wiley & Sons.

MORENO-SÁNCHEZ, M., Gómez-Cruz, A.d.J., y Toro, L.M. 2008. Proveniencia del material clástico del Complejo Quebradagrande y su relación con los complejos estructurales adyacentes. Boletín de Ciencias de la Tierra, 22: 27-38.

NIVIA, A., Maya, M., y Bermúdez, A., 1989, Transecta Colombiana No. 2 Océano Pacífico a Llanos Orientales entre Buenaventura y Florencia. VII Congreso Latinoamericano de Geología, Belém de Para, Brasil.

NUÑEZ, A. 2001. Memoria explicativa del mapa geológico del Tolima Escala 1:250.000. INGEOMINAS.

PORTA, J. de, 1965. La Estratigrafía del Cretácico superior y Terciario en el extremo Sur del Valle Medio del Magdalena. Boletín Geológico, Universidad Industrial de Santander, (19): 5-30. Bucaramanga.

PORTA, J. de, 1966. Geología del extremo sur del Valle Medio del Magdalena entre Honda y Guataquí (Colombia). Boletín de Geología, Universidad Industrial de Santander, (22-23): 347 p. Bucaramanga.

PORTA, J. de, 1974. Colombie. Lexique Stratigraphique International. Volume V, Fascicule 4a., deuxième partie: 692 p, Paris.

RESTREPO, J. J., et al., 1978. Datación de metasedimentos del Grupo Ayura-Montebello. Medellin. Esp. Geol. 10.

ROSSETTI, F., Tecce, F. 2007. Patterns of fluid flow in the contact aureole of the Late Miocene Monte Capanne Pluton (Elba Island, Italy): the role of structures and reology.

SPEAR, Frank. Metamorphic phase equilibria and pressure-temperature-time paths. 2<sup>da</sup> Edición. Mineralogical Society of America. 1995, pp. 799.

STÜWE, K. (1997). Effective bulk composition changes due to cooling: a model predicting complexities in retrograde reaction textures. Contributions to Mineralogy and Petrology, 129: 43-52.

TAKEMURA, K., Danhara, T., 1983. Fission-track age of pumices included in the Gigante Formation, north of Neiva, Colombia. Kyoto University Overseas Research report Of New World Monkes, III: 13-15. Kyoto.

THOURET, J.C., 1989. Geomorfología y cronoestratigrafía del Macizo Volcánico Ruiz - Tolima (Cordillera Central Colombiana). En: T. Van Der Hammen, S. Diaz-Piedrahita, V.J. Alvarez (Editors) Estudios de Ecosistemas Tropaandinos, volumen 3, La Cordillera Central Colombiana – Transecto Parque Los Nevados (segunda parte): 257-277. J. Cramer. Berlín.

TINKHAM, Douglas; Zuluaga, Carlos; Stowell, Harold, 2001. Metapelite phase equilibria modeling in MnNCKFMASH: The effect of variable Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and

MGO/(MGO+FEO) on mineral stability. Mineralogical Society America, volumen 3, Number 1, December 14, 2001.

VESGA, C. J., Barrero, D. 1978. Edades K/Ar en rocas ígneas y metamórficas de la Cordillera Central de Colombia y su implicación geológica. II Congreso Colombiano de Geología. Resúmenes. p.19. Bogotá.

VICH, R. y Gómez, D., 2010. Problemas de Geología Estructural: Análisis estructural mediante diagramas de contornos. Reduca (Geología). pp 148-192.

VILLAGÓMEZ, D., Spikings, R., Magna, T.; Kammer, A., Winkler, W., and Beltrán, A. 2011. Geochronology, geochemistry and tectonic evolution of the Western and Central Cordilleras of Colombia. Lithos, 125.

VINASCO, C. J., Cordani, U. G., González, H., Weber, M. and Peláez, C. 2006. Geochronological, isotopic and geochemical data from Permo-Triassic granitic gneisses and granitoids of the Colombian Central Andes. Journal of South American Earth Sciences, 21.

WEISKE, F., 1926. Memoria detallada de los estudios del río Magdalena. Obras proyectadas para su arreglo y resumen del presupuesto. Estudios Geológicos Oficiales en Colombia "CEGOC", 4: 26p. Bogotá.

WEISKE, F., 1938. Estudio sobre las condiciones geológicas de la hoya del río Magdalena. Compilación de los Estudios Geológicos Oficiales en Colombia "CEGOC", 4: 15-124 p. Bogotá.

WILL, T. 1998. Phase equilibria in metamorphic rocks-Thermodynamic background and petrological applications. Ed. Springer-Verlag. 315 p. Berlin.