

PASANTÍA DE INVESTIGACIÓN: MECANISMOS DE DEFORMACIÓN EN ROCAS CON  
METAMORFISMO DINÁMICO — COLECCIÓN UIS

Jeyson Hayduk Quintana Cárdenas

Trabajo de Grado Modalidad Pasantía de investigación Para Optar al Título de Geólogo

Director

Leonardo Palmera Sánchez

MSc en Geociencias, Universidad Federal del Amazonas (Brasil)

Codirectora

Vanessa Rey León

MSc en Geociencias, Universidad del Estado de Rio de Janeiro (Brasil)

Universidad Industrial De Santander

Facultad de Ingenieras Físico–Químicas

Escuela de Geología

Geología

Bucaramanga

2023

**Dedicatoria**

A mi madre Ana Licenia Cárdenas Céspedes por tanta paciencia y apoyo. A mi hermano y mejor amigo Hayder David Quintana Cárdenas por su apoyo y confianza. A mi padre Jaidu Quintana Álvarez, víctima del conflicto armado en Colombia, donde quiera que estés, vivo o muerto, siempre te hare sentir orgulloso.

### **Agradecimientos**

A la Universidad Industrial de Santander y a la Escuela de Geología.

A el Grupo de Investigación En Geología Básica y aplicada.

Al director de la pasantía Leonardo Palmera Sánchez y a la Codirectora Vanessa Rey León por la paciencia y ayuda.

A mi madre Ana Licenia Cárdenas Céspedes, mi hermano y mejor amigo Hayder David Quintana y mi gran amigo Danko.

A Luisa Fernanda Mosquera por el acompañamiento, apoyo y colaboración.

Al profesor Carlos Alberto García Ramírez por su colaboración.

Al Profesor Juan Diego Colegial Gutiérrez.

Al profesor Carlos Alberto Ríos Reyes.

A Camilo Ricaurte y Carlos Esparza por creer en mí.

**Tabla de Contenido**

Introducción .....	8
1. Justificación .....	11
2. Objetivos.....	12
2.1 Objetivo general.....	12
2.2 Objetivos específicos .....	12
3. Marco teórico.....	13
3.1 Deformación frágil.....	13
3.2 Deformación dúctil .....	20
3.3 Indicadores del sentido de cizalla .....	36
4. Metodología.....	46
4.1 Conducto de ingreso para nuevas muestras .....	61
5. Recomendaciones .....	64
Referencias Bibliográficas .....	65

**Lista de Figuras**

Figura 1	Fábrica Cataclástica.....	14
Figura 2	Flujo Cataclástico .....	15
Figura 3	Microfracturamiento.....	16
Figura 4	Disolución por Presión .....	18
Figura 5	Superficies Microestilolíticas .....	19
Figura 6	Defectos Puntuales .....	21
Figura 7	Defectos de Línea o Dislocaciones.....	22
Figura 8	Extinción Ondulosa .....	23
Figura 9	Maclado por Deformación.....	25
Figura 10	Maclas de Deformación en Calcita.....	26
Figura 11	Recristalización del Límite de Macla .....	27
Figura 12	Kinking.....	28
Figura 13	Recuperación .....	30
Figura 14	Recristalización Dinámica.....	32
Figura 15	Recristalización Dinámica BLG.....	33
Figura 16	Recristalización Dinámica SGR.....	34
Figura 17	Recristalización Dinámica GBM.....	36
Figura 18	Foliación Oblicua .....	37
Figura 19	Fábrica C - S.....	38

Figura 20 Fábrica S – C' .....	39
Figura 21 MicaFish.....	40
Figura 22 Tipos de Porfiroclasto de Núcleo y Manto.....	41
Figura 23 Sigmoide.....	42
Figura 24 Sombras de Deformación .....	43
Figura 25 Pliegues en Cuartos .....	44
Figura 26 Porfiroclastos Fragmentados .....	45
Figura 27 Fotomicrografía Extinción Ondulosa, Sección HQ-64 .....	48
Figura 28 Fotomicrografía Recuperación, Sección HQ-64 .....	49
Figura 29 Fotomicrografía Recuperación, Sección HQ-64 .....	50
Figura 30 Fotomicrografía Recristalización Dinámica, Sección HQ-64 .....	52
Figura 31 Fotomicrografía Recristalización Dinámica, Sección HQ-64 .....	53
Figura 32 Fotomicrografía Recristalización Dinámica, Sección HQ-64 .....	54
Figura 33 Fotomicrografía Indicadores del Sentido de Cizalla, Sección HQ-64 .....	55
Figura 34 Fotomicrografía Bandas de Cizalla C – S, Sección HQ-64.....	56
Figura 35 Fotomicrografía Bandas de Cizalla C y C', Sección HQ-64.....	58
Figura 36 Fotomicrografía Mesomilonita.....	60
Figura 37 Representación Esquemática para el Ingreso de Nuevas Muestras.....	62

### **Lista de Apéndices**

Los apéndices están adjuntos y puede visualizarlos en la base de datos de la biblioteca UIS.

Apéndice A. Catálogo Mecanismos de Deformación y Microestructuras Asociadas.

Apéndice B. Catálogo de Inventario

Apéndice C. Poster “MECANISMOS DE DEFORMACIÓN FRÁGIL Y DÚCTIL EN ROCAS METAMORFICAS — COLECCIÓN UIS”. XV Semana Técnica de Geología, Ingeniería Geológica y Geociencias.

**RESUMEN**

**TÍTULO:** MECANISMOS DE DEFORMACIÓN EN ROCAS CON METAMORFISMO DINAMICO — COLECCIÓN UIS\*

**AUTOR:** JEYSON HAYDUK QUINTANA CÁRDENAS\*\*

**PALABRAS CLAVE:** Metamorfismo dinámico, deformación frágil, deformación dúctil, microestructuras, petrografía

**DESCRIPCIÓN:**

Los mecanismos de deformación frágil y dúctil que actúan en las rocas con metamorfismo dinámico son identificables a través de microestructuras, las cuales se forman en respuesta a estos procesos de deformación. La deformación frágil ocurre comúnmente en condiciones de baja temperatura y/o alta tasa de deformación. Por otro lado, la deformación dúctil sucede generalmente en condiciones de presión–temperaturas altas y/o baja tasa de deformación, donde los granos cambian de forma, pero sin llegar a fracturarse. Mediante análisis petrográfico se identificaron mecanismos de deformación del régimen frágil y dúctil actuando en diferentes minerales.

Los mecanismos de deformación frágil se observaron en minerales con tamaños de grano grueso con contornos angulares y límites rectos, los cuales no muestran ninguna orientación preferencial. Se evidencia microfracturamiento intragranular e intergranular, algunas con deslizamientos catalogándose como microfallas; varias microfracturas se encuentran rellenas por fases minerales secundarias como opacos, clinozoisita, óxidos de hierro y calcita. Por otra parte, se identificaron mecanismos de deformación del régimen dúctil como: 1) disolución por presión en calcita; 2) deformación intracristalina, apreciable en cuarzo, feldespato potásico y plagioclasa; 3) maclado por deformación en plagioclasa y calcita; 4) kinking en biotita, calcita y plagioclasa; 5) tres tipos de recristalización dinámica principalmente en cuarzo, feldespato potásico y plagioclasa. Se describen microestructuras de cizallamiento y cinemática como: porfiroclastos de núcleo y manto, bandas de cizalla S, C y C', sigmoides y minerales fish. Las rocas se clasificaron según su estilo de deformación en cataclasitas y milonitas, y según su relación matriz – porfiroclastos en protomilonitas y mesomilonitas. Los mecanismos de deformación presentes permitieron definir los rangos de temperaturas y presiones aproximadas en que las rocas se deformaron.

---

\*Trabajo de grado

\*\*Facultad de Ingenieras Físico-Químicas. Escuela de Geología. Director: Leonardo Palmera Sánchez. Codirectora: Vanessa Rey León.

**ABSTRACT**

**TITLE:** DEFORMATION MECHANISMS IN ROCKS WITH DYNAMIC METAMORPHISM  
— UIS COLLECTION\*

**AUTHOR:** JEYSON HAYDUK QUINTANA CÁRDENAS\*\*

**KEY WORDS:** Dynamic metamorphism, Brittle deformation, Ductile deformation, Microstructures, Petrography.

**DESCRIPTION:**

The brittle and ductile deformation mechanisms that act in rocks with dynamic metamorphism are identifiable through microstructures, which are formed in response to these deformation processes. Brittle deformation normally occurs under conditions of low temperature and/or high strain rate. On the other hand, ductile deformation generally occurs under conditions of high pressure temperature and/or low deformation rate, where the grains change shape, but without actually fracturing. Through petrographic analysis, deformation mechanisms of the brittle and ductile regime acting on different minerals were identified.

Brittle deformation mechanisms were observed in minerals with coarse grain sizes with angular contours and straight boundaries, which do not show any preferential orientation. Intragranular and intergranular microfracturing is evidenced, some with landslides classified as microfaults; Several microfractures are filled by secondary mineral phases such as opaque, clinozoisite, iron oxides, and calcite. On the other hand, deformation mechanisms of the ductile regime were identified as: 1) dissolution by pressure in calcite; 2) intracrystalline deformation, appreciable in quartz, potassium feldspar and plagioclase; 3) twinned by deformation in plagioclase and calcite; 4) kinking in biotite, calcite and plagioclase; 5) three types of dynamic recrystallization mainly in quartz, potassium feldspar and plagioclase. Shear and kinematic microstructures are described as: core and mantle porphyroclasts, S, C and C' shear bands, sigmoids and fish minerals. The rocks were classified according to their deformation style in cataclasites and mylonites, and according to their matrix-porphroclast relationship in prothomilonites and mesomilonites. The present deformation mechanisms allowed us to define the approximate ranges of temperatures and pressures in which the rocks deformed.

---

\*Degree Work

\*\*Faculty of Physical-Chemical Engineering. School of Geology. Director: Leonardo Palmera Sánchez. Codirector: Vanessa Rey León.

## **Introducción**

La deformación en las rocas con metamorfismos dinámico puede ocurrir de forma frágil, dúctil o en un régimen de transición frágil – dúctil, exhibiendo microestructuras a escala de grano que revelan los tipos de mecanismos que deforman la roca y las condiciones de temperatura y presión en las cuales sucedió la deformación.

En este trabajo se identificaron y caracterizaron los mecanismos de deformación presentes en treinta (30) secciones delgadas de la colección, entregando como anexos un Catálogo de Mecanismos de Deformación y Microestructuras Asociadas (Apéndice A) y un Catálogo de Inventario (Apéndice B)

Parte de los resultados fueron presentados en una ponencia modalidad poster (Apéndice C), en la XV Semana Técnica de Geología, Ingeniería Geológica y Geociencias, realizada en la Universidad del Norte en la ciudad de Barranquilla del 18 de agosto de 2022 al 20 de agosto de 2022 en la ponencia titulada “MECANISMOS DE DEFORMACIÓN FRÁGIL Y DÚCTIL EN ROCAS METAMORFICAS — COLECCIÓN UIS” y publicada en las memorias del evento.

## 1. Justificación

Los mecanismos de deformación frágil y dúctil que han actuado en las rocas con metamorfismo dinámico son identificables a través de microestructuras a escala de grano, las cuales se forman en respuesta a estos procesos de deformación. Estudiar y aprender sobre los mecanismos de deformación permite ver y entender cómo se deforman individualmente ciertos minerales formadores de rocas como cuarzo, calcita, feldespatos, micas, olivino, epidota, anfíboles y también agregados poliminerale. La clasificación del tipo de microestructuras permite estimar los rangos de temperatura y presión en los cuales se dio la deformación y así, entender la evolución de deformación del metamorfismo de dislocación.

La colección de secciones delgadas de metamorfismo dinámico presentes en el laboratorio de petrografía la escuela de geología de la Universidad Industrial de Santander no se ha analizado y catalogado a partir de los mecanismos de deformación, es por esto que en este trabajo se identificaron los mecanismos de deformación presentes en treinta (30) secciones delgadas de la colección con el fin de describirlos, clasificarlos y caracterizarlos, incluyendo la toma de fotomicrografías. La adquisición de la información producto del análisis petrográfico de la colección de metamorfismo dinámico en sección delgada, permitió la creación de un catálogo de mecanismos de deformación y microestructuras asociadas (Apéndice A) y será un complemento al laboratorio No 6. metamorfismo dinámico, del ya existente Manual de Prácticas de Petrología Metamórfica y ampliará su alcance pues se tendrán descripciones de los mecanismos de deformación y microestructuras asociadas presentes en la colección junto con fotomicrografías que serán un apoyo indispensable para una comprensión pedagógica del tema.

## 2. Objetivos

### 2.1 Objetivo general

Describir los mecanismos de deformación presentes en las rocas con metamorfismo dinámico de la escuela de geología de la Universidad Industrial de Santander mediante su estudio petrográfico.

### 2.2 Objetivos específicos

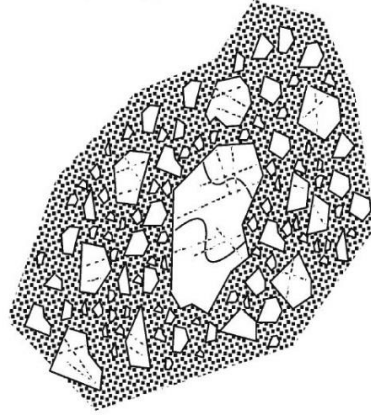
- Organizar y gestionar la colección de secciones delgadas de metamorfismo dinámico.
- Estimar las condiciones de temperatura a la cual ocurrió la deformación a partir de las microestructuras que se generan en respuesta a los mecanismos de deformación identificados en las secciones delgadas de metamorfismo dinámico.
- Elaborar un catálogo con los mecanismos de deformación a partir de la información del estudio petrográfico y fotomicrografías.

### 3. Marco teórico

Las rocas se pueden deformar de forma frágil, dúctil o en un régimen de transición frágil – dúctil. La deformación ocurre mediante mecanismos que dependen de factores como la mineralogía, tamaño de grano, presencia y composición de fluidos intergranulares, orientación preferencial; además de controles externos como la temperatura, presión, esfuerzos diferenciales, entre otros. A continuación, se presentan los tipos de deformación con sus respectivos mecanismos en un orden de baja temperatura - alta tasa de deformación a alta temperatura - baja tasa de deformación (Passchier & Trouw, 2005).

#### 3.1 Deformación frágil

La deformación frágil se define como el cambio de forma permanente de los minerales, debido al rompimiento de los enlaces atómicos, los cuales no se reconstruyen posteriormente (Song & Cao, 2021). Generalmente ocurre en la corteza superior, caracterizada por: condiciones de baja temperatura, altas presiones y presencia de fluidos. El límite del régimen frágil está demarcado por la respuesta reológica del cuarzo, el cual en temperaturas inferiores a 300°C se deforma frágilmente. En la zona de deformación frágil se desarrollan comúnmente cataclasitas, que son rocas que presentan un tamaño de grano heterogéneo, contornos angulares, límites rectos, intensa alteración, generalmente sin foliación, microfracturamiento, deslizamiento de límite de grano y en algunos casos disolución por presión (Passchier & Trouw, 2005) (Figura 1).

**Figura 1***Fabrica cataclastica*

*Nota. En la figura se observa una representación de una fábrica cataclastica, se presentan grano microfracturados de diferentes tamaños, con bordes rectos y angulosos y se encuentran en una matriz de grano fino. Tomada y modificada de Microtectonics (p. 28), por W. Passchier., J. Trouw, 2005, Springer.*

Se forman hasta los 10km de profundidad aproximadamente, en condiciones de presión-temperatura aproximadas de máximo 3Kbar y 300°C respectivamente (Trouw, Passchier, Wiersma, 2010). A continuación, se definen algunos mecanismos de deformación característicos del régimen frágil:

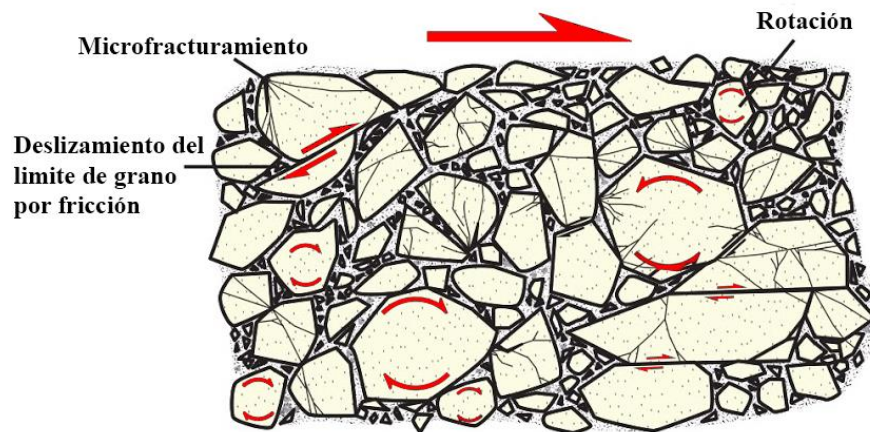
**3.1.1 Flujo cataclástico**

Es la combinación de microfracturamiento, deslizamiento por fricción y rotación sin distorsión de la red cristalina, de los fragmentos de granos (Blenkinsop, 2002). Durante

el flujo cataclástico se produce pérdida cohesión por el microfracturamiento, creando espacios que pueden estar rellenos de material precipitado como carbonatos. Se produce en un rango de temperatura entre los 200°C y 300°C (Figura 2) (Passchier & Trouw, 2005).

## Figura 2

### *Flujo cataclástico*



*Nota. En la figura se representan los diferentes mecanismos que componen el flujo cataclástico, normalmente sucede durante la deformación de rocas sedimentarias muy bien consolidadas y rocas no porosas. Tomada y modificada de Structural Geology (p. 492), por H. Fossen, 2016, Cambridge University Press.*

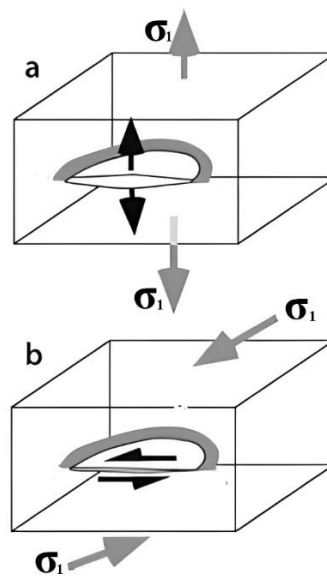
### 3.1.2 *Microfracturamiento*

En condiciones de baja temperatura – alta tasa de deformación las rocas se deforman frágilmente, lo que se ve evidenciado por formación de microfracturas que se definen como discontinuidades microscópicas tabulares o planas que pueden encontrarse rellenas por una fase mineral secundaria, pueden ser intragranulares si afectan a un solo

grano, las cuales son características en rocas porosas y mal cementadas o intergranulares si afectan a varios granos, las cuales son características en rocas de baja porosidad y bien cementadas (Blenkinsop, 2002). El microfracturamiento ocurre en respuesta a los diferentes esfuerzos a los que fue sometida la roca, los cuales pueden ser extensionales o de cizalla dando lugar a microfallas las cuales muestran desplazamiento (Figura 3) (Passchier & Throw, 2005).

### Figura 3

#### *Microfracturamiento*



*Nota. En la figura a se representa una microfractura producto de esfuerzos extensionales. En la figura b se muestra una microfractura por esfuerzos de cizalla, se puede observar desplazamiento clasificándose como microfalla. Tomada y modificada de Microtectonics (p. 26), por W. Passchier., J. Trouw, 2005, Springer.*

### ***3.1.3 Deslizamiento por fricción en los límites de grano***

Sucede en los límites de grano que han sido afectados por microfracturas. Los fragmentos resultantes se deslizan entre sí en los planos de microfracturamiento, este deslizamiento depende de la pérdida de cohesión (Vernon, 2004) y el rompimiento de la resistencia contra el deslizamiento controlada por la fricción (Fossen, 2016).

### ***3.1.4 Disolución por presión***

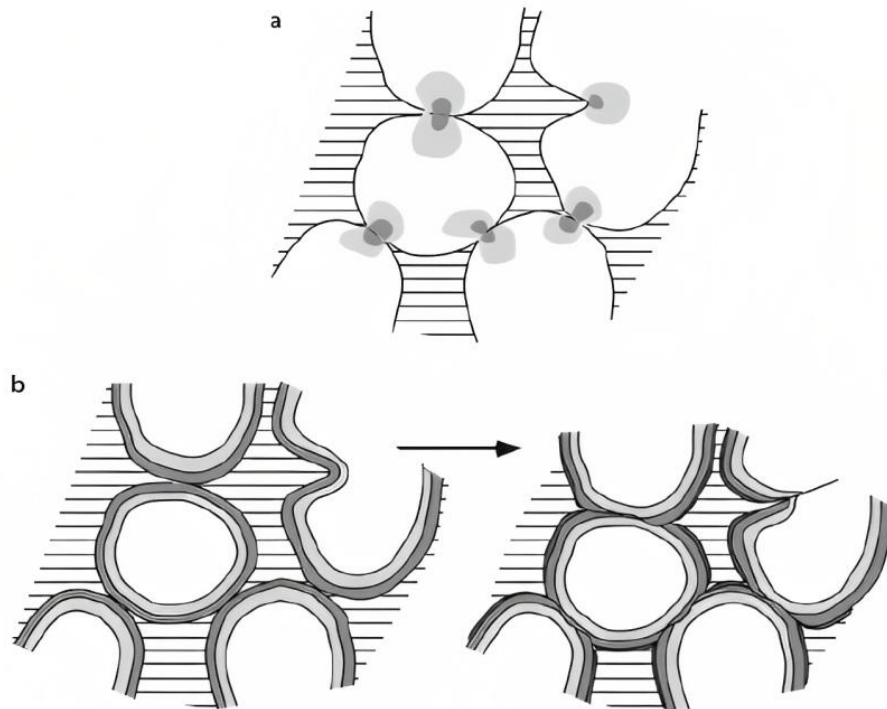
Es un mecanismo que puede suceder principalmente en el régimen frágil debido a la presencia de fluidos intergranulares. Ocurre un cambio de forma sin plasticidad y microfracturamiento, el cual se da por los esfuerzos que actúan en la disolución. Consiste en la disolución en una fase fluida de los límites de grano con altos esfuerzos diferenciales, localizándose donde los esfuerzos entre granos son más altos, como los límites de granos en contacto o a lo largo de superficies en un ángulo alto con respecto a la dirección principal de acortamiento. La disolución por presión es selectiva en los contactos entre granos ya que la solubilidad de los granos en un fluido acuoso es mayor en las zonas donde las redes cristalinas están sometidas a altos esfuerzos (Passchier & Trouw, 2005) (Figura 4).

La disolución – precipitación puede ocurrir como una película delgada de fluido intergranular que se encuentra hospedadas en una red de microfracturas en la superficie de contacto o por disolución en “estructuras de isla” que están rodeadas por canales llenos de fluido que forman una red de soporte de esfuerzos entre los granos. El material disuelto migra desde los sitios de alta solubilidad a sitios cercanos de baja solubilidad por transferencias de solución inducida por esfuerzos. La precipitación del material disuelto generalmente ocurre en los límites de grano que se encuentran libres y en contacto con el

fluido, pero puede migrar una distancia mayor y depositar en sitios como venas, sombras de deformación o fuera del volumen de roca deformada (Passchier & Trow, 2005).

#### Figura 4

##### *Disolución por presión*



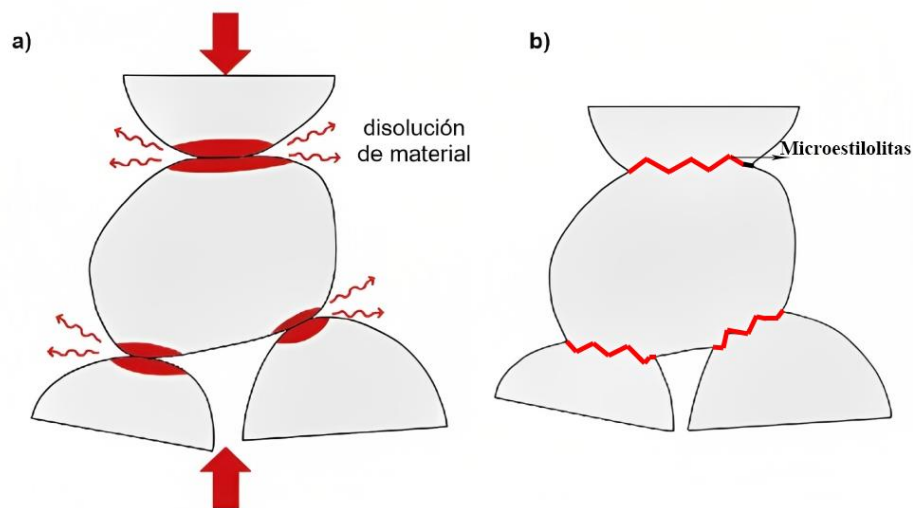
*Nota. a) Representación de Oolitos bordeados por fluidos en sus poros. En los puntos de contacto el esfuerzo diferencial es relativamente alto como indica el sombreado. b) La disolución por presión cambia la forma de los granos. El material disuelto en los puntos de contacto es redepositado en espacios porosos adyacentes (sombra oscura). Tomada y modificada de *Microtectonics* (p. 29), por W. Passchier., J. Trouw, 2005, Springer.*

La disolución por presión y la transferencia de solución son dominantes en un rango de temperatura entre los 200°C y los 300°C donde los fluidos son abundantes. En sección

delgada la evidencia de disolución por presión se puede observar en objetos truncado como microfósiles y granos, truncamiento de la zonación química en minerales como el granate y la hornblenda, microestructuras de isla, superficies microestilolíticas que son superficies indentadas en las cuales el material se ha disuelto de forma muy irregular exhibiendo una interpenetración entre los límites de granos en contacto (Passchier & Trow, 2005), pueden estar rellenas por óxidos de hierro, hidróxidos, filosilicatos, material mineral opaco o materia orgánica (Blenkinsop, 2002) (Figura 5). Los planos en los que se produce la disolución por presión suelen ser ricos en minerales opacos o micas.

### Figura 5

#### *Disolución por presión y superficies microestilolíticas*



*Nota. a) las flechas rojas indican la dirección del esfuerzo máximo y su efecto en las zonas de contacto entre granos. La disolución del material se ve favorecida por la presencia de fluido intergranular. b) se presenta un cambio de forma en los granos, mostrando en rojo límites indentados conocidos como superficies microestilolíticas. Tomada de Fundamentos de Petrología Metamórfica (p. 46), por C.A. García, 2022, Ediciones UIS.*

### 3.2 Deformación dúctil

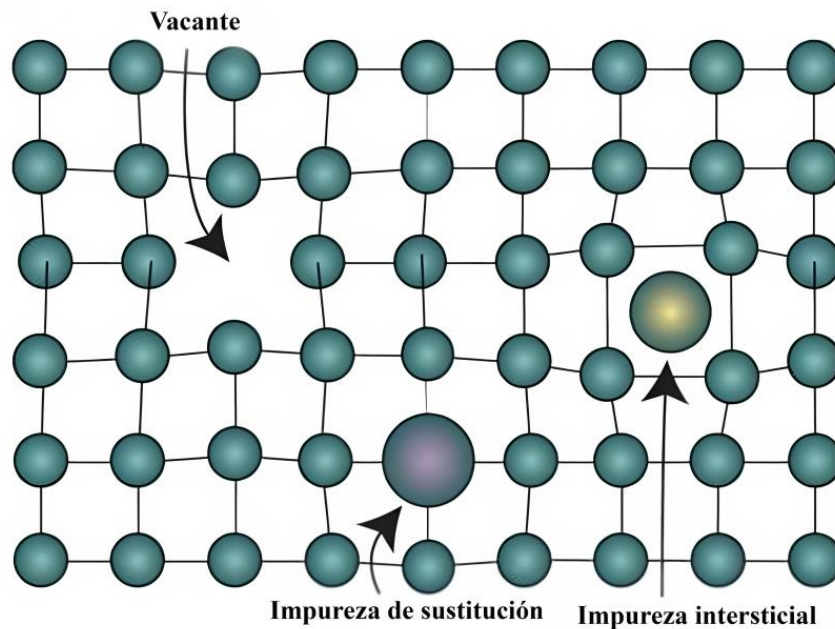
La deformación dúctil está directamente relacionada a las zonas de cizalla. Se define como la expresión en profundidad de una falla y como una zona tabular que concentra alta deformación en comparación con la roca circundante o roca caja (Fossen, 2016), presentando componentes de rotación que son la evidencia del desplazamiento de los bloques de la roca caja entre sí (Passchier & Trouw, 2005) y tiene un espesor significativo en relación con su desplazamiento (Fossen, 2016). Las zonas de cizalla van desde un régimen de transición frágil-dúctil en la corteza media con profundidades que van desde los 10Km aproximadamente, hasta la zona de flujo plástico o zona dúctil. Estas zonas están representadas por el desarrollo de milonitas, las cuales son rocas foliadas que normalmente presentan reducción del tamaño de grano por recristalización dinámica (Fossen, 2016). Se clasifican según el rango de temperatura en el que sucedió la deformación o según la clasificación de Sibson (1977) que se define por la relación matriz-porfiroclastos, en la cual las rocas con 10 a 50% de matriz se clasifican como protomilonitas; con 50 a 90% como milonita o mesomilonita y con más del 90% de matriz como ultramilonita (Passchier & Trouw, 2005), se presentan en condiciones aproximadas de temperatura y presión desde los 300°C hasta los 850°C con presencia de una fase de fundido y 3Kbar a 9Kbar respectivamente. En estas condiciones los granos sufren deformación dúctil, cambian de forma, pero sin llegar a fracturarse por fragilidad, esto sucede por medio de mecanismos que producen microestructuras específicas de este régimen. A continuación, se definen los más comunes:

### 3.2.1 Deformación intracristalina

Se define como una deformación interna del grano por medio de la distorsión de la red cristalina, sin que haya microfracturamiento por fragilidad. Esta deformación consiste en la adición y movimiento de defectos, los cuales pueden ser puntuales: vacantes, átomos extra, impurezas por sustitución e impurezas intersticiales (Figura 6); y dislocaciones, que se entienden como defectos de línea móviles. Pueden ser de dos tipos: dislocaciones de borde, que se definen como el borde de un semiplano extra en la red cristalina y; dislocaciones helicoidales (Passchier & Throw, 2005; Blenkinsop, 2002) (Figura 7).

**Figura 6**

*Defectos puntuales*



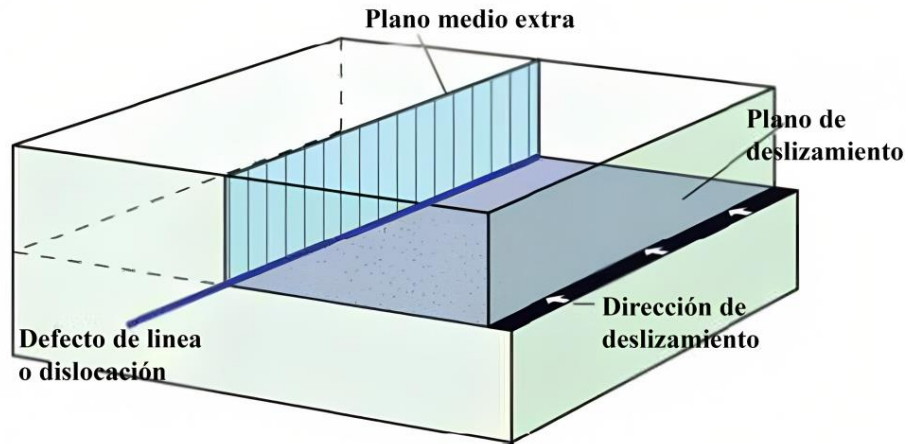
*Nota: La figura representa una red cristalina con los diferentes tipos de defectos puntuales: vacantes, impureza de sustitución e impureza intersticial. Las vacantes son el*

*defecto puntual más importante en el régimen cristal-plástico. Tomada y modificada de Structural Geology (p. 938), por H. Fossen, 2016, Cambridge University Press.*

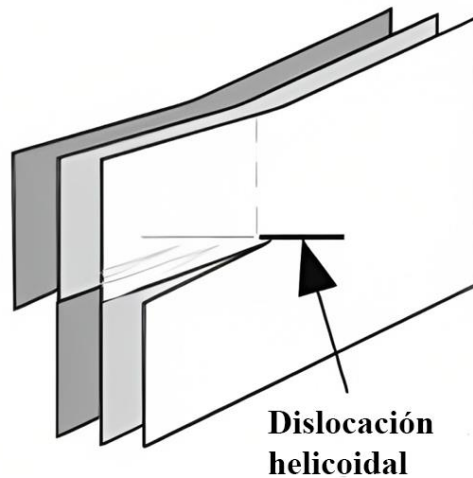
### Figura 7

*Defectos de línea o dislocaciones*

a)



b)



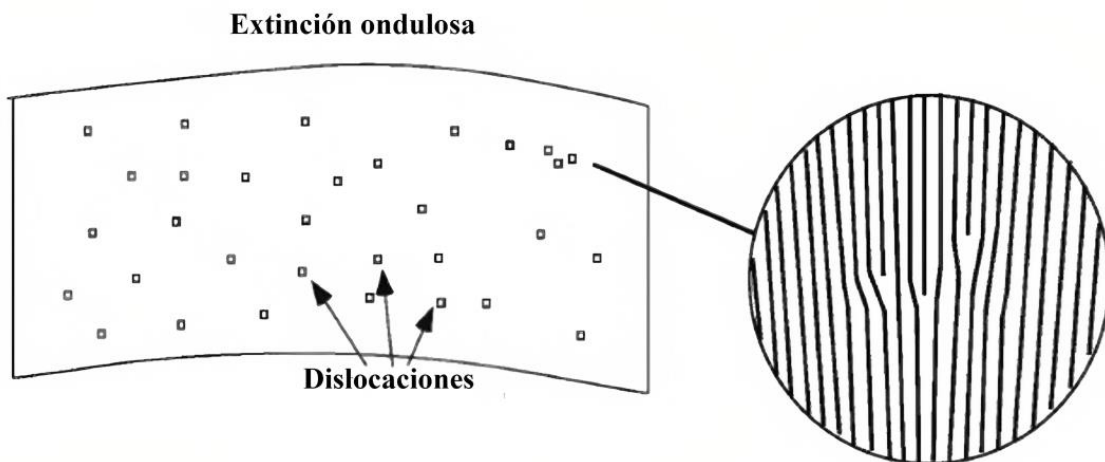
*Nota. a) la figura representa la dislocación de borde. Tomada y modificada de Structural Geology (p. 949), por H. Fossen, 2016, Cambridge University Press. b) la figura representa la dislocación helicoidal. Tomada y modificada de Microtectonics (p. 33), por W. Passchier., J. Trouw, 2005, Springer.*

Las dislocaciones de borde y helicoidales se pueden interconectar mediante las dislocaciones en lazo, las cuales dan paso a la extinción ondulosa y a la migración de las dislocaciones del centro al borde del grano o viceversa.

La deformación intracristalina se puede identificar a través de la extinción ondulosa y las laminillas de deformación. La extinción ondulosa se entiende como una red cristalina ligeramente flexionada que contiene una gran cantidad de dislocaciones distribuidas aleatoriamente y es típica en un rango de temperaturas entre los 250°C a los 500°C. (Figura 8).

### Figura 8

#### *Extinción ondulosa*



*Nota. La figura representa la extinción ondulosa. El rectángulo representa un grano y los puntos dislocaciones. Se observa como el grano se encuentra ligeramente flexionado y tiene una alta densidad de dislocaciones distribuidas aleatoriamente. En el círculo se presenta un zoom de las dislocaciones, en la cual se observan los medios planos extra dentro de la red*

*crystalina. Tomada y modificada de Microtectonics (p. 38), por W. Passchier., J. Trouw, 2005, Springer.*

Las laminillas de deformación son microestructuras planas orientadas cristalográficamente. Se explican como una red cristalina dañada con una densidad de dislocaciones variables, se presentan principalmente en granos de cuarzo que han sido deformados en un rango de temperatura entre los 200°C y los 300°C, presentan una morfología ligeramente curvada y están dispuestas con una única orientación dentro del grano. A temperaturas superiores a los 400° la extinción ondulosa y las laminillas de deformación pueden estar ausentes debido a la recuperación o recristalización (Passchier & Throw, 2005; Blenkinsop, 2002).

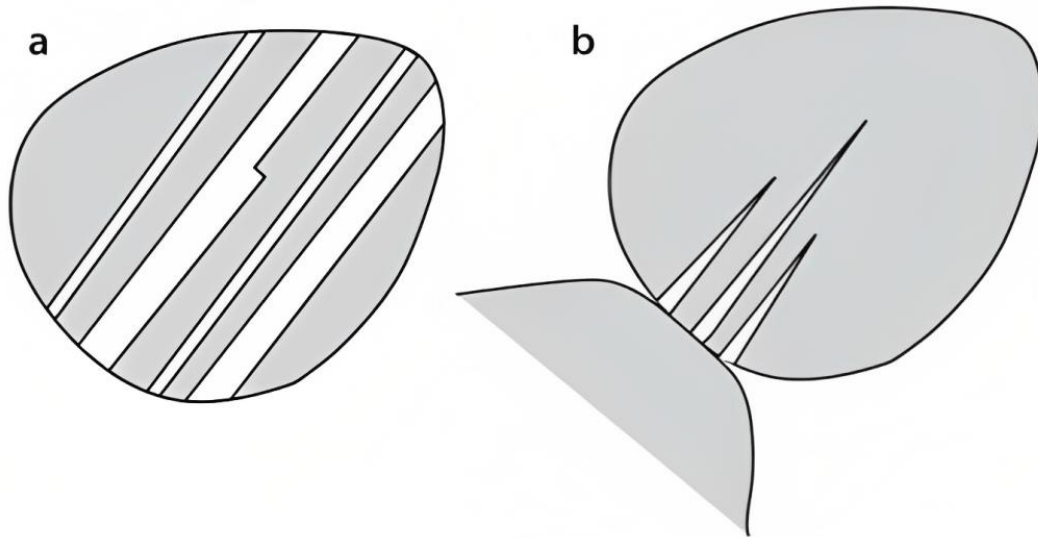
### ***3.2.2 Maclado por deformación***

Una parte de la estructura del grano experimenta torsión con respecto a otra parte del mismo grano que no experimenta torsión, de tal manera que se produce una imagen especular del cristal original, lo que se conoce como macla de deformación. Se originan debido a que una parte de la red cristalina experimenta cizallamiento a lo largo planos de macla, los cuales son los planos cristalográficos del mineral. Las maclas de crecimiento presentan una forma recta y escalonada y suelen estar delimitadas por zonación. Por otra parte, las maclas de deformación presentan forma de cuña volviéndose más estrechas hacia el centro del cristal, tienen espesor variable y pueden estar flexionadas. Se suelen nuclear o encontrar en sitios de alta tensión como los son los bordes de dos granos que están en contacto (Figura 9). Son comunes en carbonatos y feldespatos, en los carbonatos la

morfoloía de las maclas de deformación depende de la temperatura (Passchier & Trouw, 2005; Blenkinsop, 2002).

### Figura 9

*Maclado por deformación*



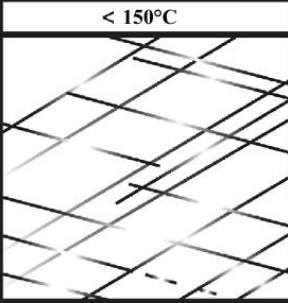
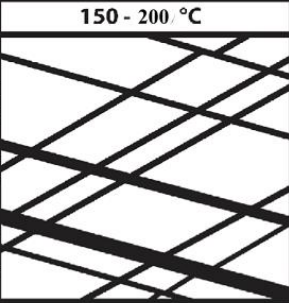
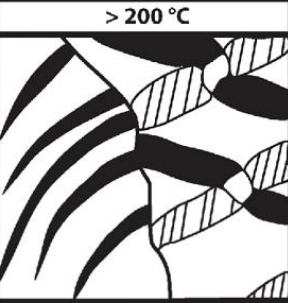
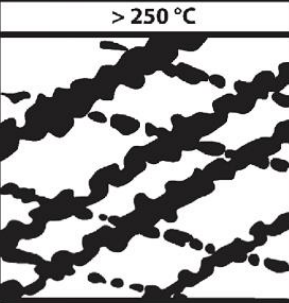
*Nota. a) maclas de crecimiento. b) La figura representa el maclado por deformación, se observa que se nuclean en sitios de alta tensión como lo límites de dos granos que se forman entre sí, presentan forma de cuña estrechándose hacia el centro del grano. Tomada y modificada de *Microtectonics* (p. 38), por W. Passchier., J. Trouw, 2005, Springer.*

En la calcita, el ancho y la morfoloía de las maclas de deformación da información acerca de la temperatura a la cual ocurrió, a medida que la temperatura aumenta la forma de las maclas y su grosor van cambiando. Burkhard (1993) definió cuatro tipos de maclas con un aumento de temperatura progresivo: Tipo I, maclas delgadas, rectas y con un grosor menor a  $1\mu\text{m}$ , en temperaturas menores a los  $150^\circ\text{C}$ ; Tipo II, maclas rectas y gruesas con un grosor mayor a  $1\mu\text{m}$ , se pueden encontrar granos completamente maclados, pueden ser

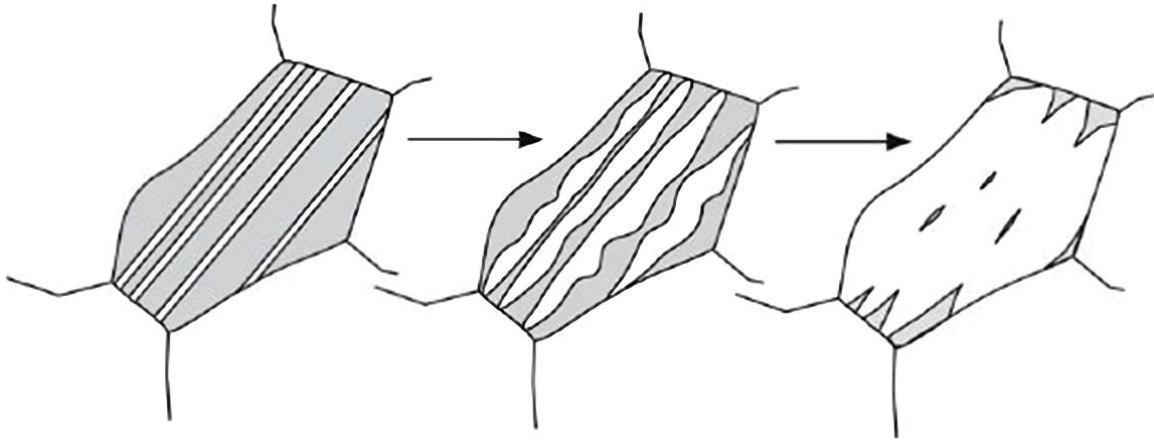
sindeformacionales o posdeformacionales, temperaturas entre los 150°C y 200°C; Tipo III, maclas curvas y gruesas, se pueden apreciar maclas dentro de las maclas, granos completamente maclados, generalmente son sindeformacionales, temperaturas entre los 200°C y 250°C; Tipo IV, maclas irregulares y gruesas que pueden presentar recristalización dinámica, temperaturas mayores a los 250°C (Figura 10 y 11) (Burkhard, 1993; Ferril et al, 2004; Vernon, 2004).

### Figura 10

#### *Maclas de deformación en calcita*

INCREMENTO DE TEMPERATURA			
< 150°C	150 - 200 °C	> 200 °C	> 250 °C
			
<p><b>Tipo I</b></p> <p>Maclas delgadas y rectas, con un grosor menor a 1µm.</p>	<p><b>Tipo II</b></p> <p>Maclas tabulares, gruesas y rectas, con un grosor mayor a 1µm.</p>	<p><b>Tipo III</b></p> <p>Maclas curvas y gruesas, se pueden apreciar maclas dentro las maclas y granos completamente maclados.</p>	<p><b>Tipo IV</b></p> <p>Maclas gruesas irregulares, modificadas por recristalización dinámica.</p>

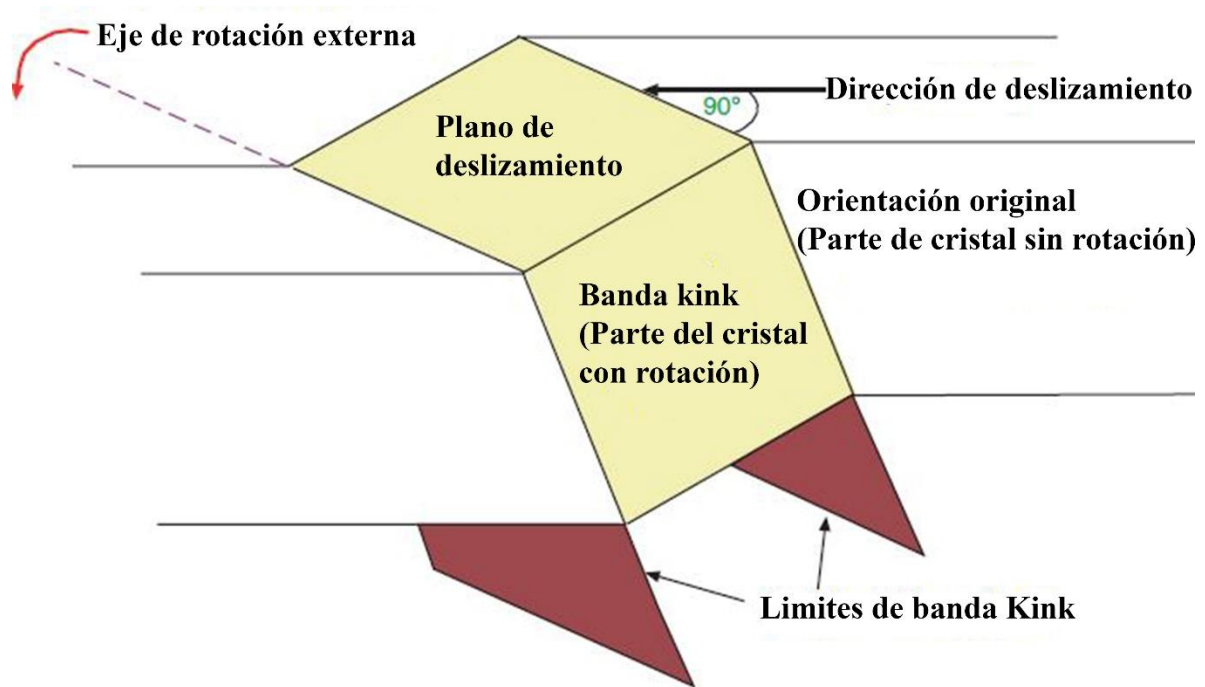
*Nota. En la figura se representan los diferentes tipos de maclas de deformación en calcita de acuerdo al aumento de temperatura. Tomada y modificada de Calcite twins, their geometry, appearance, and significance as stress-strain markers and indicators of tectonic regime: a review (p, 5), por M. Bukhard, 1993, Journal of Structural Geology.*

**Figura 11***Recristalización del límite de macla*

*Nota. La figura representa la recristalización del límite de macla, se observa cómo puede afectar totalmente el interior del grano sin que los límites de grano se vean afectados. Tomada y modificada de *Microtectonics* (p. 38), por W. Passchier., J. Trouw, 2005, Springer.*

**3.2.3 Kinking**

Ocurre debido a que el deslizamiento en un solo plano no es suficiente para mantener una deformación homogénea, una parte del grano se rota o se flexiona fuertemente y la deformación se concentra en zonas llamadas bandas kink. Las bandas kink se pueden definir como la parte del grano que experimenta intensa flexión o rotación con respecto a las partes del mismo grano que no la experimentan (Figura 12). Es común en minerales con estructuras cristalinas anisotrópicas y con un único sistema de deslizamiento como lo son las micas, pero también puede ocurrir en minerales con varios sistemas de deslizamiento como cuarzo, feldespatos y calcita. (Passchier & Trouw, 2005; Vernon, 2004).

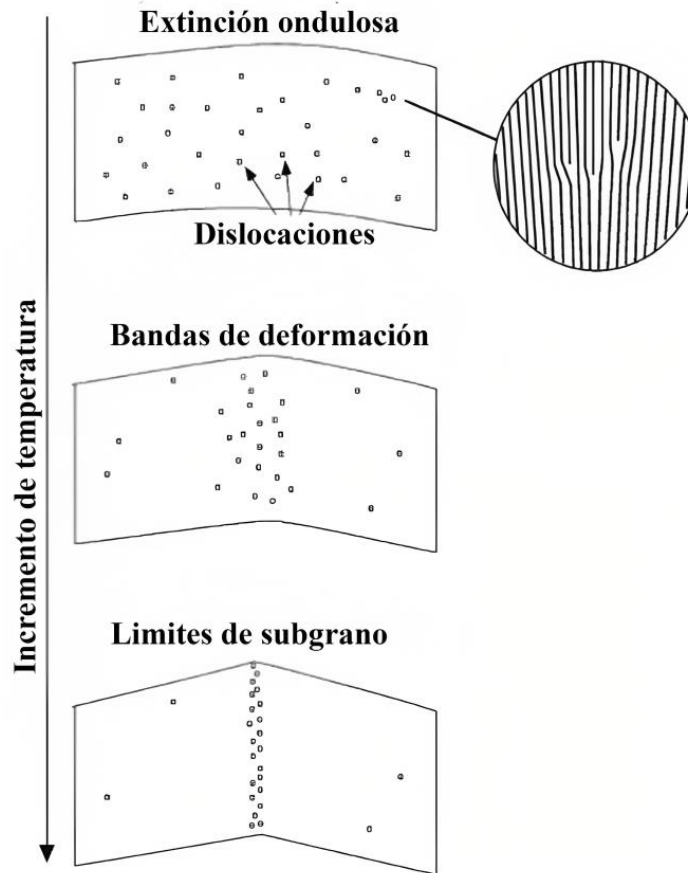
**Figura 12***Kinking*

*Nota. La figura representa la geometría de las bandas kink. Tomada y modificada de A practical guide to Rock Microstructure (p, 304), Por R.H. Vernon, 2004, Cambridge University Press.*

### 3.2.4 Recuperación

Se refiere a los procesos que intentan devolver el grano a un estado no deformado por medio de la migración y ordenamiento de las dislocaciones en planos o paredes de dislocaciones que separa volúmenes del mismo grano con ligeras orientaciones cristalográficas diferentes involucrando alta energía. La migración o movimiento de dislocaciones se produce por el proceso llamado fluencia de dislocaciones, reduciendo la

energía de deformación interna del cristal por medio del movimiento de las dislocaciones a los límites de grano o su reagrupamiento en zonas dentro del grano, también se puede dar por el desenredo de dislocaciones a través de la dislocación ascendente y dislocación cruzada. La recuperación es un mecanismo que va cambiando con el aumento de la temperatura, en una etapa inicial se tienen dislocaciones distribuidas aleatoriamente sin ningún agrupamiento, que se expresa como la extinción ondulosa; luego las dislocaciones se empiezan a agrupar en planos o paredes de dislocaciones, que en esta etapa son anchas y difusas, con ángulos de extinción ligeramente diferentes, se conocen como bandas de deformación; por último, se forman límites de subgranos y por consiguiente subgrano (Figura 13). A medida que aumenta la temperatura y se acumula la deformación, las dislocaciones desenredadas continúan migrando y se agrupan en límites de subgranos, los cuales son más netos, definidos y con relieve óptico bajo, también se conocen como pared de subgrano inclinada debido al cambio de orientación cristalográfica. Estos límites o paredes de subgranos delimitan volúmenes dentro del mismo grano, que serán los subgranos, los cuales presentan una extinción diferente y homogénea debido a la reorientación cristalográfica y la no presencia de dislocaciones, las cuales se encuentran agrupadas en los límites de dichos subgranos. (Passchier & Trouw, 2005; Blenkinsop, 2002; Fossen, 2016; Vernon, 2004).

**Figura 13***Recuperación*

*Nota. La figura representa el proceso de recuperación. Inicialmente se tiene la extinción ondulosa, luego debido al aumento de temperatura y recuperación, las dislocaciones se agrupan en bandas de deformación y por último en límites de subgranos. Tomada y modificada de *Microtectonics* (p. 38), por W. Passchier., J. Trouw, 2005, Springer.*

### 3.2.5 Recristalización dinámica

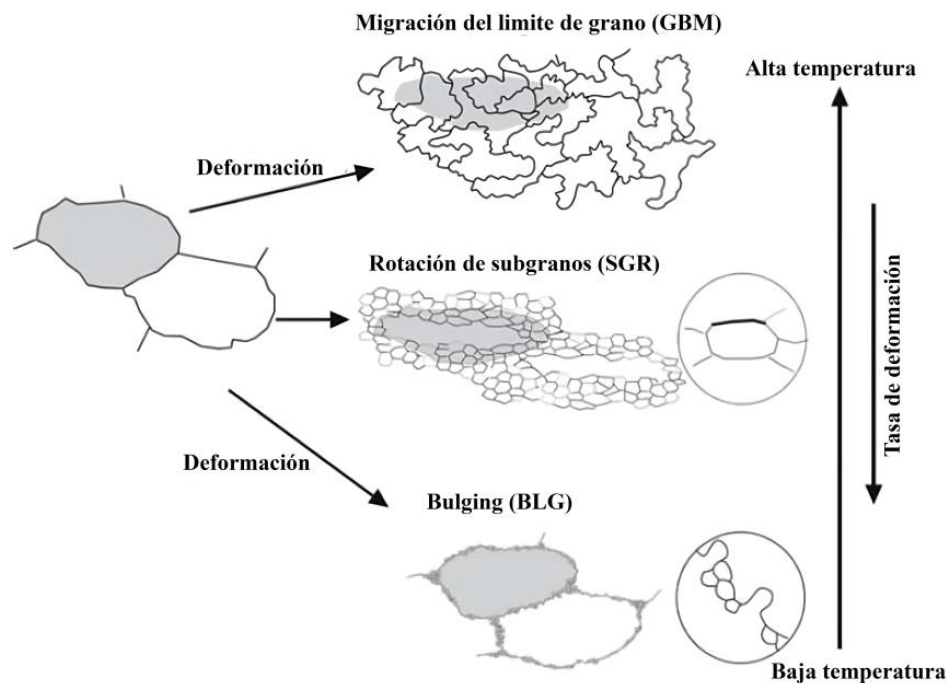
Es una recristalización sindeformacional. Se entiende como una reorganización del material cristalino en un conjunto de granos nuevos, sin o con muy poca deformación, con

reducción de su tamaño, cambio de forma y orientación, todo esto debido a la movilidad y modificación de los límites de grano lo cual contribuye a la reducción de la densidad de dislocaciones en cristales deformados. Esto sucede por medio de dos procesos: 1) migración de los límites de grano, 2) formación de subgranos y eliminación de las dislocaciones presentes en los subgranos. Estos dos procesos son los responsables de la aparición de tres mecanismos de recristalización dinámica que exhiben texturas específicas que son resultado de la activación del sistema de deslizamiento intracristalino dominante por el aumento de temperatura durante la deformación. El cuarzo es un mineral clave para comprender la recristalización dinámica por las siguientes razones: 1) es uno de los minerales formadores de rocas más comunes y más abundantes; 2) es estable en todas las condiciones metamórficas y su deformación dúctil o cristalino plástica sucede en un rango de temperatura desde los 300°C hasta los 750°C; 3) las microestructuras metamórficas de deformación son observables por microscopía óptica (Passchier & Trouw, 2005; Blenkinsop 2002; Vernon 2004, Fossen, 2016; Faleiros, 2010; Forero, 2021). Hirth & Tullis (1992) definieron tres regímenes de recristalización dinámica para el cuarzo: Régimen 1: Temperatura entre los 300°C a 400°C, alta densidad de dislocaciones en granos originales, extinción ondulosa irregular, recristalización bulging dominante; Régimen 2: Temperatura entre los 400°C a 500°C, extinción ondulosa más regular mostrando bandas de deformación y subgranos, estructuras de núcleo y manto, granos recristalizados tiene un tamaño aproximado a los subgranos, baja densidad de dislocaciones en granos originales y recristalizados, fuerte reducción del tamaño de grano, recristalización por rotación de subgranos dominante y en menor medida bulging; Régimen 3: Temperatura entre los 500°C hasta los 750°C, presencia de subgranos, granos recristalizados presentan baja reducción del tamaño de grano y muy poca o nula densidad de

dislocaciones, recrystalización por migración del límite de grano a alta temperatura es dominante y en menor medida la rotación de subgranos. A continuación, se definen los tres tipos de recrystalización dinámica en un orden de menor temperatura a mayor temperatura (Figura 14).

**Figura 14**

*Recrystalización dinámica*



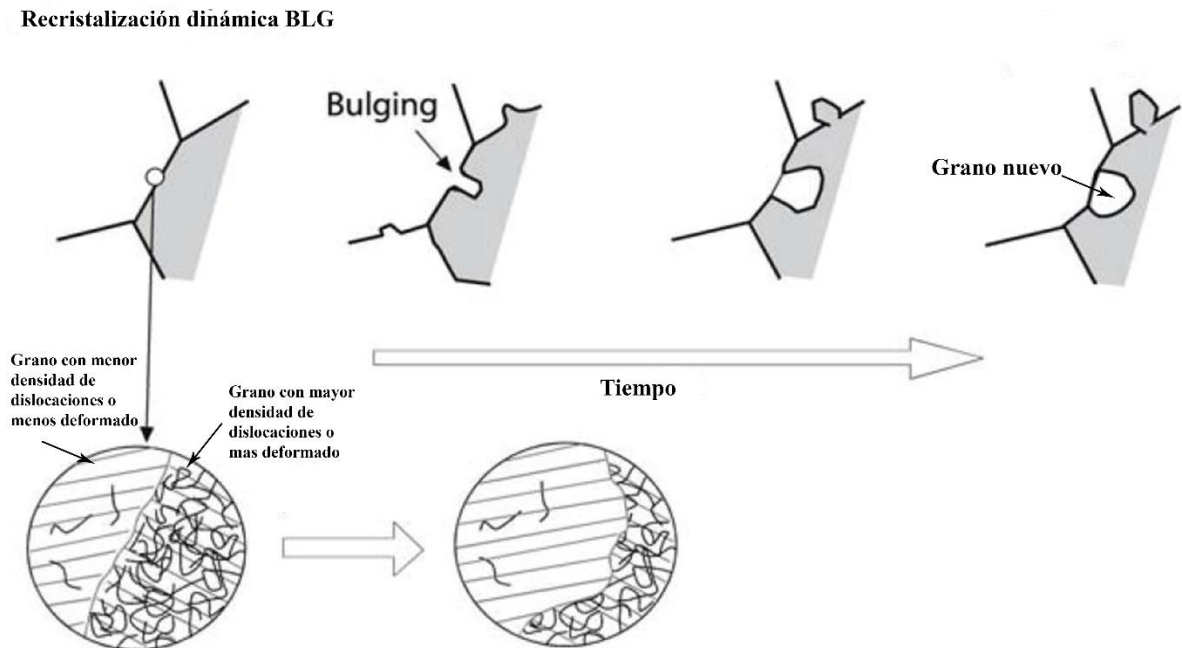
*Nota. La figura representa los tres tipos de recrystalización negro. El grano que recrystaliza se señala en sombreado, antes y después de la recrystalización. Tomada y modificada de Microtectonics (p. 41), por W. Passchier., J. Trouw, 2005, Springer.*

**3.2.5.1 Recrystalización Bulging.** También llamada recrystalización por migración del límite de grano a baja temperatura, recrystalización abultada o recrystalización BLG por sus siglas en inglés. Implica la movilidad de límites de grano, esta migración es local y sucede en un tramo. Debido al

incremento de la temperatura ocurre una difusión de átomos a través de los límites y los átomos pueden transferirse fácilmente de una red cristalina a otra adyacente, lo cual se ve reflejado en un abultamiento de un límite de grano sobre el grano contiguo, el grano con menor densidad de dislocaciones se abultará sobre el vecino de menor densidad de dislocaciones, esto puede llevar a la formación de subgranos y nuevos granos pequeños e independientes (Figura 15).

### Figura 15

#### Recristalización dinámica Bulging (BLG)



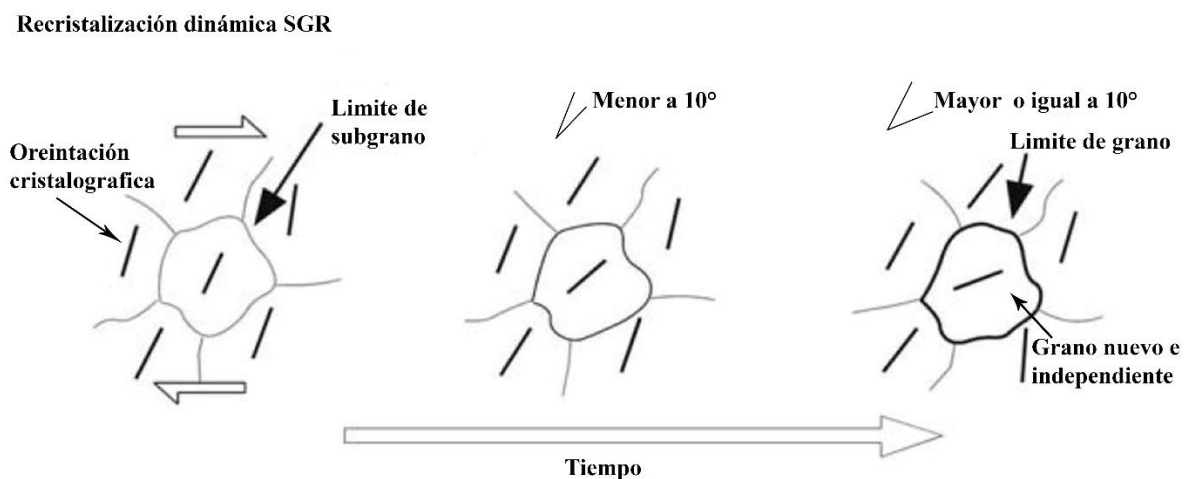
*Nota. La figura representa la recristalización BLG a través del tiempo. El grano sombreado representa el que tiene una alta densidad de dislocaciones. Se observa como el grano con menor densidad de dislocaciones empieza a consumir desde los límites de grano al grano con mayor densidad de dislocaciones, formándose límites lobulados y protuberancia y eventualmente la formación de un nuevo grano. Tomada y modificada de *Microtectonics* (p. 42), por W. Passchier., J. Trouw, 2005, Springer.*

Entre los 250°C-300°C empieza la recristalización bulging en cuarzo y es dominante hasta 400°C aproximadamente. Por otro lado, el feldespato empieza su recristalización bulging a partir de los 400°C y es dominante hasta aproximadamente los 600°C (Passchier & Trouw, 2005; Blenkinsop 2002; Vernon 2004, Fossen, 2016; Faleiros, 2010; Forero, 2021).

**3.2.5.2 Recristalización por rotación de subgranos.** También conocida como recristalización SGR por sus siglas en ingles. Esta se produce cuando ha ocurrido una deformación constante, es decir, se agregan continuamente dislocaciones. Estas dislocaciones migran y se acumulan en los límites de subgranos durante la recuperación provocando una rotación progresiva de los subgranos. Cuando los límites de subgrano rotan más de 10°, la red atómica se rompe formando un nuevo grano independiente, de menor tamaño y diferente orientación cristalográfica con respecto al grano anfitrión o el grano afectado por la recristalización dinámica SGR (Figura 16).

**Figura 16**

*Recristalización dinámica SGR*



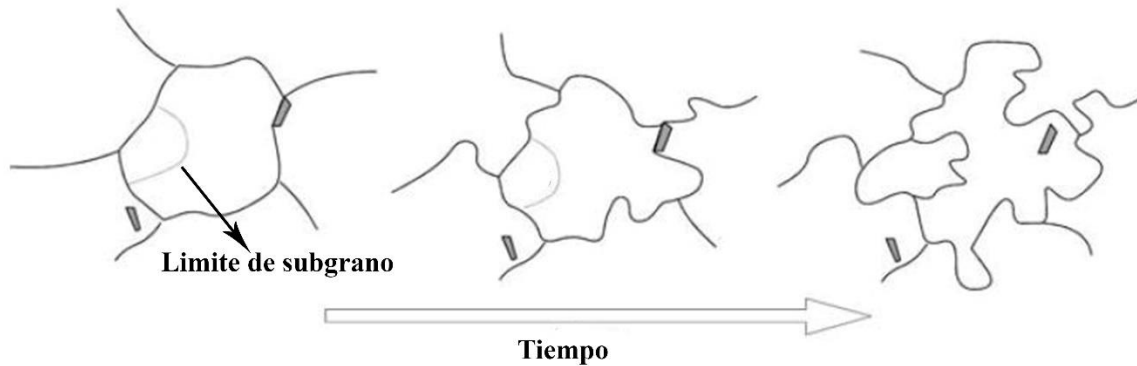
*Nota.* La figura representa la rotación de subgranos (SGR). Se observa cómo debido a una deformación progresiva las dislocaciones migran a los límites de subgranos, en respuesta a esto los

*subgranos rotan progresivamente hasta formar nuevos granos independientes los cuales tiene una desorientación cristalográfica mayor a 10° con respecto al grano anfitrión o recristalizado. Tomada y modificada de Microtectonics (p. 42), por W. Passchier., J. Trouw, 2005, Springer.*

Entre los 400° y 500°C el cuarzo experimenta recristalización por rotación de subgranos. Por otro lado, en el feldespato la recristalización SGR es dominante desde los 600°C y puede ocurrir hasta los 750°C (Passchier & Trouw, 2005; Blenkinsop 2002; Vernon 2004, Fossen, 2016; Faleiros, 2010; Forero, 2021).

### **3.2.5.3 Recristalización por migración del límite de grano a alta temperatura.**

También conocida como recristalización GBM por sus siglas en inglés. Es un mecanismo impulsado por las diferencias de energía de deformación interna entre los granos. Debido a la alta temperatura los límites de los granos se vuelven muy móviles y habrá un ligero movimiento de átomos en los límites de grano, el límite de grano con menor densidad de dislocaciones migrará al interior del grano con mayor cantidad de dislocaciones, estos límites pueden consumir granos enteros para eliminar las dislocaciones y los límites de subgranos. Se puede entender como una forma más pronunciada de abultamiento de límite de grano, lo cual produce protuberancias con longitudes largas que migran a través del agregado. Como producto final se obtiene granos con límites muy lobulados, con una apariencia libre de deformación, es decir sin dislocaciones y por consiguiente sin extinción ondulosa y subgranos. (Figura 17). No es común la reducción del tamaño de grano ni la formación de nuevos granos. Entre los 500°C y 800°C la recristalización es principalmente por GBM en cuarzo, indicando condiciones de medio a alto grado. Por otro lado, el feldespato potásico se recristaliza por GBM aproximadamente a partir de los 800°C a 850°C con presencia de una fase de fundido, indicando condiciones de ultra alto grado. (Passchier & Trouw, 2005; Blenkinsop 2002; Vernon 2004, Fossen, 2016; Faleiros, 2010; Forero et al, 2021).

**Figura 17***Recristalización dinámica GBM***Recristalización GBM**

*Nota. En la figura se representa la acción de la recristalización GBM a través del tiempo. Debido a la alta temperatura los límites de grano se vuelven muy móviles y pueden consumir los granos en cualquier dirección para eliminar dislocaciones y límites de subgranos. Se puede producir la rotación de subgrano cuando los límites de subgranos se transforman en límites de grano, estos son muy móviles. Tomada y modificada de *Microtectonics* (p. 42), por W. Passchier., J. Trouw, 2005, Springer.*

**3.3 Indicadores del sentido de cizalla**

Las milonitas presentan elementos de fábrica y microestructuras simétricas de forma monoclinica como resultado de la deformación progresiva no coaxial en las zonas de cizalla por el desplazamiento relativo de la roca caja. Por otra parte, se presentan microestructuras asimétricas de forma monoclinica, cuya asimetría se puede usar para deducir el sentido de cizalla. Las microestructuras asimétricas se desarrollan mejor en milonitas deformadas en un

rango de temperaturas entre los 300°C a 500°C (Passchier & Trouw, 2005; Trouw et al, 2010).

A continuación, se explican los indicadores de cizalla identificados en sección delgada:

### 3.3.1 *Foliación oblicua*

Se define como una fábrica de estado estacionario que ocurre como una orientación preferencial de forma de grano en capas monominerales principalmente de cuarzo. La foliación oblicua es el resultado de la acción de dos procesos: una deformación que produce granos dúctiles elongados por un aplanamiento pasivo, en donde la deformación por cizallamiento es la responsable de alinear los granos con los ejes de estiramiento instantáneo, implicando una rotación entre 20° a 45° de los granos con respecto foliación milonítica y; recristalización dinámica por migración del límite de grano, que forma nuevos granos equidimensionales libres de deformación (Figura 18) (Passchier & Trouw, 2005; Trouw et al, 2010).

## Figura 18

### *Foliación oblicua*



*Nota. En la figura se representa una foliación oblicua idealizada para un sentido de cizalla dextral. Tomada y editada de Script to Structural Geology (p. 301), por J.P. Burg., 2018.*

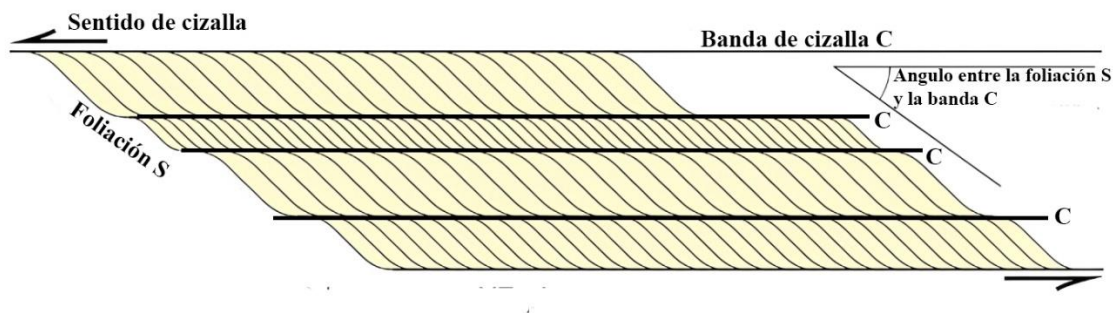
### 3.3.2 Bandas de cizalla C, C' y C''

Se definen como zonas de cizallamiento menores que cortan transversalmente una orientación preferencial o foliación más antigua S.

Las bandas de cizalla C son comunes en protomilonitas, presentan una morfología recta, espaciada y continúan sino es cortada por la banda C'. Son paralelas a la zona de cizalla principal y definen la foliación milonítica. En la fábrica C-S, la foliación S muestra una morfología sigmoidal y es cortada por la banda de cizalla C en un ángulo entre 10° a 45°, la fábrica C-S es común en mesomilonitas y zonas de cizallamiento con temperaturas de deformación de hasta 500°C, donde las bandas C se suelen encontrar anastomosadas alrededor de porfiroclastos de feldespato potásico (Figura 19)

**Figura 19**

*Fabrica C – S*

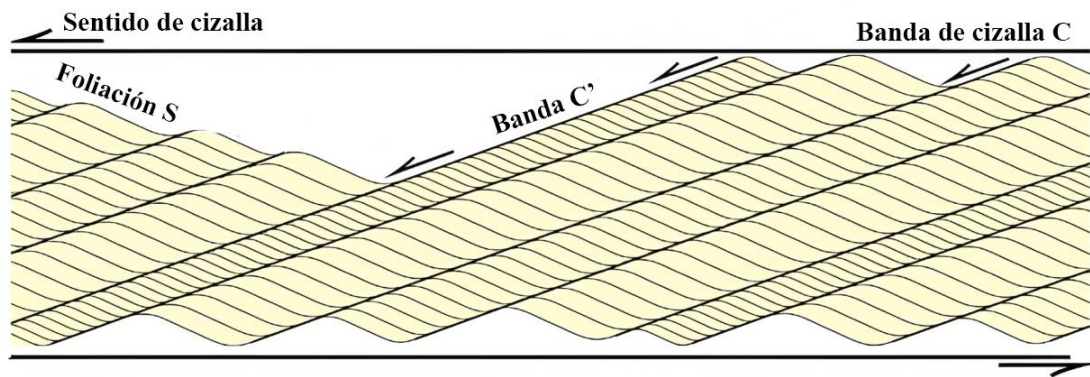


*Nota. La figura representa una fábrica C – S. Se observan que la foliación S presenta una forma sigmoidal debido al cizallamiento evidenciado por las bandas C que cortan la foliación S. Tomada y editada de Script to Structural Geology (p. 248), por J.P. Burg., 2018.*

La banda de cizalla C' presentan una morfología recta, espaciada y continua sino son cortadas por las bandas C''. Las bandas C' cortan las bandas C en un ángulo menor a 30° y representan el riedel (Figura 20).

**Figura 20**

*Fabrica S – C'*



*Nota. La figura representa una fábrica S – C' para un sentido de cizalla dextral. Se observa como las bandas C son cortadas por las bandas C'. Tomada y editada de Script to Structural Geology (p. 249), por J.P. Burg., 2018.*

Las bandas de cizalla C'' son zonas de microcizallamiento espaciadas que cortan las bandas de cizalla C' en un ángulo de aproximadamente 60° y representan las antiriedel.

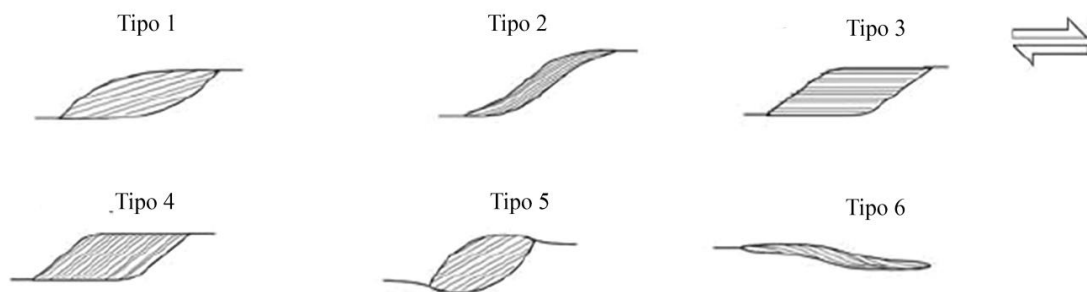
### 3.3.3 Mineral fish

Presentan morfología de rombos alargados o lentes en la cual su dirección de estiramiento forma un pequeño ángulo con respecto a la foliación milonítica principal, exhibiendo una morfología escalonada la cual indica el sentido de cizalla. Comúnmente son compuestos de mica blanca como moscovita llamados mica fish, pero también se puede

dar en otros minerales como biotita, plagioclasa, feldespato potásico, hornblenda, granate, dióxido, ilmenita. La forma de rombo alargado o lente se debe probablemente a deformación interna, disolución por presión o recristalización y crecimiento lateral por precipitación de material disuelto. En la naturaleza se identifican 6 tipos de morfologías de mica fish (Figura 21) (Passchier & Trouw, 2005; Trouw et al, 2010).

### Figura 21

#### *Mica fish*



*Nota. En la figura se representan 6 diversos tipos o morfologías de mica fish para un sentido de cizalla dextral. Tomada y modificada de Microtectonics (p. 142), por W. Passchier., J. Trouw, 2005, Springer.*

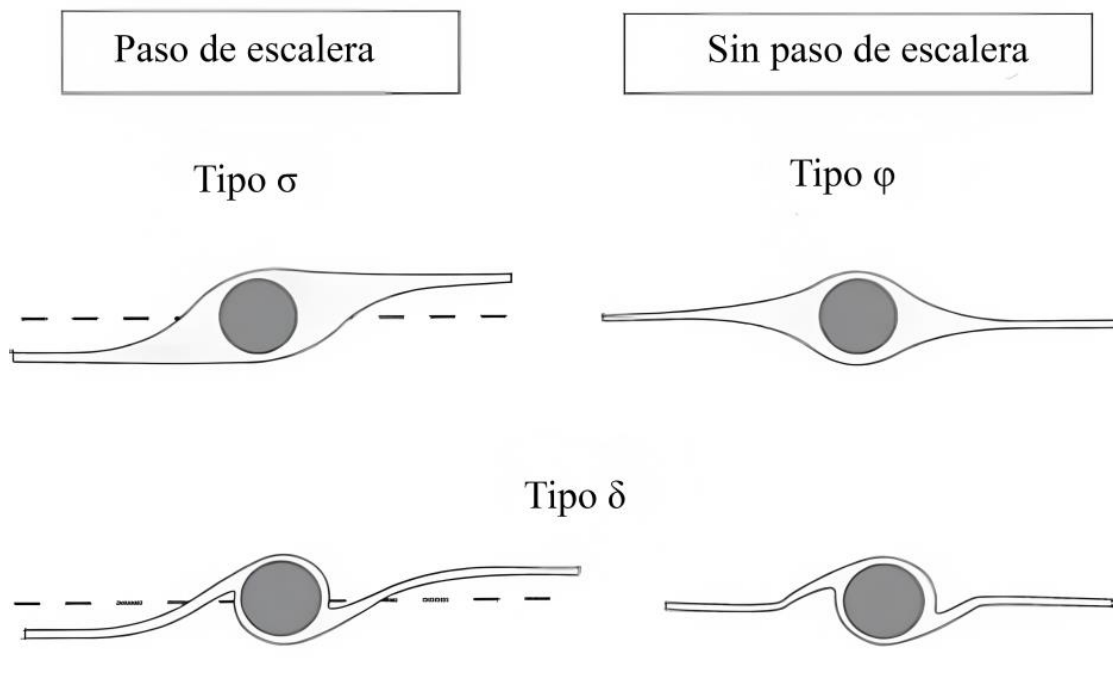
#### 3.3.4 Porfiroclastos de núcleo y manto

Consiste en un grano central o núcleo con un manto recristalizado de la misma composición que el núcleo. El porfiroclasto es afectado por recristalización dinámica SGR desde sus bordes, haciendo que se reduzca su tamaño y creando un manto de grano fino de material recristalizado de la misma composición que el porfiroclasto. Se distinguen tres tipos principales de porfiroclastos de núcleo y manto: tipo  $\sigma$  los cuales presentan un manto ancho cerca del núcleo y las alas se encuentran a diferente altura o son asimétricas

indicando el sentido de cizalla, en estos porfiroclastos la recrystalización es más dominante que la rotación y ocurren en milonitas de baja deformación; tipo  $\delta$  que se derivan de la rotación de porfiroclastos tipo  $\sigma$ , arrastrando y enrollando las alas alrededor del núcleo con una morfología estrecha y curva, no todos presentan paso de escalera o asimetría en sus alas, domina la rotación sobre la recrystalización y ocurren generalmente en milonitas de alta deformación y; tipo  $\varphi$  que presentan un manto ancho cerca del núcleo, sus alas son simétricas sin paso de escalera, domina la recrystalización sobre la rotación y son comunes en milonita de grano grueso de alto grado (Passchier & Trouw, 2005; Trouw et al, 2010) (Figura 22).

### Figura 22

*Tipos de porfiroclastos de núcleo y manto*



*Nota. La figura representa los 3 tipos principales de porfiroclastos de núcleo y manto con alas para un sentido de cizalla dextral. Tomada y modificada de Microtectonics (p. 133),*

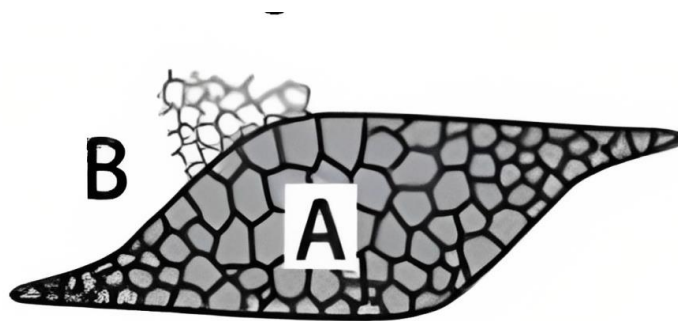
por W. Passchier., J. Trouw, 2005, Springer.

### 3.3.5 Sigmoides

Son porfiroclastos de una composición diferente a la matriz que suelen tener una forma parecida a los porfiroclastos  $\sigma$  o a los mineral fish. Presentan deformación interna y recrystalización dinámica SGR. Algunas de las razones por las que se pudieron haber formado son: deformación dúctil de granos rectangulares que recrystalizaron completamente o por recrystalización completa del núcleo de un porfiroclasto tipo  $\sigma$  de núcleo y manto (Passchier & Trouw, 2005) (Figura 23).

#### Figura 23

*Sigmoide*



*Nota. La figura representa un sigmoide para un sentido de cizalla dextral. A y B son minerales diferentes y B es la matriz. Se observa totalmente recrystalizado y con una forma parecida a un mineral fish. Tomada y modificada de Microtectonics (p. 133), por W. Passchier., J. Trouw, 2005, Springer.*

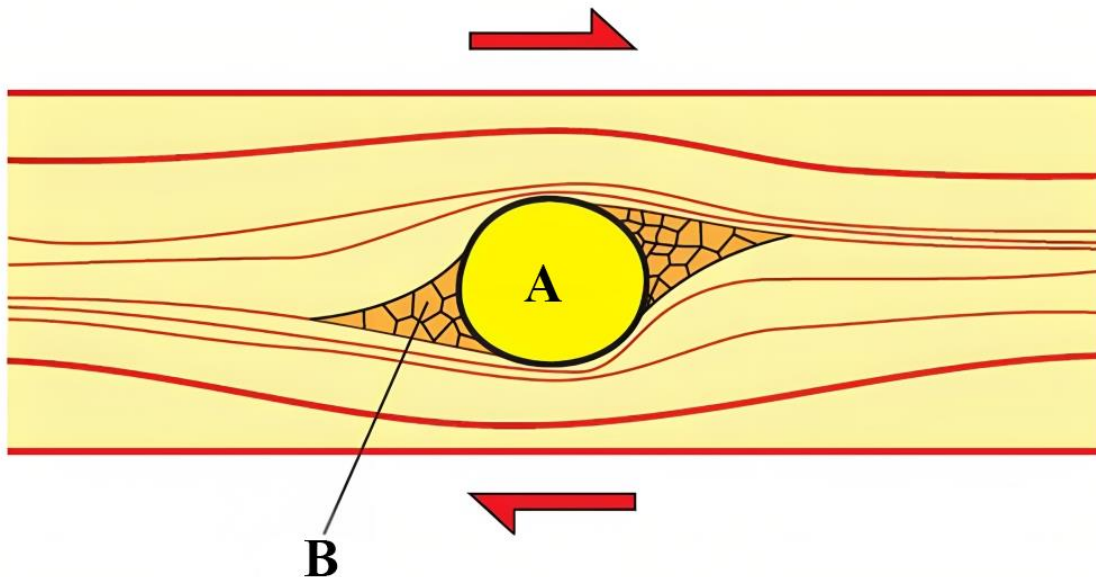
### 3.3.6 Sombras de deformación

Son zonas laterales alargadas de un porfiroclasto que presentan una diferente

mineralogía con respecto al porfiroclasto y una fábrica ausente, diferente o muy poco desarrollada con respecto a la matriz. Su composición mineral normalmente puede ser cuarzo, carbonatos o clorita. Las sombras de deformación pueden asociarse a circulación de fluidos, disolución por presión y precipitación de material en los límites de grano en la sombra de deformación en desarrollo y pueden formarse por redistribución de minerales producto a una deformación no homogénea alrededor de un objeto central. La morfología asimétrica de las sombras de deformación permite deducir el sentido de cizalla (Figura 24) (Passchier & Trouw, 2005).

### Figura 24

#### *Sombras de deformación*



*Nota. En la figura se representan las sombras de deformación para un sentido de cizalla dextral para un objeto central. Las sombras de deformación son asimétricas y están compuestas de un mineral diferente al porfiroclasto. Tomada y modificada de Atlas of*

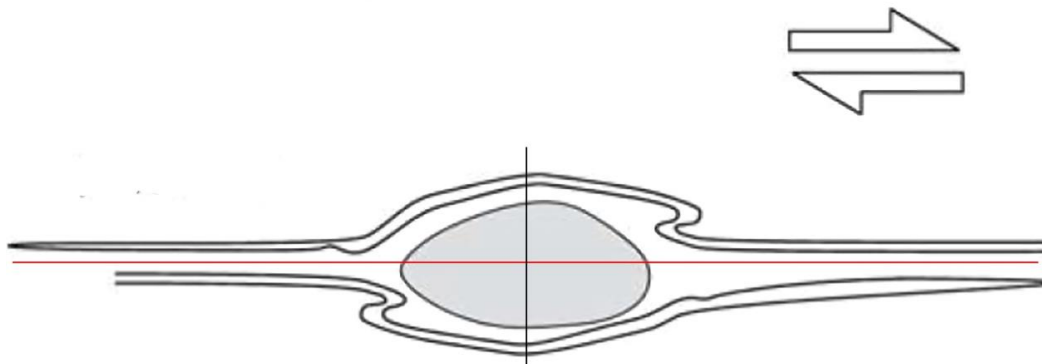
*Mylonites – and Related Microstructures (p. 234), por R.A.J. Trouw., C.W. Passchier., D.J Wiersma, 2010, Springer.*

### 3.3.7 *Pliegues de cuartos*

Se presenta un microplegamiento en la foliación circundante a un porfiroclasto. El microplegamiento se presenta en dos cuadrantes opuestos definidos por un plano formado entre la foliación y la normal a esta (Figura 25) (Passchier & Trouw, 2005).

#### **Figura 25**

*Pliegues de cuartos*



*Nota. En la figura se representa una microestructura de pliegue de cuartos para un sentido de cizalla dextral. La línea roja define la orientación de la foliación y la negra la normal a la foliación, Se observa el microplegamiento en el cuadrante superior derecho e inferior izquierdo. Tomada y modificada de *Microtectonics (p. 150)*, por W. Passchier., J. Trouw, 2005, Springer.*

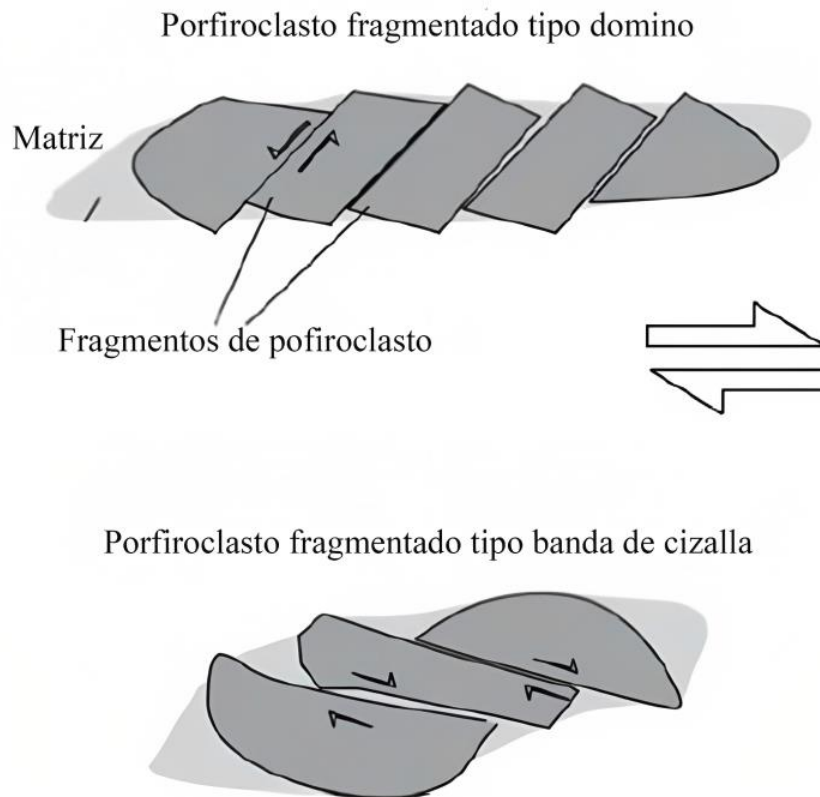
### 3.3.8 *Porfiroclastos fragmentados*

La geometría de los fragmentos depende del sentido de cizalla de la roca, la orientación de las microfallas y la forma original de los granos. Las fracturas simples

dominan en porfiroclastos que han sufrido leve deformación interna. Se identifican dos tipos de porfiroclastos fragmentados: tipo domino, que se caracterizan por un movimiento antitético respecto a la cizalla principal o banda C a lo largo de las microfallas que normalmente tienen una inclinación mayor a  $45^\circ$ ; tipo banda de cizalla, que indican un movimiento sintético con respecto a la banda C a lo largo de las microfallas, las cuales normalmente tiene una inclinación menor a  $45^\circ$  (Figura 26) (Passchier & Trouw, 2005; Trouw et al, 2010).

### Figura 26

#### *Porfiroclastos fragmentados*



*Nota. En la figura se representan los porfiroclastos fragmentados tipo domino y banda de cizalla para un sentido de cizalla dextral. Tomada y modificada de Microtectonics (p. 153),*

*por W. Passchier., J. Trouw, 2005, Springer.*

#### **4. Metodología**

Esta pasantía de investigación se desarrolló en cuatro etapas: revisión bibliográfica, estudio petrográfico (mineralogía, mecanismos y microestructuras de deformación), toma de fotomicrografías y elaboración del catálogo.

Se inició con la etapa de revisión bibliográfica, en la cual se realizó una recolección y análisis de la información obtenida de libros, artículos científicos y atlas, donde se abordaban los diferentes mecanismos de deformación presentados a diferentes condiciones de temperatura y presión en diversos minerales.

Durante la etapa de petrografía se identificaron y describieron los diferentes mecanismos de deformación y microestructuras asociadas encontrados en treinta (30) secciones delgadas pertenecientes a la colección, utilizando un microscopio de luz transmitida marca Nikon. (\*)

En la etapa de toma de fotomicrografías se utilizó un microscopio de luz transmitida marca Leica modelo DM750P, se tomaron fotomicrografías a los mecanismos de deformación en treinta (30) secciones delgadas pertenecientes a la colección. (\*\*).

---

\*Estos análisis fueron realizados en el laboratorio de petrografía de la escuela de geología de la Universidad Industrial de Santander.

\*\* La toma de fotomicrografías fue realizada en el laboratorio del grupo de investigación en geología básica y aplicada(GIGBA) en la sede Guatiguará.

Las treinta (30) secciones delgadas registradas en el catálogo de mecanismos de deformación y microestructuras asociadas (Apéndice A) y catálogo de inventario (Apéndice B) contienen la información de la mineralogía, mecanismos de deformación del régimen frágil y dúctil, indicadores del sentido de cizalla y clasificación de la roca. En las fotomicrografías se utiliza las abreviaturas minerales según la SCMR (\*).

A continuación, se muestra un ejemplo de una de las secciones delgadas que hace parte del catálogo de mecanismos de deformación y microestructuras asociadas (Apéndice A):

## **1. SECCIÓN DELGADA HQ-64**

### **1.1 Composición mineralógica:**

**Minerales mayores:** cuarzo, moscovita, biotita, plagioclasa, calcita.

**Minerales menores:** epidota, clorita.

### **1.2 Mecanismos de deformación.**

#### **Dúctiles**

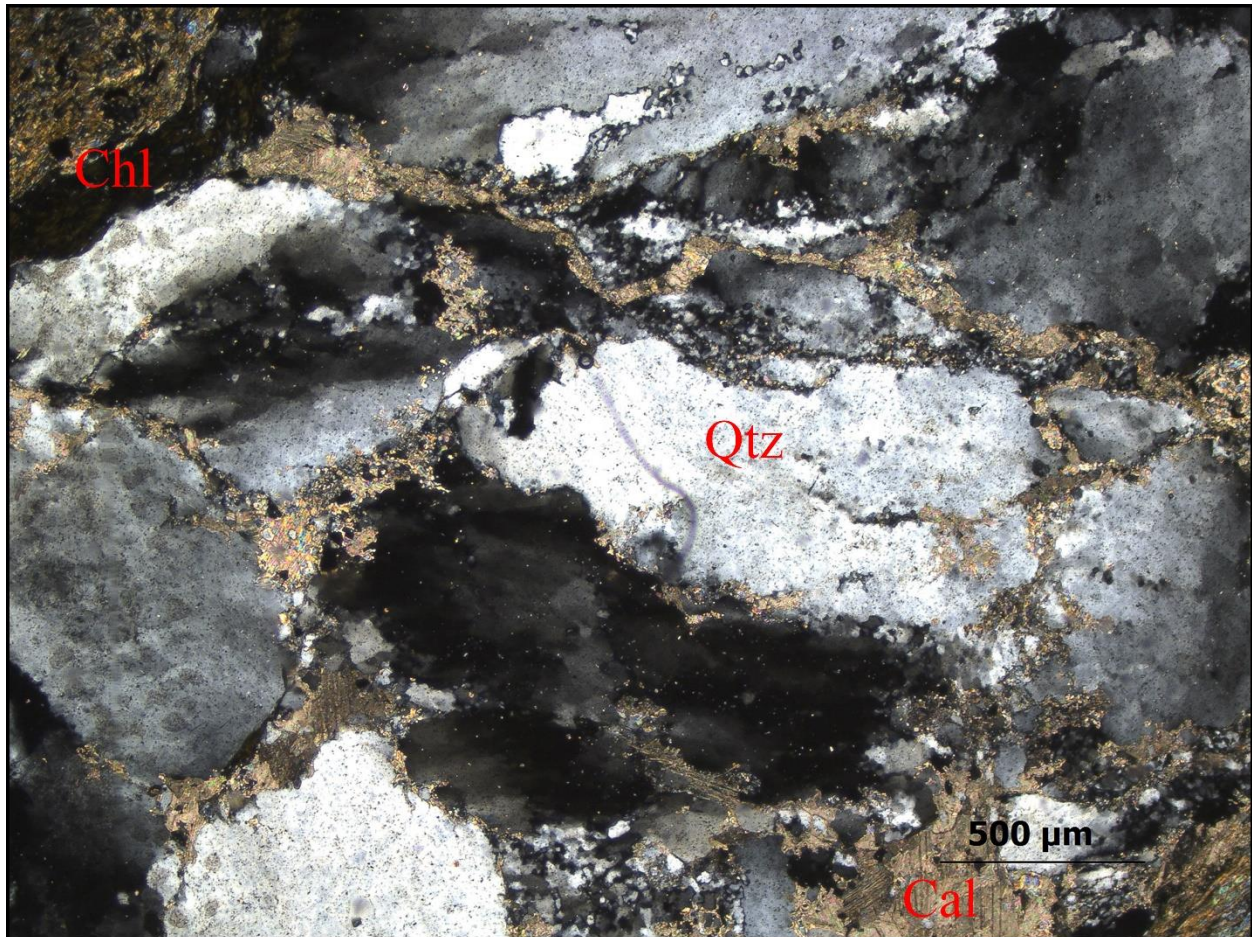
**Deformación intracristalina:** Se presenta una etapa de transición entre extinción ondulosa a bandas de deformación en cuarzo, con predominancia de las bandas de deformación. En la plagioclasa la extinción ondulosa es más intensa. La extinción ondulosa indica que las redes cristalinas de los granos se encuentran ligeramente flexionadas y contienen una gran cantidad de dislocaciones distribuidas aleatoriamente (Figura 27).

---

(\*) Subcommittee on the Systematics of Metamorphic Rocks (SCMR)

**Figura 27**

*Fotomicrografía extinción ondulosa, sección HQ-64*



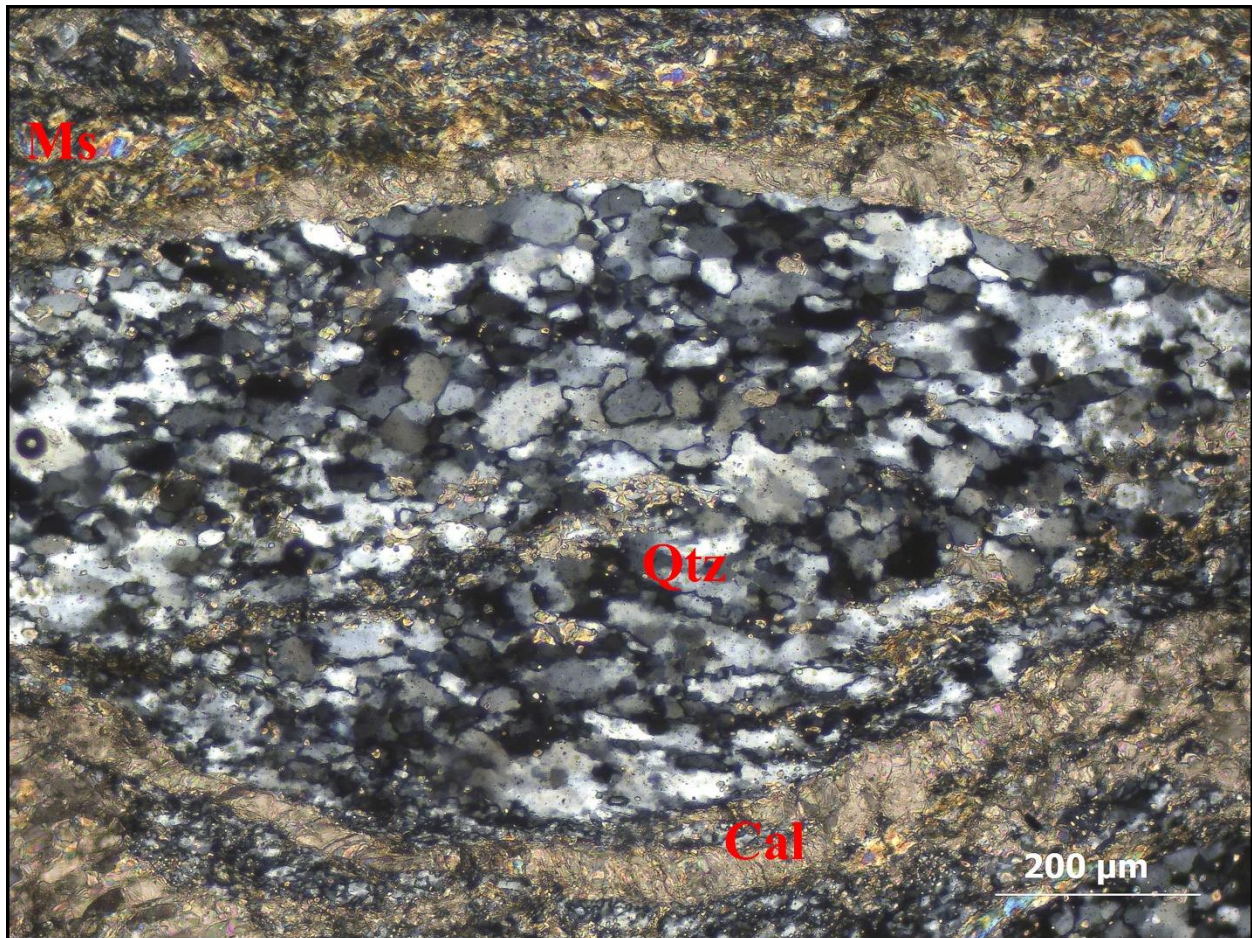
*Nota. En la fotomicrografía se observa extinción ondulosa en granos de cuarzo, la extinción es no uniforme en los granos de cuarzo y en algunos se pueden observar ligeras bandas de deformación producto de una ligera agrupación de algunas dislocaciones. Polarizadores cruzados, objetivo 4x.*

**Recuperación:** se presentan microestructuras de recuperación en cuarzo, exhibiendo bandas de deformación y principalmente subgranos. Debido al aumento de temperatura las dislocaciones presentes en los granos empezaron a moverse y agruparse en redes planas netas

que son los límites de subgranos y por consiguiente la creación de subgranos. Las microestructuras de recuperación en cuarzo son abundantes en condiciones de temperatura aproximadas de 400°C a 500°C (Figura 28 y 29).

### Figura 28

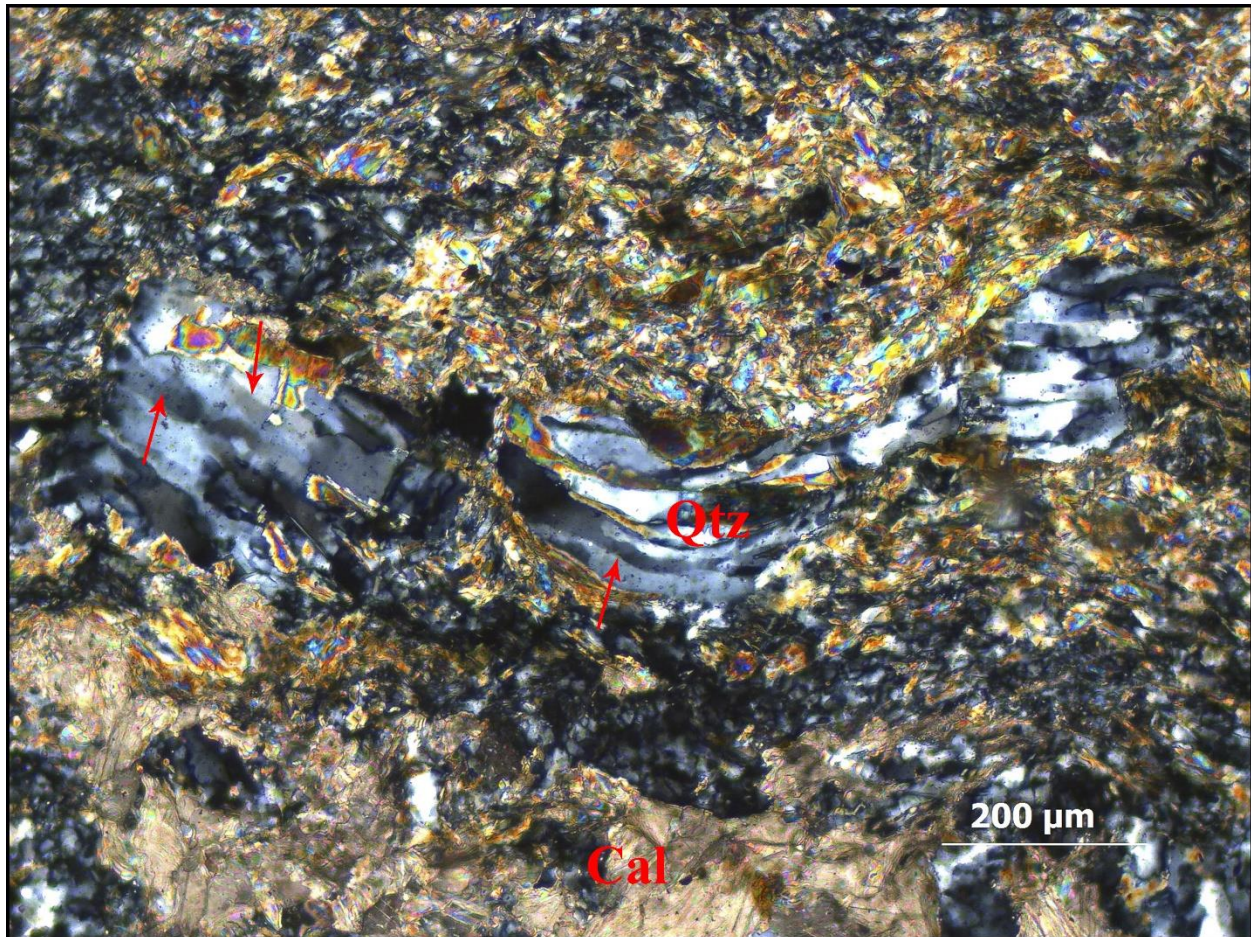
*Fotomicrografía recuperación, sección HQ-64*



*Nota. En la fotomicrografía se observan una alta densidad de subgranos en cuarzo producto de la recuperación. Polarizadores cruzados, objetivo 10x.*

**Figura 29**

*Fotomicrografía recuperación, sección HQ-64*



*Nota. En la fotomicrografía se observan cuarzo alargados. En la parte central se señala con una flecha roja un subgrano paralelo a la dirección de alargamiento. En la parte izquierda se señala en flechas rojas una etapa de transición entre bandas de deformación a subgranos. Polarizadores cruzados, objetivo 10x.*

**Recristalización dinámica:** Se presenta un régimen combinado de recristalización dinámica BLG y SGR, con dominancia de la recristalización dinámica SGR. La roca estuvo sometida a una deformación constante la cual adiciono dislocaciones constantemente. Debido al

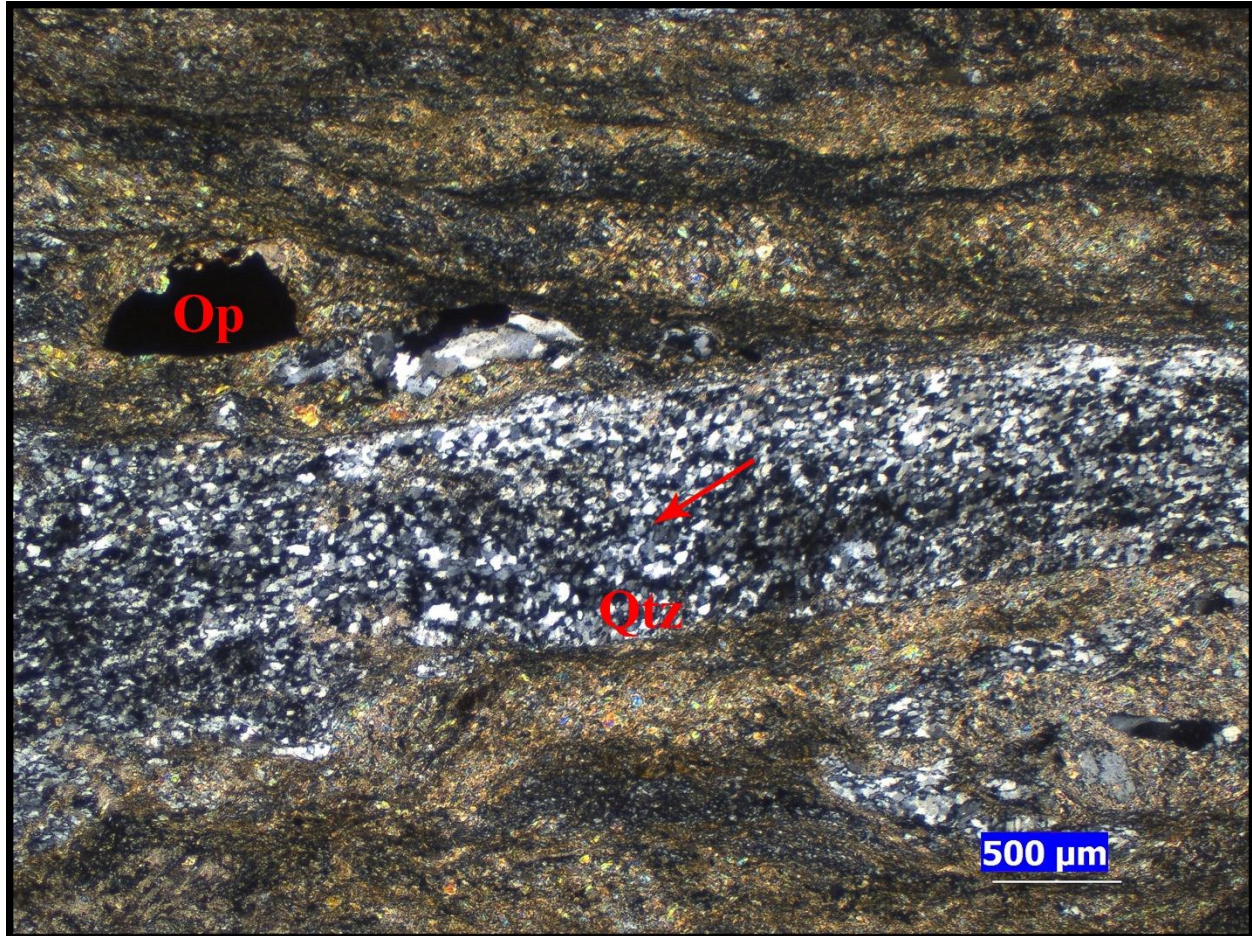
aumento de temperatura las dislocaciones se movilizaron y se acumularon progresivamente en los límites de subgranos creados por la recuperación, hasta que estos rotaron más  $10^\circ$  y dieron paso a la creación de nuevos granos los cuales presentan una orientación cristalográfica diferente al grano anfitrión. La recristalización dinámica SGR en cuarzo es dominante en condiciones de temperatura aproximadas de  $400^\circ\text{C}$  a  $500^\circ\text{C}$  (Figura 30 y 31).

Por otra parte, se presenta recristalización BLG en plagioclasa y en menor medida en cuarzo, indicando que hubo movilidad de los límites de grano, evidenciado por los bordes lobulados de poca amplitud y protuberancias en los granos (Figura 32).

En plagioclasa la recristalización BLG es dominante, afectando porfiroclastos desde los bordes y produciendo nuevos granos pequeños e independientes debido a la separación de las protuberancias, En plagioclasa la recristalización BLG es dominante en condiciones de temperatura aproximadas de  $450^\circ\text{C}$  a  $600^\circ\text{C}$ .

**Figura 30**

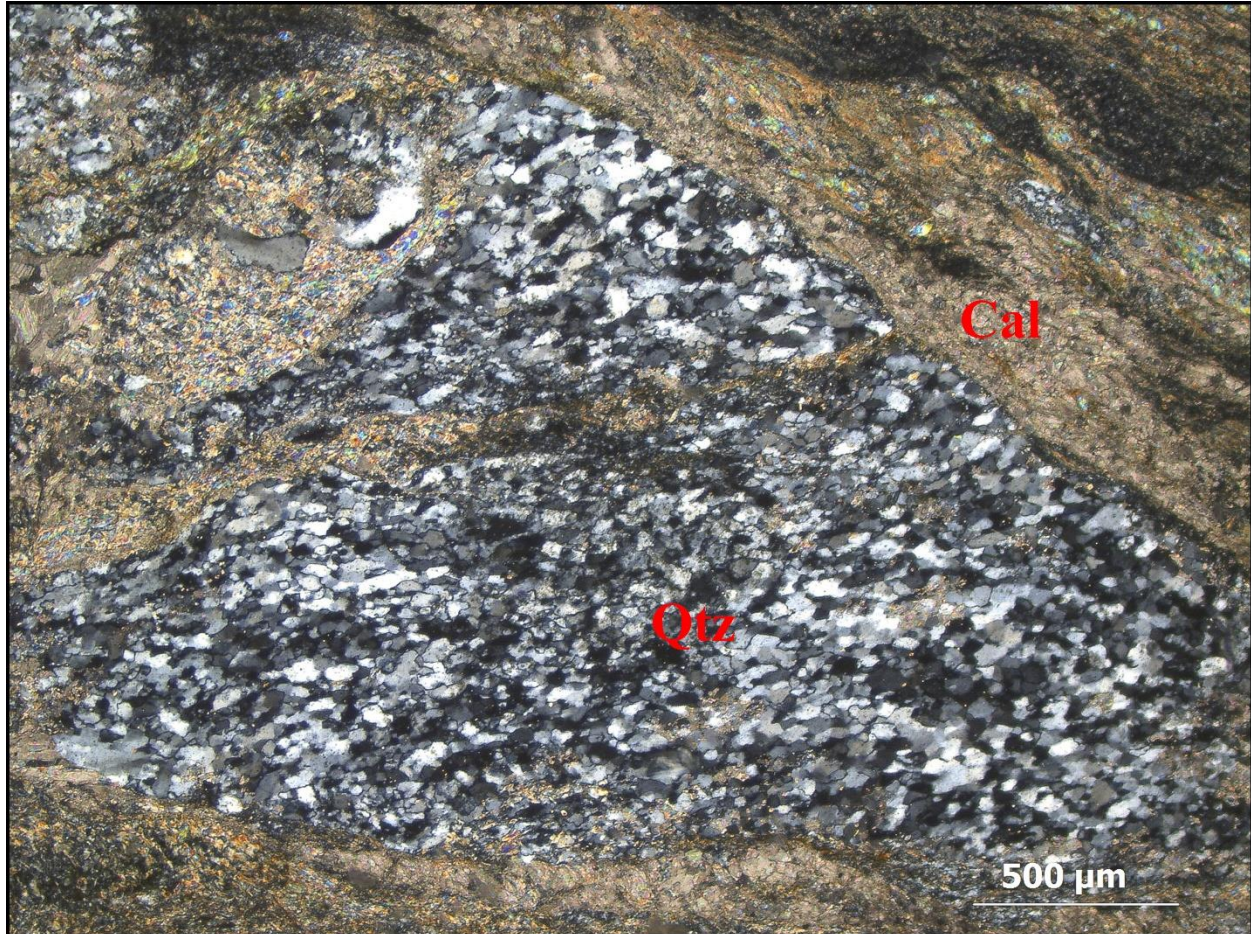
*Fotomicrografía recristalización dinámica, sección HQ-64*



*Nota. En la fotomicrografía se observa una banda de cuarzo totalmente recristalizada por rotación de subgranos. Se evidencia tamaño de grano fino y una orientación cristalográfica marcada por las líneas rojas, diferente a la banda de cuarzo anfitrión. Polarizadores cruzados, objetivo 2.5x.*

**Figura 31**

*Fotomicrografía recristalización dinámica, sección HQ-64*

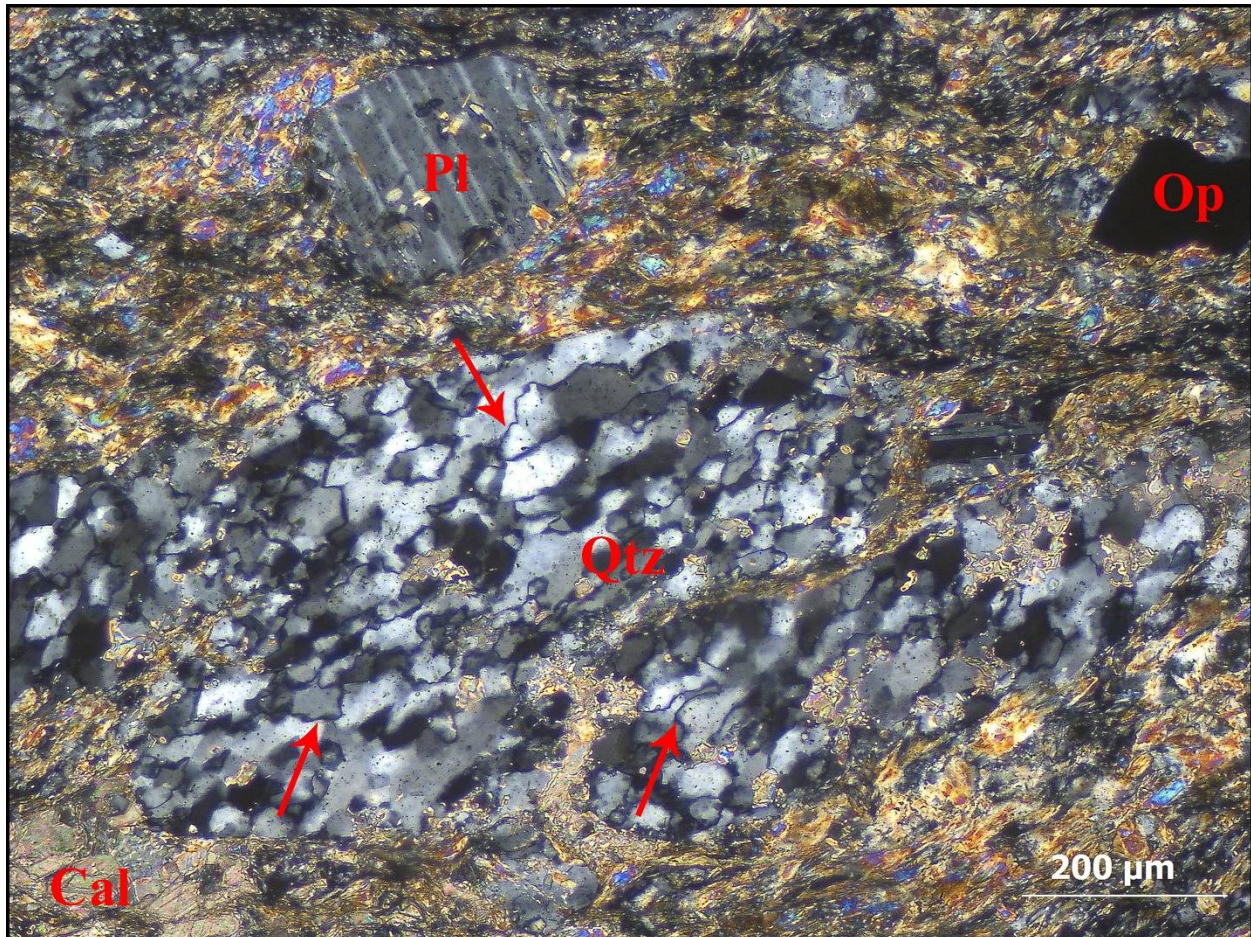


*Nota. En la fotomicrografía se observa recristalización SGR en cuarzo. Se evidencia una orientación diferente de los granos finos recristalizados con respecto al grano anfitrión.*

*Polarizadores cruzados, objetivo 4x.*

**Figura 32**

*Fotomicrografía recristalización dinámica, sección HQ-64*

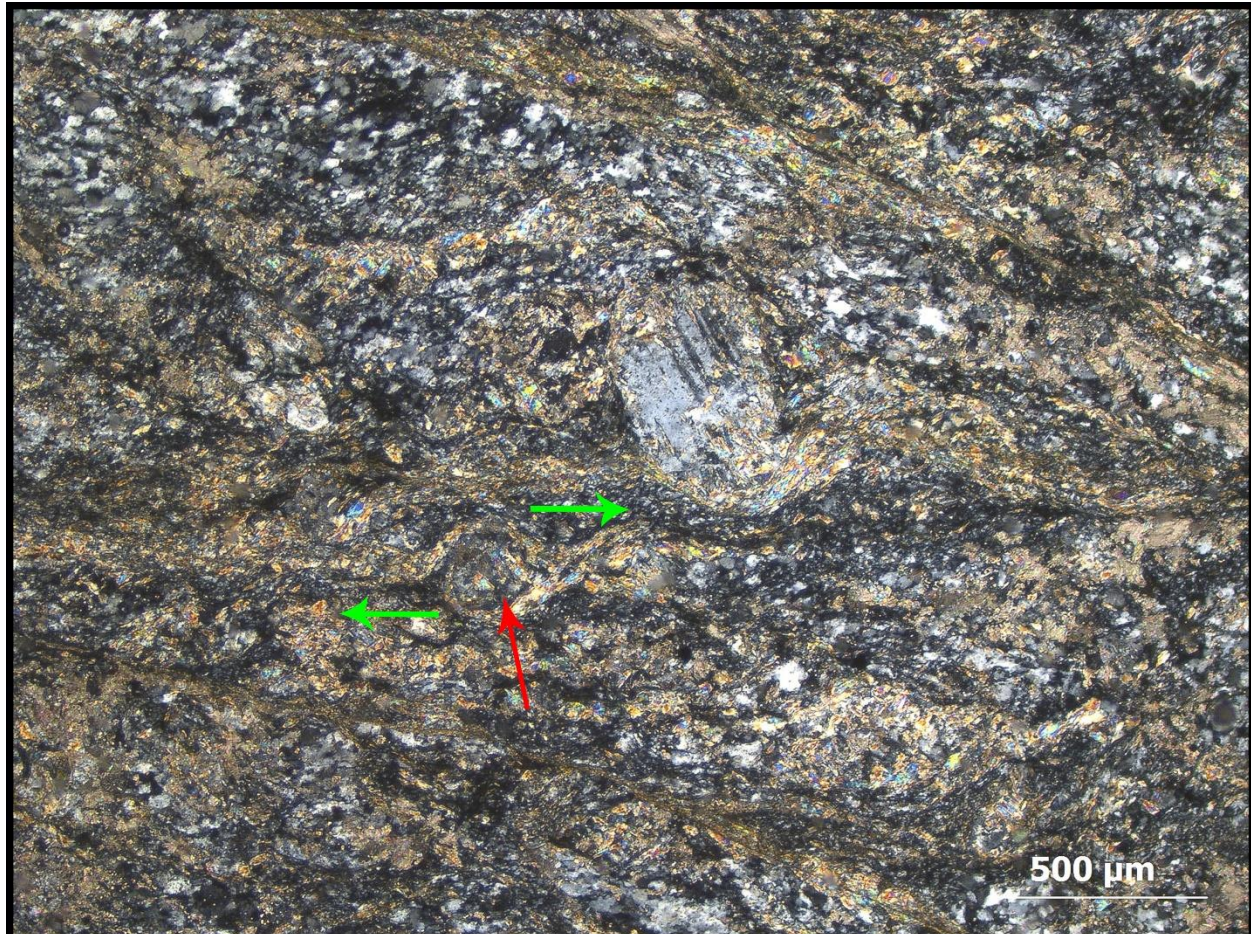


*Nota. En la fotomicrografía se muestra evidencia de recristalización BLG, la cual ocurrió primero, presentando límites lobulados de pequeña amplitud y protuberancias señalados con una flecha roja. Por otra parte, se observa cómo se han creado nuevos granos de cuarzo por rotación de subgranos que muestran una orientación cristalográfica de arriba a la derecha a abajo a la izquierda, diferente a la del grano anfitrión. Polarizadores cruzados, objetivo 10x.*

### 1.3 Indicadores del sentido de cizalla

#### Figura 33

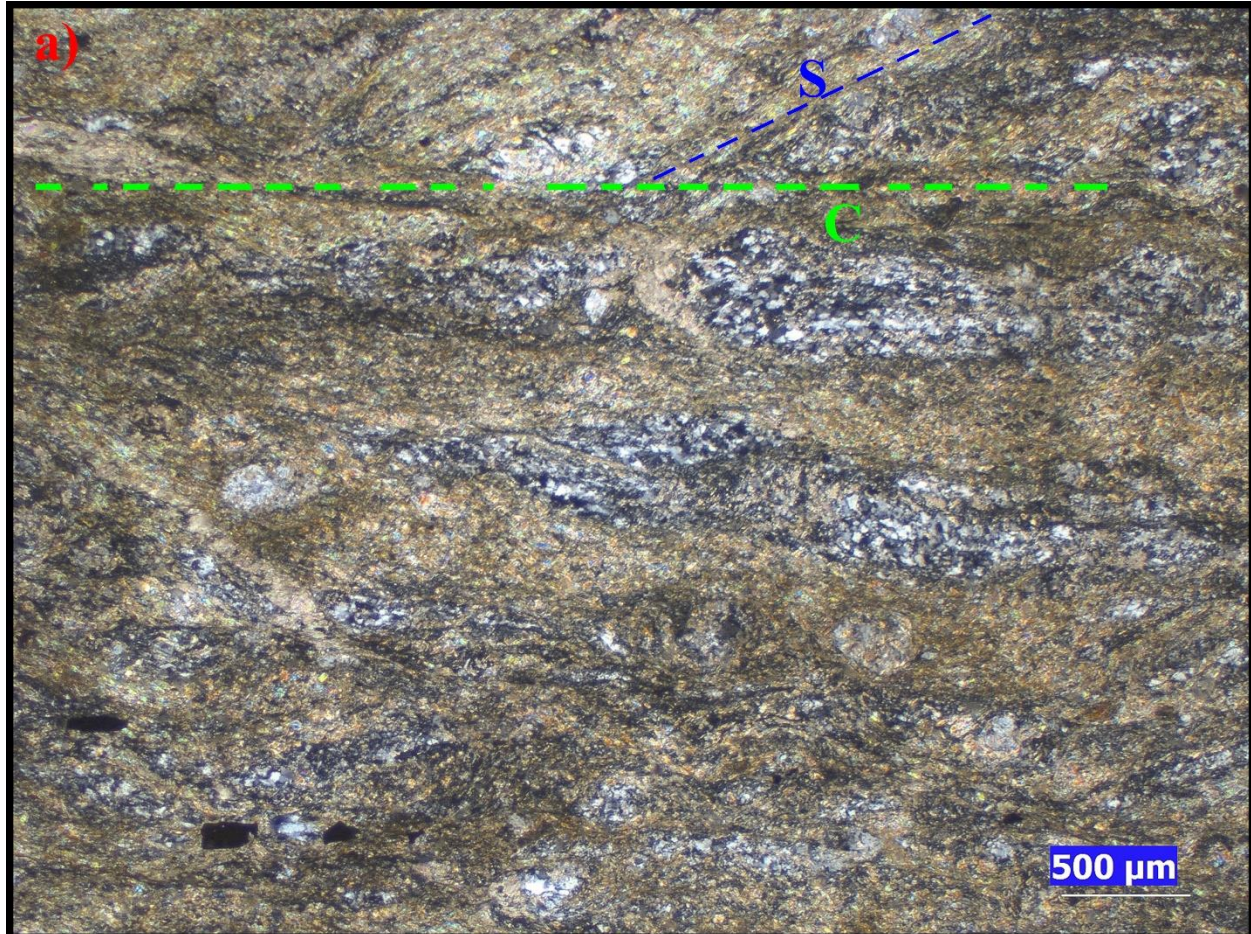
*Fotomicrografía indicadores del sentido de cizalla, sección HQ-64*



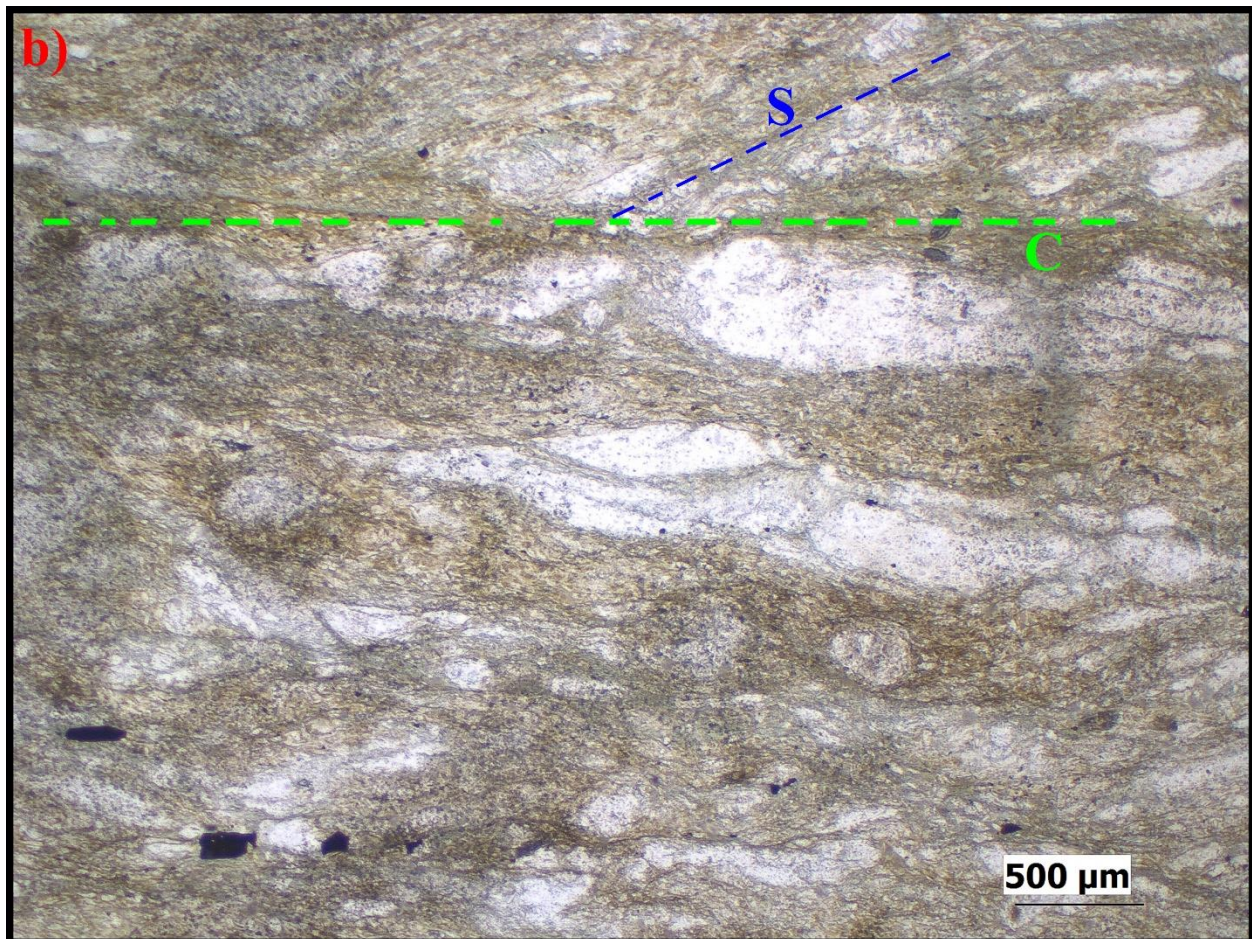
*Nota. En la fotomicrografía se señala con una flecha roja un porfiroclasto de plagioclasa con manto Tipo  $\delta$ , indicando un sentido de cizalla dextral señalado por las flechas verdes. Polarizadores cruzados, objetivo 4x.*

**Figura 34**

*Fotomicrografía bandas de cizallamiento C/S, sección HQ-64*



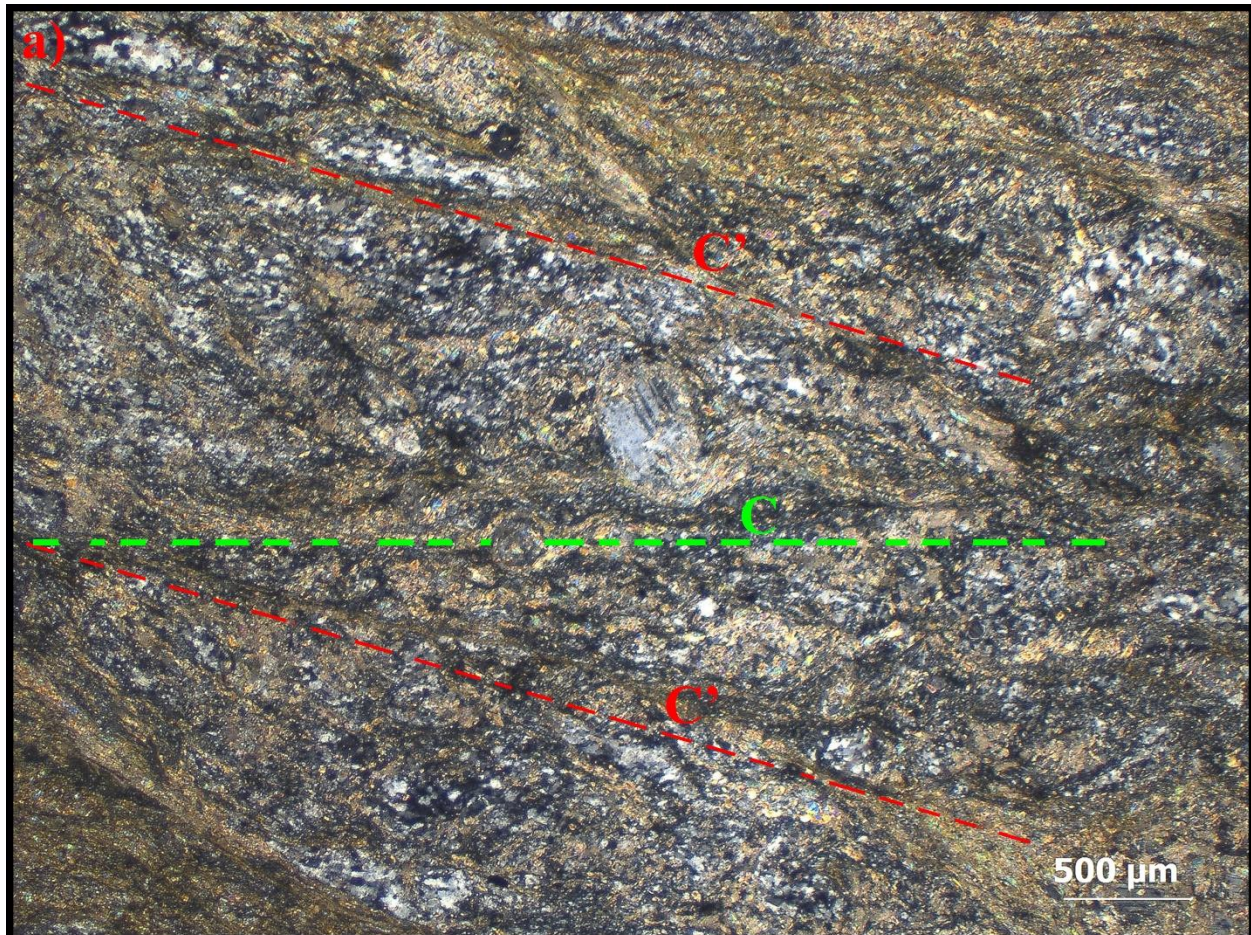
*Nota. En la fotomicrografía se observan las bandas de cizallamiento C/S, indicando un sentido de cizalla dextral. Polarizadores cruzados, objetivo 2.5x.*



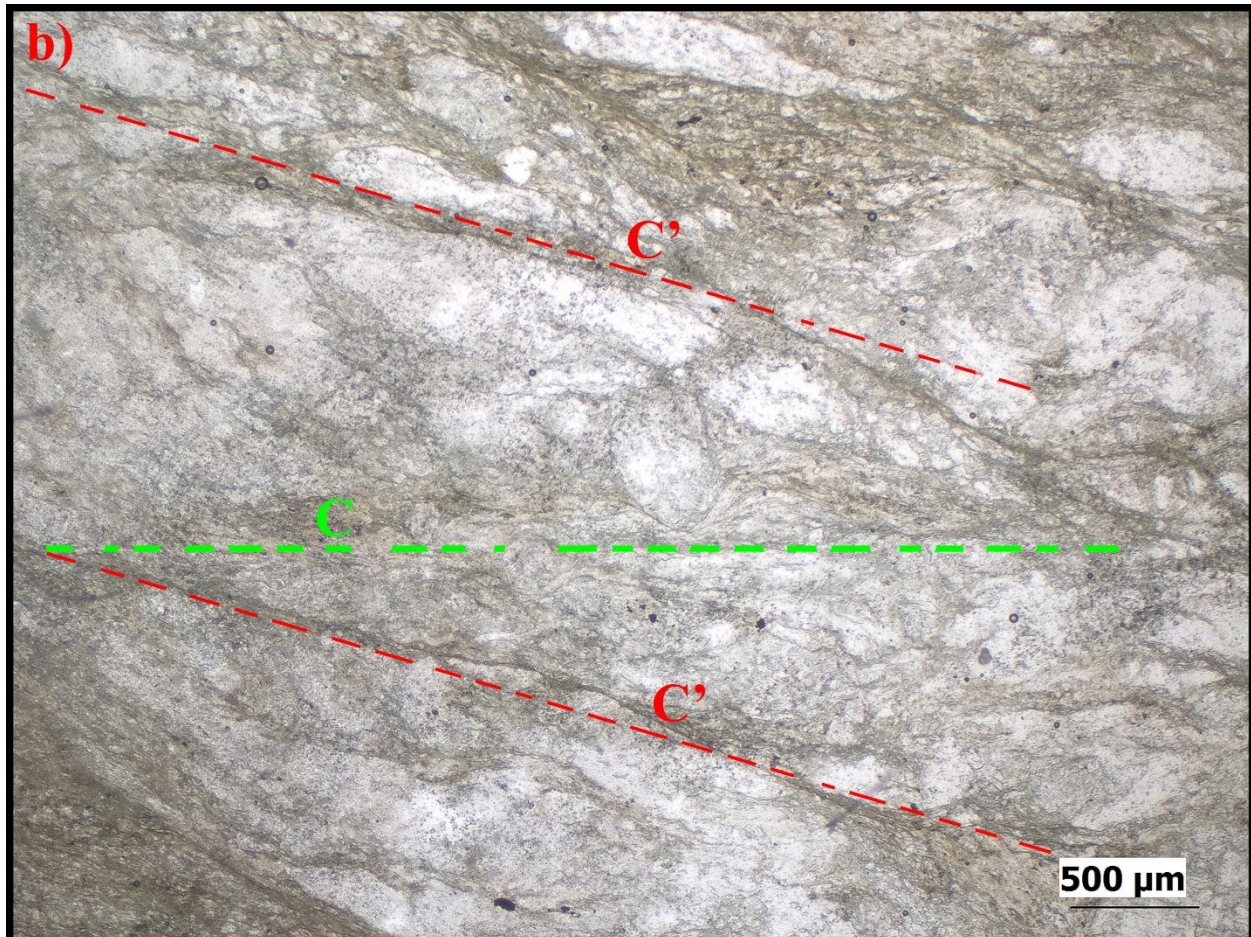
*Nota. En la fotomicrografía se observan las bandas de cizallamiento C/S, indicando un sentido de cizalla dextral. Polarizadores paralelos, objetivo 2.5x.*

**Figura 35**

*Fotomicrografías bandas de cizallamiento C y C', sección delgada HQ-64*



*Nota. En la fotomicrografía se observan bandas de cizalla tipo C' indicando un sentido de cizalla dextral. Polarizadores cruzados, objetivo 2.5x.*



*Nota. En la fotomicrografía se observan bandas de cizalla tipo C' indicando un sentido de cizalla dextral. Polarizadores paralelos, objetivo 2.5x.*

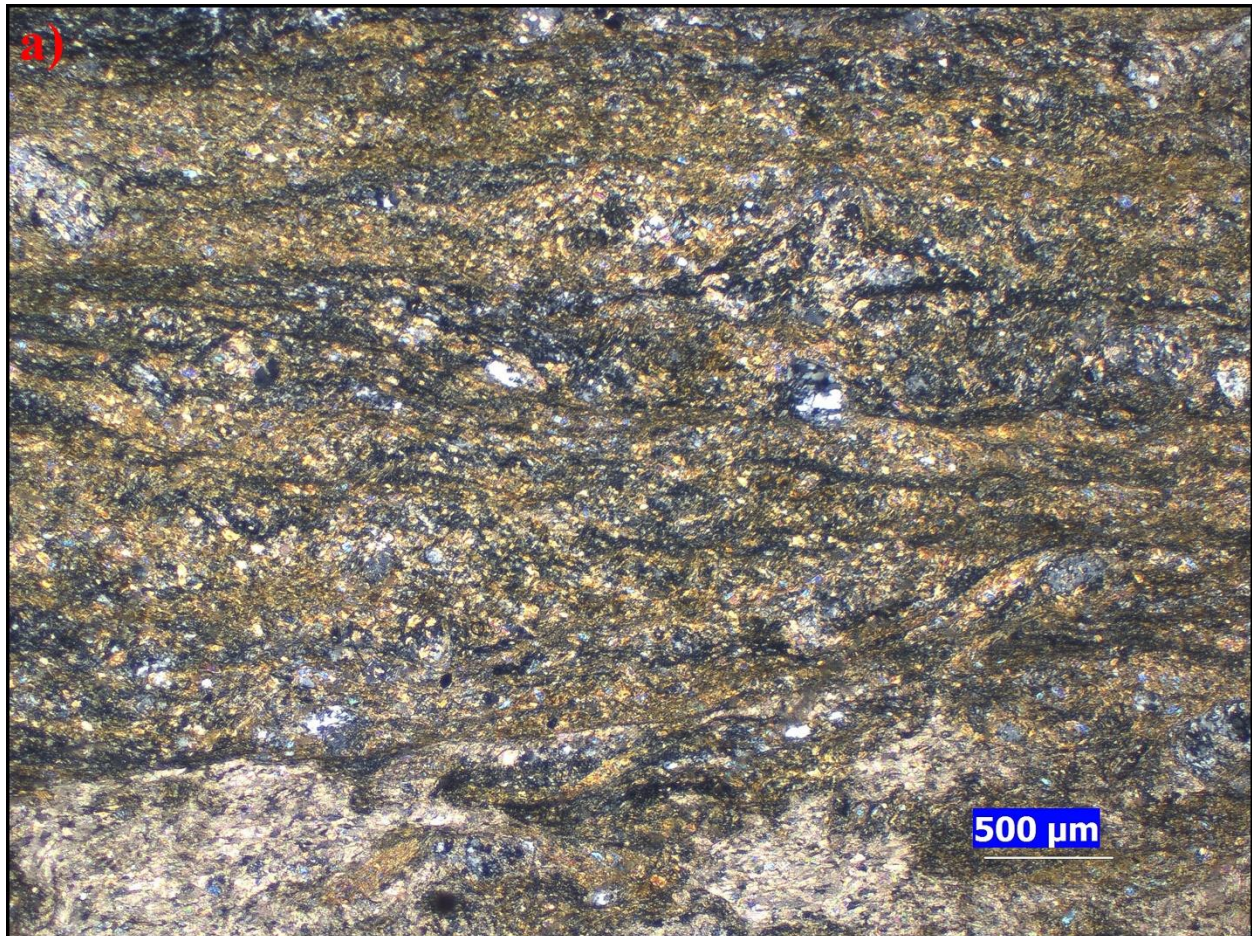
#### 1.4 Clasificación

Se realizó un conteo modal de 258 puntos, donde la proporción matriz – porfiroclastos es 258 y 73 puntos respectivamente, con unos porcentajes de: 77.95% matriz y 22.08% porfiroclastos. La roca se clasifica como una mesomilonita pues el porcentaje de matriz es mayor al 50% y menor al 90%. Las microestructuras presentes en el cuarzo como recristalización dinámica por bulging y rotación de subgranos y la presencia de cuarzo alargado deformado dúctilmente con microestructuras de recuperación, permite deducir temperaturas de deformación aproximadas

entre los 400°C y 500°C. La plagioclasa no muestra una deformación frágil, se evidencian estructuras de núcleo y manto, con recristalización dinámica BLG desde los bordes de los núcleos, indicando temperaturas de deformación de aproximadamente 450°C a 600°C. Se estima un rango de temperatura de deformación de la roca entre los 400°C y los 500°C y presiones entre los 4Kbar y los 5 Kbar. La roca se clasifica como una mesomilonita (Figura 36).

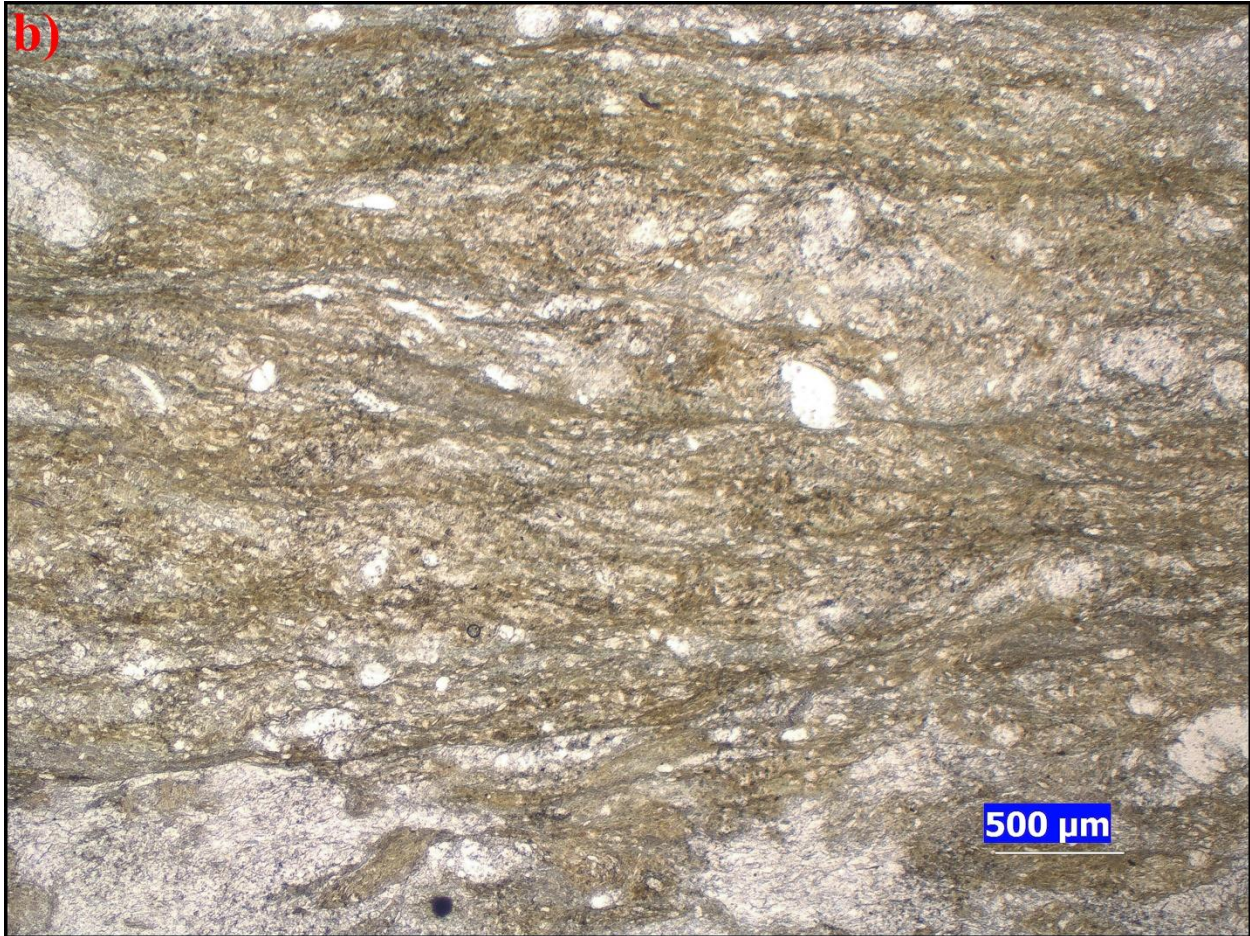
### Figura 36

*Fotomicrografías mesomilonita, sección HQ-64*



*Nota. En la fotomicrografía se observa la textura mesomilonítica general de la sección HQ-64.*

*Polarizadores cruzados, objetivo 2.5x.*



*Nota. En la fotomicrografía se observa la textura mesomilonitica general de la sección HQ-64.*

*Polarizadores paralelos, objetivo 2.5x.*

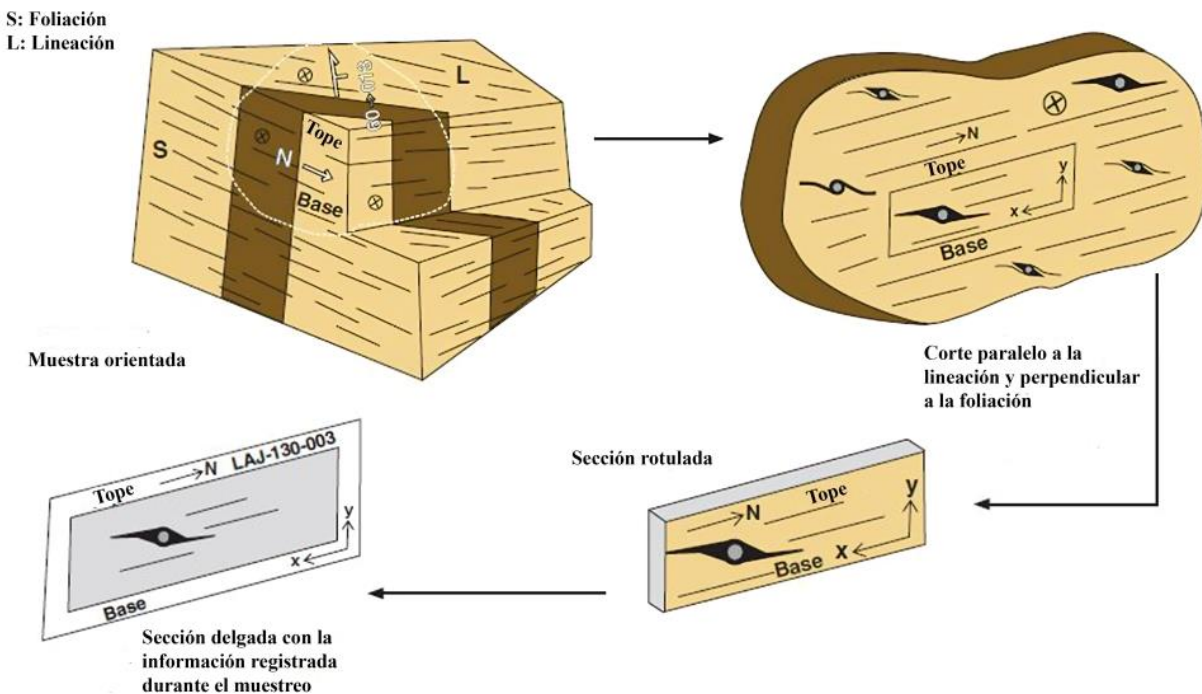
#### **4.1 Conducto de ingreso para nuevas muestras**

Para el ingreso de nuevas muestras a la colección se debe seguir el siguiente conducto: 1) Se debe diligenciar el formato “CARTA DE SOLICITUD DE SERVICIO DE PREPARACIÓN DE MUESTRAS” la cual se encuentra en la página web institucional de la escuela de geología: <http://geologia.uis.edu.co/eisi/> en la sección Comunicación/Documentos de interés. La carta debe ser remitida vía correo electrónico al director de escuela. 2) Se debe diligenciar el documento “FORMATO SOLICITUD DE SERVICIO PREPARACIÓN DE MUESTRAS” el cual se

encuentra en la página web institucional de la Escuela de Geología, en la sección Comunicación/Documentos de interés. Para diligenciar el formato se requiere la siguiente información: rumbo, buzamiento, base, tope, coordenadas y ubicación geográfica; la muestra debe estar orientada marcando el norte geográfico y en la sección de observaciones del formato se debe especificar que el corte para la elaboración de la sección delgada debe realizarse paralelo a la lineaciones de estiramiento y perpendicular a la foliación milonítica, esto con el fin de mostrar la mayor deformación, geometría y dirección del movimiento indicada por los indicadores de cizalla (Figura 37) (Forero et al, 2021).

### Figura 37

*Representación esquemática del conducto a seguir para ingreso de nuevas muestras*



*Nota. En la figura se representa un esquema del conducto a seguir para el ingreso de nuevas muestras a la colección de sección delgada de metamorfismo dinámico. Tomada y modificada de*

*Geological – structural mapping and geochronology of shear zones: A methodological proposal (p. 91), por A.J. Forero et al, 2021, Boletín Geológico.*

EL formato diligenciado se debe imprimir y entregar al técnico encargado junto la muestra y se debe enviar por vía e-mail al correo electrónico: [secregeo@uis.edu.co](mailto:secregeo@uis.edu.co). 3) Una vez recibida la sección delgada, se debe realizar el análisis petrográfico y toma de fotomicrografías, identificando y describiendo mineralogía y mecanismos de deformación frágiles y dúctiles, la información debe ser registrada siguiendo el formato del Catálogo Mecanismos de Deformación y Microestructuras Asociadas (Apéndice A) y Catálogo de Inventario (Apéndice B). El análisis petrográfico se realizará en el laboratorio de petrografía de la Escuela de Geología siguiendo lo estipulado en el “Manual de Buenas Practicas de Laboratorios y Litoteca” y en “Protocolo de Bioseguridad Laboratorio de Petrografía”, estos documentos se encuentran en la página web institucional de la Escuela de Geología, en la sección Comunicación/Documentos de interés.

Para solicitar el préstamo de la colección o de alguna sección delgada perteneciente a la colección se debe realizar y enviar una carta vía correo electrónico dirigida al director de escuela con copia al técnico encargado del laboratorio de petrografía; la carta de estar firmada por el director del trabajo ya sea trabajo de campo, trabajo de grado a nivel de pregrado o posgrado, o trabajo de investigación de alguna asignatura que lo requiera. En la carta se debe especificar los motivos y el tipo de trabajo que se realizara con las secciones delgadas, lugar de trabajo, se debe hacer un inventario de las secciones delgadas solicitadas y prestadas, así como el tiempo de préstamo. Las secciones delgadas deben ser entregadas y recibidas por el técnico encargado del laboratorio de petrografía.

## 5. Recomendaciones

Se recomienda que las secciones delgadas que ingresen a la colección deben ser rotuladas con la información del muestreo de campo, es decir, rumbo, buzamiento, norte geográfico, base, tope, ejes de coordenadas y un código el cual debe seguir el formato de las demás secciones delgadas pertenecientes a la colección registradas en el Catálogo Mecanismos de deformación y Microestructuras Asociadas (Apéndice A) y Catálogo de Inventario (Apéndice B).

**Referencias Bibliográficas**

- Blenkinsop, T. (2002). *Deformation Microstructures and Mechanisms in Minerals and Rocks*. Kluwer Academic Publishers.
- Burkhard, M. (1993). Calcite twins, their geometry, appearance, and significance as stress-strain markers and indicators of tectonic regime: a review. *Journal of Structural Geology*.
- Burg, J. P. (2018). *Script to Structural Geology*. ETH Zurich. <https://doi.org/10.3929/ethz-b-000279493>
- Faleiros, F. M., Campanha, G. A. C., Bello, R. M. S., & Fuzikawa, K. (2010). Quartz recrystallization regimes, c-axis texture transitions and fluid inclusion reequilibration in a prograde greenschist to amphibolite facies mylonite zone (Ribeira Shear Zone, SE Brazil). *Tectonophysics*.
- Ferril, D., Morris, A., Evans, M., Burkhard, M., Groshong, R., Onasch, C. (2004). Calcite twin morphology: A low-temperature deformation geothermometer. *Journal of structural geology*. Acta 26.
- Forero, A.J., López, J.A., López, N.R., Cuellar, M.A., Cetina, L.M., Aguirre, L.M. (2021). Geological – structural mapping and geochronology of shear zones: A methodological proposal. *Boletín de Geología*.
- Fossen, H. (2016). *Structural Geology*. Cambridge University Press.
- García, C.A. (2022). *Fundamentos de Petrología Metamórfica*. Ediciones UIS.

Hirth, G., Tullis, J. (1992). Dislocation creep regimes in quartz aggregates. *Journal of Structural Geology*. Volume 14.

Hobbs, B., & Ord, A. (2015). *Structural geology: The mechanics of deforming metamorphic rocks*. Volume 1: principles. Elsevier.

Myron, G. (2003). *Igneous and metamorphic petrology*. (2da ed.). Blackwell.

Passchier, C., & Throw, R. (2005). *Microtectonics*. (2da ed.). Springer.

Snoke, A.W., Tullis, J., Todd, V.R. *Fault – Related Rocks*. (1998). Princeton University Press.

Song, S., & Cao, Y. (2021). *Encyclopedia of geology*. (2da Ed). Vol. 2. Elsevier.

Trouw, R.A.J., Passchier, C.W., Wiersma, D.J. (2010). *Atlas of Mylonites – and Related Microstructures*. Springer.

Vernon, R. (2004). *A practical guide to rock microstructure*. Cambridge University Press.