

# **Alteración hidrotermal**

**Para Ing. de Minas**

# Alteración hidrotermal

Proceso metasomático o respuesta mineralógica, textural y química de las rocas al cambio físico-químico que acontece en presencia de agua, vapor y gases calientes.

## Cambios

- 1) Transformación / reemplazo de fases minerales pre-existentes
- 2) Lixiviación / disolución de fases minerales y vidrio
- 3) Crecimiento o precipitación de nuevos minerales
- 4) Reacciones de intercambio iónico (cambio de base) entre los minerales (+/- vidrio) de la roca y el fluido caliente

## Factores que controlan a la alteración hidrotermal

- a) **Temperatura** de fluido y  $\Delta T$  entre roca y fluido
- b) **pH del fluido**: mientras más ácido, mayor efecto.
- c) **Permeabilidad** de la roca: primaria o secundaria (fracturamiento hidráulico o disolución).
- d) **Duración** de la interacción agua/roca y relación de volumen de agua/roca.
- e) **Composición** de la roca. Independiente del tipo de roca original si la alteración es intensa.
- f) **Presión**: control de profundidad de ebullición de fluidos, fracturamiento hidráulico (generación de brechas hidrotermales y explosiones hidrotermales).

## Los más importantes

### 1) Fluido:

- **Temperatura (!!)**
- **Composición – pH (!!)**

### 2) Roca:

- **Permeabilidad (!)**

Ej: la asociación propilítica (chl, cc, ep, py, ill, ab) se forma a partir de fluidos de pH ~neutro y calientes (250-280° C). Se ha observado afectando tanto a basaltos, andesitas, riolitas, como a sedimentitas de distinta naturaleza.

## Suceptibilidad a la alteración (reactividad)

Vidrio volcánico >> minerales

Ol > Mag > Opx > Hbl > Bt = Pl

**Qtz** generalmente **resistente** a la alteración y recristalización hasta 300°C

### Mineral Original

Vidrio Volcánico

Magnetita/ilmenita

Px / Anf / Ol / Cc / Bt

Plagioclasa cálcica, biotita

Ortoclasa/sanidina

### Productos de reemplazo hidrotermal

Zeolitas (Ej. mordenita, laumontita), cristobalita, cuarzo, calcita, arcillas (Ej. Montmorillonita, illita)

Pirita, leucoxeno, esfena, pirrotina, hematita

Clorita, illita, biotita, cuarzo, pirita, anhidrita

Calcita, albita, adularia, wairakita, cuarzo, anhidrita, clorita, illita, caolín, montmorillonita, epidota, siderita

Adularia

# Cambios en las propiedades físicas de las rocas

- **densidad:** aumento o disminución
- **porosidad, permeabilidad:** aumenta con disolución y brechamiento, disminuye con precipitación y sellamiento
- **susceptibilidad magnética:** aumenta con Mag 2º o disminuye con la lixiviación de mag primaria
- **resistividad:** usualmente decrece, es mayor si hay silicificación

# Cambios en la composición química

<u>Elemento</u>	<u>Cambio</u>	<u>Mineral hidrotermal en el que se incorpora</u>
SiO <sub>2</sub>	Agregado	Cuarzo, cristobalita, tridimita, silicatos
TiO <sub>2</sub>	No cambia	Esfena, leucoxeno
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Agregado y removido	Muchos silicatos, algunos óxidos.
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , FeO	Agregado y removido	Clorita, pirita, pirrotina, siderita, epidota, hem
MnO	No cambia grlte	rodocrosita, rodonita, bustamita
MgO	Removido	Clorita, biotita
CaO	Agregado y removido	Calcita, wairakita, epidota, prehnita, anhidrit, montmorillonita, esfena, fluorita, zeolitas
Na <sub>2</sub> O	Agregado y removido	Albita
K <sub>2</sub> O	Agregado	Adularia, illita, alunita, biotita
CO <sub>2</sub>	Agregado	Calcita, siderita, rodocrosita
S, SO <sub>3</sub>	Agregado	Anhidrita, alunita, pirita, pirrotina, baritina
H <sub>2</sub> O	Agregado	Arcillas, epid., prehn., zeol., diasp., pirof, anf
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	No cambia o agregado	Apatita, APS

# Hidrólisis o Metasomatismo de $H^+$

Controla la estabilidad de feldespatos, micas y arcillas

$K^+$ ,  $Na^+$  y  $Ca^{++}$  y otros cationes se transfieren desde los minerales a la solución hidrotermal

$H^+$  se incorpora en las fase sólidas remanentes

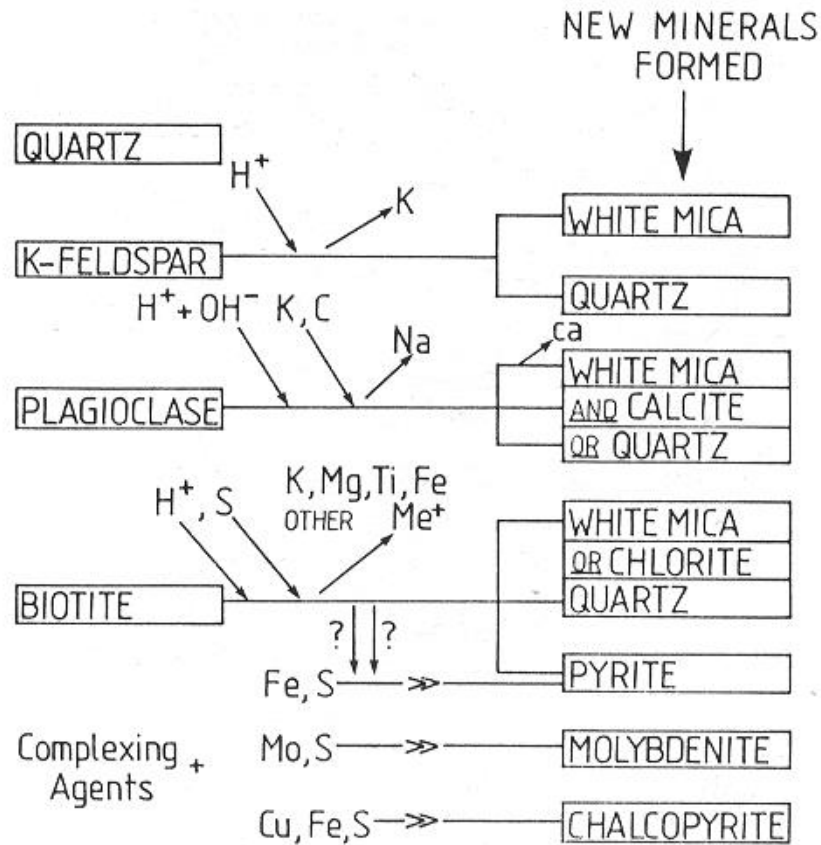
Empobrecimiento de  $H^+$  en el fluido → aumento del pH

- a) Neutralización escalonada de fluidos ácidos
- b) Zonación mineral en torno a conductos



# Hidrólisis o Metasomatismo de $H^+$

## Sericitización



Alteración de plagioclasa → sericita → arcillas → cuarzo

andesina

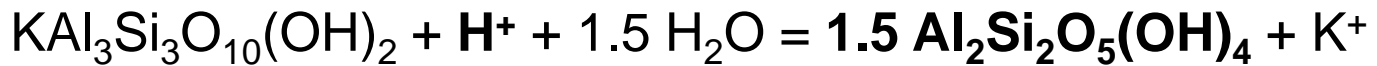
sericita (Musill)

cuarzo



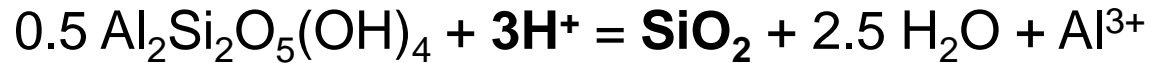
sericita (mica potásica)

caolinita



caolinita

cuarzo residual (vuggy SiO<sub>2</sub>)



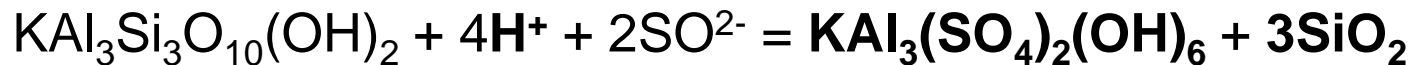
## Otros ejemplos

sericita

ácido sulfúrico

alunita

cuarzo



sericita

pirofilita

cuarzo



## **Clasificación de la alteración hidrotermal**

a) Por el mineral de alteración más abundante

Ej.: silicificación, sericitización, cloritización, etc

b) Por los cambios químicos ocurridos

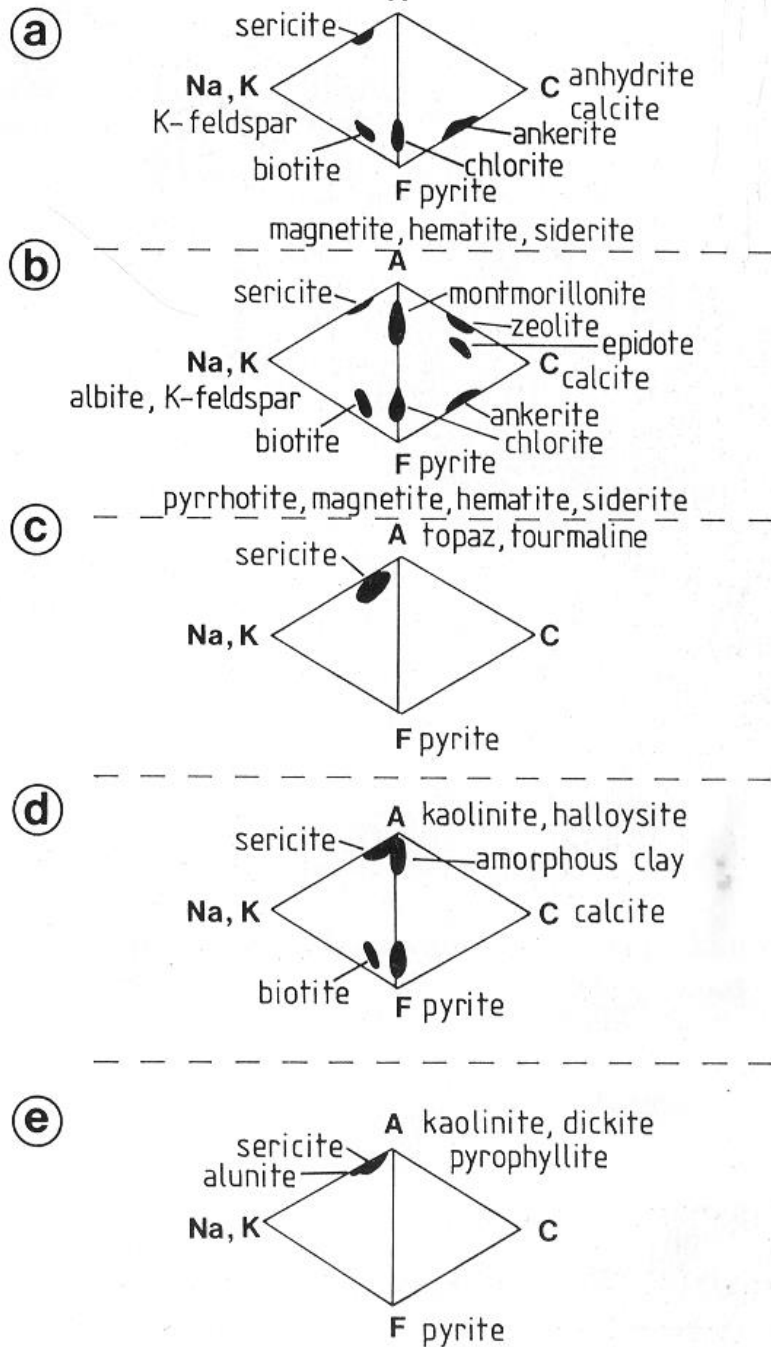
Ej.: metasomatismo de H, metasomatismo de K, etc

c) Por la **asociación de minerales** de alteración presentes (!)

# Asociación de minerales de alteración

- Refleja las condiciones de P-T, composición del fluido, mineralogía original de la roca y tiempo para alcanzar el equilibrio entre fluido y roca
- Requiere de estudio textural y mineralógico detallado
- Variedad de términos (uniformizado por Lowell y Gilbert, 1970)

Ej.: propilítica, potásica, fílica/sericítica, argílica intermedia, argílica avanzada



a) Asociación potásica

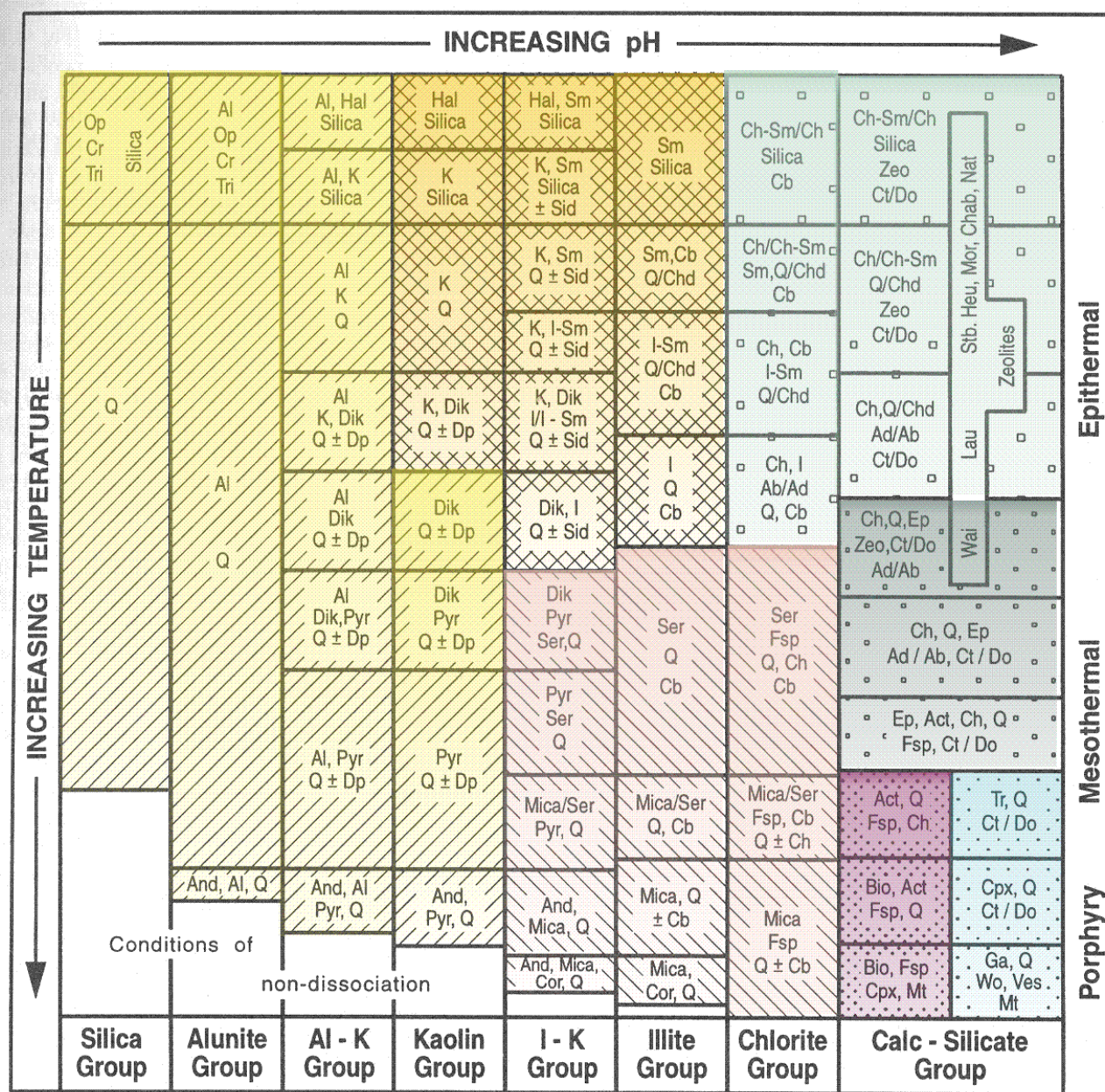
b) Asociación propilítica

c) Asociación cuarzo-sericítica o fílica

d) Asociación argílica intermedia

e) Asociación argílica avanzada

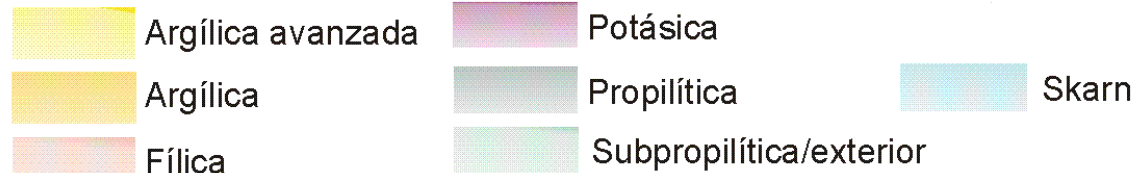
c/u implica un grado mayor de hidrólisis que las anteriores



Corbett

y

Leach (1998)



## Términos que denotan intensidad de la alteración

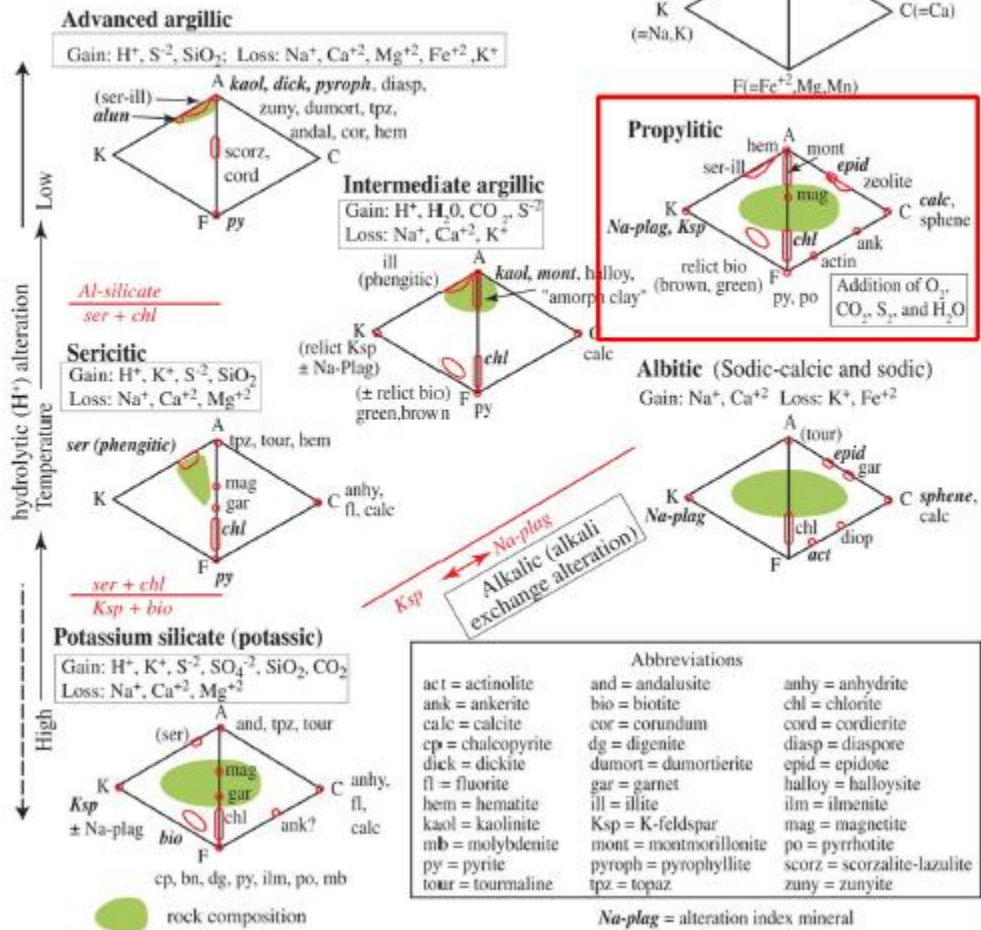
**Pervasividad:** todos los minerales originales fueron alcanzados por la alteración, de manera que ésta se puede considerar penetrativa.

**Pervasividad selectiva:** algunos minerales son alterados totalmente pero de manera preferencial, mientras que otros exhiben distintos grados de modificación o están inalterados (metaestables).

# Alteración (sub)propilítica

## chl – ep – ab – CO<sub>3</sub><sup>-2</sup> – mnt – py ± zeo

AKF-ACF Diagrams: Hydrothermal Alteration  
Mineral Assemblages and Associations for Granites



Estadios de T<sup>o</sup> alta e intermedia  
~300 – 200<sup>o</sup> C pero chl, chl+mnt,  
chlo-zeo puede aparecer hasta  
<150 °C.

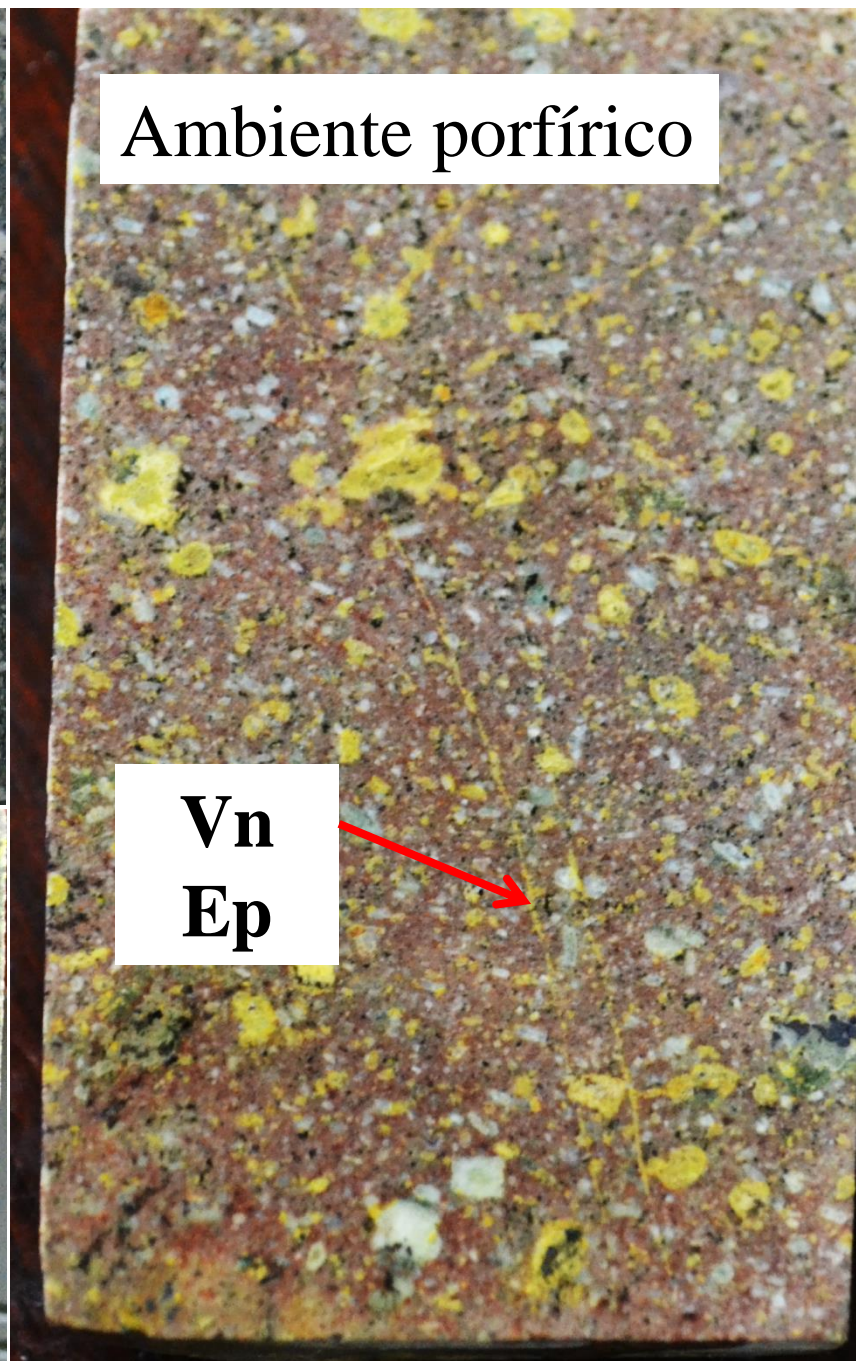
Fluidos de pH neutro producen  
limitada hidrólisis de plagioclasa y  
feldespatos alcalinos o vidrio.  
Minerales Fe-Mg pasan a chl-ttn-  
hem y plagioclasa se saussuritiza  
(ab-ep-ser-cc)

Hacia sectores distales chl-zeo,  
difíciles de diferenciar en  
basamento metamórfico de muy  
baja T<sup>o</sup> (e.g., Puna)

No siempre se encuentra



# Aspecto macroscópico

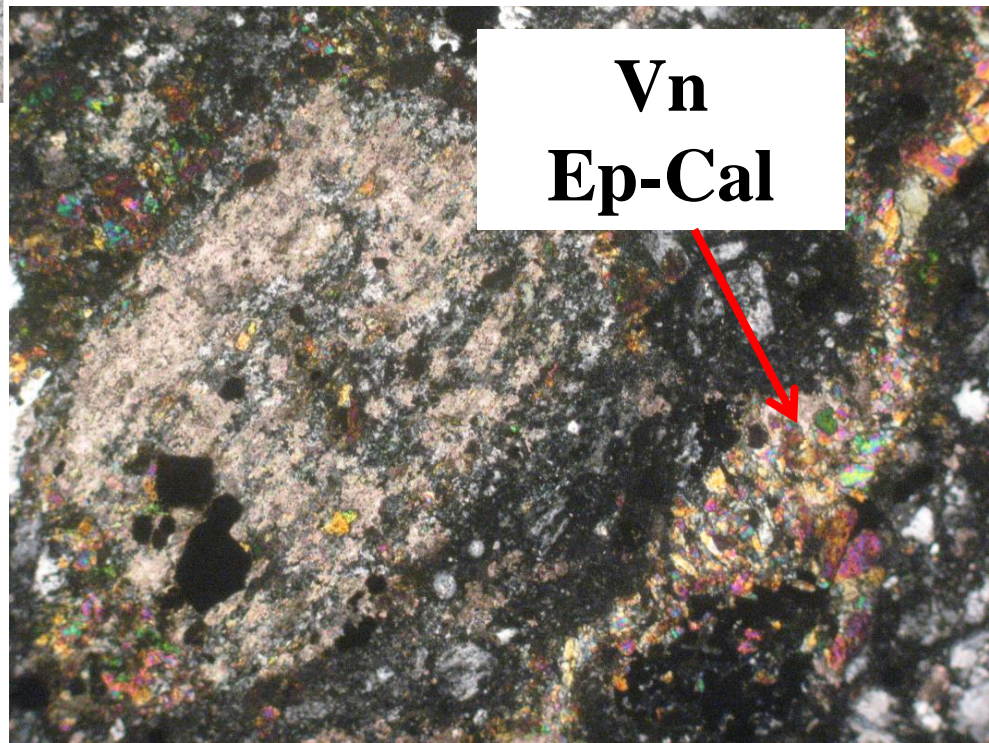
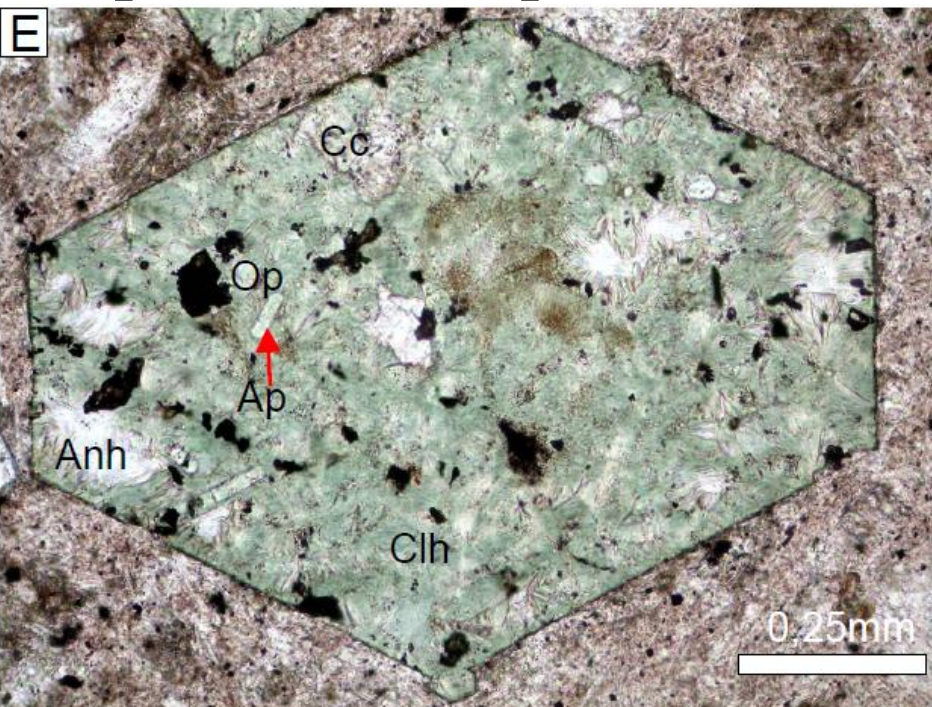


Ambiente porfírico

Vn  
Ep

Ep  
Chl

# Aspecto microscópico





**Alteración propilítica**

Ambiente epitermal



# Alteración propilítica



# Alteración propilítica



# Alteración Potásica

## Ad – qtz – ser – bt

### ± CO<sub>3</sub><sup>-2</sup> (sid/rdh/cc)

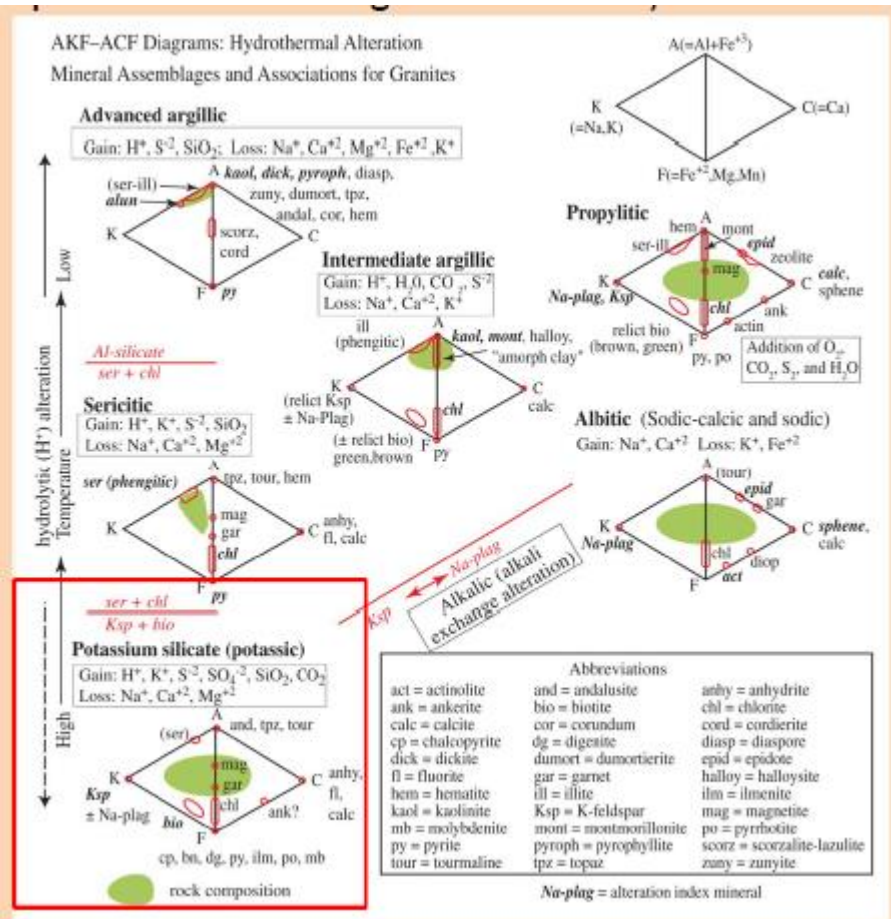
Estadios tempranos de Alta T<sup>o</sup>  
 ~350-250 °C. En ambiente porfírico puede ser >500°C

Fluidos neutros producen metasomatismo alcalino de plagioclasa e incluso pueden reemplazar vidrio rico en K

Baja T: Adularia en cristales típicamente esqueléticos u oquerosos. Biotita magmática se mantiene estable mientras que biotita hidrotermal raramente se forma en este ambiente

Alta T: Ortosa y biotita secundarias

Pueden acompañar carbonatos y ser o chl (baja T), anhidrita y magnetita (alta T)



**Aspecto macroscópico (feldespato potásico en la matriz de la roca y magnetita reemplazando a mafitos)**

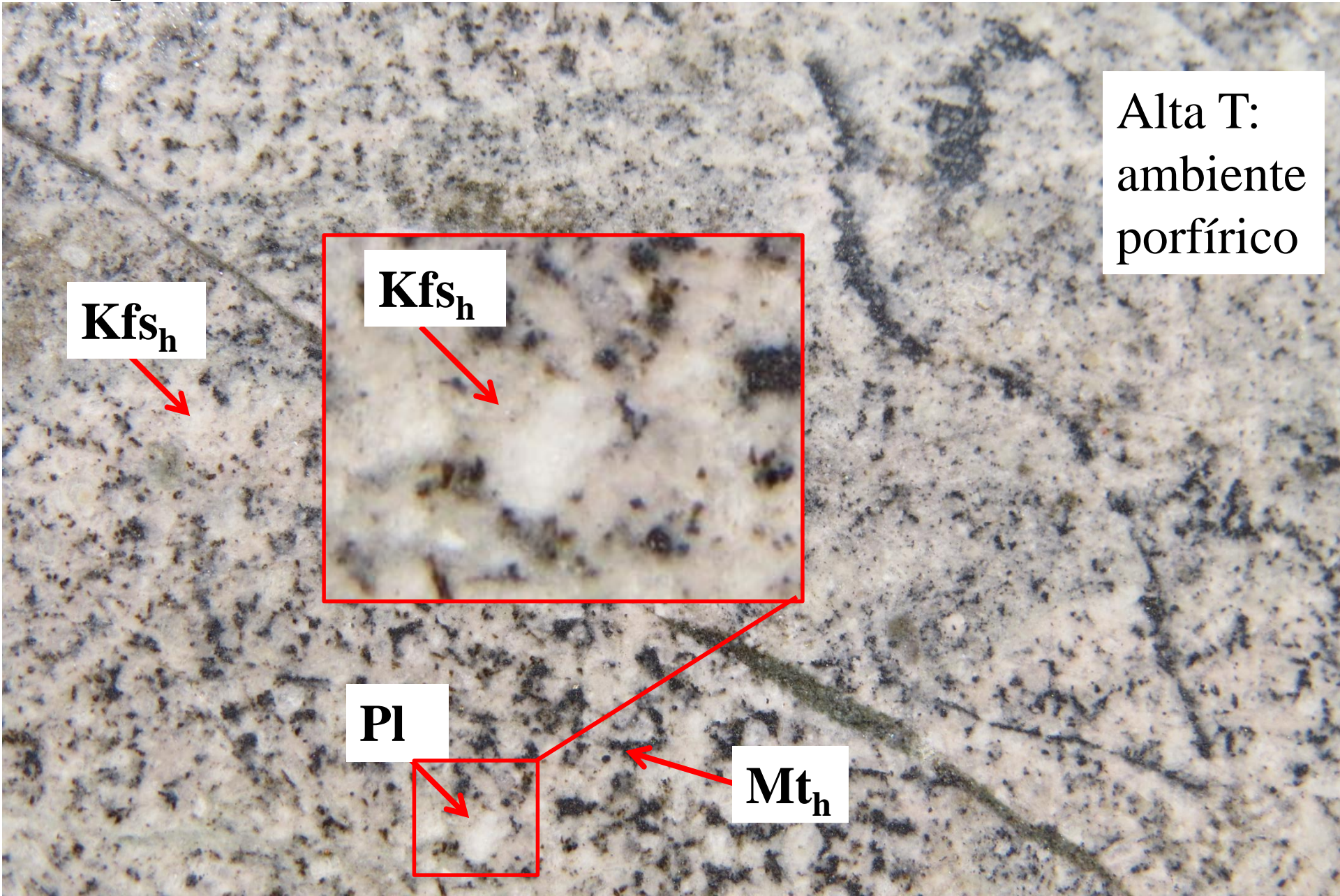
Alta T:  
ambiente  
porfírico

**Kfs<sub>h</sub>**

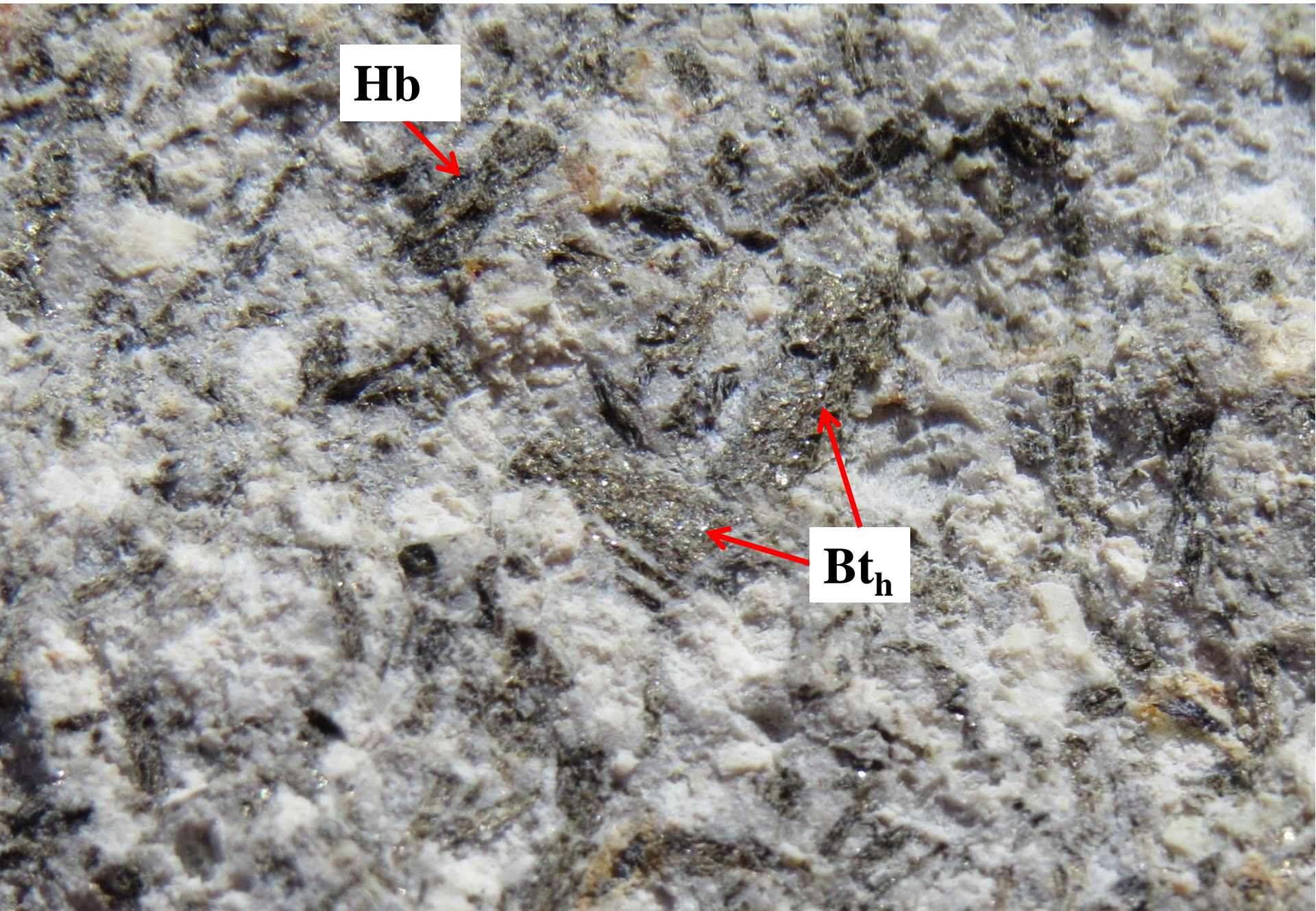
**Kfs<sub>h</sub>**

**Pl**

**Mt<sub>h</sub>**

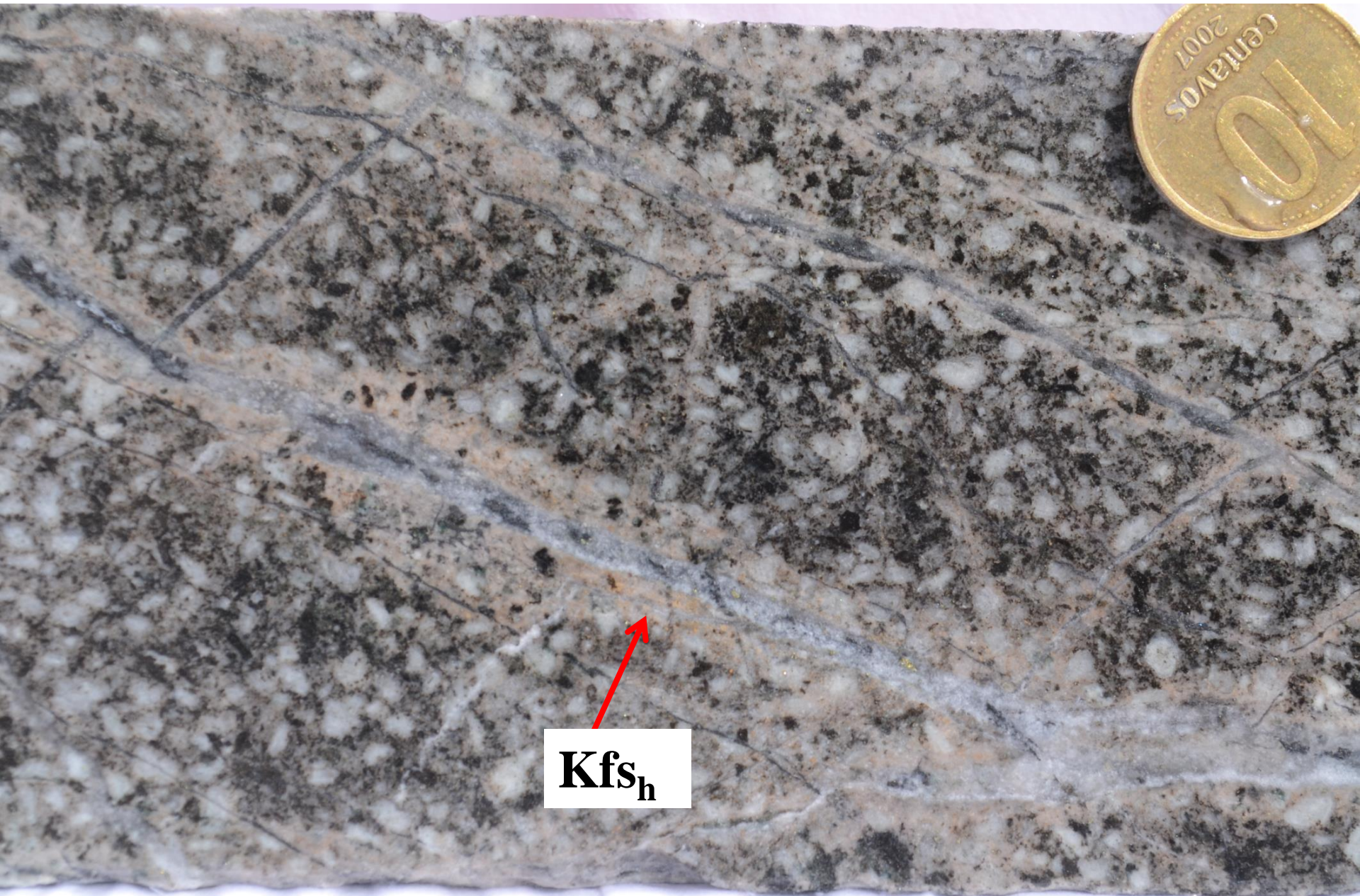


# Aspecto macroscópico (hornblenda reemplazada por biotita hidrotermal)





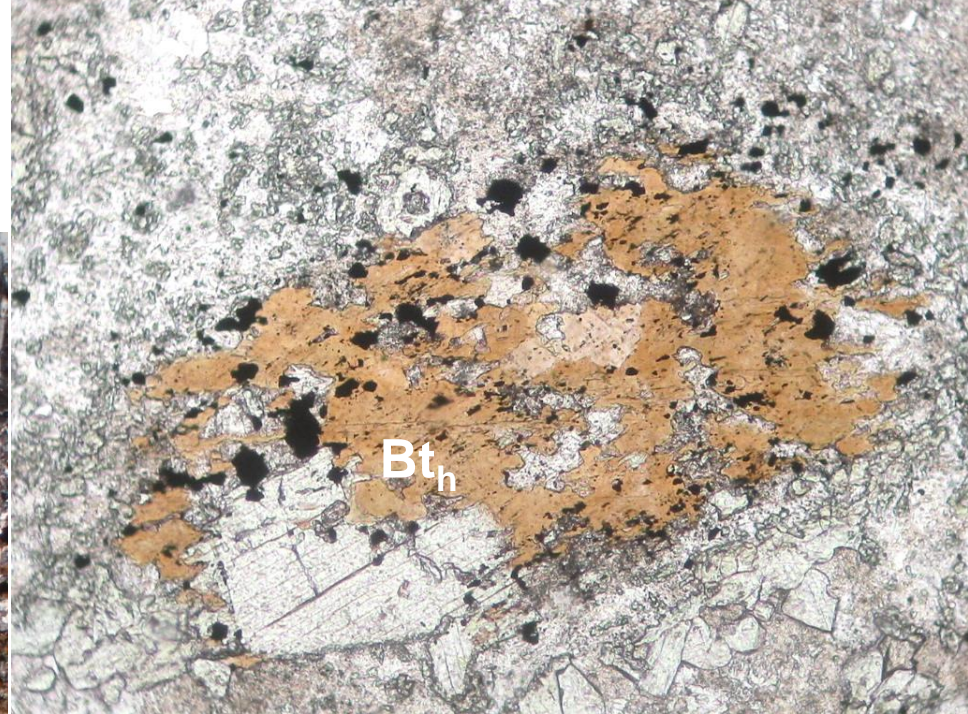
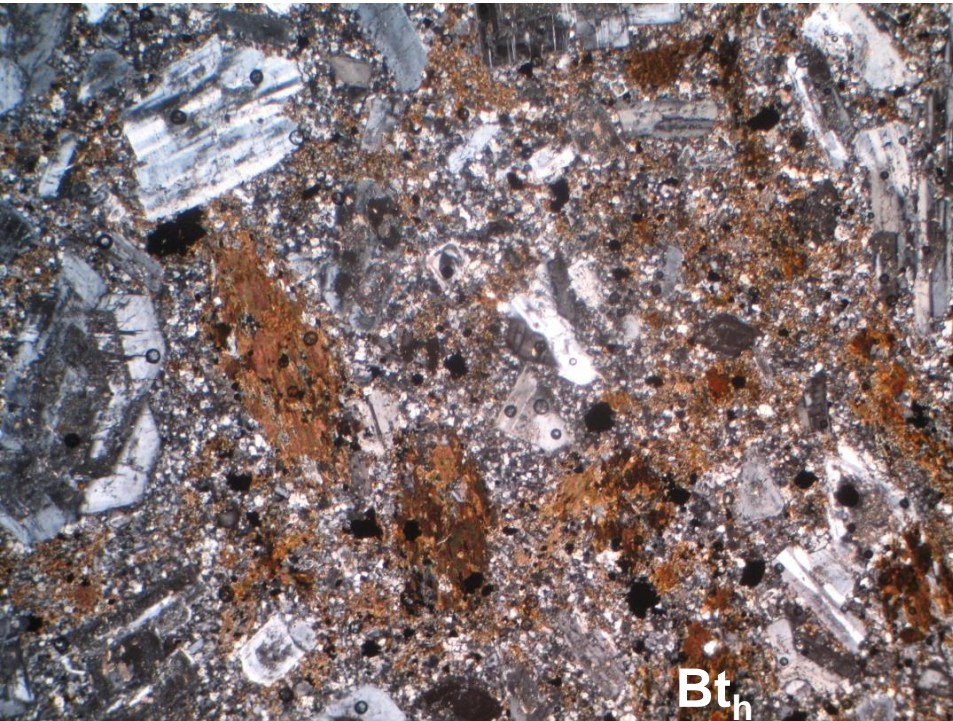
# Venillas con halo de alteración de feldespato potásico



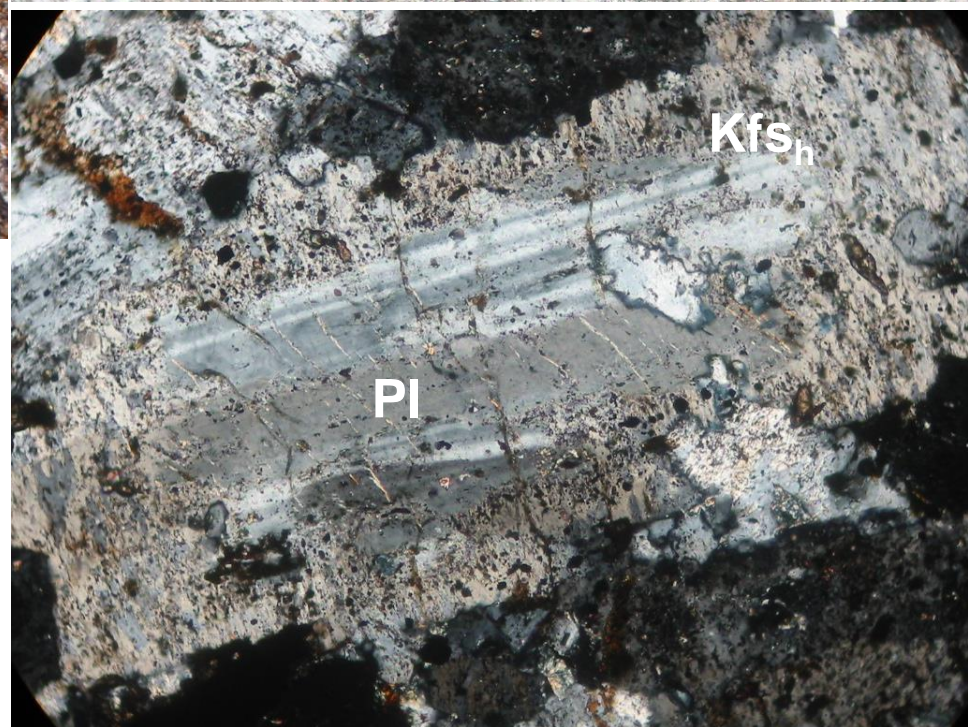
$Kfs_h$

## Aspecto microscópico

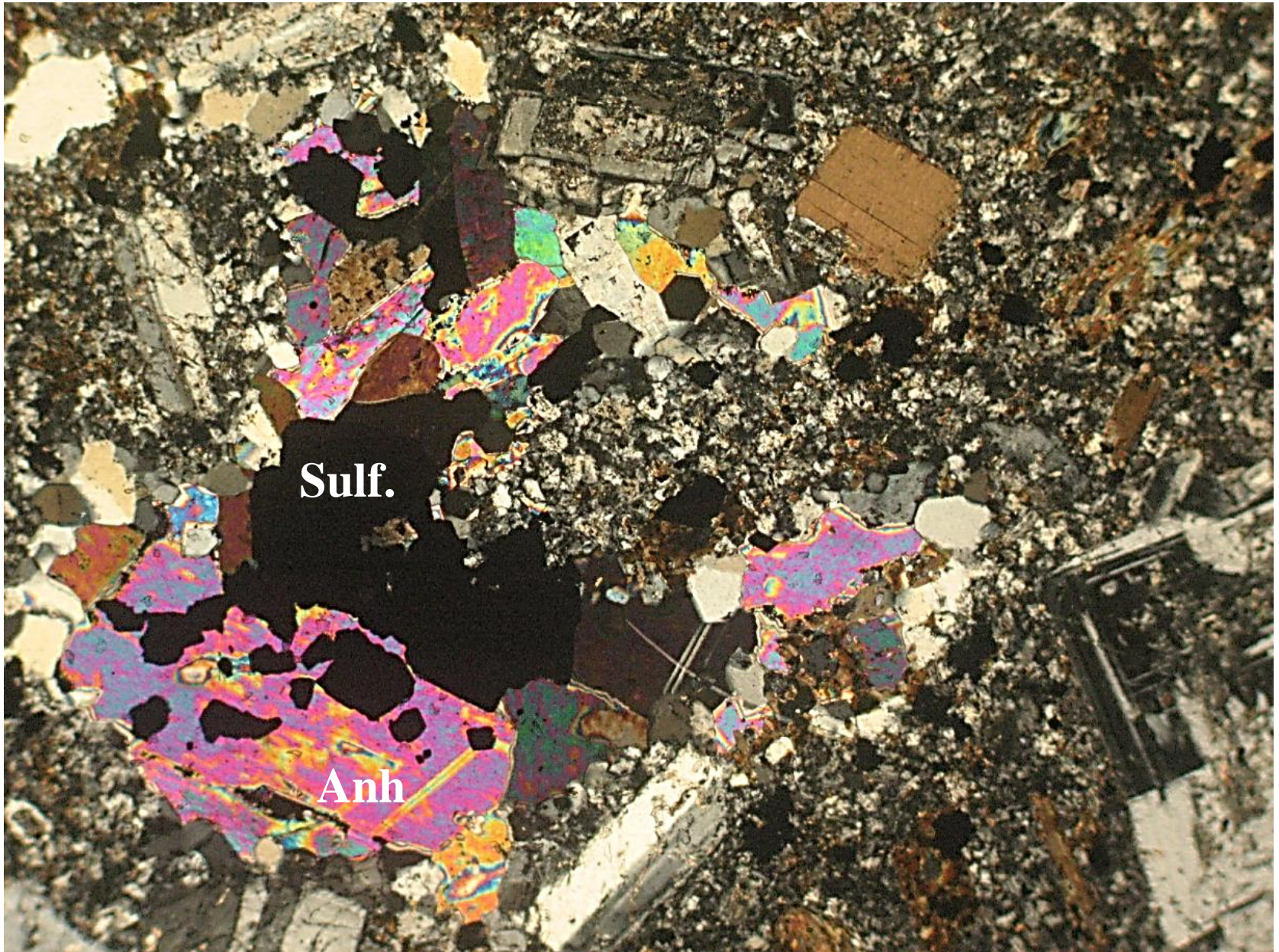
**Biotita** es el mineral K dominante en intrusiones porfíricas intermedias



**Feldespato potásico** es característicamente el mineral K dominante en las rocas silíceas (graníticas, granodioritas y cuarzo monzonitas).



**Alteración Potásica:** Otros minerales: magnetita, anhidrita o calcita, calcopirita, bornita, molibdenita, pirita.



# Venillas asociadas a alteración potásica

La alteración potásica está directamente asociada con abundantes venillas ricas en cuarzo, incluyendo las Tipo A (cuarzo-bornita-calcopirita ± magnetita ± anhidrita ± calcita)

Tipo B (cuarzo ± molibdenita ± sulfuros Cu-Fe)

## Parámetro

### Descripción

Asociación mineral

Qz (50-95%); Fk; sulfuros ± Anh. V sin simetría y sin espacios abiertos

© Rabbia 2008

Halo de alteración

Generalmente Fk alrededor de la V.

Estilo estructural

Orientación aleatoria, discontinua, segmentada, delgadas 1-25 mm ancho

Asociación y textura de sulfuros

Diseminados Cpy ± Bn ± Moly. Py rara

Paragénesis y zonación

Temprana, generalmente limitada al intrusivo porfídico

### Vetillas "A"



El Teniente (Cu,Mo)

## Parámetro

### Descripción

Asociación mineral

Qz -sulfuros ± Anh; Qz grueso, V con simetría y espacios abiertos comun

© Rabbia 2008

Halo de alteración

Sin halo de alteración

Estilo estructural

Regular y continua, generalmente pared plana, 5-50 mm ancho

Asociación y textura de sulfuros

Cpy ± Moly ± Py; grano grueso, generalmente bandeada

Paragénesis y zonación

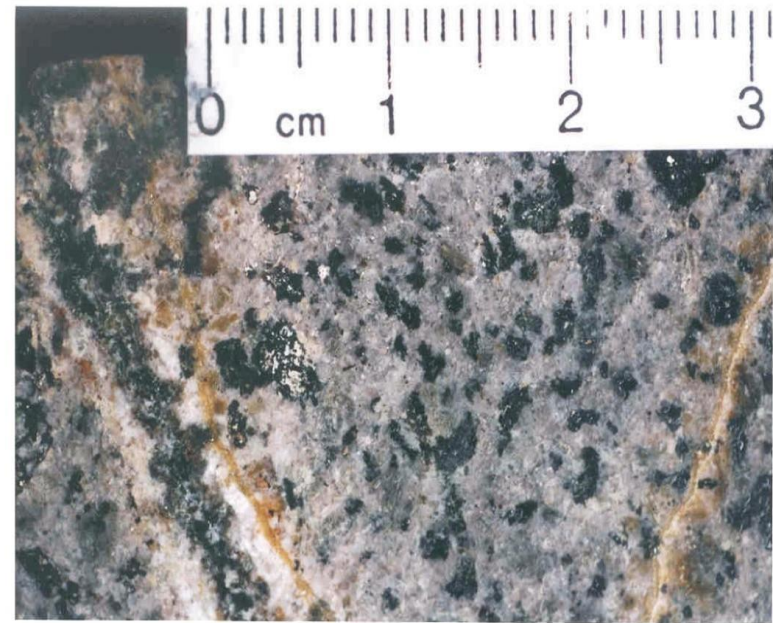
Intermedia, generalmente común en márgenes del intrusivo y roca caja

### Vetillas "B"



Brenda (Cu,Mo)

# Alteración potásica



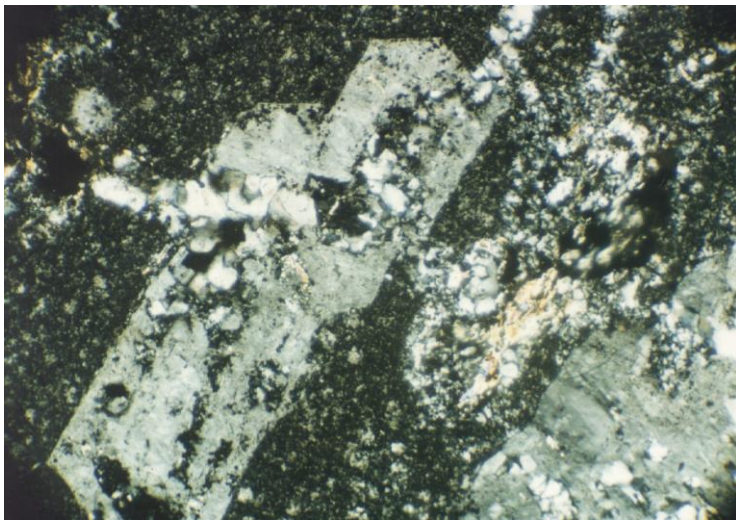
# Baja T: epitermal



Dacita con alteración K

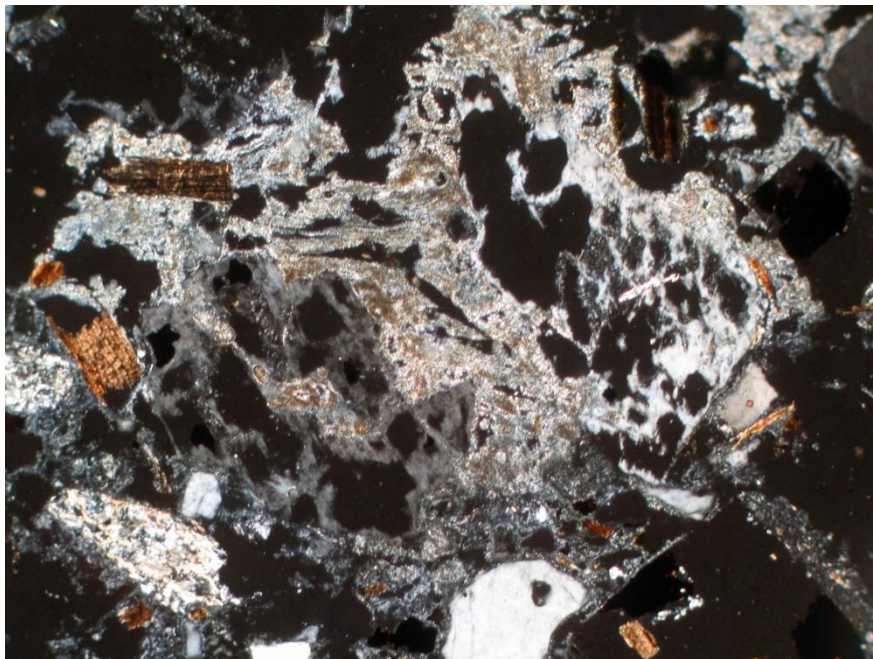
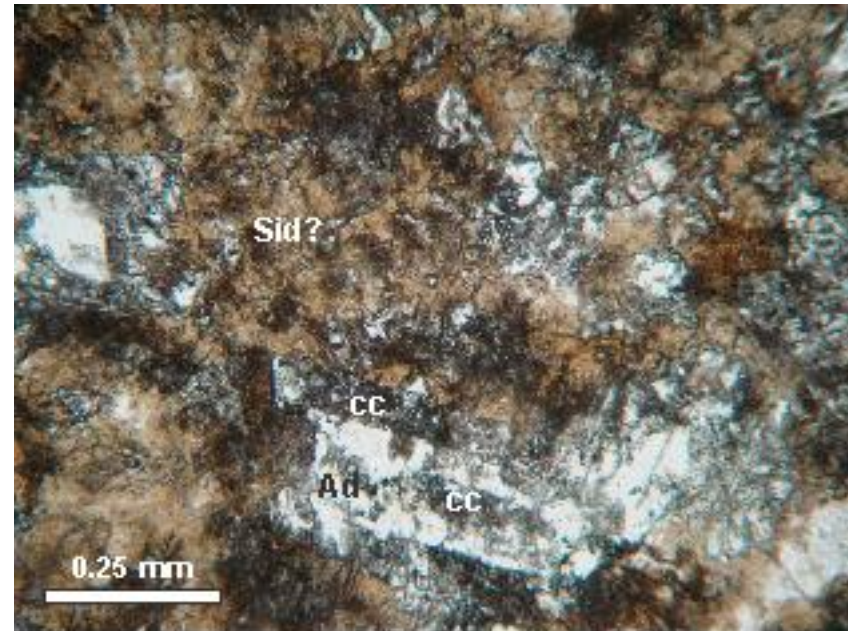


Tobas lapillíticas de Chinchillas  
Resalta una tonalidad gris plomiza a azulina cuando el Kfsp está preservado

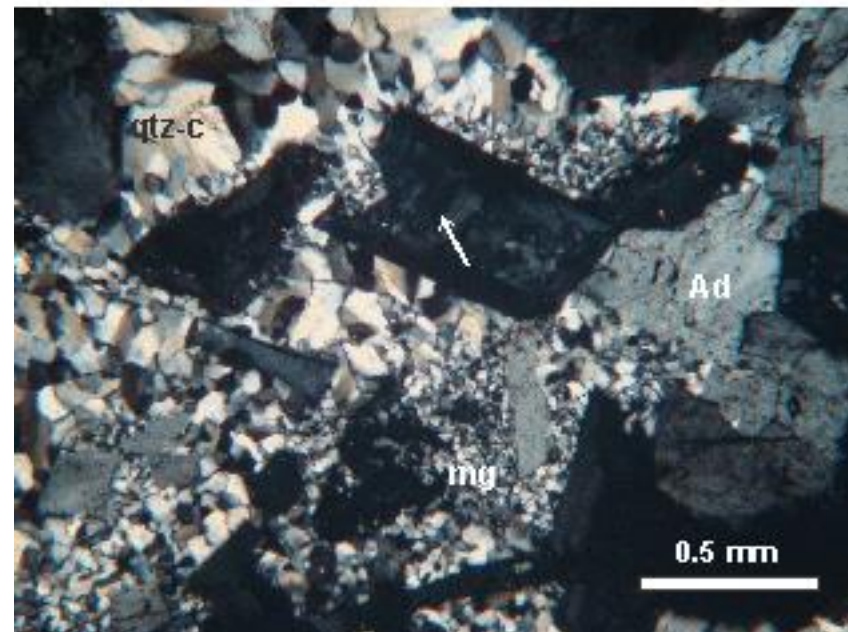


Pseudomorfo de plagioclasa según adularia oquerosa (buddingtonita, rica en NH4) y venilleo de qtz Pan de Azúcar

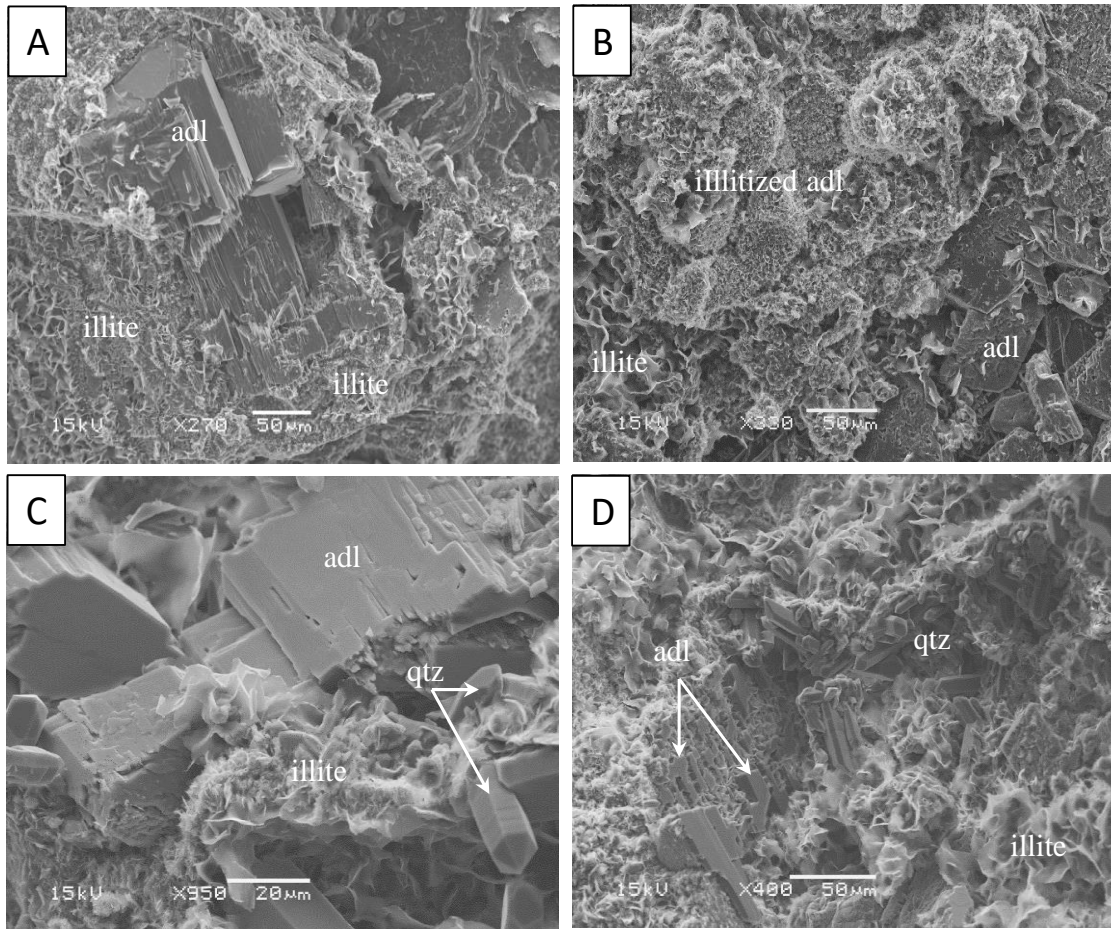
Adularia oquerosa y siderita



Adularia oquerosa sobre pómez (Chinchillas, Puna N)



Adularia masiva con zonas de crecimiento y cuarzo tipo "peine"



En ambiente epitermal es usual que el feldespatos secundario sea realterado por fluidos más fríos y ácidos posteriores



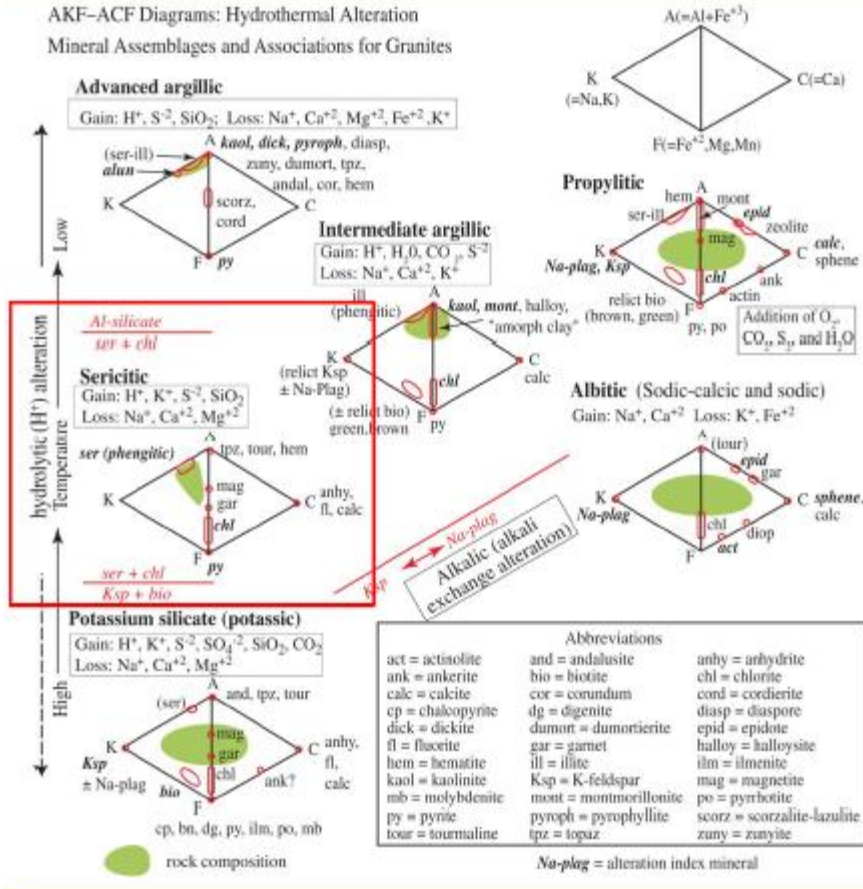
# Alteración fílica

## qtz – ser/ill – py ± tm ± chl

Estadios de T° intermedia  
~250 -180 °C.

### Alteración fílica o cuarzo-sericítica

AKF-ACF Diagrams: Hydrothermal Alteration  
Mineral Assemblages and Associations for Granites



Fluidos de pH moderado (6-4) producen hidrólisis de plagioclasa y feldspatos alcalinos (hidrotermales también!, retrabajo). Reemplaza vidrio con facilidad

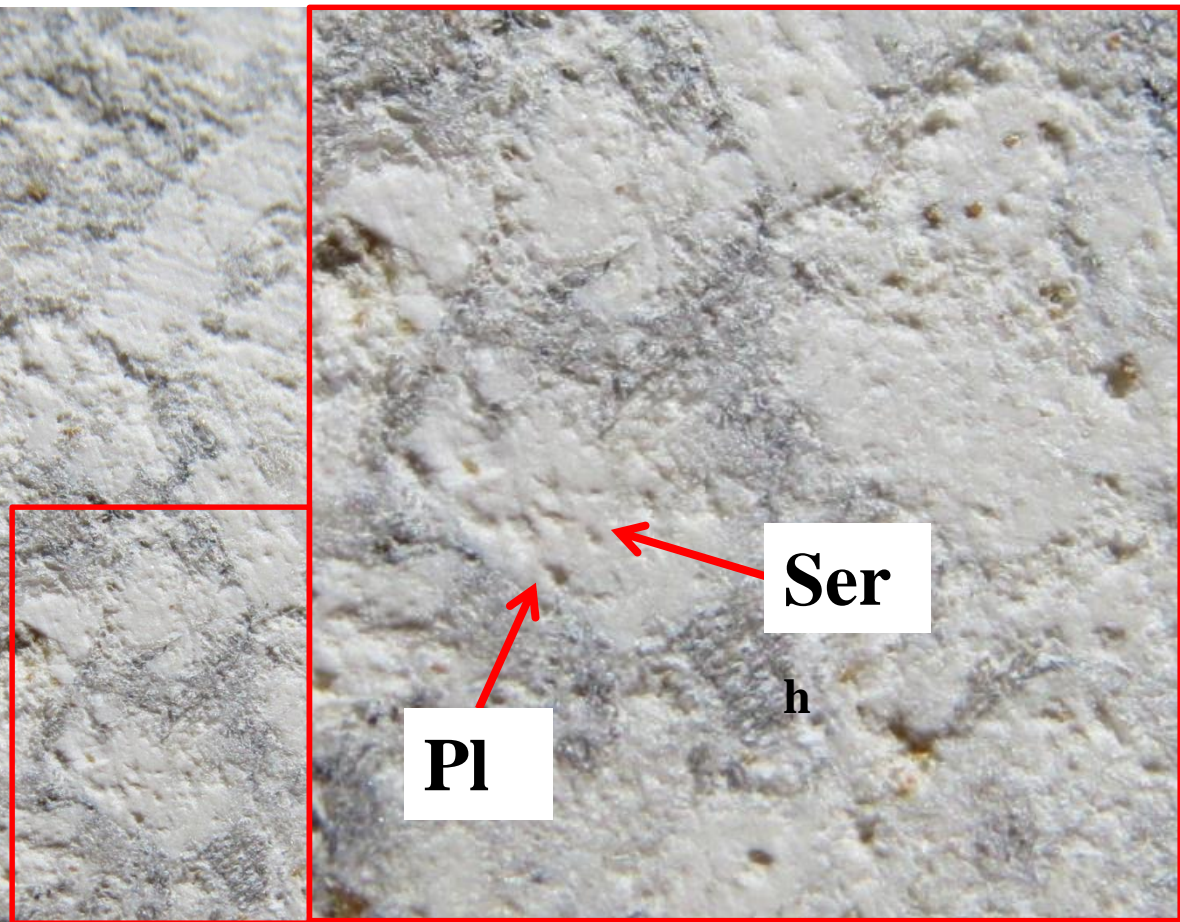
Masas de grano fino mejor cristalizados en profundidad, más finos (illita) en superficie.

Biotita magmática es fuertemente afectada. Turmalina es un acompañante común si hay B y si T° es alta, los mismo topacio si hay F.

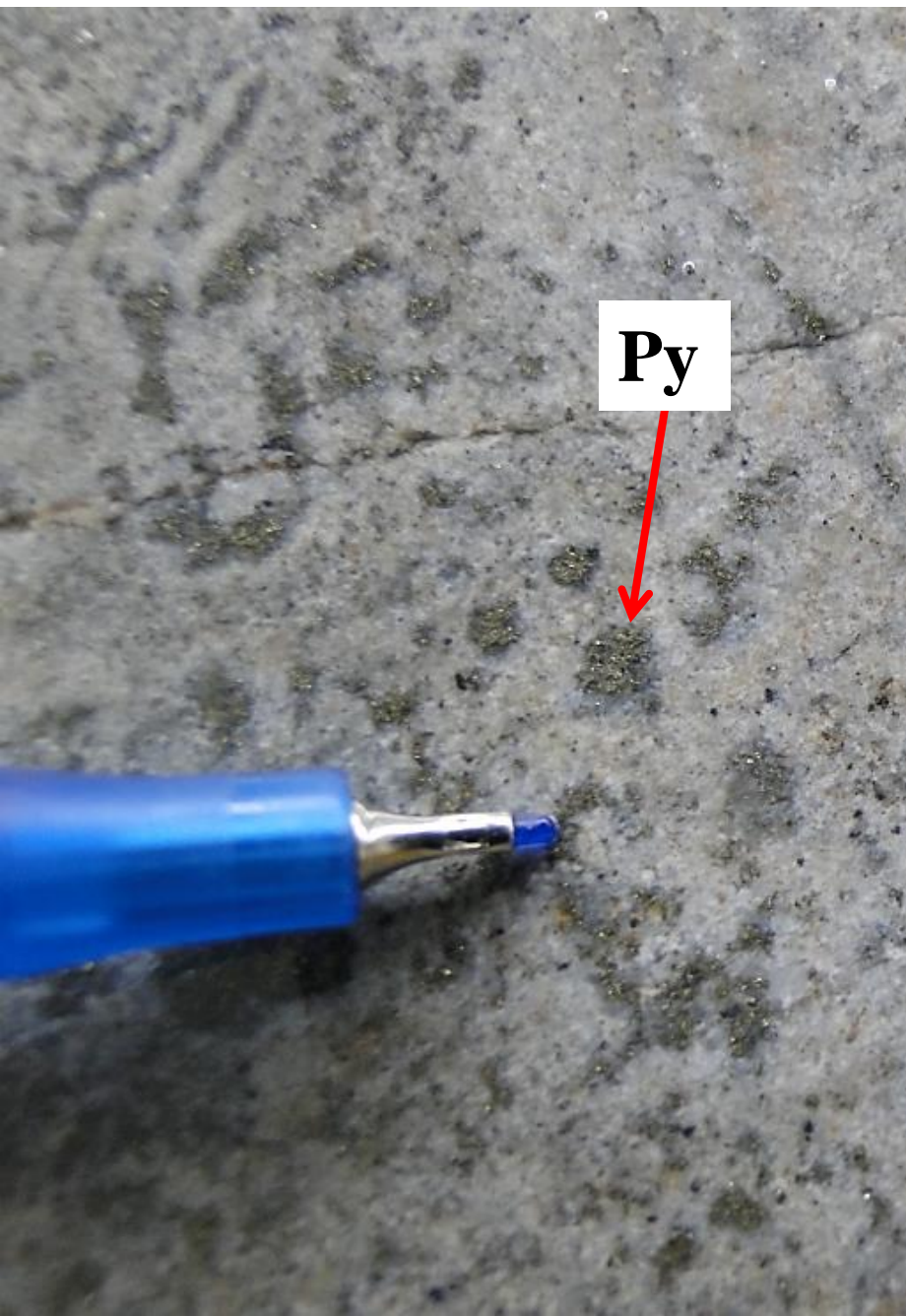
Pueden acompañar pirita, carbonatos y chl

# Aspecto macroscópico (sercita-cuarzo reemplazando a plagioclasa y mafitos)

En sistemas  
porfíricos



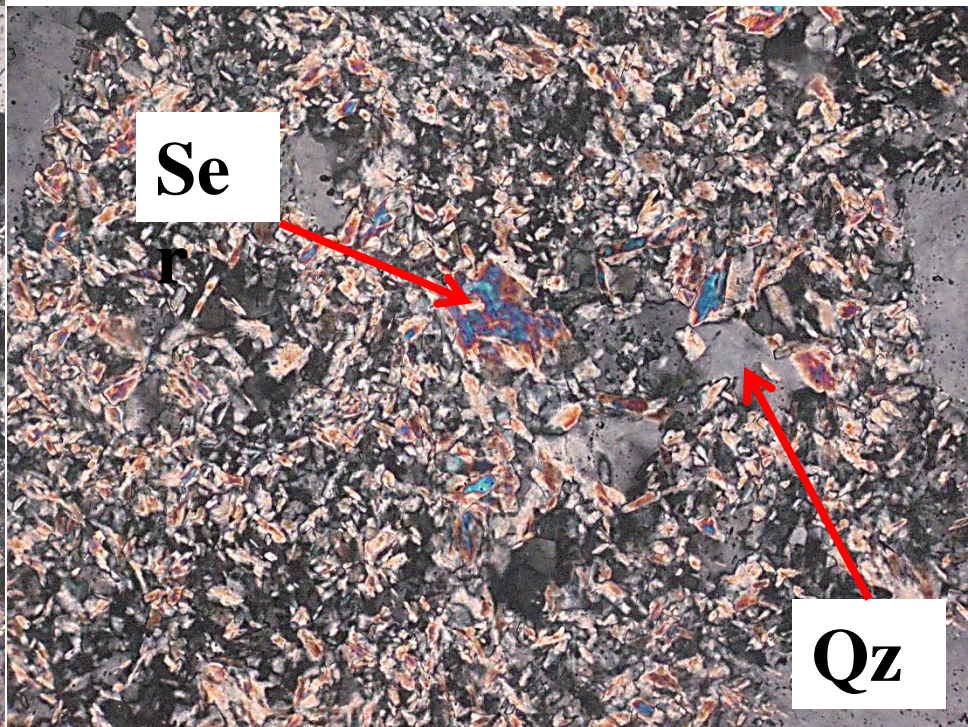
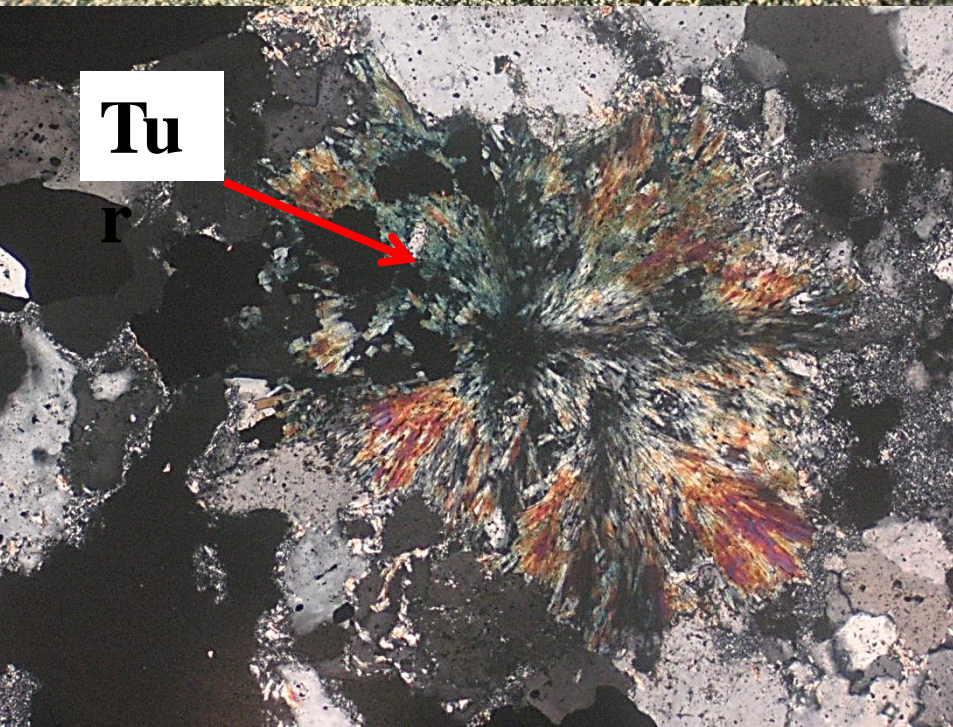
# Aspecto macroscópico





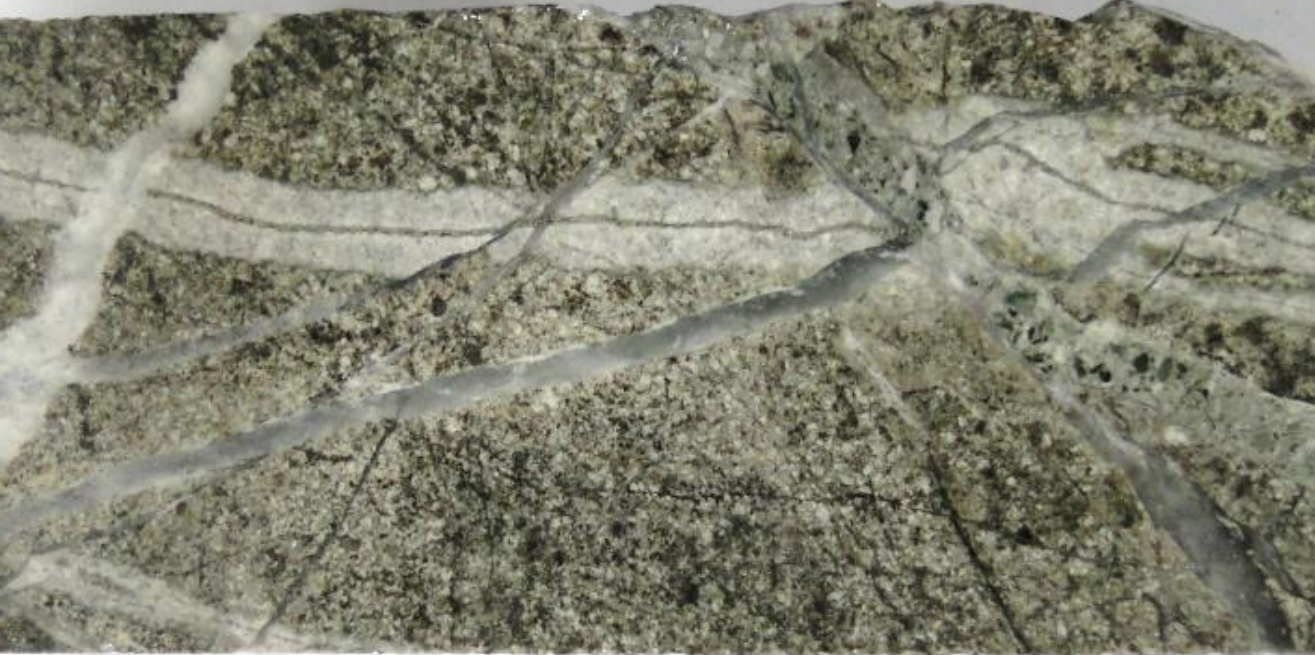
## Aspecto microscópico

Plagioclasa y feldespato potásico  
(magmáticos o primarios)  
reemplazados por sericita y  
cuarzo



# Venillas asociadas a alteración fílica

Compuesta por pirita, pirita-cuarzo ± magnetita, calcopirita, entre otros, con halo de alteración sericítica



Parámetro

Descripción

Vetillas "D"

Asociación mineral

Sulfuros ± Qz ± Anh; textura bandeas Anh-sulfuro; Qz/sulfuro bajo

Halo de alteración

Ser reemplaza Bt/Fk alrededor de la V.

Estilo estructural

Continua, pero localmente irregular, 1-100 mm ancho

Asociación y textura de sulfuros

Py ± Bn ± Cpy ± Enargita; escasa Moly.

Paragénesis y zonación

Muy tardía, corta todas las demás, controlada estructuralmente



Sutura de sulfuro (oxidado)

Halo Qz-Ser

Polo Sur (Cu)



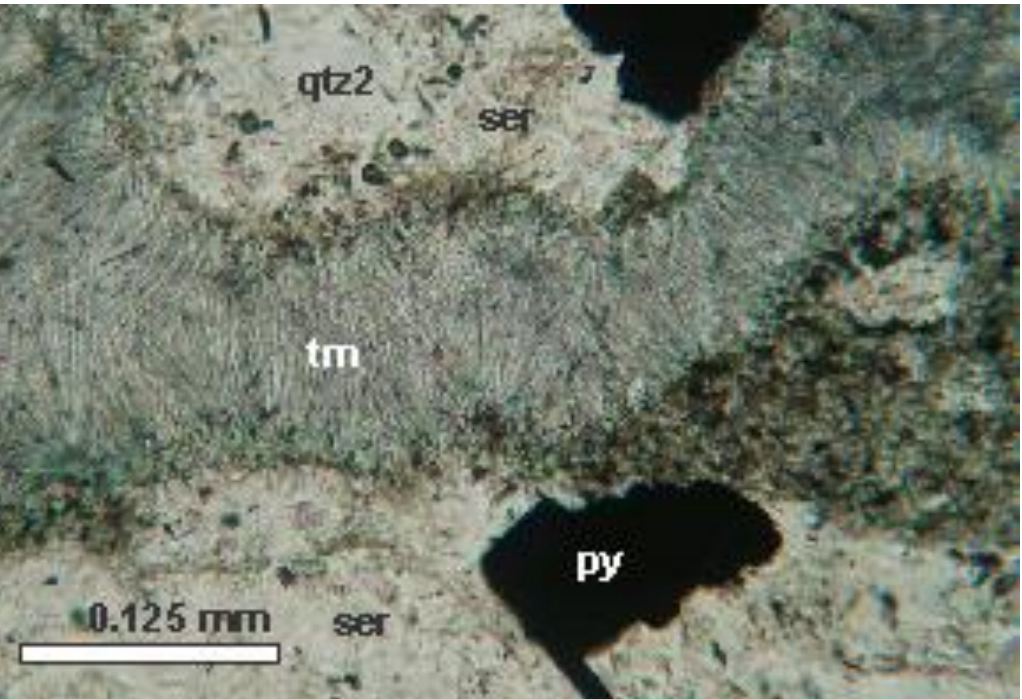
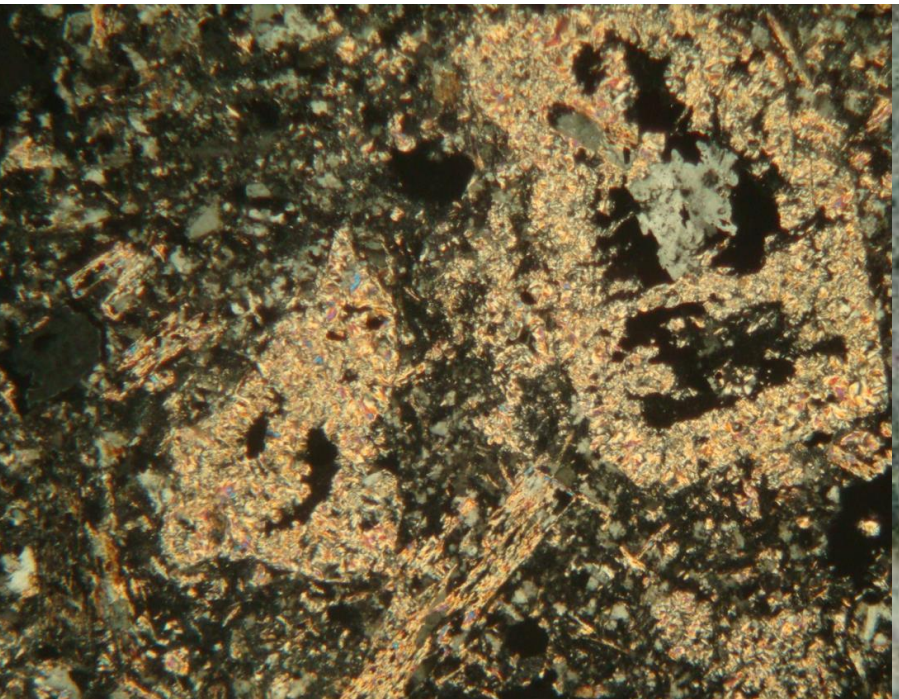
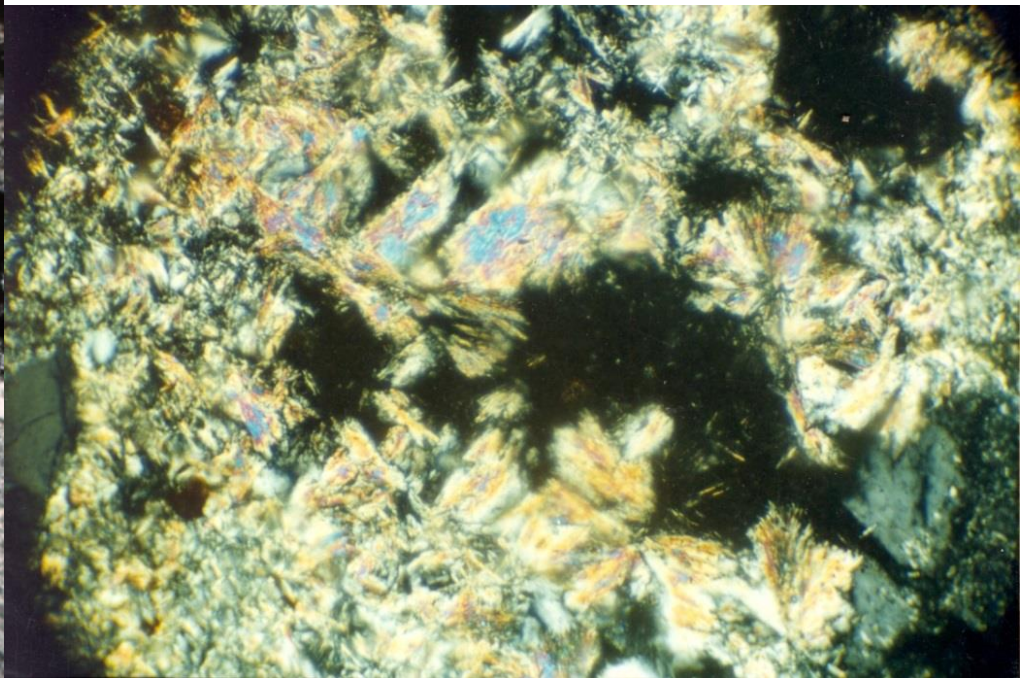
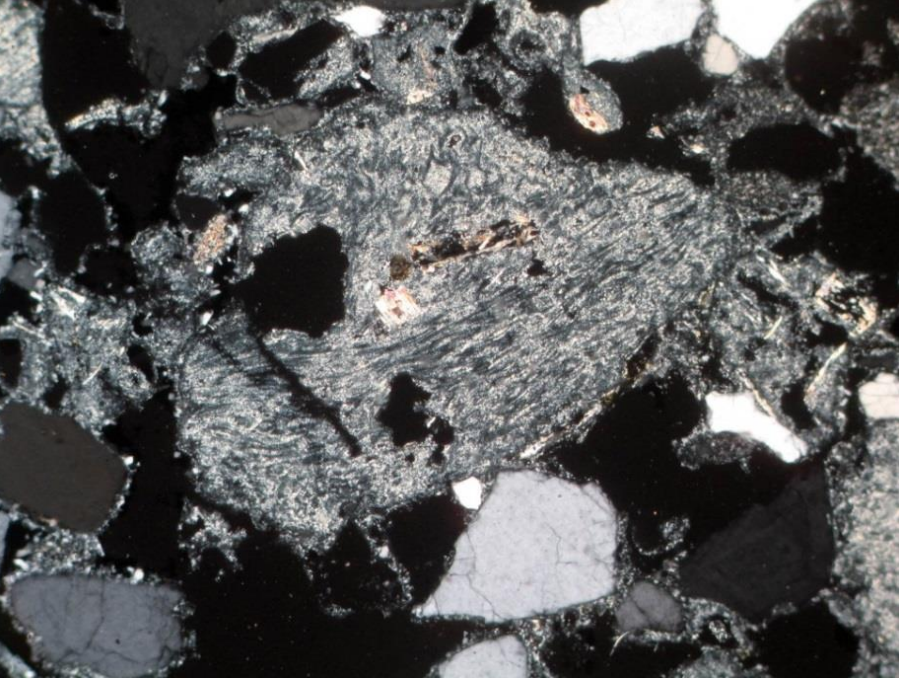


## Ambiente epitermal Muy extendida

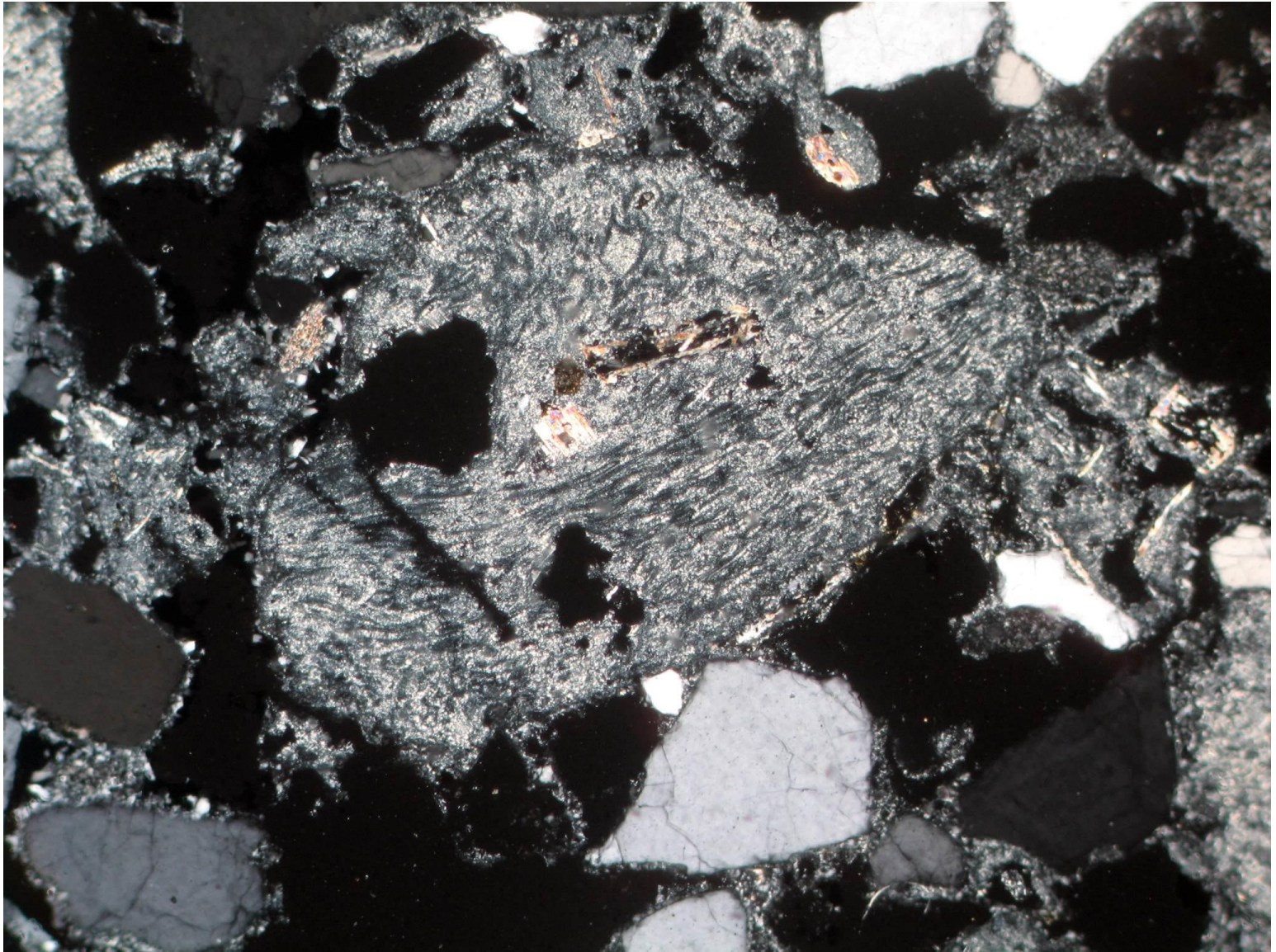
Alteración ser - tm (soles)  
en lava riodacítica (Huayra  
Huasi, Puna jujeña)

Toba lapillítica de origen  
freatomagmático  
sericitizada (ill) Chinchillas

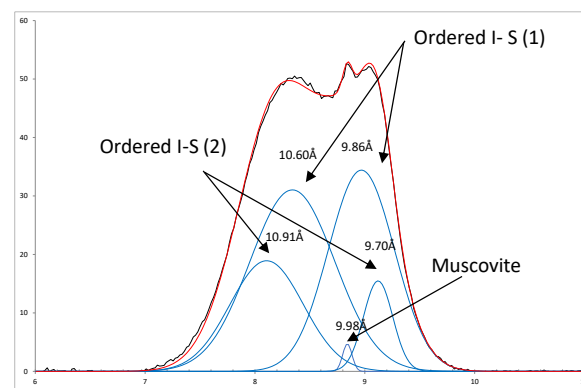
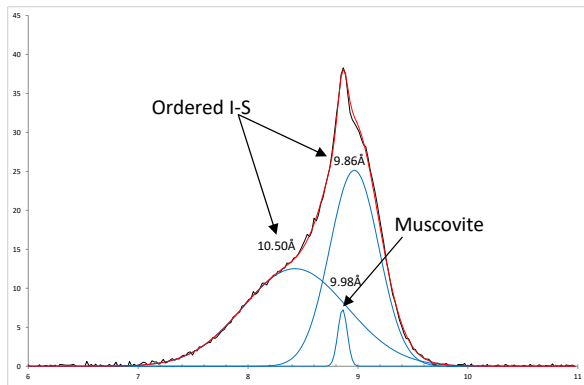
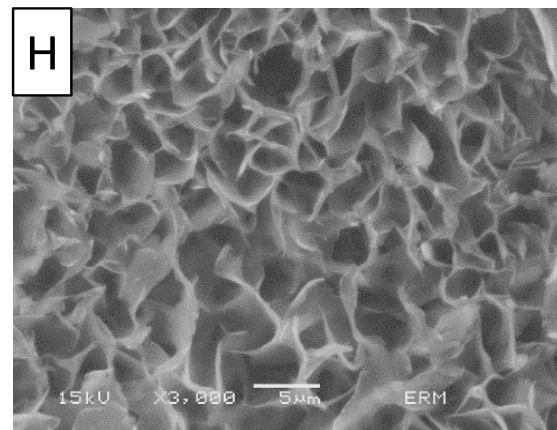
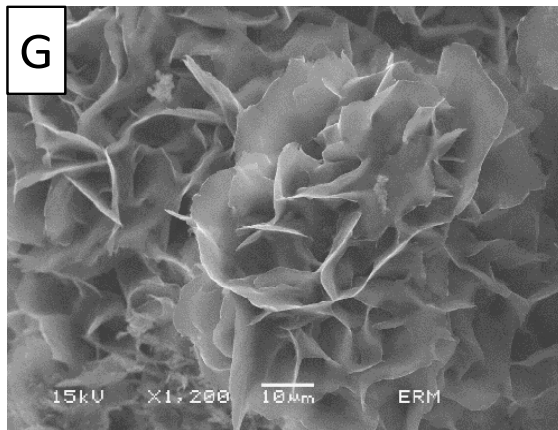
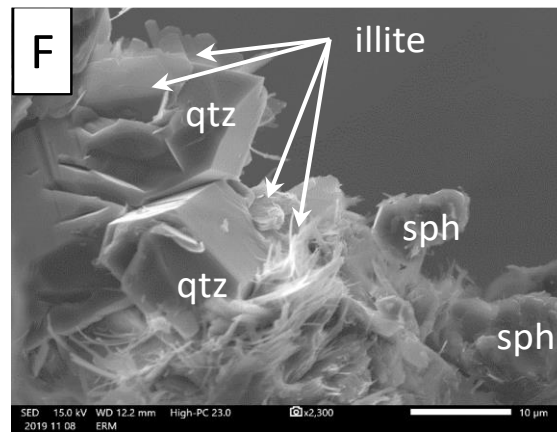
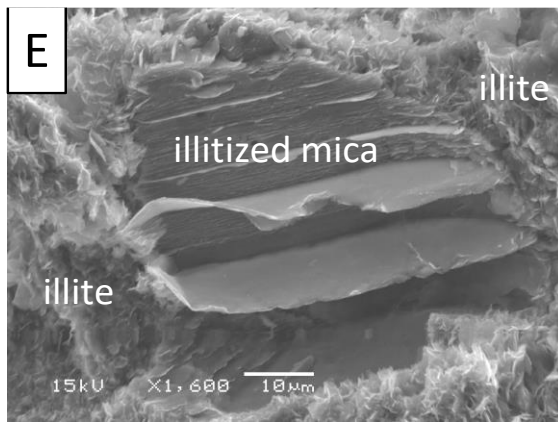




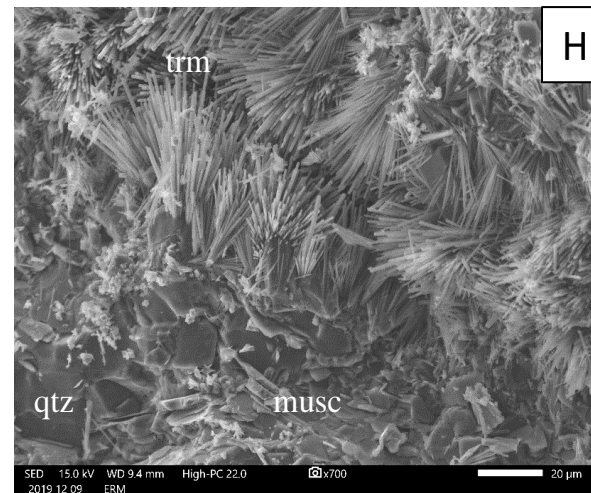
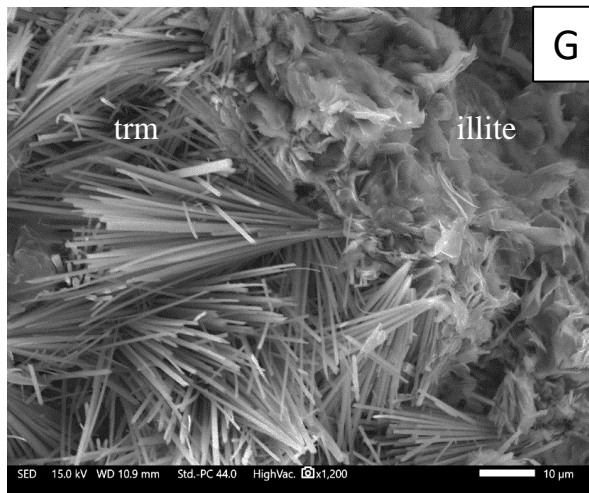
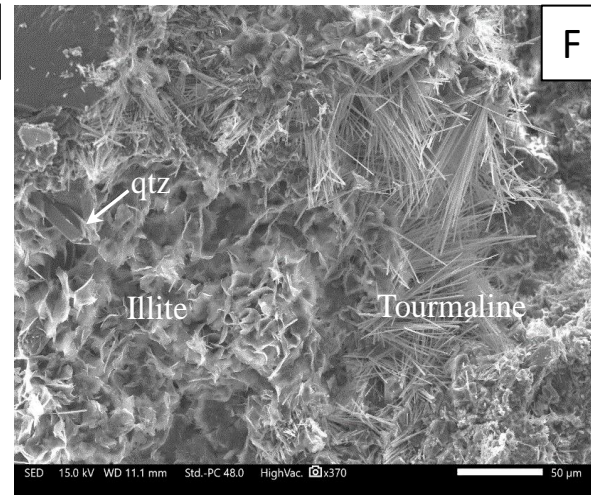
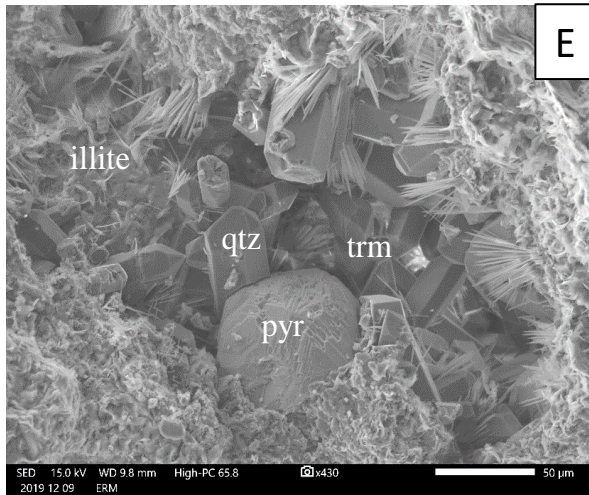
## cuarzo – sericita (illita)







Es necesario resolver espectros de DRX complejos para definir qué filosilicatos dioctaédricos blancos participan de la asociación



La asociación fílica no sólo incluye filosilicatos dioctaédricos “blancos” sino que puede incluir turmalina en fibras y pirita comúnmente

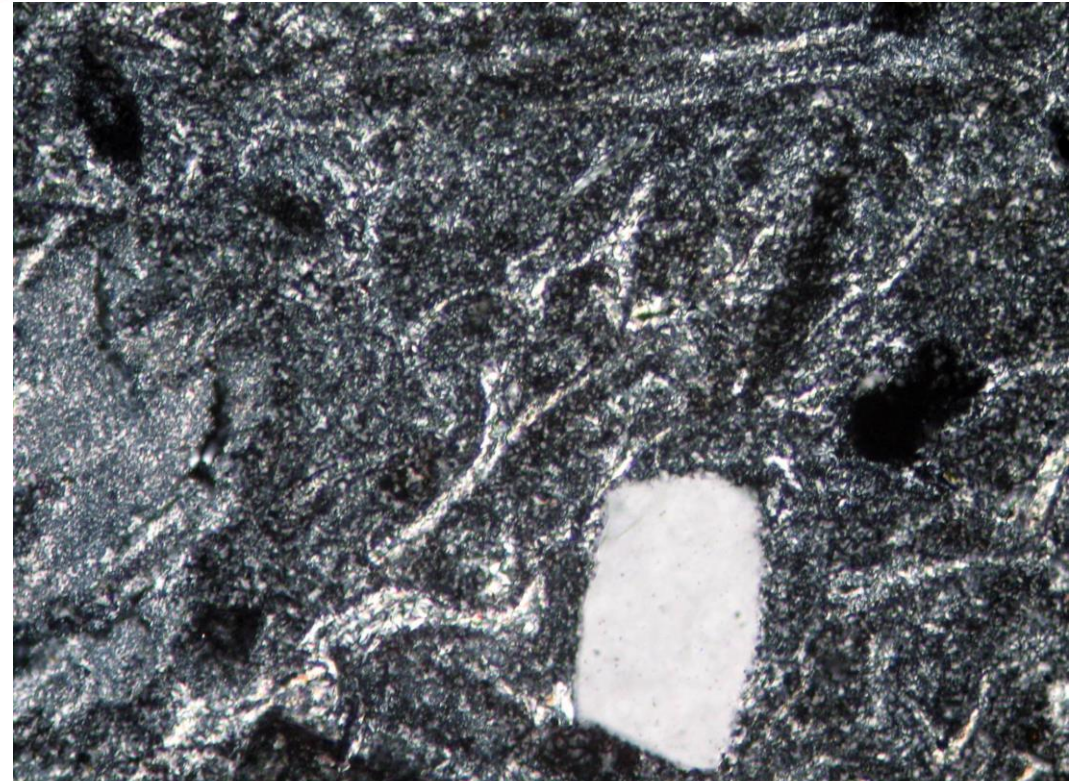
## ALTERACION ARGILICA INTERMEDIA

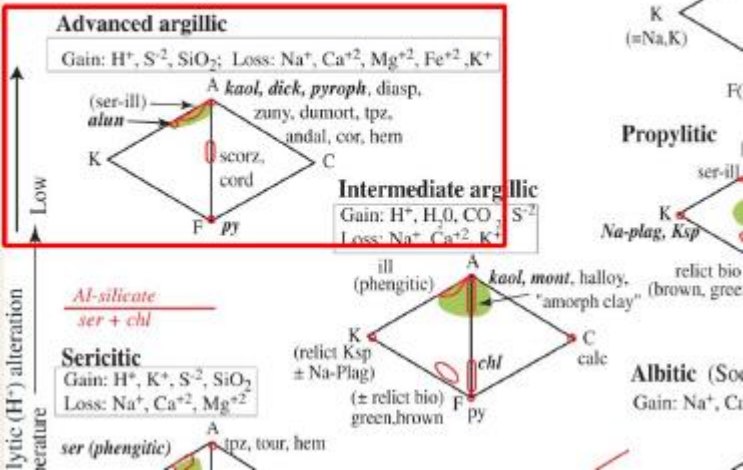
Smec – ill – Kao (arg. Intermedia) reemplazan lava dacítica en Cerro Quemita, Panamá.

Notar cómo se preserva la textura, indicando fluidos menos reactivos que los de alteración argílica avanzada

En sección delgada la mayoría de las características texturales originales de la roca se preservan. El vidrio altamente susceptible a la alteración es reemplazado por un fino mozaico de esmectitas e interestratificados de caolinita-illita y agregados de los mismos minerales en forma de parches.

Matriz de ignimbrita riodacítica alterada, Minas Viejas, Puna Jujeña.





# ALTERACION ARGILICA AVANZADA HIPOGENA

Condiciones de T° 350 °C y <150 °C  
pH de 0 a 3

Hidrólisis extrema de feldespatos y micas  
Alu – Kao – Prl – Dp – And - Zun ± ill ± APS

andesina

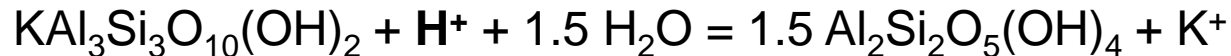
sericita

cuarzo



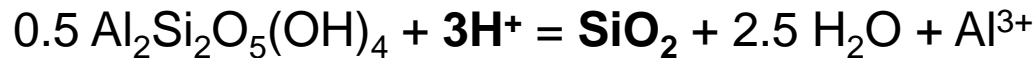
sericita (mica potásica)

caolinita



caolinita

cuarzo residual



sericita

ácido sulfúrico

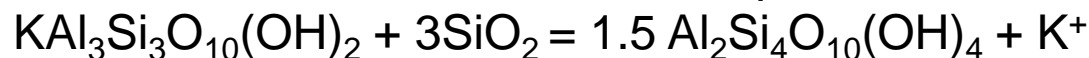
alunita

cuarzo



sericita

pirofilita

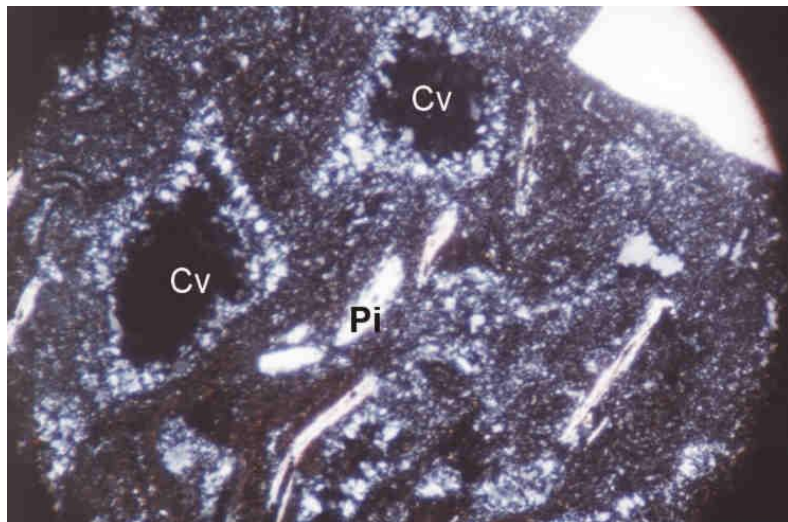




Alteración a sílice oquerosa o residual (vuggy silica) de un pórfido , Distrito El Indio

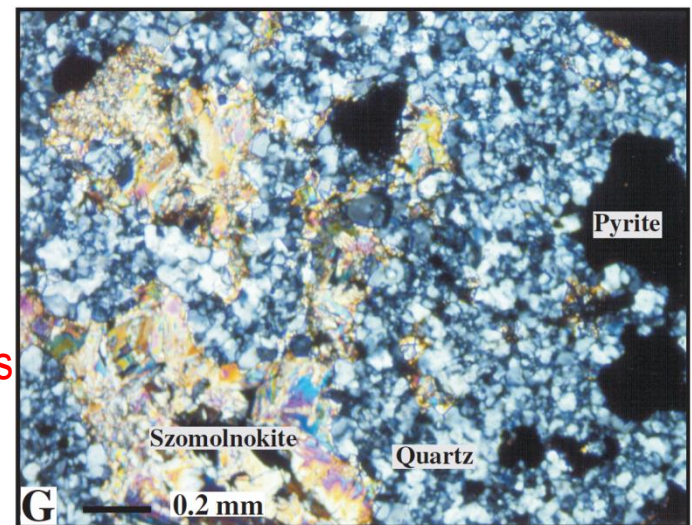


Brecha de diatrema con silicificación de la matriz de roca finamente molida y alteración a sílice oquerosa de los clastos porfíricos, interpretados como fragmentos de intrusivos, Veladero, Argentina



Cuarzo oqueroso en corte delgado (Cerro Solterío, Puna Jujeña)

Cuarzo residual en Yacimiento Pascua  
Py rellena los huecos  
Dejados por la disolución de minerales previos  
(Chouinard et al., 2005)



G 0.2 mm

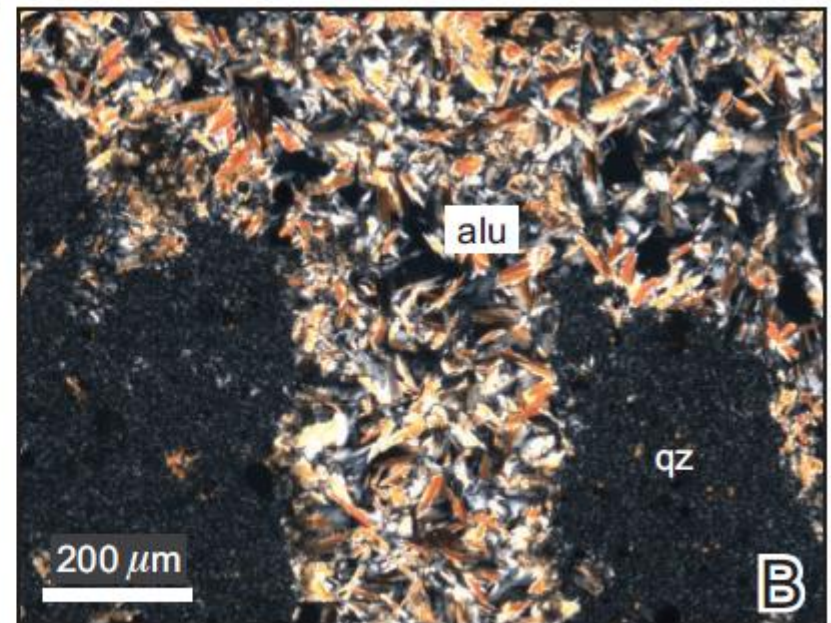
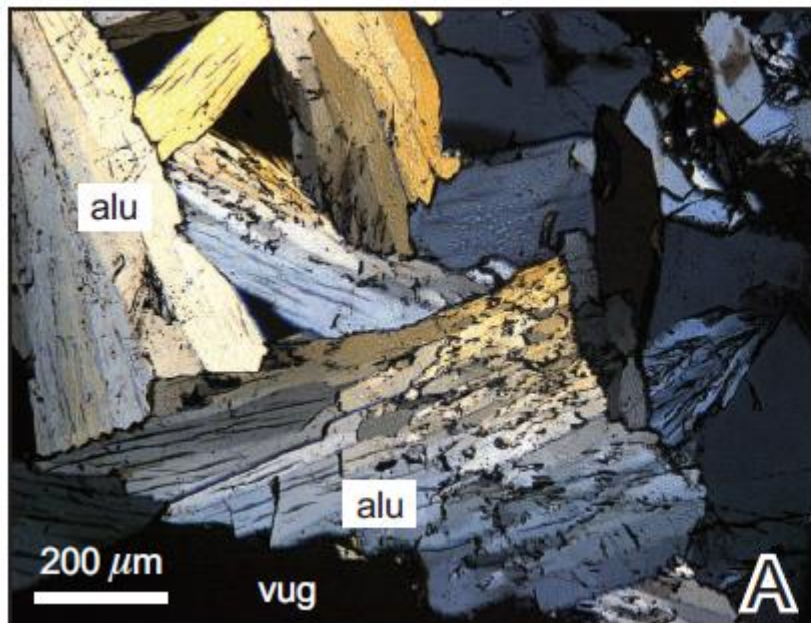
## Alteración argílica avanzada cuarzo-alunita y venillas de alunita



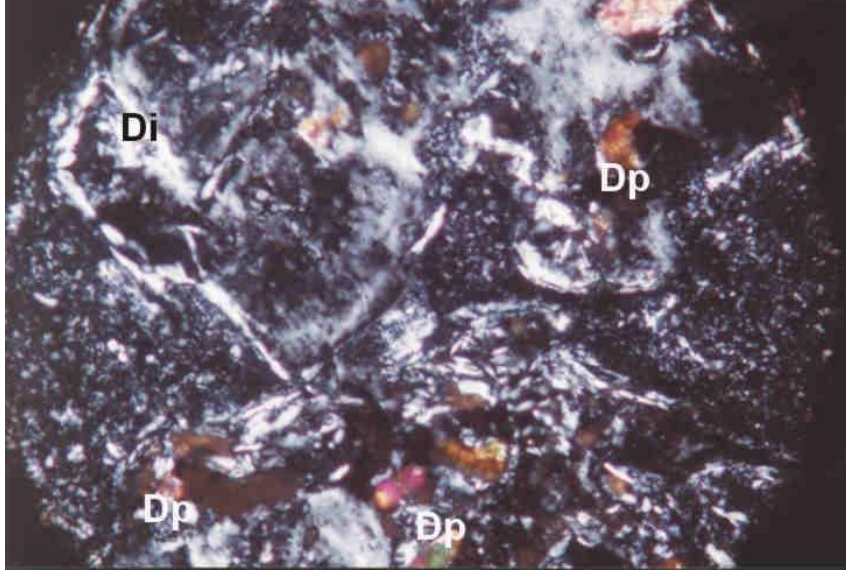
Salitrales



Can Can

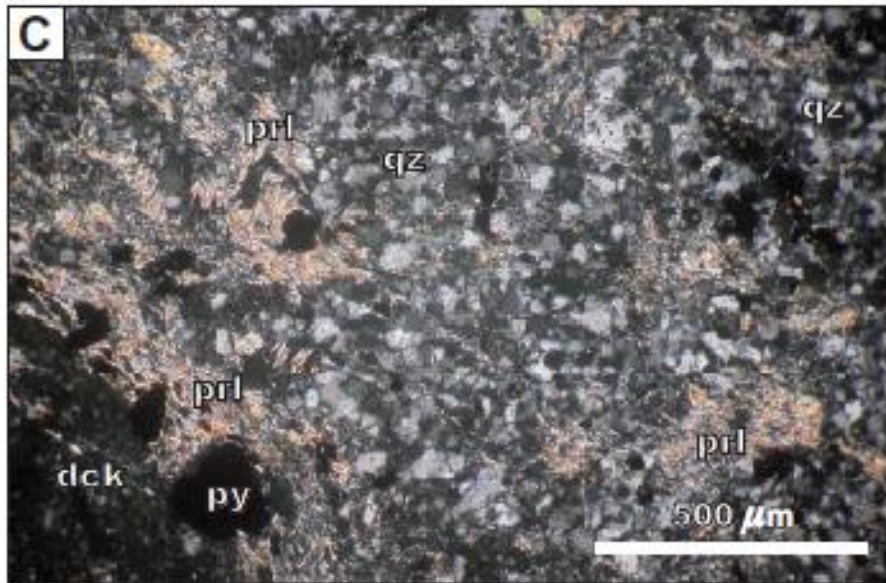


Sección delgada de alunita prismática masiva y venillas de Alu+Qz en Veladero (Holley et al. 2016)

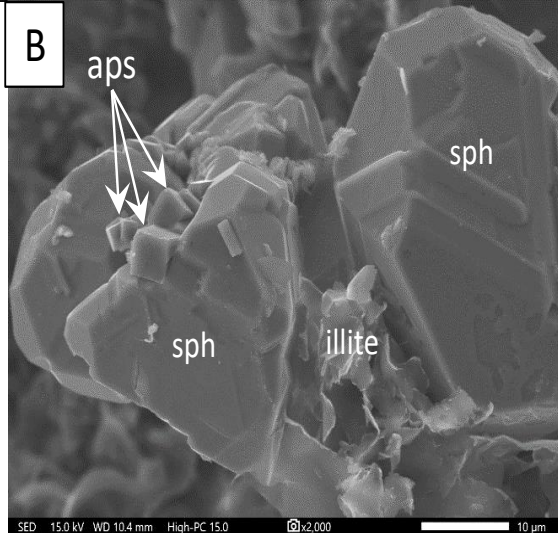
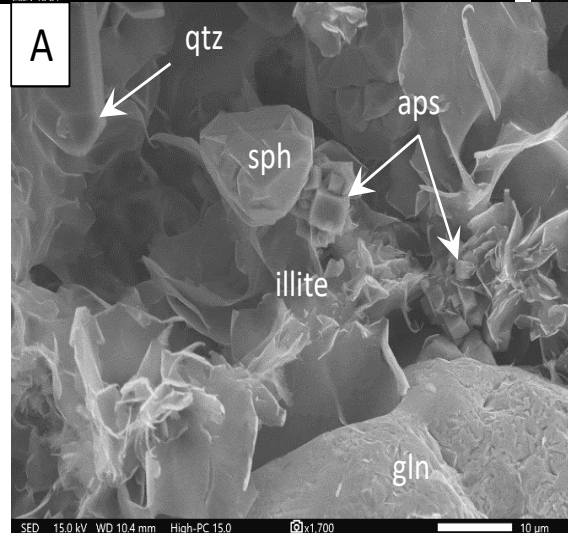
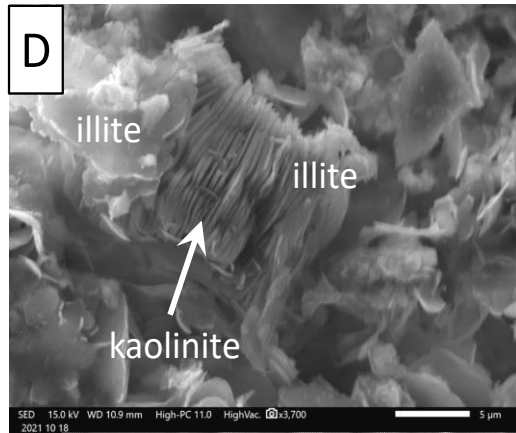
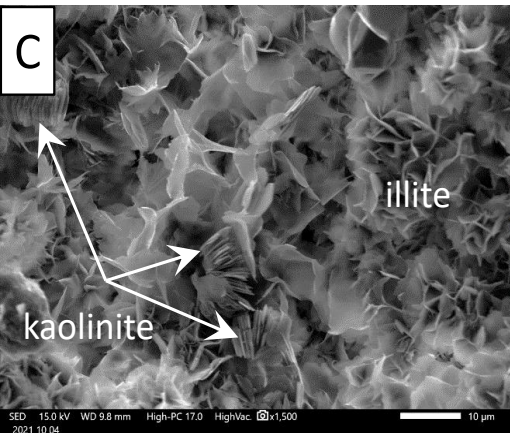
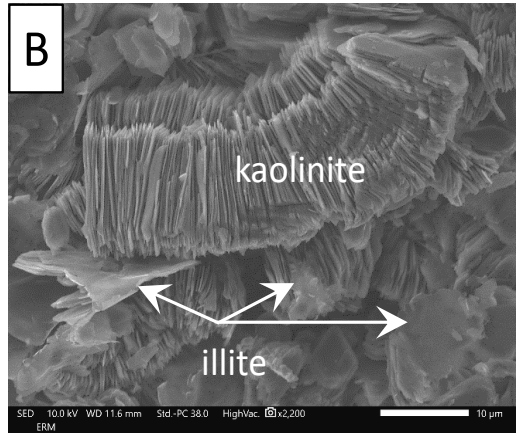
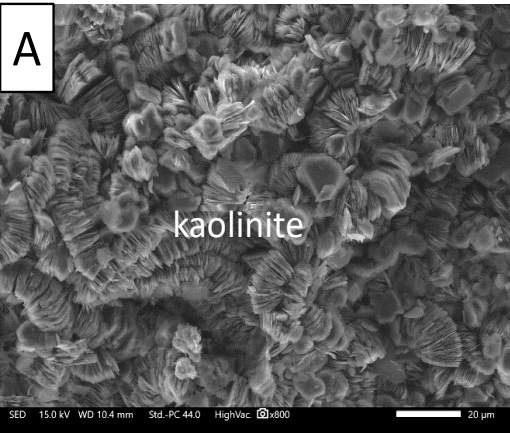


Diásporo (Dp) y dickita reemplazan a plagioclasa Cerro Solterío Puna jujeña

Aspecto pulverulento y blanquecino – Dickita es la clave (alta T°)!! DRX - SWIR



Dickita, pirofilita, cuarzo en brecha dacítica alterada (Cerro Quema, Panamá)



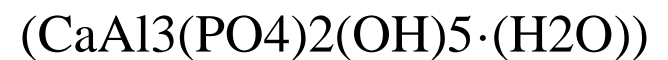
La alteración por fluidos más ácidos puede preceder o posdatar a la asociación fílica.

En Chinchillas la alteración illítica es posterior a fluidos que causaron una asociación argílica avanzada

### APS

Soluciones sólidas de

crandallite



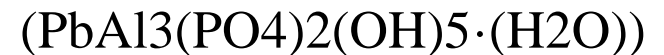
goyazite



gorceixite

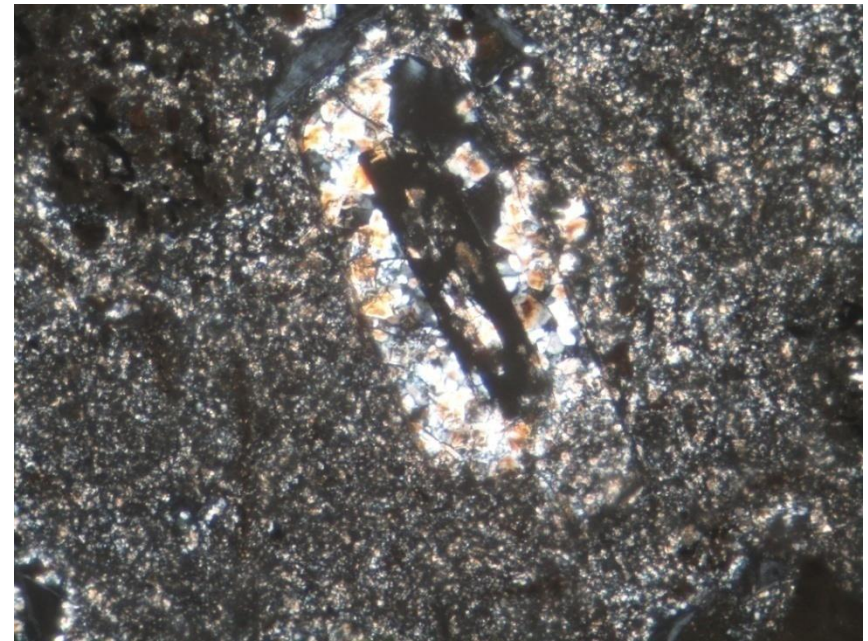


plumbogummite





**Coipa Norte:** Steam-heated cristobalite-alunite-Kaolinite blanket over residual quartz zone

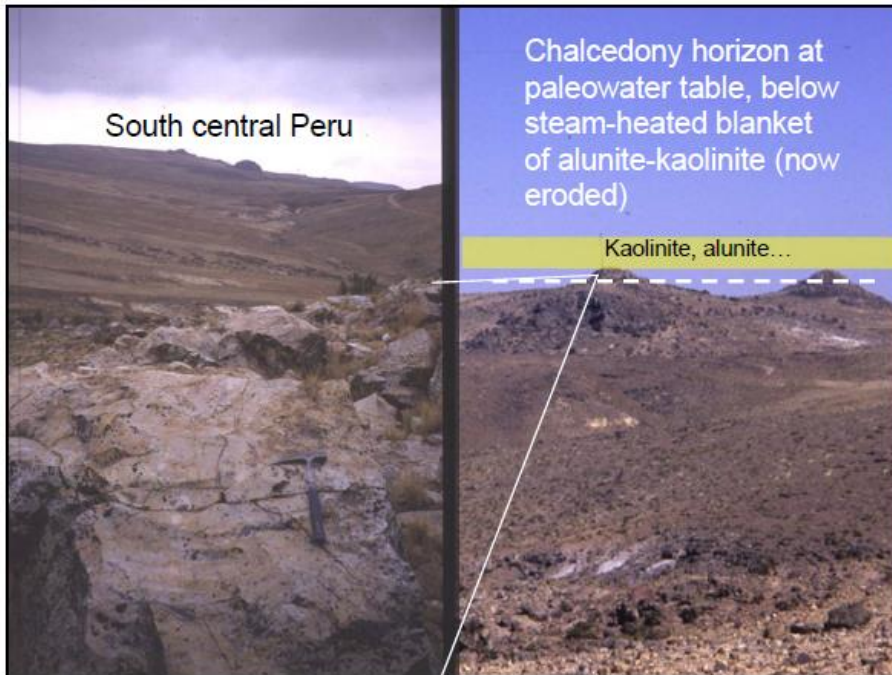


Agregado de alunite pseudocúbica y cristobalita en pseudomorfo de una plagioclasa cribada (Cerro Solterío, Puna Norte)

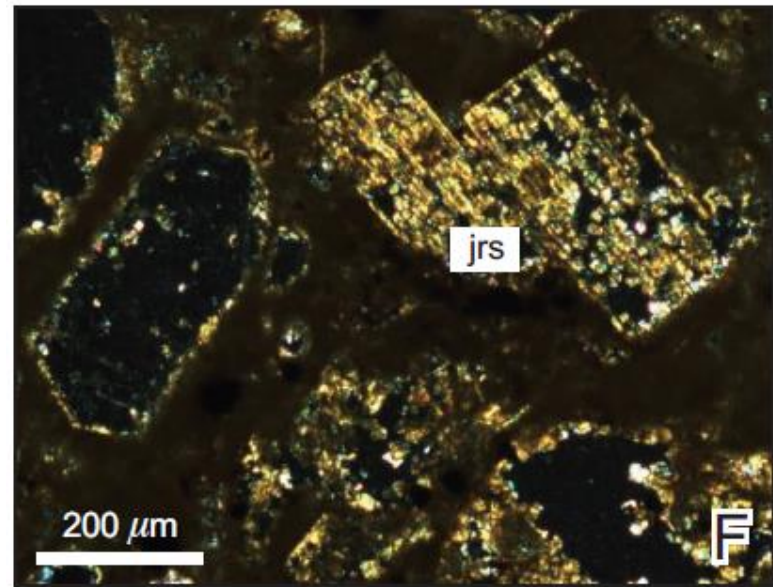
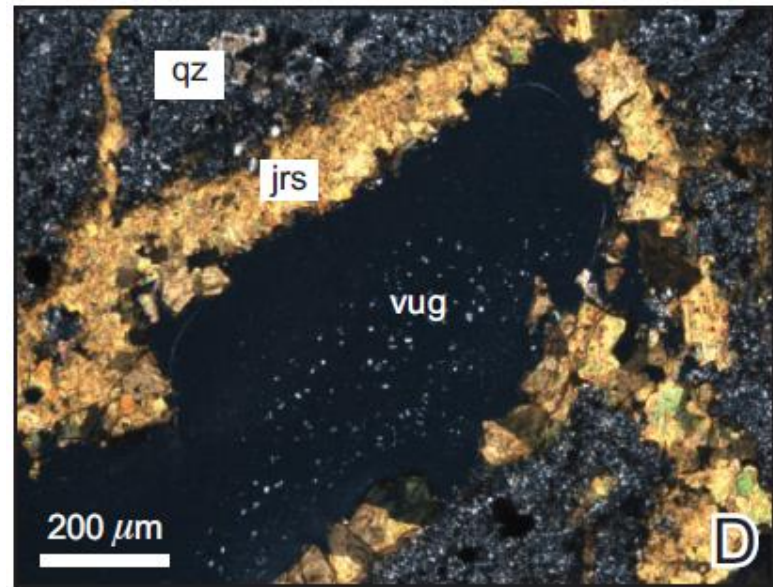
South central Peru

Chalcedony horizon at paleowater table, below steam-heated blanket of alunite-kaolinite (now eroded)

Kaolinite, alunite...



ALTERACIÓN ARGÍLICA  
AVANZADA POR  
CALENTAMIENTO DE AGUAS  
SUBTERRANEAS EN ZONA  
VADOSA (STEAM HEATED)



## Alteración supergénica: Alunita pseudocúbica ± Jarosita

Jarosita relleno de huecos de disolución y venillas, o como reemplazo de xx de feldespatos en ignimbrita? Veladero