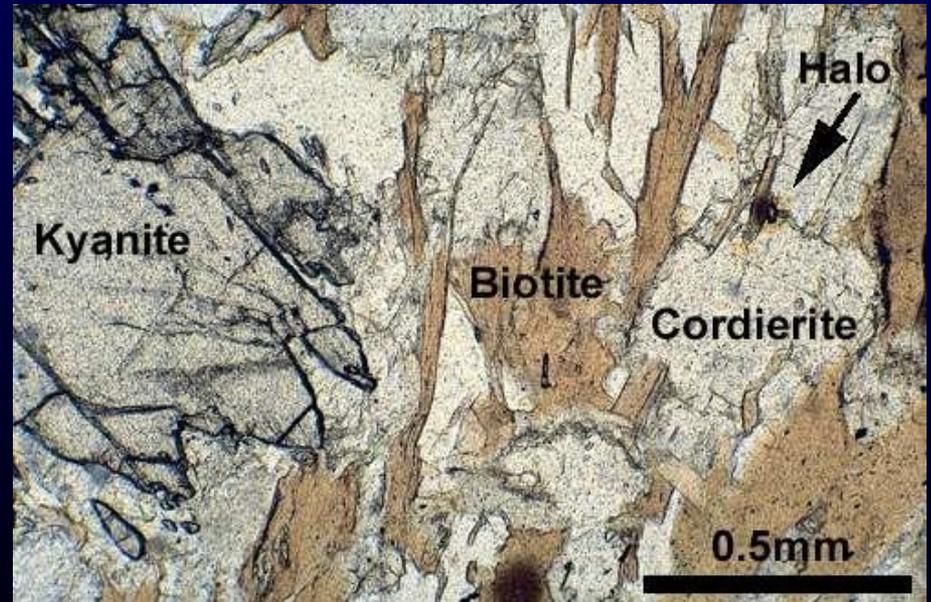


# Metamorfismo de rocas pelíticas

Dr Pablo Caffè – Prof. Titular  
Petrología



# Metamorfismo de rocas pelíticas

- Pelitas, fangolitas y limolitas: sedimentos clásticos de grano muy fino, derivados de la corteza continental
- Se acumulan característicamente en porciones distales de la plataforma continental o incluso en sectores más profundos (pelágicos)
- Gradan hacia grauvacas más gruesas y sedimentos arenosos hacia la fuente continental
- Las metapelitas representan una importante familia de rocas metamórficas, composicionalmente muy sensibles a los cambios de P y T: muchos minerales índices

# Metamorfismo de rocas pelíticas

- La mineralogía de sedimentos pelíticos está dominada por filosilicatos muy finos ricos en Al y K, tales como arcillas (montmorillonita, caolinita, o esmectitas), algunas micas blancas de grano fino (sericita, paragonita, o fengita) y clorita, todas las que pueden aparecer como granos autigénicos o detríticos
- Filosilicatos: hasta >50% sedimento original
- Cuarzo fino: 10-30%
- Menor % de feldespatos (albita y feldespato potásico), óxidos e hidróxidos de Fe, zeolitas, carbonatos, sulfuros y materia orgánica.

# *Mineralogía de las rocas pelíticas (% mineral).*

<i>Mineral</i>	<i>Porcentaje promedio</i>
<i>Filosilicatos</i>	<b>55</b>
<i>Cuarzo</i>	<b>29</b>
<i>Feldespatos</i>	<b>11</b>
<i>Zeolitas</i>	<b>1.1</b>
<i>Oxidos de Fe</i>	<b>1.4</b>
<i>Sulfuros</i>	<b>0.5</b>
<i>Rutilo</i>	<b>0.4</b>
<i>Titanita</i>	<b>0.3</b>
<i>Otros (CO<sub>3</sub> - SO<sub>4</sub> - Materia orgánica, etc.</i>	<b>1.3</b>

# Metapelitas

- Características químicas de una pelita: altos  $\text{Al}_2\text{O}_3$  y  $\text{K}_2\text{O}$ , y bajo  $\text{CaO}$ , que reflejan su mineralogía predominante
- Dominancia de Ms + Qtz en las paragénesis metamórficas durante un amplio rango de condiciones metamórficas
- Alta proporción de micas → frecuente desarrollo de **foliación y esquistosidad** en las rocas: pizarras, filitas, esquistos micáceos.
- La composición de las pelitas puede representarse en el sistema  $\text{K}_2\text{O}-\text{FeO}-\text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$  (“KFMASH”)
- Si tratamos el  $\text{H}_2\text{O}$  como perfectamente móvil (sistema permeable), la petrogénesis de pelitas puede representarse adecuadamente en los diagramas A'FK y AFM

# Metapelitas

**Table 28-1.** Chemical Compositions\* of Shales and Metapelites

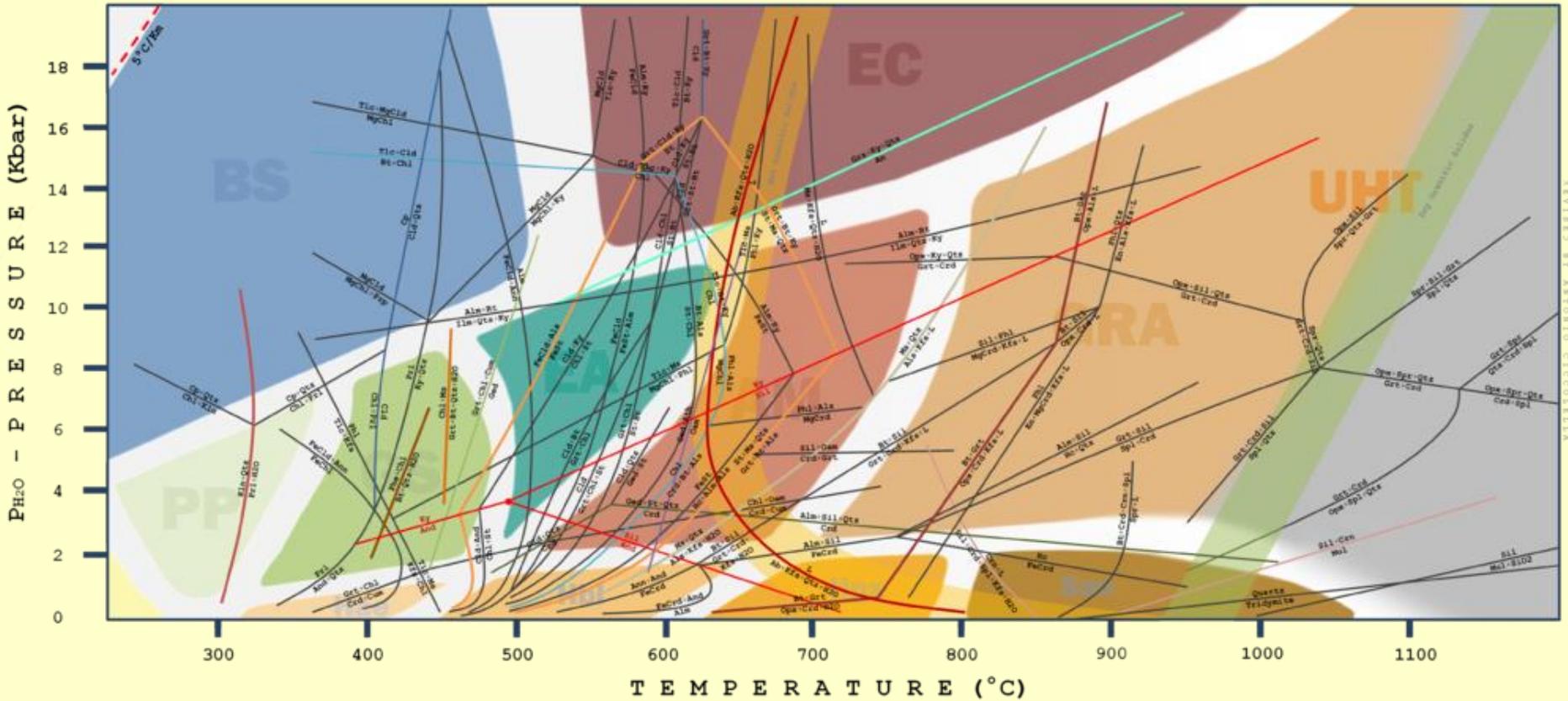
	1	2	3	4	5
<b>SiO<sub>2</sub></b>	64.7	64.0	61.5	65.9	56.3
<b>TiO<sub>2</sub></b>	0.80	0.81	0.87	0.92	1.05
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	17.0	18.1	18.6	19.1	20.2
<b>MgO</b>	2.82	2.85	3.81	2.30	3.23
<b>FeO</b>	5.69	7.03	10.0	6.86	8.38
<b>MnO</b>	0.25	0.10			0.18
<b>CaO</b>	3.50	1.54	0.81	0.17	1.59
<b>Na<sub>2</sub>O</b>	1.13	1.64	1.46	0.85	1.86
<b>K<sub>2</sub>O</b>	3.96	3.86	3.02	3.88	4.15
<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	0.15	0.15			
<b>Total</b>	100.00	100.08	100.07	99.98	96.94

\* Reported on a volatile-free basis (normalized to 100%) to aid comparison

1. "North American Shale Composite". Gromet *et al.* (1984).
2. Average of ~100 published shale and slate analyses (Ague, 1991).
3. Ave. pelite-pelagic clay (Carmichael, 1989).
4. Ave. of low-grade pelitic rocks, Littleton Fm, N.H. (Shaw, 1956).
5. Ave. of

# Grilla P-T para metapelitas

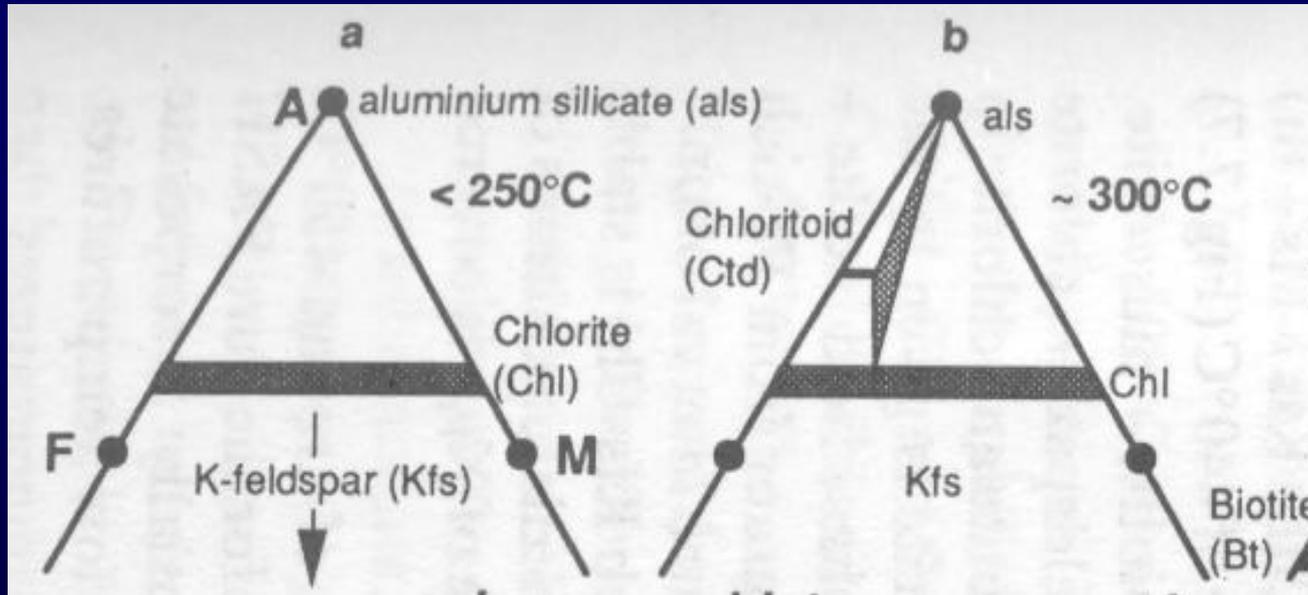
NKFMASH Petrogenetic Grid - Metapelites



<b>Ab</b> Albite	<b>Bt</b> Biotite	<b>Ged</b> Gedrite	<b>Ky</b> Kyanite	<b>Pl</b> Plagioclase	<b>Spr</b> Sapphire
<b>Alm</b> Almandine	<b>Chl</b> Chlorite	<b>Gra</b> Grossular	<b>Ms</b> Muscovite	<b>Prp</b> Pyrophyllite	<b>St</b> Staurolite
<b>Als</b> Aluminosilicate	<b>Chd</b> Chloritoid	<b>Grt</b> Garnet	<b>Mul</b> Mullite	<b>Qtz</b> Quartz	<b>Tlc</b> Talc
<b>An</b> Anorthite	<b>Cp</b> Carpholite	<b>Hc</b> Hercynite	<b>Oam</b> Ortoamphibole	<b>Rt</b> Rutile	<b>L</b> Liquid
<b>And</b> Andalusite	<b>Crd</b> Cordierite	<b>Ilm</b> Ilmenite	<b>Opx</b> Ortoproxene	<b>Fe-H2O</b> Ferro-Water	<b>Mg-</b> Magnesium-
<b>Ann</b> Annite	<b>Crn</b> Corundum	<b>Kfs</b> K-feldspar	<b>Phe</b> Phenigite	<b>Sil</b> Sillimninite	
<b>Ath</b> Anthophyllite	<b>Cum</b> Cusumingtonite	<b>Kln</b> Kaolinite	<b>Phl</b> Phlogopite	<b>Spl</b> Spinel	

# Progrado metamórfico según geoterma Barroviana

## Sistema KFMASH - Diagramas AFM



### Facies de subesquistos verdes

a)  $T < 250^\circ \text{C}$ : Qtz + Ill(Ms) + Chl + Prl (Kln) + Pg (Si Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> es bajo Kfs sustituye Prl). El grado de cristalinidad de illita indica si es metamórfica o diagenética ( $8,97^\circ 2\theta$ ; límite del índice de Kübler  $< 0,42^\circ \Delta 2\theta$ )

b)  $T \sim 300^\circ \text{C}$ : aparece el primer mineral enteramente metamórfico: el cloritoide ( $(\text{Fe}^{+2}, \text{Mg}, \text{Mn})_2(\text{Al}, \text{Fe}^{+3})_2[\text{O}(\text{OH})_2\text{SiO}_4]$ )

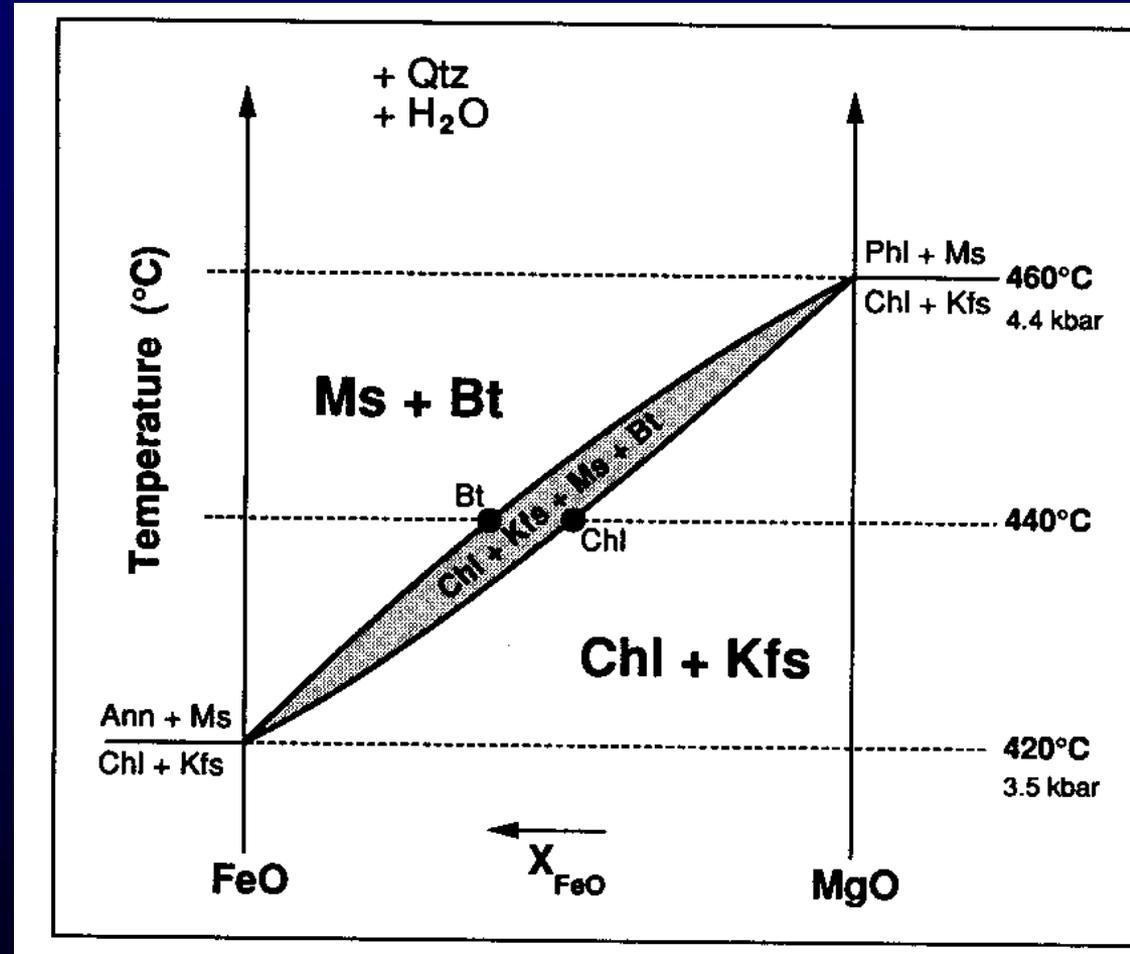


# Facies de esquistos verdes (baja T)

c) Cerca de 400° C, aparece la primera biotita a expensas de Chl + Kfs en metapelitas pobres en aluminio.

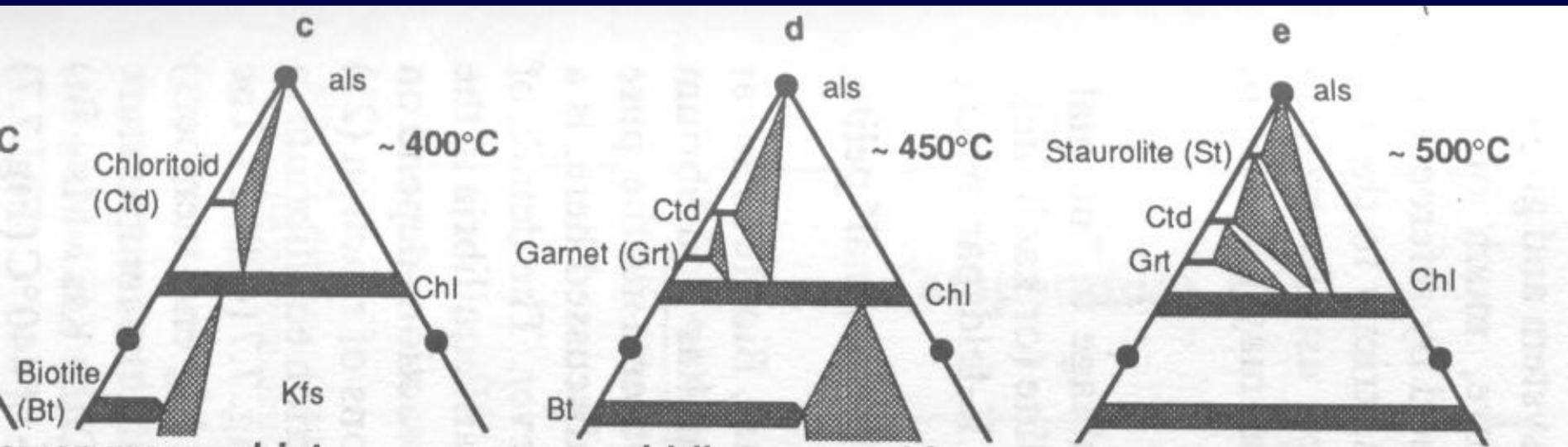
Reacción a 420° C y 3.5 kbar de tipo divariante (continua) en el sistema KFMASH

La paragénesis en equilibrio varía de T dependiendo de  $X_{\text{FeO}}$ . Por ejemplo, a 440° C puede ser **Ms-Bt**, **Chl-Kfs**, o **Chl-Kfs-Ms-Bt**



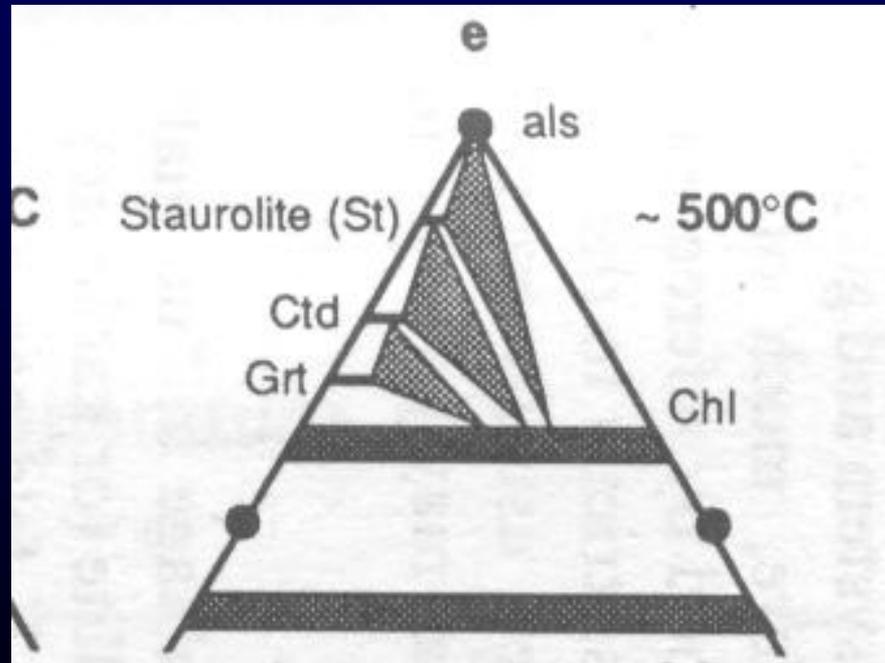
## Facies de esquistos verdes (T media)

d) A  $\sim 450^\circ\text{C}$  aparece el primer granate. En las metapelitas de baja T, los granates son **manganesíferos** (espessartínicos). A mayor T los granates incorporan progresivamente más FeO y sobre todo **más MgO** (almandino y piropo). La biotita en equilibrio a T mayores tiene más MgO que la de baja T.  $X_{\text{FeO}}$  en biotita disminuye con la T.

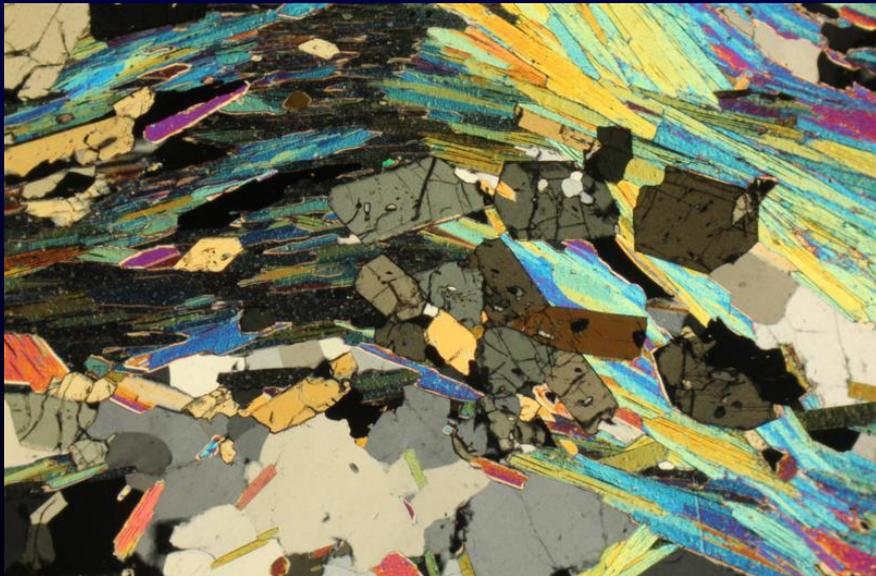
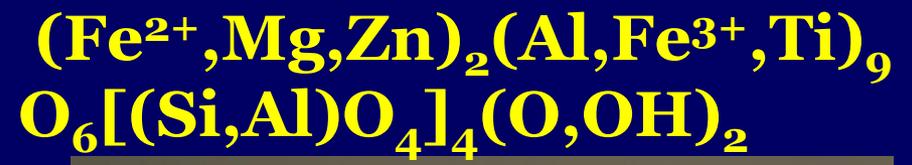


# Transición de facies de esquistos verdes a anfibolitas

e) A  $\sim 500^\circ\text{C}$ , la paragénesis Chl + Kfsp deja de ser estable hasta en las composiciones más ricas en MgO, y la desestabilización de Ctd da lugar a la primera aparición de estauroлита, que ya indica la transición a facies de anfibolitas. Asociaciones críticas: St-Ctd-Chl y St-Ky-Chl.

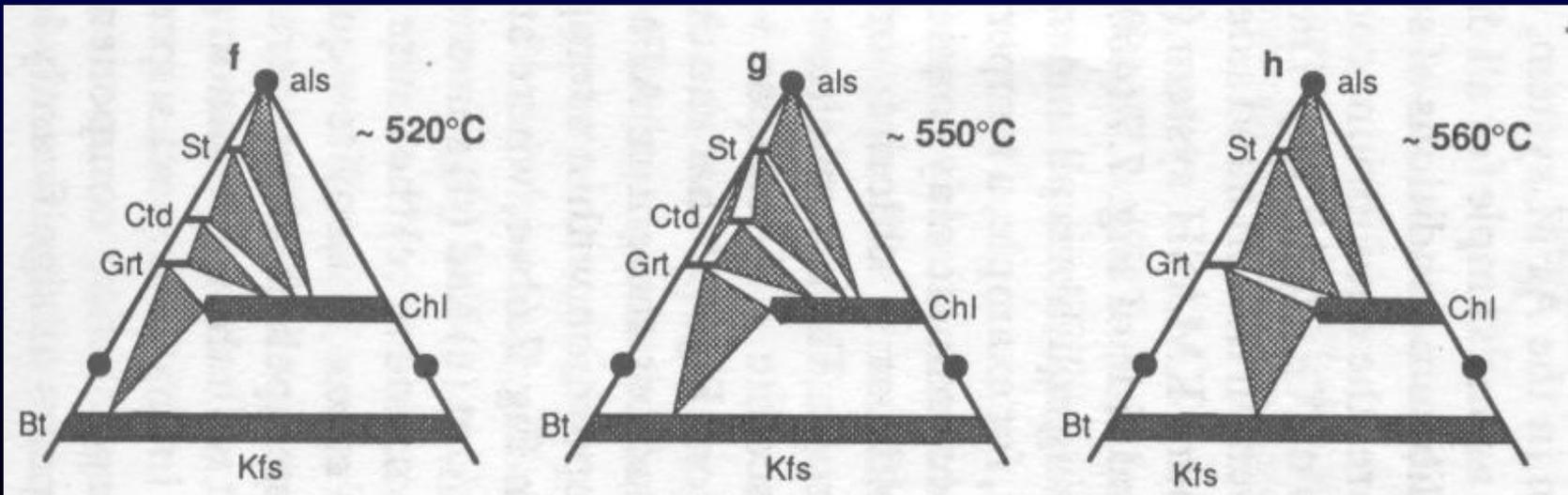


# Estaurolita -



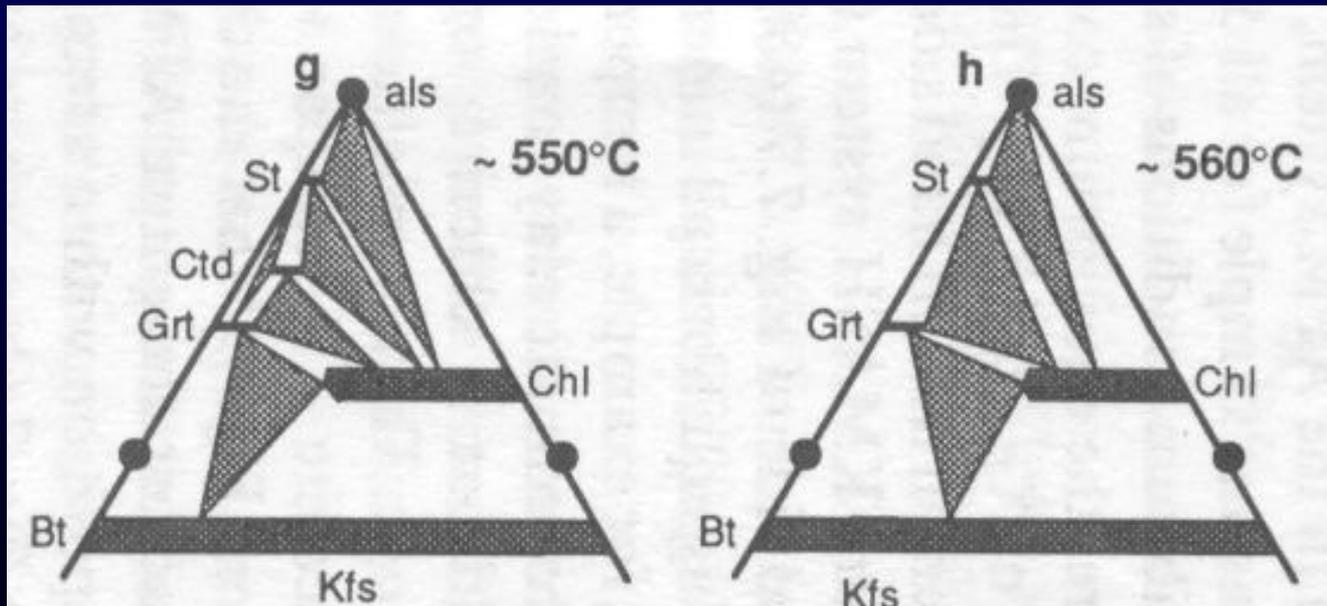
## Facies de anfibolitas

f) Entre 500° y 520° C, la clorita más rica en Fe deja de ser estable a expensas del par Grt + Bt. Esta asociación es estable incluso a más altas T, pero a relaciones Fe/Mg cada vez más bajas (diagramas f a h). Ojo: Grt-Bt puede estabilizar a menor T (470° C) si el protolito es rico en Mn y Ca.



## Facies de anfibolitas

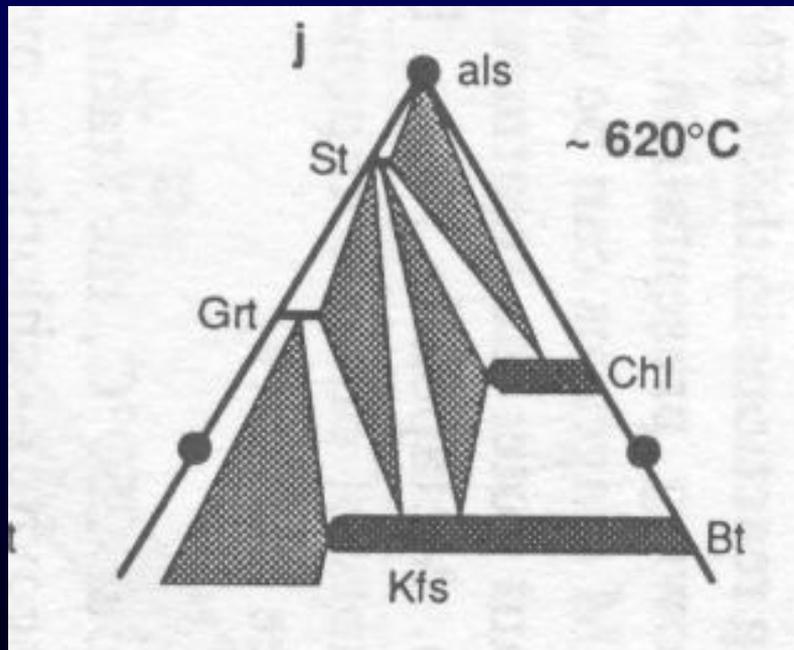
g-h) Entre  $550^{\circ}$  y  $560^{\circ}$  C desaparece el mineral cloritoide de la roca, mediante la reacción:  $Ctd = St + Grt + Chl$   
La asociación  $St + Ctd + Grt$  tiene un rango de estabilidad de  $10^{\circ}$  C.





## Facies de anfibolitas

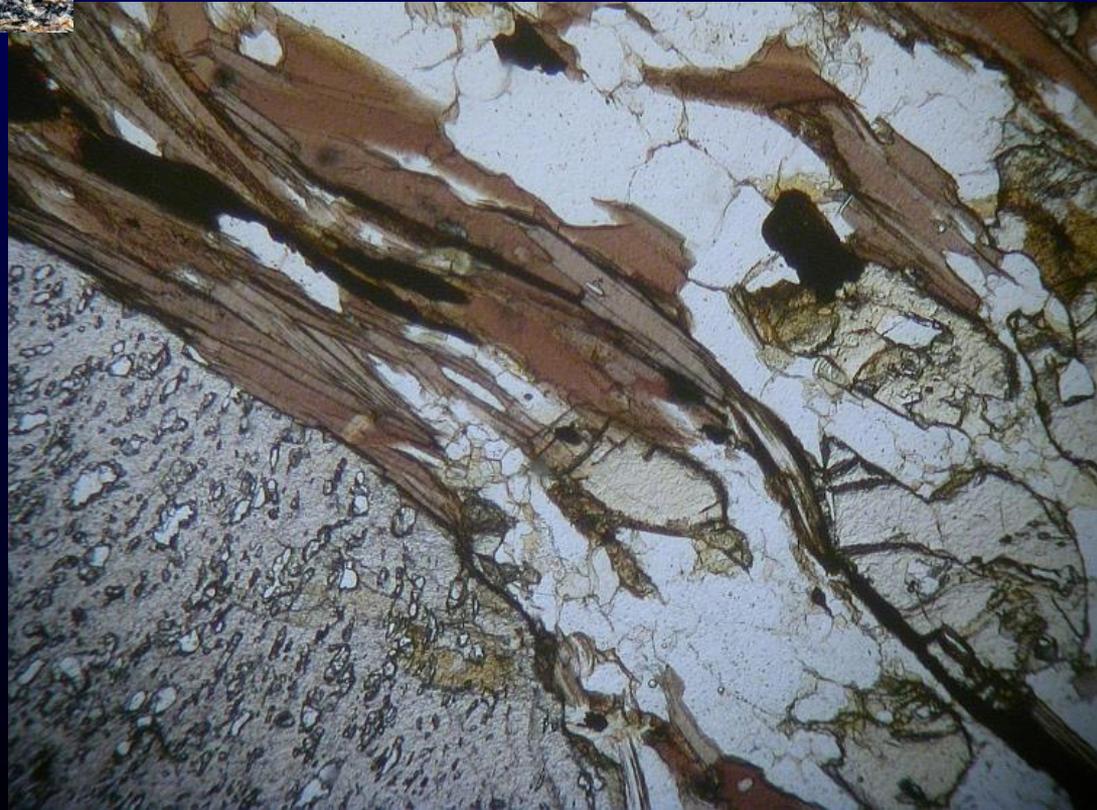
j) A  $T \sim 620^\circ \text{C}$  aparece por primera vez el par estable  $\text{St} + \text{Bt}$ . Se considera que esta paragénesis indica el grado medio de facies de anfibolitas. La reacción discontinua significativa que genera este par es:



En el campo esta reacción es mapeable pues hay un abrupto cambio en los minerales paragenéticos en contacto mutuo



Esquisto biotítico  
estaurolítico con granate

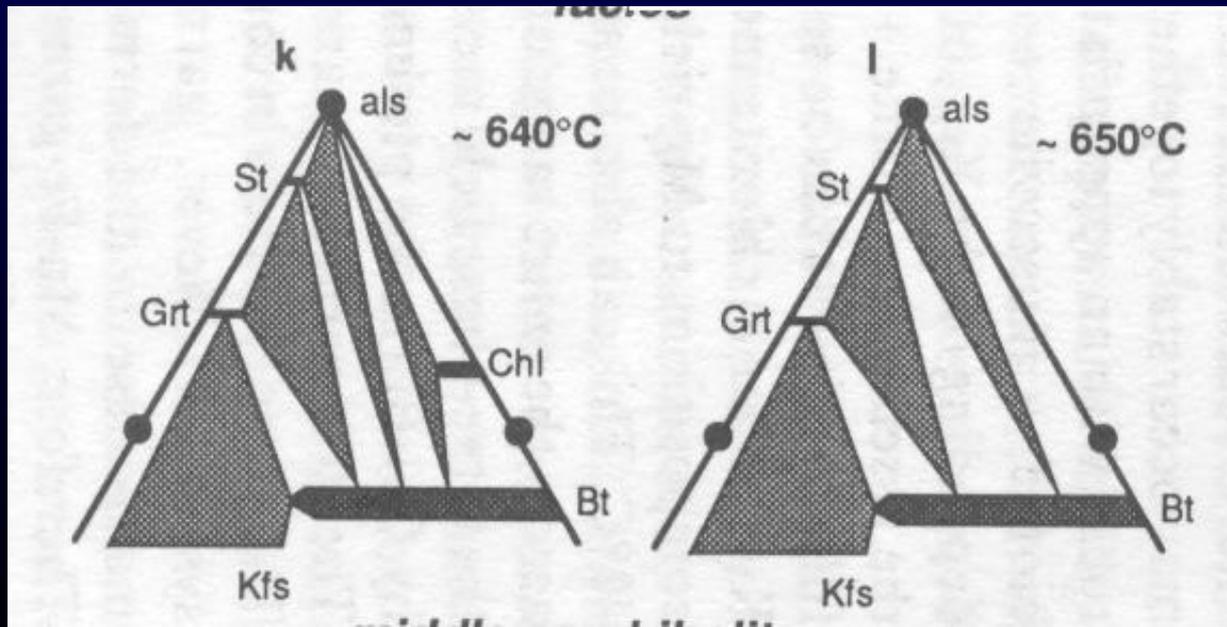


# Facies de anfibolitas

k-1) A T ~640° C bajo la reacción discontinua:



comienza a desaparecer definitivamente la clorita (rica en Mg). El rango total de vigencia de esta reacción son 10° C, en el que toda la clorita es consumida en rocas saturadas en cuarzo y muscovita. Nota: Ky se forma a gradiente de presiones medias y Sil, a gradiente de presiones bajas. La coexistencia de Bt-Als indica la entrada al grado alto de facies de anfibolitas



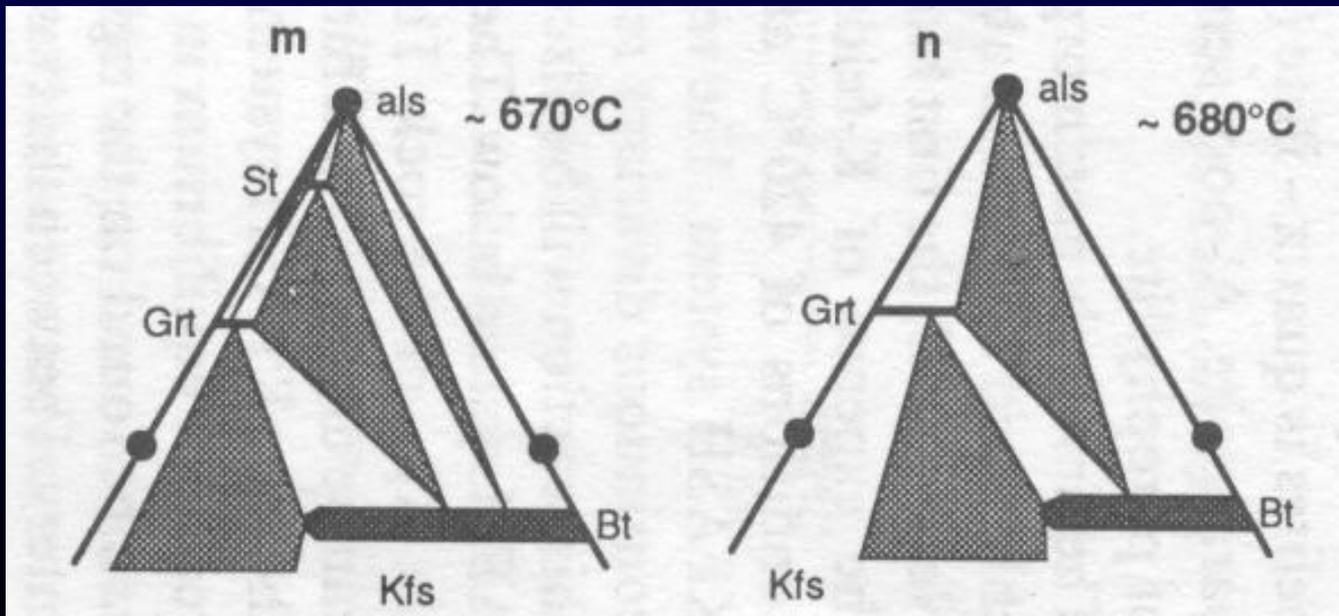
## Facies de anfibolitas

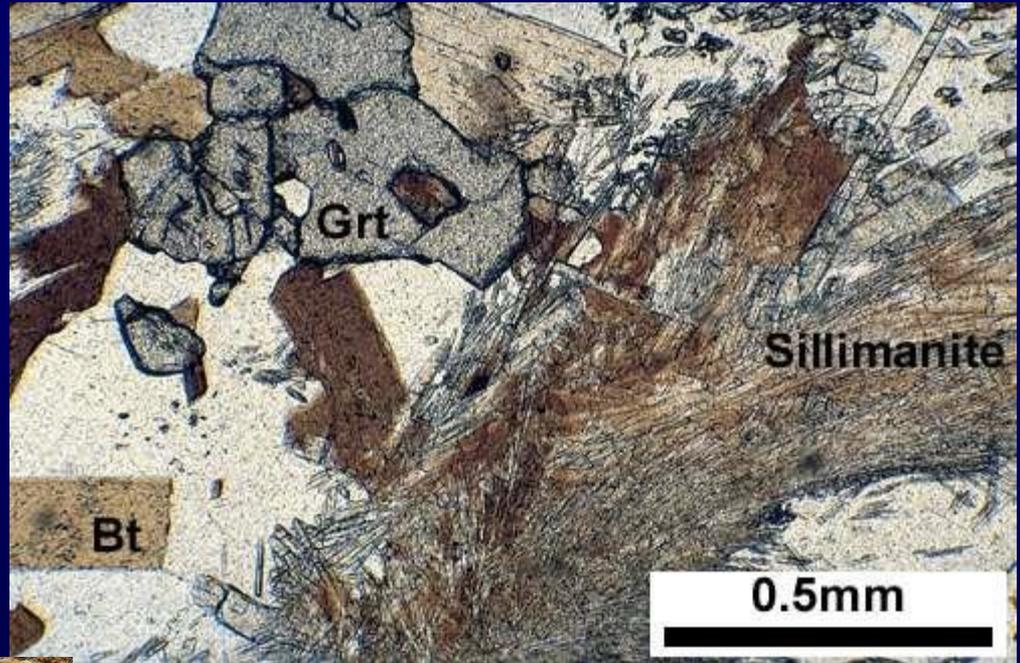
m) Estauroлита rica en Fe se desequilibra a  $\sim 670^\circ\text{C}$  formando Grt + Ky (Sil) o St + Grt + Ky (Sil), menos frecuentemente.

n) La estauroлита desaparece completamente de metapelitas saturadas en cuarzo a  $680^\circ\text{C}$  mediante la reacción discontinua



Aquí estamos en la facies de anfibolitas de alta T. Si hay saturación en  $\text{H}_2\text{O}$ , esta reacción coincide con el primer fundido parcial de metapelitas.





Gneis Bt-Grt-Sil

(incipientemente migmático)

# Facies de granulitas

Si  $P_{\text{fluidos}} \ll P_{\text{total}}$  (es decir, condiciones de deshidratación progresiva) y por encima de los 680-700° C, las rocas entran progresivamente en facies de granulitas

En rocas donde se formarían ortoanfíboles, éstos se descomponen por la reacción (750-800° C)



En rocas pelíticas donde hay Qtz en exceso, la aparición de Opx marca el ingreso a la facies de granulitas. Una de las reacciones más importantes que da origen a opx es:



Esta reacción remueve los filosilicatos remanentes, comenzando a los 800° C.

Granulitas metapelíticas ricas en Fe  
Grt-Sil-Crd o Grt-Sil (+Qtz, Kfs)

Granulitas ricas en Mg  
Crd-Bt-Opx o Crd-Opx-Grt (+Qtz, Kfs)

Bt es muy magnesiana porque es metaestable  
(depende del equilibrio de la reacción formadora  
de opx, que consume toda la Bt ferrosa)

La interrelación de las diversas paragénesis  
depende de P y T, y se ven en la Fig. b.

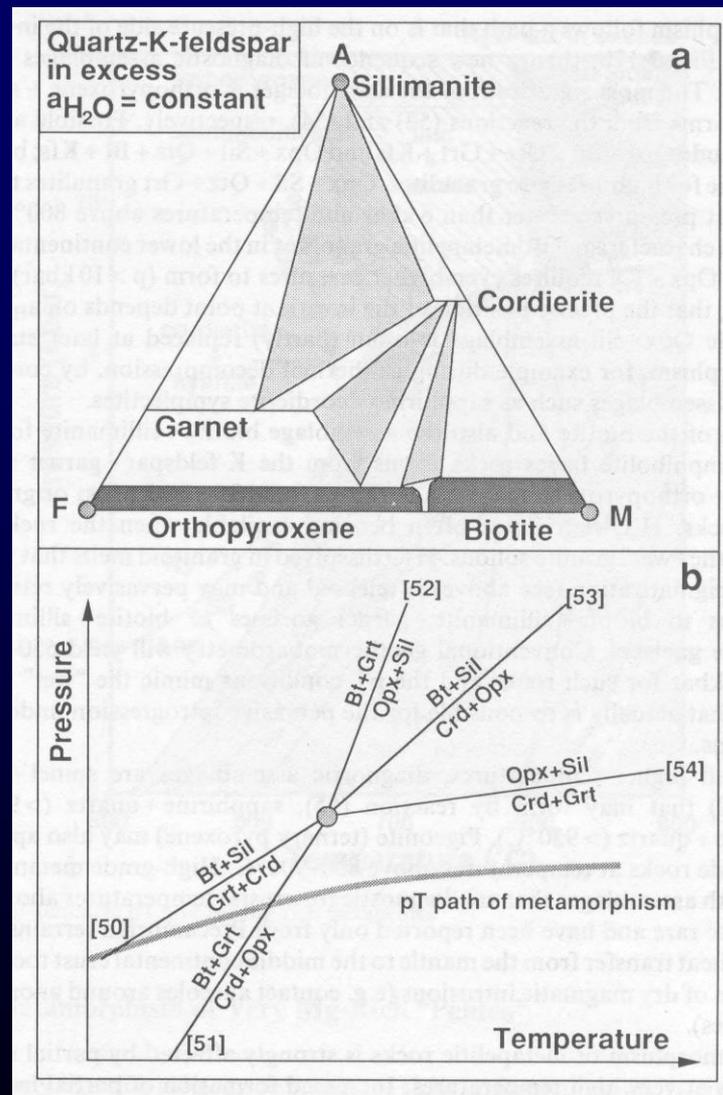
Ej: Bt-Sil cambian a Grt-Crd por aumento de T  
Bt-Grt a Crd-Opx si la T aumenta más, pero si ese  
aumento es acompañado de un incremento de P es  
reemplazada por Opx-Sil

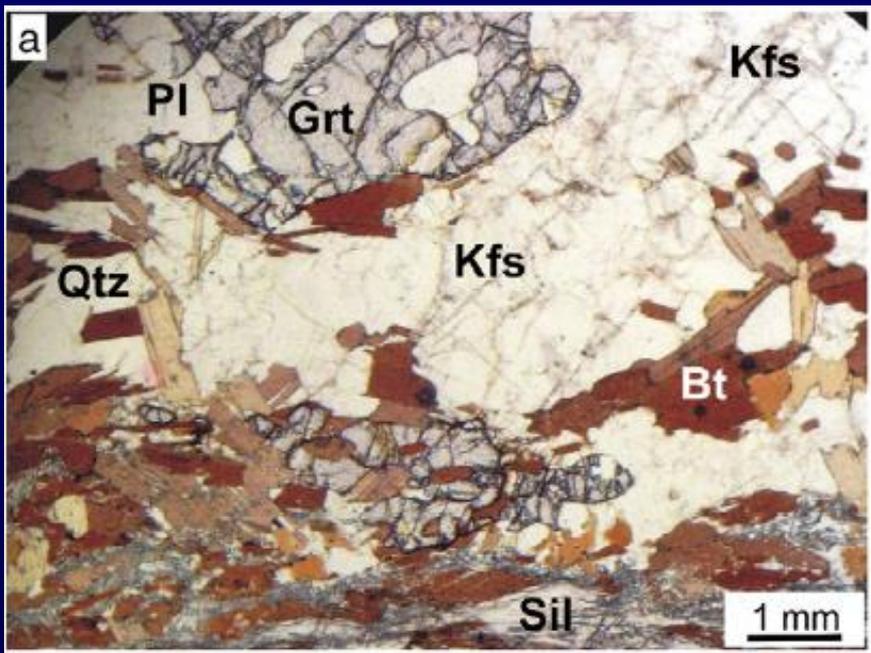
Metapelitas con las paragénesis

Opx-Sil-Qtz-Grt-Kfs u Opx-Sil-Qtz-Bt-Kfs son  
típicas de granulitas de corteza inferior

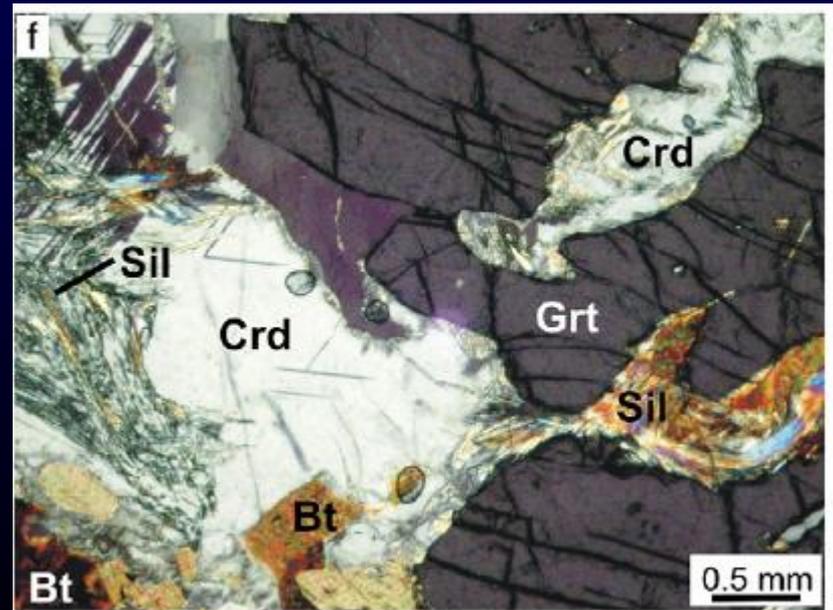
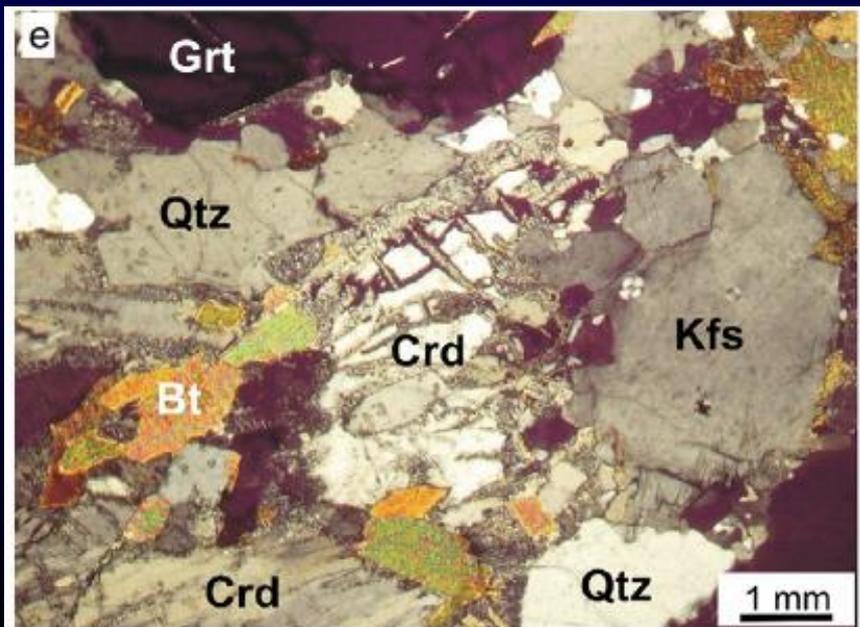
Exceso de Qtz y Kfs

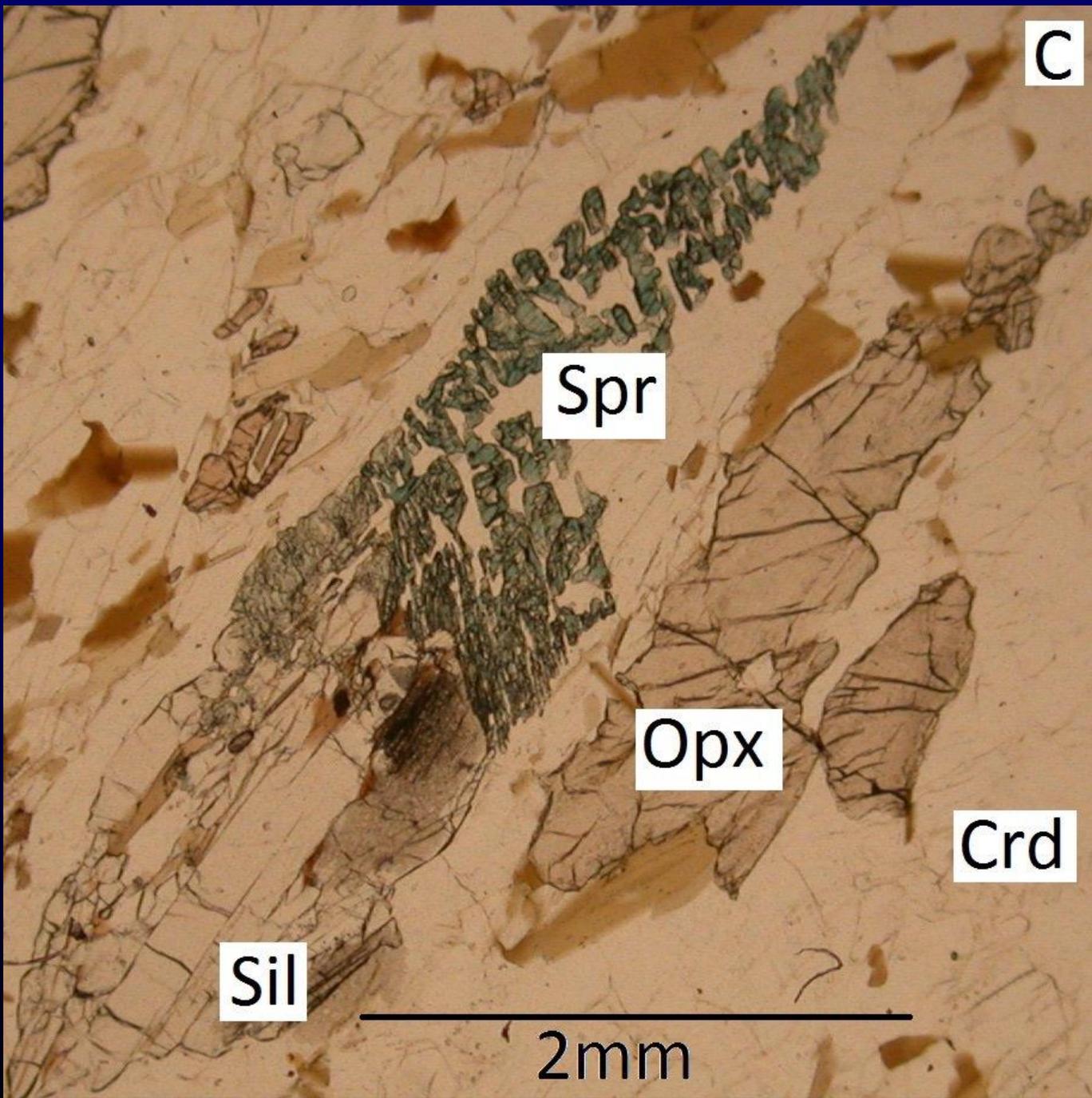
750° C – 5 kbar –  $P_{H_2O} \ll P_{total}$





a- Grt-Sil-Kfsp-Pl-Bt  
e- Grt-Crd-Kfsp  
f- Grt-Crd-Sil-Bt



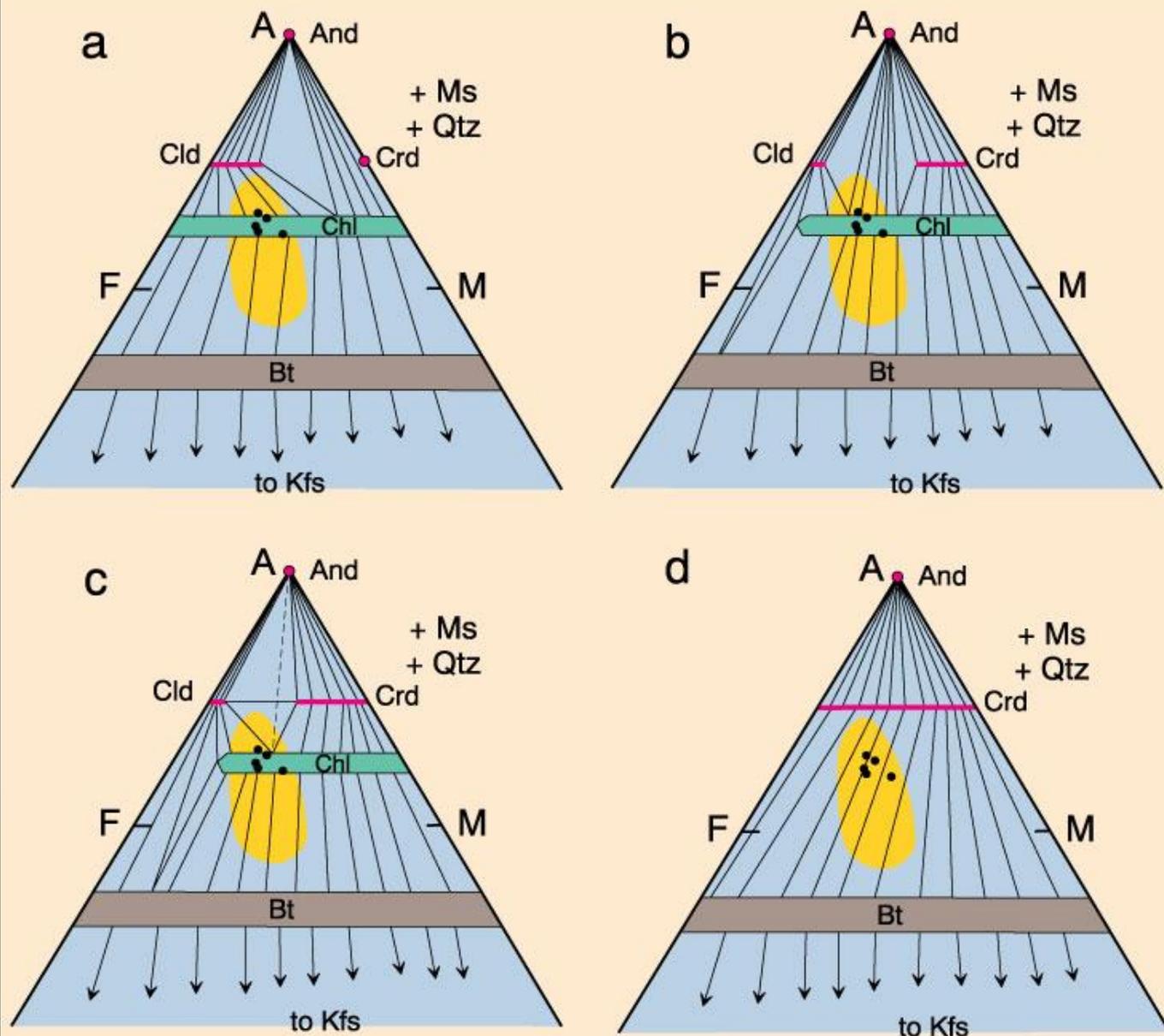


Opx-Sil-Crd-Spr

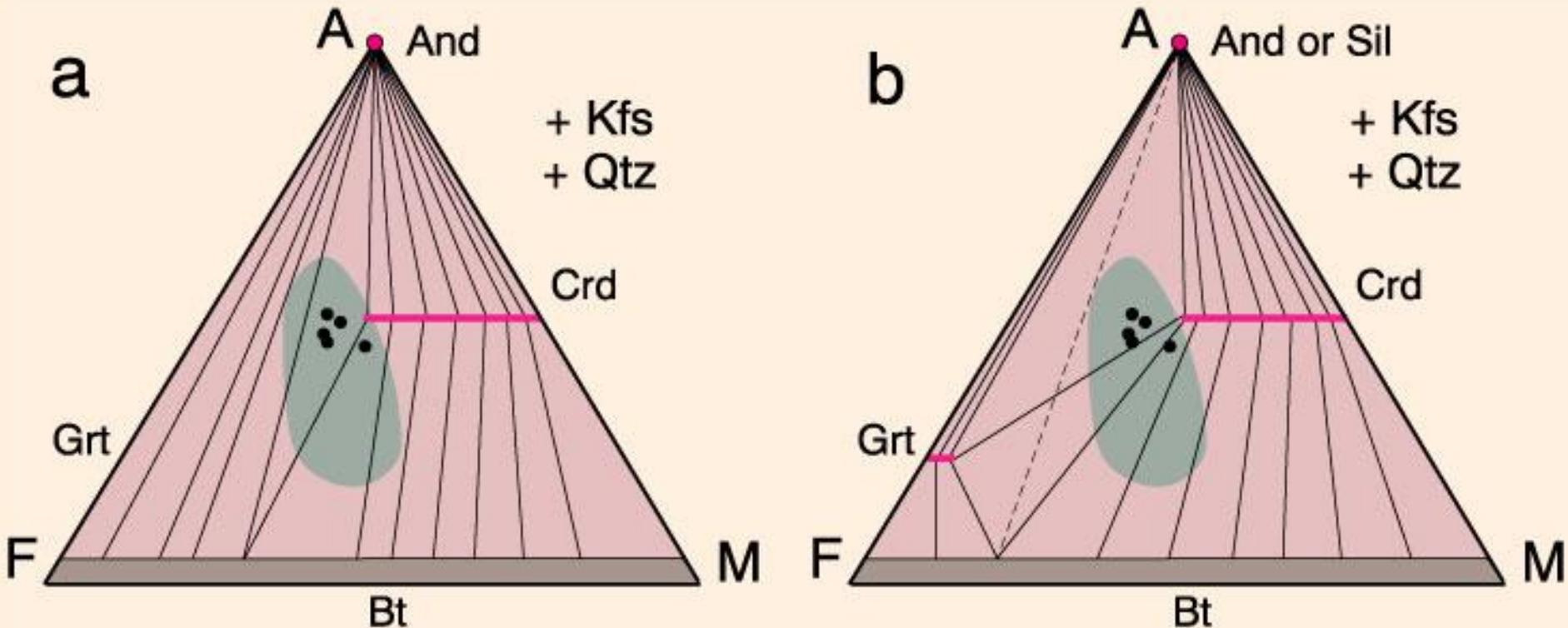
Zafirina (Spr)  
 $(Mg,Al)_8(Al,Si)_6O_{20}$

# Si se trata de un gradiente P/T bajo (contacto)

Diagramas AFM (proyectados desde muscovita). **a.** En primera instancia se forma cordierita rica en Mg por la reacción  $\text{Chl} + \text{And} + \text{Qtz} = \text{Crd} + \text{H}_2\text{O}$ . **Facies de hornfels de albita-epidoto.** **b.** El rango composicional del cloritoide se achica, mientras que el de la cordierita se expande a composiciones más ricas en Fe (ver triángulos Chl-Cld-And y And-Chl-Crd). **(d)** En hornfels horblendíferos la clorita se pierde en pelitas muscovíticas a expensas de Bt-Crd



En la facies de **hornfels piroxénicos a**. El rango composicional de Crd se vuelve cada vez más magnesiano, a la vez que se estabiliza la paragénesis Crd-Bt-And a partir de la reacción de  $\text{Chl} + \text{Ms} + \text{Qtz}$  **b**. Granate es introducido a partir de la reacción  $\text{Bt} + \text{And} + \text{Qtz} = \text{Crd} + \text{Grt} + \text{Kfs} + \text{H}_2\text{O}$ . A estas T ( $>670^\circ \text{C}$ ) puede comenzar la fusión parcial si la  $P_{\text{fluidos}}$  es alta





Dave Waters Teaching Resources

## Hornfels Crd-And-Bt



# Metamorfismo y Fusión Parcial: las migmatitas

Del griego *migma*: mezcla.

Son rocas que presentan aspectos mixtos, una porción es de tipo gnéisico y la otra parece un cuerpo magmático leucocrático.

Dos tipos diferentes:

**Migmatitas de inyección o arteríticas:** rocas gnéisicas venuladas, cuyas porciones leucocráticas de aspecto magmático proceden de fuera de la roca.

**Migmatitas anatécnicas o anatexitas:** todas las porciones de la roca tienen un origen común, a partir de un proceso de fusión parcial que acompaña a los procesos subsólidos del metamorfismo de rocas con cuarzo y feldespatos (K y Ab), pelíticas o cuarzo-feldespáticas (granitoides, grauvacas y areniscas sub-arcósicas).

## Terminología

**Paleosoma:** de orden genético. Indica la porción de la roca de aspecto gnéisico que fue precursora, por anatexis, del *leucosoma*.

**Neosoma:** de orden genético. Son las partes de la migmatita neoformadas por el proceso de fusión (*leuco y melanosomas*)

**Leucosoma:** de orden descriptivo. Es la porción de la roca rica en minerales félsicos (Qtz + FK ± Pl).

**Melanosoma:** de orden descriptivo. Banda delgada de minerales máficos y aluminosos que se observa como salvanda del leucosoma. Genéticamente es interpretada como la acumulación de minerales refractarios durante la anatexis que formó el leucosoma

**Mesosoma:** de orden descriptivo. Porción de roca intermedia entre el leuco y melanosoma. Suele paralelizarse ya sea con el término *paleosoma* o bien con el de *resister*

# Terminología

**Resister:** porciones de la roca original que no sufrieron fusión. Grnte. porciones metacuarcíticas o intercalaciones anfibolíticas con una T solidus mayor.

**Restita:** material residual que ha quedado luego de haberse movilizado el fundido. Generalmente compuesta por minerales refractarios ricos en Al, Fe y Mg que se forman como fases sólidas peritéticas durante el proceso de fusión parcial.

**Metatexita:** migmatita anatética de fusión parcial incipiente, resultando en estructuras bandeadas donde alternan porciones fundidas con otras no fundidas

**Diatexita:** anatexita donde la fusión es tan avanzada que la estructura es semejante a la de un granitoide (nebulítica o schlieren) sin distinguirse claramente las porciones que no sufrieron fusión.

# Estructuras de las migmatitas

a- Agmatítica

b- En red o flebítica

c- En bloques

d- Plegada

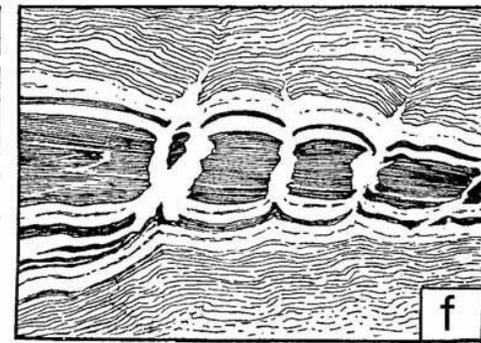
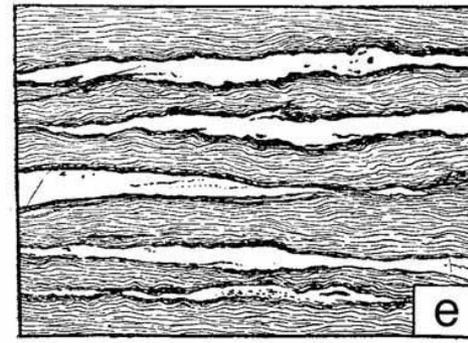
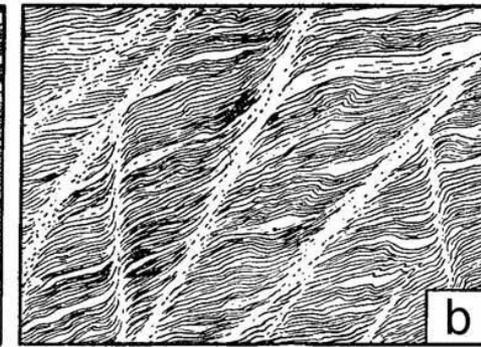
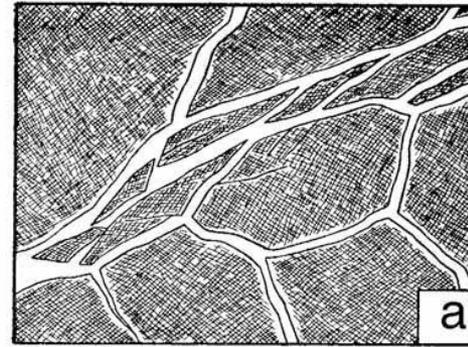
e- Estromatítica

f- Abudinada

g- En schlieren

h- Nebulítica

i- homogénea o diatexítica



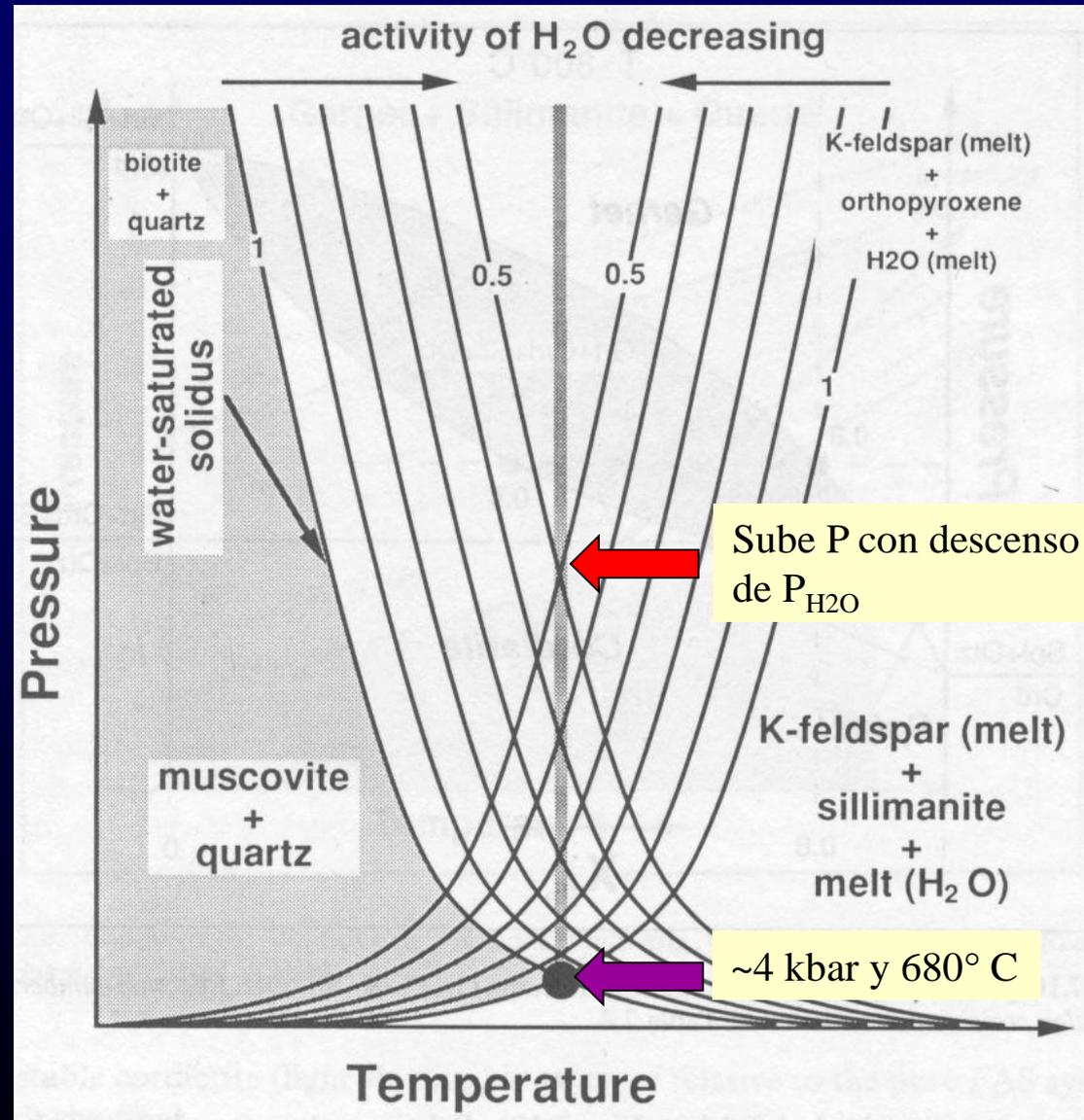
**Anatexis:** reacciones de deshidratación (desestabilización de micas) bajo condiciones de  $P_{\text{fluidos}} = P_{\text{total}}$  y  $T > 650^\circ \text{C}$ .

**Ms “out”**

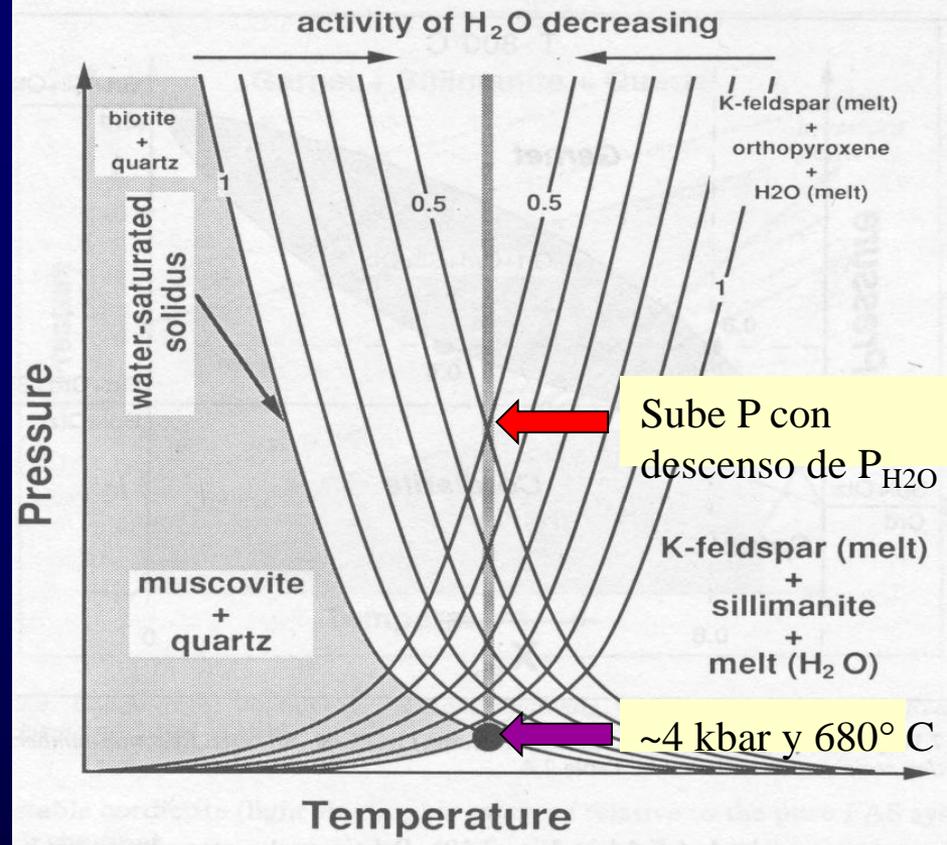
**Ms+Qtz = Als (Sil-And) + Kfs+H<sub>2</sub>O**

El componente volátil y el Kfs en esta reacción, siempre que se desarrolle por encima del solidus granítico saturado en agua, se disuelven en el fundido, mientras que el producto sólido es únicamente Sil que queda como residuo si el fundido se moviliza.

No confundir: por debajo de la curva de sólidos Kfs es un producto sólido más, y tanto And como Sil aparecen, dependiendo de P.



Una vez que se supera la T del sólido granítico, el cuarzo, plagioclasa y Kfs pre-existentes en la roca (sistema haplogranítico) también comenzarán a fundir, dependiendo de  $P_{total}$  y  $P_{H_2O}$ . Mientras menor es la  $P_{H_2O}$  mayor es la T de fusión y mayor la capacidad de segregación y movilización de los fundidos  $\Rightarrow$  granitos anatécnicos. La movilidad del fundido depende de otros factores, como % de fusión (depende de la fertilidad de la roca), existencia de P dirigidas. Si la movilidad fue escasa veremos migmatitas metatexíticas o diatexitas muy “sucias”, plagadas de minerales restícticos, producto de su escasa segregación desde la fuente.



Reacciones de deshidratación de la Bt ( $P > 4$  kbar y  $T > 720^\circ C$ , grlte.  $> 800^\circ C$ )



# Estructuras de migmatitas

Flebíticas



Agmatítica



Plegada - venular

En bloques

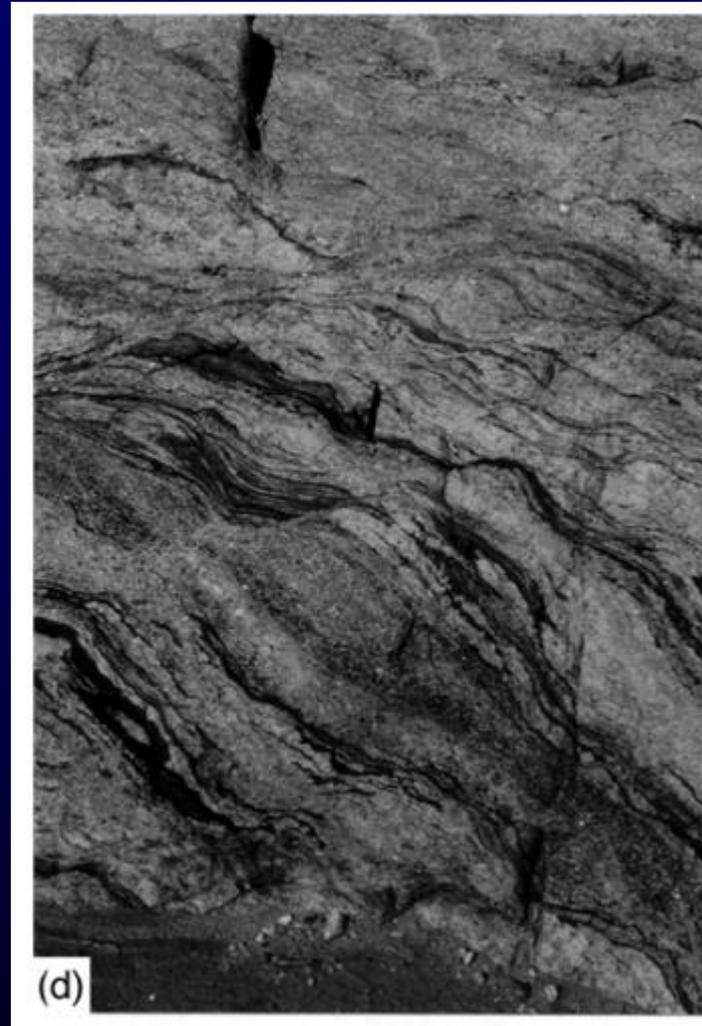




Ptigmatítica

Estromatítica





Schlieren o Schollen



Nebulítica, con resister anfibolítico



Diatexitas