

# **Metamorfismo de Rochas Pelíticas (2)**

## *Variações no padrão zonal barrovidiano clássico*

Terrenos com zoneamentos metamórficos semelhantes ao encontrado nas Terras Altas da Escócia são muito comuns.

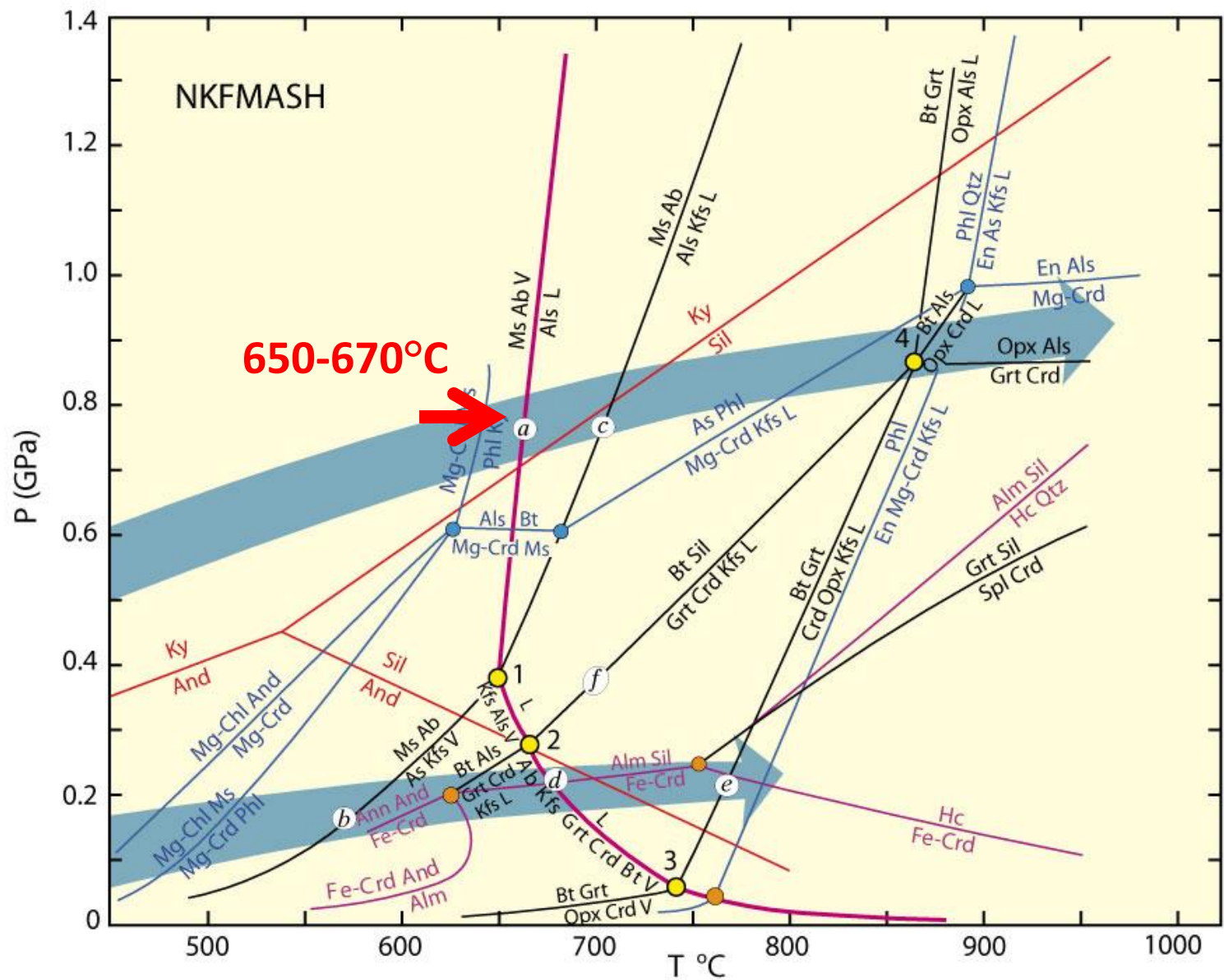
Entretanto, associações distintas não são incomuns. Podemos citar quatro tipos de situações principais que fogem ao padrão:

- 1) O metamorfismo progride para temperaturas mais elevadas, resultando em zonas adicionais.
- 2) Rochas de diferentes composições (mais aluminosas) geram zonas com associações diferentes.
- 3) O metamorfismo ocorre sob pressões mais baixas.
- 4) O metamorfismo ocorre sob pressões mais elevadas.

## *Variações no padrão zonal barroviiano clássico*

- 1) O metamorfismo progride para temperaturas mais elevadas, resultando em zonas adicionais.

O que ocorre se a rocha continuar sendo aquecida a temperatura acima da isógrada da sillimanita (> 650-700 °C)?



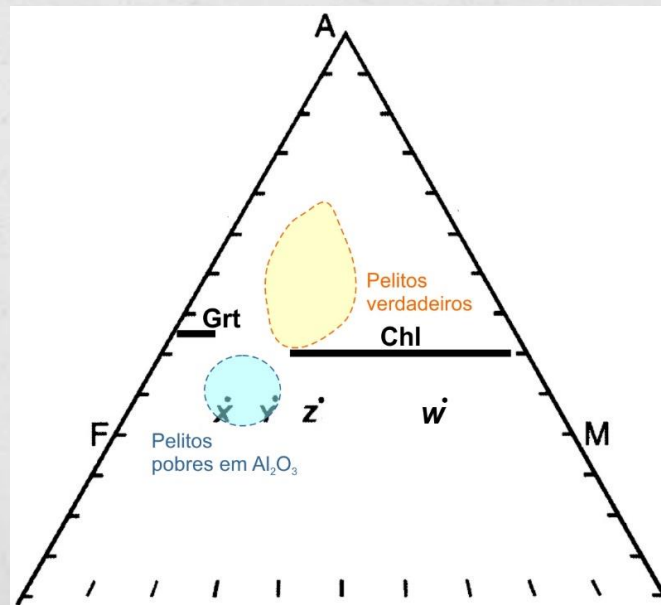
Winter (2010) Principles of Igneous and Metamorphic Petrology 2<sup>nd</sup> edition. Prentice Hall.  
 (Adaptado de Spear et al., 1999)



# Variações no padrão zonal barrovioano clássico

- 1) O metamorfismo progride para temperaturas mais elevadas, resultando em zonas adicionais.
- 2) Rochas de diferentes composições (mais aluminosas).

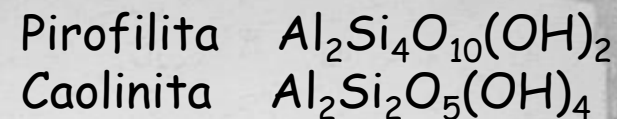
## Metapelitos ricos em $Al_2O_3$



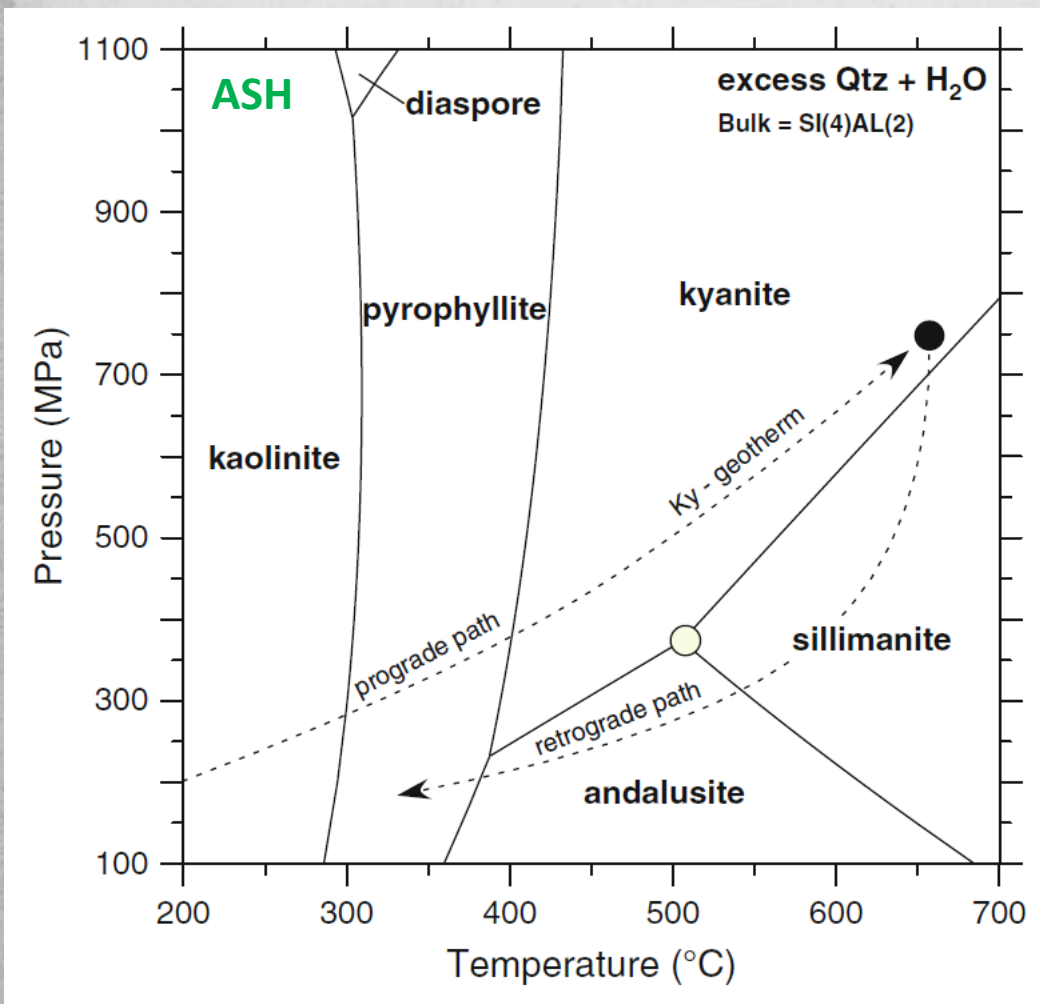
# Principais minerais metamórficos (KFMASH)

granada ←	$(\text{Fe-Mg})_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$
→ cianita, andalusita e sillimanita ←	$\text{Al}_2\text{SiO}_5$
cordierita	$\text{Mg}_2\text{Al}_4\text{Si}_5\text{O}_{18}\text{H}_2\text{O}$
→ cloritóide	$\text{FeAl}_2\text{SiO}_3(\text{OH})_2$
estauroлита ←	$\text{Fe}_4\text{Al}_{18}\text{Si}_{7.5}\text{O}_{48}(\text{OH})_4$
muscovita ←	$\text{KAl}_2\text{AlSi}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$
→ biotita	$\text{K}(\text{FeMg})_3\text{AlSi}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$
clorita ←	$(\text{FeMg})_5\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_4$
quartzo ←	$\text{SiO}_2$
feldspato potássico	$\text{KAlSi}_3\text{O}_8$
hercinita	$\text{FeAl}_2\text{O}_4$
espinélio	$\text{MgAl}_2\text{O}_4$
corundum	$\text{Al}_2\text{O}_3$
ortopiroxênio	$(\text{Fe-Mg})_2\text{Si}_2\text{O}_6$
safirina (442)	$\text{Mg}_4\text{Al}_8\text{Si}_2\text{O}_{20}$
safirina (793)	$\text{Mg}_{3.5}\text{Al}_9\text{Si}_{1.5}\text{O}_{20}$

# Metapelitos ricos em Al



## Sub-xisto-verde

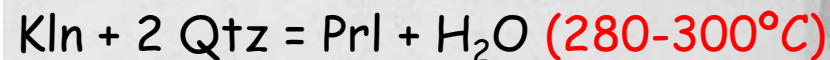


Sistema ASH:

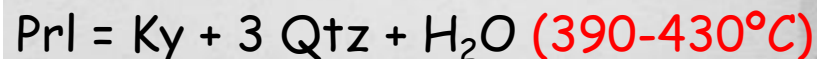
Relações entre fases e reações no ápice A do diagrama AFM.

Reações (ASH) (fluido puro  $\text{H}_2\text{O}$ ):

Formação de pirofilita por quebra de caolinita (sub-xisto-verde):



Quebra de pirofilita para formação de cianita ( $> 2,5$  kbar) ou andalulita ( $< 2,5$  kbar):



Adicionando  $\text{FeO}$  (Sistema FASH) = + Chl na paragênese (baixa temperatura)

# Metapelitos ricos em Al

## Zona do Cloritóide (Cld + Chl)

Cloritóide é o primeiro mineral metamórfico formado em metapelitos verdadeiros durante a progressão do metamorfismo.

Reação contínua no sistema KFMASH:

$\text{Fe-Chl} + 4 \text{ Prl} = 5 \text{ Cld} + 2 \text{ Qtz} + 3 \text{ H}_2\text{O}$  ( $\sim 280^\circ\text{C}$ ) — início do metamorfismo

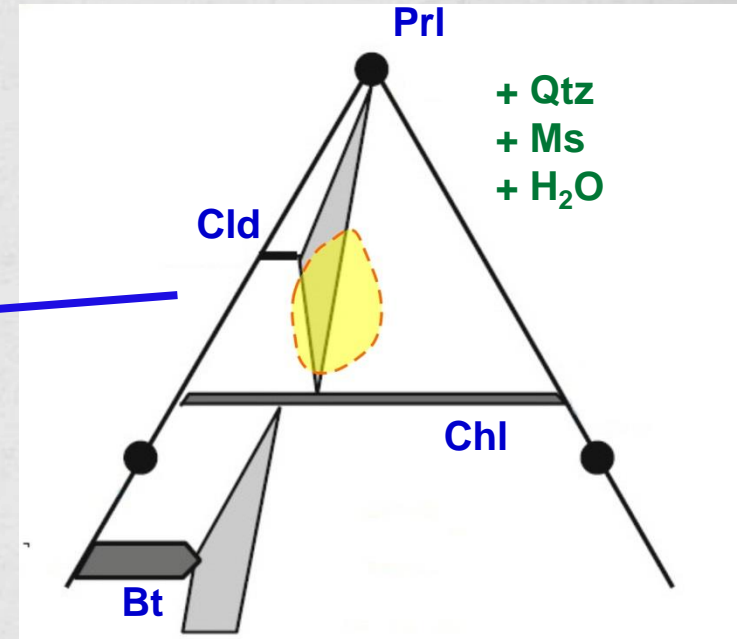
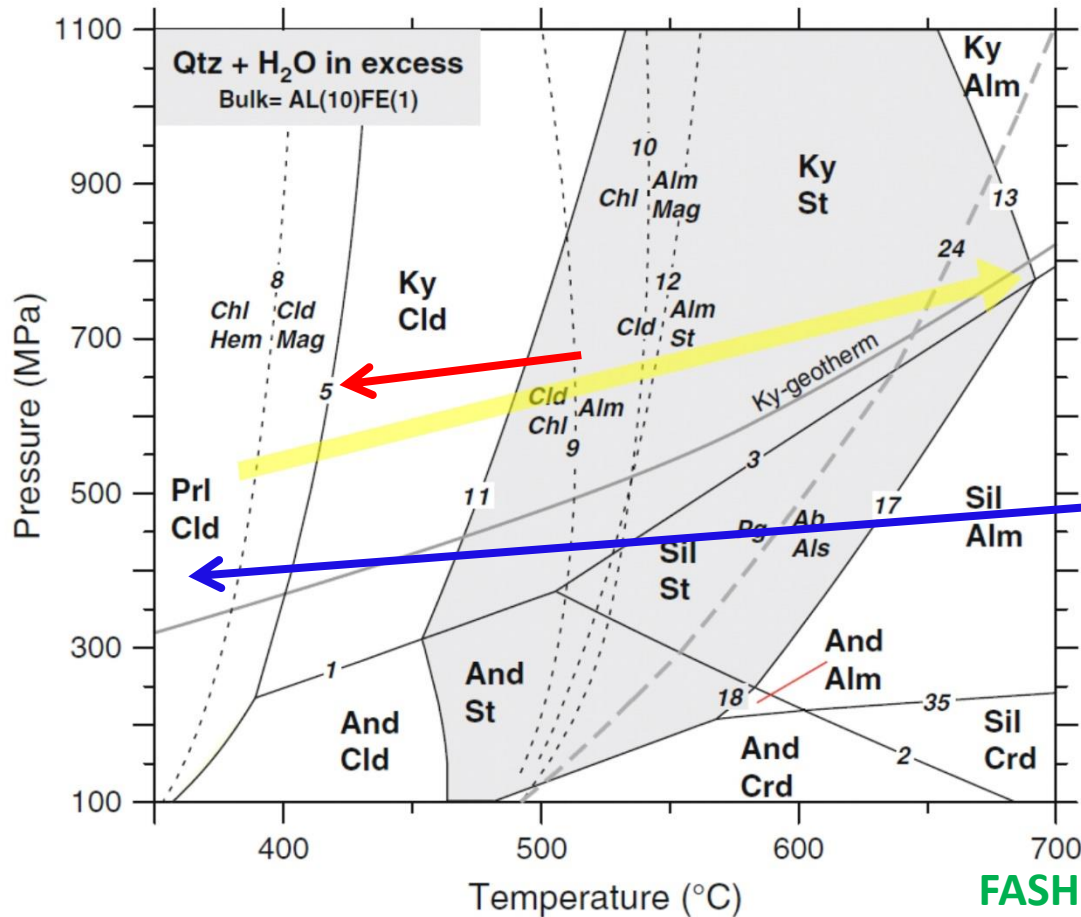
Associação:  $\text{Chl} + \text{Cld} + \text{Prl}$



# Metapelitos ricos em Al

## Zona do Cloritóide

Cld + Chl + Prl

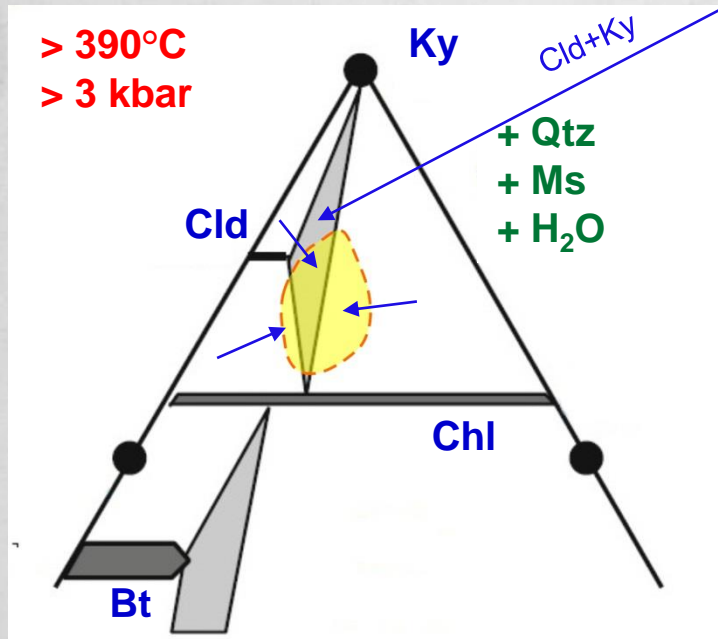


Não atravessou a reação:  $\text{Prl} = \text{Ky} + 3 \text{Qtz} + \text{H}_2\text{O}$  ( $< 390\text{-}430^\circ\text{C}$ )

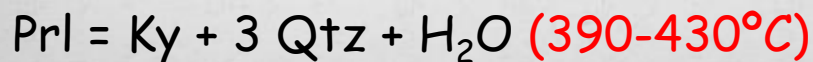
# Zona do Cloritóide (Prl-fora)

$Ky + Cld + Chl$

Xisto-verde intermediário



Reação (ASH) (fluido puro  $\text{H}_2\text{O}$ ):





# Zona do Cloritóide (ricos em Al)

versus

# Zona da Biotita (pobres em Al)

> 400°C

> 4 kbar

Ky

+ Qtz

+ Ms

+ H<sub>2</sub>O

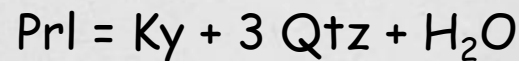
Cld

Chl

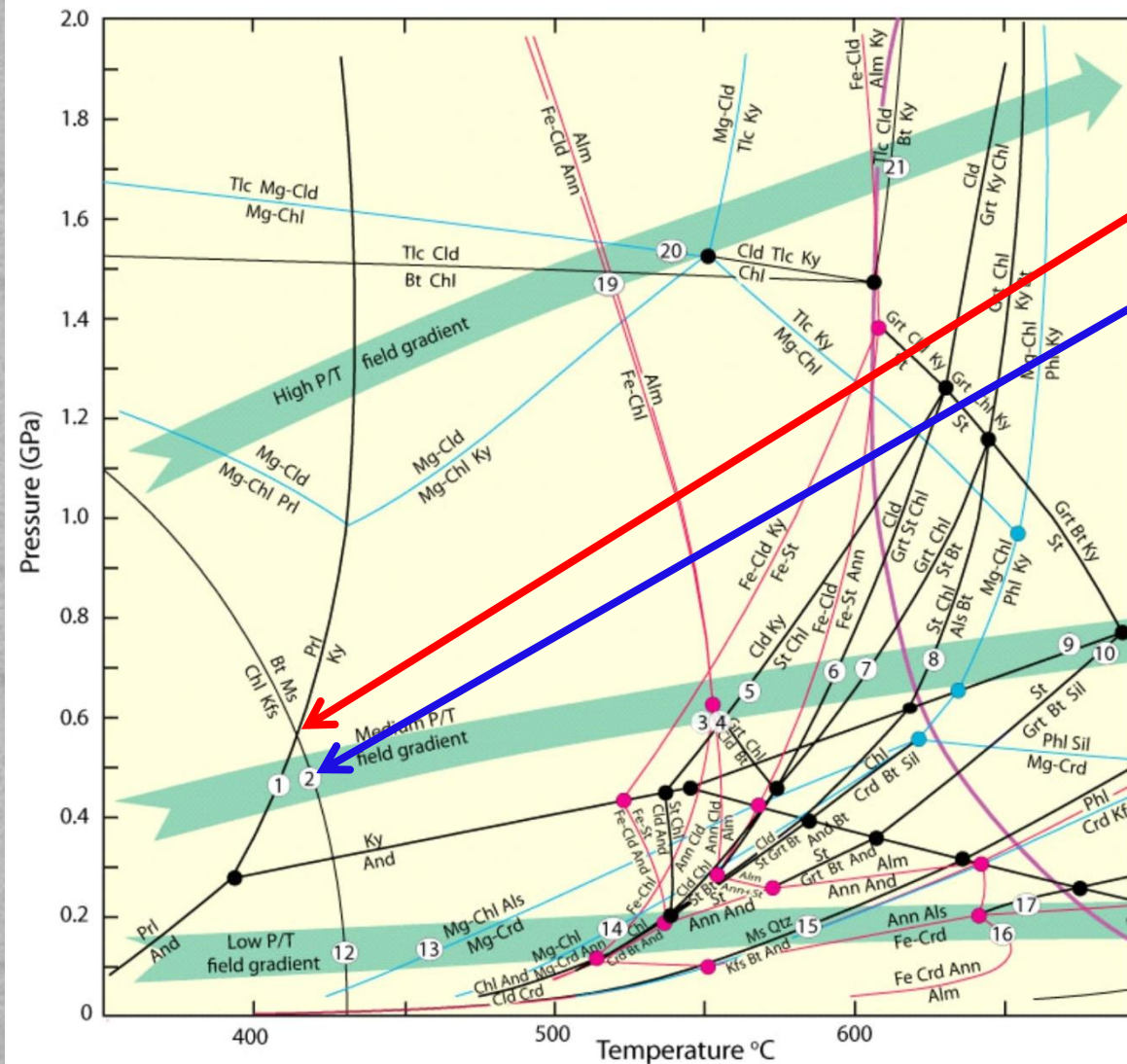
Bt

Ky + Cld + Chl (Prl-fora)

Equivalente da zona da biotita em metapelitos pobres em Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

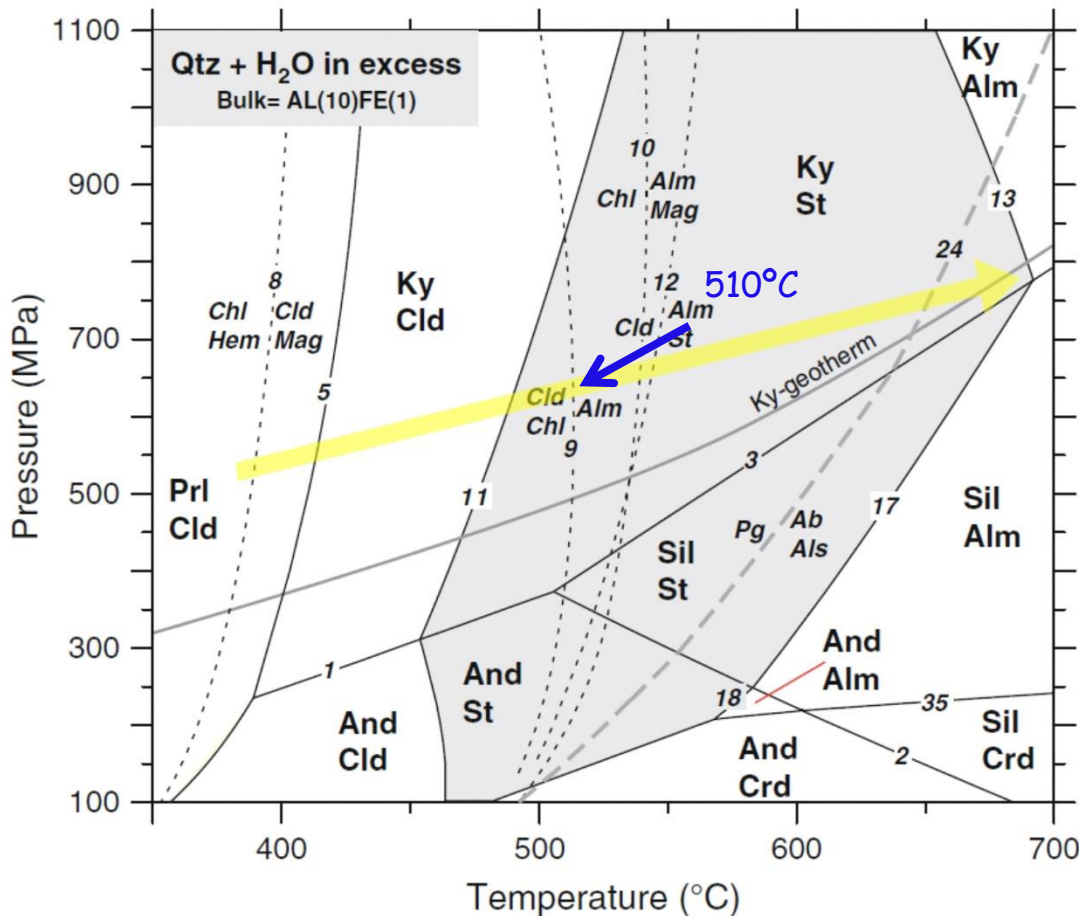
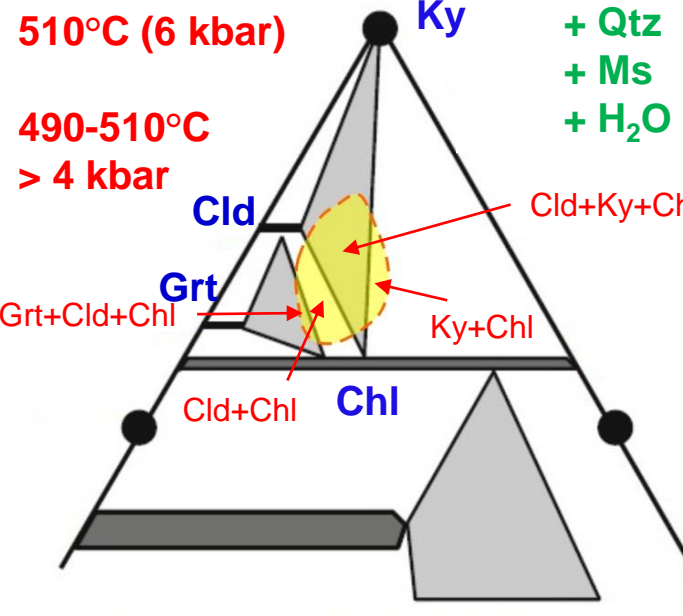
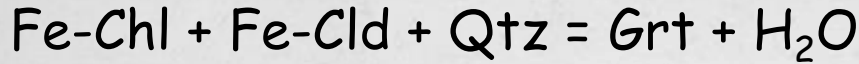


(390-430°C, > 2,5 kbar)



# Zona da Granada (fácies xisto-verde superior)

Reação contínua (FMASH):

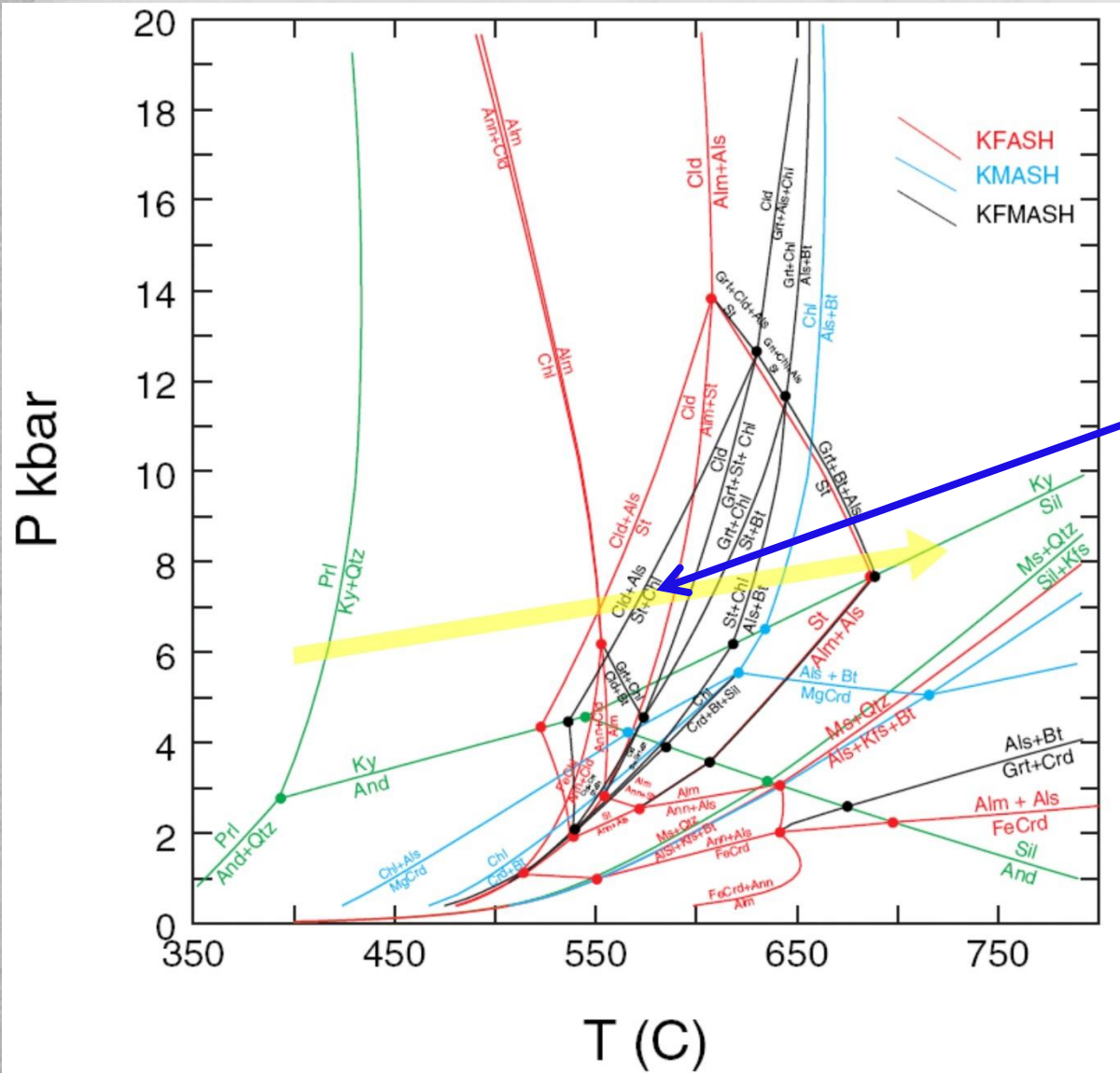
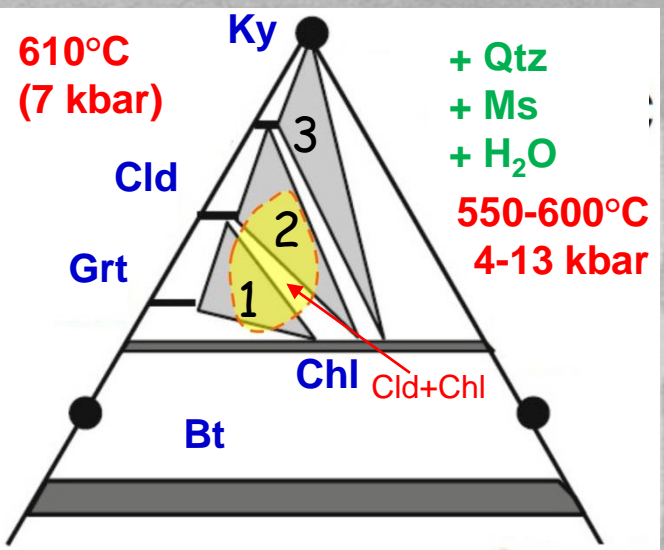


Dentre os metapelitos verdadeiros afeta composições mais ricas em Fe e mais pobres em Al.

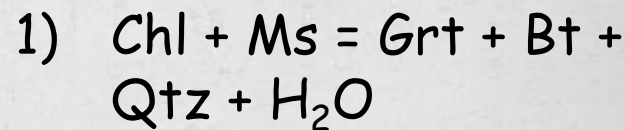
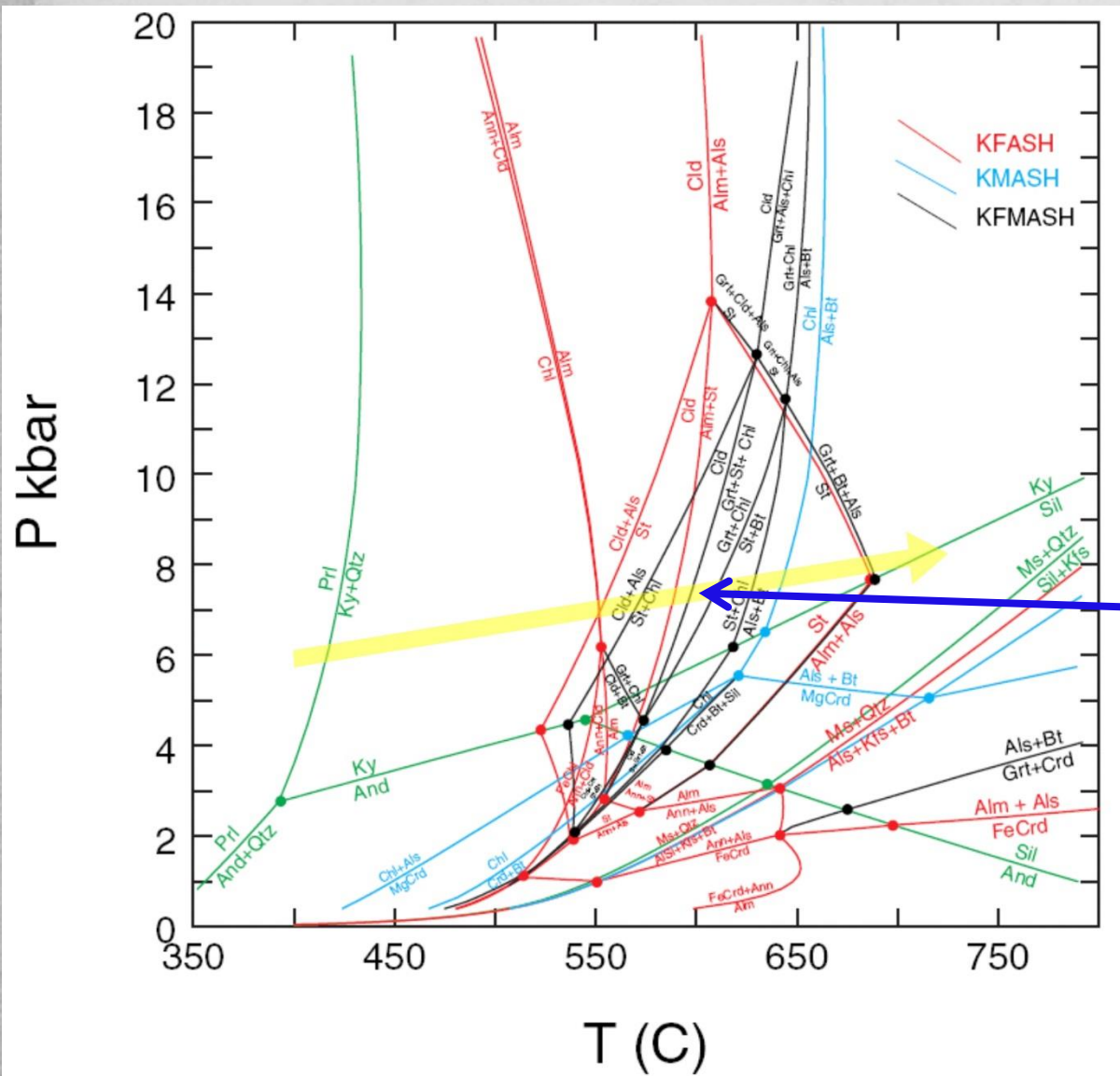
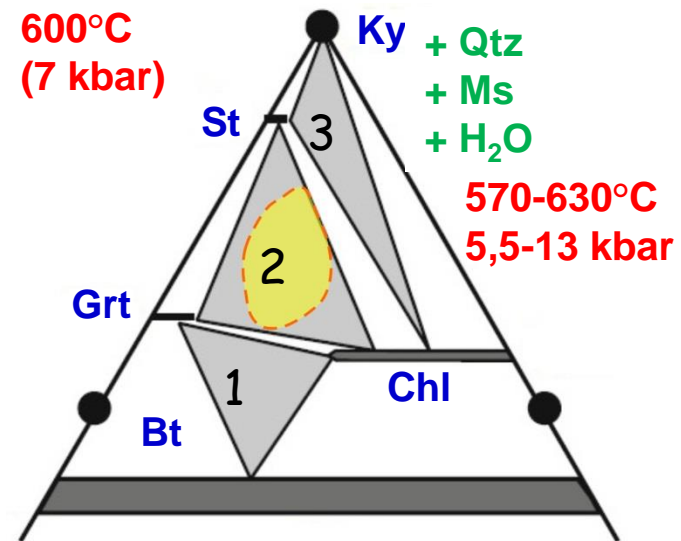
Composições ricas em Al continuam com paragênese Cld + Chl + Ky.



# Zona da Estaurolita (fácies anfibolito inferior)



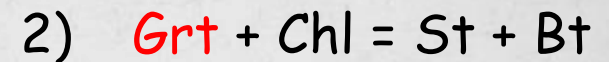
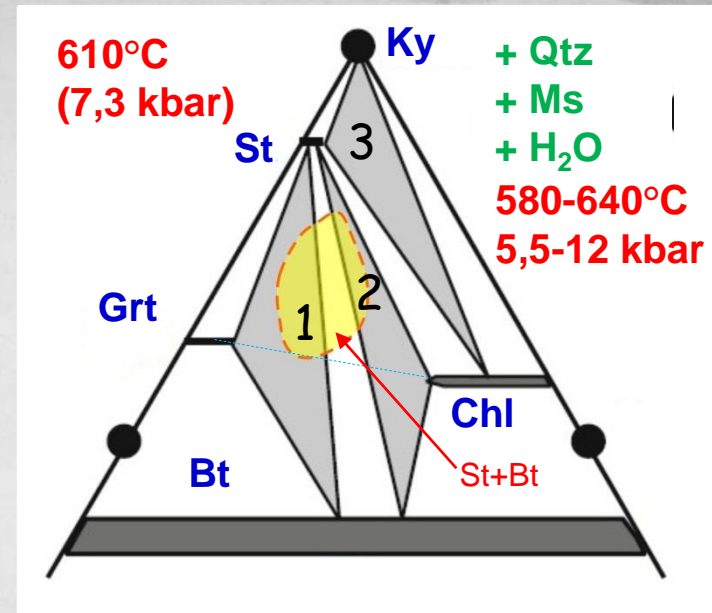
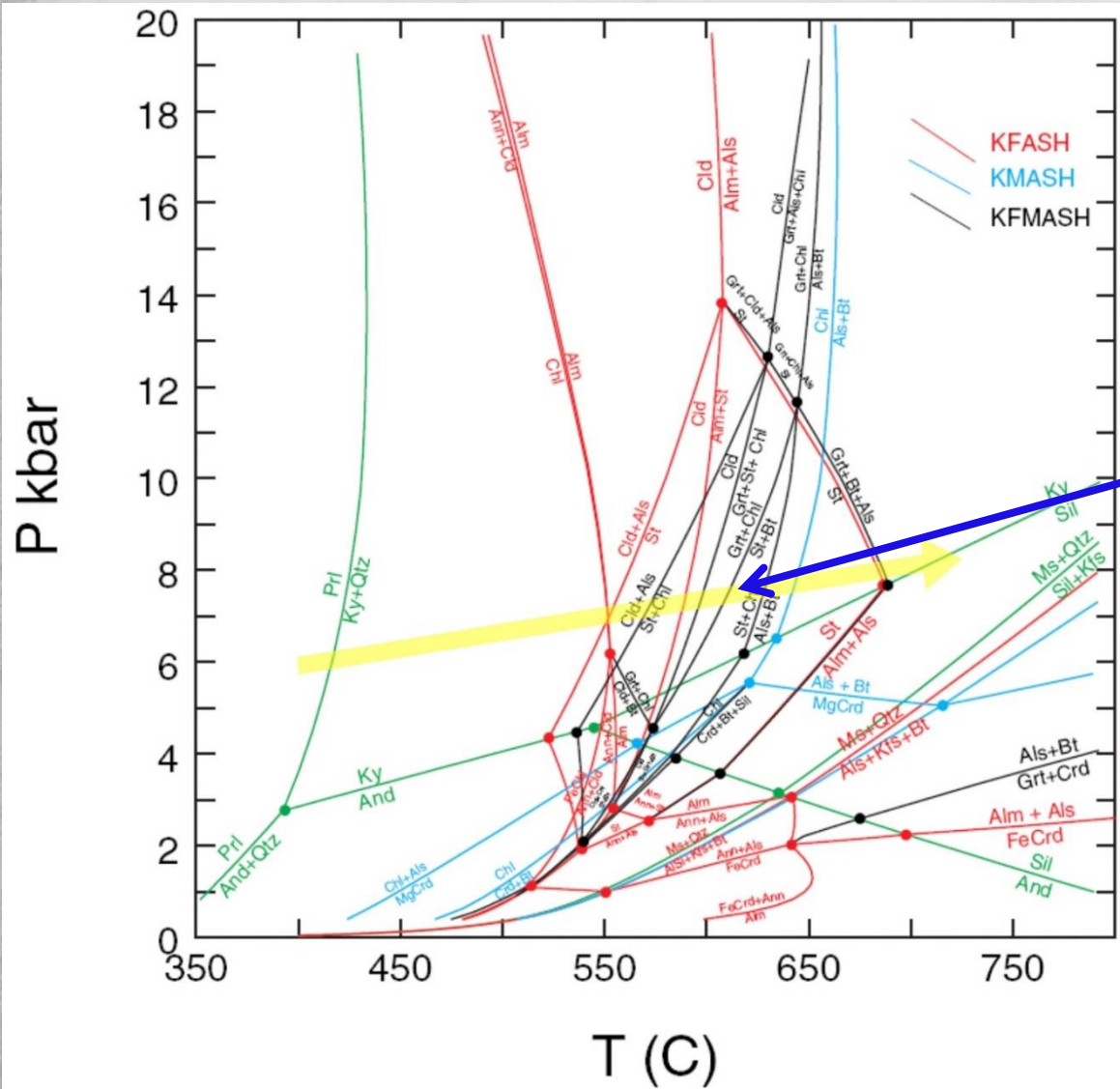
# Zona da Estaurolita (Cloritoide-fora) (fácies anfibolito)



Rocha 3 não é afetada pela reação (2), pois Cld já havia sido exaurido.

# Zona da Estaurorolita (+ Biotita)

Primeiro aparecimento de Bt em metapelitos ricos em Al

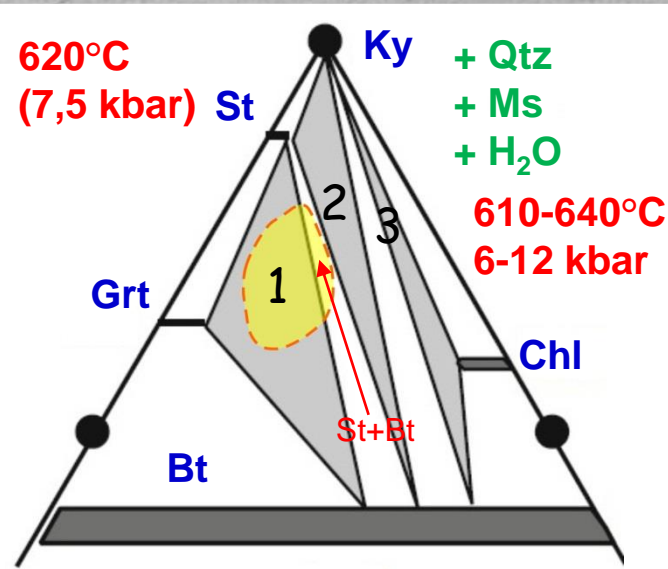
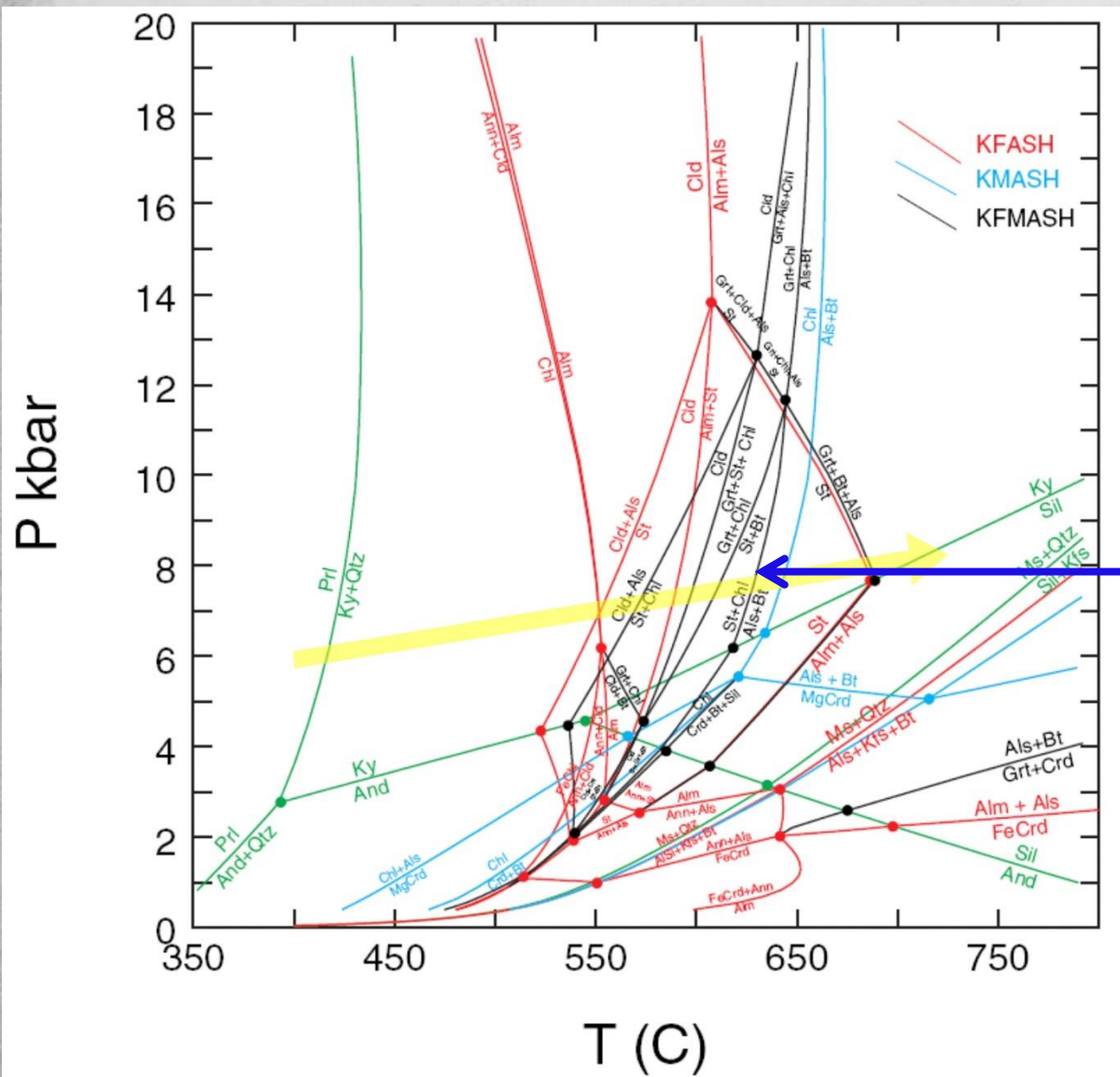


Rocha 3 (magnesiana) não é afetada pela reação, pois não possui Grt.



# Zona da Cianita

## Primeiro aparecimento do par Ky + Bt



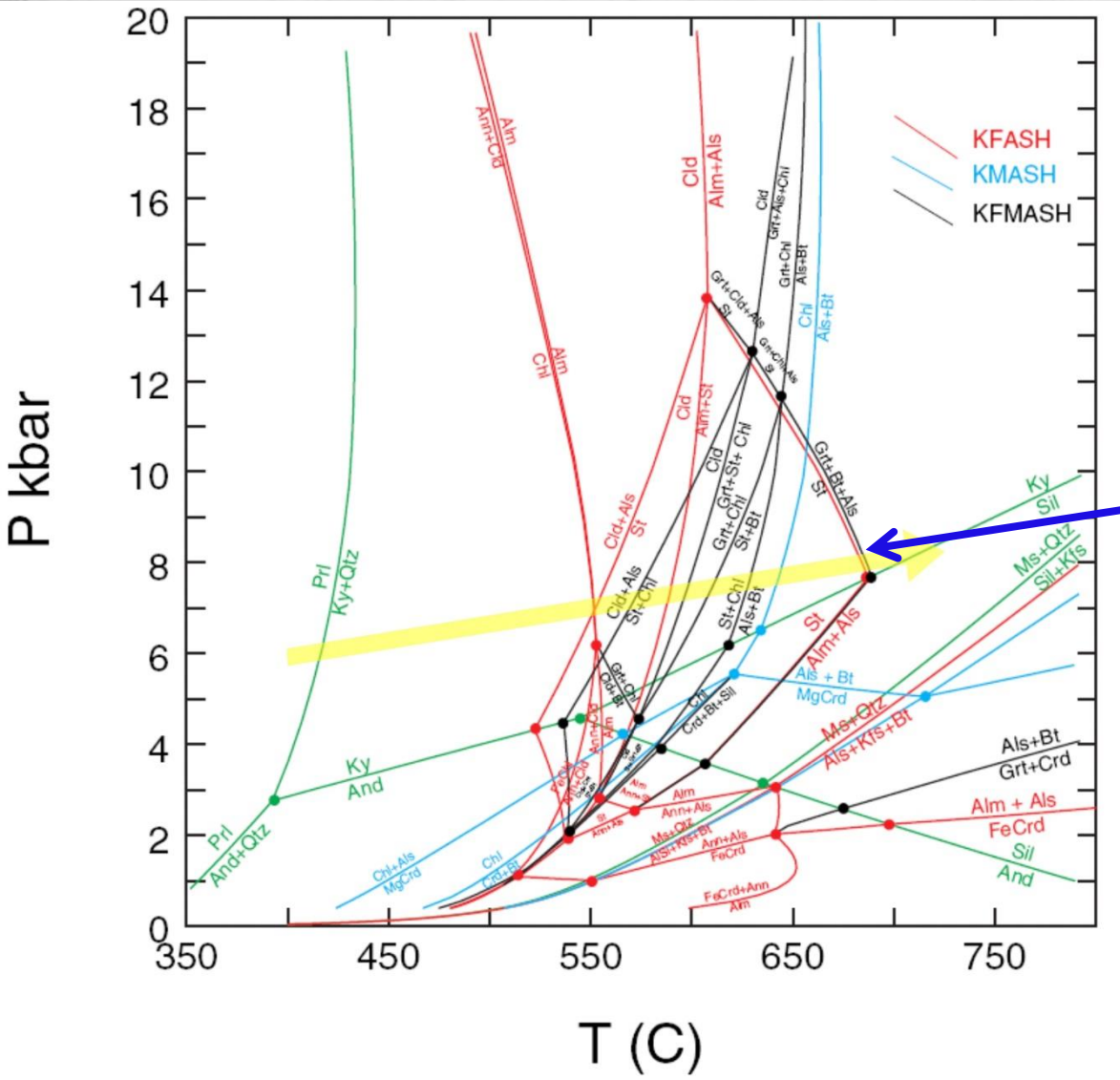
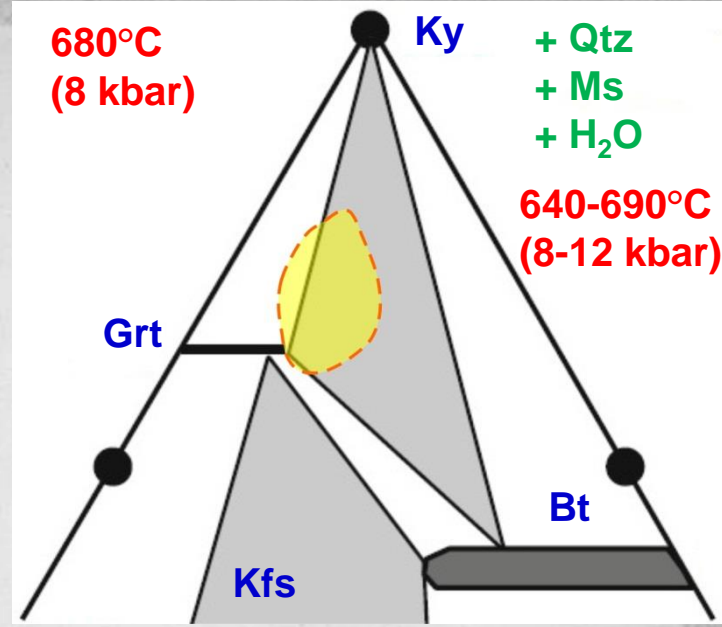
- 1) não afetada
- 2)  $St + Chl = Ky + Bt$
- 3)  $St + Chl = Ky + Bt$

Rocha 1 (rica Fe) não é afetada pela reação, pois não possui Chl.

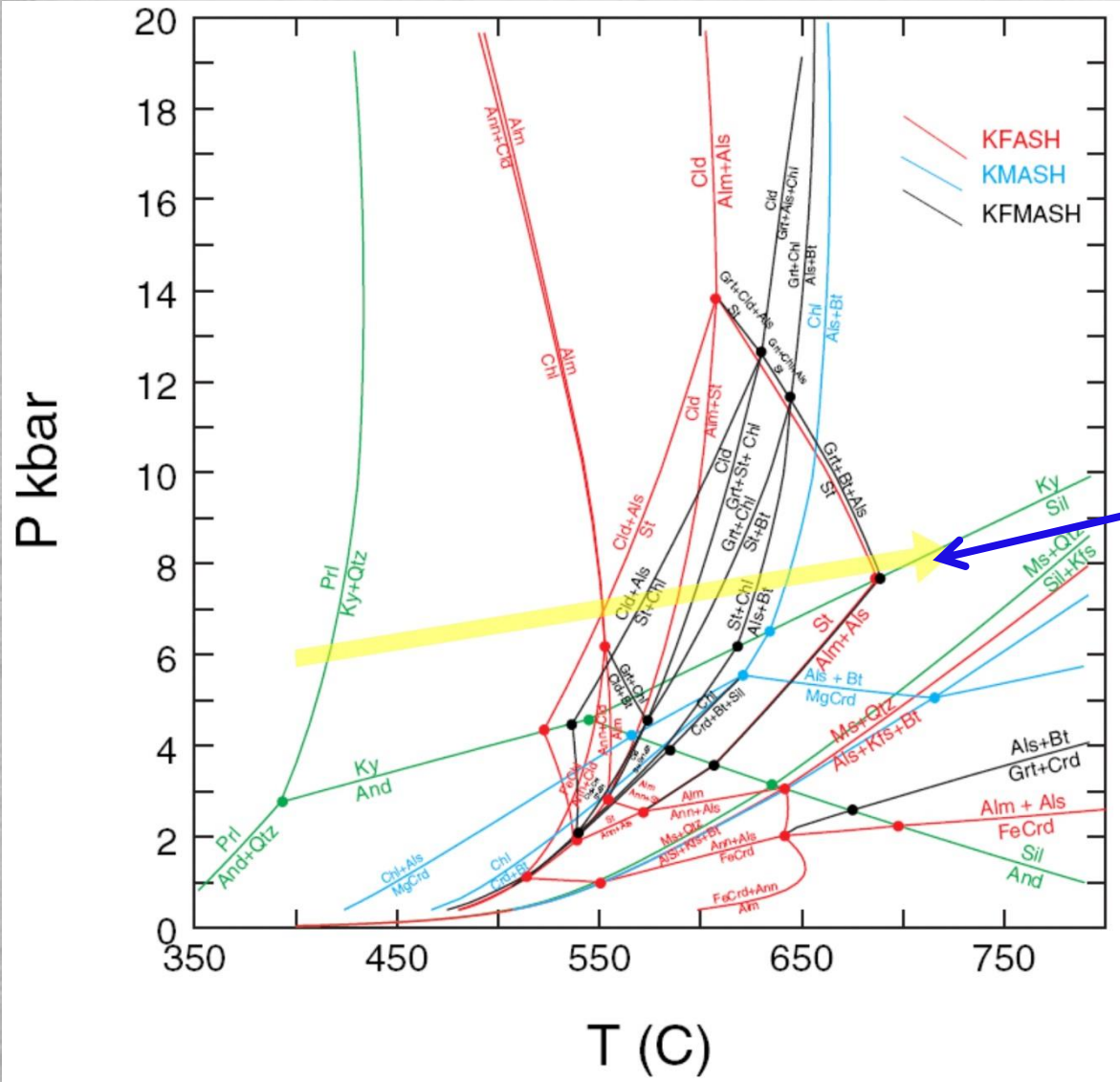
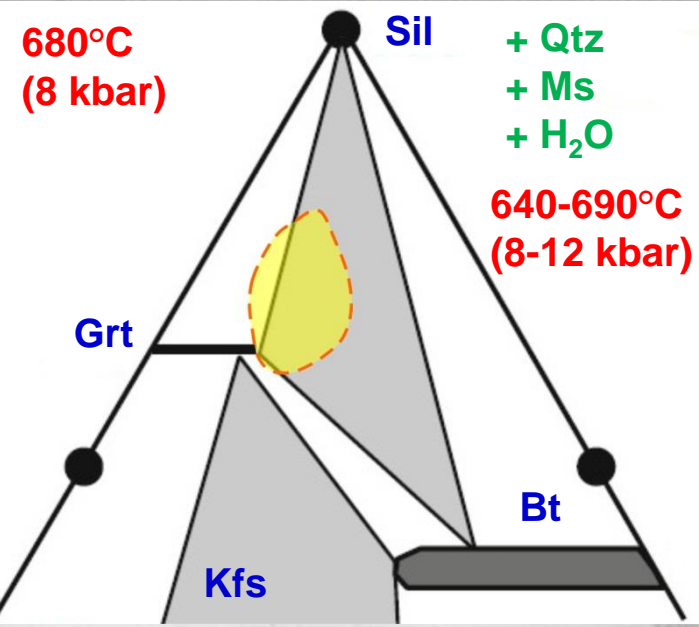


# Zona da Cianita (anfíbolito superior)

## Reação terminal da Estaurolita



# Zona da Sillimanita (anfibolito superior)



# Isógradas

Os pelitos ricos em  $Al_2O_3$  apresentam sequência maior de possíveis isógradas do que a da Escócia (típico barroviano)

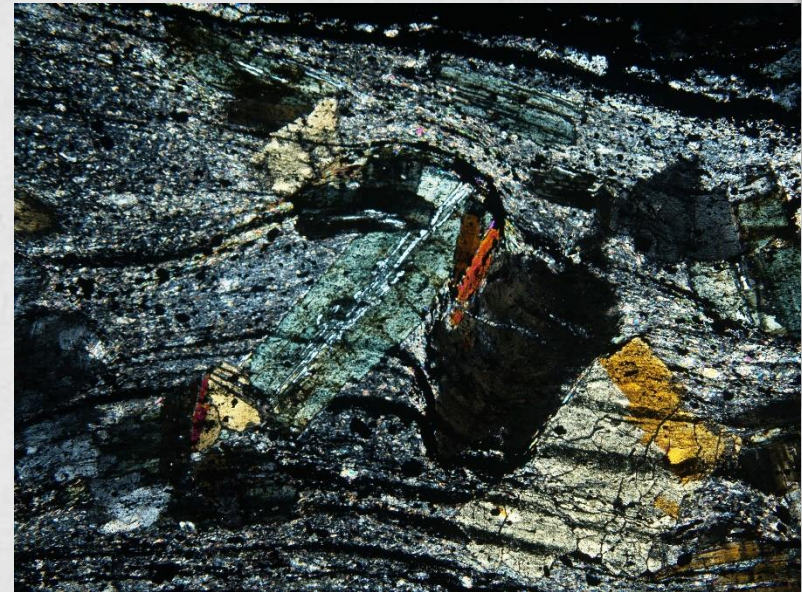
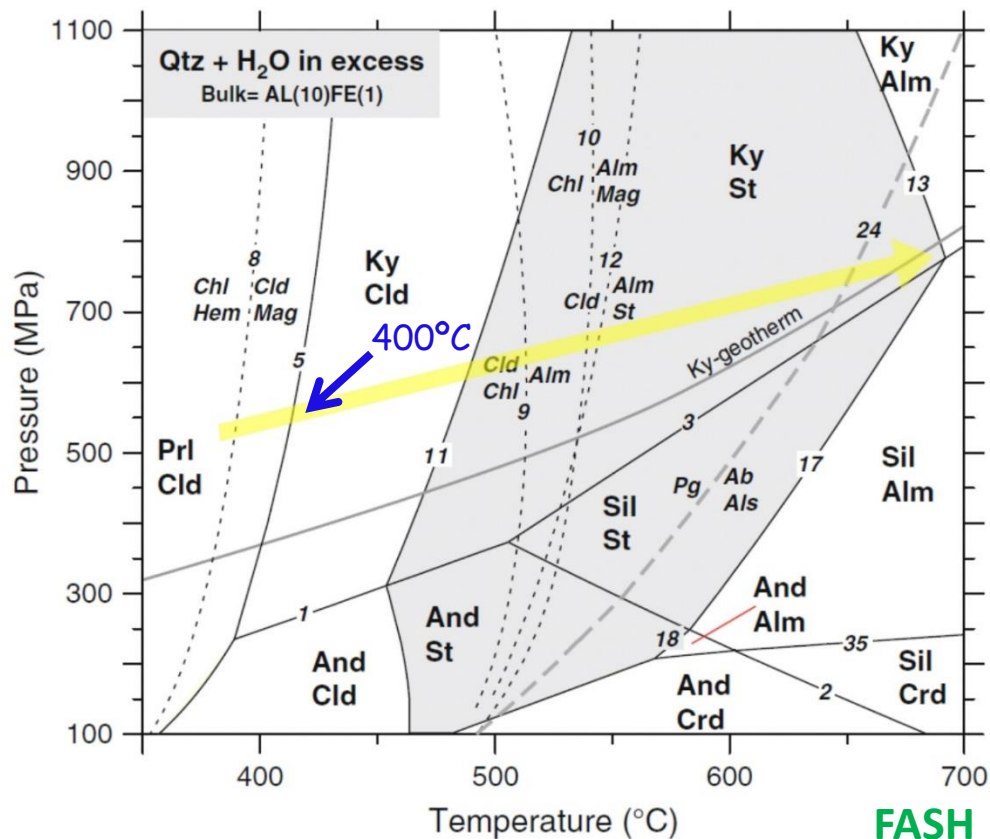
Zona da clorita	Ctd + Chl	Xisto-verde inferior
Zona da biotita	Ctd + Ky + Chl (ou Ky + Ctd ou Ky + Chl)	Xisto-verde intermediário
Zona da granada	Ctd + St + Chl (ou Ctd + Grt + Chl ou St + Ky + Chl)	Anfibolito inferior
	St + Grt + Chl	
Zona da estaurolita	St + Bt + Grt (ou St + Bt + Chl)	Anfibolito intermediário
Zona da cianita	St + Ky + Bt	
Zona da cianita	Ky + Grt + Bt	Anfibolito superior
Zona da sillimanita (1ª isógrada)	Sil + Grt + Bt	
Zona da sillimanita (2ª isógrada)	Sil + Kfs	



# Diferenças marcantes em reação à zonação metamórfica descrita por Barrow

Quando a composição é rica em  $Al_2O_3$ :

1) As rochas têm Cld e Ky em baixa  $T$



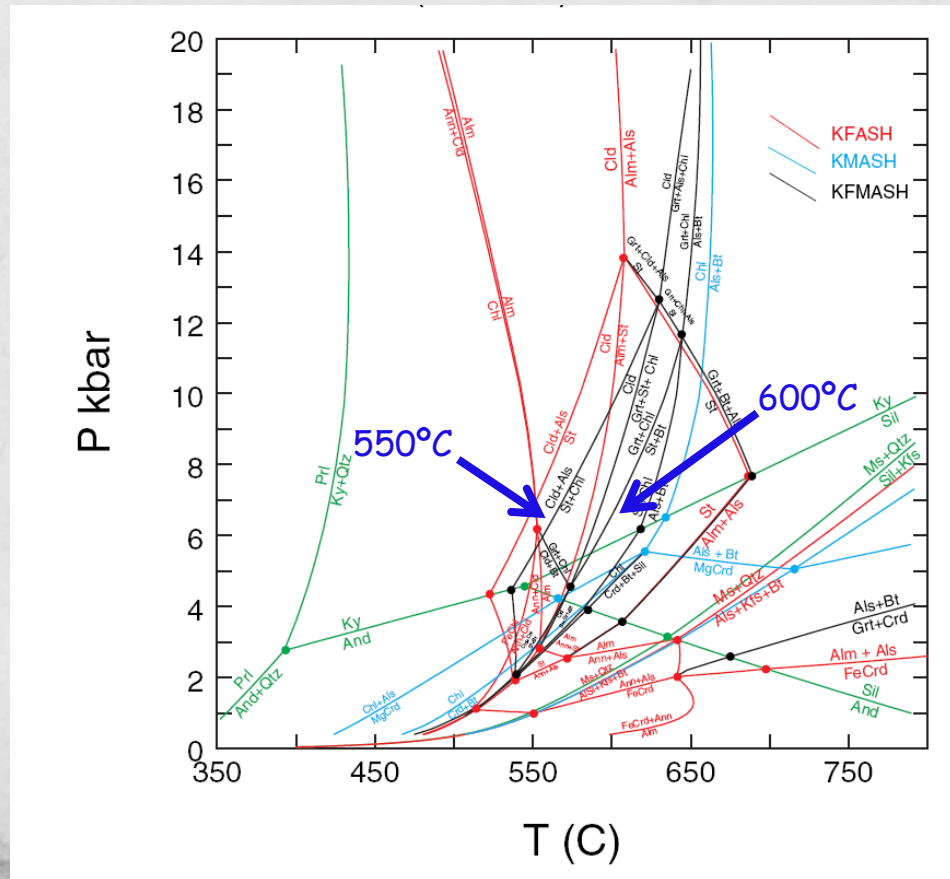




# Diferenças marcantes em reação à zonação metamórfica descrita por Barrow

Quando a composição é rica em  $Al_2O_3$ :

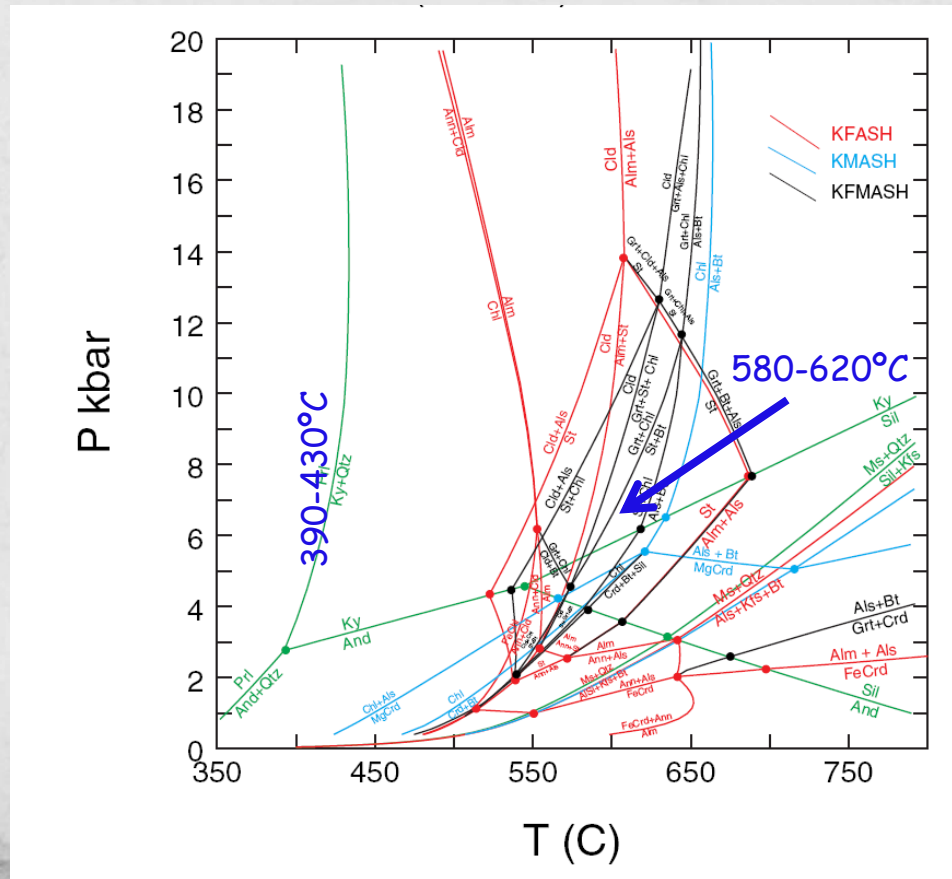
3) A St aparece ANTES (em T mais baixa) pelo consumo de Cld



# Diferenças marcantes em reação à zonação metamórfica descrita por Barrow

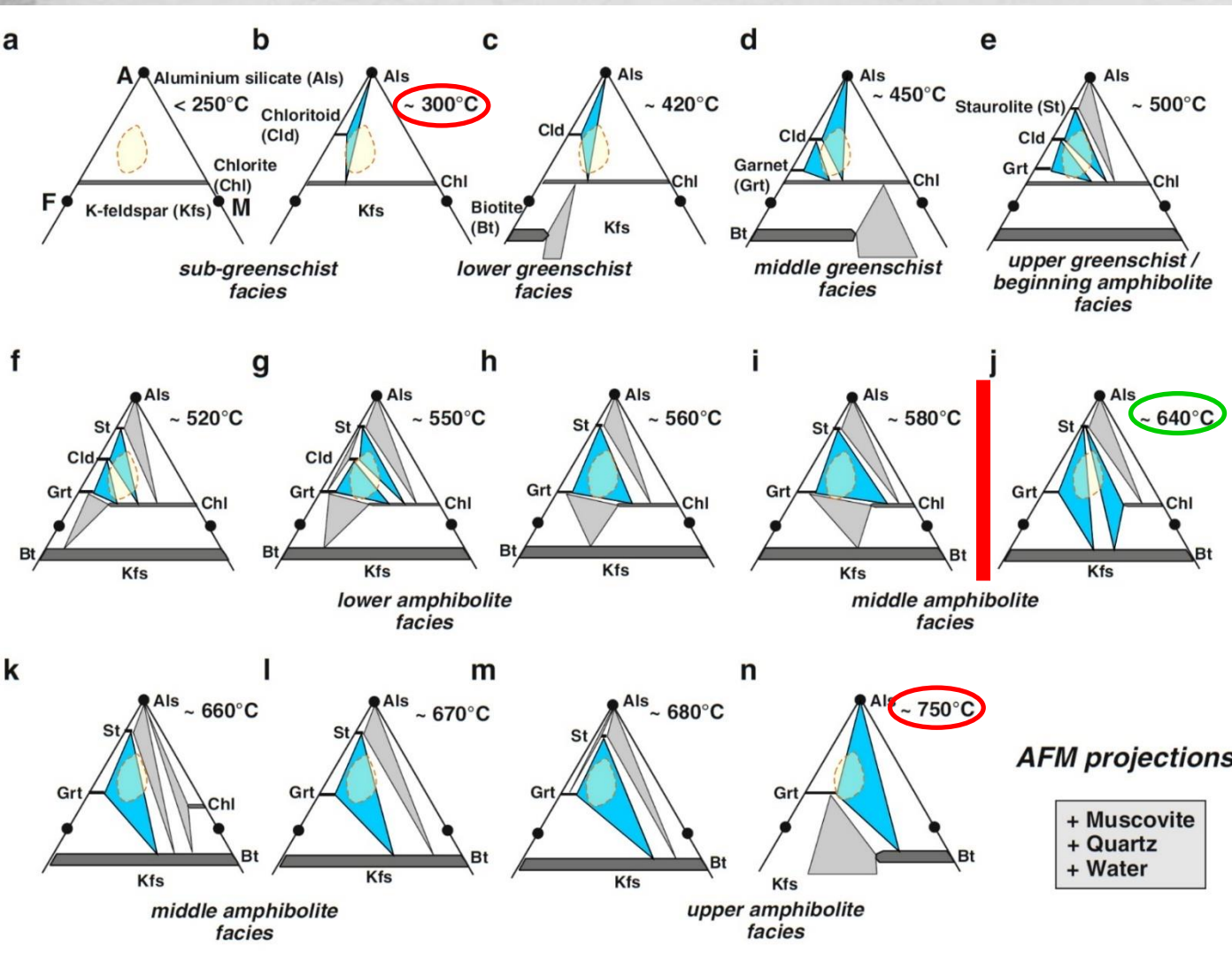
Quando a composição é rica em  $Al_2O_3$ :

4) Bt ocorre em  $T$  bem mais elevada, só depois da quebra de Chl + Grt





# Diagramas de compatibilidade para metapelitos verdadeiros no intervalo entre 300 e 750°C



Características marcantes

- (1) Paragêneses de fácies xisto-verde envolvem Ctd.
- (2) Maior número de zonas metamórficas podem se desenvolver.
- (3) Ky aparece em menores temperaturas.
- (4) Biotita aparece em maiores temperaturas.

Mudança repentina na topologia do diagrama: rocha passou por reação descontínua (univariante)

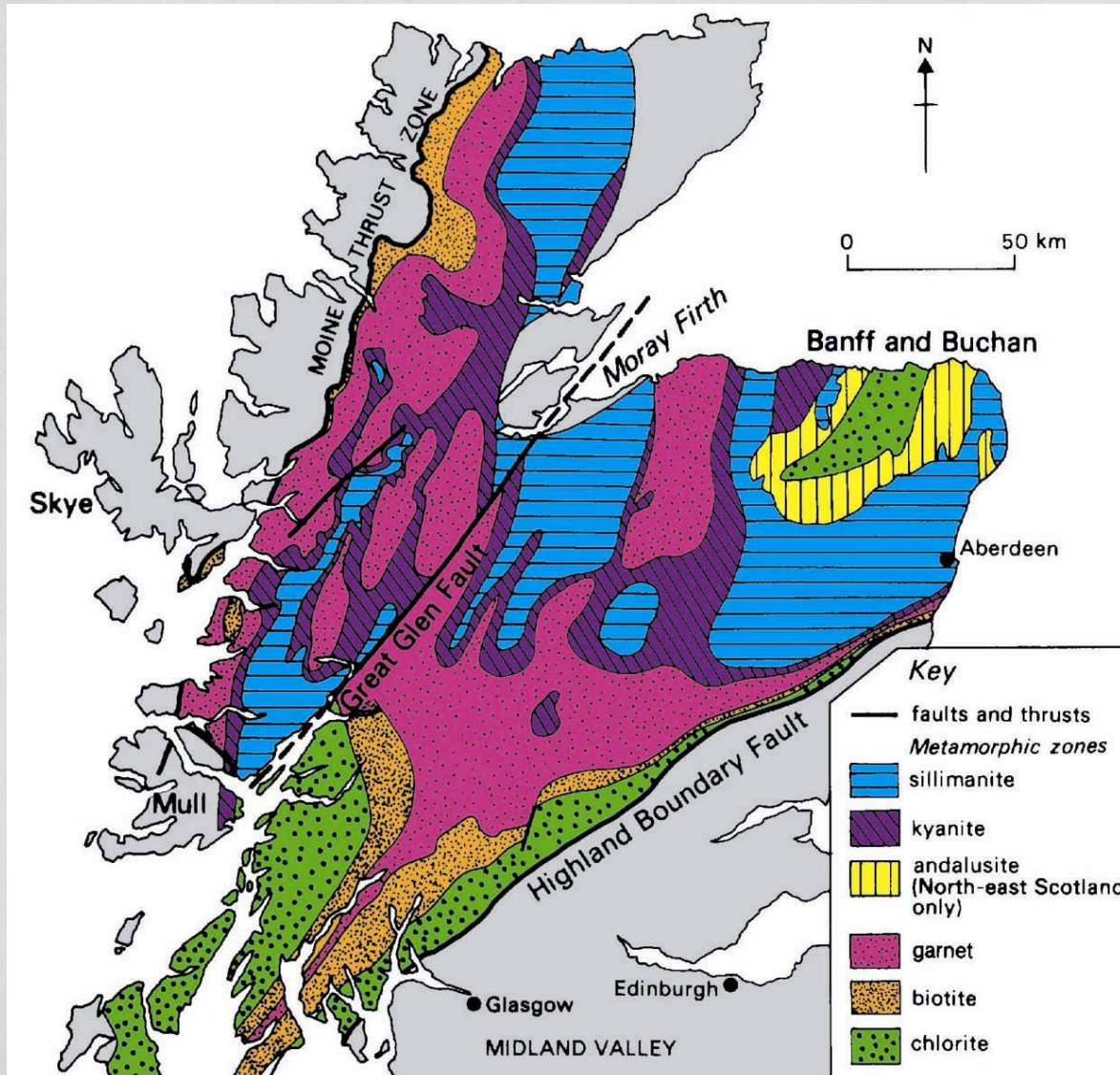


## *Variações no padrão zonal barroviiano clássico*

- 1) O metamorfismo progride para temperaturas mais elevadas, resultando em zonas adicionais.
- 2) Rochas de diferentes composições (mais aluminosas).
- 3) O metamorfismo ocorre sob pressões mais baixas.



# Metamorfismo de Baixa Pressão (Tipo Buchan)

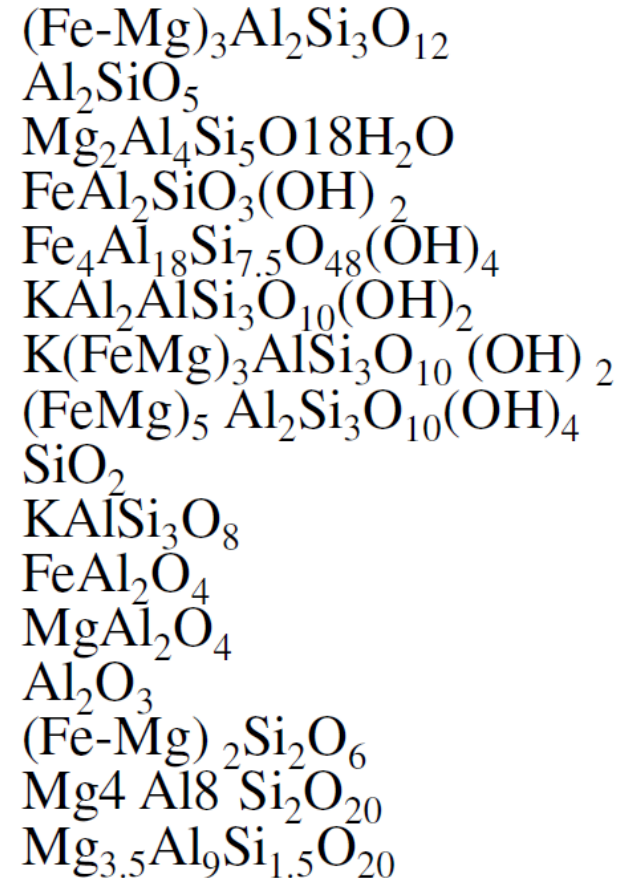


- chlorita
- biotita
- cordierita
- andalusita
- sillimanita

*Semi-pelitos ou pelitos pobres em  $Al_2O_3$ !*

# Principais minerais metamórficos (KFMASH)

- granada ←
- andalusita e sillimanita
- cordierita
- cloritóide ←
- estaurolita ←
- muscovita
- biotita
- clorita
- quartzo
- feldspato potássico
- hercinita
- espinélio
- corundum
- ortopiroxênio
- safirina (442)
- safirina (793)

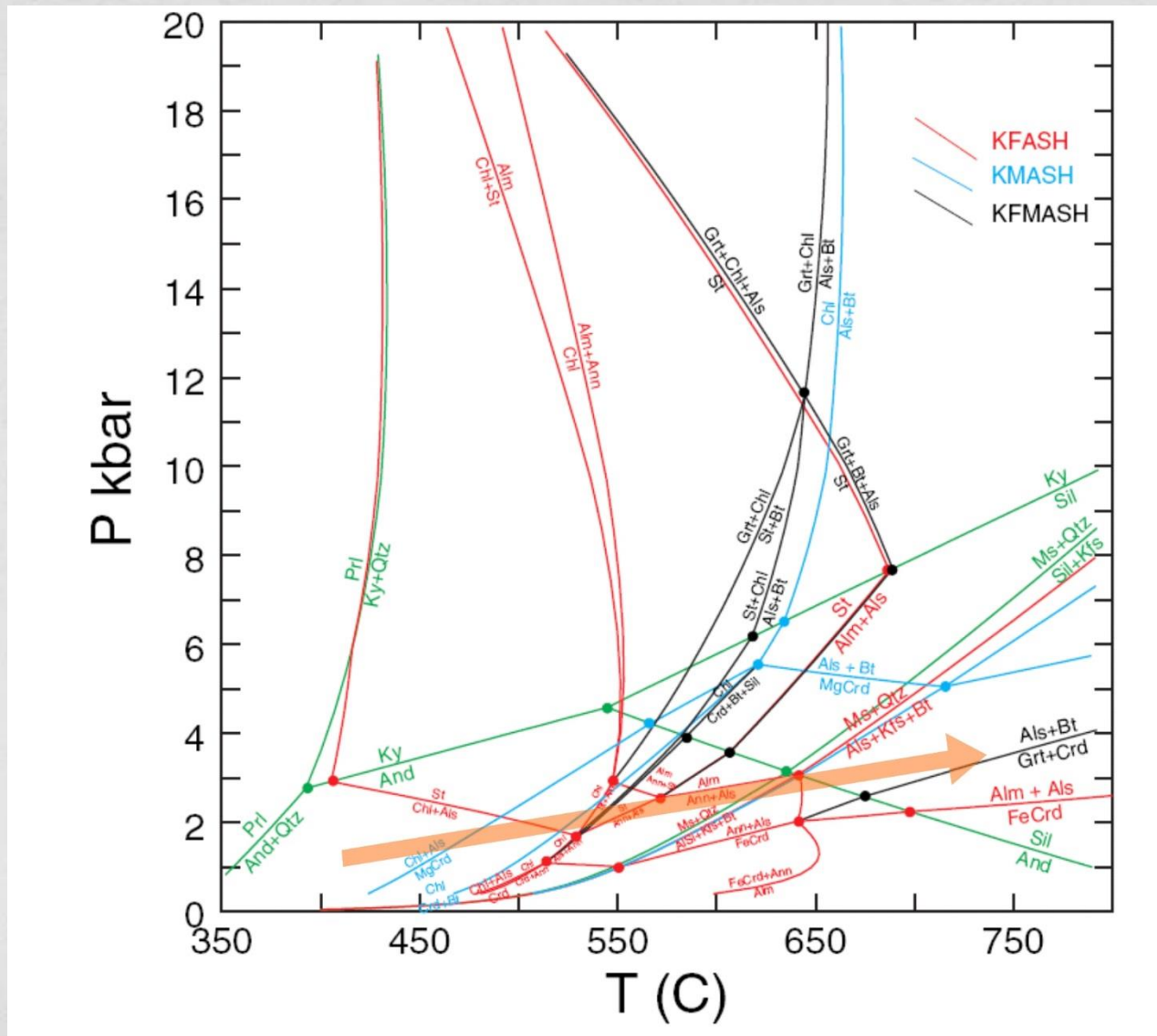


## Zonação tipo Buchan (características gerais)

- Não ocorre Ky, mas And ou Sil são mais comuns (dependendo da  $T$ )
- Crd é comum em baixas  $T$
- Grt é rara



# Metamorfismo de Baixa Pressão (Tipo Buchan)



Gradiente metamórfico de campo típico

# Metamorfismo de Baixa Pressão (Tipo Buchan)

## Zona da clorita

### Associação:

Chl + Ms (Phe) + Qtz + Ab  $\pm$  Cal

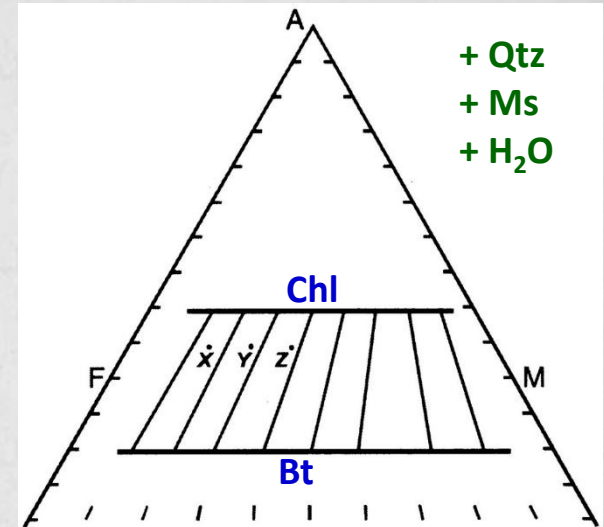
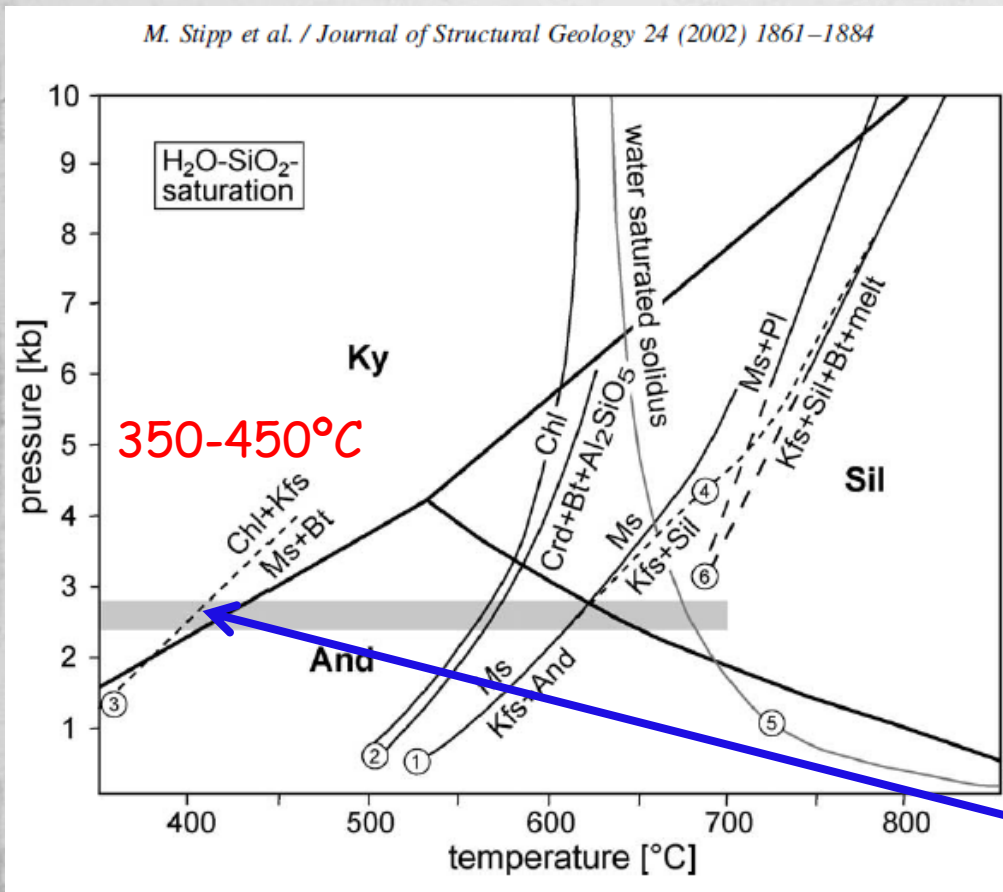
### Rocha:

filito ou xisto com clorita, muscovita, quartzo e albita.

(Kfs detrítico ou autigênico)

# Metamorfismo de Baixa Pressão (Tipo Buchan)

## Zona da biotita



### Associação:

Bt + Chl + Ms (Phe) + Qtz + Ab ± Cal

### Rocha:

filito ou xisto com biotita, clorita, muscovita, quartzo e albita.

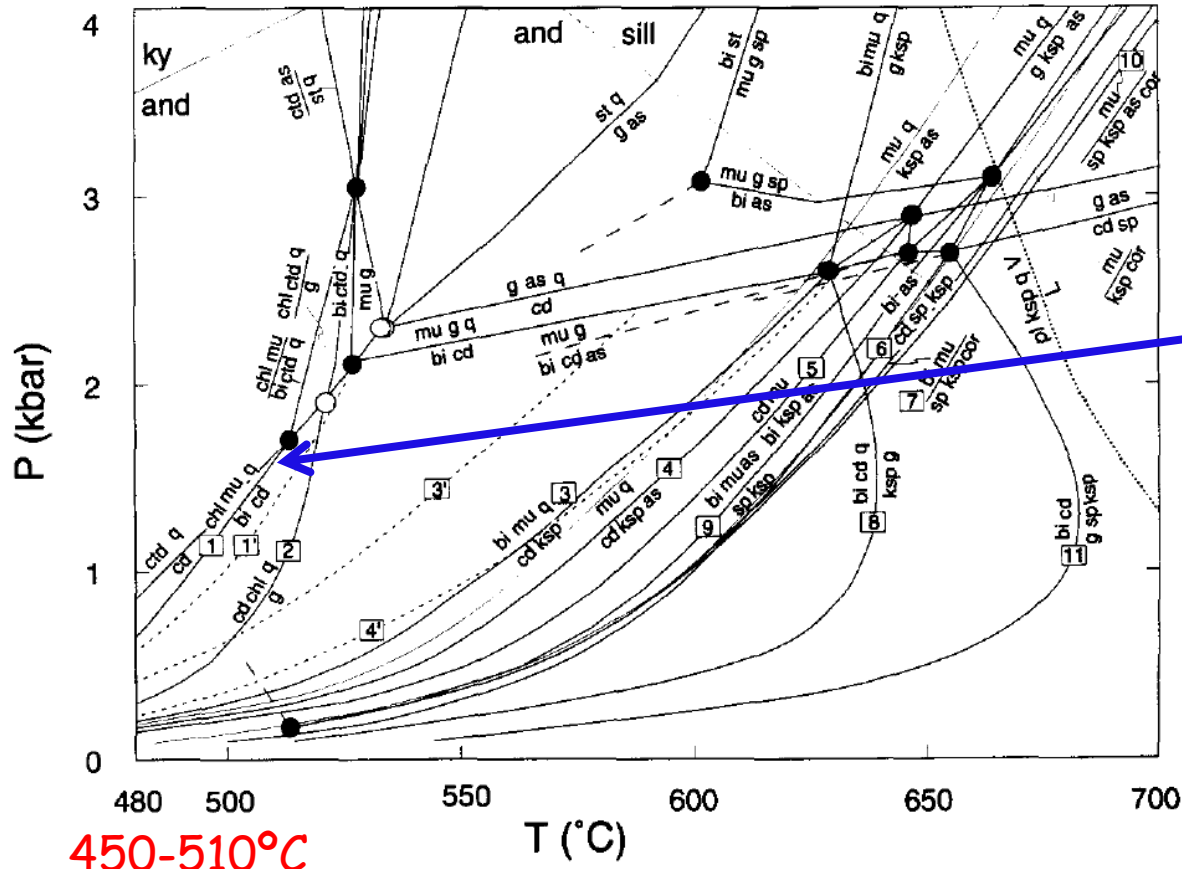
### Reação contínua:

$Kfs + Chl = Bt + Ms + Qtz + H_2O$   
(gravaca - Kfs detrítico/autigênico)

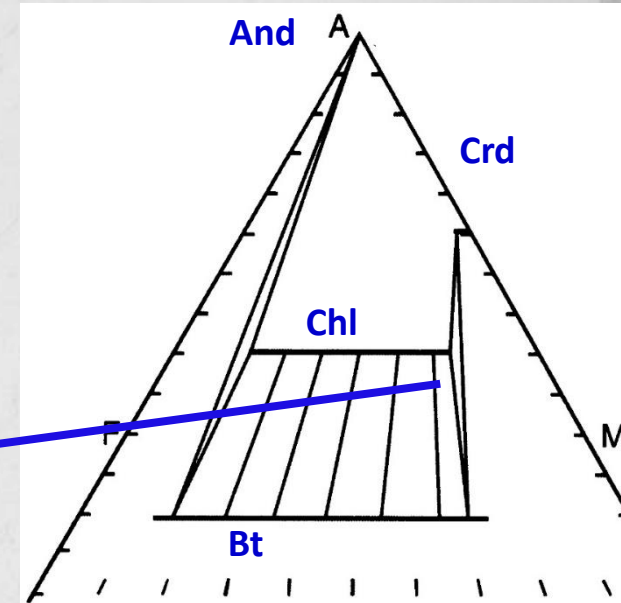


# Metamorfismo de Baixa Pressão (Tipo Buchan)

## Zona da cordierita



450-510°C



Yardley (2004) Introdução à Petrologia Metamórfica, segunda edição. Editora UnB.

Ausência da paragênese  
And + Crd!

Em quais rochas a Crd  
poderá se formar?

Xu et al. (1994). Contact metamorphism around the Stawell granite, Victoria, Australia. *Journal of Metamorphic Geology* 12: 609-624.

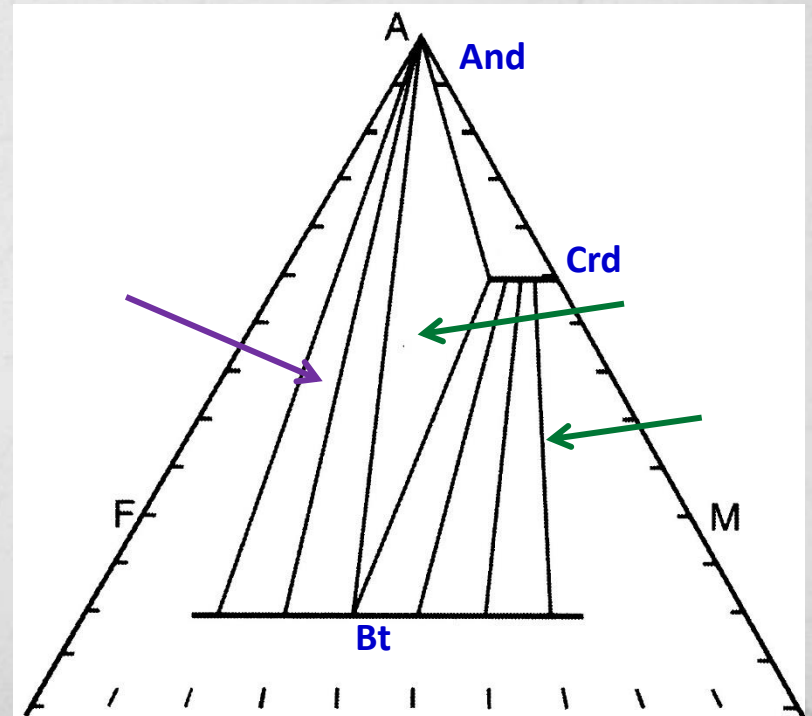
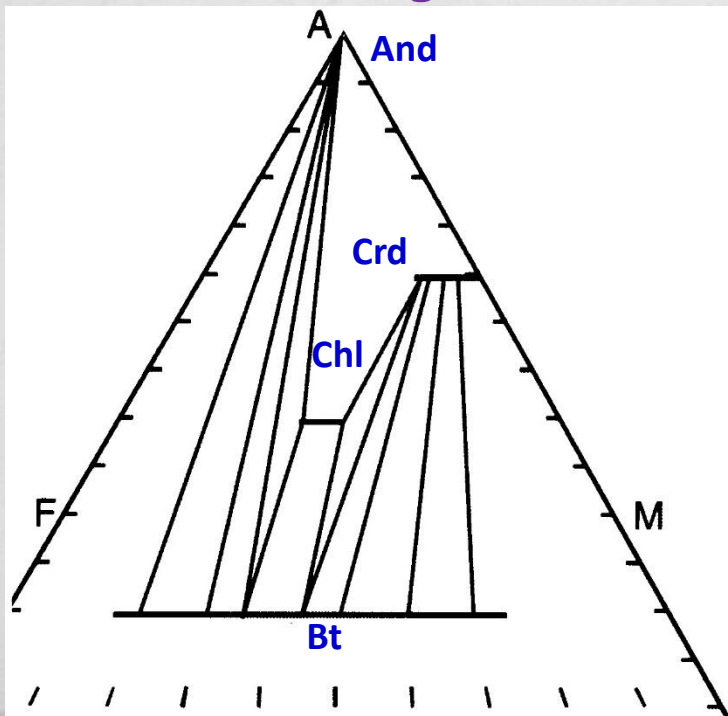
# Metamorfismo de Baixa Pressão (Tipo Buchan)

## Zona da Andalusita (clorita-fora)

Reação descontínua:  $\text{Chl} + \text{Ms} + \text{Qtz} = \text{Crd} + \text{And} + \text{Bt} + \text{H}_2\text{O}$   
(limite superior de clorita - rochas mais magnesianas)

$\text{Crd} + \text{Ms} + \text{Qtz} = \text{Bt} + \text{And} + \text{H}_2\text{O}$

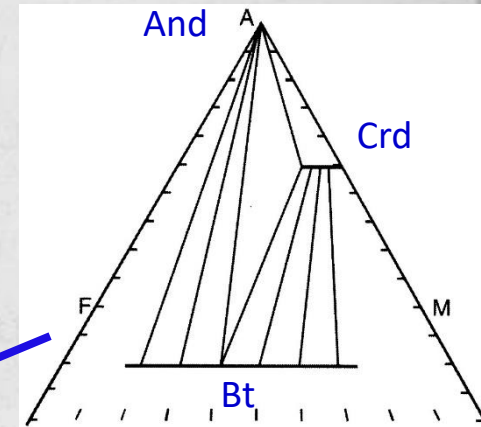
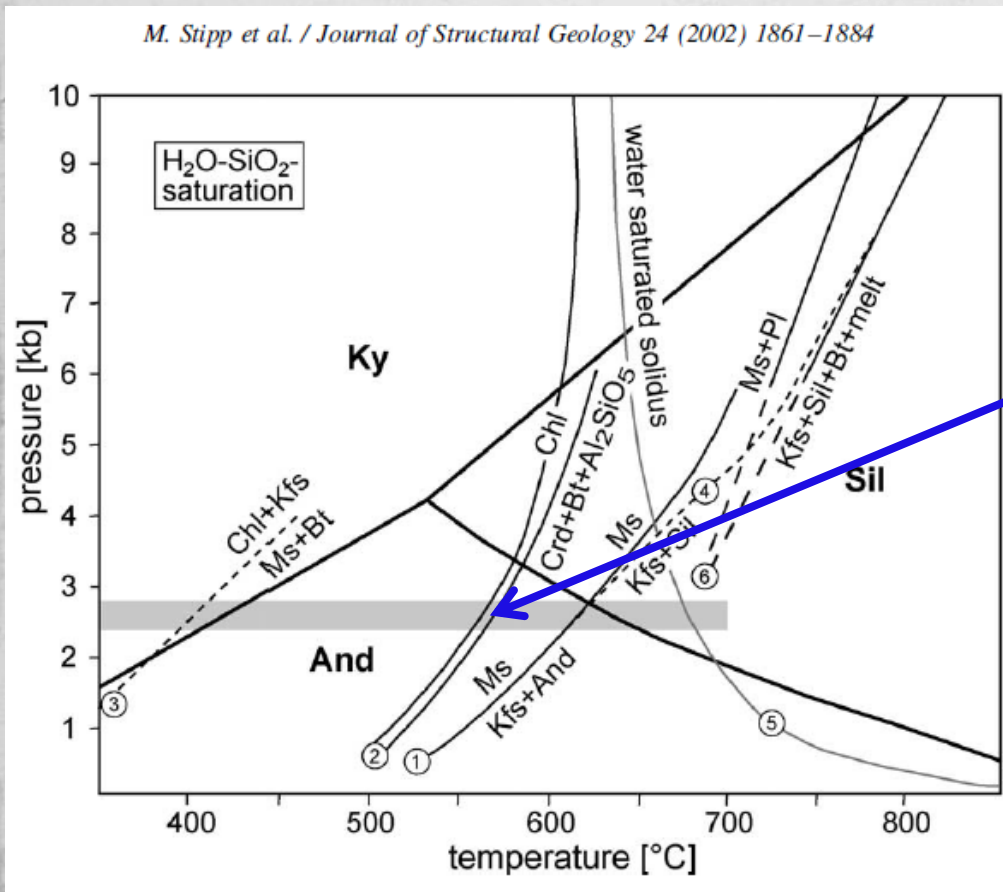
(quando clorita é esgotada na primeira formação de cordierita - rochas menos magnesianas)



# Metamorfismo de Baixa Pressão (Tipo Buchan)

## Zona da Andalusita

Reação descontínua:  $\text{Chl} + \text{Ms} + \text{Qtz} = \text{Crd} + \text{Bt} + \text{And} + \text{H}_2\text{O}$   
(limite superior de clorita)



Yardley (2004) Introdução à Petrologia Metamórfica, segunda edição. Editora UnB.

500-600°C



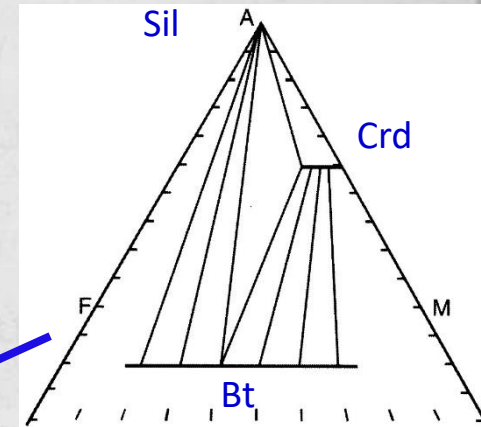
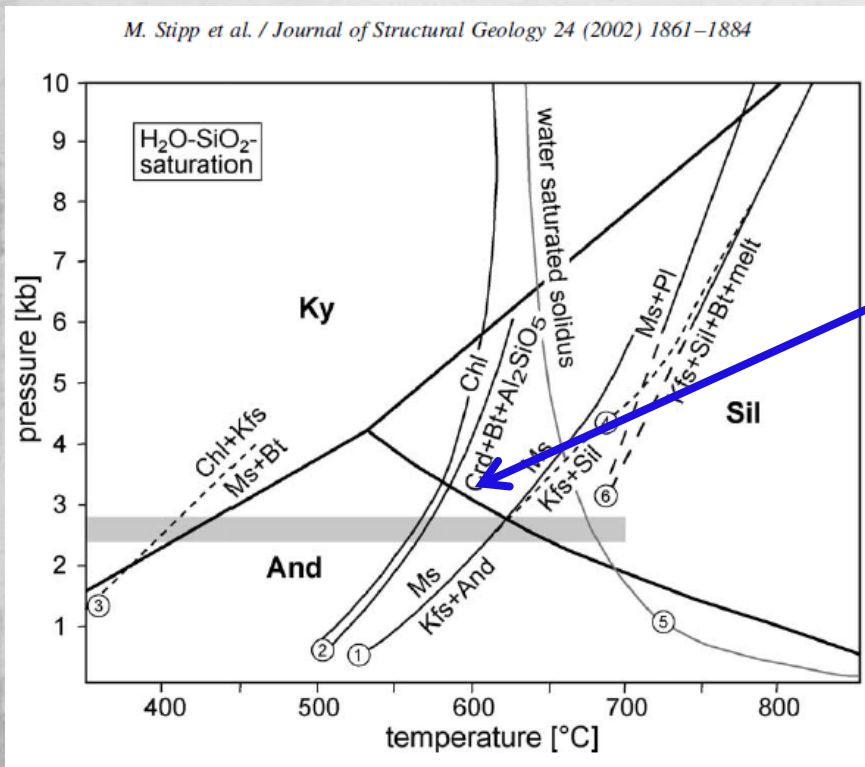
# Metamorfismo de Baixa Pressão (Tipo Buchan)

## Zona da Sillimanita

Reações:

And = Sil

$\text{Chl} + \text{Ms} + \text{Qtz} = \text{Crd} + \text{Bt} + \text{Sil} + \text{H}_2\text{O}$  ( $\rightarrow$  pressão)

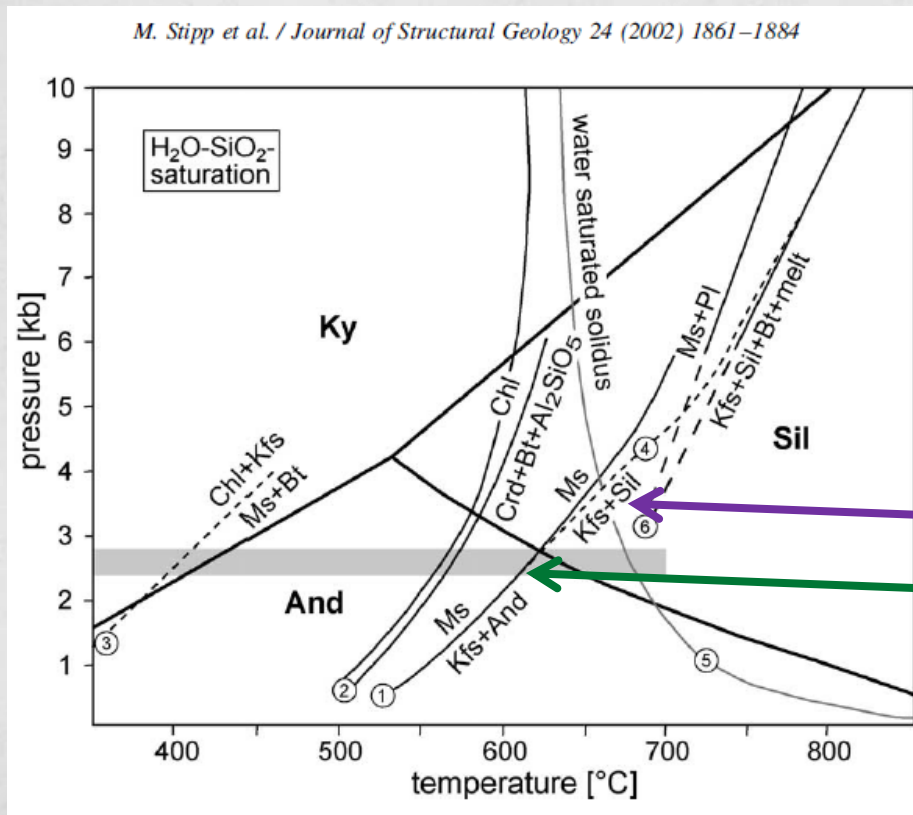
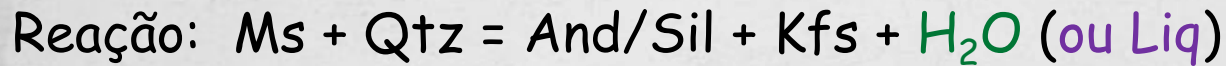


Yardley (2004) Introdução à Petrologia Metamórfica, segunda edição. Editora UnB.

>570°C

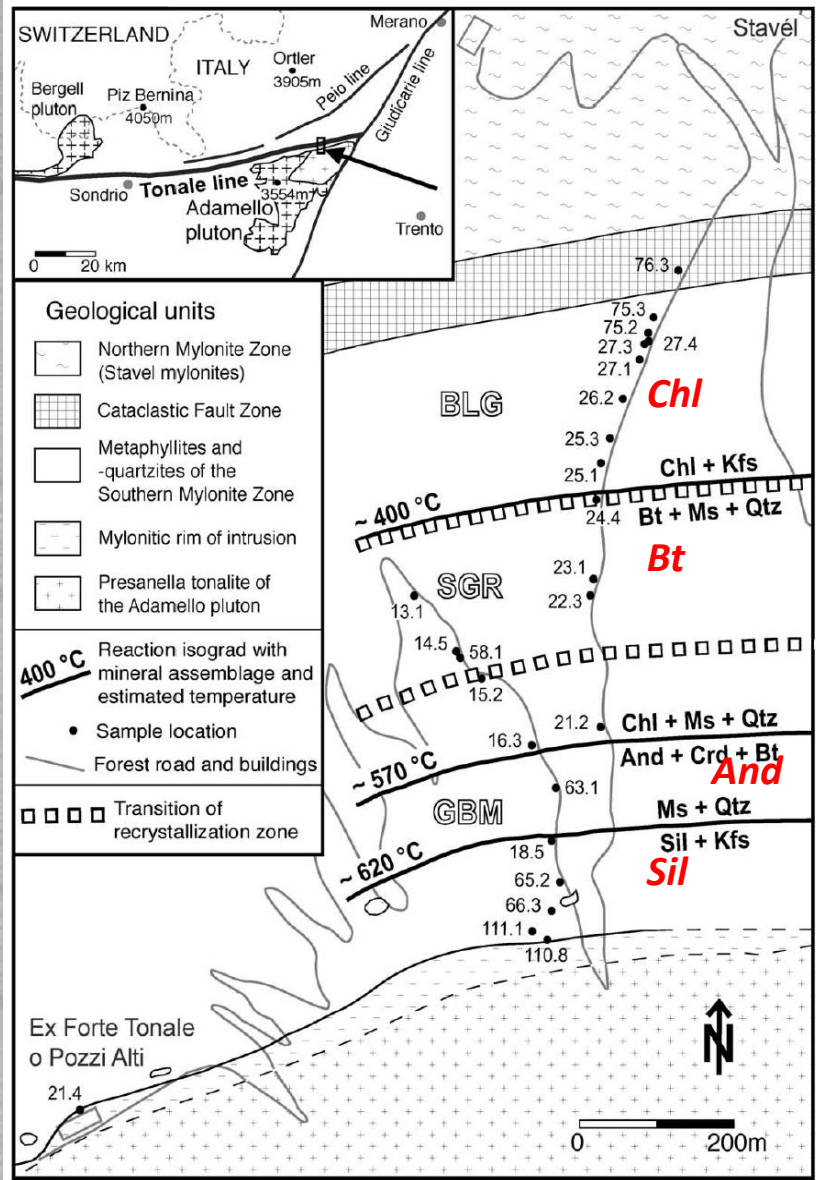
# Metamorfismo de Baixa Pressão (Tipo Buchan)

## Segunda isógrada da Sillimanita

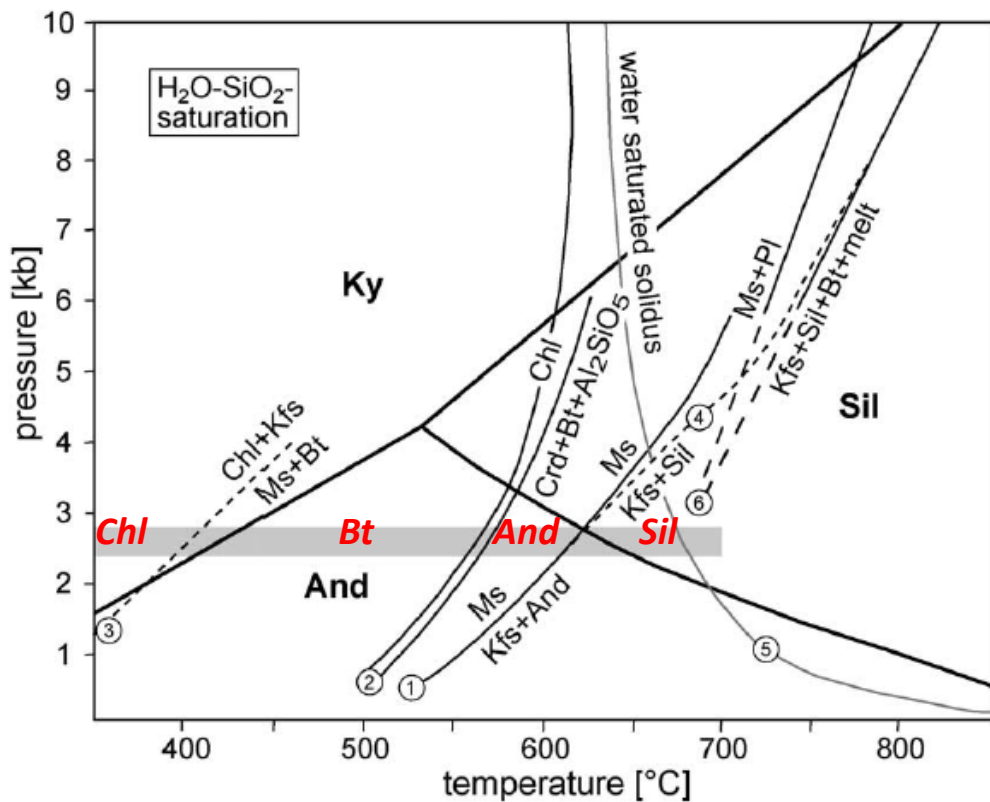


>600°C

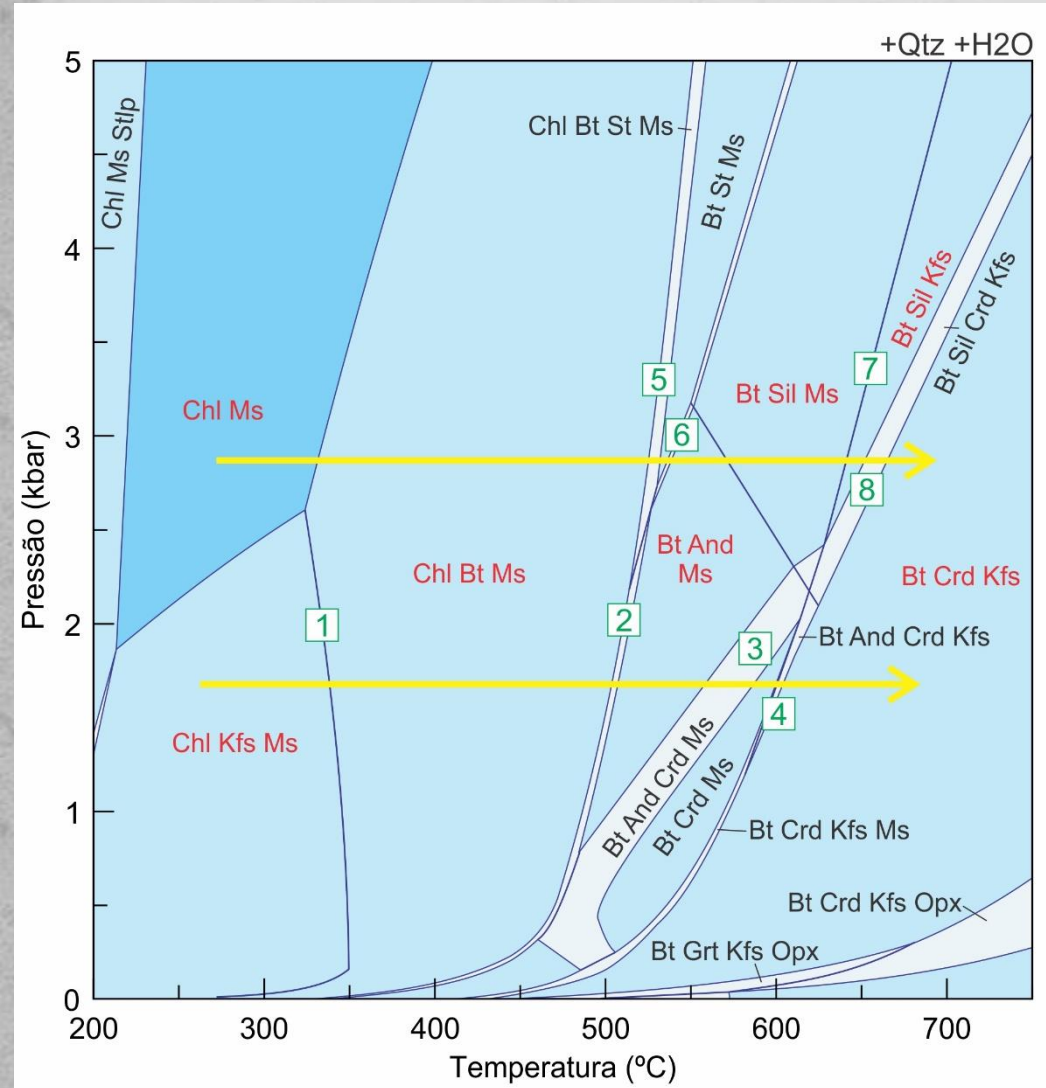
>650°C



M. Stipp et al. / Journal of Structural Geology 24 (2002) 1861–1884





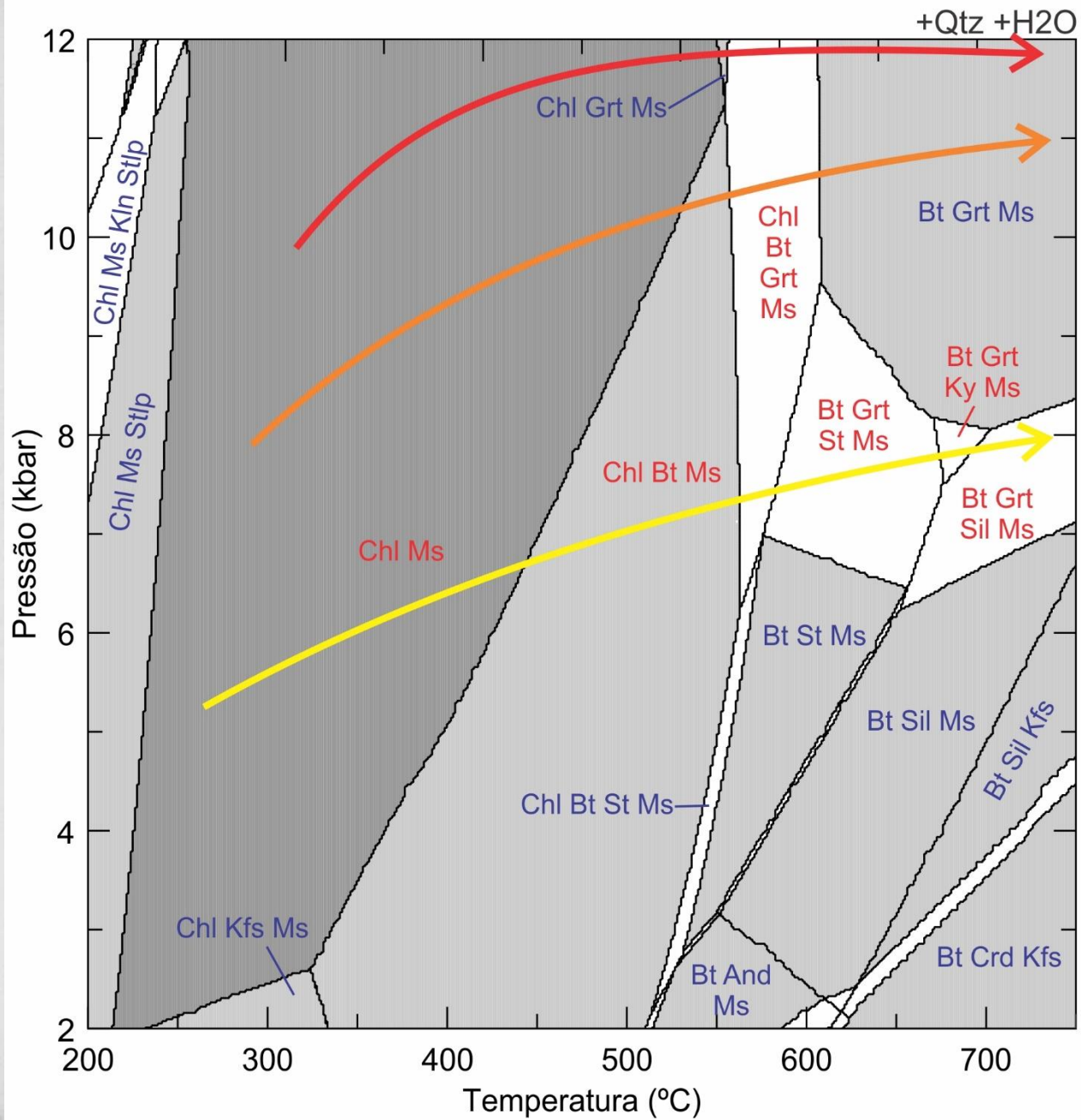


### Reações

- 1)  $Kfs + Chl = Bt + Ms + Qtz + H_2O$
- 2)  $Chl + Ms = Bt + And + Qtz + H_2O$
- 3)  $And + Bt + Qtz + H_2O = Crd + Ms$
- 4)  $Ms + Bt + Qtz = Crd + Kfs + H_2O$
- 5)  $Chl + Ms = Bt + St + Qtz + H_2O$
- 6)  $St + Ms + Qtz = Bt + And + H_2O$
- 7)  $Ms + Qtz = Sil + Kfs + H_2O$
- 8)  $Bt + Sil + Qtz = Crd + Kfs + H_2O$

## *Variações no padrão zonal barroviiano clássico*

- 1) O metamorfismo progride para temperaturas mais elevadas, resultando em zonas adicionais.
- 2) Rochas de diferentes composições (mais aluminosas).
- 3) O metamorfismo ocorre sob pressões mais baixas.
- 4) O metamorfismo ocorre sob pressões mais altas.



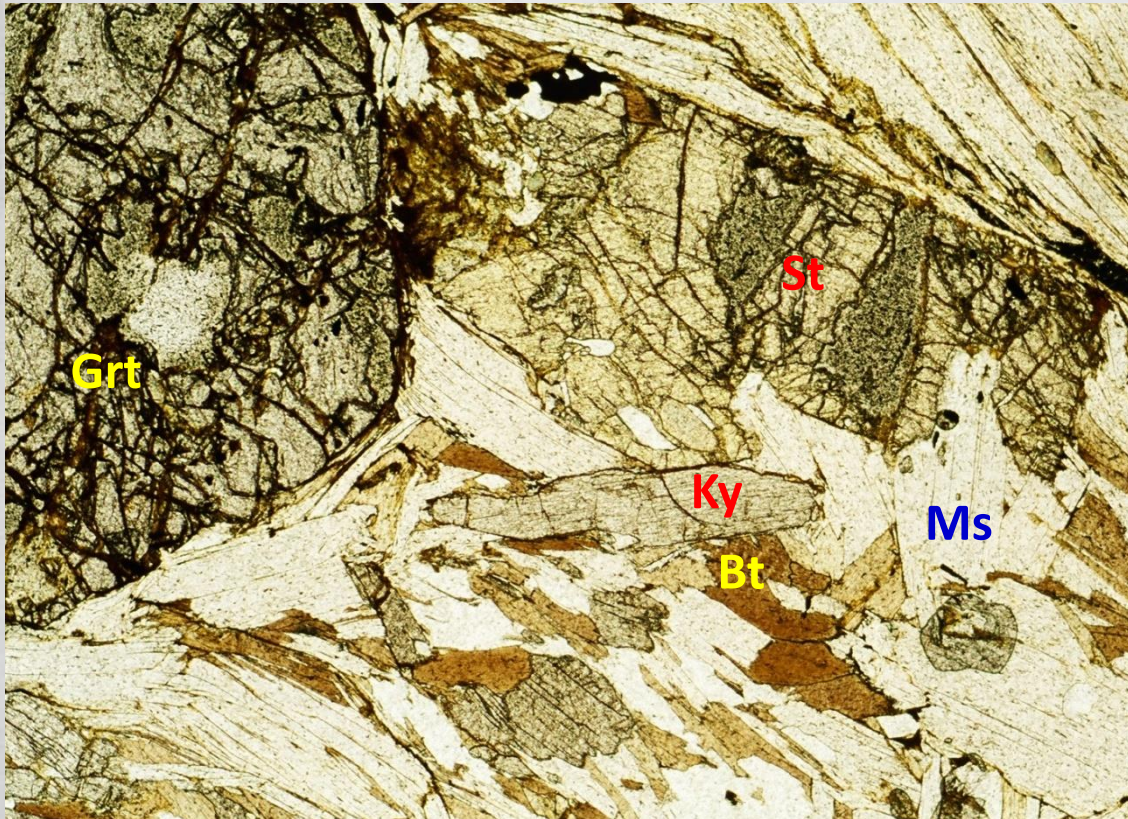




# Limitações da aplicabilidade do diagrama AFM

Regra das Fases:  $F = C - P + 2$

**Associação:** Grt + Bt + Ky + St + Ms + Qtz + H<sub>2</sub>O



Persistência metaestável de minerais formados anteriormente

Presença de componentes adicionais no sistema natural (estabiliza maior número de fases).

Mn e Ca estabilizam granada como uma fase extra.







# Referências Bibliográficas Utilizadas

Bucher, K., Grapes, R., 2011. Petrogenesis of Metamorphic Rocks, 8th Edition. Springer. 428 p.

Faleiros, F.M., 2008. Evolução de Terrenos Tectono-Metamórficos da Serrania do Ribeira e Planalto Alto Turvo (SP, PR). Tese de Doutorado. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. 326 p.

Waters, D. Homepage. <http://www.earth.ox.ac.uk/~davewa/>.

Winter, J.D., 2010. Principles of Igneous and Metamorphic Petrology, second edition. Prentice Hall. 702 p.

Yardley, B.W.D., 2004. Introdução à Petrologia Metamórfica, 2ª edição, revista. Editora UnB. 434 p.