

Metamorfismo de Rochas Pelíticas

Aula de hoje

- Introdução
- Principais protolitos e suas composições químicas
- Sistema químico simplificado
- Quimiografia
- Metamorfismo barroiano (metapelitos pobres em Al_2O_3)

29. *On an INTRUSION of MUSCOVITE-BIOTITE GNEISS in the SOUTH-EASTERN HIGHLANDS of SCOTLAND, and its ACCOMPANYING METAMORPHISM.* By GEORGE BARROW, Esq., F.G.S. (Communicated by permission of the Director-General of the Geological Survey. Read March 22nd, 1893.)

[PLATES XV. & XVI.]

CONTENTS.

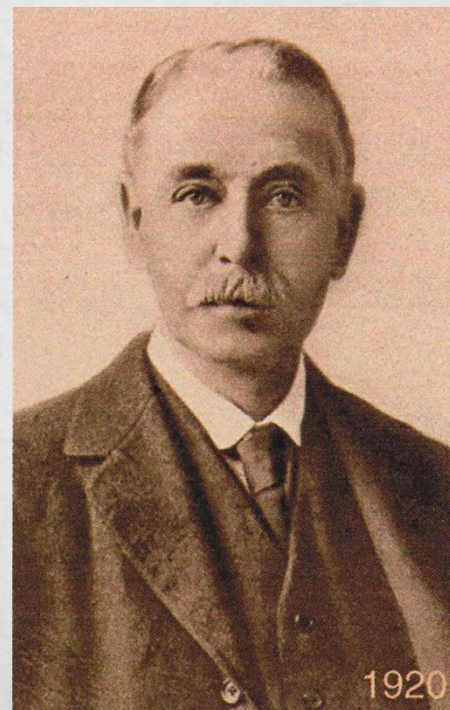
	Page
I. Introduction	330
II. Distribution and Mode of Occurrence of the Igneous Rocks	330
III. Petrological Characters of the Igneous Rocks	332
IV. Minerals of the Metamorphic Rocks	337
V. Rocks of the Metamorphic Area	343
(a) The Sillimanite-zone.	
(b) The Cyanite-zone.	
(c) The Staurolite-zone.	
VI. Sedimentary Origin of the Metamorphic Rocks	351
VII. Evidence of Progressive Metamorphism.....	352
VIII. General Conclusions, and Summary of Results.....	352
IX. Analyses of the Rocks	354

I. INTRODUCTION.

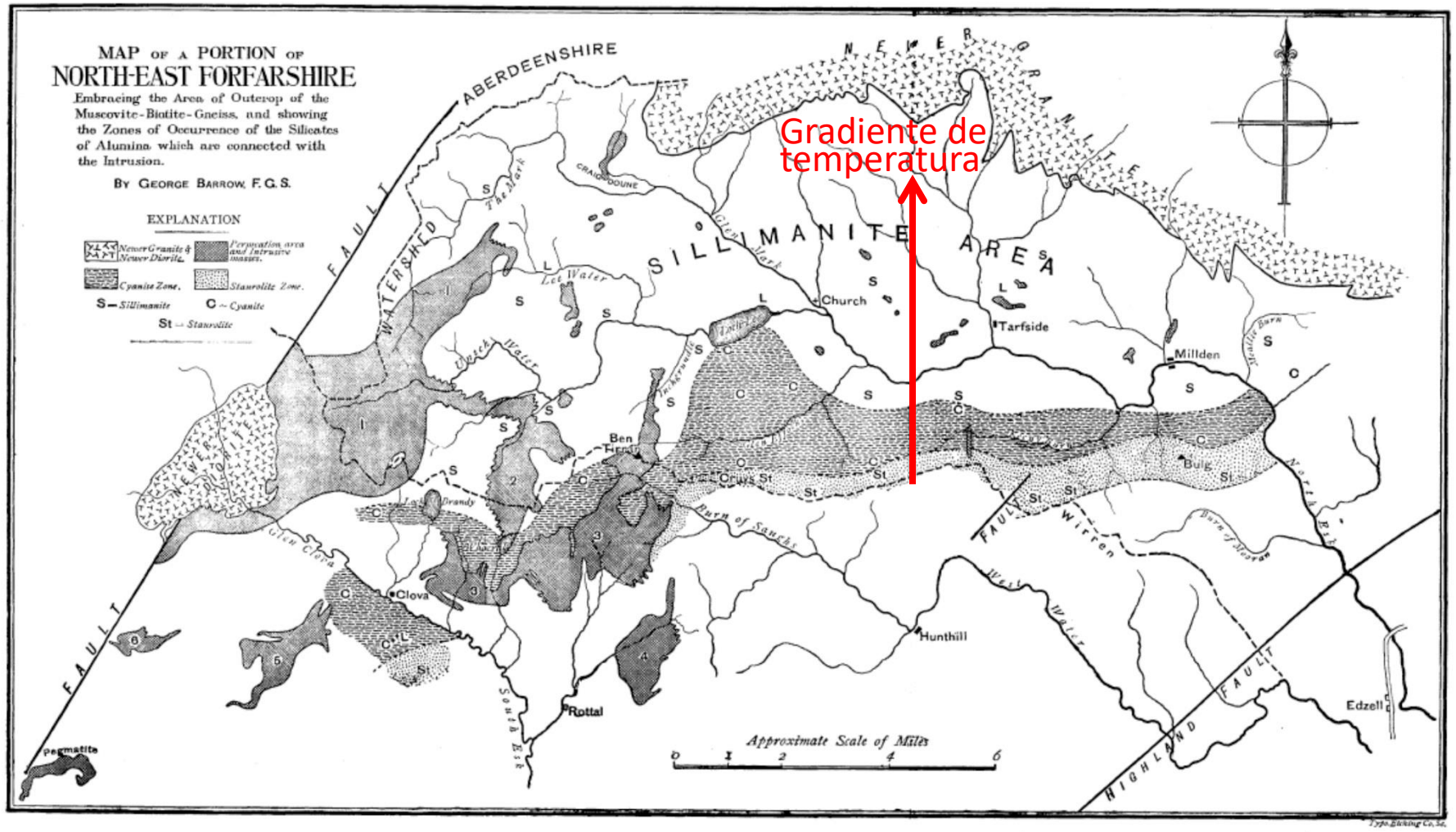
THE area to which attention is directed in the following pages lies in the north-eastern corner of Forfarshire, and forms part of the singularly flat table-land of the South-eastern Highlands. It is essentially a moorland district, much covered with peat and heather, and is drained by two rivers, the North Esk and the South Esk. The rocks of which the area is composed consist principally of gneisses and schists; these are clearly seen in the craggy sides of the valleys through which the two Esks and their tributaries flow. Boulders of these rocks may be noticed in the rough walls by the roadside as one drives up the glens, and their intensely crystalline aspect is a most striking feature. A brief visit to the crags and the flat-topped moorland speedily convinces the observer that this crystalline aspect is one of the chief characteristics of the district. It is proposed to show in the present communication that this area contains several masses of intrusive rock which are probably connected underground, and that the highly crystalline character of the surrounding schists is mainly the result of thermometamorphism.

Metamorfismo Barroviano (Terras Altas da Escócia)

Barrow, G., 1893. On an intrusion of muscovite-biotite gneiss in the south-eastern Highlands of Scotland, and its accompanying metamorphism. *Quarterly Journal of the Geological Society* 49: 330-358.



Metamorfismo Barroviano (Terras Altas da Escócia)



Barrow, G., 1893. On an intrusion of muscovite-biotite gneiss in the south-eastern Highlands of Scotland, and its accompanying metamorphism. *Quarterly Journal of the Geological Society* 49: 330-358.

Metamorfismo Barroviano (Terras Altas da Escócia)

274

ON THE GEOLOGY OF LOWER DEE-SIDE AND THE SOUTHERN HIGHLAND BORDER.

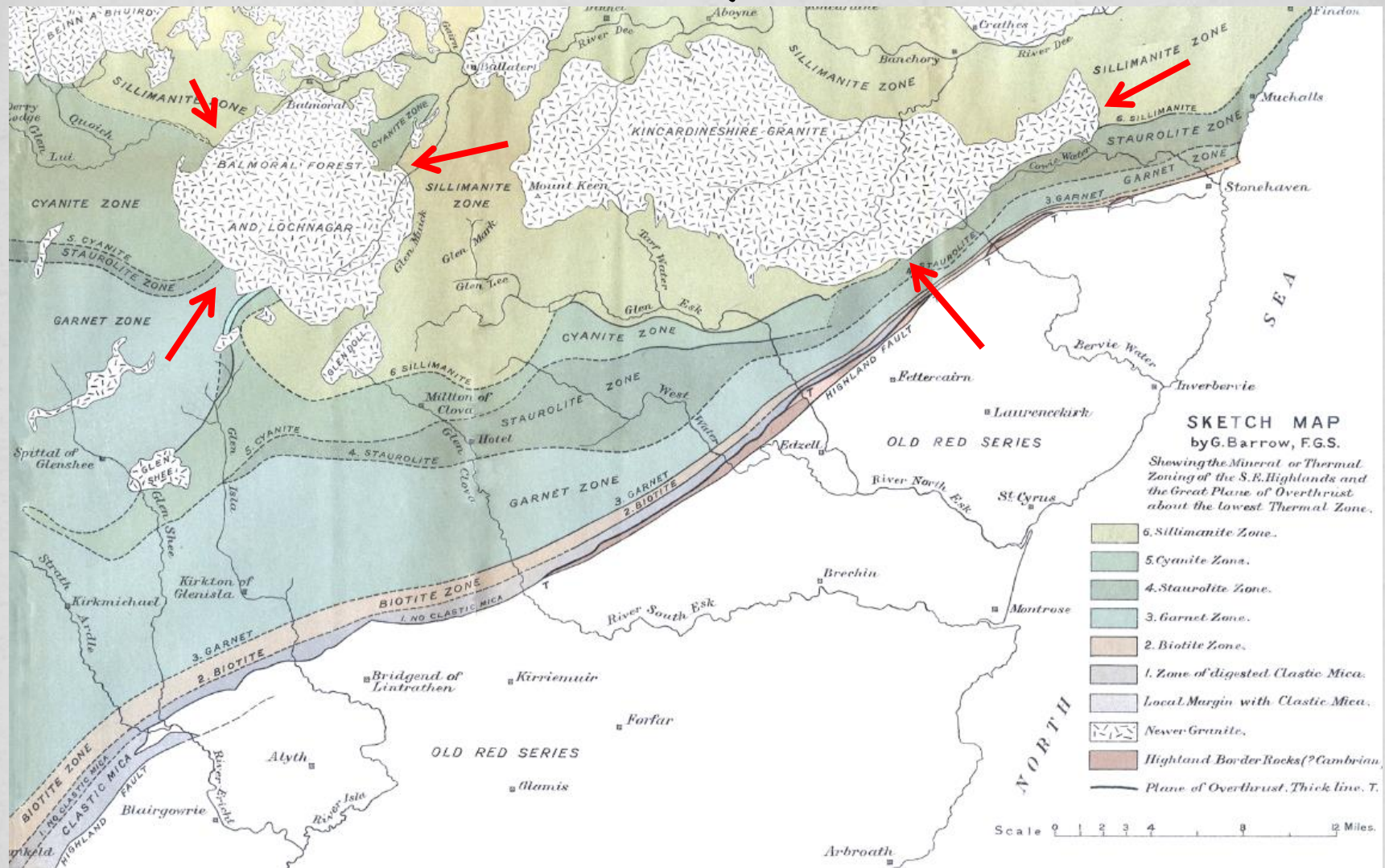
BY GEORGE BARROW, F.G.S.

THE Excursion of the Association to the west of Scotland in September, 1912, was undertaken in order to enable the Members to examine two portions of the great mass of more or less crystalline rocks that cover so large a part of the north of Scotland and of the north-west of Ireland. As it is now well known that the same metamorphosed sediments occur in both countries it will be convenient to call these rocks the Highland series. The object of this examination was to get a true insight into the nature of this great mass of crystalline material; into the cause, in part at least, of its crystallisation, and to study the phenomena occurring along the margins of the mass where it ceases to be crystalline.

Reconhecimento de
mais 3 zonas
metamórficas,
totalizando 6 zonas

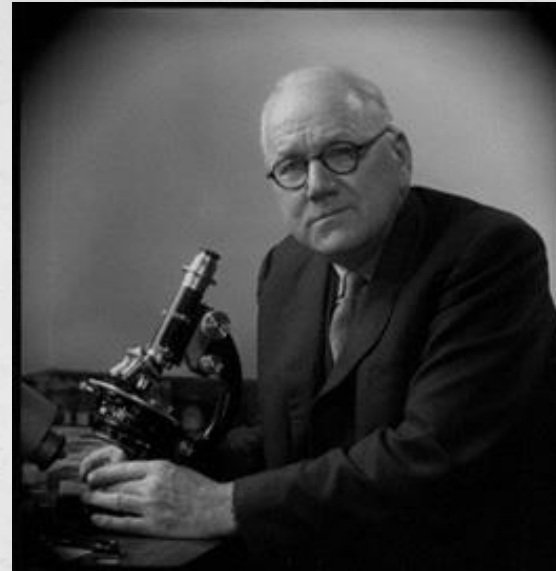
Barrow, G., 1912. On the geology of lower dee-side and the southern Highland border. *Proceedings of the Geologists' Association* 23: 274-290.

Metamorfismo Barroviano (Terras Altas da Escócia)



Barrow, G., 1912. On the geology of lower dee-side and the southern Highland border. *Proceedings of the Geologists' Association* 23: 274-290.

Metamorfismo Barroviano (Terras Altas da Escócia)



Tilley, C.E., 1924. The facies classification of metamorphic rocks. *Geological Magazine* 61: 167-170.

Tilley, C.E., 1925. A preliminary survey of metamorphic zones in the Southern Highlands of Scotland. *Geological Society* 81: 100-112.

Expandiu o mapeamento das zonas metamórficas para uma região maior; Reconheceu que uma isógrada reflete uma reação química que ocorreu a uma condição específica de temperatura e pressão; e que o metamorfismo responsável pela zonação metamórfica foi regional e não associado às intrusões.

Protolitos

Em petrologia metamórfica o termo rocha pelítica (ou metapelítica) é utilizado de maneira abrangente para designar rochas sedimentares ricas em argila.

Protolitos incluem sedimentos inconsolidados, lama e argila, e rochas sedimentares, tais como lamito, argilito e folhelho.

Em geral, são rochas de granulação muito fina ($< 2 \mu\text{m}$).

Mineralogia

Mineralogia dominada por filossilicatos ricos em Al_2O_3 e K_2O , tais como argilas (montmorillonita, caolinita e esmectita), micas brancas finas (sericita, paragonita ou fengita), além de clorita.

Esses minerais podem ser grãos detríticos ou autigênicos; representam geralmente > 50% em volume e são responsáveis pelos conteúdos de alumínio e álcalis.

Quartzo representa de 10-30% em volume dos pelitos, estando comumente em excesso.

Constituintes comuns menores incluem feldspatos (albita e feldspato potássico), óxidos e hidróxidos de ferro, zeólitas, carbonatos, sulfetos e matéria orgânica.

Composição química dos metapelitos

Análises químicas de argilitos e metapelitos

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

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

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

As características composicionais dos pelitos verdadeiros (ricos em Al₂O₃) são melhor representadas por argilas pelágicas.

11 óxidos mais comuns (incluindo H₂O)

Representação gráfica necessitaria de 11 dimensões!

Composição química dos metapelitos

Análises químicas de argilitos e metapelitos

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

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

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

Principais componentes:

SiO₂, Al₂O₃, FeO_t, MgO, K₂O, H₂O

Componentes menores:

Na₂O, CaO, TiO₂, MnO, Fe₂O₃

Alto conteúdo de água:

água liberada durante o metamorfismo ajuda a manter o equilíbrio químico

No início do metamorfismo as rochas estão em seu estado mais hidratado.

Sistema químico simplificado

Análises químicas de argilitos e metapelitos

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

Qual artifício poderíamos utilizar para reduzir o número de componentes do sistema químico sem prejudicar a interpretação das paragêneses observadas nas rochas naturais?

Sistema químico simplificado

THE AMERICAN MINERALOGIST, VOL. 42, NOVEMBER-DECEMBER 1957

THE GRAPHICAL ANALYSIS OF MINERAL ASSEMBLAGES IN PELITIC SCHISTS*

JAMES B. THOMPSON, JR., *Harvard University,
Cambridge, Massachusetts.*

ABSTRACT

The principal minerals used as metamorphic indicators in pelitic schists are, to a first approximation, phases in the system: $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO-FeO-K}_2\text{O-H}_2\text{O}$. At a given pressure, temperature and humidity (activity of H_2O), quartz-bearing assemblages in this system are dependent on the relative amounts of Al_2O_3 , MgO , FeO , and K_2O . These assemblages may be shown three-dimensionally in the tetrahedron: $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-MgO-FeO-K}_2\text{O}$. Assemblages which include muscovite as well as quartz may be represented successfully in two dimensions by projecting the compositions of minerals onto some suitable plane with the composition KAl_3O_5 as point of projection. This projection is applicable to rocks over a wide range in bulk composition and through wide range of metamorphic conditions. It also provides a unique characterization of the mineral facies observed in pelitic schists. The principal variation in composition of most of the minerals involved is given by the ratio MgO/MgO+FeO . This ratio may commonly be determined with sufficient accuracy by simple measurements of optical or other physical properties.

Sistema químico simplificado

Artifícios

1) Desconsiderar componentes que formam fases puras que podem ser ignoradas (Ti - rutilo).

Análises químicas de argilitos e metapelitos

	1	2	3	4	5
1 → SiO ₂	64.7	64.0	61.5	65.9	56.3
1 → TiO₂	0.80	0.81	0.87	0.92	1.05
2 → Al ₂ O ₃	17.0	18.1	18.6	19.1	20.2
5 → MgO	2.82	2.85	3.81	2.30	3.23
3 → FeO	5.69	7.03	10.0	6.86	8.38
MnO	0.25	0.10			0.18
CaO	3.50	1.54	0.81	0.17	1.59
Na ₂ O	1.13	1.64	1.46	0.85	1.86
4 → K ₂ O	3.96	3.86	3.02	3.88	4.15
P ₂ O ₅	0.15	0.15			
Total	100.00	100.08	100.07	99.98	96.94

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

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

Sistema químico simplificado

Artifícios

Análises químicas de argilitos e metapelitos

	1	2	3	4	5
1 → TiO₂	64.7	64.0	61.5	65.9	56.3
2 → CaO	0.80	0.81	0.87	0.92	1.05
5 → Al ₂ O ₃	17.0	18.1	18.6	19.1	20.2
5 → MgO	2.82	2.85	3.81	2.30	3.23
3 → FeO	5.69	7.03	10.0	6.86	8.38
MnO	0.25	0.10			0.18
CaO	3.50	1.54	0.81	0.17	1.59
Na₂O	1.13	1.64	1.46	0.85	1.86
4 → K ₂ O	3.96	3.86	3.02	3.88	4.15
P₂O₅	0.15	0.15			
Total	100.00	100.08	100.07	99.98	96.94

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

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

1) Desconsiderar componentes que formam fases puras que podem ser ignoradas (Ti - rutilo).

2) Excluir componentes que entram na composição de uma só fase, a qual pode ser ignorada por não ser índice metamórfico (Ca e Na - plagioclásio, P - apatita, Zr - zircão).

Sistema químico simplificado

Artifícios

Análises químicas de argilitos e metapelitos

	1	2	3	4	5
1 → SiO ₂	64.7	64.0	61.5	65.9	56.3
1 → TiO₂	0.80	0.81	0.87	0.92	1.05
2 → Al ₂ O ₃	17.0	18.1	18.6	19.1	20.2
5 → MgO	2.82	2.85	3.81	2.30	3.23
3 → FeO	5.69	7.03	10.0	6.86	8.38
MnO	0.25	0.10			0.18
CaO	3.50	1.54	0.81	0.17	1.59
Na₂O	1.13	1.64	1.46	0.85	1.86
4 → K ₂ O	3.96	3.86	3.02	3.88	4.15
P₂O₅	0.15	0.15			
Total	100.00	100.08	100.07	99.98	96.94

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

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

1) Desconsiderar componentes que formam fases puras que podem ser ignoradas (Ti - rutilo).

2) Excluir componentes que entram na composição de uma só fase, a qual pode ser ignorada por não ser índice metamórfico (Ca e Na - plagioclásio, P - apatita, Zr - zircão).

3) Desconsiderar elementos que não são abundantes para estabilizar fases específicas (Mn, Zn).

Sistema químico simplificado

Artifícios

Análises químicas de argilitos e metapelitos

	1	2	3	4	5
1 → SiO ₂	64.7	64.0	61.5	65.9	56.3
2 → TiO₂	0.80	0.81	0.87	0.92	1.05
2 → Al ₂ O ₃	17.0	18.1	18.6	19.1	20.2
5 → MgO	2.82	2.85	3.81	2.30	3.23
3 → FeO	5.69	7.03	10.0	6.86	8.38
MnO	0.25	0.10			0.18
CaO	3.50	1.54	0.81	0.17	1.59
Na₂O	1.13	1.64	1.46	0.85	1.86
4 → K ₂ O	3.96	3.86	3.02	3.88	4.15
P₂O₅	0.15	0.15			
Total	100.00	100.08	100.07	99.98	96.94

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

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

1) Desconsiderar componentes que formam fases puras que podem ser ignoradas (Ti - rutilo).

2) Excluir componentes que entram na composição de uma só fase, a qual pode ser ignorada por não ser índice metamórfico (Ca e Na - plagioclásio, P - apatita, Zr - zircão).

3) Desconsiderar elementos que não são abundantes para estabilizar fases específicas (Mn, Zn, Cr).

4) Desconsiderar componentes com potencial químico controlado externamente (CO₂)

Sistema químico simplificado

Análises químicas de argilitos e metapelitos

	1	2	3	4	5
1 → SiO ₂	64.7	64.0	61.5	65.9	56.3
TiO₂	0.80	0.81	0.87	0.92	1.05
2 → Al ₂ O ₃	17.0	18.1	18.6	19.1	20.2
5 → MgO	2.82	2.85	3.81	2.30	3.23
3 → FeO	5.69	7.03	10.0	6.86	8.38
MnO	0.25	0.10			0.18
CaO	3.50	1.54	0.81	0.17	1.59
Na₂O	1.13	1.64	1.46	0.85	1.86
4 → K ₂ O	3.96	3.86	3.02	3.88	4.15
P₂O₅	0.15	0.15			
Total	100.00	100.08	100.07	99.98	96.94

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

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

KFMASH

K₂O, FeO, MgO, Al₂O₃, SiO₂, H₂O

Esse foi o sistema utilizado para realização da maioria dos estudos teóricos e experimentais.

(anterior ao advento das pseudosseções)

Sistema com 6 componentes:
6 dimensões para representação gráfica!

Sistema químico simplificado

Análises químicas de argilitos e metapelitos

	1	2	3	4	5
1 → SiO ₂	64.7	64.0	61.5	65.9	56.3
2 → TiO₂	0.80	0.81	0.87	0.92	1.05
2 → Al ₂ O ₃	17.0	18.1	18.6	19.1	20.2
5 → MgO	2.82	2.85	3.81	2.30	3.23
3 → FeO	5.69	7.03	10.0	6.86	8.38
MnO	0.25	0.10			0.18
CaO	3.50	1.54	0.81	0.17	1.59
Na₂O	1.13	1.64	1.46	0.85	1.86
4 → K ₂ O	3.96	3.86	3.02	3.88	4.15
P₂O₅	0.15	0.15			
Total	100.00	100.08	100.07	99.98	96.94

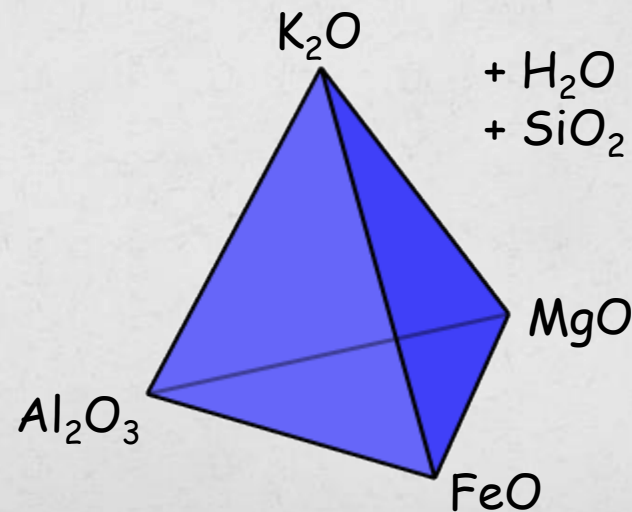
* Reported on a volatile-free basis (normalized to 100%) to aid comparis

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

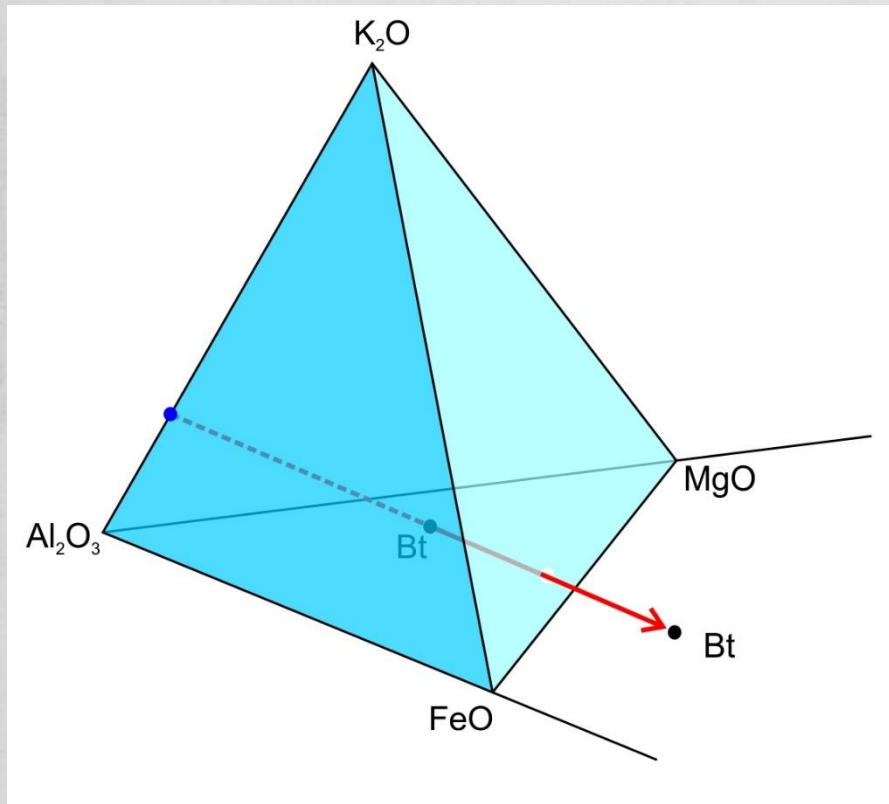
Artifícios

5) Projetar a partir do vértice de fases puras que estão em excesso (SiO₂ - quartzo, H₂O - água)

Sistema reduzido para 4 componentes: representação gráfica por um tetraedro.



Representação quimiográfica simplificada



Artifícios

6) Se um componente ocorre em número restrito de fases e uma delas ocorre em excesso, esse componente pode ser eliminado se a projeção for feita a partir dessa fase.

K_2O - muscovita - em excesso em metapelitos de fácies xisto verde inferior a anfibolito superior

K_2O também está presente na biotita e no feldspato potássico.

Muscovita: $K_2Al_6Si_6O_{20}(OH)_4$
1 K_2O : 3 Al_2O_3 : 6 SiO_2 : 2 H_2O

Diagrama AFM (J.B. Thompson, 1957)

Biotita: $\text{KMg}_2\text{FeSi}_3\text{AlO}_{10}(\text{OH})_2$

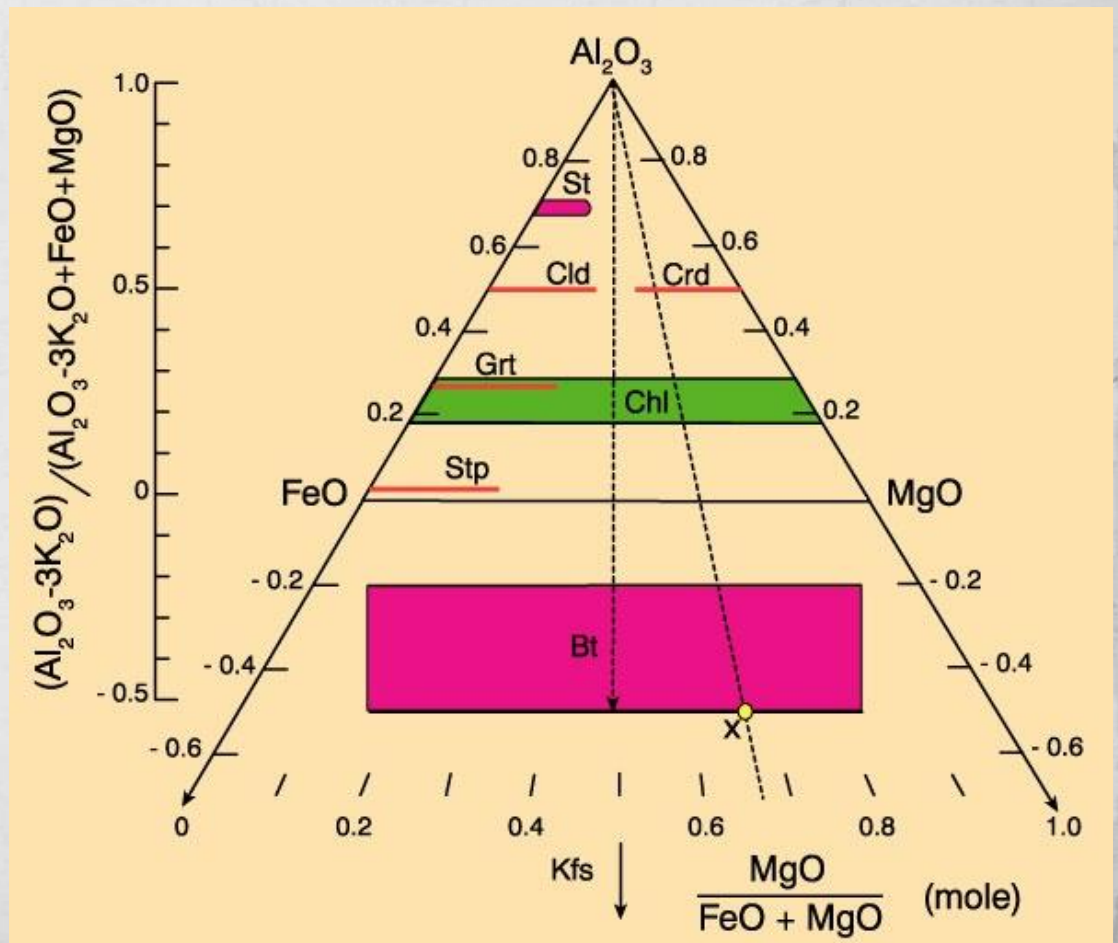


Diagrama AFM (J.B. Thompson, 1957)

Biotita: $\text{KMg}_2\text{FeSi}_3\text{AlO}_{10}(\text{OH})_2$

0,5 K_2O : 2 MgO : 1 FeO : 3 SiO_2 : 0,5 Al_2O_3 : 1 H_2O

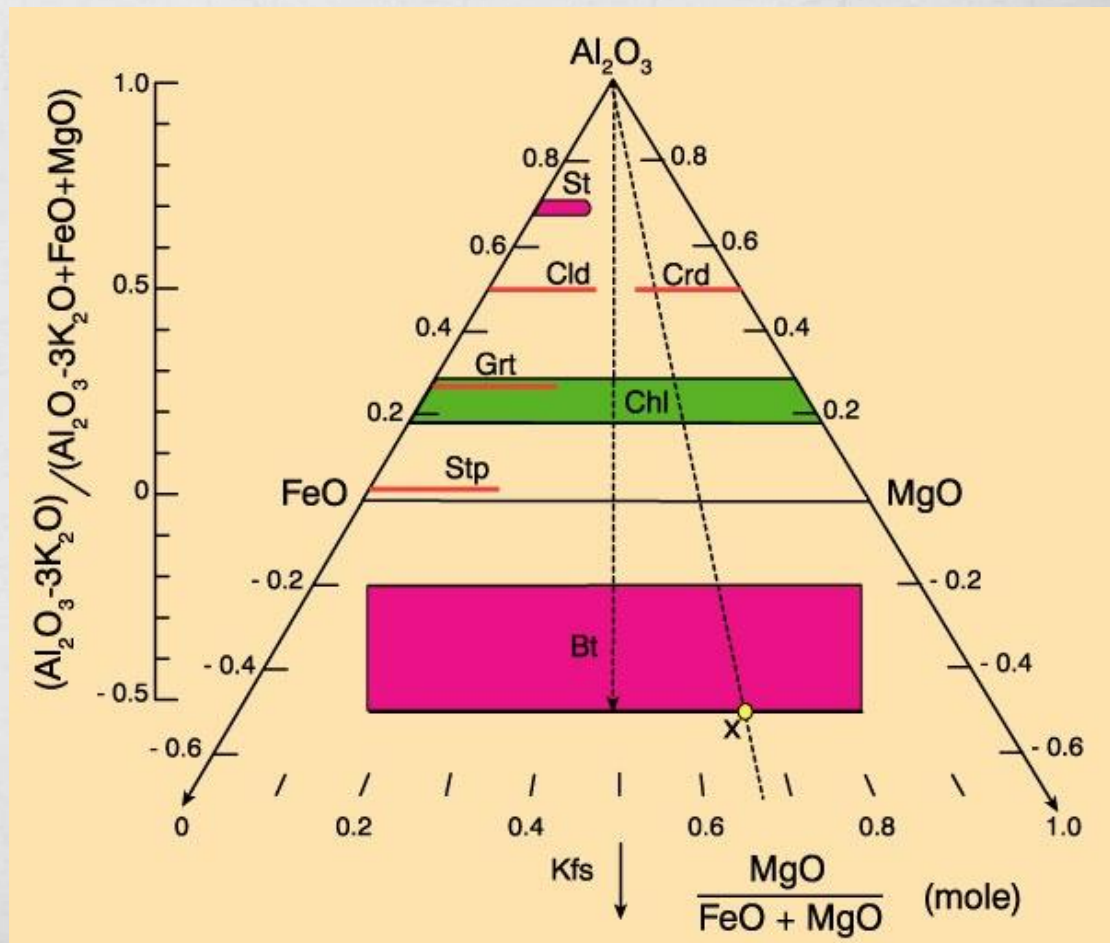


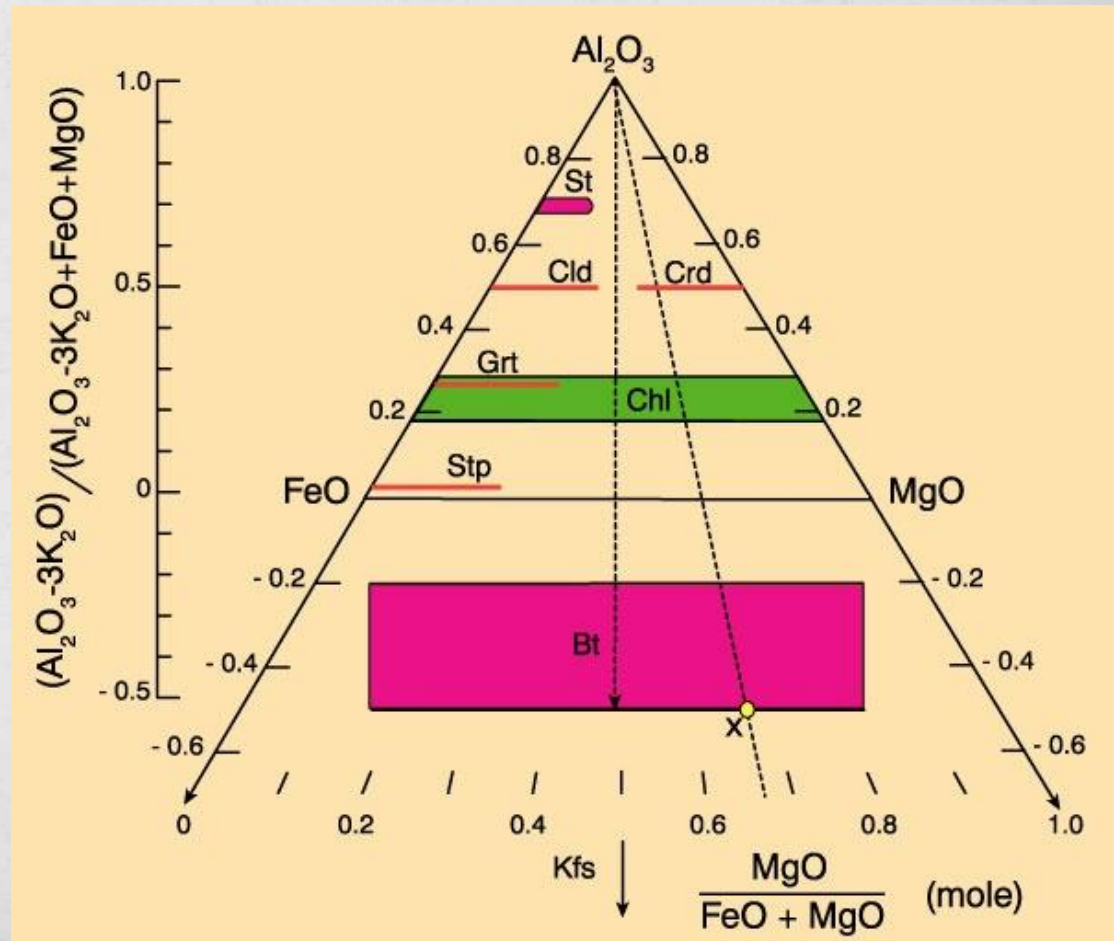
Diagrama AFM (J.B. Thompson, 1957)

Biotita: $\text{KMg}_2\text{FeSi}_3\text{AlO}_{10}(\text{OH})_2$

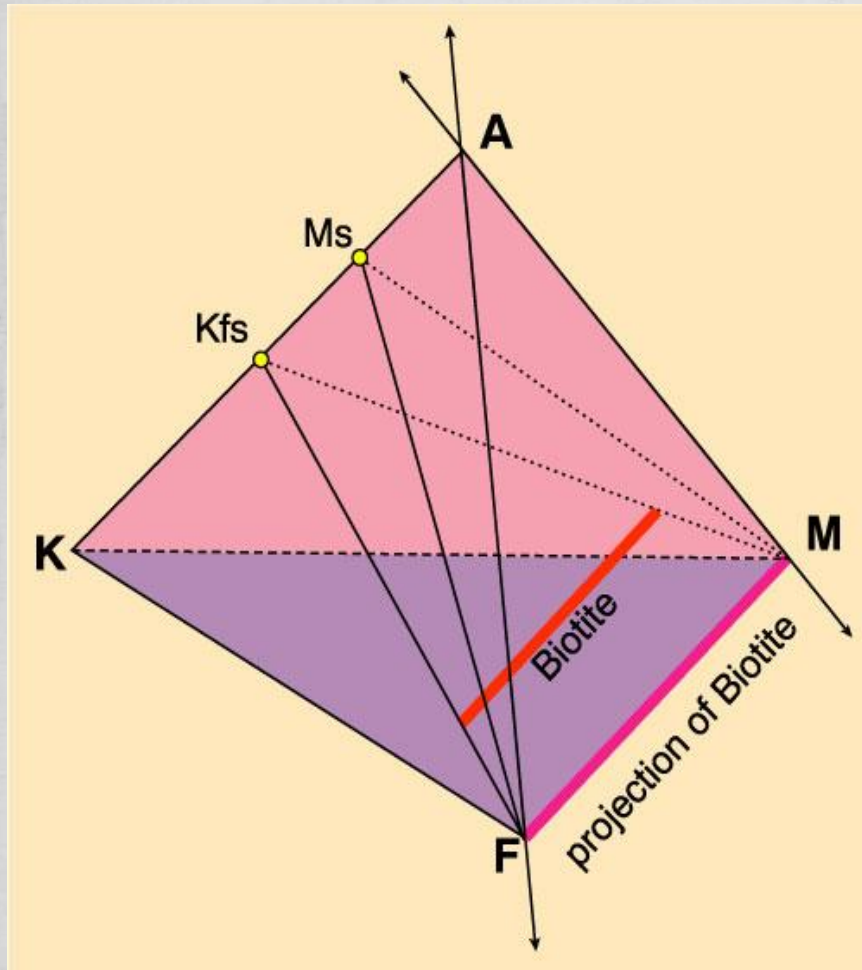
0,5 K_2O : 2 MgO : 1 FeO : 3 SiO_2 : 0,5 Al_2O_3 : 1 H_2O

$$A = \frac{\overset{\text{Al}_2\text{O}_3}{0,5} - 3(\overset{\text{K}_2\text{O}}{0,5})}{\underset{\text{Al}_2\text{O}_3}{0,5} - 3(\overset{\text{K}_2\text{O}}{0,5}) + \underset{\text{FeO}}{1} + \underset{\text{MgO}}{2}} = -0,5$$

$$X_{\text{Mg}} = \frac{\overset{\text{MgO}}{2}}{\underset{\text{FeO}}{1} + \underset{\text{MgO}}{2}} = 0,67$$



AFM projetado do Kfs

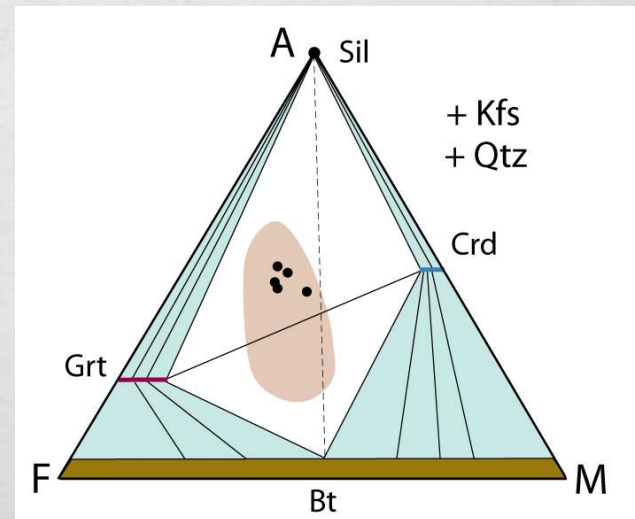


Feldspato potássico: $KAlSi_3O_8$
 $0,5 K_2O : 0,5 Al_2O_3 : 3 SiO_2$

K_2O - feldspato potássico - em excesso em metapelitos de fácies anfibolito superior a granulito

$$A = \frac{Al_2O_3 - K_2O}{Al_2O_3 - K_2O + FeO + MgO}$$

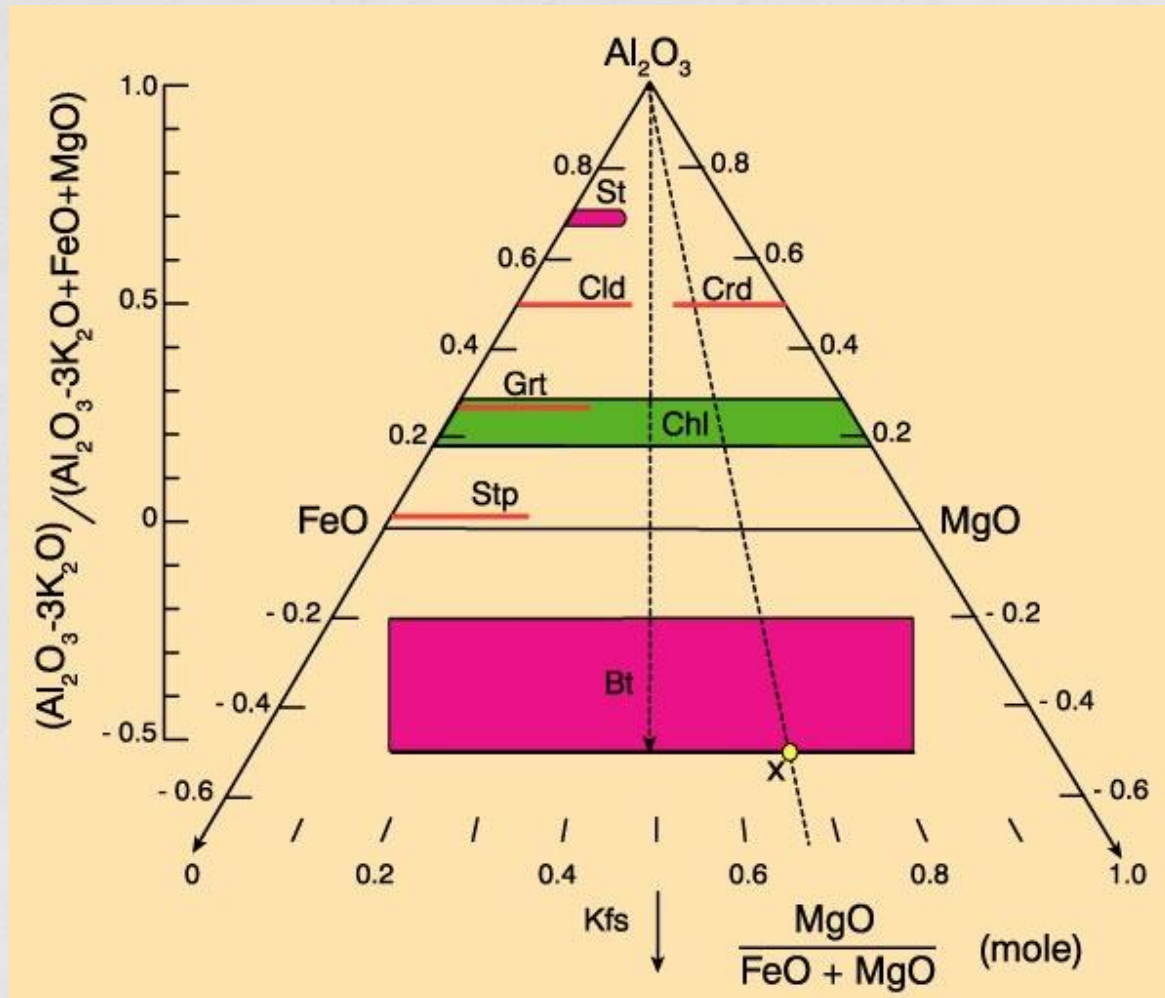
$$X_{Mg} = \frac{MgO}{FeO + MgO}$$



Principais minerais metamórficos (KFMASH)

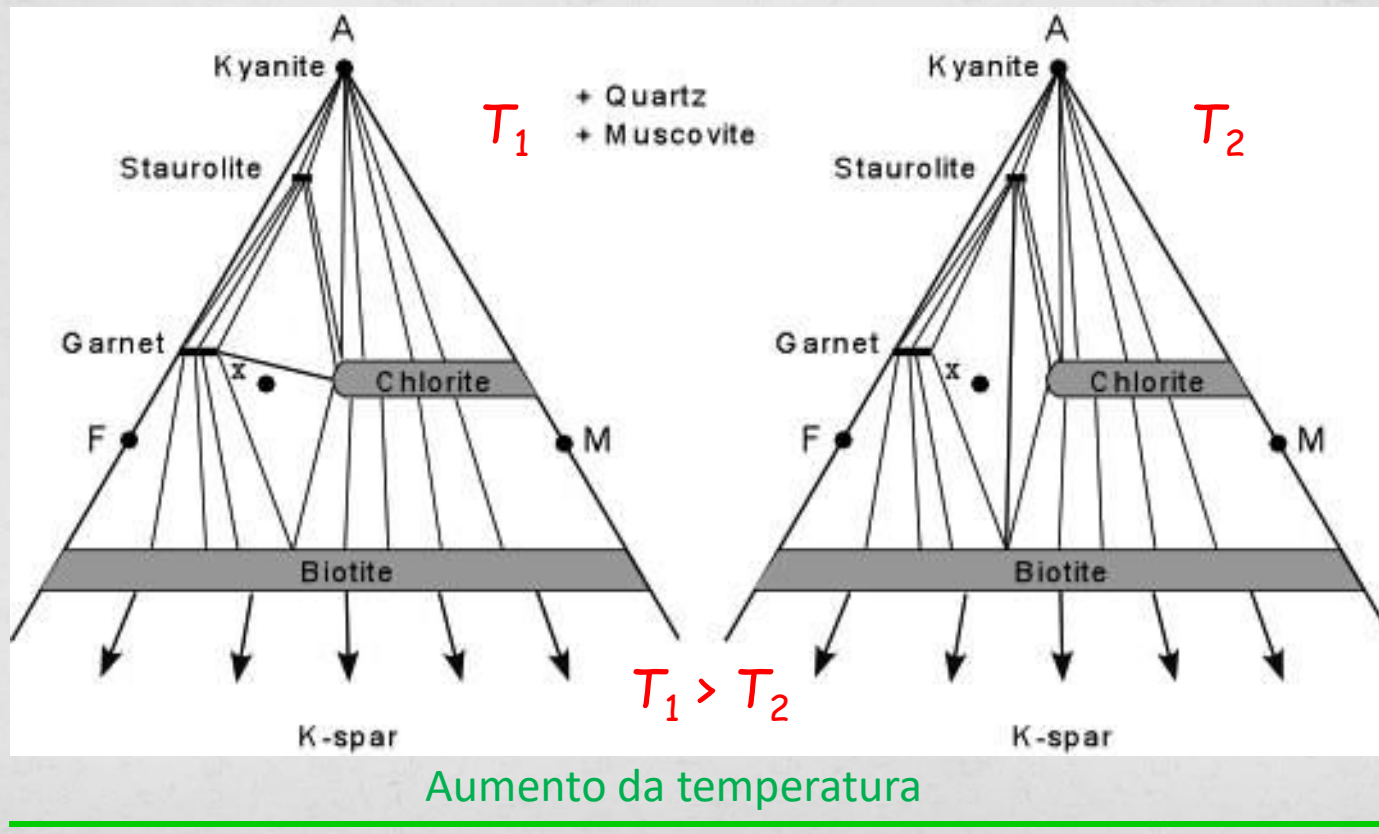
granada	$(\text{Fe-Mg})_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$
cianita, andalusita e sillimanita	Al_2SiO_5
cordierita	$\text{Mg}_2\text{Al}_4\text{Si}_5\text{O}_{18}\text{H}_2\text{O}$
cloritóide	$\text{FeAl}_2\text{SiO}_3(\text{OH})_2$
estaurolita	$\text{Fe}_4\text{Al}_{18}\text{Si}_{7.5}\text{O}_{48}(\text{OH})_4$
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	SiO_2
feldspato potássico	KAlSi_3O_8
hercinita	FeAl_2O_4
espinélio	MgAl_2O_4
corundum	Al_2O_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)	$\text{Mg}_{3.5}\text{Al}_9\text{Si}_{1.5}\text{O}_{20}$

Quais as utilidades do diagrama AFM?



A rocha 'x' apresenta diferentes paragênese nas temperaturas T_1 e T_2 . Quais seriam elas?

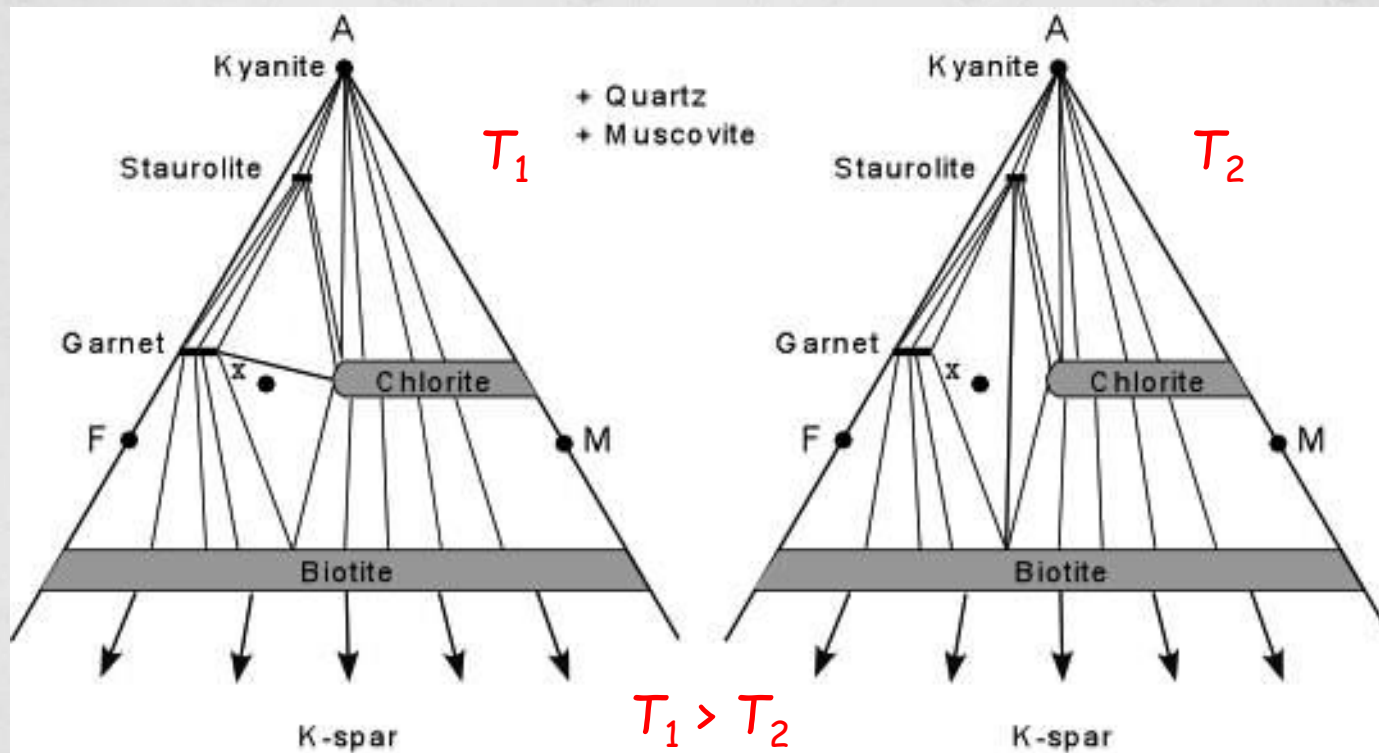
O que aconteceu na passagem entre T_1 e T_2 ?



A rocha 'x' apresenta na condição de temperatura T_1 a paragénese Grt + Bt + Chl. Na temperatura T_2 a mesma rocha apresenta a paragénese Grt + Bt + St. O que aconteceu?

Reação simplificada: $\text{Grt} + \text{Chl} = \text{St} + \text{Bt}$

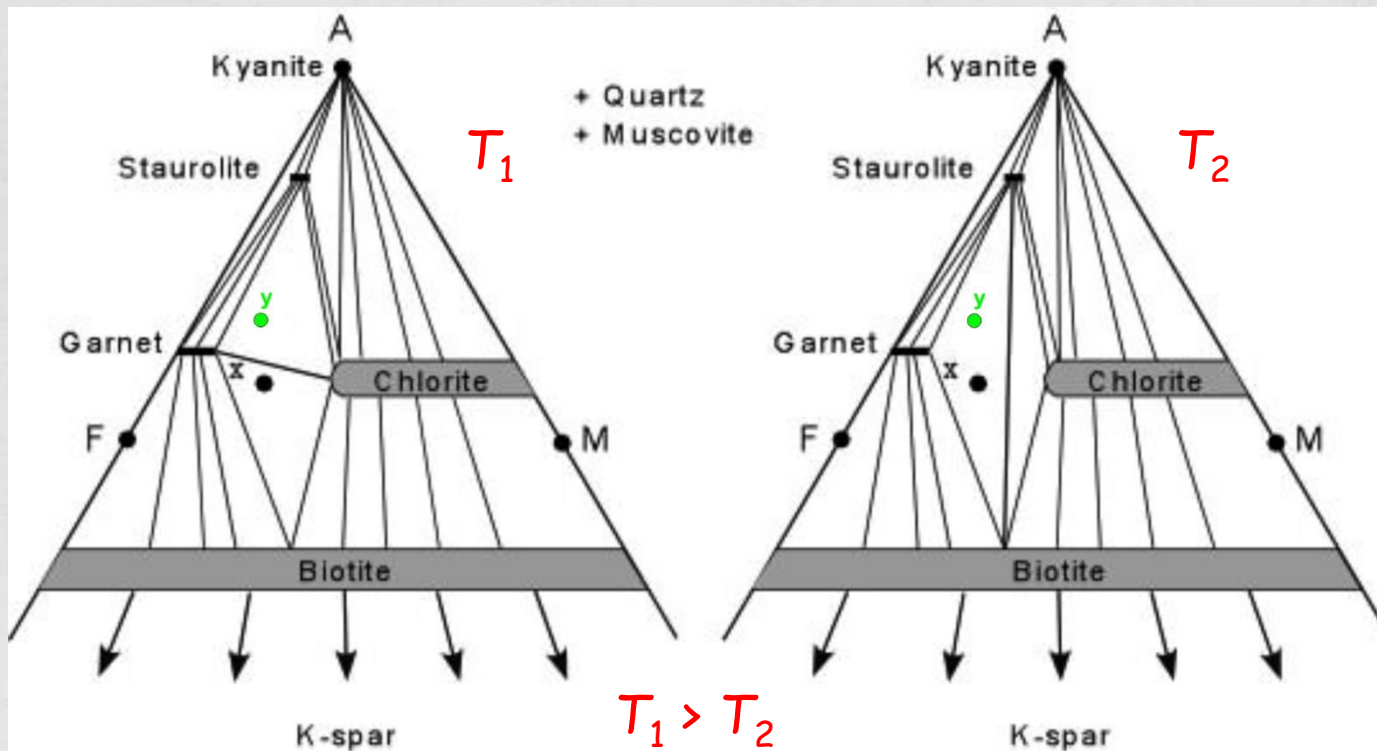
Reação completa: $\text{Grt} + \text{Chl} + \text{Ms} = \text{St} + \text{Bt} + \text{Qtz} + \text{H}_2\text{O}$



Aumento da temperatura

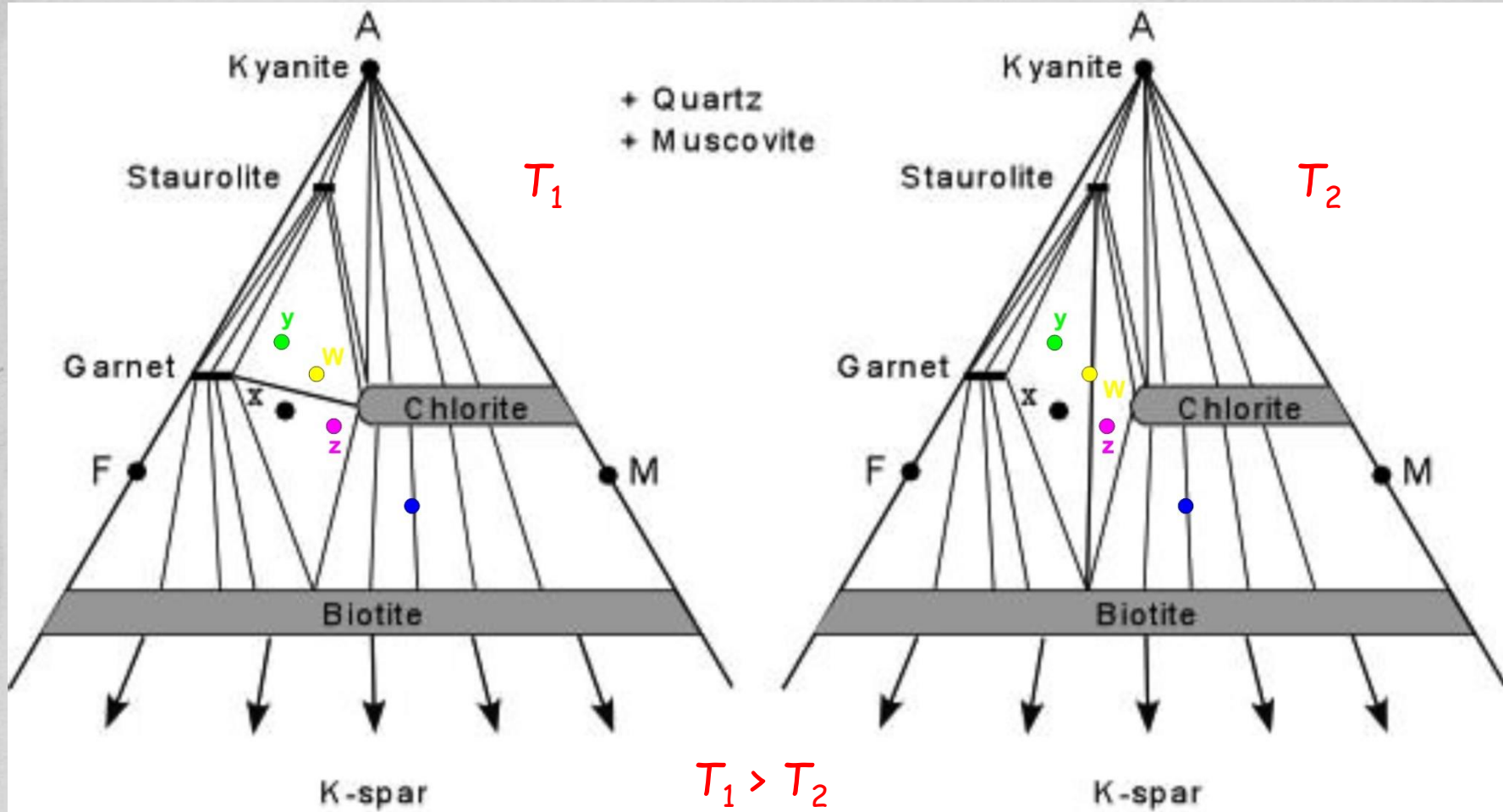


E o que acontece com a rocha 'y' na passagem entre T_1 e T_2 ?



Aumento da temperatura





Aumento da temperatura

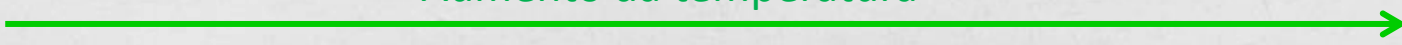
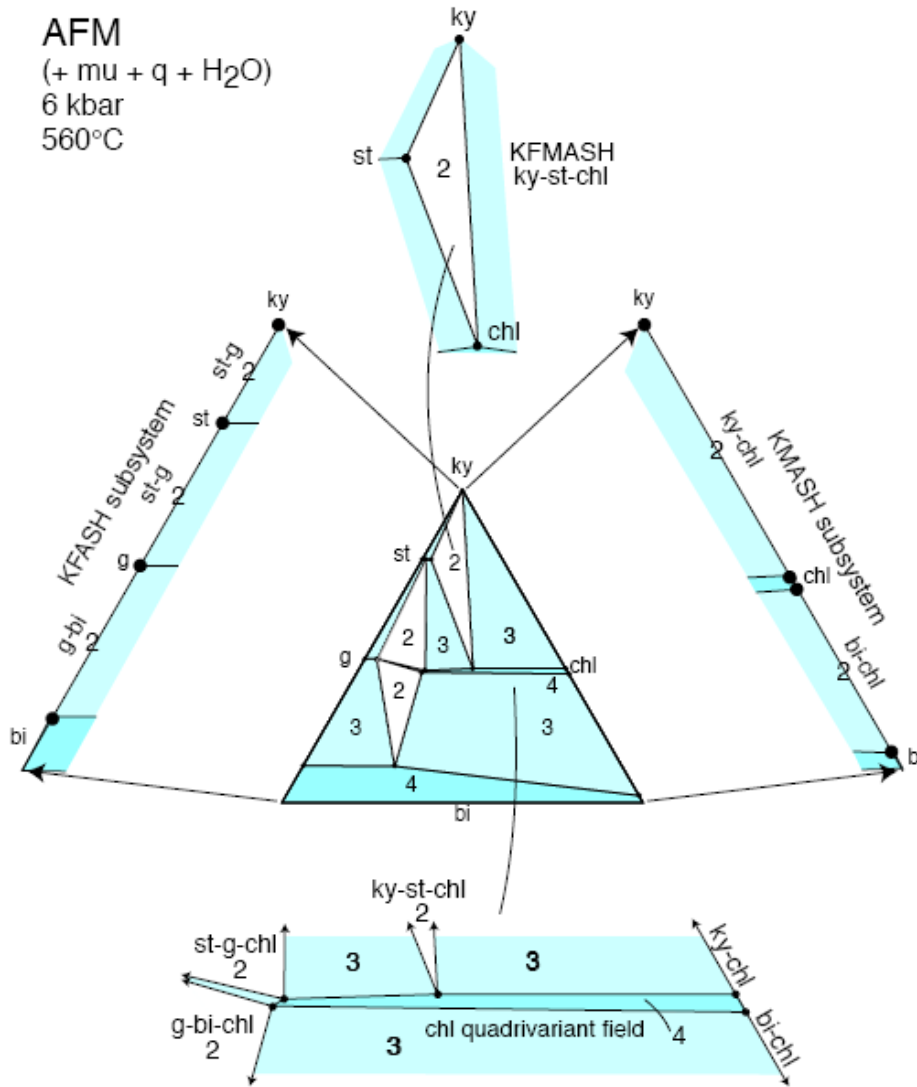


Diagrama AFM e regra das fases

AFM
 (+ mu + q + H₂O)
 6 kbar
 560°C

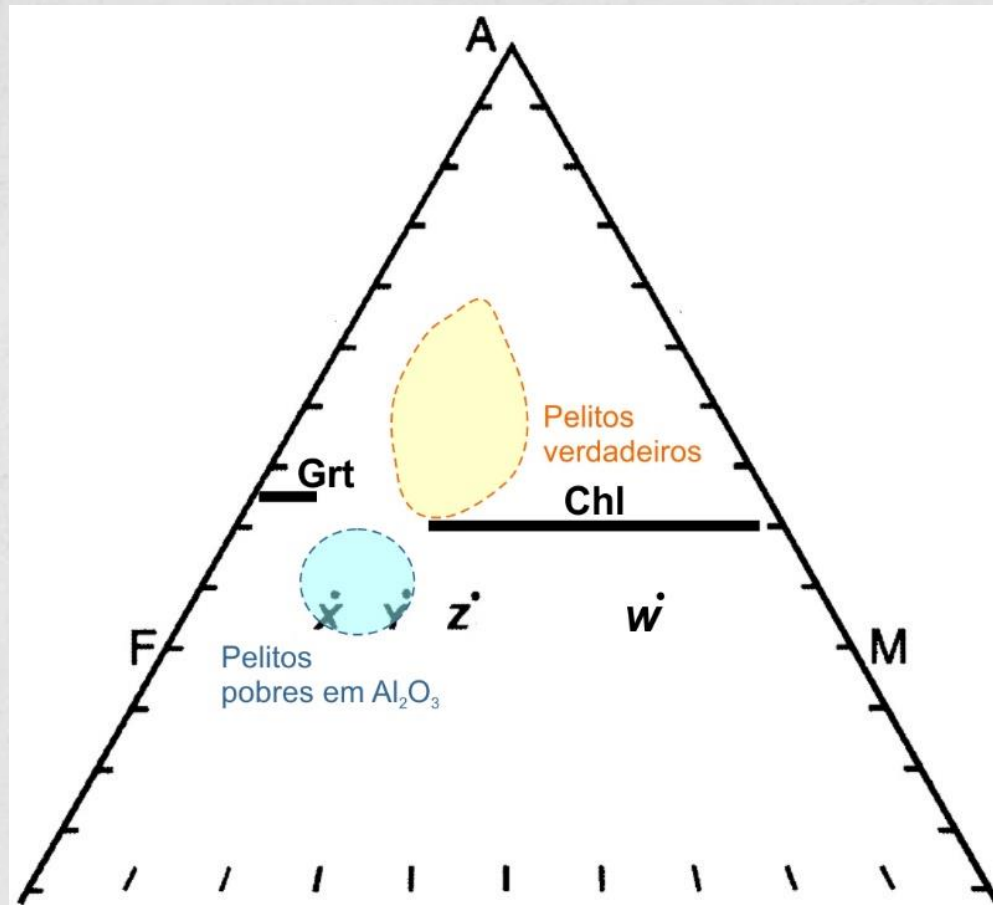


linhas de conexão

campos di, tri e tetravariantes

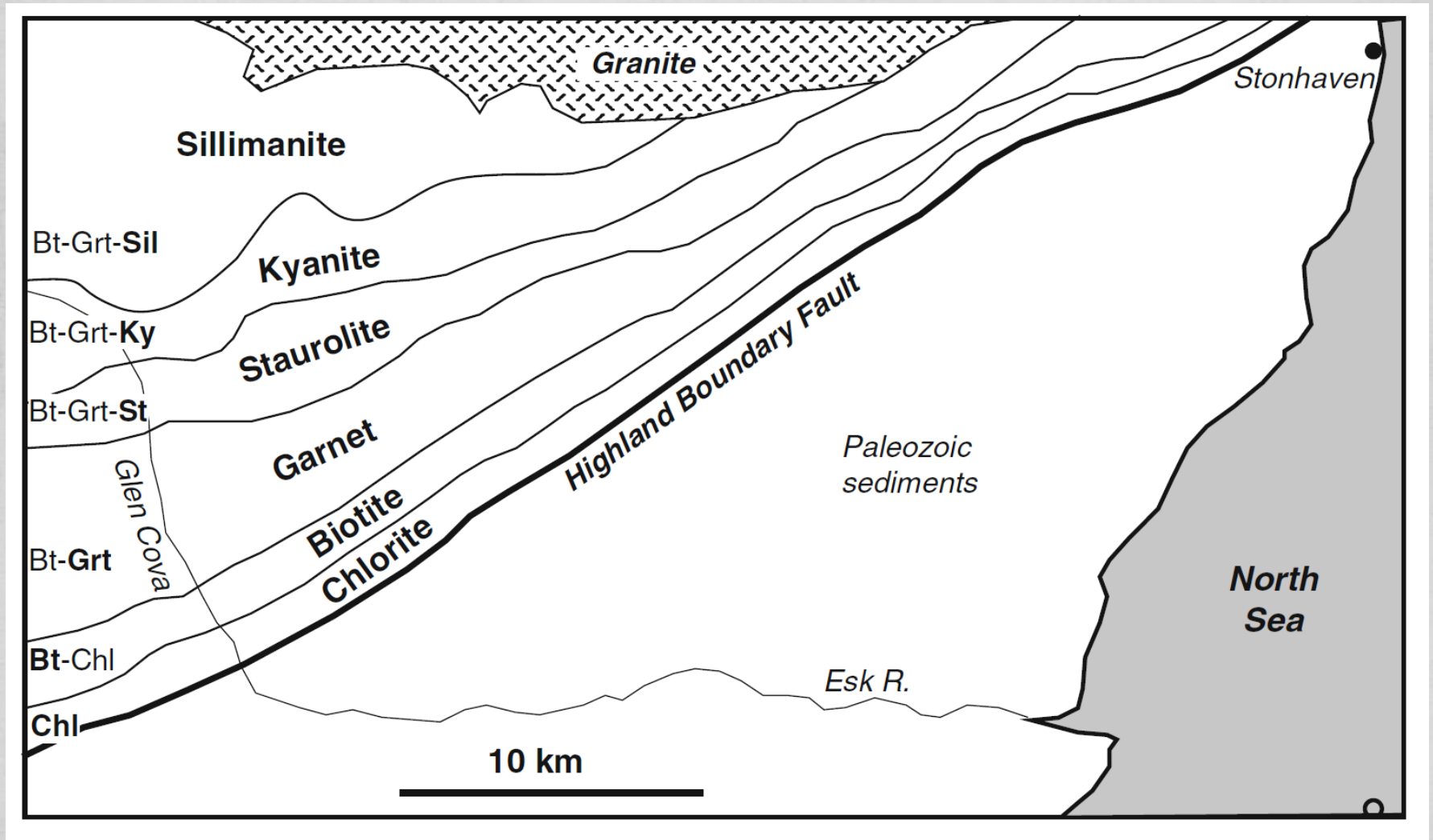
$$F = C - P + 2$$

Composições químicas dos metapelitos comuns



Metapelitos pobres em Al_2O_3

Metamorfismo Barroviano (Terras Altas da Escócia)



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

Metamorfismo de temperatura muito baixa

Transformações transicionais entre diagênese e metamorfismo de temperatura muito baixa.

Primeiramente os minerais de argila são transformados em

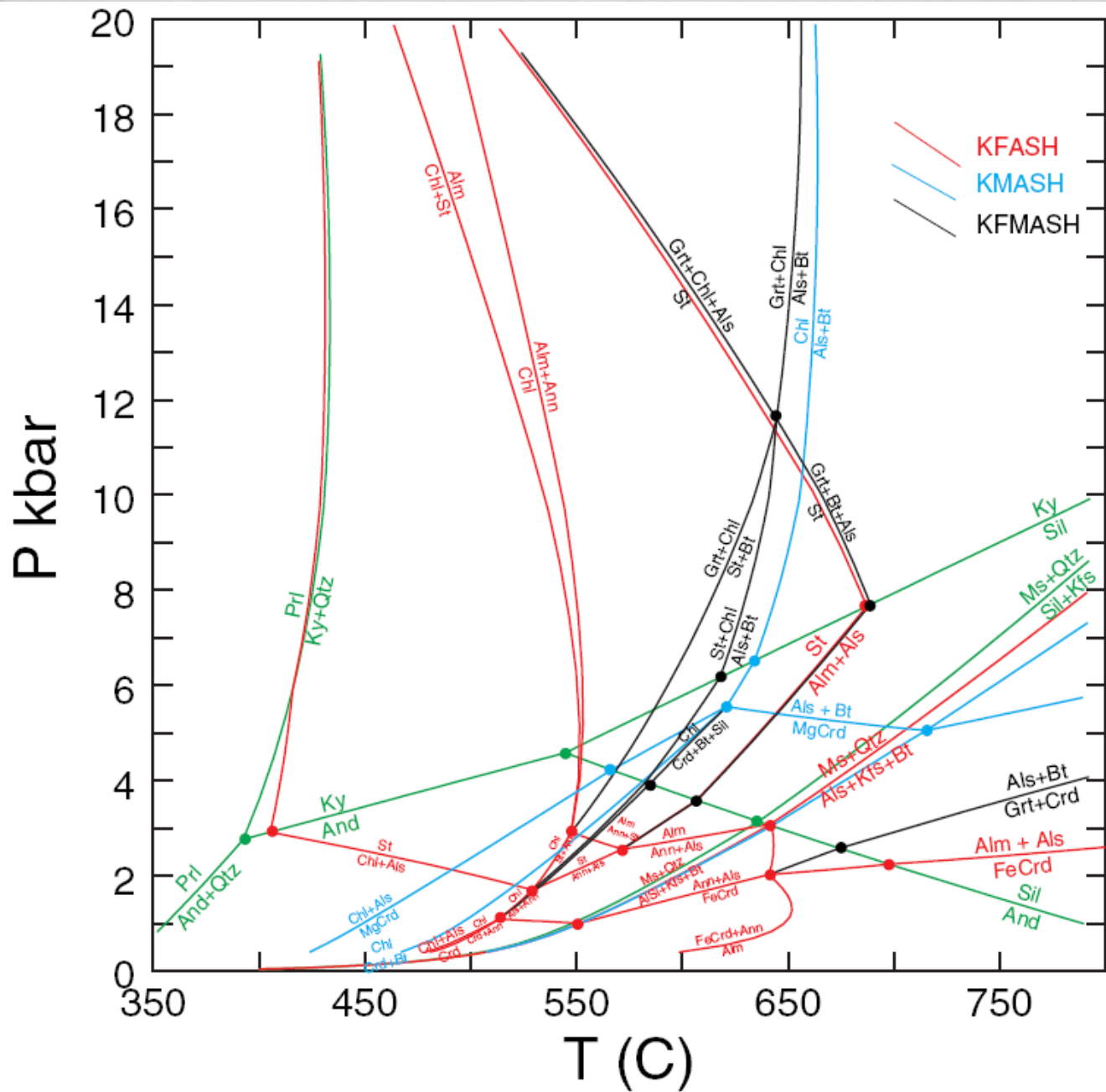
Clorita (Chl) - $Mg_5Al_2Si_3O_{10}(OH)_4$

Illita (Ill) - $K_{1,5-1}Al_4Al_{1,5-1}Si_{6,5-7}O_{20}(OH)_4$

Caolinita (Kln) - $Al_4Si_4O_{10}(OH)_8$

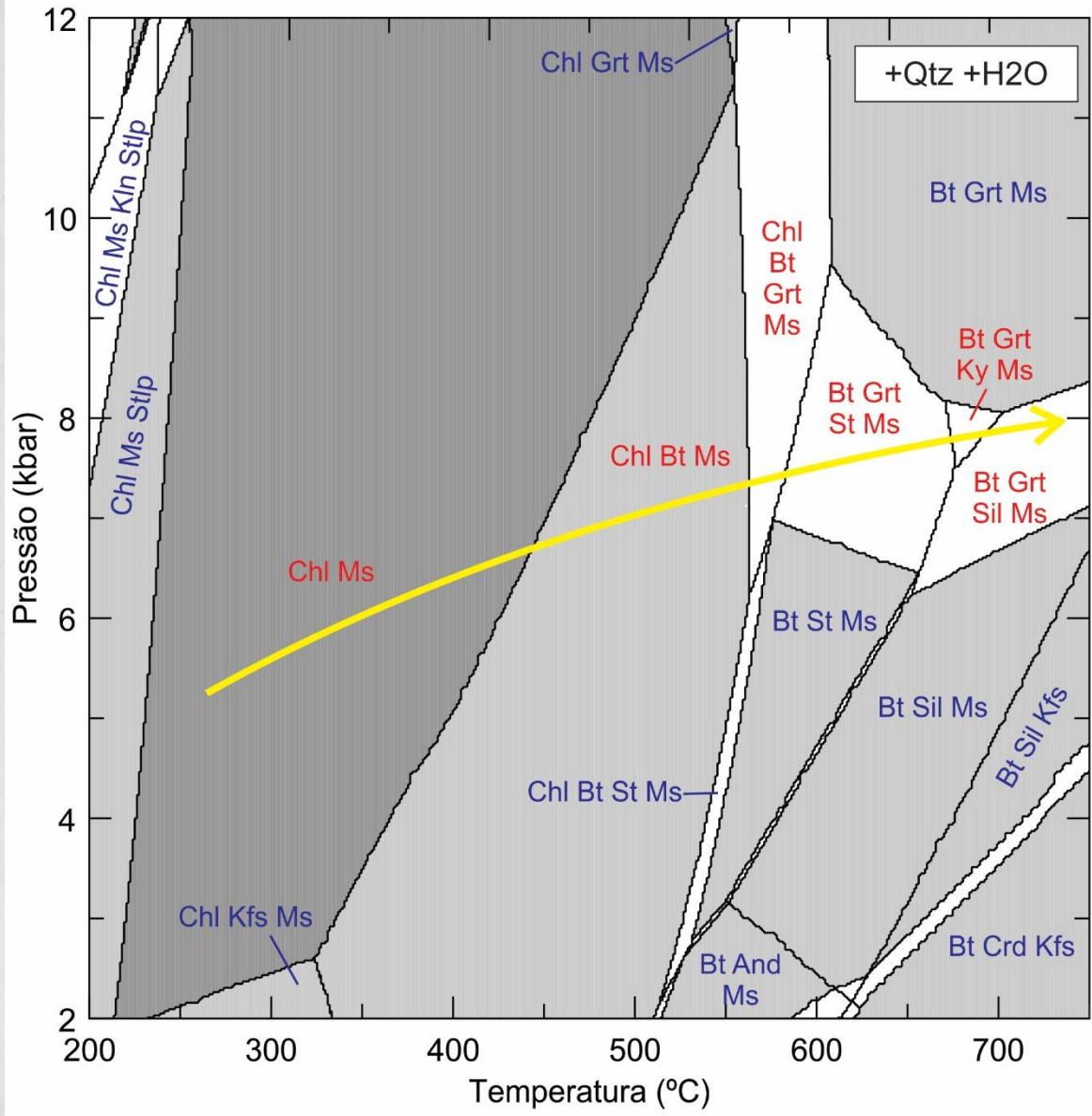
Com aumento progressivo de temperatura forma-se

Muscovita (Ms) - $K_2Al_4Al_2Si_6O_{20}(OH)_4$ (aumento de cristalinidade da Illita)



Spear & Cheney,
 inédito
 versão sem
 cloritóide

KFMASH



Zona da Clorita

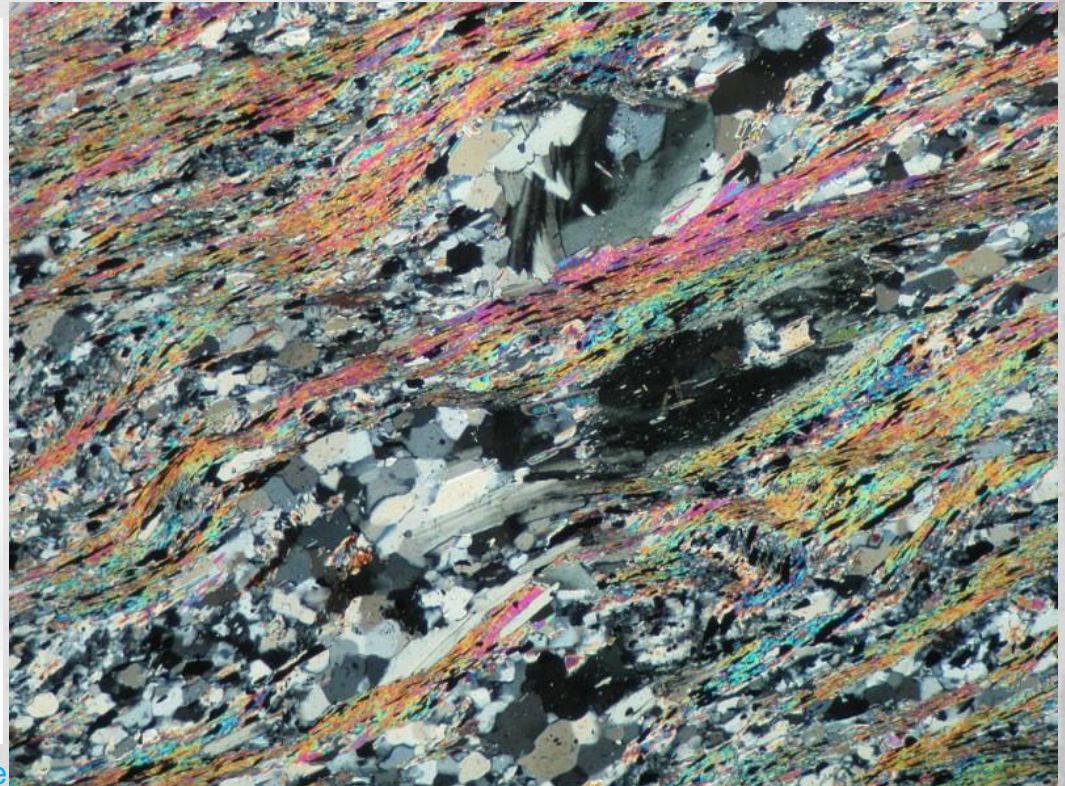
Rocha:

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

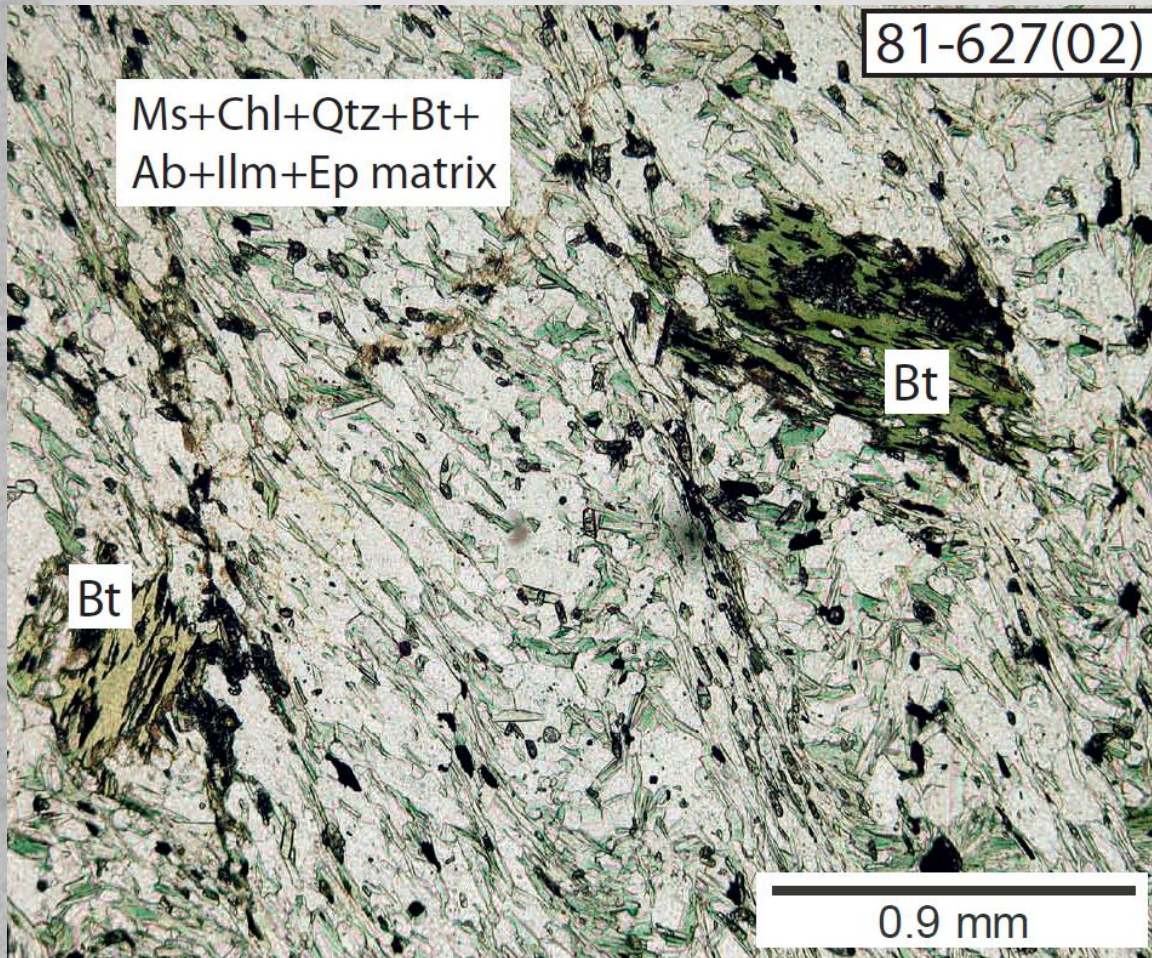
Associação:

Chl + Ms (Phe) + Qtz + Ab \pm Cal \pm Kfs detrítico ou autigênico

Zona Sesia-Lanzo (Itália)

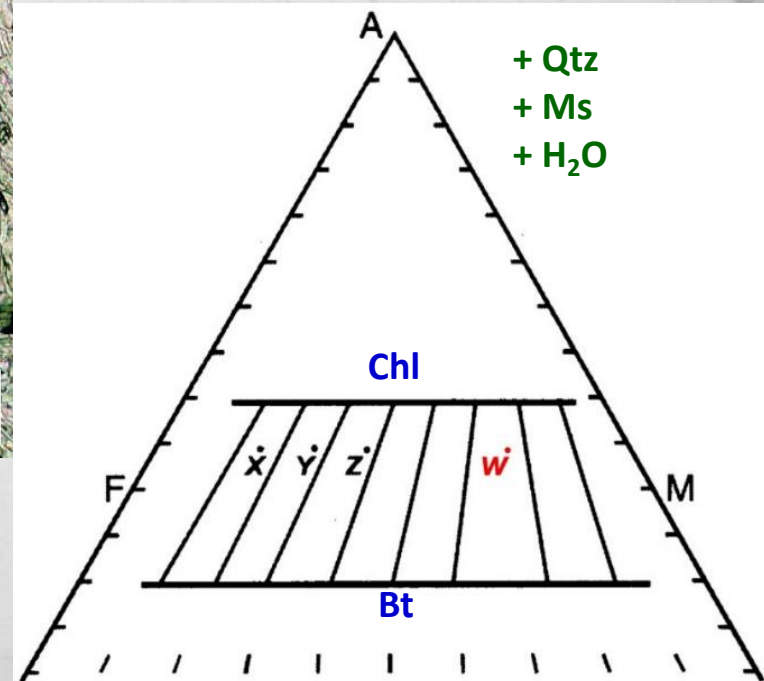


Zona da Biotita (Highlands, Escócia)



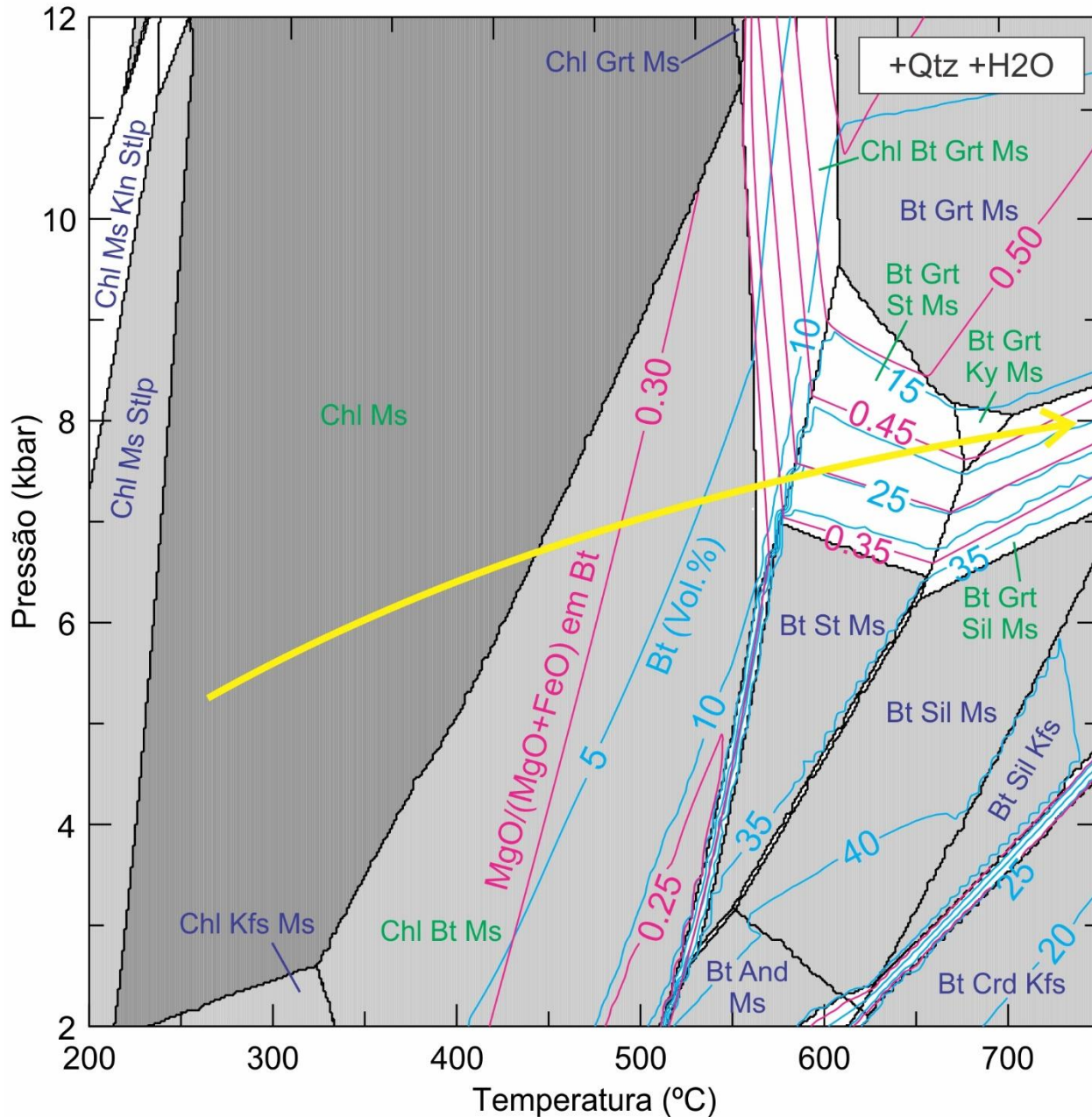
Rocha:

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



Pattison, D.R.M., 2013. Regional metamorphism in the Ballachulish area, SW Highlands, Scotland: new perspectives on a famous old debate, with regional implications. *Journal of the Geological Society* 170: 417-434.

Zona da Biotita



Associação:

Bt + Chl + Ms (Phe) +
Qtz + Ab ± Cb

Reações (contínuas):

Baixa pressão

Kfs + Chl = Bt + Ms +
Qtz + H₂O

(grauvaca com Kfs
detrítico e/ou
autigênico)

Pressão moderada-alta

Phe + Chl = Bt + Ms +
Qtz + H₂O

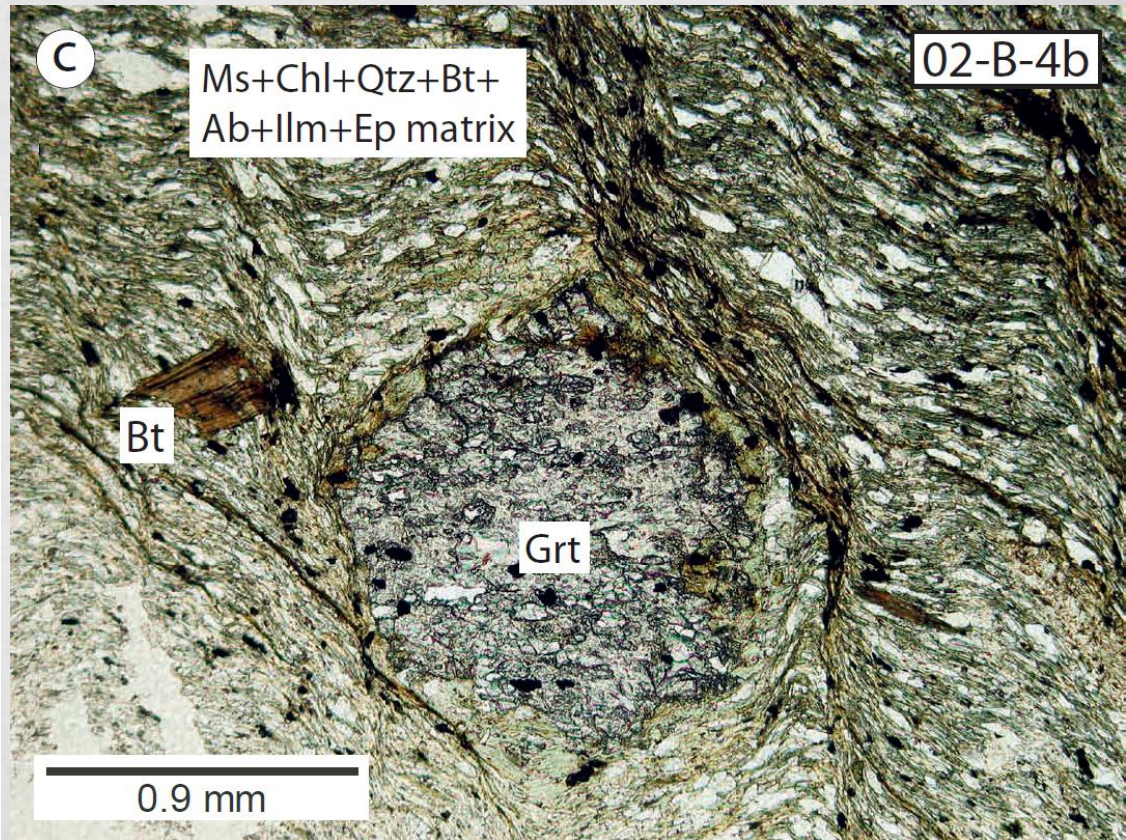
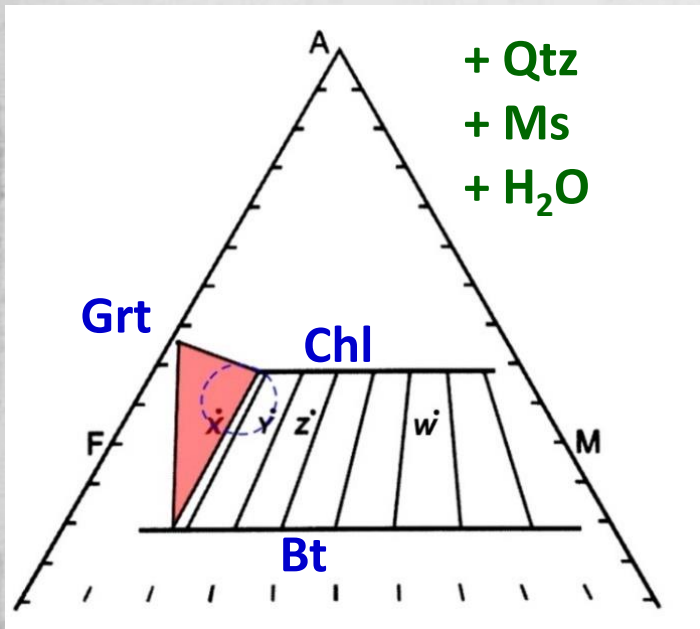
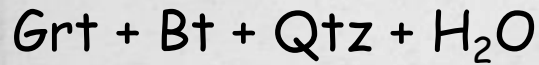
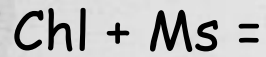
Zona da Granada

Associação típica:



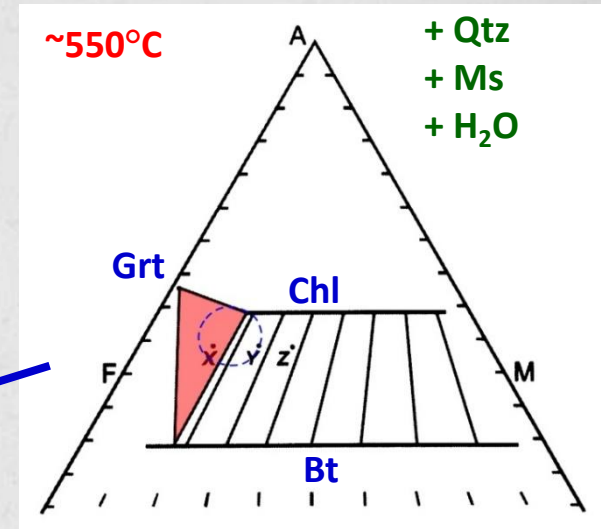
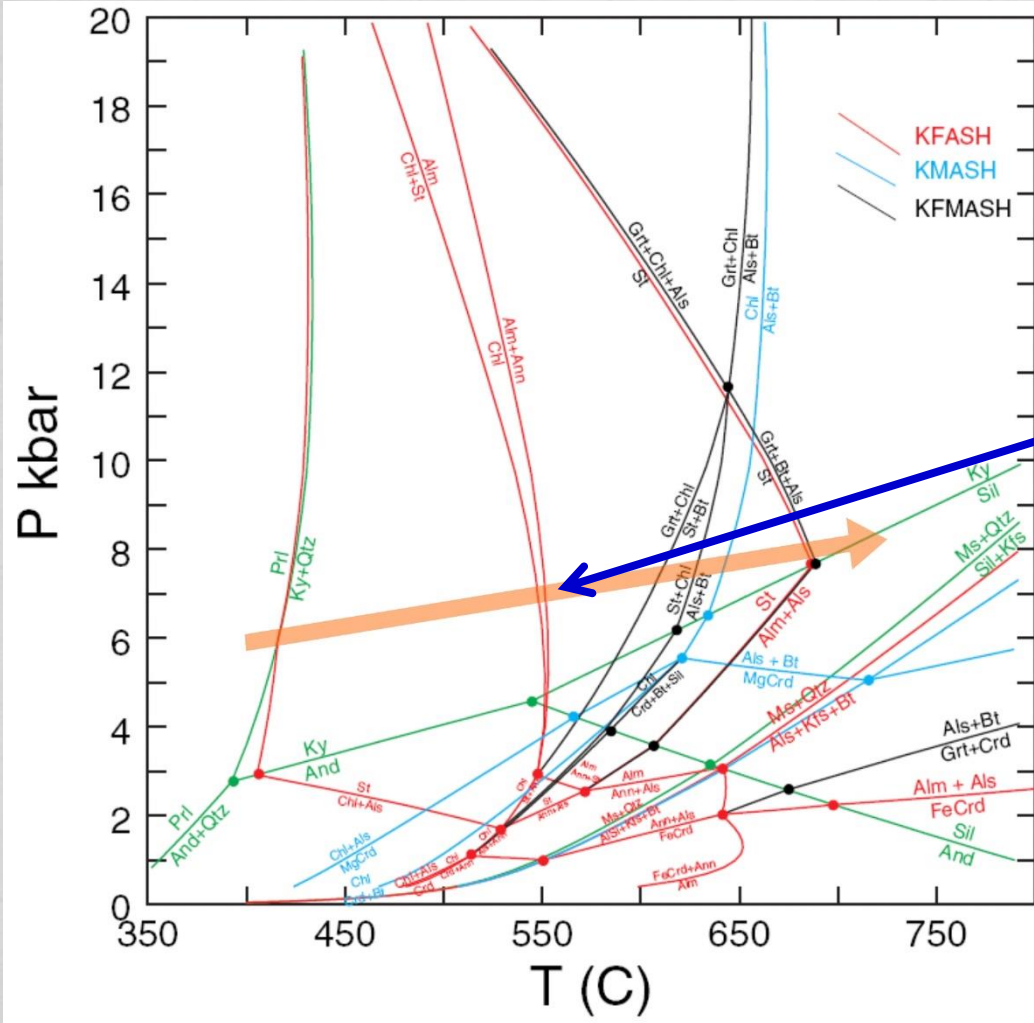
Rocha: xisto ou filito com granada rica em almandina, biotita, clorita, muscovita, quartzo e albita ou oligoclásio.

Reação (contínua):



Zona da Granada

Reação contínua no sistema KFMASH: $\text{Chl} + \text{Ms} = \text{Grt} + \text{Bt} + \text{Qtz} + \text{H}_2\text{O}$

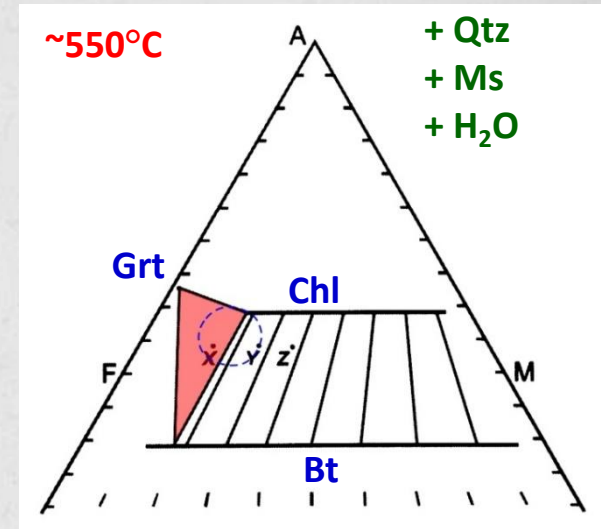
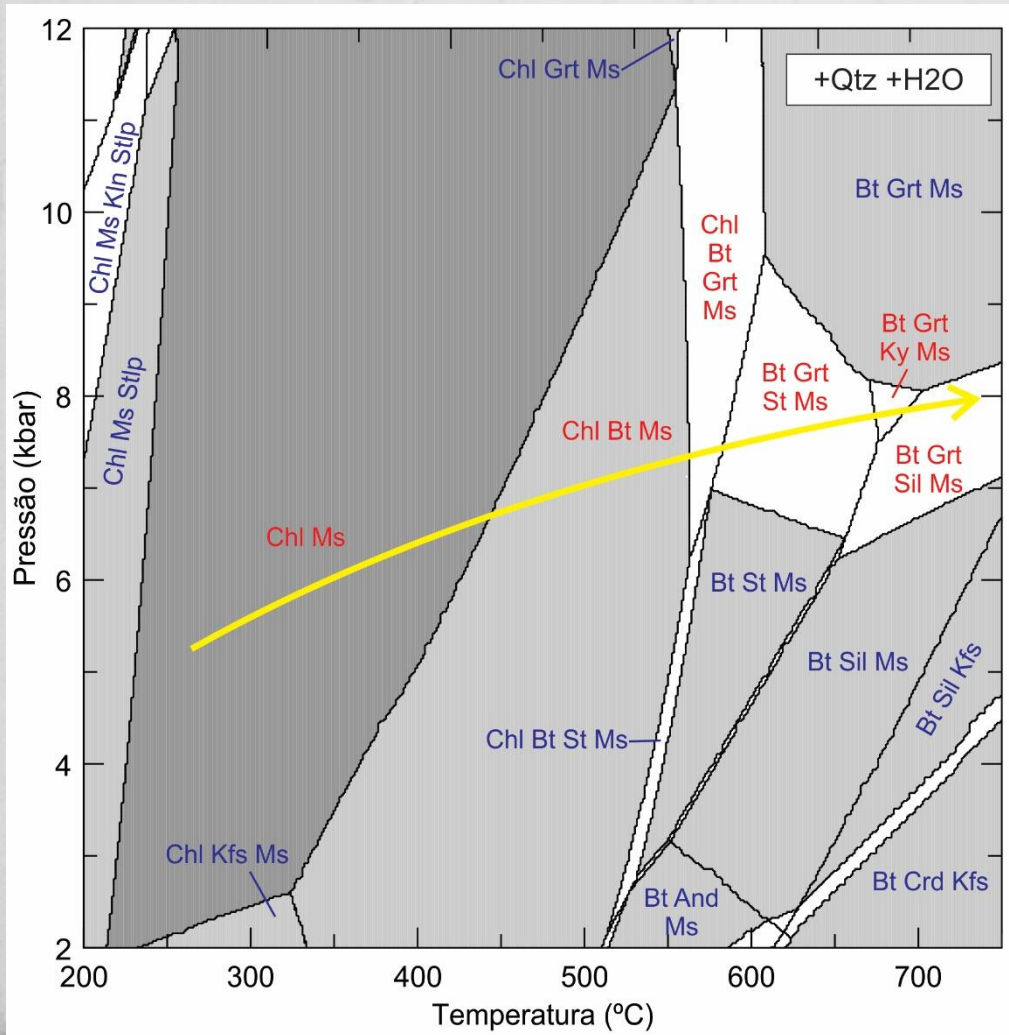


Spear & Cheney (inédito), cloritóide ausente

Zona da Granada

Reação contínua no sistema KFMASH: $\text{Chl} + \text{Ms} = \text{Grt} + \text{Bt} + \text{Qtz} + \text{H}_2\text{O}$

"Fe-Chl" = Fe-Grt + Fe-Bt + "Mg-Chl"

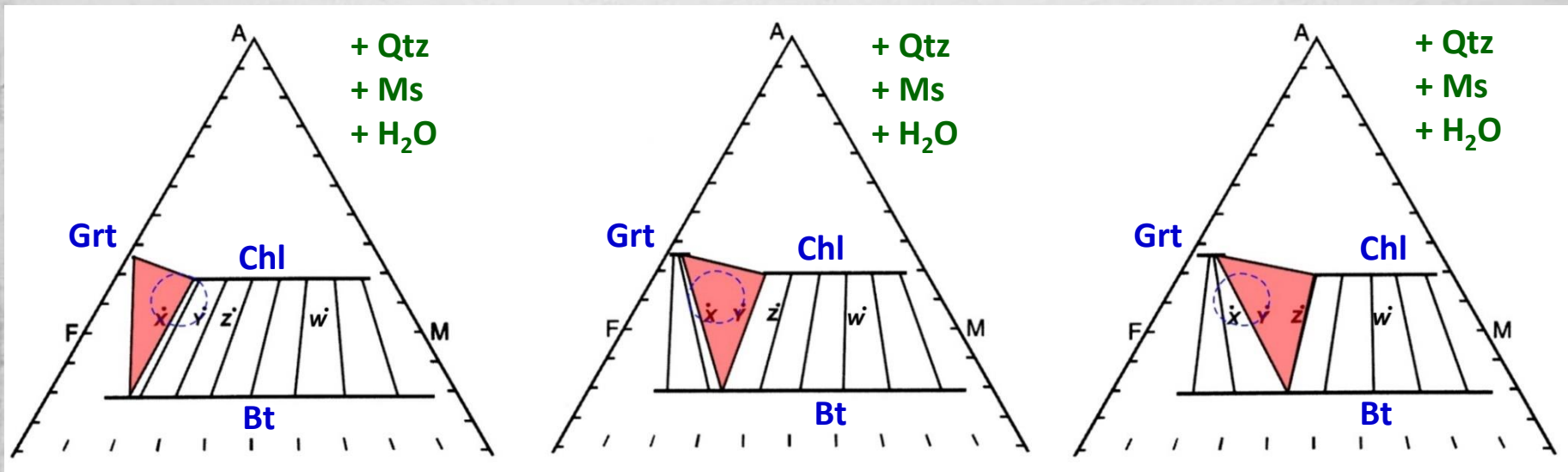


Zona da Granada

Efeitos da reação (contínua): $\text{Chl} + \text{Ms} = \text{Grt} + \text{Bt} + \text{Qtz} + \text{H}_2\text{O}$

"Fe-Chl" = Fe-Grt + Fe-Bt + "Mg-Chl" Distribuição de Fe e Mg: X_{Mg} da Chl > Bt > Grt

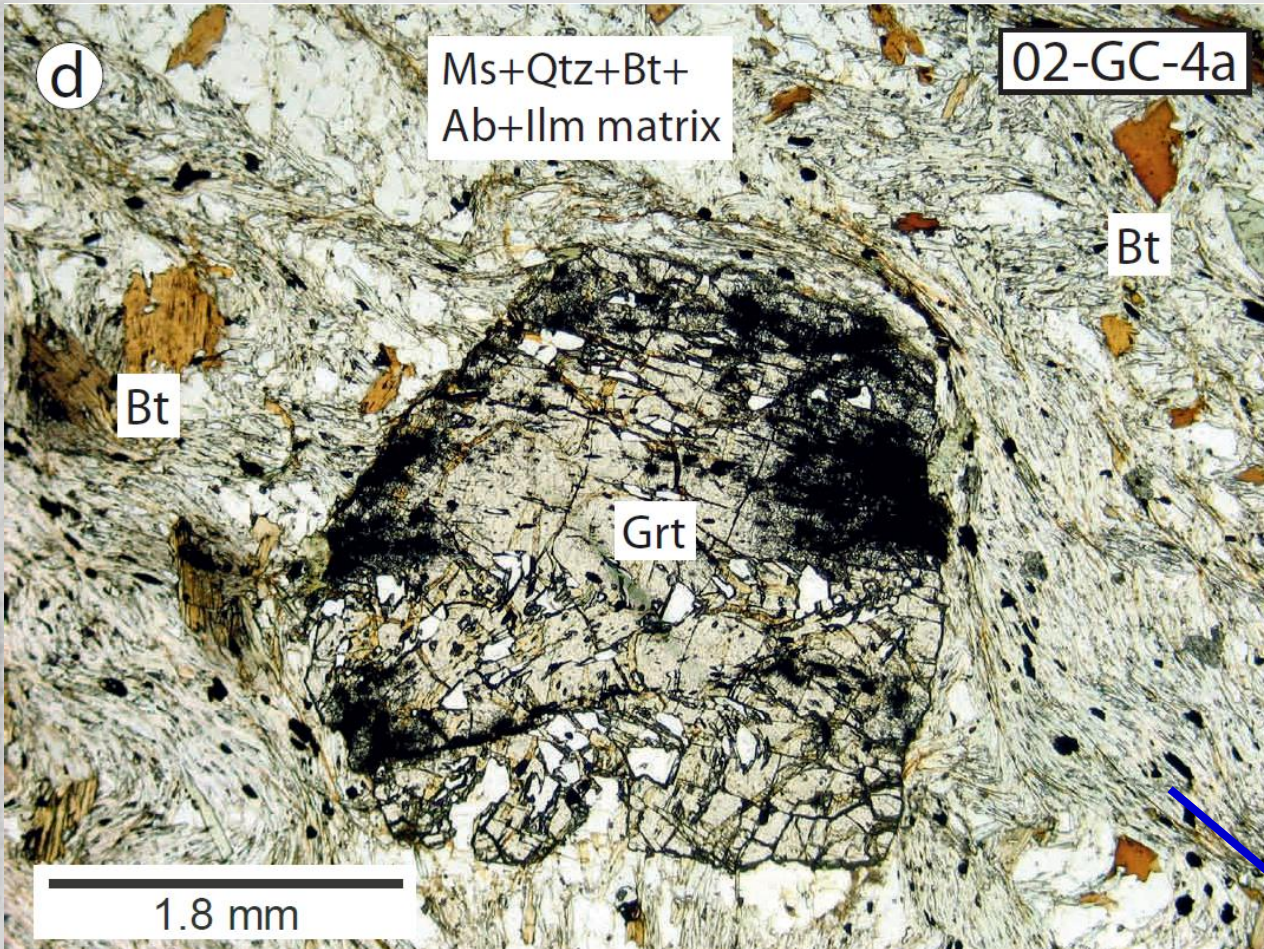
Aumento da temperatura



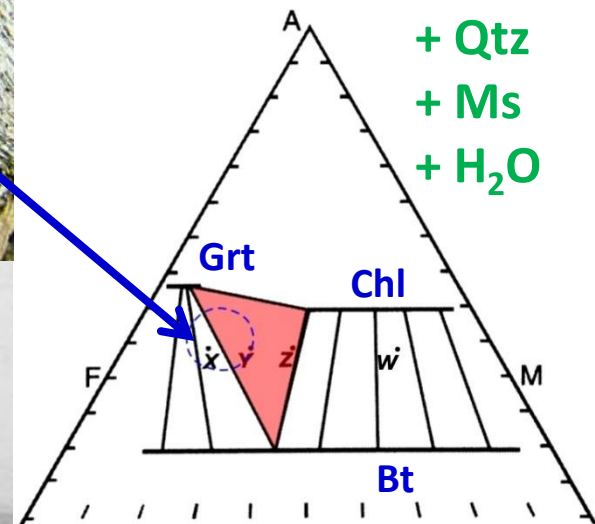
Adaptado de Yardley (2004) *Introdução à Petrologia Metamórfica*, segunda edição. Editora UnB.

- (1) Chl tem preferência por Mg: reação empobrece a Chl em Fe (clorita rica em Fe tornam-se instáveis).
- (2) Isso causa restrição do espectro das composições possíveis de clorita.
- (3) Que por sua vez faz com que a granada se desenvolva em rochas progressivamente mais magnesianas.

Zona da Granada (Highlands, Escócia)



Pattison, D.R.M., 2013. Regional metamorphism in the Ballachulish area, SW Highlands, Scotland: new perspectives on a famous old debate, with regional implications. *Journal of the Geological Society* 170: 417-434.



Zona da Estaurolita

Associação:

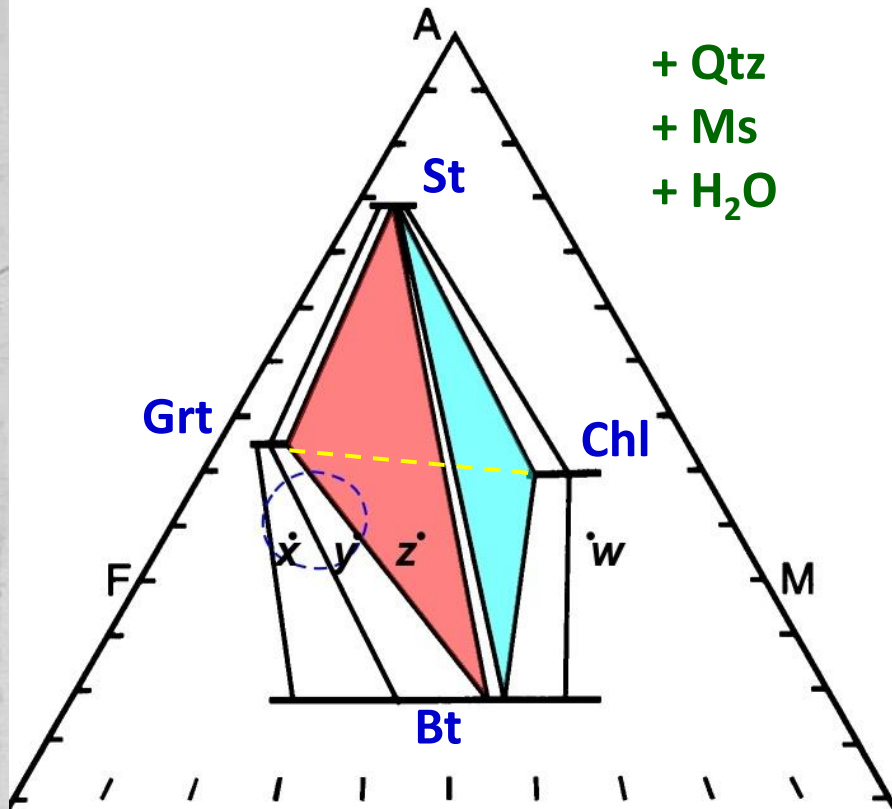
St + Grt + Bt + Ms + Qtz + Pl (\pm Chl)

Rocha:

xisto com estaurolita, biotita, muscovita, quartzo, granada e plagioclásio. Clorita pode ocorrer, mas não em paragênese com Grt.

Reação:

$\text{Grt} + \text{Ms} + \text{Chl} = \text{St} + \text{Bt} + \text{Qtz} + \text{H}_2\text{O}$
descontínua



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

Paragêneses

x: Grt + Bt (Chl exaurida antes)

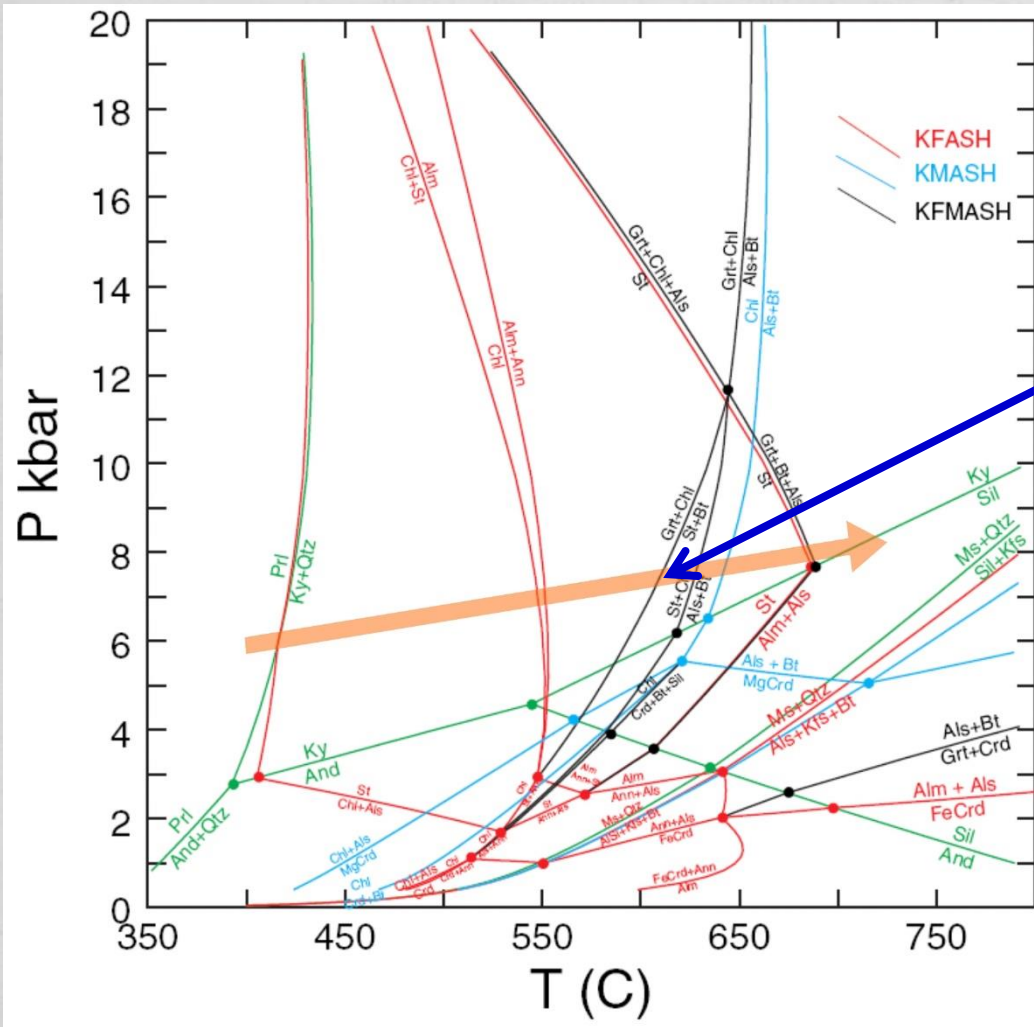
y: Grt + Bt (Chl exaurida antes)

z: Grt + Bt + St

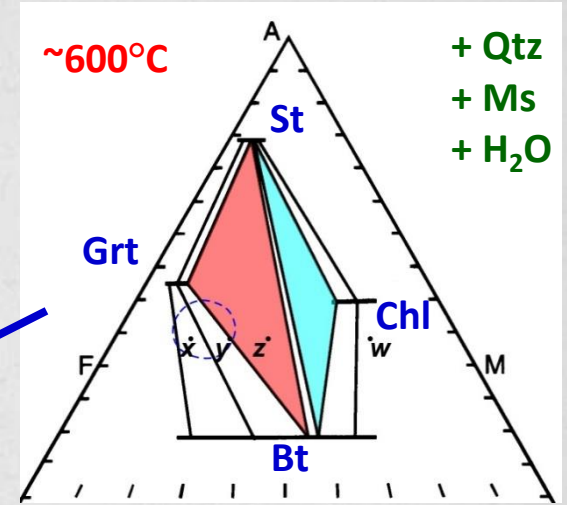
w: Bt + Chl (Não formou Grt)

Zona da Estaurolita

Reação KFMASH descontínua: $\text{Grt} + \text{Ms} + \text{Chl} = \text{St} + \text{Bt} + \text{Qtz} + \text{H}_2\text{O}$



Spear & Cheney (inédito), cloritóide ausente



Segundo a grade petrogenética de Spear & Cheney a reação de formação de estaurolita por consumo de Grt e Chl ocorre num intervalo de temperatura entre 540 e 650°C para pressões entre 5 e 12 kbar.

Paragêneses

- x: Grt + Bt
- y: Grt + Bt
- z: Grt + Bt + St
- w: Bt + Chl

Zona da Estaurolita

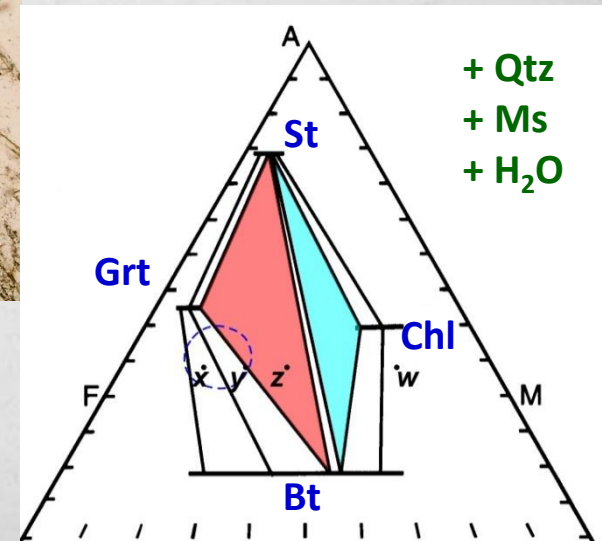


Faleiros et al. (2010). *Tectonophysics* 485: 193-214.

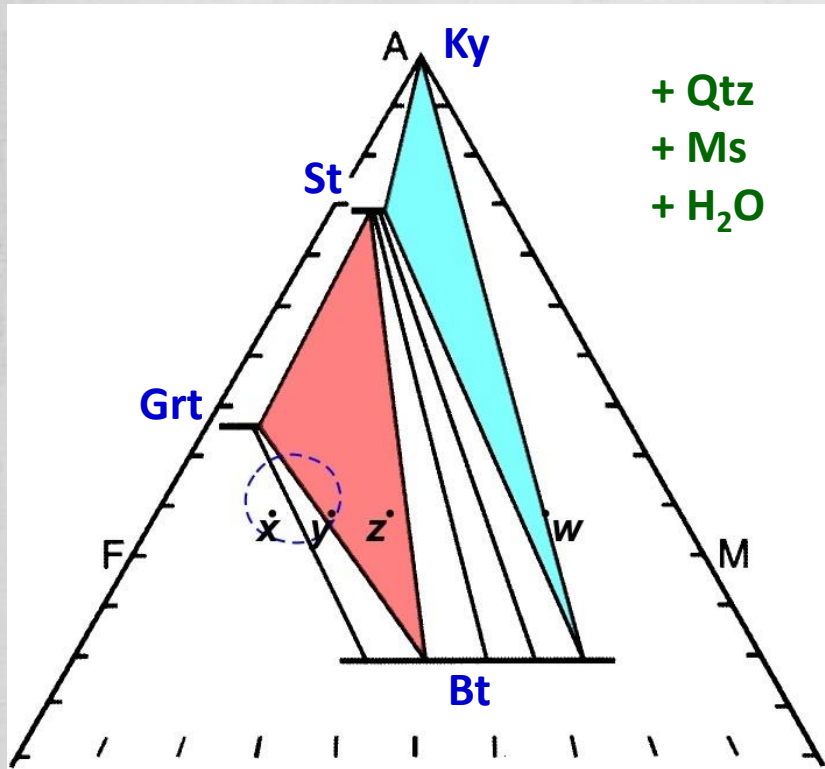
Grupo Votuverava

Associação:

$\text{Grt} + \text{Bt} + \text{St} + \text{Ms} + \text{Qtz} \pm \text{Pl}$



Zona da Cianita



+ Qtz
+ Ms
+ H₂O

Associações diagnósticas:

Ky + St + Bt + Ms + Qtz

Ky + Bt + Ms + Qtz

Rocha característica:

xisto com cianita, biotita, muscovita, quartzo, plagioclásio, podendo conter granada ou estauroлита.

Reação:

$Ms + St + Chl = Ky + Bt + Qtz + H_2O$

Descontínua

(pelitos ricos em Mg)

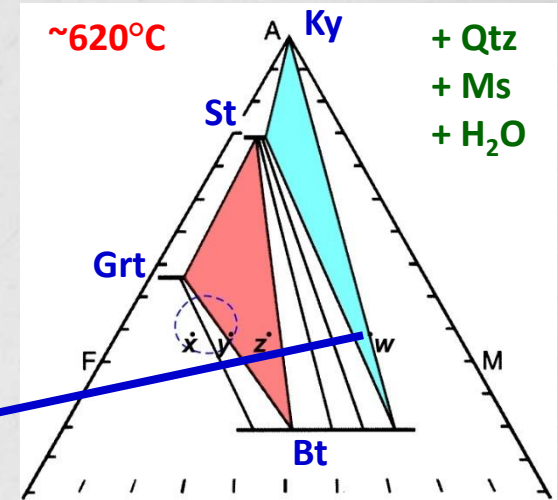
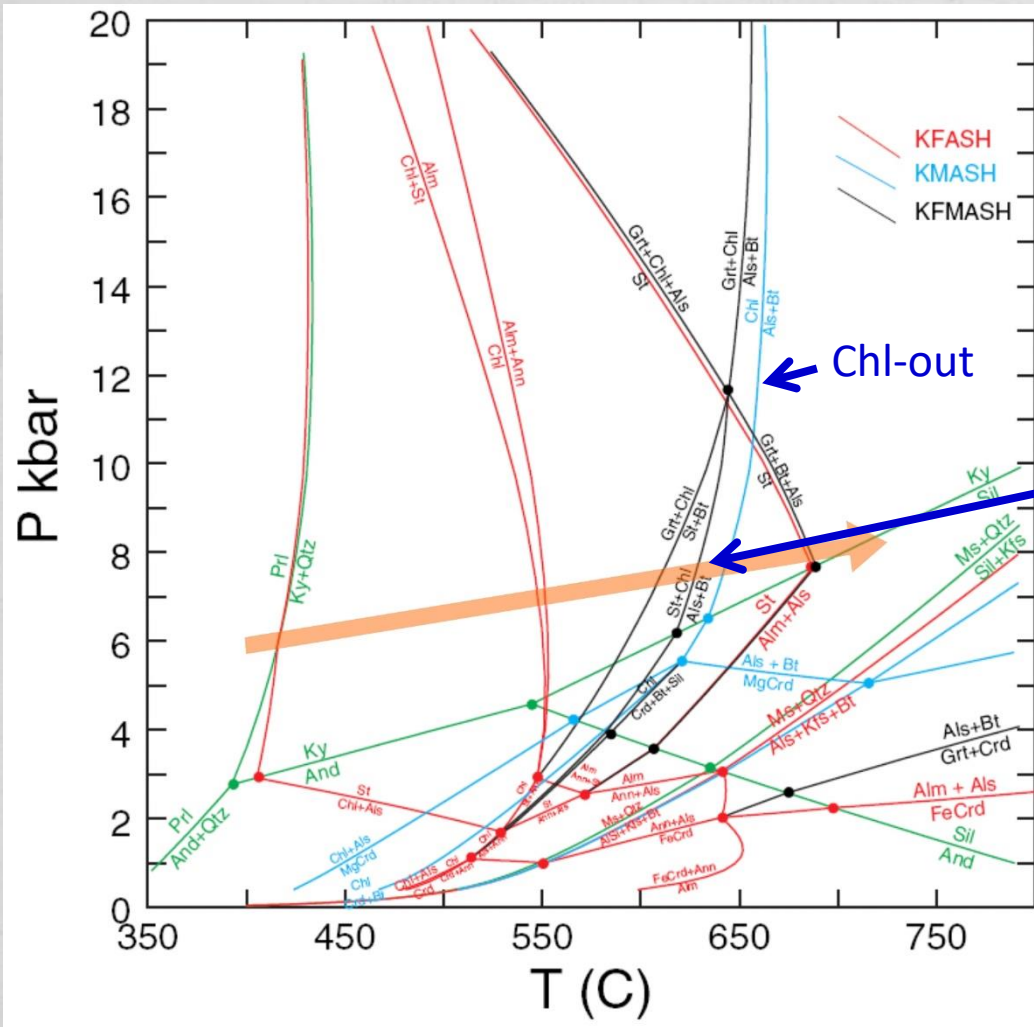
Adaptado de Yardley (2004)

Introdução à Petrologia Metamórfica, segunda edição.

Editora UnB.

Zona da Cianita

Reação descontínua no sistema KFMASH: $Ms + St + Chl = Ky + Bt + Qtz + H_2O$



Segundo a grade de Spear & Cheney a reação de formação do par cianita + biotita ocorre em condições de 610-650°C e 6-12 kbar.

Somente as composições mais ricas em Mg poderão passar por essa reação.

Spear & Cheney (inédito), cloritóide ausente

Zona da Cianita

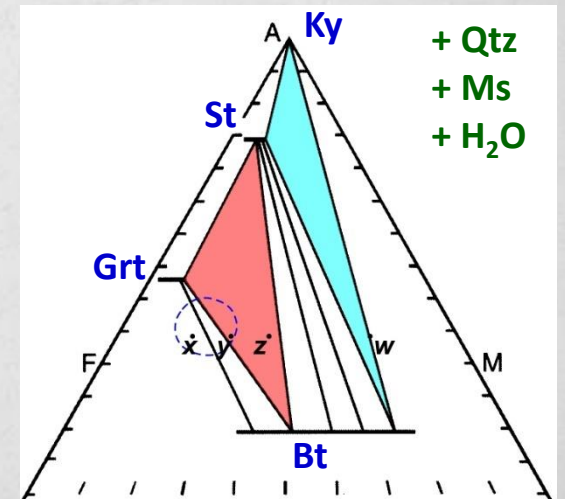
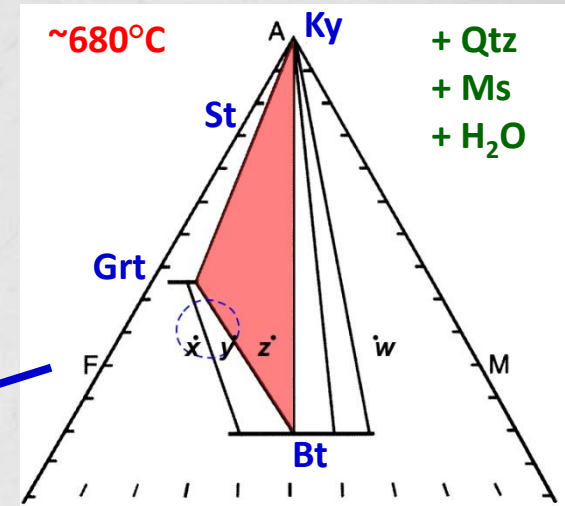
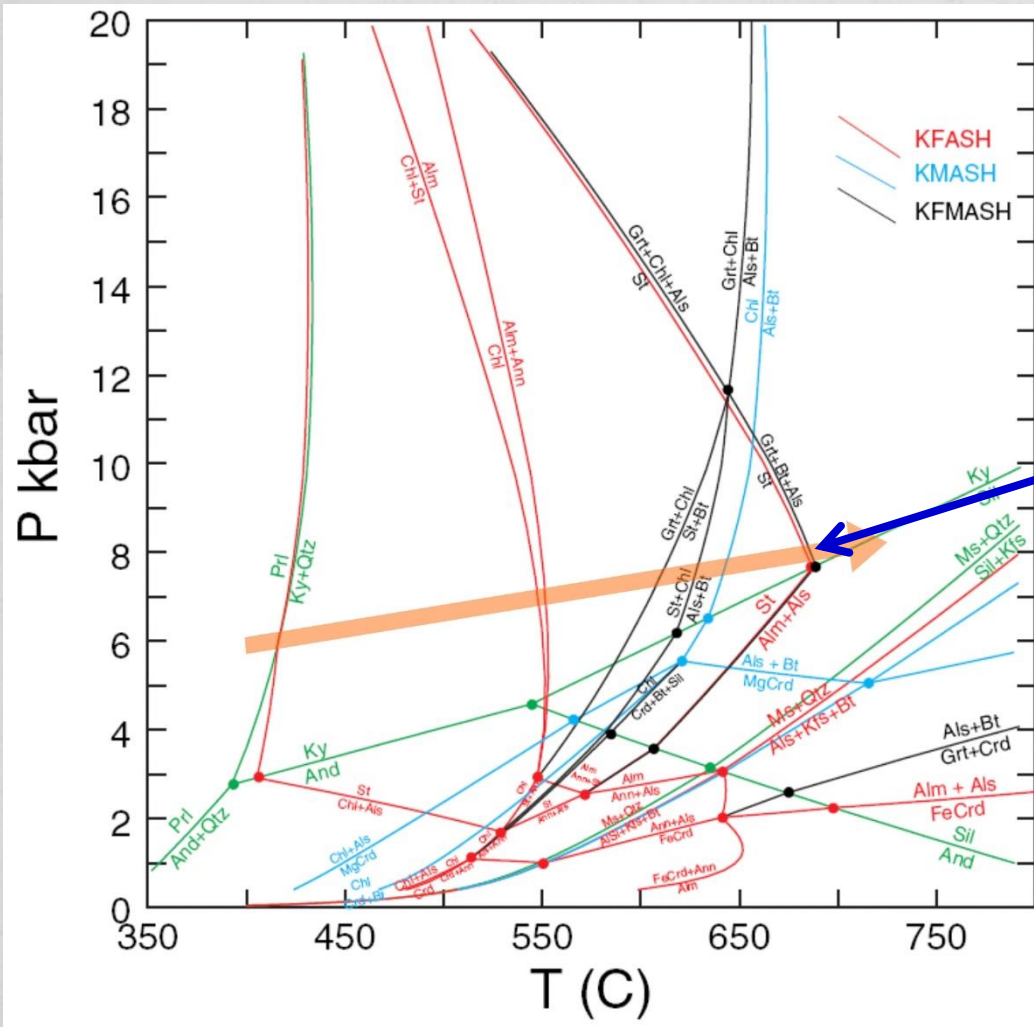
Associação: Bt + Ky + Ms + Qtz \pm Pl \pm St

Grupo Votuverava, Cinturão Ribeira Meridional, Adrianópolis (PR)



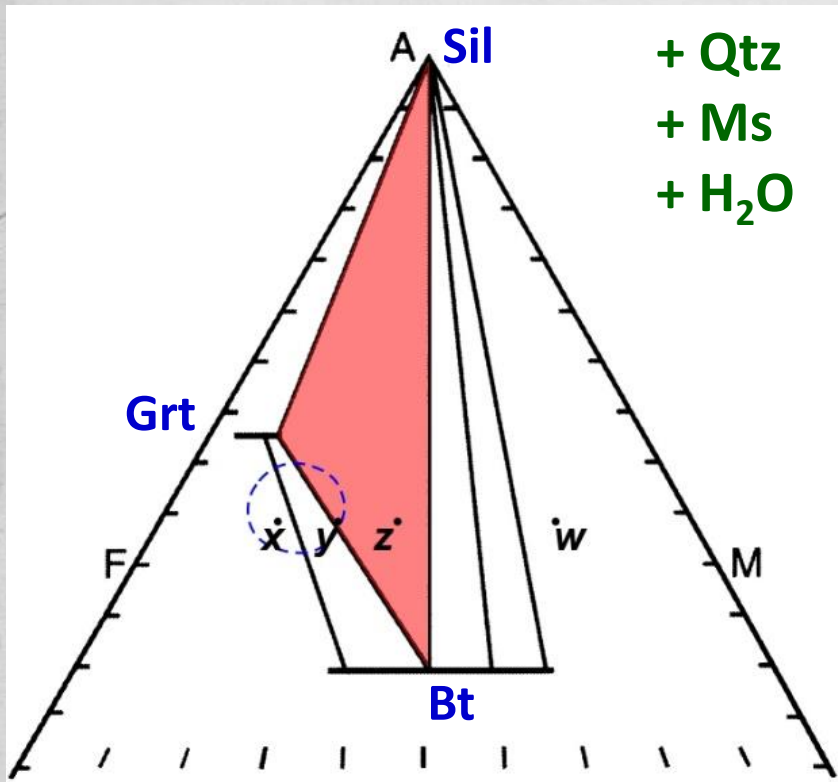
Zona da Cianita

Reação descontínua no sistema KFMASH: $St + Ms + Qtz = Grt + Bt + Ky + H_2O$



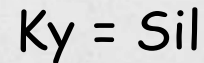
Spear & Cheney (inédito), cloritóide ausente

Zona da Sillimanita

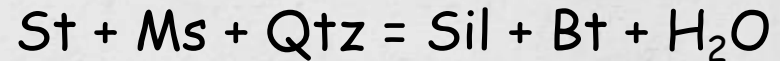


+ Qtz
+ Ms
+ H₂O

Transição polimórfica:



Reação contínua:



Sillimanita: Fibrolita

Cianita comumente persiste

(cinética da transição polimórfica)

Reação descontínua:

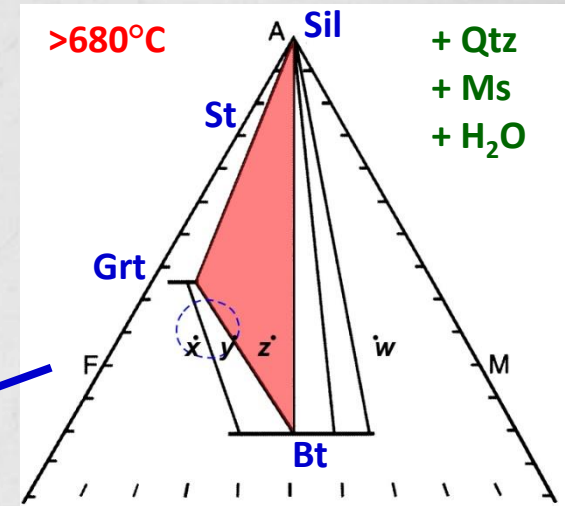
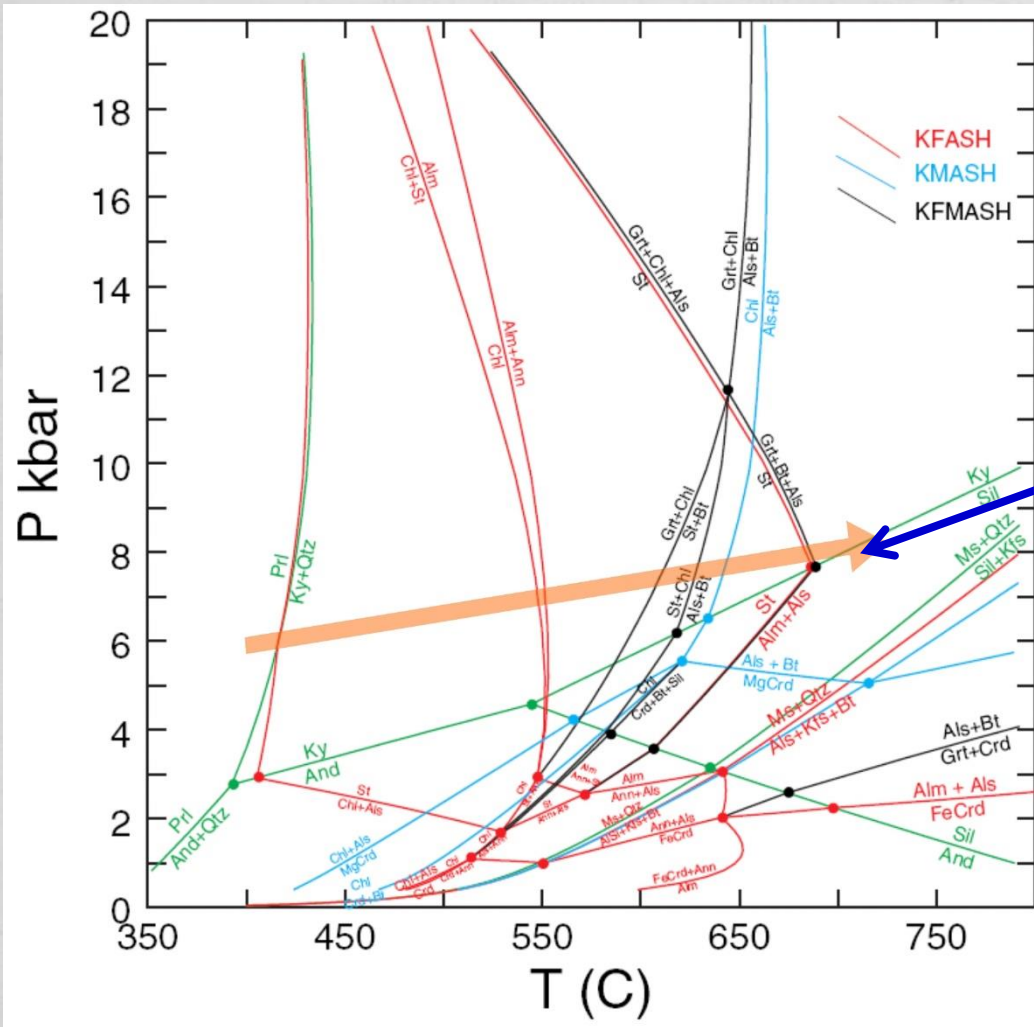


Desaparecimento de estauroлита

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

Zona da Sillimanita

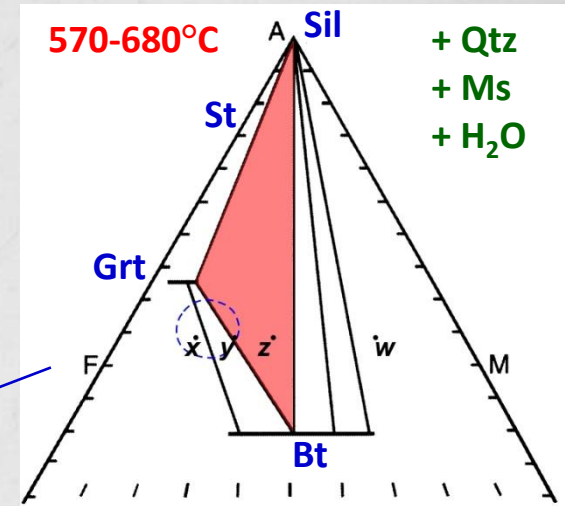
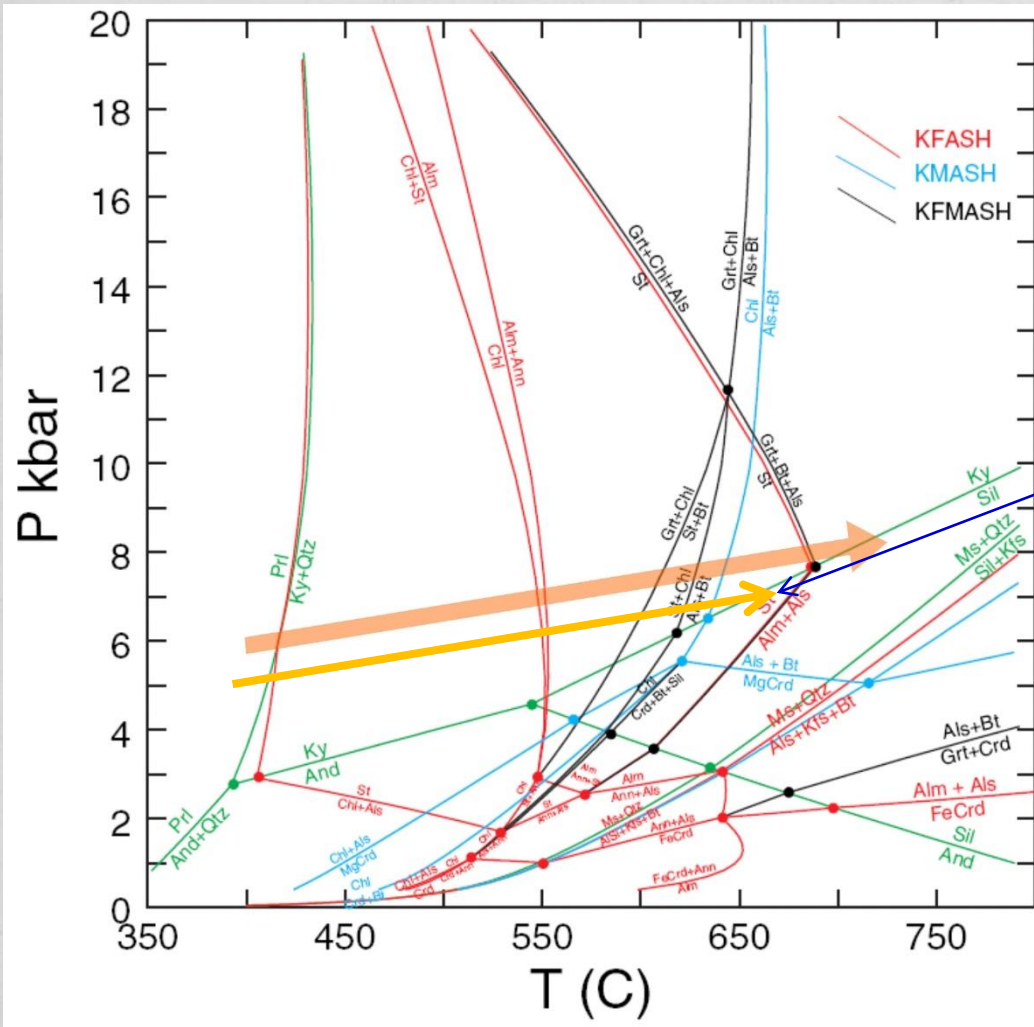
Reação polimórfica: $Ky = Sil$



Spear & Cheney (inédito), cloritóide ausente

Zona da Sillimanita

Reação polimórfica: $Ky = Sil$

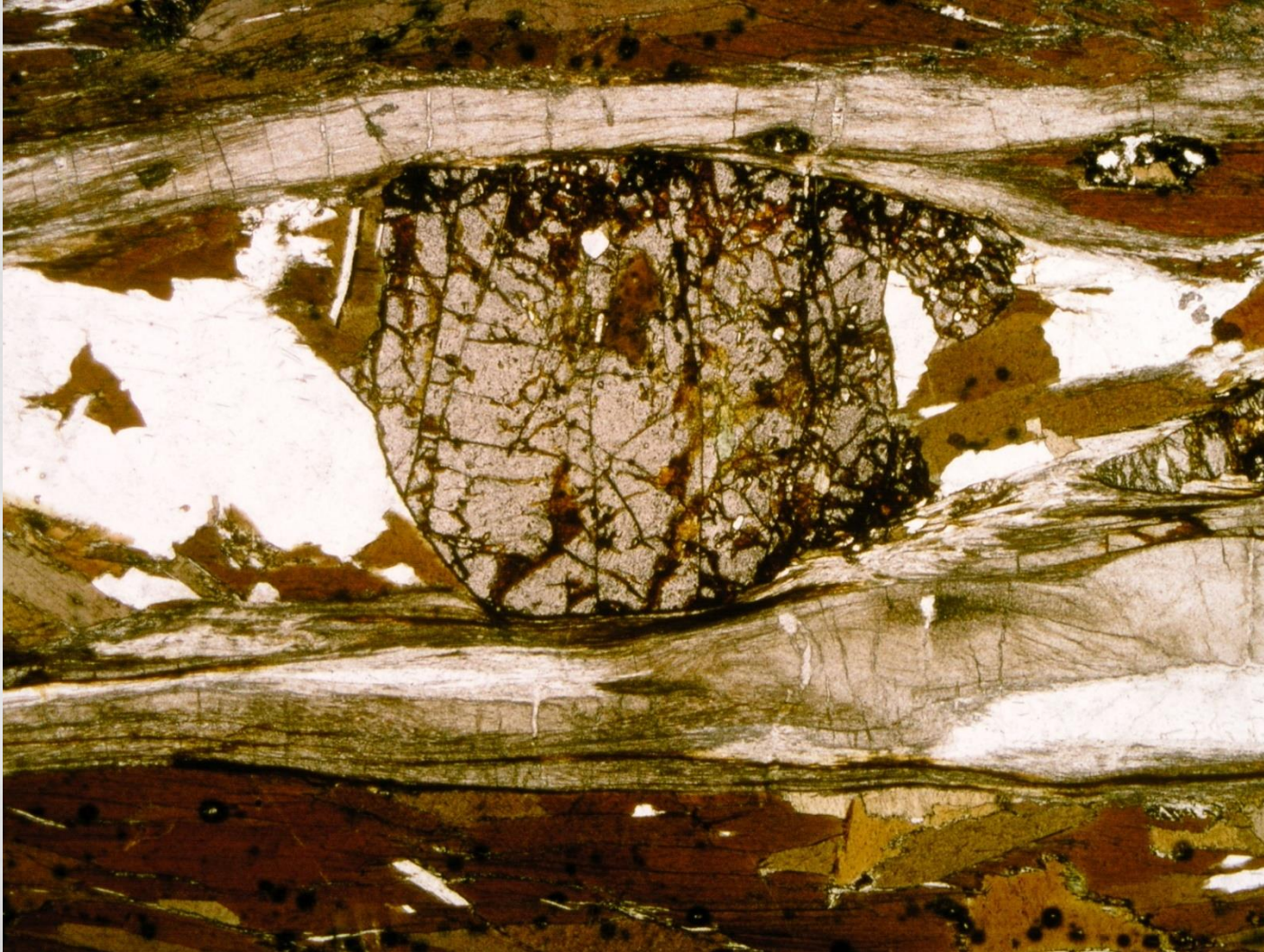


Spear & Cheney (inédito), cloritóide ausente

Zona da Sillimanita

Associação: Grt + Bt + Sil + Ms + Qtz ± Pl ± Ky

Formação Turvo-Cajati (Criogeniano), Cinturão Ribeira Meridional, Cajati (SP)

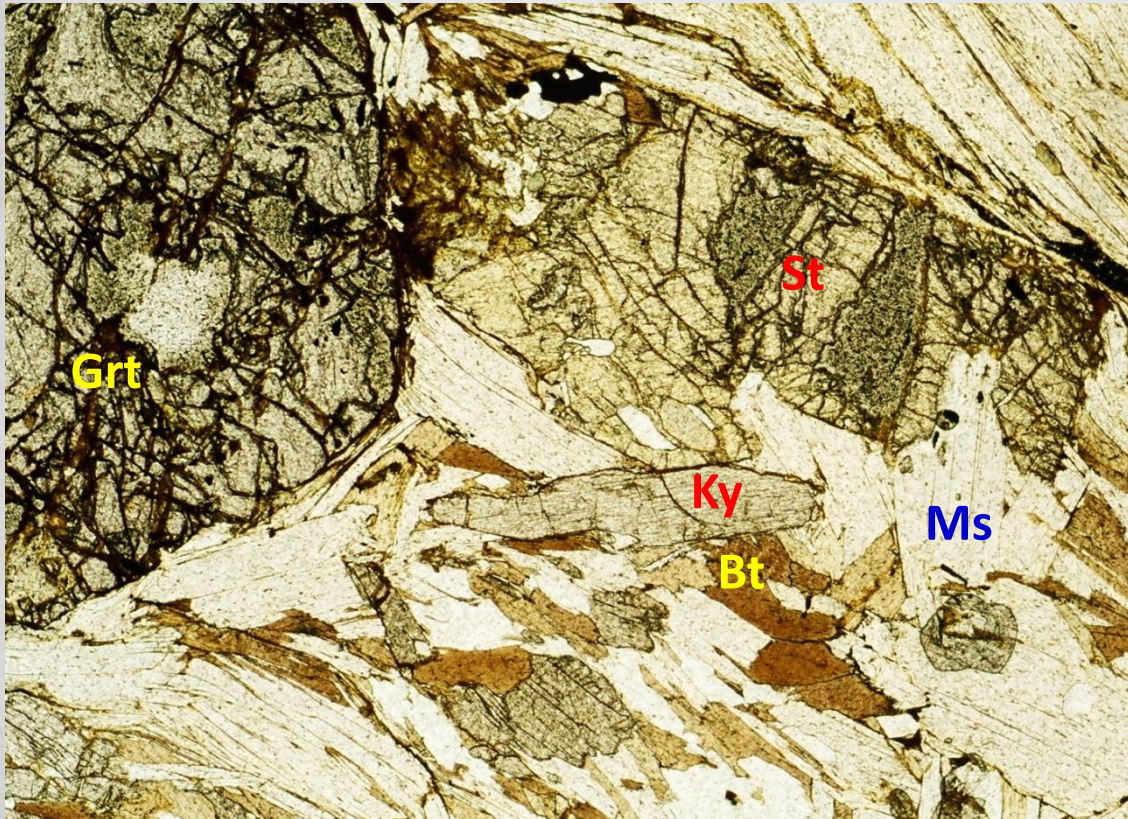


Faleiros (2008) Tese de Doutorado. IGc-USP.

Limitações da aplicabilidade do diagrama AFM

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

Associação: Grt + Bt + Ky + St + Ms + Qtz + H₂O

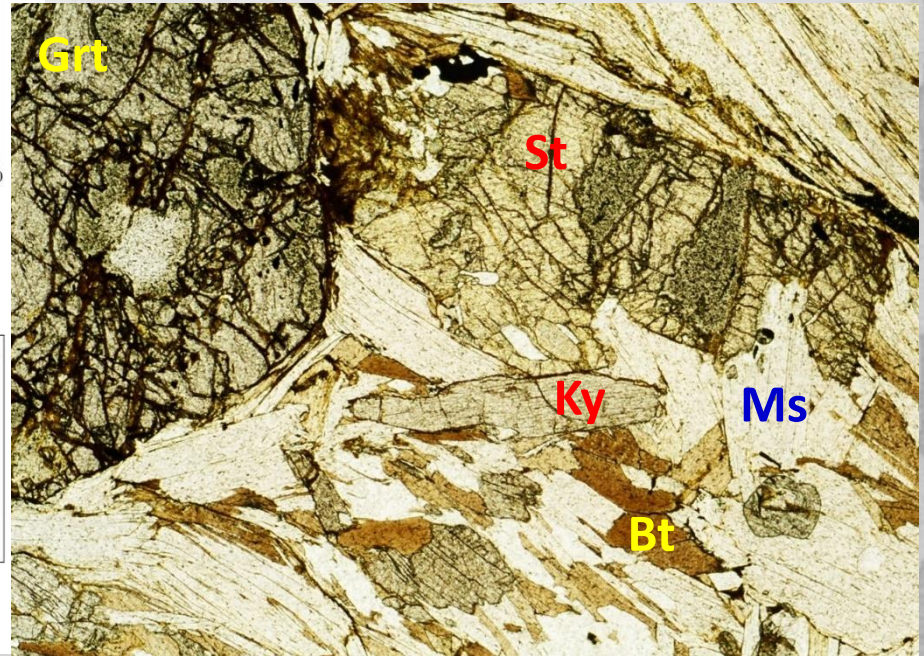
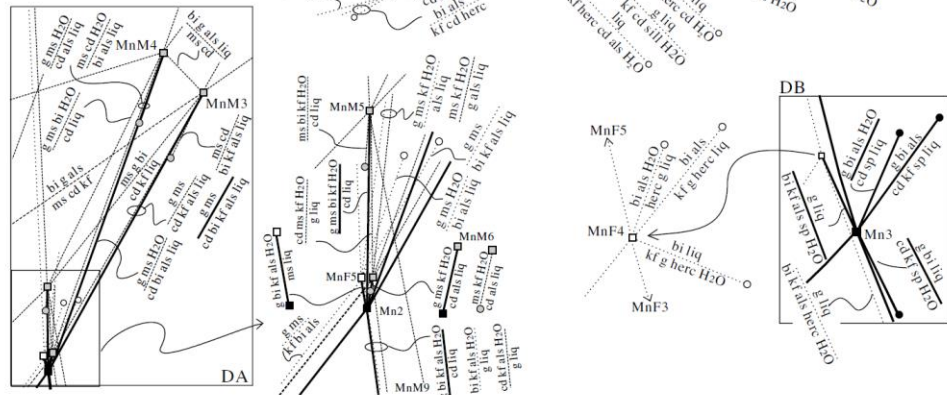
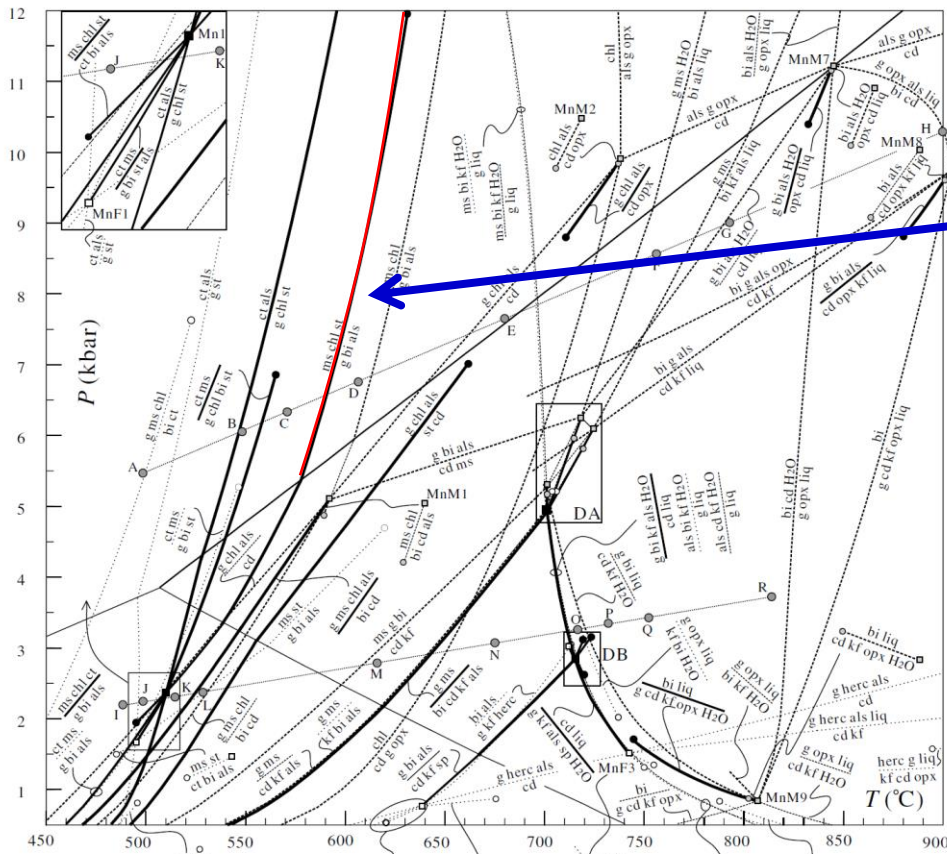
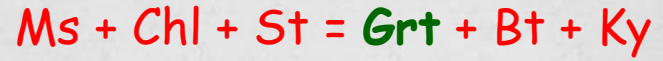


Persistência metaestável de minerais formados anteriormente

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

Mn e Ca estabilizam granada como uma fase extra.

MnKFMASH



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.

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 485: 193-214.

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.