

ESTUDO DA FORMAÇÃO DE MINERAIS

1. INTRODUÇÃO

2. TERMOMETRIA GEOLÓGICA

3. FORMAÇÃO DOS MINERAIS

4. ESTABILIDADE DOS MINERAIS

INTRODUÇÃO

O estudo dos jazigos minerais baseia-se, essencialmente, na **paragénese** e na **sucessão** dos minerais que o constituem

CONHECER OS PROCESSOS E AS CONDIÇÕES DE FORMAÇÃO DOS MINERAIS É ESSENCIAL PARA COMPREENDER A FORMAÇÃO DOS JAZIGOS MINERAIS

A formação de qualquer mineral ou qualquer associação mineral é afectada por três parâmetros fundamentais

TEMPERATURA **PRESSÃO** **AMBIENTE QUÍMICO**

A velocidade (**cinética**) das reacções condiciona também os resultados finais, nomeadamente os aspectos estruturais e texturais

Como determinar as condições termodinâmicas de formação dos minerais ?

As condições físicas de formação dos minerais podem ser reproduzidas de modo satisfatório no laboratório (**mineralogia/petrologia experimental**), mas a reprodução de muitas associações paragenéticas idênticas às naturais ainda é muito difícil e pouco acessível

Quais as alternativas ?

Termometria geológica

Podem ser utilizados os chamados **termómetros geológicos** (baseiam-se em medidas directas, pontos de fusão e de inversão, dissociações e exsudações, alteração de propriedades físicas, recristalizações e inclusões fluidas) ou os chamados **minerais tipomórficos** e as **texturas tipomórficas**

O significado termométrico dos minerais tipomórficos será tanto mais preciso ou convincente quanto mais numerosos forem numa dada paragénese

Não menos importante que a influência da temperatura e da pressão é o **PROCESSO DE FORMAÇÃO** dos minerais

Um mesmo processo pode originar minerais dentro duma gama vasta de temperatura e pressões

É fundamental conhecer

- **CONDIÇÕES DE FORMAÇÃO DOS MINERAIS**
- **DOMÍNIO DE ESTABILIDADE DOS MINERAIS**

O processo de formação e as condições de temperatura e pressão em que se originaram os minerais ficam impressos na respectiva **TEXTURA** e **ESTRUTURA**

AMBIENTE QUÍMICO

Quais os elementos químicos presentes?

Sob que forma se encontram? Eh, pH

Quais as respectivas quantidades disponíveis?

A presença de determinados elementos químicos e o seu estado dependem, essencialmente, de três factores:

ORIGEM

Magmática juvenil, magmática por fusão de rochas pré-existentes, lixiviação de rochas, desagregação mecânica, etc.

TRANSPORTE

Sem transporte (autóctones); com transporte (alóctones)

MECANISMO(S) DE CONCENTRAÇÃO

Físico, (bio)químico, mecânico ou misto

Termometria Geológica

- 1. Medições directas**
- 2. Pontos de Inversão**
- 3. Dissociações**
- 4. Exsudações**
- 5. Alteração das Propriedades Físicas**
- 6. Recristalizações**
- 7. Inclusões Fluidas**
- 8. Minerais Indicadores de Temperatura**
- 9. Isótopos estáveis**

Medições directas*

Aplicável às lavas, fumarolas e nascentes quentes

Dá indicação sobre as temperaturas máximas a que se podem ter formado os minerais constituintes das lavas e os originados pelas fumarolas e nascentes quentes e que se depositaram nas cavidades por onde os gases e as águas brotam à superfície da Terra ou nas proximidades imediatas.

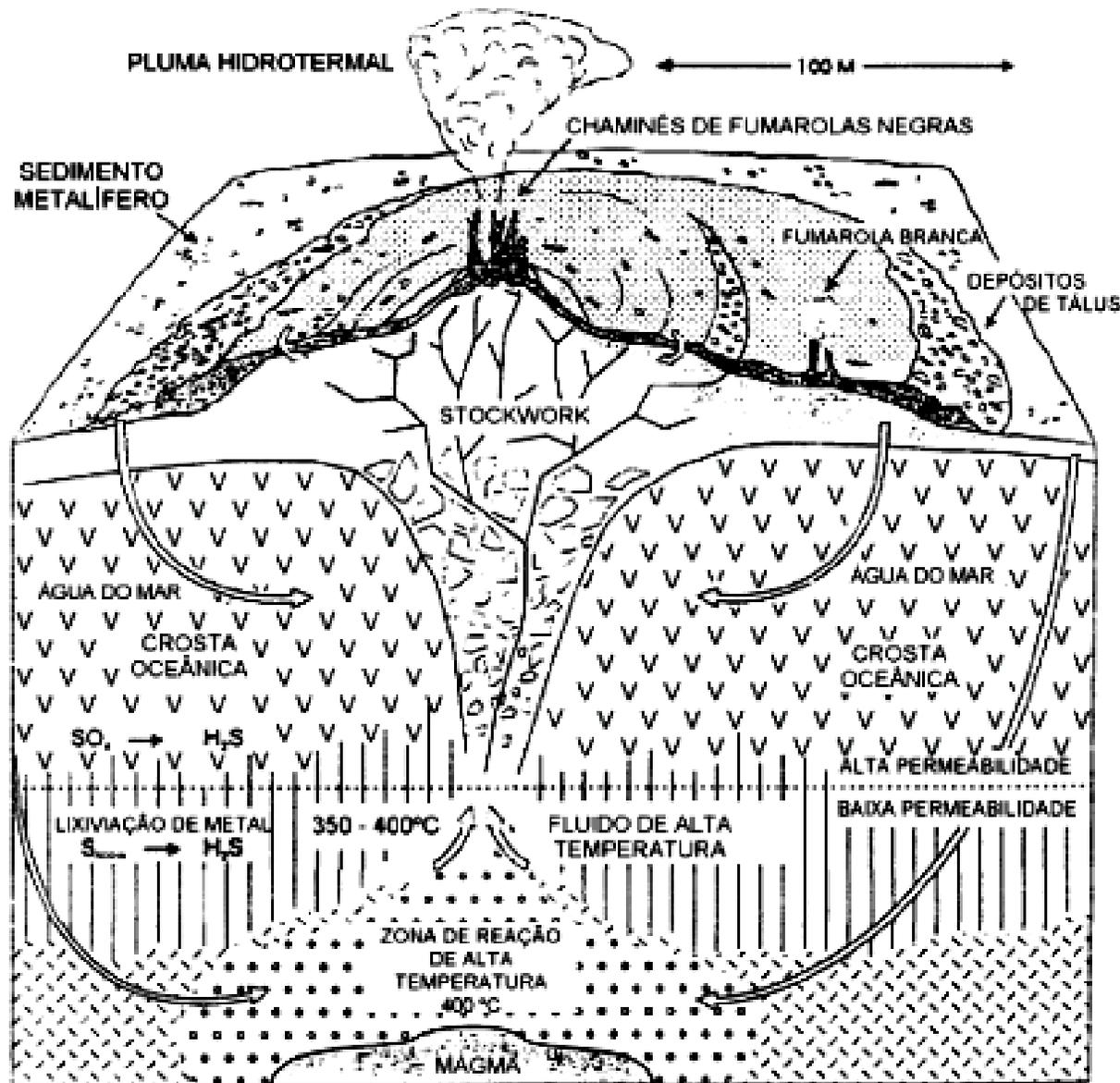
Exemplos

***utilização limitada**

Lavas basálticas - $T > 1300\text{ }^{\circ}\text{C}$

Gases das fumarolas - T 650 $^{\circ}\text{C}$ até inferior a 100 $^{\circ}\text{C}$
sublimados: magnetite, pirrotite, pirite, galena, leucite, augite, etc.)

Águas termais - T superficial até ao ponto de ebulição da água
precipitados de opala, gesso, cinábrio, estibina, enxofre, etc.



Circulação hidrotermal e depósitos associados
Modificado de Herzig et al. (2000)

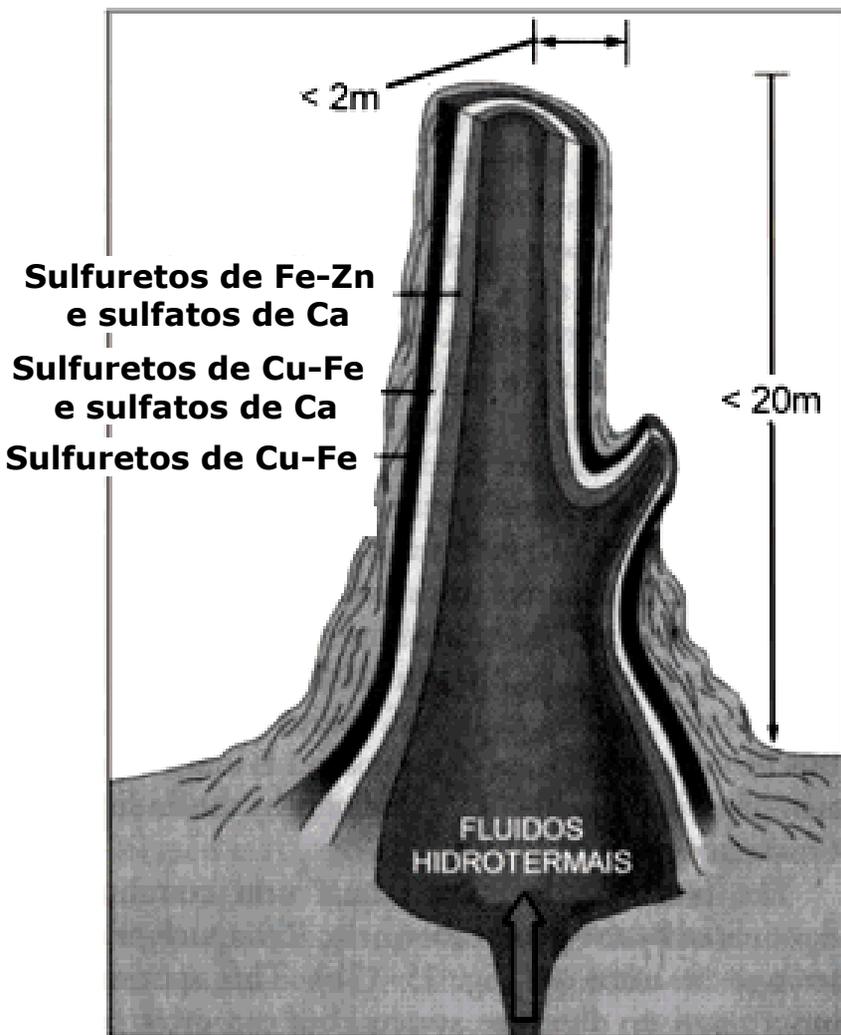


Figura 2 – (a) Estrutura de uma chaminé hidrotermal e (b) Foto de uma chaminé de fumarola negra na Cadeia Juan de Fuca (Dr. Verena Tunnicliffe, <http://web.uvic.ca/sciweb/pics/hydrothermalvents.html>).

Fumarolas negras

Pontos de fusão

Este método baseia-se na determinação laboratorial dos pontos de fusão dos minerais.

Fornece valores máximos ou seja o limite superior do intervalo de temperaturas a que se podem ter formado os minerais.

Considerações e limitações

- A presença de substâncias diversas dissolvidas e de outras voláteis acarreta um abaixamento dos pontos de fusão
- A pressão também pode afectar o intervalo de fusão
- Os minerais têm, em regra, temperaturas de fusão mais elevadas que as respectivas temperaturas de formação

Pontos de Inversão

O método baseia-se na passagem de uma fase a outra, quimicamente idêntica mas cristalograficamente distinta (formas polimórficas) é de utilização mais generalizada porque a influência da pressão é bastante mais reduzida e muitas inversões verificam-se a temperaturas bem definidas e referenciáveis com relativa facilidade.

Exemplos

Quartzo β - (573 °C) - **Quartzo α**

Formas de alta temperatura (maior simetria) → formas de menor temperatura (menor simetria). **Porquê?**

Este aspecto pode ser reconhecido em anomalias da anisotropia

Dissociações

Este método baseia-se no estudo dos minerais que a dada temperatura libertam constituintes voláteis, como sejam os zeólitos em relação à água de constituição.

A temperatura destas dissociações é fortemente influenciada pela pressão. Fornece, pois, indicações sobre a temperatura máxima de formação dos minerais.

Exsudações ou exsoluções

Este método é aplicável a soluções sólidas que, por abaixamento de temperatura, deixam de ser estáveis, dando-se a separação dos constituintes da solução sólida, com a conseqüente formação de texturas de exsudação ou exsolução.

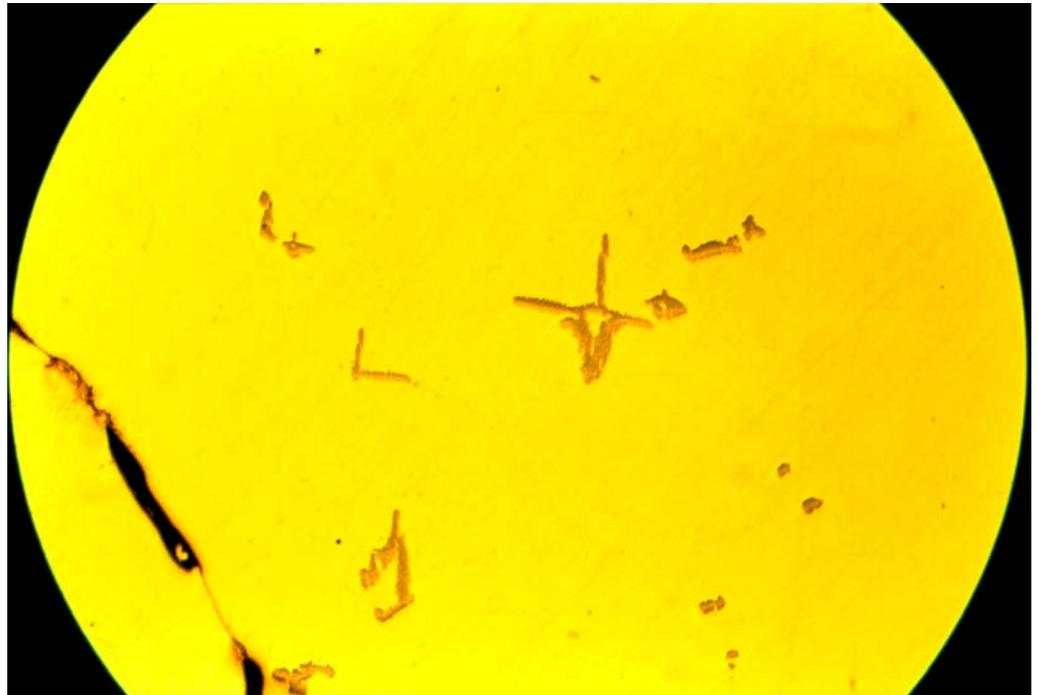
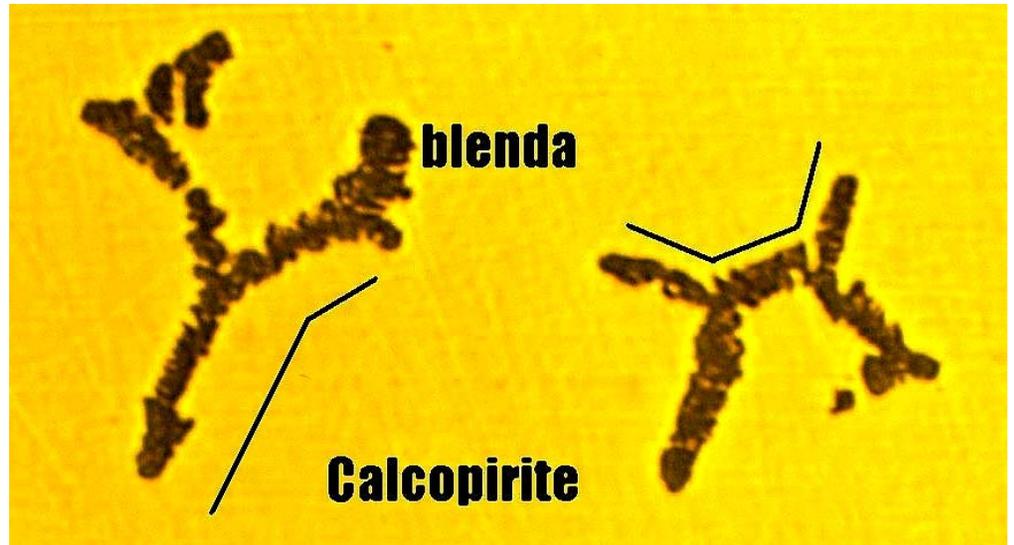
Fornece o limite inferior do domínio de estabilidade da solução sólida.

Dificuldades

- Nem sempre é fácil determinar as texturas devidas realmente a fenômenos de exsudação
- A temperatura de exsudação varia com a concentração do material dissolvido.

Exemplo típico: exsudação da calcopirite na blenda (550 °C)

A geometria das exsoluções depende da simetria cristalina das fases hospedeira (cp) e hóspede (bl)



Alteração das propriedades físicas

Alguns minerais sofrem modificações de propriedades físicas, facilmente reconhecíveis sob a influência da temperatura

Exemplos

- Desaparecimento dos **halos pleocróicos da biotite** a 480 °C
- Perda da cor do **quartzo fumado** e **ametista**, entre 240 e 260°C, ou da **fluorite**, a cerca de 175 °C.

Estas observações fornecem, portanto, indicações sobre a temperatura máxima de formação dos minerais.

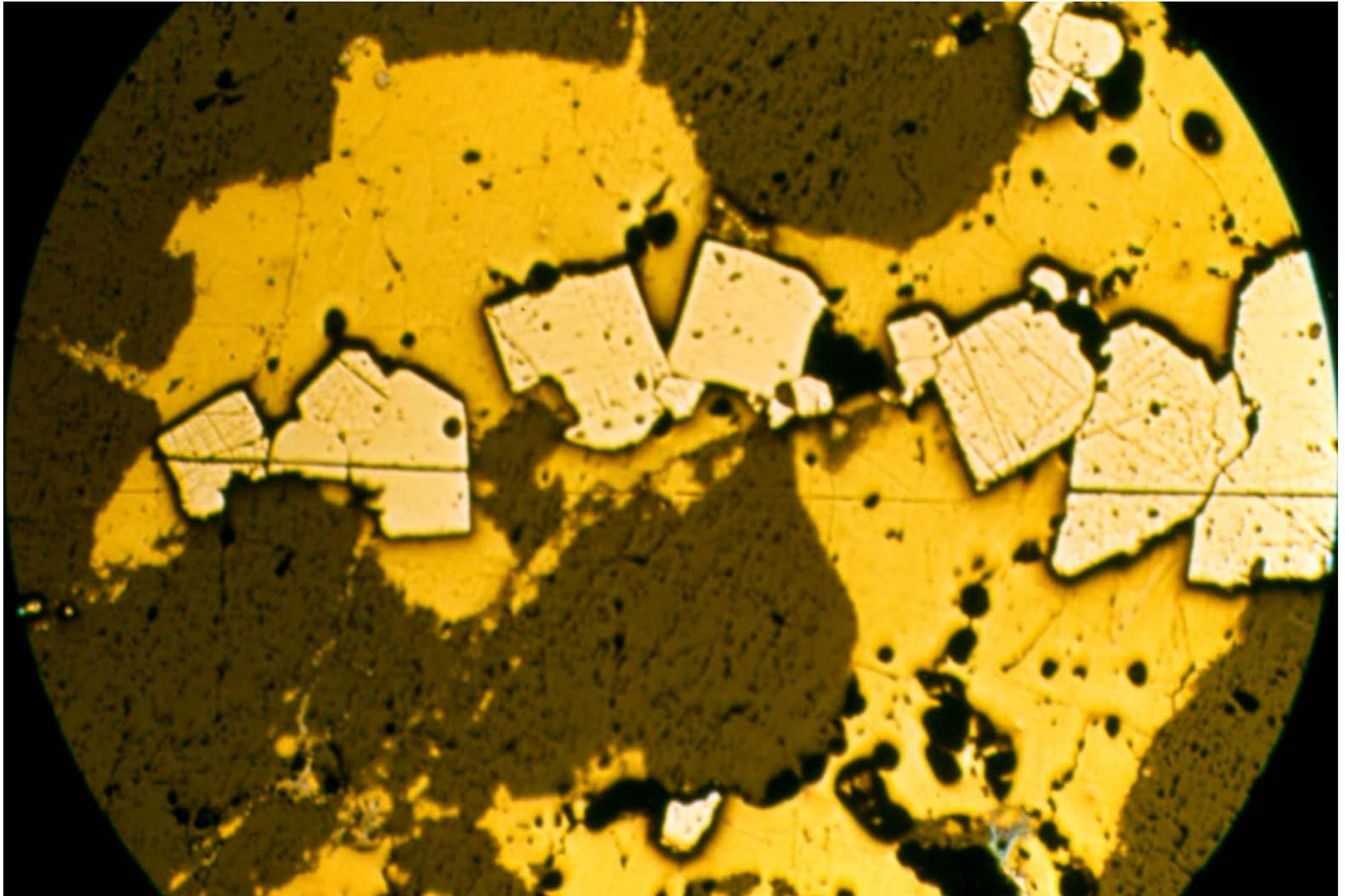
Recristalizações

Este método baseia-se na propriedade apresentada por alguns minerais de sofrerem recristalização a uma determinada temperatura

Aplica-se sobretudo aos elementos nativos, permitindo distinguir se são de origem supergénica ou hipogénica.

A recristalização é muita vezes reconhecida pela modificação textural dos minerais, nomeadamente o tamanho, em mosaicos com cristais mais pequenos ou maiores que os grãos originais

Ex. Calcite



Recristalização de pirite

- cristais subeuédricos no seio da calcopirite -

Inclusões fluidas

Técnica mais utilizada!

O fundamento deste método baseia-se na consideração de que durante o crescimento dos cristais poderão ficar aprisionadas porções do fluido mineralizado (inclusões) e que posteriormente não se terão verificado trocas significativas com o exterior – **as inclusões revelam a composição do fluido original**

Algumas inclusões fluidas têm pequenos cristais de sais. O estudo da temperatura de formação destes cristais é utilizado também para determinar a temperatura mínima a que teriam sido encerradas as inclusões fluidas - **temperatura de dissolução**

As temperaturas máximas de formação dos cristais podem ser determinadas aquecendo os cristais até que a dilatação do fluido provoque a decrepitação (rotura) daqueles – **temperatura de decrepitação**

DIFICULDADE - Nem todas as inclusões são primárias, ou seja, contemporâneas da formação do mineral !

Equipamento

Microscópio

Sistema de refrigeração
e aquecimento

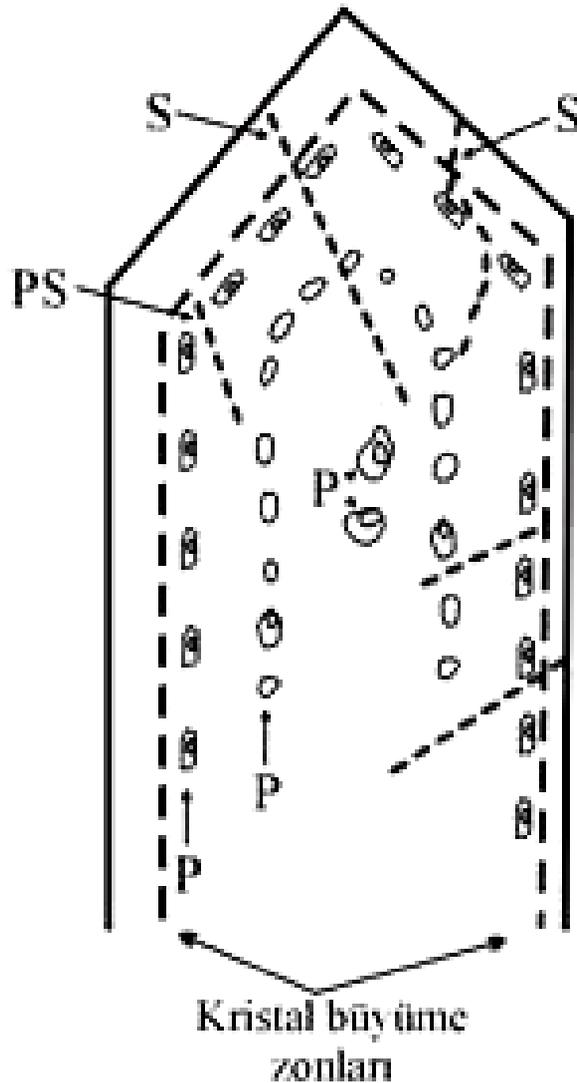
Sistema de aquisição
de imagem



Inclusões

- **Primárias**
- **Secundárias**
- **Pseudosecundárias**

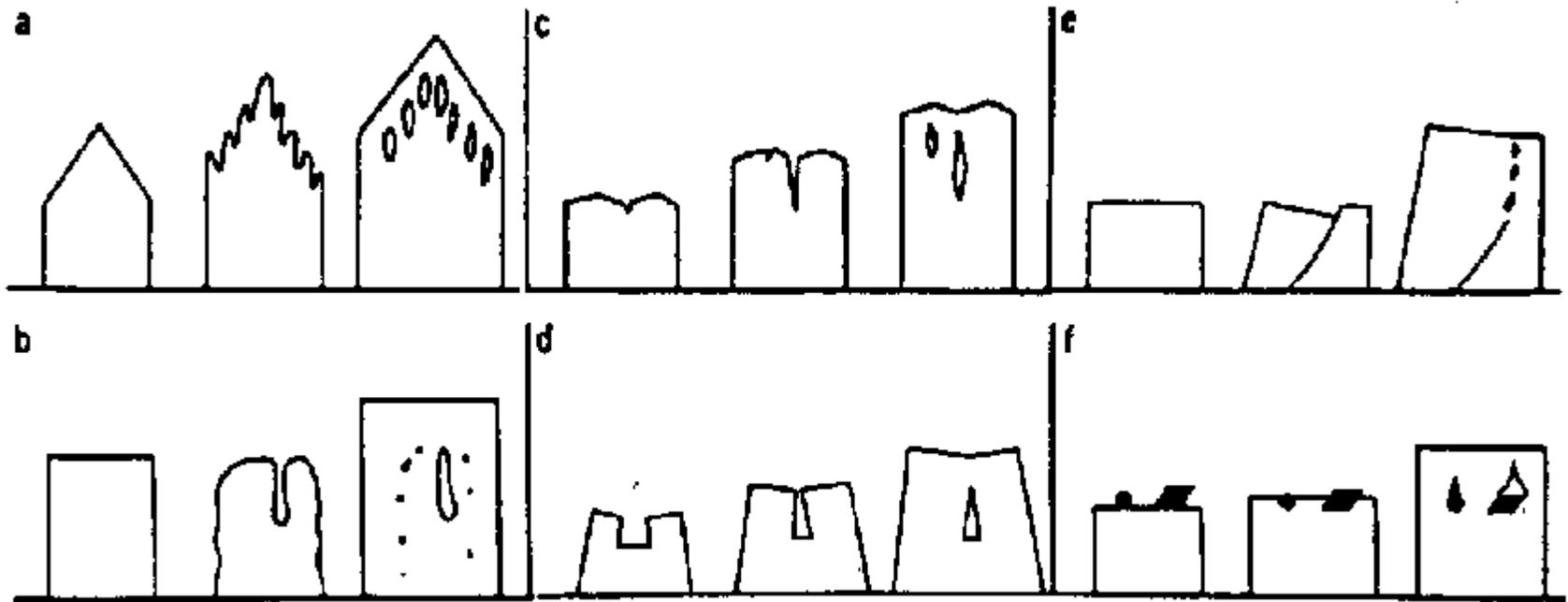
Tipos de inclusões



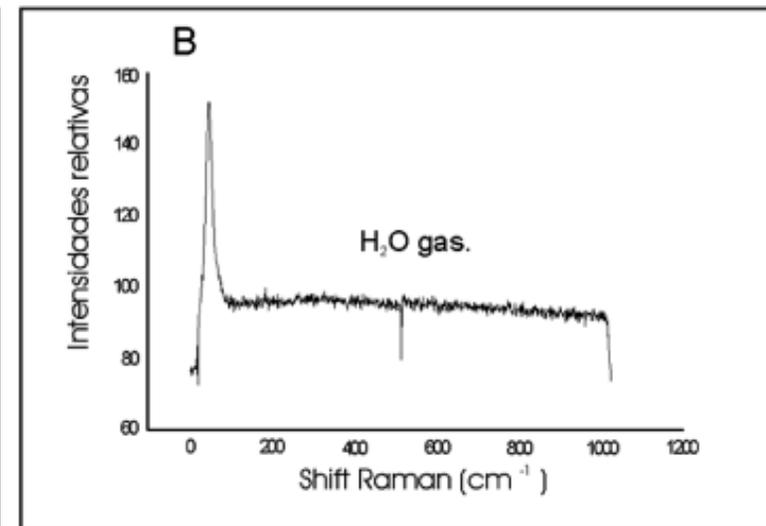
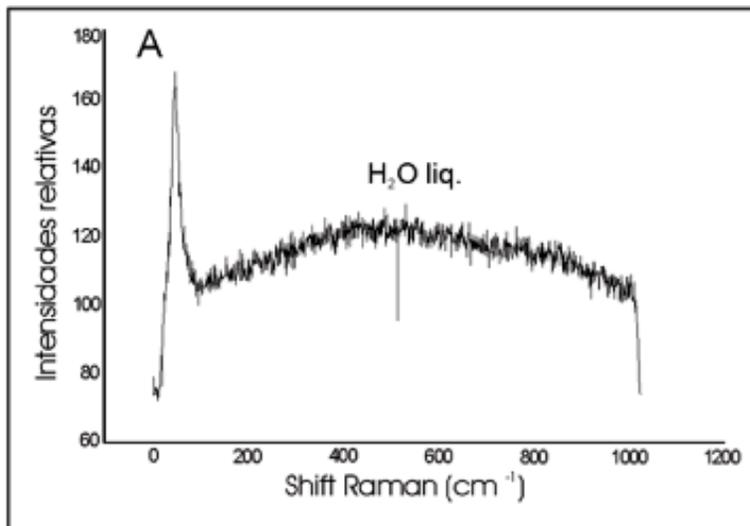
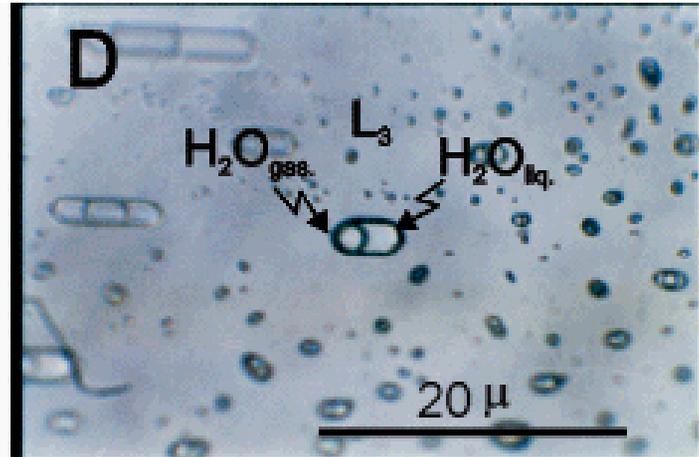
P= Birincil kapaım
(Primary inclusion)

PS= Yalancı ikincil kapaım
(Pseudosecondary inclusion)

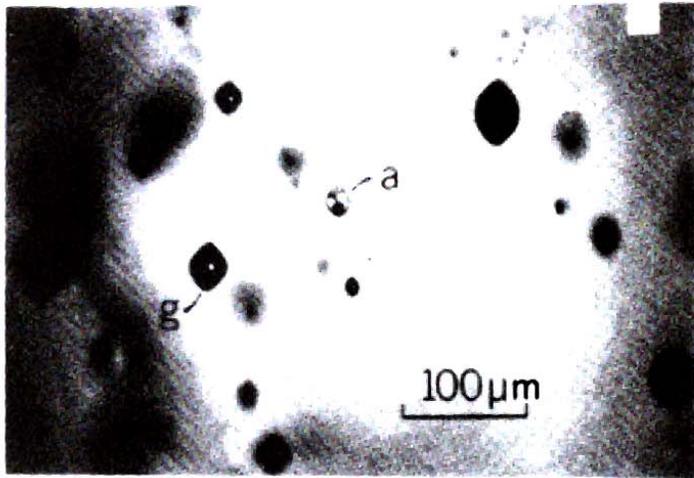
S= İkincil kapaım
(Secondary inclusion)



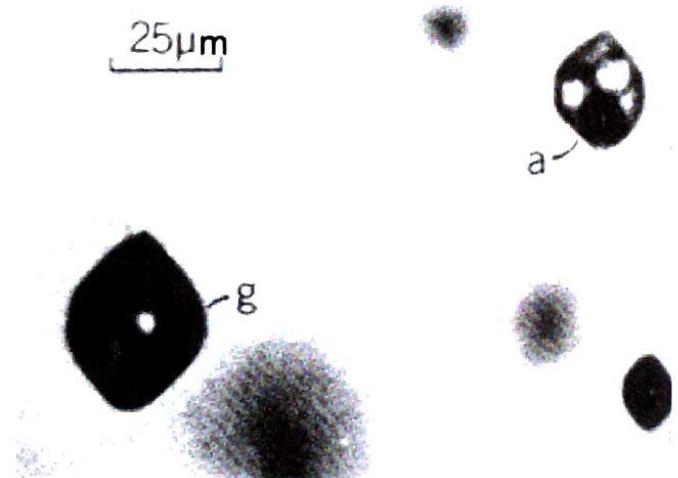
Formação de inclusões



Composição química (H_2O , NaCl , ...)



(a)



(b)

Figure 7-8. Type II and Type III inclusions in quartz from Oruro, Bolivia, showing almost certain boiling conditions. Both types of inclusions homogenize between 464 and 470°C. One is gas-rich (g) and fills to vapor upon heating, the other (a) is liquid- and crystal-rich and fills to a liquid. (b) Enlargement of (a). (From Kelly and Turneaure, 1970.)

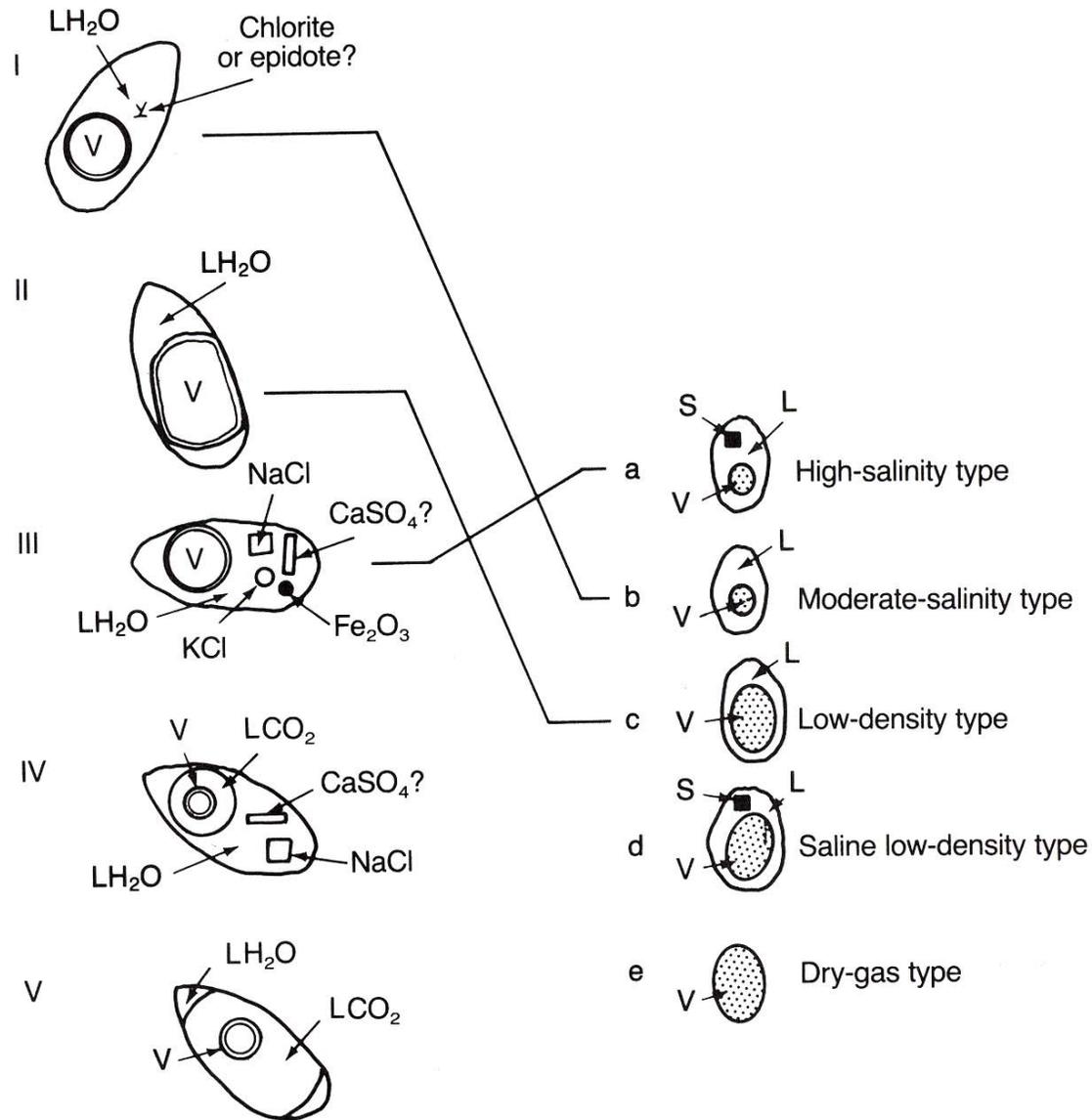


Figure 7-9. Sketches of the most important types of fluid inclusion: Types I to V from Nash and Theodore (1971) and Types *a* to *e* from Ahmad and Rose (1980), with tie lines connecting pairs where applicable. L = liquid; V = vapor.

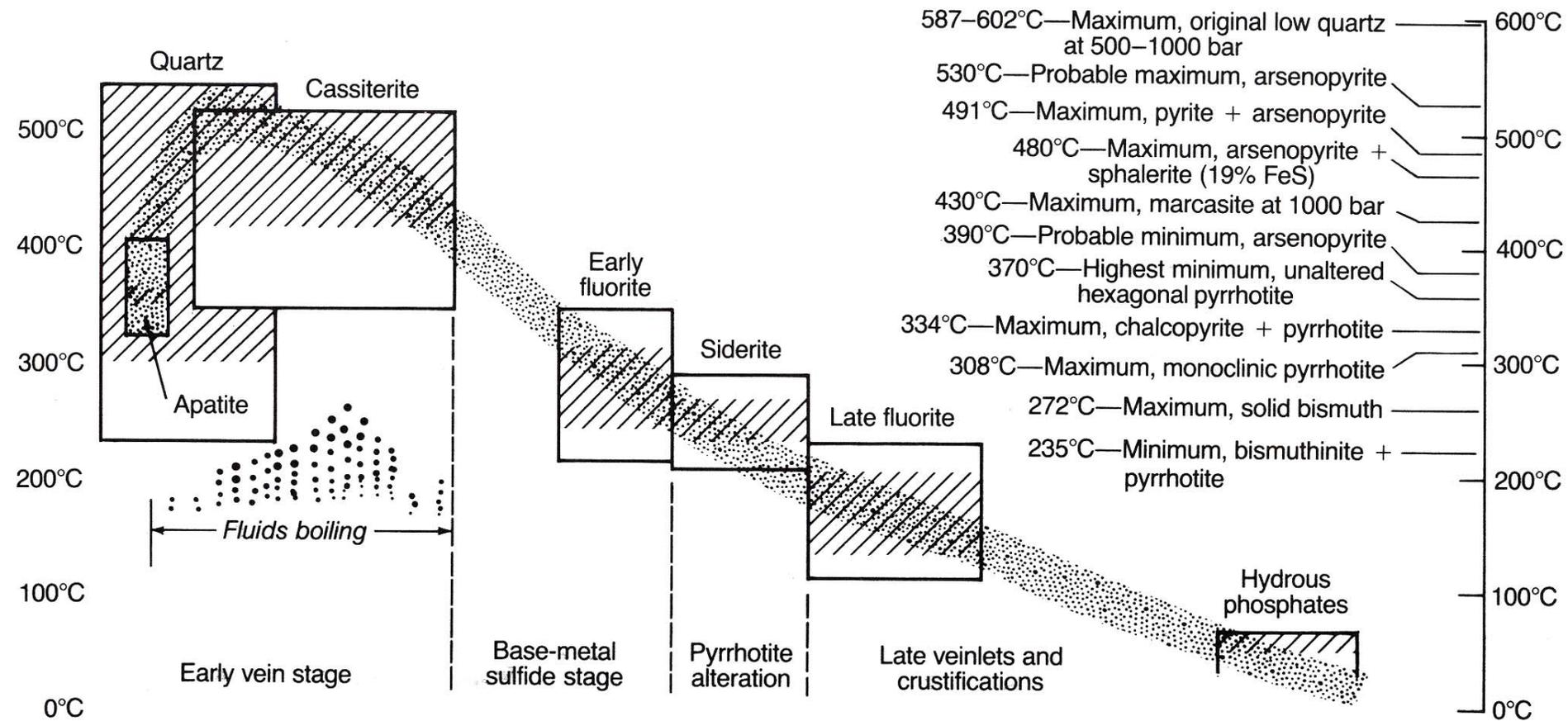
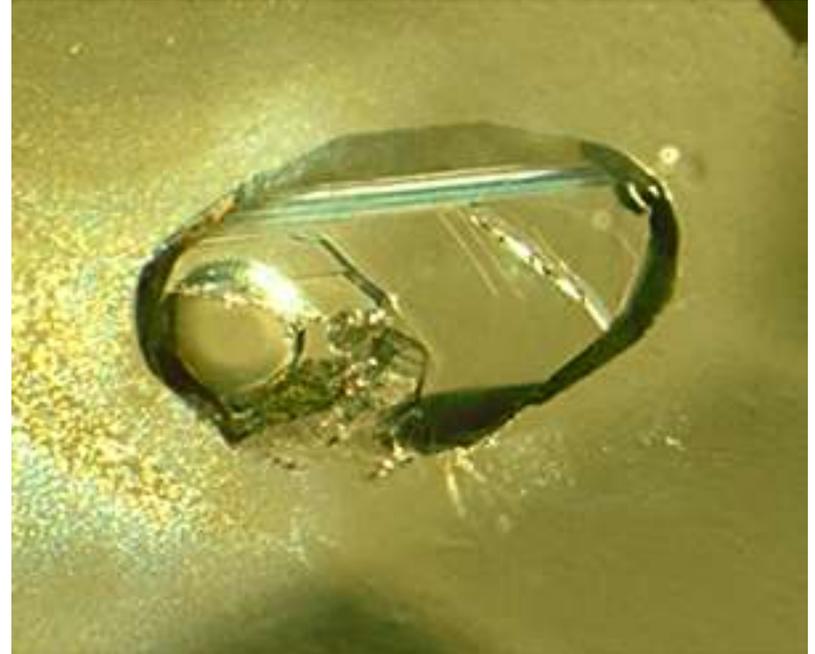
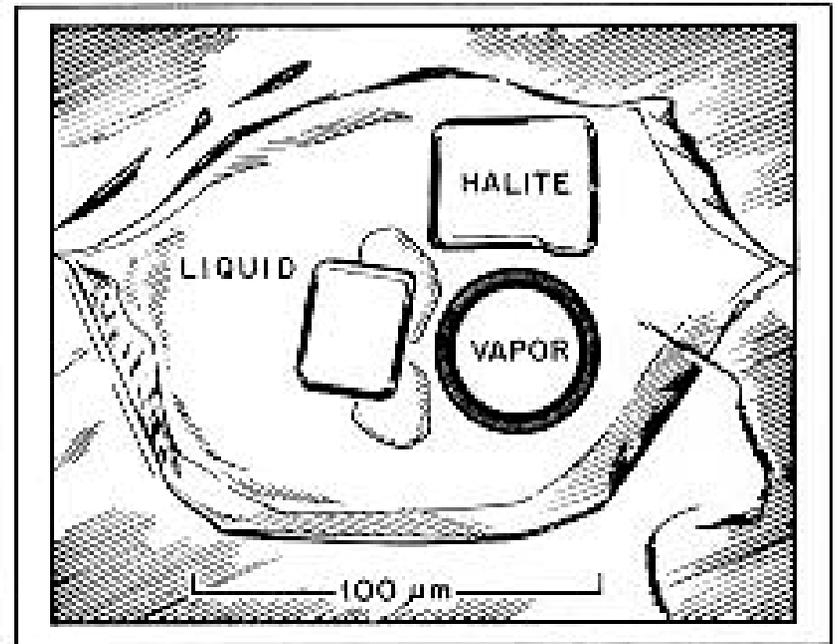


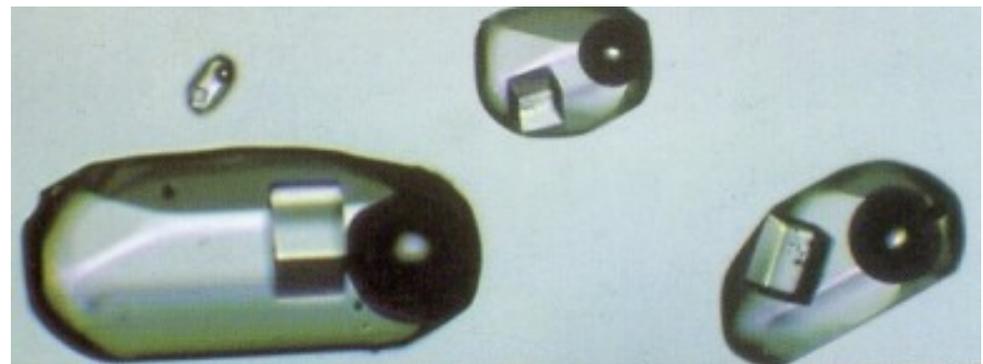
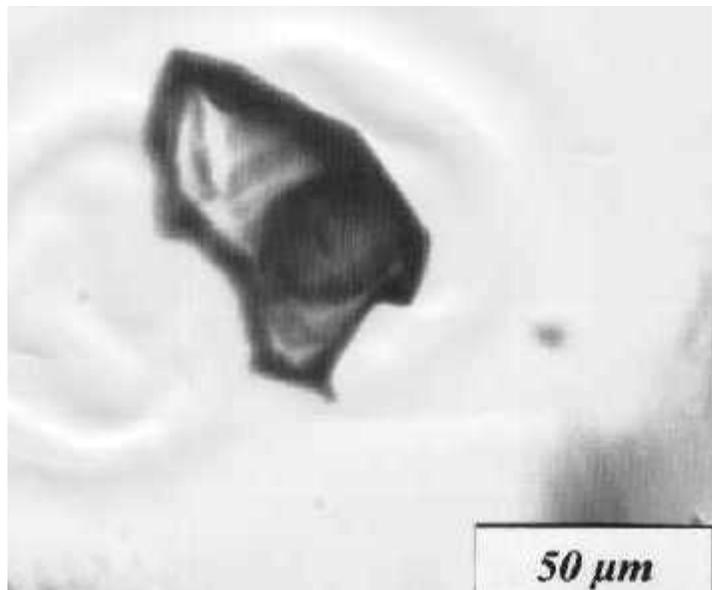
Figure 7-10. Paragenesis-paragenetic sequence diagram (horizontal) related to temperature of formation (vertical) as defined by pressure-corrected fluid inclusion filling temperatures, with other geothermometers indicated. Note the boiling zone above about 400°C revealed by fluid inclusions (see Figure 7-8) and the poor bracketing, or definition, of temperatures provided by the other techniques. (From Kelly and Turneaure, 1970.)

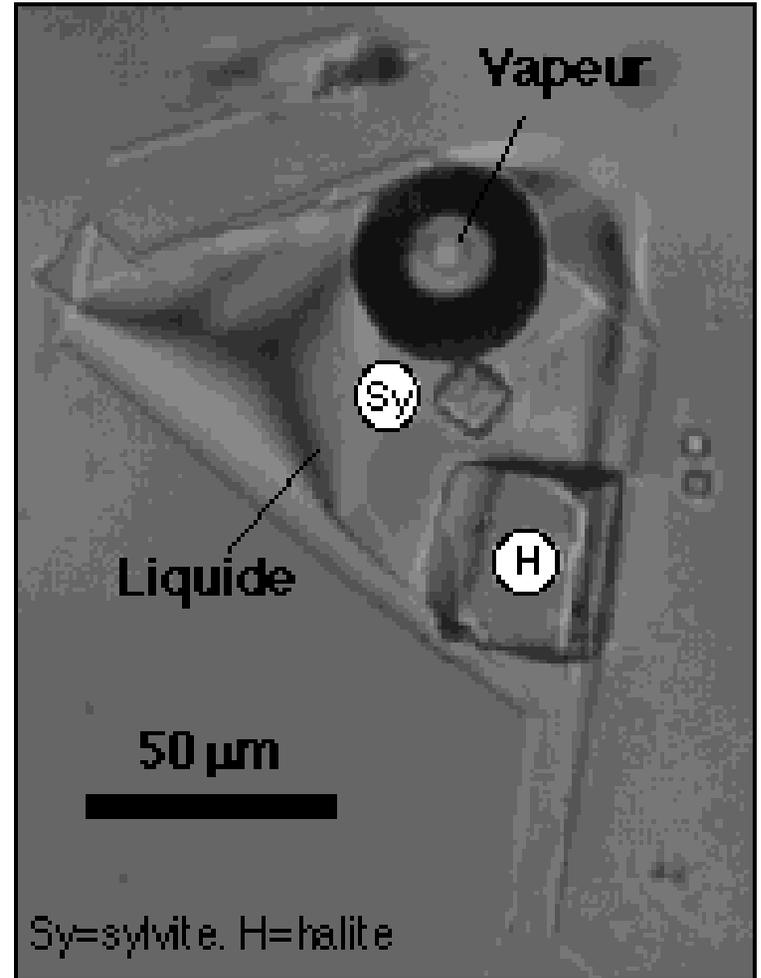
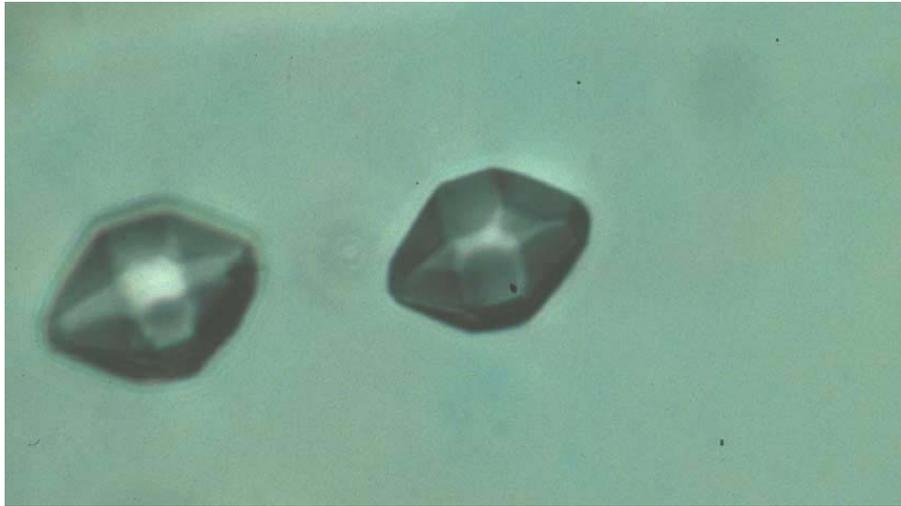


Quantas fases ?

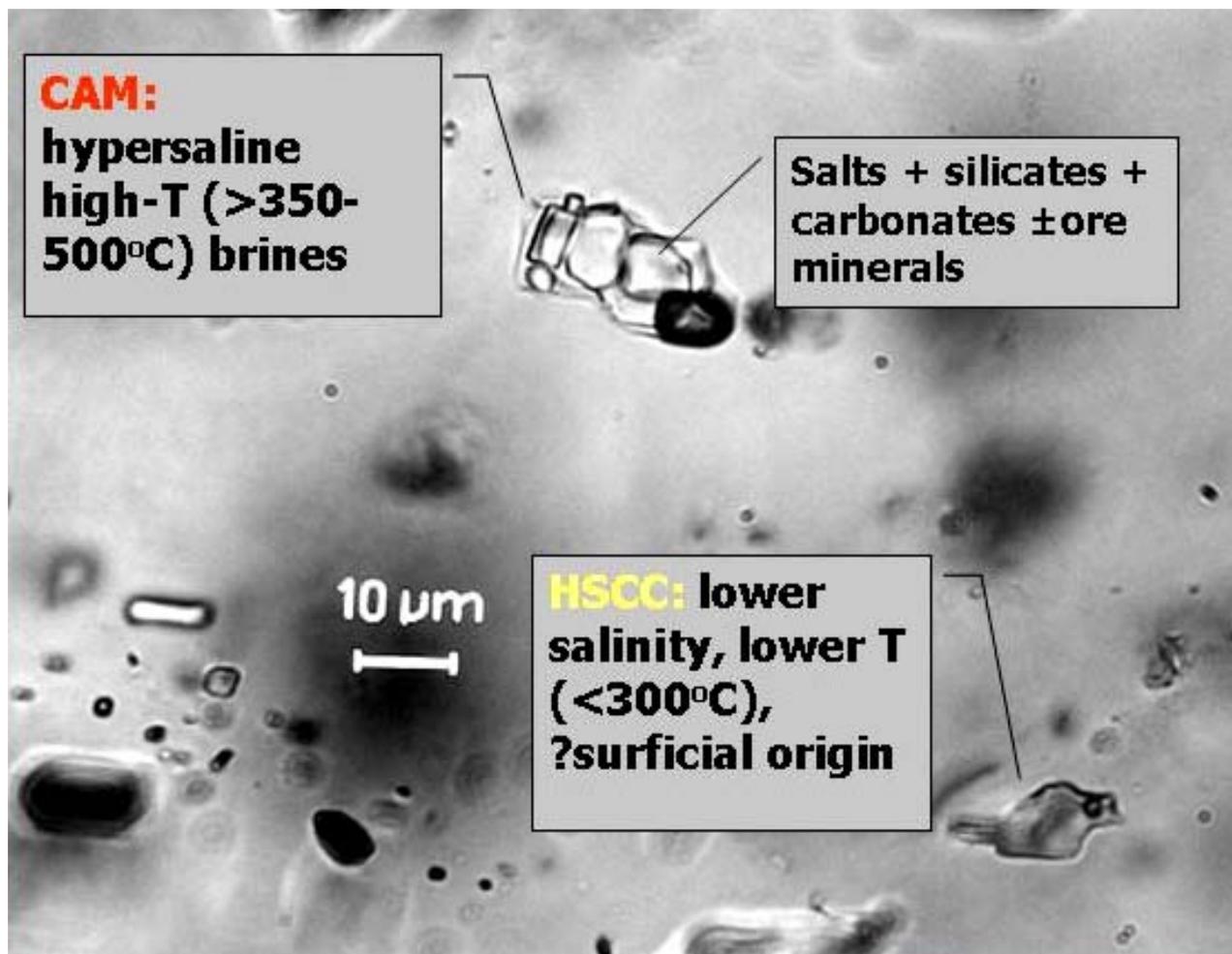


Photomicrograph of Fluid Inclusion





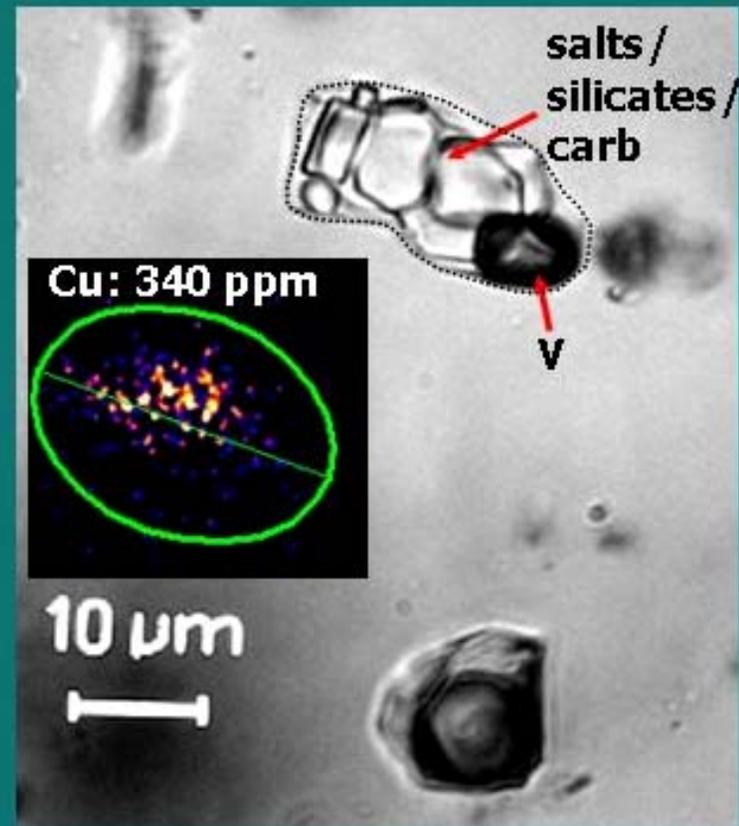
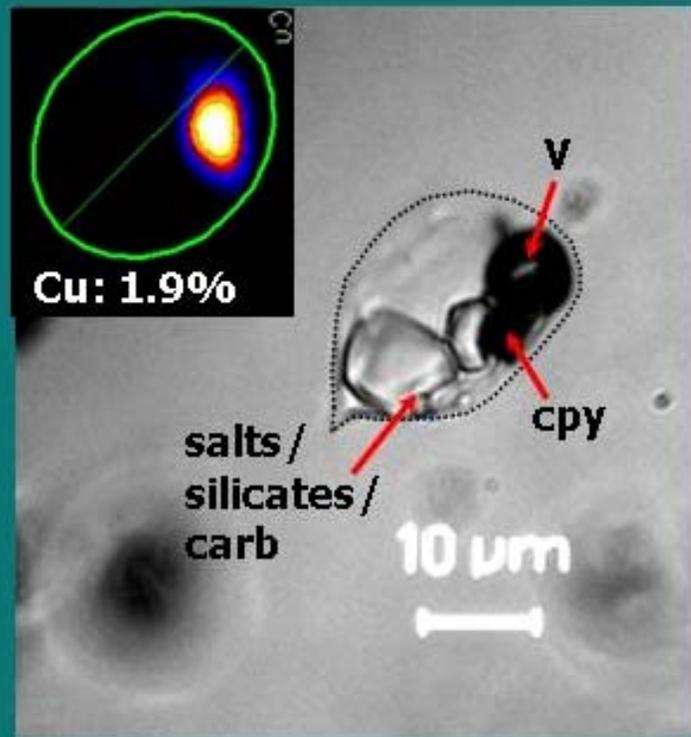
Fluid inclusion types (Stuart Shelf basement)



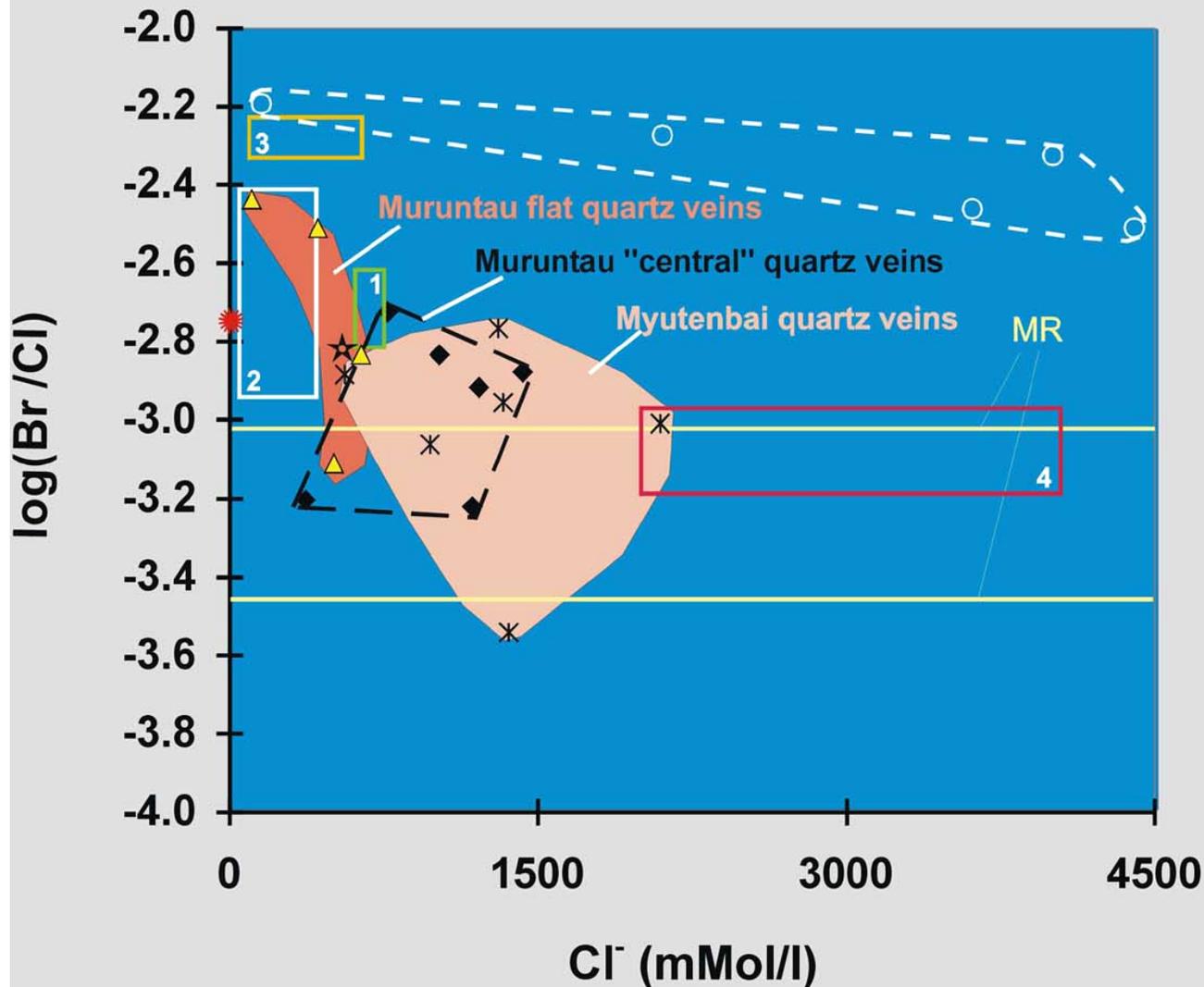
High-temp Cu-bearing brines

(drill hole BD1)

CAM alteration: magnetite-qtz-amp-Kfs-ap-py (trace cpy)



Chloride vs. log(Br /Cl)



Legend:

Muruntau

◆ "central" quartz veins

△ flat quartz veins

Myutenbai

✱ main and stockwork quartz veins

literature data

★ seawater

☀ "earth" / Cl chondrites (Dreibus et al., 1977)

MR logBr/Cl range for volcanic fumarole condensates, "magmatic range" (compilation of Böhlke and Irwin, 1992)

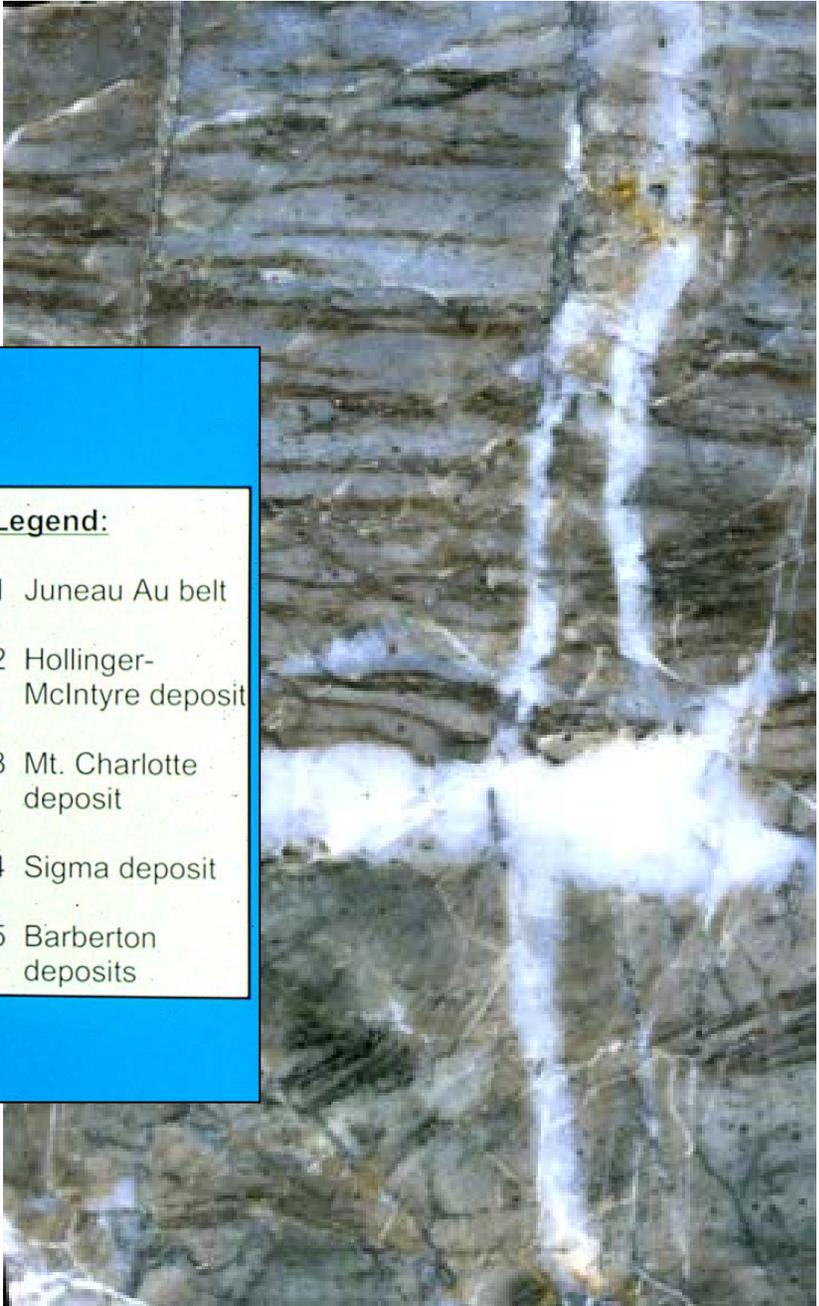
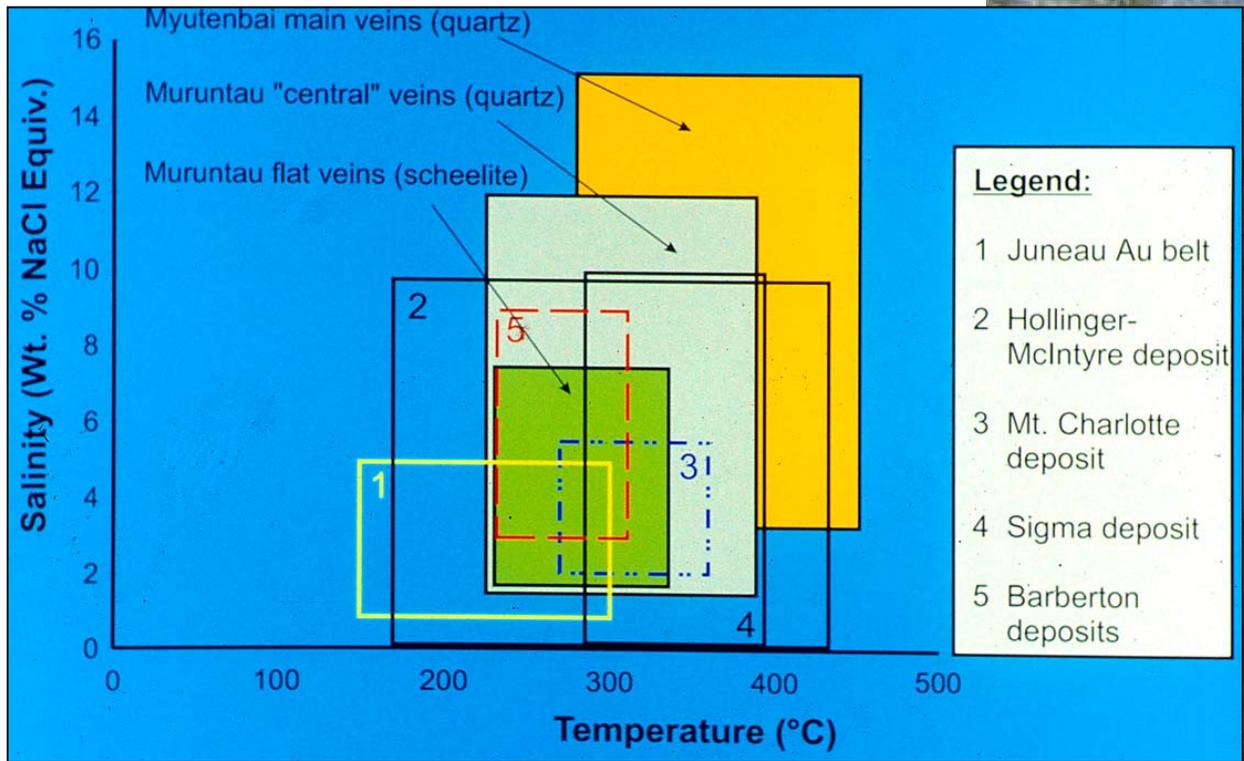
⊙ Canadian Shield brines (Fritz and Frape, 1982)

1 Brusson Au-quartz veins (Yardley et al., 1993)

2 Alleghany Au-quartz veins (Böhlke and Irwin, 1992)

3 Ouro Fino retrograde metamorphic quartz veins (Boiron et al., 1999)

4 St. Austell granites (Böhlke and Irwin, 1992)



Minerais indicadores de temperatura

São minerais indicadores de temperatura aqueles que se formam a temperatura conhecida ou aqueles que ocorrem com certa constância associados a minerais reconhecidos como de alta, média ou baixa temperatura de formação. Estes últimos são chamados minerais termométricos auxiliares.

É indispensável o maior cuidado com a atribuição de uma dada gama de temperaturas a uma certa associação mineral e a validade de uma tal atribuição depende mais da **CONVERGÊNCIA DE UMA SÉRIE DE OBSERVAÇÕES** que simplesmente da presença de tais ou tais minerais. É necessário ter em conta os possíveis **termómetros geológicos**, os **dados experimentais** e o **ambiente geológico do jazigo** para que as considerações térmicas se reconheçam de interesse.

Estudos isotópicos

- Isótopos estáveis

As diferenças ocorrentes nas composições isotópicas estáveis de um elemento devem-se a pequenas diferenças de comportamento químico dos seus isótopos, assumindo que as respectivas razões isotópicas desse elemento se mantêm, cosmicamente, fixas e inalteradas ao longo do tempo geológico

Hidrogénio-Deutério ($Z=1$, $^1\text{H}=99.985\%$, $^2\text{H} = \mathbf{D} = 0.015\%$)

Carbono ($Z=6$, $^{12}\text{C} = 98.89\%$, $^{13}\text{C} = 0.205\%$)

Oxigénio ($Z=8$, $^{16}\text{O} = 99.756\%$, $\mathbf{^{18}\text{O}} = 0.205\%$)

Enxofre ($Z=16$, $^{32}\text{S}=95.05\%$, $^{34}\text{S} = 4.21\%$)

- Isótopos radioactivos

Aguns isótopos correspondem ao produto final de decaimento radioactivo de elementos com longos tempos de decaimento



Isótopos estáveis

Técnica muito utilizada!

As variações encontradas na natureza dependem de pequenas diferenças no comportamento físico e químico dos isótopos nos ambientes naturais

A separação dos isótopos estáveis – **fraccionação** - baseia-se no facto de as massas dos átomos afectarem as propriedades termodinâmicas dos iões, radicais ou moléculas, exibindo por isso comportamentos diferenciados

De um modo geral, as ligações formadas pelos iões mais leves são mais fracas; deste modo os iões isotopicamente mais leves têm maior mobilidade e são mais reactivos que os seus equivalentes pesados

Processos que produzem fraccionamento isotópica

- **Oxidação-redução**
- **Evaporação**
- **Condensação**
- **Reacções reversíveis de dissolução-precipitação a partir de soluções aquosas**
- **Reacções de adsorção-desadsorção**
- **Reacções catalizadas por micróbios (ambientes sedimentares-diagenéticos)**
- **Difusão**

Isótopos de hidrogénio e Oxigénio

- O vapor de água é isotopicamente mais leve do que o líquido donde evaporou
- Usa-se como padrão a razão das composições isotópicas do SMOW (Standard Mean Ocean Water)

δD vs. $\delta^{18}O$ (‰)

- O vapor evaporado a partir do SMOW é sempre isotopicamente mais leve
- A condensação da chuva é praticamente um processo de equilíbrio com proporcionalidade directa entre a fraccionção D/H e $^{18}O/^{16}O$

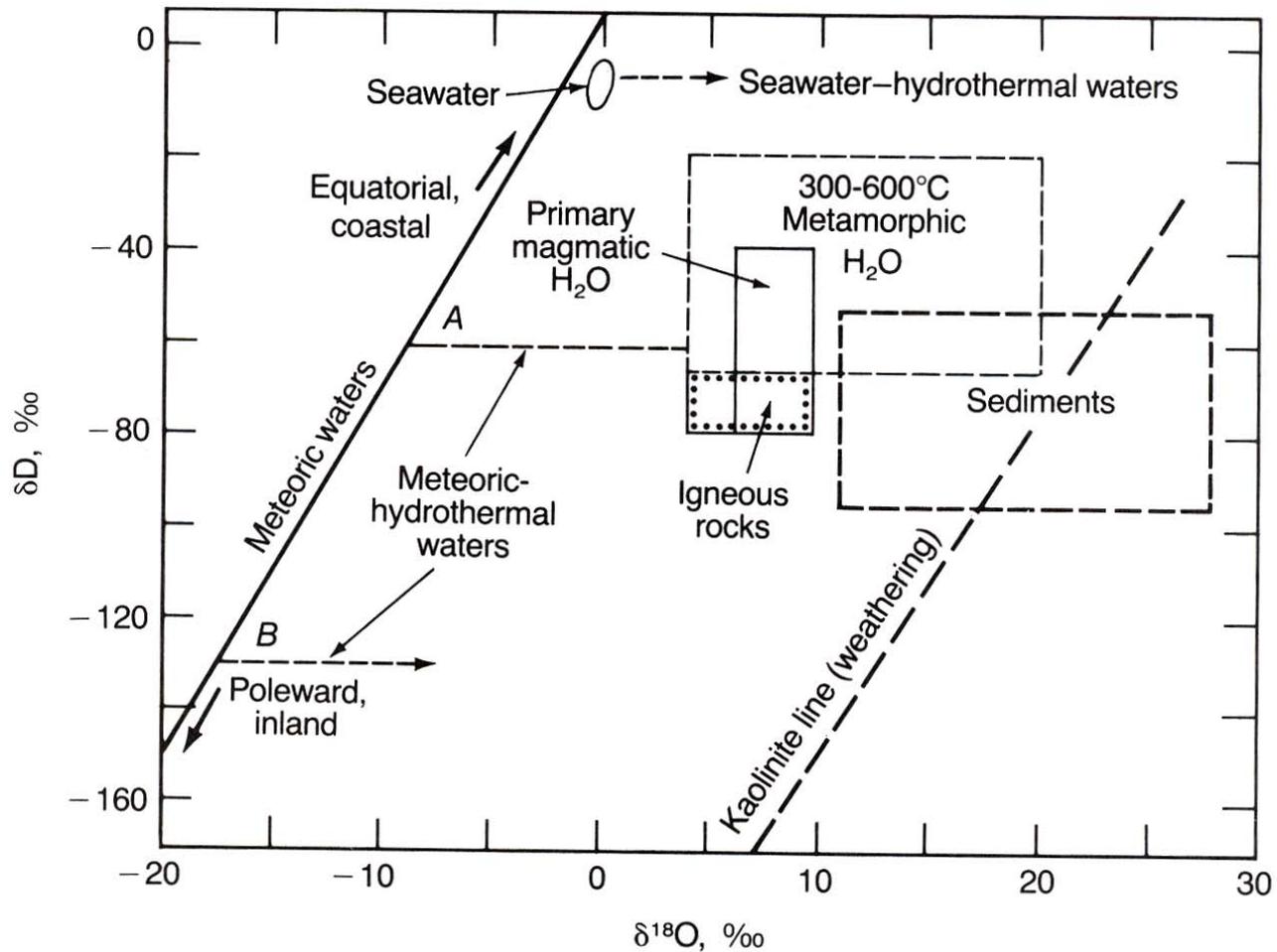
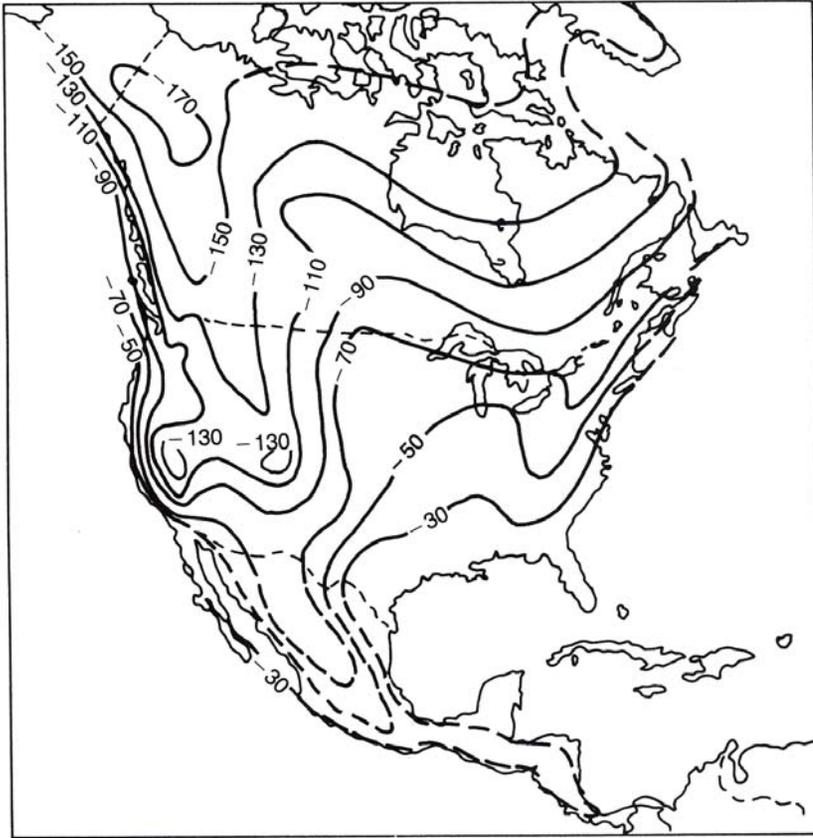


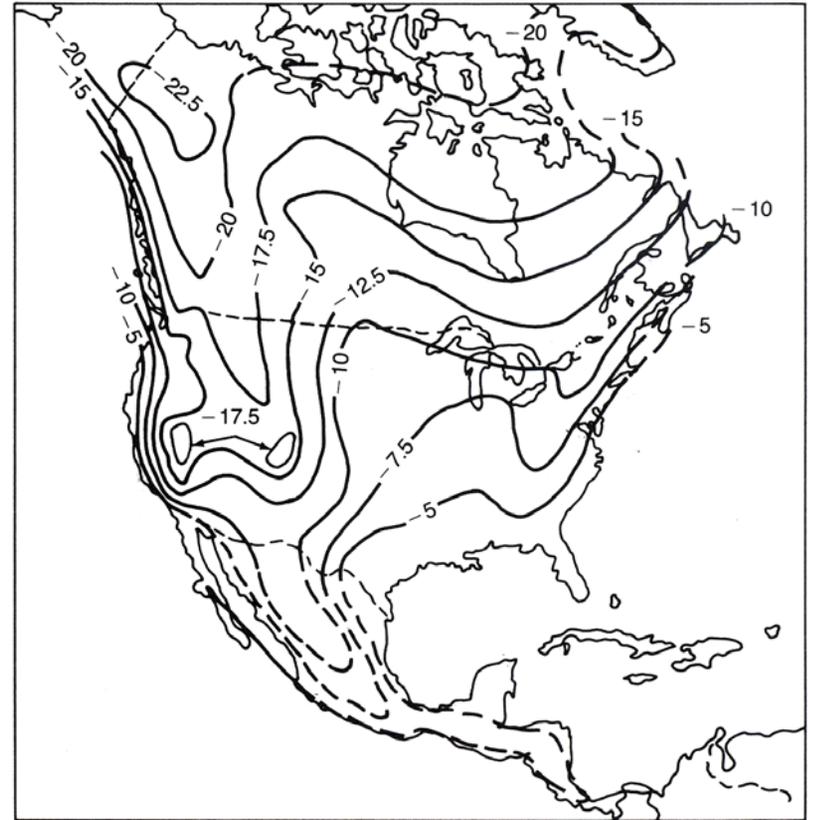
Figure 7-13. Summary diagram of isotope composition of waters of different origins. Trends of ^{18}O shift due to water-rock interaction and exchange are shown for seawater and meteoric waters of compositions A and B. (After Taylor, 1967.)

SMOW

$$\delta D = \delta^{18}\text{O} + 10 \quad (\text{‰})$$

δD 

(a)

 $\delta^{18}O$ 

(b)

Figure 7-12. Maps of North America showing contours of the approximate average δD values (a) and $\delta^{18}O$ values (b) (*facing page*) of meteoric surface waters. Similar maps have been prepared for all continents. Note that the values decrease landward, especially near coastal mountains, and poleward. (*After Taylor, 1974.*)

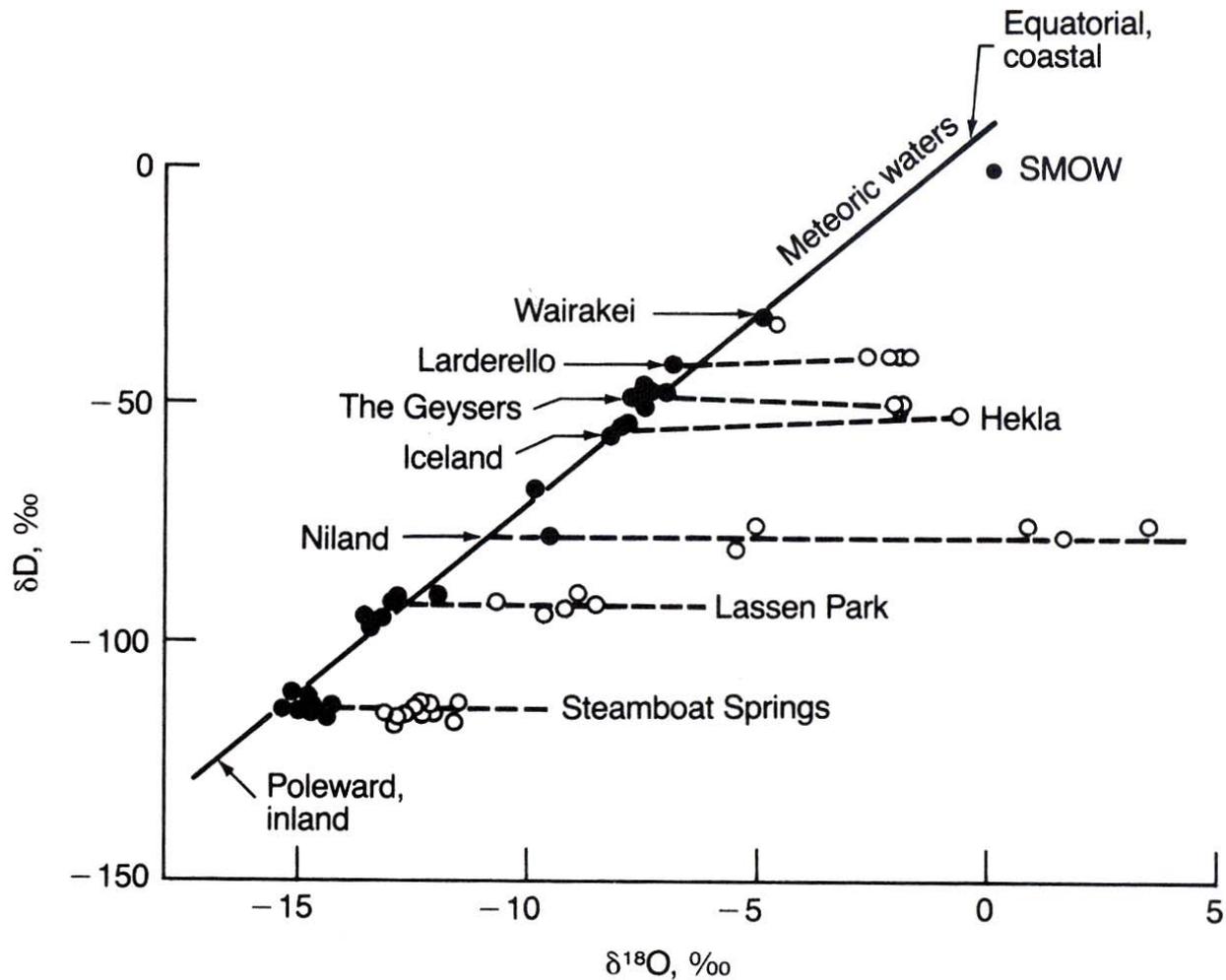


Figure 7-14. Plot of δD versus $\delta^{18}O$ for near-neutral chloride-rich geothermal waters (open circles) and local rain or snow (dark symbols) from a variety of hot spring areas throughout the world. Localities: Wairakei, New Zealand; Larderello, Italy; Niland (Salton Sea), The Geysers, and Lassen Park, California; Hekla, Iceland; and Steamboat Springs, Nevada. Notice that the precipitating waters get isotopically lighter both inland and poleward. The open circles define the degree to which the spring waters are diluted with magmatic water or equilibrated with isotopically heavier wall rocks by alteration and isotopic exchange. (From Taylor, 1974, Table 2-2.)

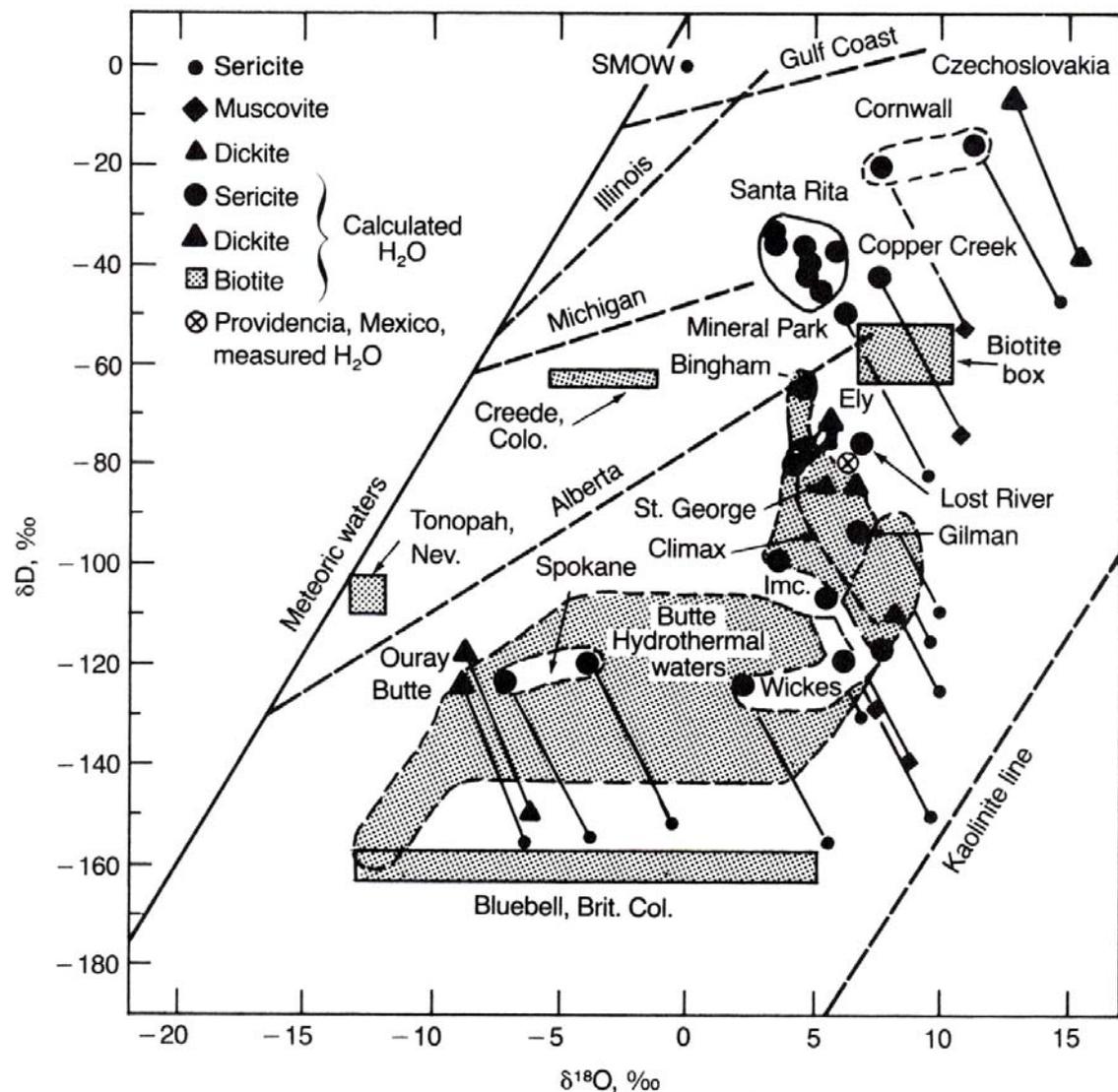


Figure 7-15. Plot of δD versus $\delta^{18}O$ for calculated hydrothermal waters from a variety of ore deposits, mainly from western North America. The stippled biotite "box" represents the "magmatic water box" of Figure 2-11 and describes waters that would have coexisted in equilibrium with hydrothermal biotites from Ely, Bingham, and Santa Rita at $650^{\circ}C$. Also shown are the trend lines for oil-field formation waters from various sedimentary basins in the midcontinent of North America. See also Figures 7-12, 7-13, 7-14, and 2-11. (From Taylor, 1974.)

Isótopos de Enxofre ^{34}S e ^{32}S

- A fraccionação ocorre em meios orgânicos e inorgânicos
- Usa-se como padrão a razão das composições isotópicas da troilite (FeS) meteorítica (Canion Diablo no Arizona) – cosmicamente primitivo e inalterado por processos orgânicos

Isótopos estáveis

$^{32}\text{S} = 95.02 \%$ $^{33}\text{S} = 0.75\%$ $^{34}\text{S} = 4.21 \%$ $^{34}\text{S} = 4.21 \%$

$$\delta^{34}\text{S} = \frac{{}^{34}\text{S}/{}^{32}\text{S}_{\text{amostra}} - {}^{34}\text{S}/{}^{32}\text{S}_{\text{padrão}}}{{}^{34}\text{S}/{}^{32}\text{S}_{\text{padrão}}}$$

- Os meteoritos, as rochas ígneas e os sulfuretos têm valores próximos de zero (0).

Fracção orgânica

As bactérias anaeróbicas consomem SO_4^{2-} nos rios, lagos e oceanos, quebrando as ligações entre o oxigénio e o enxofre e libertando H_2S gasoso

Bactérias

Desulfovibrio desulfuricans (mais activa e abundante)

Desulfovibrio orientis (espécie de temperatura média)

Clostridium nigrificans (espécie de alta temperatura)

H_2S pode reagir com outros elementos (Cu, Pb, Zn) e formar sulfuretos sedimentares (são isotopicamente mais leves e designados como bacteriogénicos)

Fraccionação inorgânica

É mais complexa e mais subtil que a biogénica

^{34}S apresenta-se em maior quantidade nos iões mais oxidados como o sulfato e em posições estruturais dos minerais onde as ligações são mais fortes

As composições isotópicas dos sulfuretos precipitados a partir de fluidos hidrotermais são controladas pelas características físico-químicas desses fluidos.

As espécies mais importantes são H_2S , HS^- , S^{2-} , SO_4^{2-} , HSO_4^- , NaSO_4^- , KSO_4^- e alguns iões com S mais complexos

Actividades destes iões dependem do **pH** e da **f(O₂)**

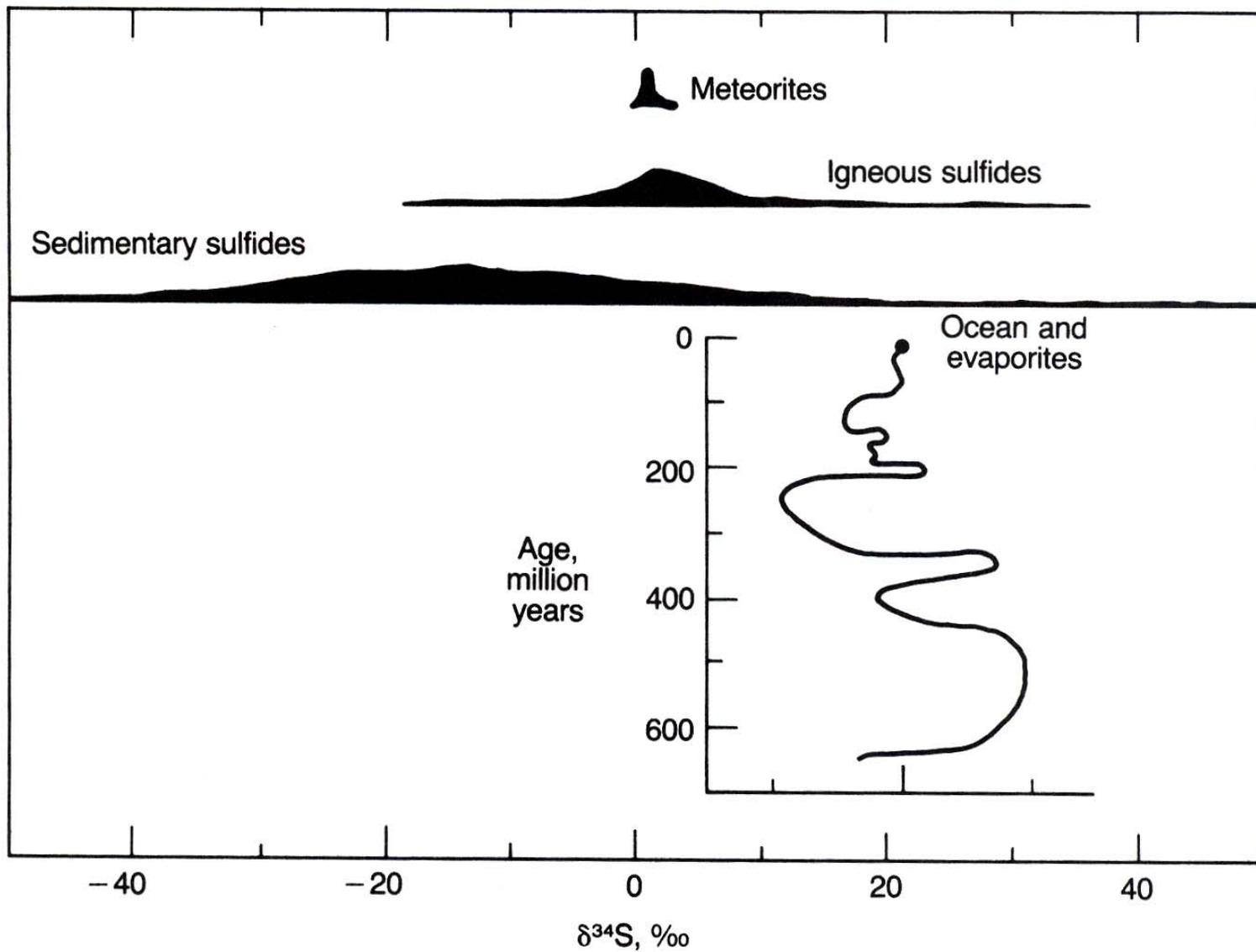
Jazigos da Faixa Piritosa Ibérica (FPI)

Medições isotópicas ($\delta^{34}\text{S}$ - ‰)

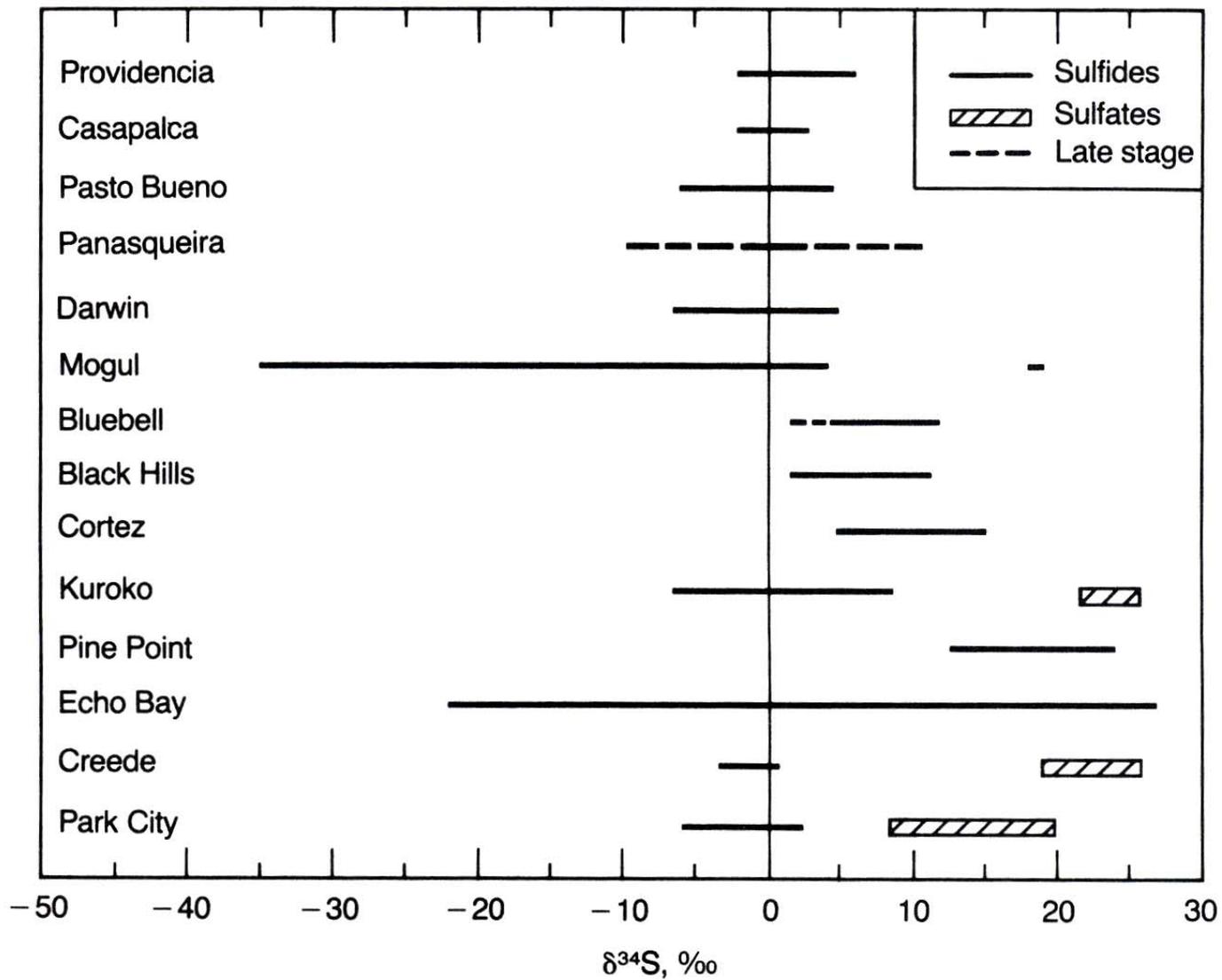
pirite, calcopirite, blenda e barita

- **Jazigos autóctones vs. para-autóctones e alóctones**
- **Contribuição magmática vs. contribuição biogénica**
- **Zonamento de jazigos**
(stockwork, minérios bandados, tecto, muro, zona intermédia)

Estabelecer os ambientes de formação de jazigos, sob o ponto de vista do processo ou da termometria



(a)



(b)

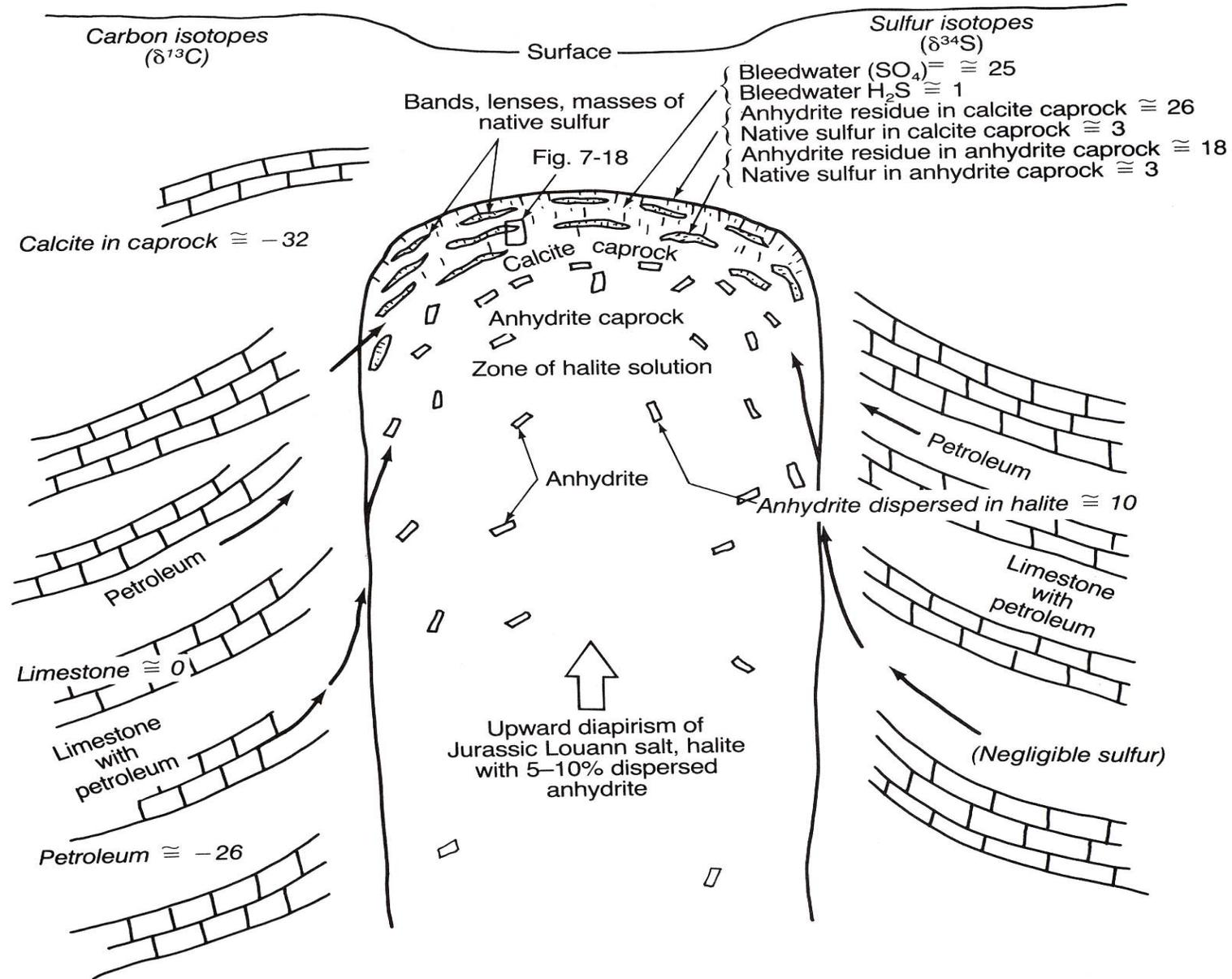
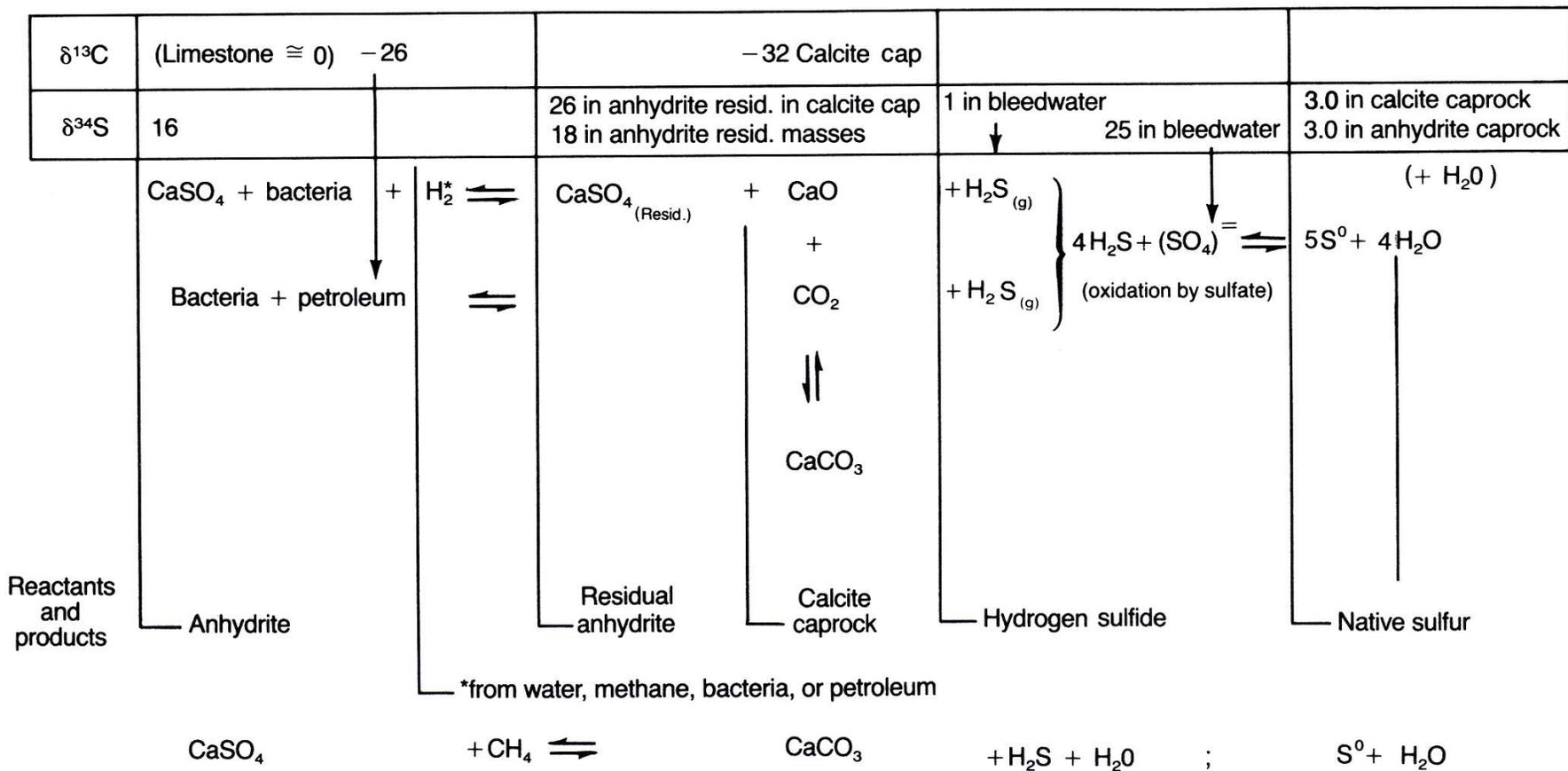


Figure 7-17. Sketch of geologic and isotope relations in salt dome systems. See also Figure 7-19. (Isotope data from Feely and Kulp, 1957.)



Formação de Minerais

A formação dos minerais depende em grande parte das condições físicas, temperatura e pressão. Os métodos anteriores permitem estimar temperaturas de formação; a acção da pressão, e a sua estimação apresenta maiores dificuldades.

Porém, a formação dos minerais, embora controlada por aquelas condições físicas, pode processar-se por modos diversos que se vão passar em revista.

Formação dos Minerais

1. **Cristalização dos Magmas**
2. **Sublimação**
3. **Destilação**
4. **Evaporação e Sobressaturação**
5. **Reacções de gases sobre outros gases, líquidos ou sólidos**
6. **Reacções de líquidos sobre outros líquidos ou sólidos**
7. **Precipitação por Bactérias**
8. **Deposição Coloidal**
9. **Metamorfismo**
10. **Deposição em espaços abertos e substituição metassomática**
11. **Precipitação em espaços abertos**
12. **Substituição metassomática**

Cristalização dos Magmas

Magma - Fusão silicatada

A cristalização dos minerais, a partir do magma, opera-se do mesmo modo que a partir de uma solução aquosa; quer dizer, atingida a saturação do magma para um dado mineral, este começa a cristalizar desde que a temperatura do magma, para a pressão dada, seja inferior à temperatura de fusão mínima daquele mineral (Bateman, 1950, p.29; Tatarinov, 1955, p.34).

A cristalização de minérios a partir de um magma pode dar lugar a concentrações originando jazigos de cromite, apatite, titano-magnetite, etc.

Como se deslocam os magmas?

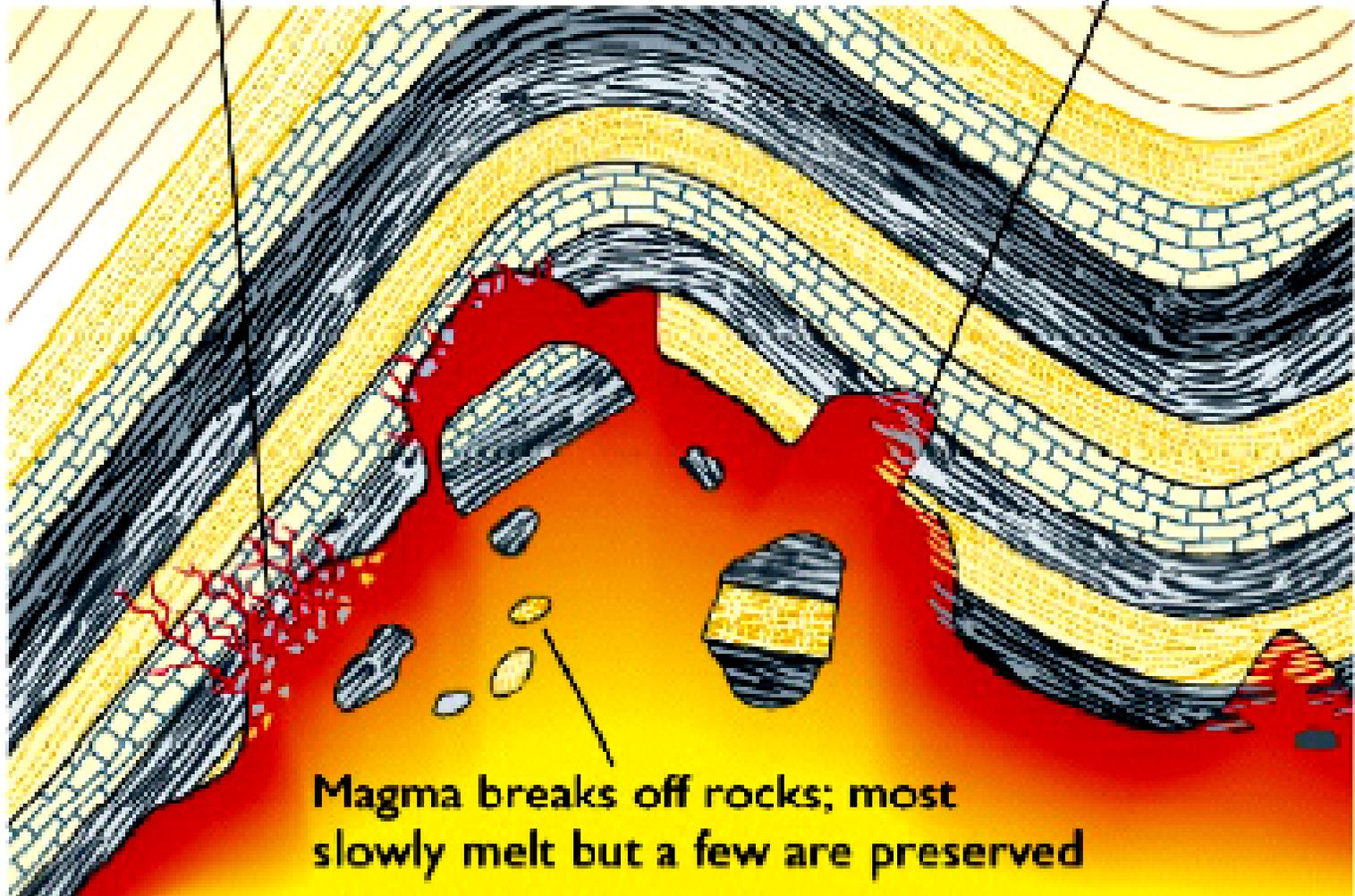
Como os magmas têm mobilidade e se encontram a elevada temperatura, o que lhes confere menor densidade que rochas subjacentes, têm tendência para subir para os níveis mais elevados da crosta ou mesmo até à superfície.

A ascensão do magma dá-se ao longo de falhas, fracturas ou outras descontinuidades, como os planos de estratificação, ou através de um processo conhecido como **“magmatic stoping”** (desmonte magmático), através do qual o magma interage com as rochas com as quais contacta, envolvendo-as e, eventualmente, fundindo-as, no que se designa como **assimilação magmática**.

A assimilação conduz à modificação da composição química do fundido e conduz à formação de condutas que facilitam o movimento ascensional do magma. A densidade e a viscosidade controlam o tipo de deslocação magmática.

Magma invades cracks

Magma melts walls of country rock



Magma breaks off rocks; most slowly melt but a few are preserved

Diferenciação Magmática

Processo através do qual um magma gera dois ou mais “corpos” com composições distintas.

Os processos envolvidos na diferenciação magmática são:

Cristalização fraccionada: os cristais mais densos que o magma têm tendência para precipitar na base da câmara magmática (cumulados) e os menos densos concentram-se nas partes superiores. Considera-se também a possibilidade da existência de filtragem sob pressão (filter pressing) em que o fundido é “esprimido” da polpa cristalina

Assimilação: quando o magma envolve e funde as rochas com as quais contacta, modificando assim a sua composição química (é contaminado pelas rochas encaixantes)

Mistura de magmas: contaminação de magmas diferentes, que poderão ser responsáveis pelo aparecimento de rochas de composição intermédia.

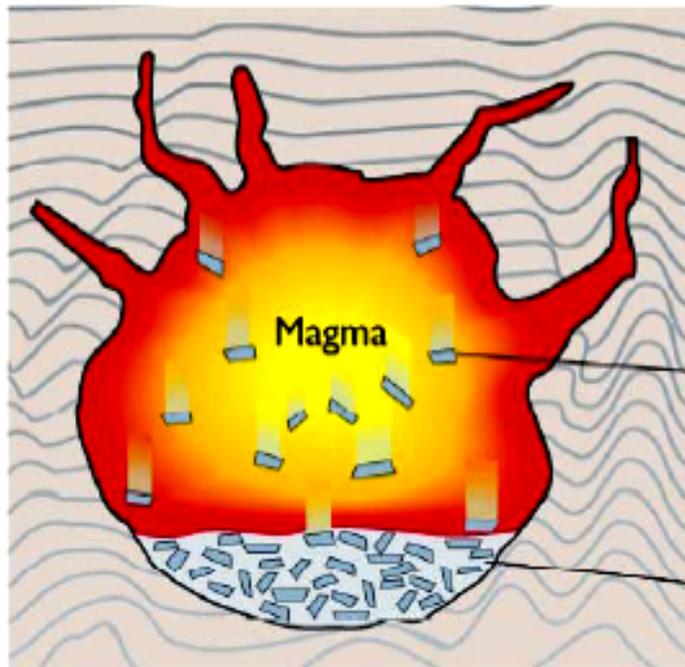
Cristalização convectiva e cristalização in situ: ex. movimentos de convecção geram estruturas de fluxo e de arrastamento de cristais.

Magma Differentiation

how do we get from here to there?

- **Fractional Crystallization**

- Separation of crystals from liquid *Sen, Fig. 10.2*
- Gravitative settling or flotation play a significant role



Crystals form from magma cooling and settle to floor of chamber

Crystals from early cooling accumulate

Magma Differentiation

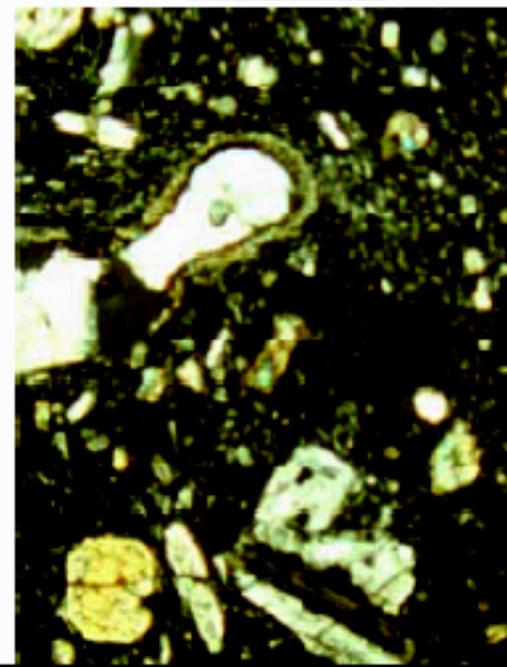
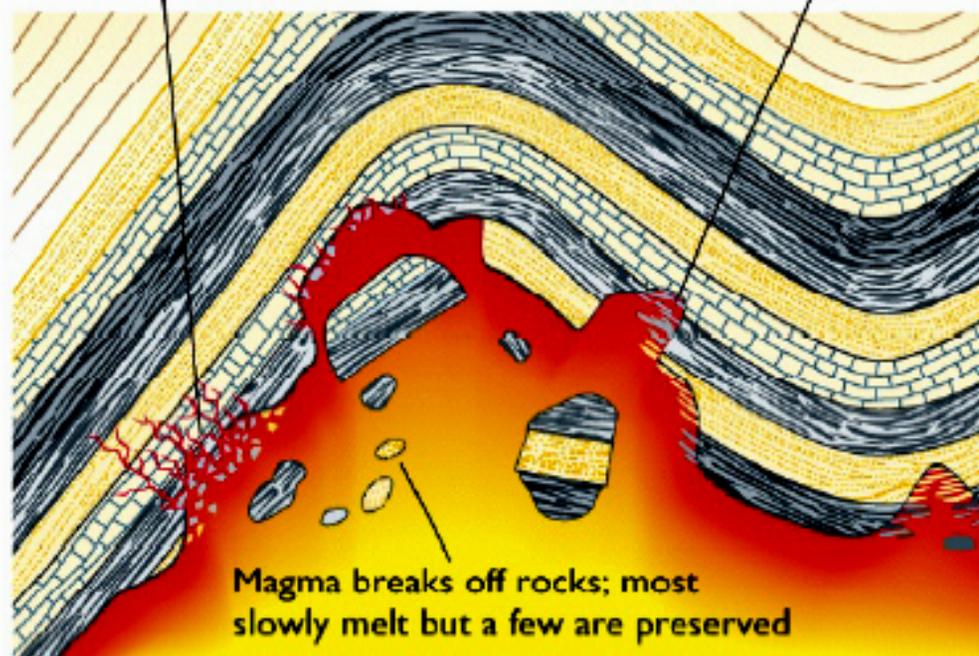
how do we get from here to there?

- **Assimilation +/- Fractional Crystallization**
 - Reaction/dissolution of wallrock
 - Crystallization provides heat for reaction

Magma invades cracks

Magma melts walls
of country rock

1 mm



Magma Differentiation

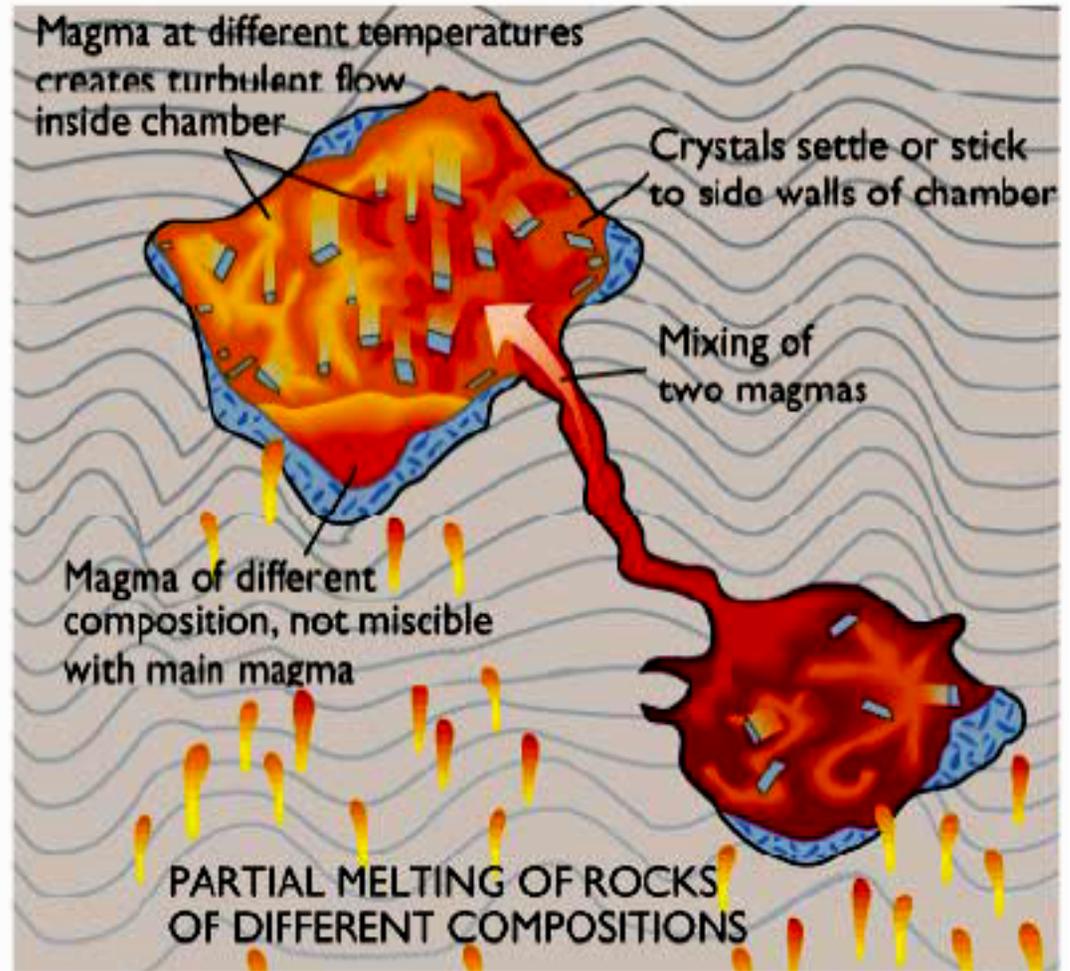
how do we get from here to there?

- **Magma Mixing**

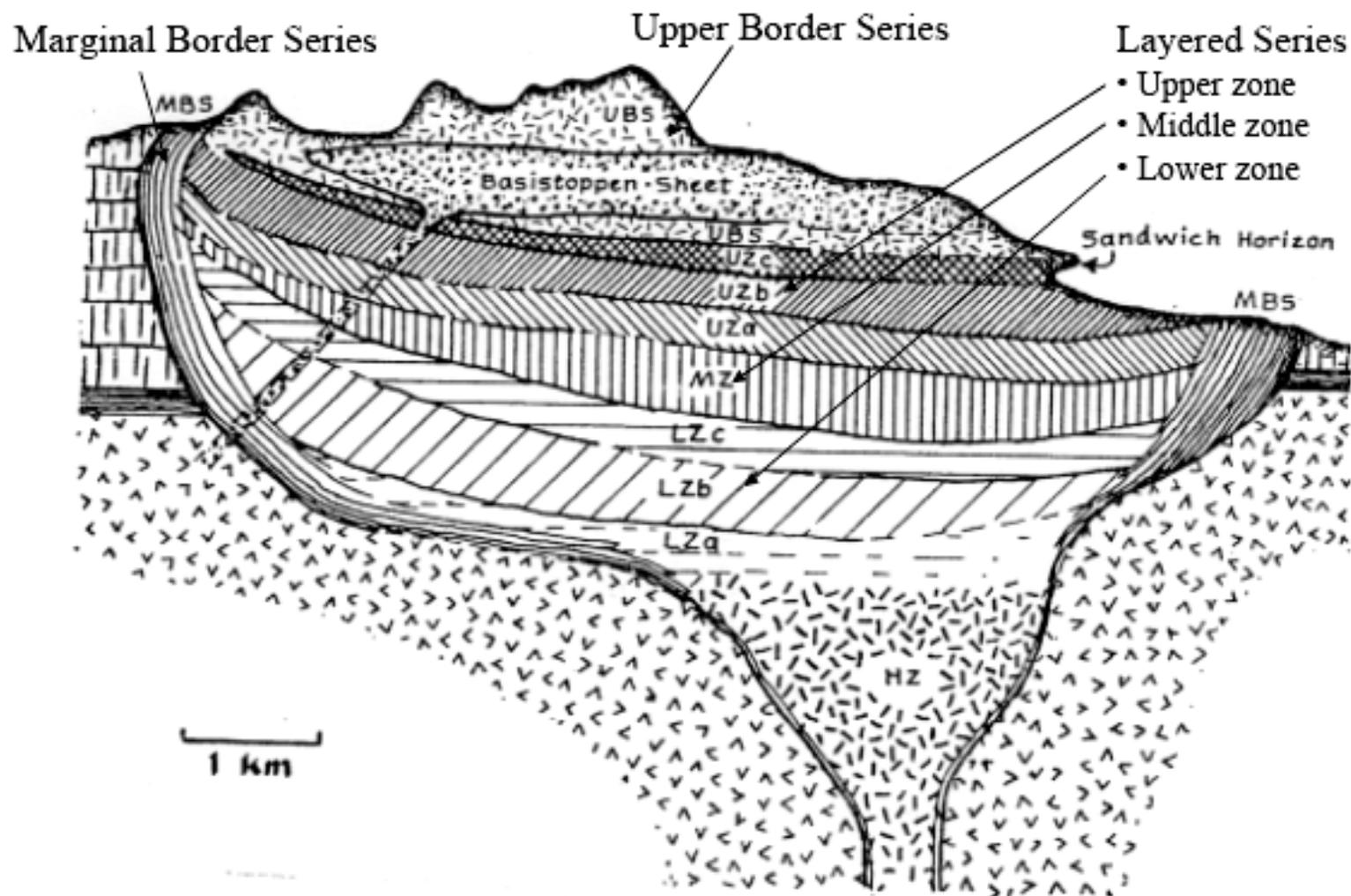
- What to look for?

- Reversely zoned minerals

- Reaction rims on minerals



Schematic E-W section of Skaergaard Intrusion



Como se formam as rochas ígneas a partir dos magmas?

Quando o magma ascende para níveis menos profundos e começa a **PERDER CALOR**, os minerais começam a **CRISTALIZAR**. Como a cristalização é o processo inverso da fusão, conhecer os mecanismos através dos quais as rochas fundem é muito importante para compreender o seu modo de formação a partir de um magma.

No geral, para a mesma composição de magma/rocha, os minerais que são mais **REFRACTÁRIOS** (fundem a maiores temperaturas) são os primeiros a cristalizar a partir dos magmas. Alguns minerais, precocemente formados, permanecem em contacto com o magma em arrefecimento, reagindo com ele e modificando a sua composição. Pelo contrário, outros minerais ao serem formados tem tendência para se separarem do magma, não reagindo com este, provocando assim uma modificação gradual da composição magmática (o magma fica mais pobre nos componentes consumidos pelos minerais em cristalização – ex. torna-se mais rico em sílica).

Ver séries de Reacção de Bowen !

Alta Temperatura

Olivinas

plagioclase cálcica (anortite)

↓
Piroxenas

↓
Anfibolas

↓
plagioclase calco-sódica

↓
Biotites

↓
plagioclase sódica (albite)

↓
Ortose

↓
Moscovite

↓
Quartzo

Série
descontínua

Série
contínua

SÉRIES DE BOWEN

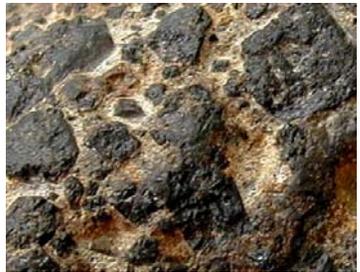
Baixa Temperatura

Séries de Reacção de Bowen

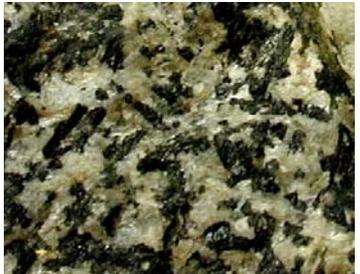
Cristalização Fraccionada



Olivinas



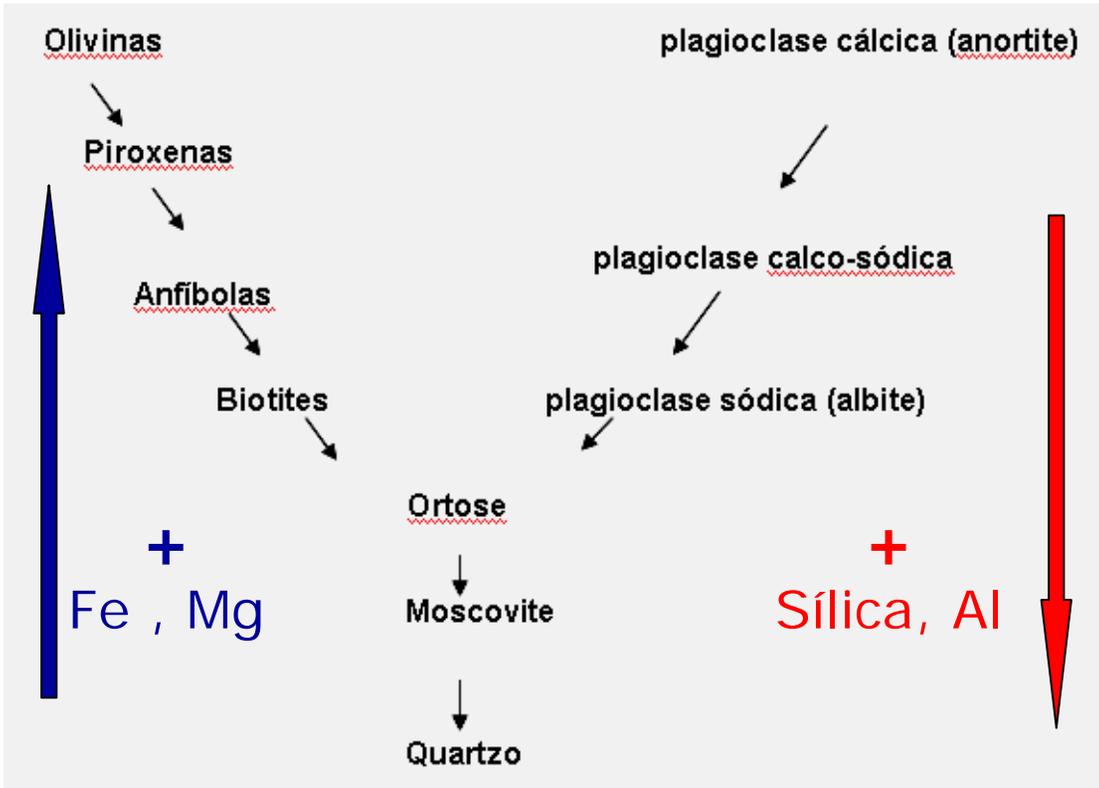
Piroxenas



Anfíbolas



Biotite



Plagioclases + Ca



Plagioclases + Na



Moscovite



Quartzo 100% sílica



Feldspato alcalino (K)

Sublimação

O desenvolvimento de calor que acompanha a actividade vulcânica causa a volatilização de algumas substâncias que se libertam conjuntamente com gases, sob a forma de vapores. Estes dão facilmente origem à deposição de **sublimados** por contacto com as paredes frias das crateras e das fendas por onde se libertem os gases e os vapores que originam as fumarolas.

Por este processo se origina a deposição do ácido bórico, posteriormente transformado em **bórax**, na dependência de certas fumarolas e, sobretudo, os jazigos vulcânicos de enxofre, enxofre das solfataras.

Destilação

Supõe-se que seja um processo de destilação lenta de matérias orgânicas que está na origem do processo que conduz à formação dos jazigos de **petróleo** e de **gás natural**.

Evaporação e Sobressaturação

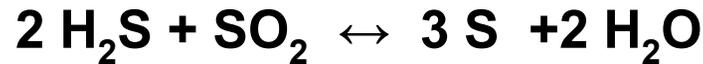
Processo responsável pela precipitação de minerais a partir da evaporação de **salmouras** (“brines”) - sobressaturação das substâncias dissolvidas que, pelo facto de constituírem soluções iónicas estáveis mesmo para valores elevados de pH (substâncias com potencial iónico inferior a 3), só precipitam por evaporação intensa do dissolvente, daí a designação que geralmente lhes é atribuída de **evaporitos**.

Exemplos característicos: depósitos salíferos de **sais de Na, K e Mg**; jazigos de **nitratos** e de **boratos** e **cobre** dos desertos de Atacama, Tarapoca e Antofagasta, no norte do Chile, cuja origem é atribuída à evaporação de águas subterrâneas transportando, em solução, aquelas substâncias.

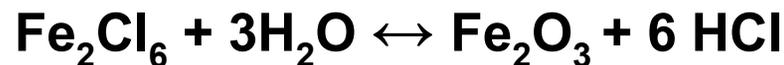
Reacções de gases sobre outros gases, líquidos ou sólidos

A actividade vulcânica é acompanhada de libertação de importantes quantidades de gases e vapores que depositam compostos sulfúreos dos metais básicos (Cu, Pb, Zn) e de molibdénio, magnetite, quantidades importantes de cloretos e fluoretos, boratos, enxofre, etc.

Reacção do ácido sulfídrico com o anidro sulfuroso, originando a deposição de enxofre nativo



Reacção do cloreto férrico com o vapor de água, dando origem à hematite



Reacções de gases sobre outros gases, líquidos ou sólidos

Como exemplo de **reacções de gases sobre líquidos** pode citar-se o caso frequente da precipitação de sulfureto de cobre, a partir das águas de mina sulfatadas, pelo ácido sulfídrico



As **reacções de gases sobre substâncias sólidas**, são muito importantes, sobretudo no caso de estas serem quimicamente activas, como é o caso das rochas carbonatadas.

Este processo origina silicatos cálcicos, sulfuretos e óxidos de diferentes metais em resultado da acção da emanações magmáticas sobre os minerais das rochas percoladas - **substituição metassomática**.

Reacções de líquidos sobre outros líquidos ou sólidos

As reacções de líquidos sobre líquidos ou sólidos estão na base da formação de numerosos e importantes jazigos minerais.

Quer as **soluções hipogénicas**, de origem magmática ou outra, quer as **soluções supergénicas**, produzidas pelas águas superficiais, transportam quantidades importantes de substâncias minerais que se podem depositar em resultado da mistura de soluções de natureza diferente.

Reacções de líquidos sobre outros líquidos ou sólidos

Esta deposição é regida, normalmente pela **Lei de Nernst**, segundo a qual a solubilidade de um sal diminui em presença de um outro sal com um ião comum, mas pode também resultar simplesmente da diluição de uma solução concentrada pelas águas superficiais. Neste último caso são precipitados os metais transportados sob a forma complexa.

A mistura de soluções diferentes pode também originar a precipitação de substâncias por **redução** e por **oxidação**.

Reacções entre soluções e os minerais por elas depositados ou os minerais das rochas através das quais percolam as soluções - **reacções metassomáticas**.

Precipitação por Bactérias

O papel desempenhado pelos microorganismos e outros seres orgânicos na fixação de metais, assume vários aspectos (Routhier, 1963)

- Acção indirecta influenciando o pH do meio (sílica, Fe, Mn)
- Assimilação de metais e restituição depois de mortos (U)
- Fornecimento do enxofre indispensável para a formação dos sulfuretos metálicos, quer por redução bacterica dos sulfatos, quer por cisão bacterica da matéria orgânica com libertação de azoto, fósforo, enxofre, etc.

Deposição Coloidal

A concentração de substâncias a partir de soluções coloidais é frequente e importante pois numerosos minerais e metais, que são fracamente solúveis na água, dão facilmente soluções coloidais. Exemplos: sílica, alumina, ferro, manganês, níquel.

Sistemas coloidais ou dispersos, com particular importância sob o ponto de vista da formação de jazigos minerais - o sistema sólido-líquido - em que o sólido constitui a fase dispersa e a água a fase dispersante.

Deposição Coloidal

Sistema sólido-líquido

- **Sol (suspensóide)** - a fase dispersante domina largamente sobre a fase dispersa
- **Gel** - a fase dispersa domina largamente sobre a fase dispersante
- **Pasta ou massa** - predominância da fase dispersa de modo que representa, praticamente, a massa do sistema (ex. argilas plásticas).

Deposição Coloidal

Soles hidrófilos quando existe uma forte interação entre as partículas da fase dispersa e as moléculas de água. Exemplo: **sílica**

Soles hidrófobos quando não existe aquela interação. Exemplo : **hidróxido de alumínio**

Estes últimos são menos estáveis e, portanto, mais facilmente precipitados; por outro lado, os primeiros, quando precipitados por qualquer mudança física são, em geral, reversíveis enquanto os últimos não.

Deposição Coloidal

A carga eléctrica das partículas coloidais influencia profundamente a estabilidade dos sistemas coloidais. Assim, para que se mantenham exigem uma certa concentração de electrólitos. Se esta concentração é demasiada os colóides floculam.

Exemplo: acção floculante da água do mar para a maioria dos colóides.

Deposição dos colóides (Rankama & Sahama, 1950)

- **precipitação de colóides dissolvidos**
- **floculação de colóides por acção de electrólitos**
- **floculação de colóides por interacção de soles com cargas eléctricas opostas**
- **adsorção iónica e troca de bases**

Metamorfismo

Os processos metamórficos têm de ser considerados geradores de concentrações minerais porquanto os respectivos agentes (fundamentalmente, pressão, temperatura e água) actuam sobre os minerais, provocando recombinações de outros minerais estáveis sob as novas condições físicas.

Exemplos

Jazigos de **granadas**, **grafite**, **silimanite**, alguns dos **asbestos**, etc.

Precipitação em espaços abertos

O enchimento de cavidades por precipitação consiste na deposição de minerais, nas cavidades das rochas, a partir de soluções aquosas; estas são em geral hidrotermais mas também podem ser frias e de origem meteórica. Qualquer tipo de cavidades nas rochas pode tornar-se sede de uma deposição de minérios.

Classificação de Bateman (1942) para as cavidades:

- **Cavidades originais** (contemporâneas das rochas)
- **Cavidades subsequentes ou induzidas**

Precipitação em espaços abertos

Classificação de Bateman (1942) para as cavidades:

- **Cavidades originais** (contemporâneas das rochas)
 - ❑ Poros
 - ❑ Vacúolos
 - ❑ Cavidades em rochas conglomeráticas
 - ❑ Fendas de arrefecimento ou fendas de contracção

Precipitação em espaços abertos

Classificação de Bateman (1942) para as cavidades:

- **Cavidades subsequentes ou induzidas**

1. Fracturas com ou sem movimento
2. Cavidades provenientes de laminagem (“shearing cavities”)
3. Cavidades devidas a enrugamento e ondulações
 - a. cavidades em sela (“saddle reefs”)
 - b. cavidades nas zonas axiais das dobras (“pitches” e “flats”)
 - c. fracturação anticlinal e sinclinal
4. Cavidades de dissolução
5. Brechas tectónicas
6. Brechas de colapso
7. Chaminés vulcânicas
8. Aberturas provocadas pela alteração das rochas

Precipitação em espaços abertos

Classificação morfológica de jazigos minerais Bateman (1959)

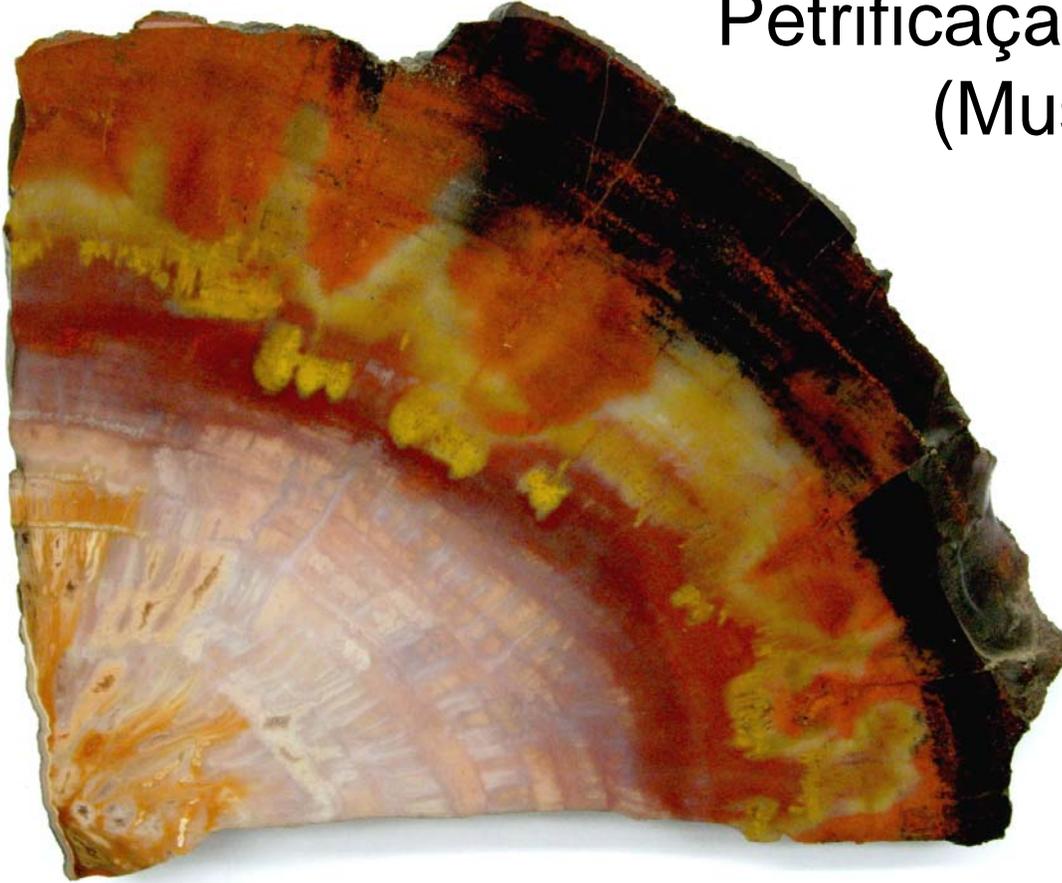
- Filões
- Jazigos em Zonas de Corte (“Shear Zone Deposits”)
- “Stockworks”
- “Saddle Reefs”
- “Ladder Veins”
- “Pitches” e “Flats”; Fraturas de Dobramento
- Enchimentos de Brechas: Vulcânicas, de Colapso, Tectônicas
- Enchimentos de Cavidades de Dissolução: Cavernas, Canais, Fendas
- Enchimento de Poros
- Enchimentos Vesiculares

Substituição metassomática

A evolução de um magma e dos produtos dele derivados, bem como das soluções supergênicas não se faz em sistema fechado; todos aqueles produtos, gasosos ou líquidos, reagem, em maior ou menor escala, com o material das cavidades ou fendas que os encerram ou por onde circulam, originando-se trocas entre aqueles e o material das rochas encaixantes que sofrem modificações mineralógicas e químicas.

Esta troca de substâncias dá-se, pois, por substituição e o processo denomina-se **substituição metassomática** ou, simplesmente, **metassomatose**.

Petrificação da madeira por sílica (Museu Alfredo Bensaúde)



Pseudomorfoses
comuns

- Calcite em quartzo
- Pirite em limonite e hematite
- Galena em quartzo

Substituição metassomática

A metassomatose pode originar grandes massas de minérios por substituição de outras de igual volume de rochas - fenómenos bastante complexos.

A metassomatose opera-se em **sistema aberto** - as soluções que transportam as substâncias substituidoras depositam estas e, concomitantemente, dissolvem as substâncias substituídas e transportam-nas para outras zonas.

Os fluidos deslocam-se ao longo de fendas muito estreitas, donde resulta que a superfície de contacto (de reacção) seja muito grande em relação ao volume de fluido reagente - modificação quase instantânea deste e a deposição dos minerais substituidores nos mesmos locais ocupados pelos minerais dissolvidos.

Alguns diagramas de fases

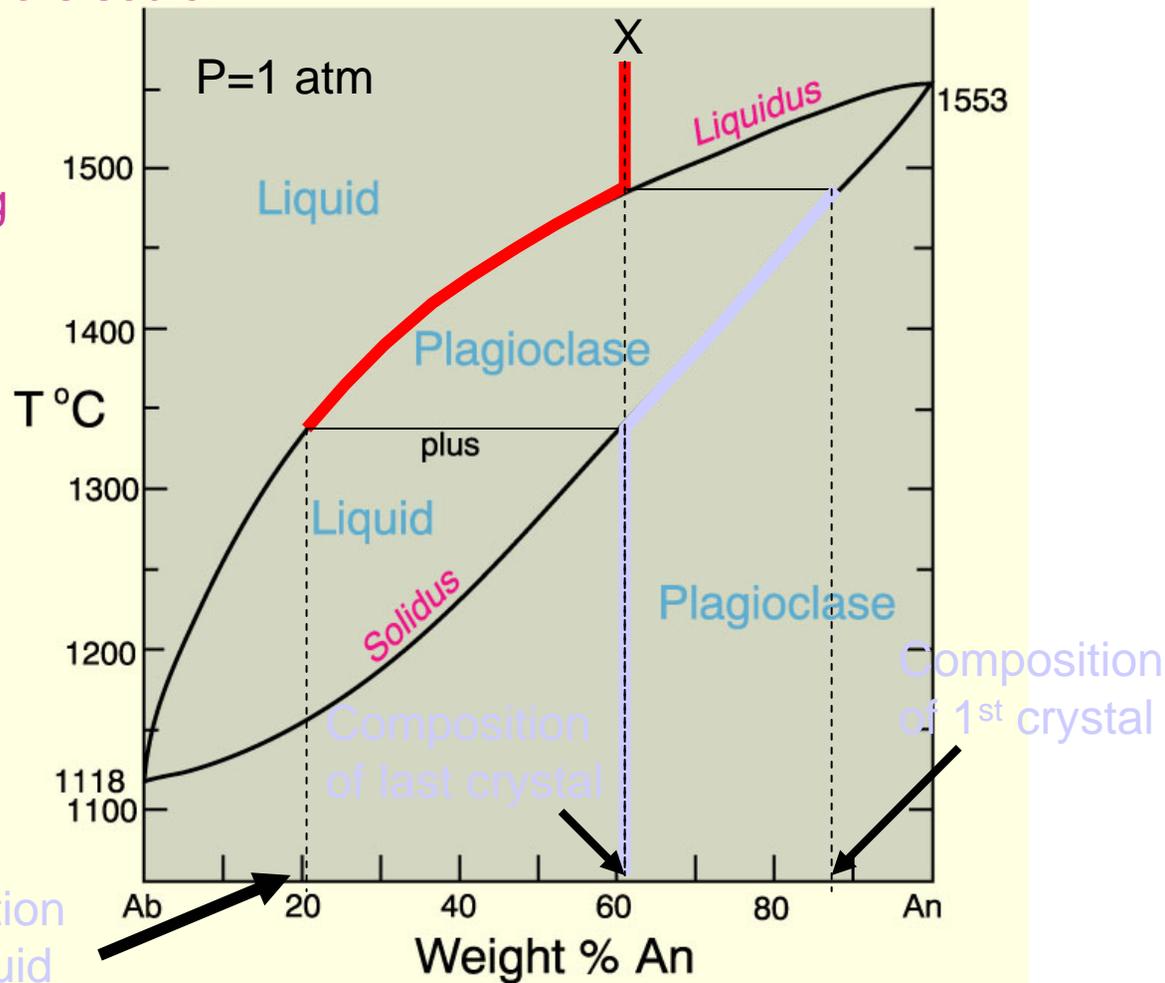
Petrologia Experimental

Equilibrium Crystallization of the Plagioclase Feldspars

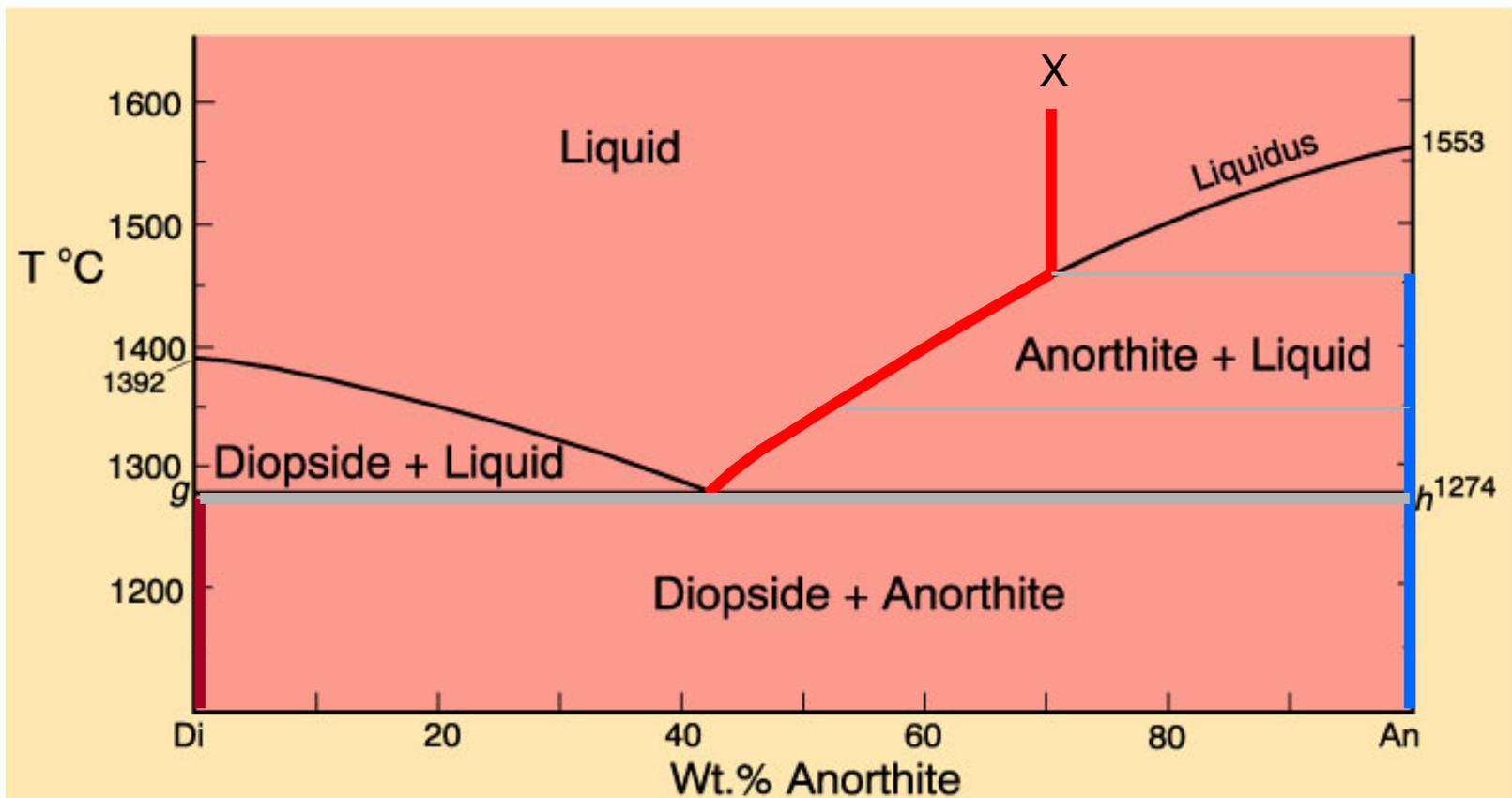
1. Liquid of composition X (An₆₁) cools to the liquidus
2. Crystals of approximately An₈₇ begin to form
3. Crystals have higher Ca/Na than liquid; ppt of crystals causes L composition to become more sodic.

4. Ratio of Ca/Na in both crystals and liquid decrease with decreasing temperature; proportion of crystals increases as liquid decreases

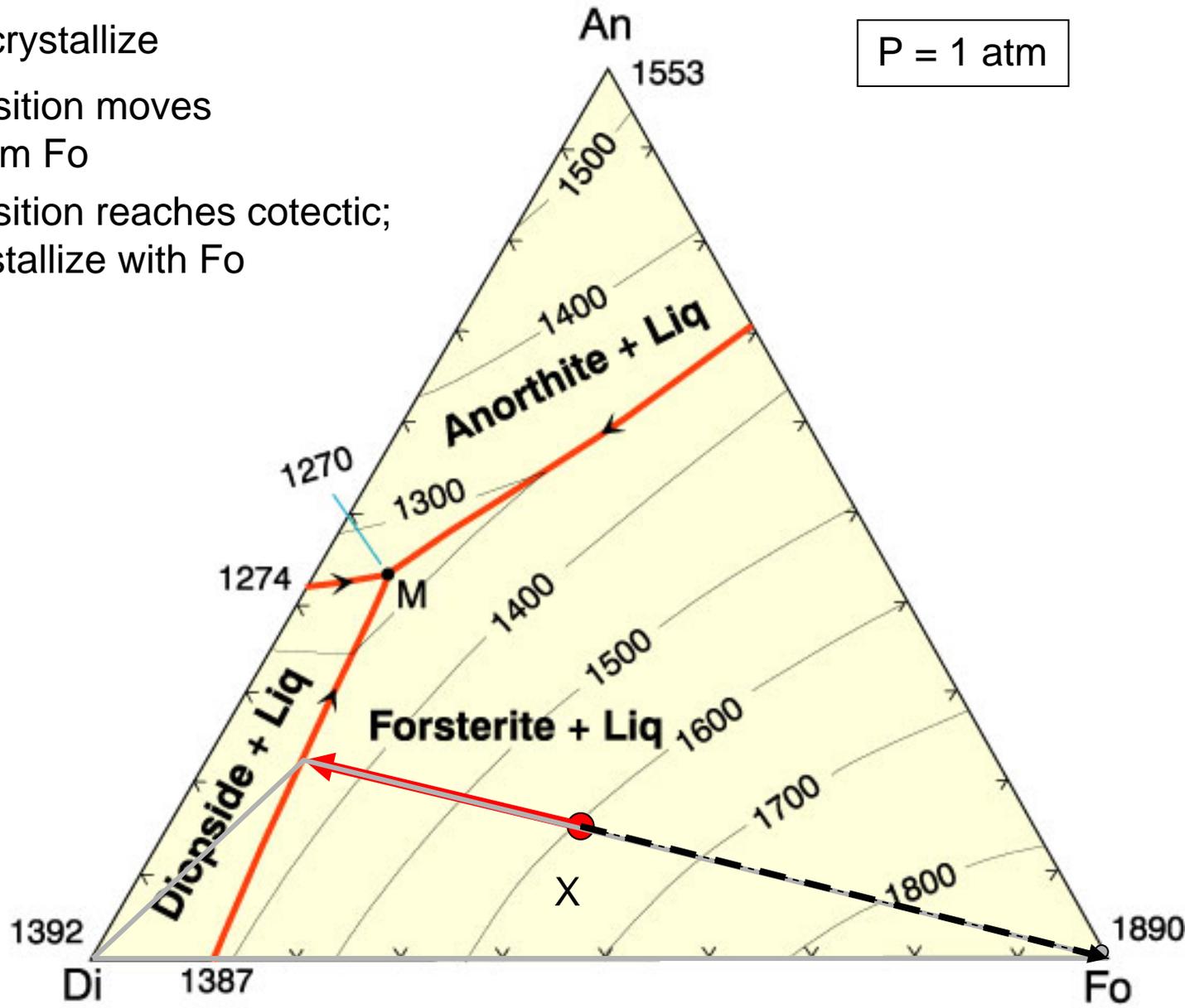
5. Crystals of An₆₁ cool without further change in composition



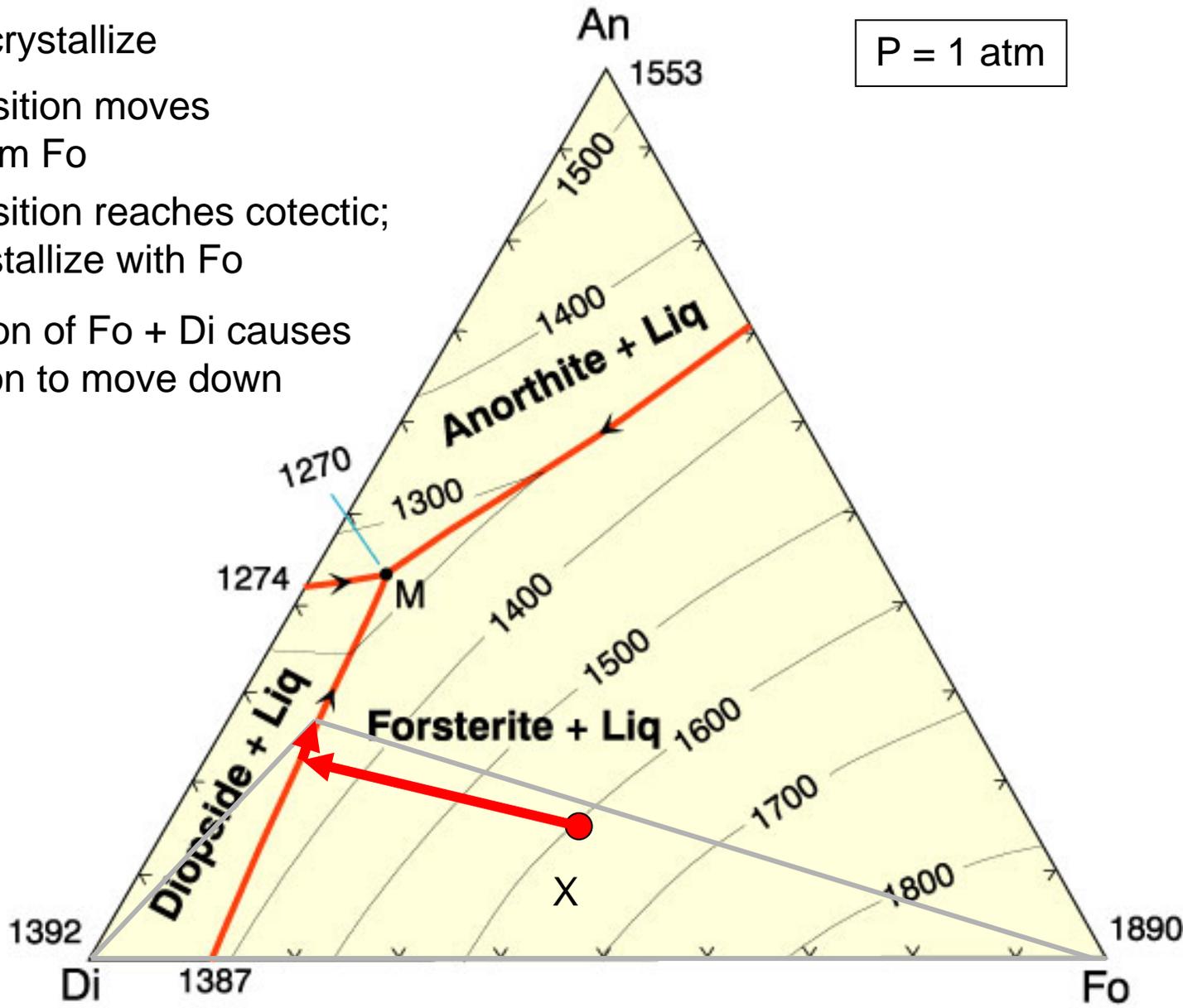
1. A bulk composition of X cools to the liquidus, at which point An crystallizes.
2. Continued crystallization of An causes liquid composition to move toward Di.
3. When $T=1274^{\circ}\text{C}$, liquid has moved to eutectic; Di begins to crystallize. No change in temperature or composition of any of the 3 phases is permitted until the liquid has completely crystallized.
4. At temperatures below 1274°C , only crystals of An and Di are present.



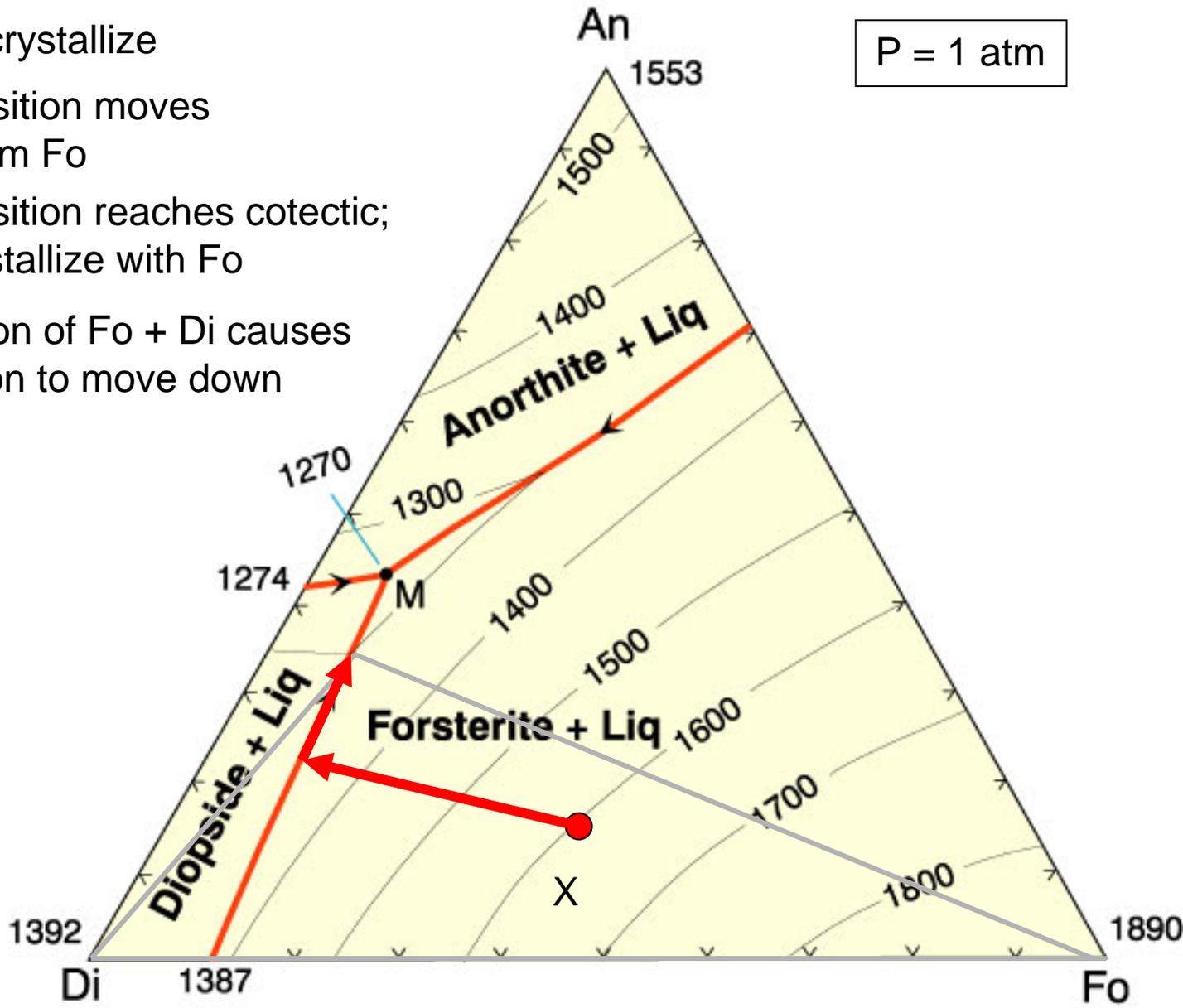
1. For bulk composition X, liquid cools to liquidus at 1600°C
2. Fo begins to crystallize
3. Liquid composition moves directly away from Fo
4. Liquid composition reaches cotectic; Di begins to crystallize with Fo



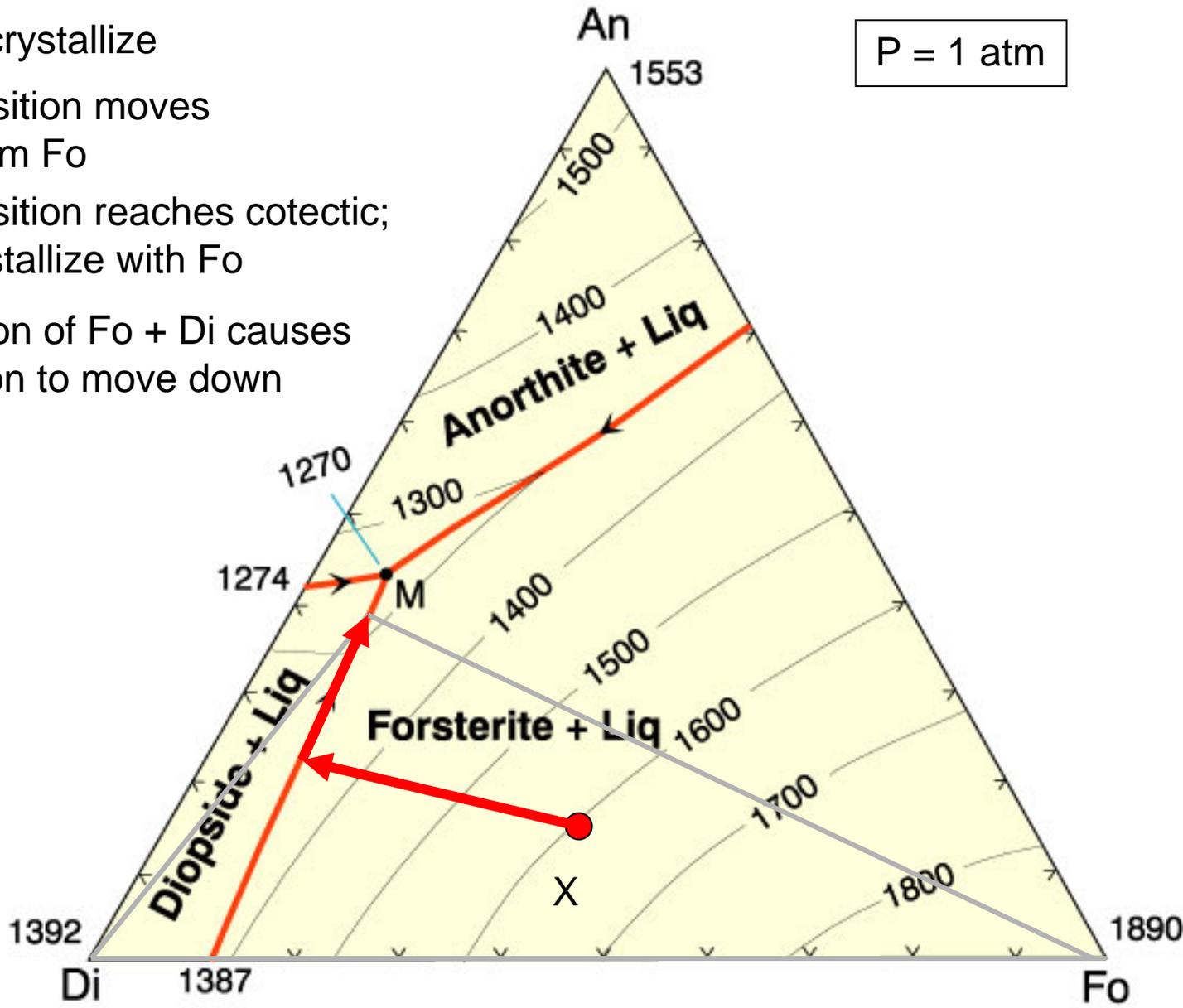
1. For bulk composition X, liquid cools to liquidus at 1600°C
2. Fo begins to crystallize
3. Liquid composition moves directly away from Fo
4. Liquid composition reaches cotectic; Di begins to crystallize with Fo
5. Co-precipitation of Fo + Di causes liquid composition to move down cotectic curve



1. For bulk composition X, liquid cools to liquidus at 1600°C
2. Fo begins to crystallize
3. Liquid composition moves directly away from Fo
4. Liquid composition reaches cotectic; Di begins to crystallize with Fo
5. Co-precipitation of Fo + Di causes liquid composition to move down cotectic curve



1. For bulk composition X, liquid cools to liquidus at 1600°C
2. Fo begins to crystallize
3. Liquid composition moves directly away from Fo
4. Liquid composition reaches cotectic; Di begins to crystallize with Fo
5. Co-precipitation of Fo + Di causes liquid composition to move down cotectic curve



1. For bulk composition X, liquid cools to liquidus at 1600°C
2. Fo begins to crystallize
3. Liquid composition moves directly away from Fo
4. Liquid composition reaches cotectic; Di begins to crystallize with Fo
5. Co-precipitation of Fo + Di causes liquid composition to move down cotectic curve
6. Liquid composition reaches ternary eutectic at 1270°C; An begins to crystallize with Di + Fo
7. Liquid is consumed; An + Di + Fo cool below 1270°C

