

Sistemas Hidrotermais e Metalogênese

GSA 0407

Caetano Juliãni
(cajulian@gusp.br)
Lana Virginia Soares Monteiro
(lanavsmonteiro@gusp.br)

Departamento de Geologia Sedimentar e Ambiental
2019

Regimes Tectônicos, Fluxo de Fluidos Hidrotermais e Depósitos Minerais na Crosta Terrestre

Extensão Subducção Expansão Colisão

- ☆ Au epitermal
- ☉ Cu-Mo-Au pórfiro, skarns, Sn greisens
- ★ Au mesotermal ou orogênico
- Cu-Pb-Zn vulcanogênico
- △ Cu-Pb-Zn em rochas sedimentares

Minerais Hidrotermais e os Flúídos

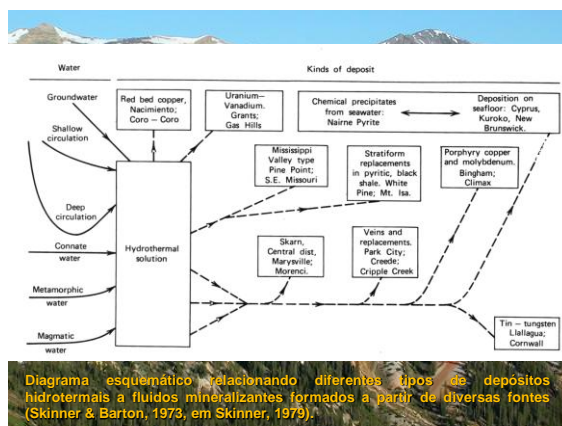
Minerais	Voláteis na estrutura (% peso)		
Clorita	10% H ₂ O		
Actinolita	2% H ₂ O		
Hornblenda			
Epidoto	1% H ₂ O		
Calcita		45% CO ₂	
Dolomita		40% CO ₂	
Pirita			50% S
Pirrotita			30% S

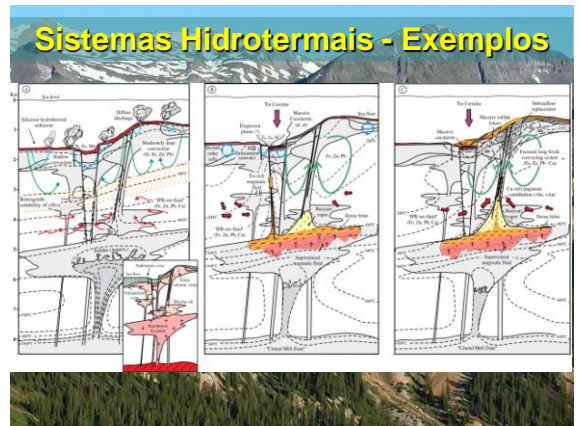
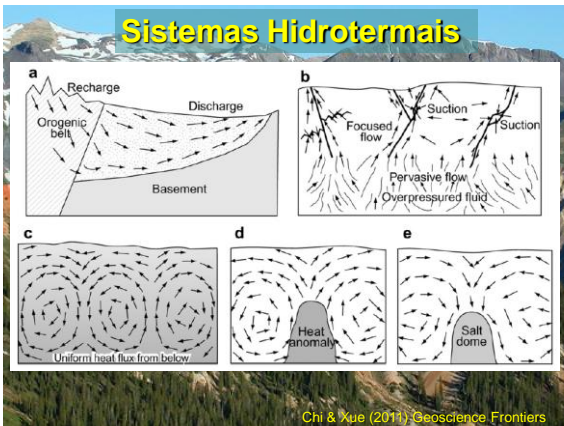
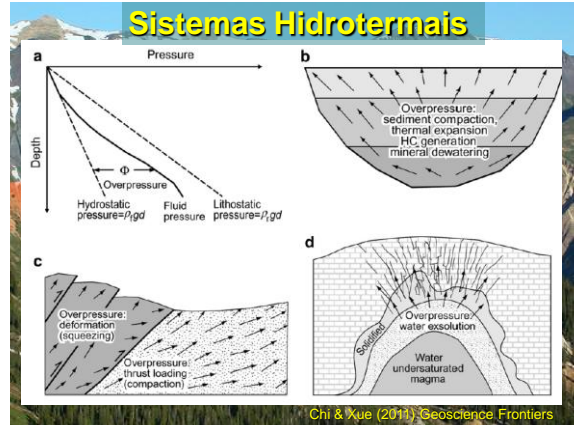
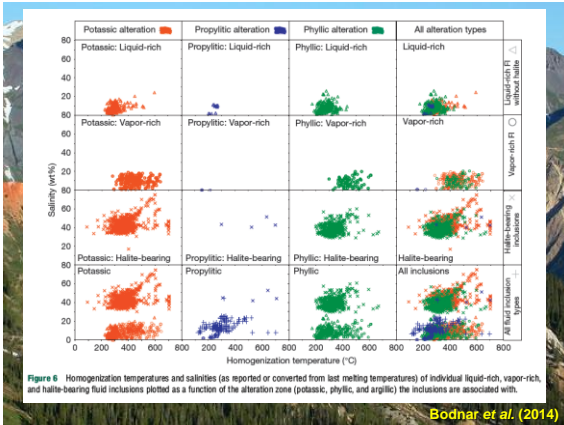
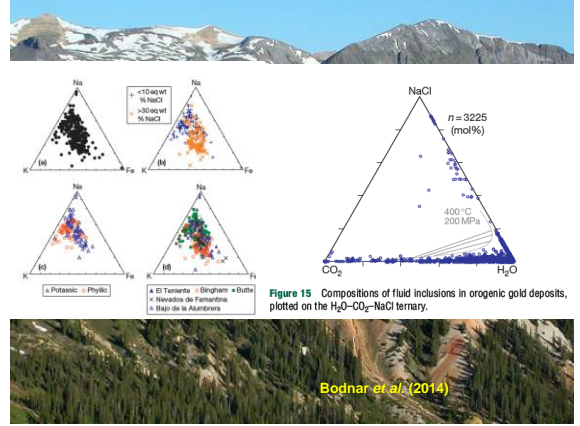
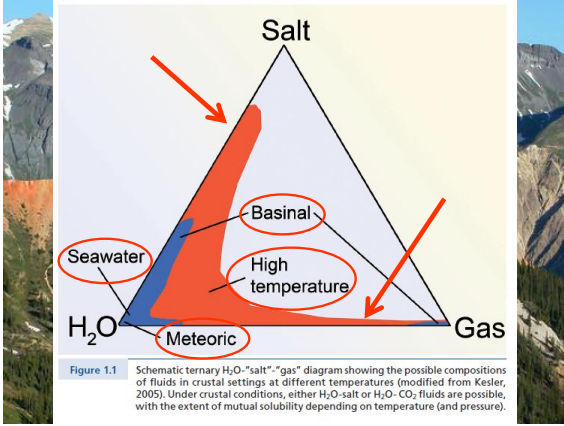
→ **inclusões fluidas**

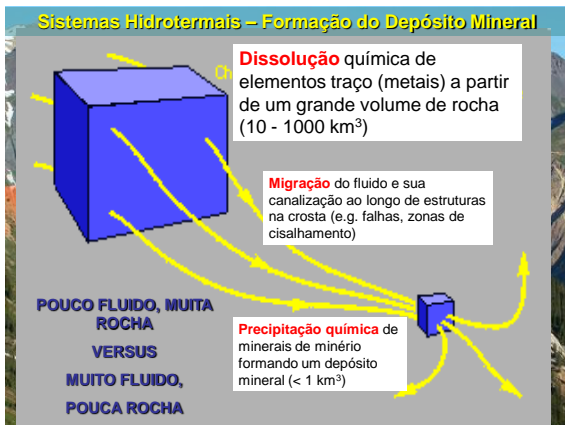
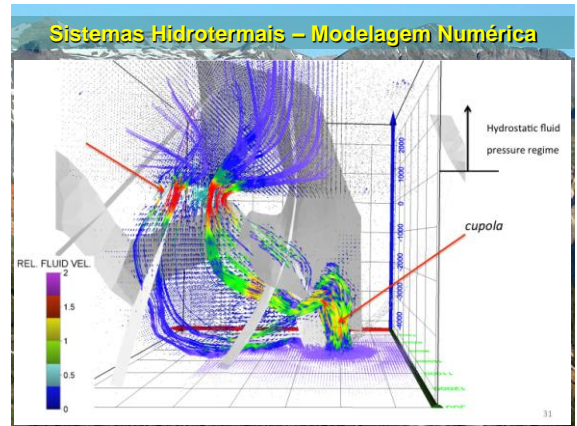
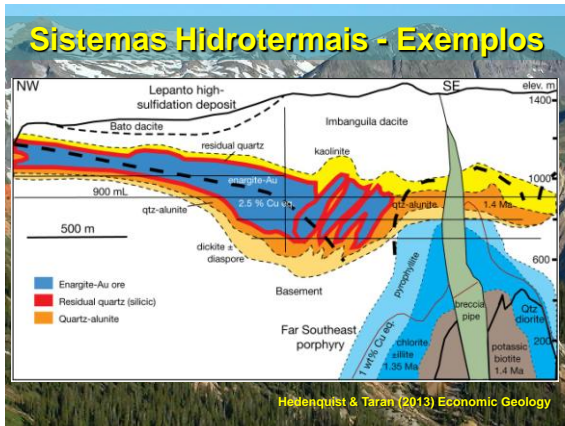
→ **sistemas geotermais ativos em crosta oceânica e continental**

Os fluidos hidrotermais podem ser formados a partir de águas

- Marinhas
- Meteóricas
- Conatas (Formacionais ou basinais)
- Metamórficas
- Magmáticas (Juvenis)



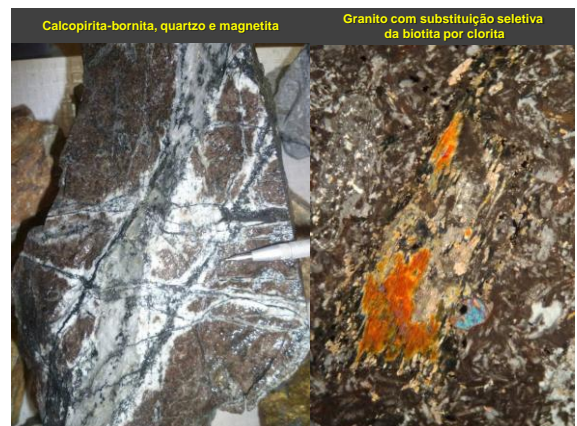
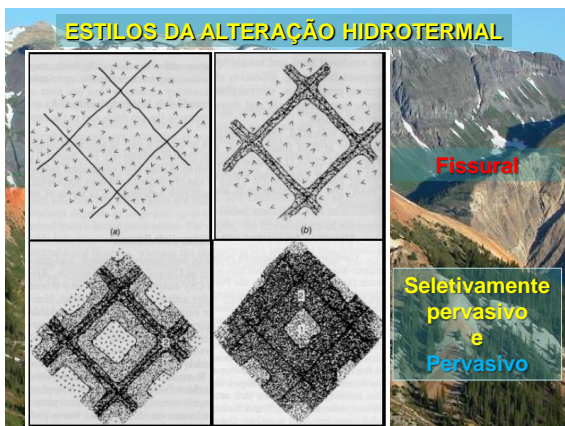


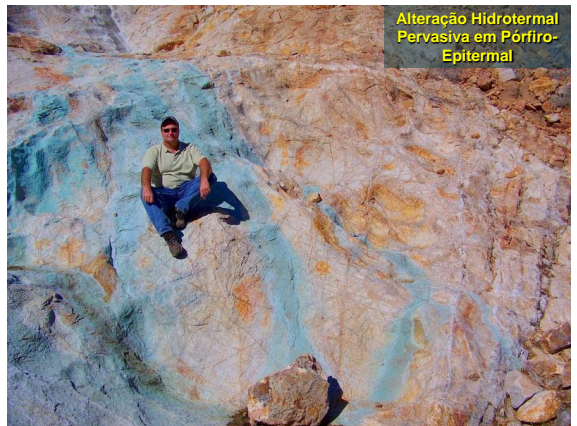
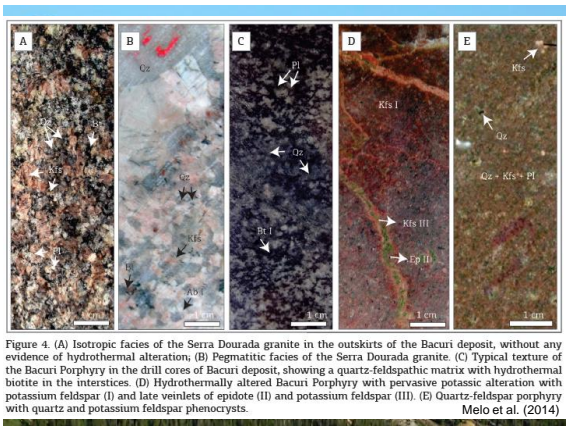
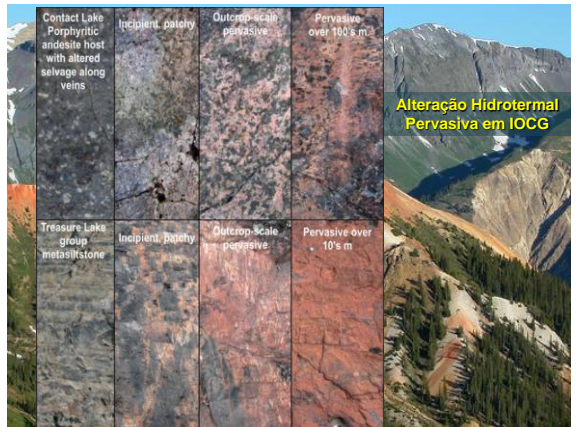
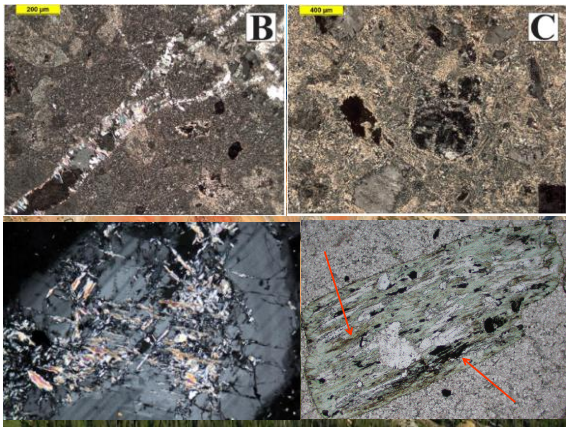
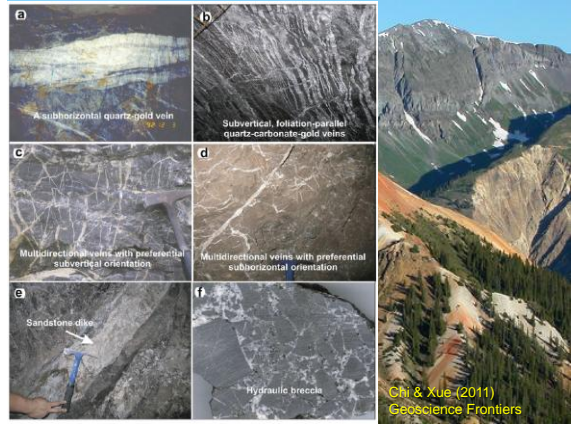
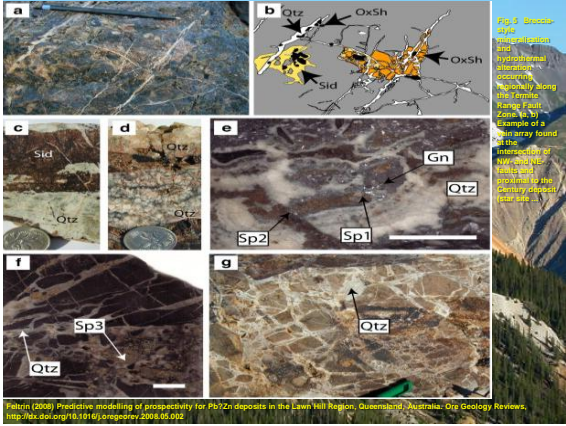


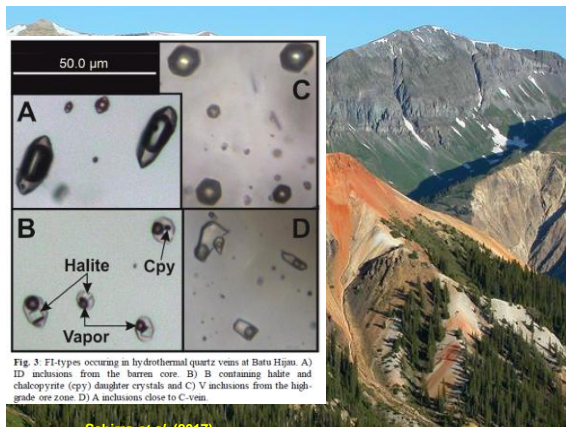
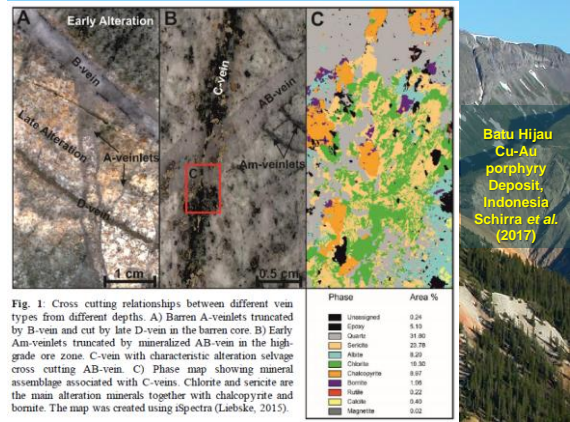
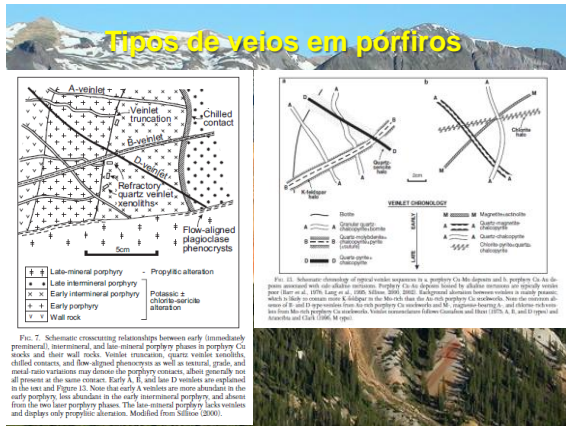
ESTILOS DE ALTERAÇÃO HIDROTHERMAL

Não existe consenso na definição dos estilos de alteração hidrotermal na literatura, reflexo dos diferentes critérios aplicados na descrição e classificação dos depósitos minerais, mas os estilos mais comuns são:

- **Fissural**: substituições ao longo de fraturas, com formação de vênulas e veios e alteração ao redor.
- **Pervasivo**: substituição total ou da maior parte dos minerais originais da rocha, resultando na obliteração parcial ou total das texturas originais.
- **Pervasivo seletivo**: caracterizado pela substituição de determinados minerais da rocha, como, por exemplo, a substituição de determinados megacristsais, resultando em texturas pseudomórficas.







INTENSIDADE E EVOLUÇÃO DA ALTERAÇÃO HIDROTHERMAL

TABLE 3. Types of Potassic Alteration

Intensity	Porphyry groundmass	Plagioclase ^a	K-feldspar	Biotite ^b
Intense	No longer visible; >75% is replaced by 0.1-1.0 mm K-feldspar-quartz; rock may have a porous, vuggy texture	>75% are replaced by 0.1-1.0 mm K-feldspar-quartz	>75% are replaced by 0.1-1.0 mm K-feldspar-quartz; others altered to hydrothermal K-feldspar, commonly pink in color	Biotite greatly reduced in size and abundance; remaining biotite consists of pale brown, thin flakes
Moderate	>25% replaced by 0.1-1.0 mm K-feldspar-quartz along A-quartz vein halos	>25% of plagioclase phenocrysts altered to K-feldspar	Altered to hydrothermal K-feldspar, usually pink in color	Medium brown; slightly reduced in size and abundance
Weak	Dark color; clearly visible with hand lens; <10% replaced by 0.1-1.0 mm K-feldspar-quartz along A-quartz vein halos	<10% of plagioclase phenocrysts altered to K-feldspar	Altered to hydrothermal K-feldspar, usually pink in color	Dark brown-black; not reduced in size or abundance

^aPlagioclase that is not replaced by K-feldspar is commonly altered to Na-rich plagioclase (see App. 3) and the majority of plagioclase phenocrysts have been subjected to varying degrees of late argillic alteration.
^bFlakes magnetic black biotite and hydrothermal darkly biotite (after hornblende)

Redmond S. Einaudi (2010) Economic Geology



SISTEMAS HIDROTHERMAIS

1 ÁGUA E SOLUÇÕES

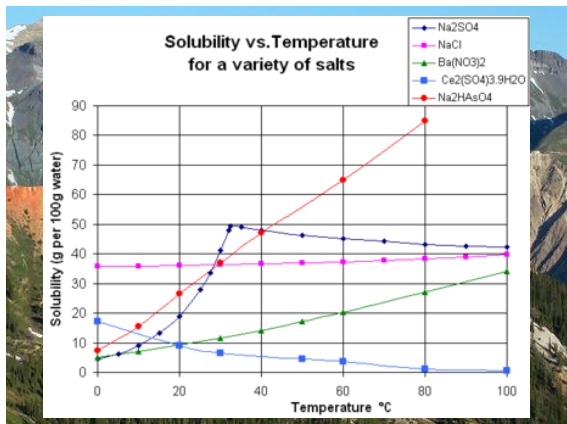
1.1 Soluções

- Moleculares ou coloidais
- Soluto e solvente
- Sólidos (íons ou moléculas), gases e líquidos
- Saturação (insaturada, saturada e supersaturada)

1.2 Solubilidade e Ebulição

Ebulição H₂ e CO₂ provoca aumento da f₀₂ → oxidação do S

→ (HS → H₂S → H₂SO₄) → H₂SO₄ diminui o pH e provoca lixiviação ácida



NO₃⁻ Todos os nitratos são solúveis

Cl⁻ Os cloretos são solúveis, exceto AgCl e Hg₂Cl₂

SO₄²⁻ Os sulfatos são solúveis, exceto CaSO₄, SrSO₄, BaSO₄, PbSO₄ e Ag₂SO₄

CO₃²⁻ Os carbonatos são insolúveis, exceto aqueles formados pelos elementos pertencentes ao Grupo Químico I (Na, K, etc)

OH⁻ Os hidróxidos são insolúveis, exceto aqueles formados pelos elementos do Grupo I, Sr(OH)₂ e Ba(OH)₂

S²⁻ Os sulfetos são insolúveis, exceto aqueles formados pelos elementos dos Grupos I e II.

As regras acima mostram que algumas substâncias são insolúveis, especialmente os sulfetos de metais de base e em experiências de laboratório estes compostos mostram-se extremamente insolúveis.

No entanto, as ocorrências geológicas mostram que muitas vezes estes compostos foram depositados a partir de soluções hidrotermais de temperaturas moderadas. Krauskopf (1972) chama a isto o "dilema" das soluções hidrotermais.

1.3 Nomenclatura de Ácidos e Bases

Considera-se um ácido aquela substância que produz ions de hidrogênio (H⁺) em solução aquosa e, uma base, aquela que produz ions de hidroxila (OH⁻).

$pH = -\log_{10}[H^+] = \log_{10}1/[H^+]$

1.4 Estrutura da Água, Hidrólise e Hidratação

Dissociação das moléculas de H₂O em ions H⁺ e OH⁻

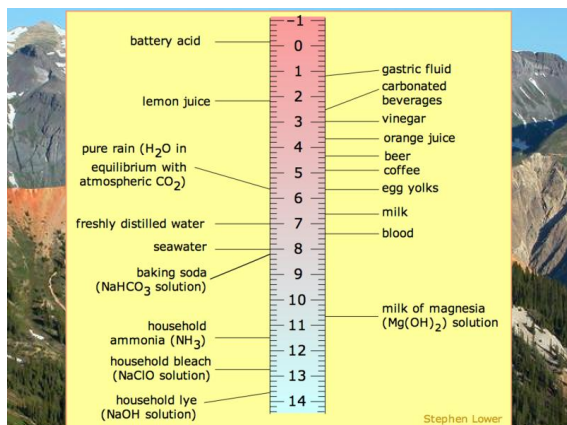
1.5 Potencial de Oxi-Redução (Eh)

O potencial de oxidação deve-se ao ganho ou perda de elétrons do elemento químico

$Zn^0 = Zn^{++} + 2e^-$ (nesse caso o Zn foi oxidado)

$Cu^{++} + 2e^- = Cu^0$ (nesse caso o cobre foi reduzido)

Valores altos de Eh (ou pe) indicam sistemas oxidantes e valores baixos redutores



Hidrólise é uma reação que resulta na quebra de uma ligação química de uma molécula por meio da água. A reação ocorre principalmente entre um ion e moléculas de água e muitas vezes altera o pH da solução.

Existem três tipos principais de hidrólise:

Hidrólise de sal: Em água os sais se dissociam completamente ou parcialmente em ions

$NaCl_{(aq)} \rightarrow Na^+_{(aq)} + Cl^-_{(aq)}$

Como a molécula da água é polar, o ion de sódio é atraído pelo oxigênio e o cloro pelo hidrogênio. Hidrólise ácida

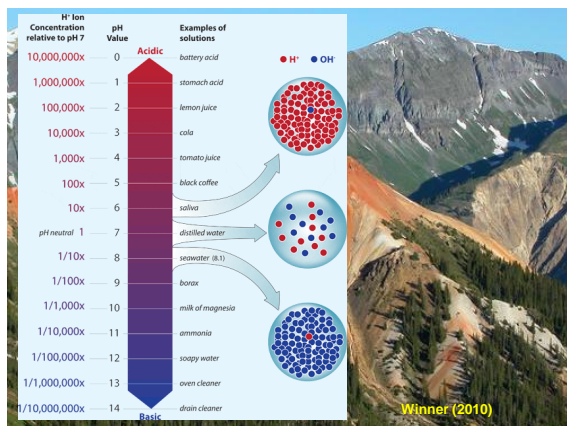
A água pode agir como ácido (doando um H⁺) ou como base (recebendo um H⁺).

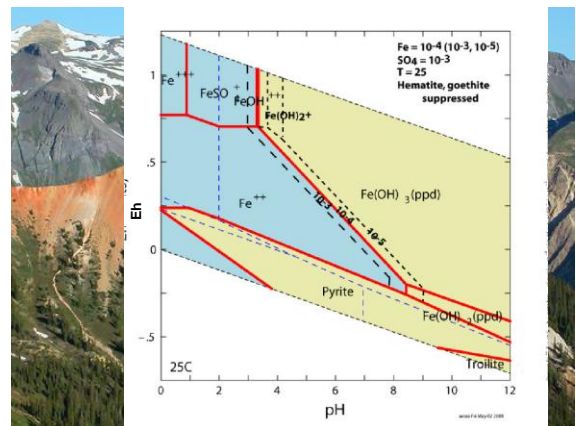
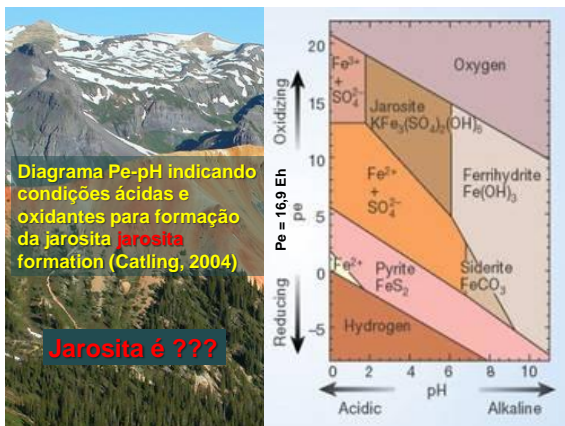
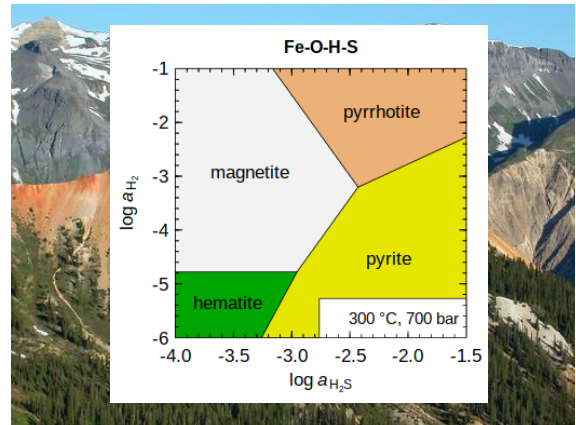
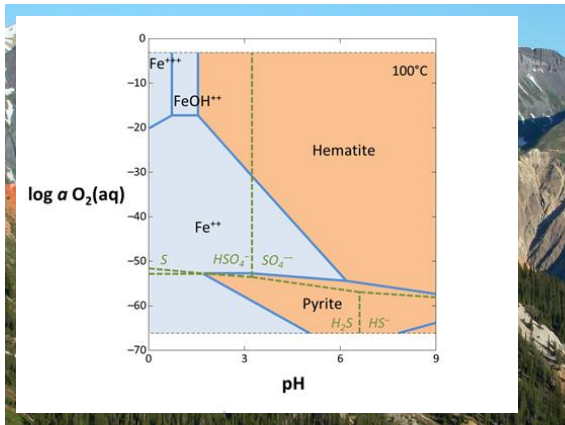
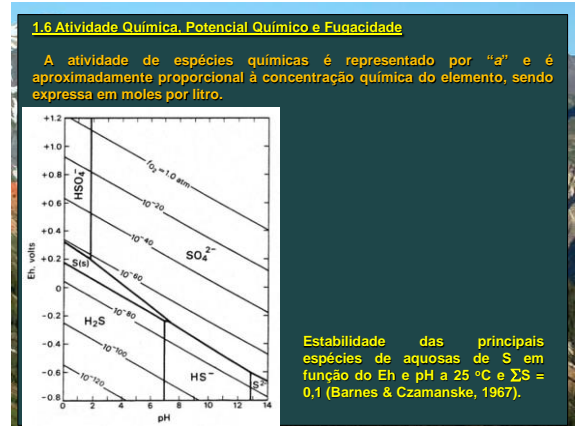
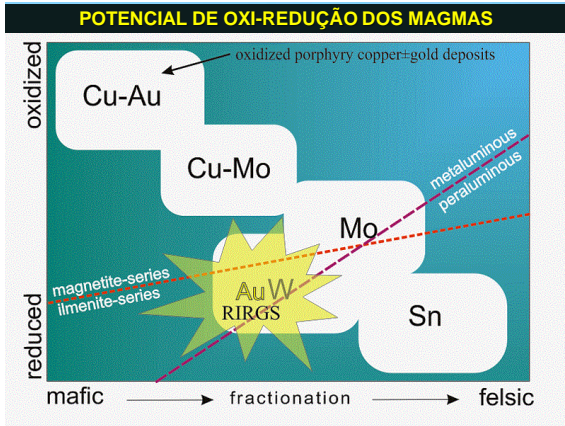
Na hidrólise ácida ocorre uma reação de dissolução ácida:

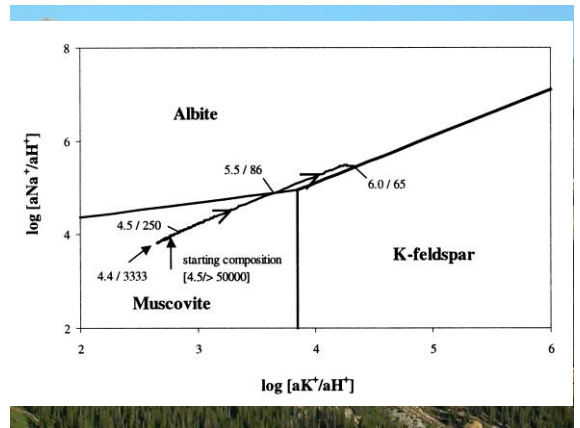
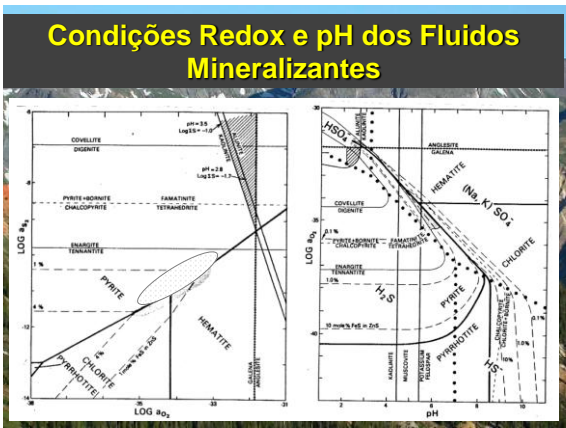
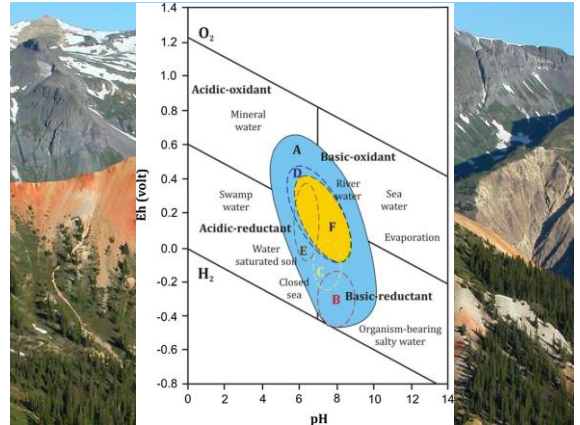
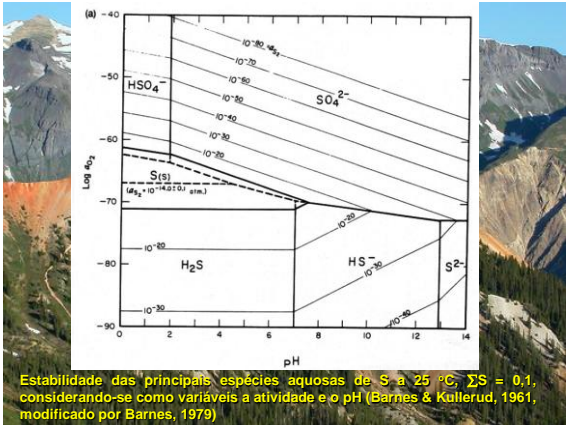
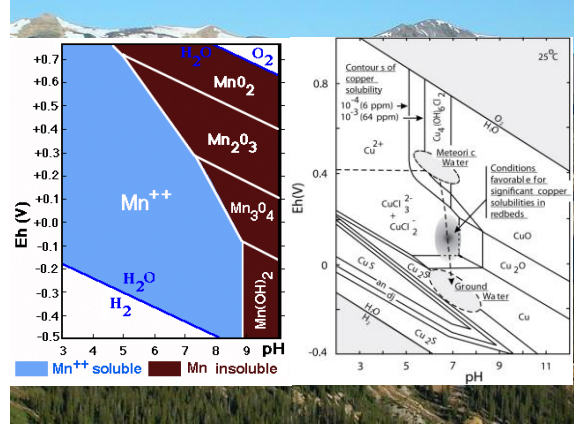
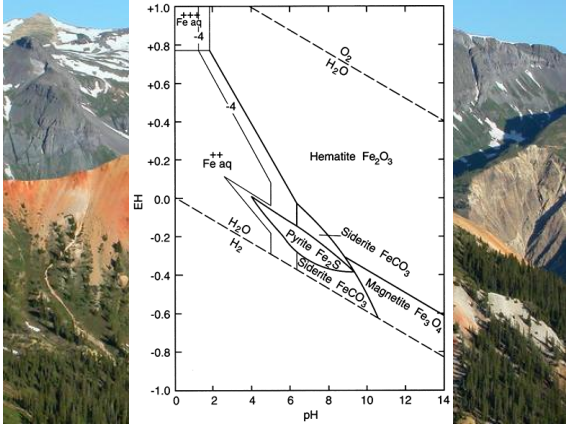
$CH_3COOH + H_2O \rightleftharpoons H_3O^+ + CH_3COO^-$
 Ácido acético + água \rightleftharpoons hidrônio + ion acetato

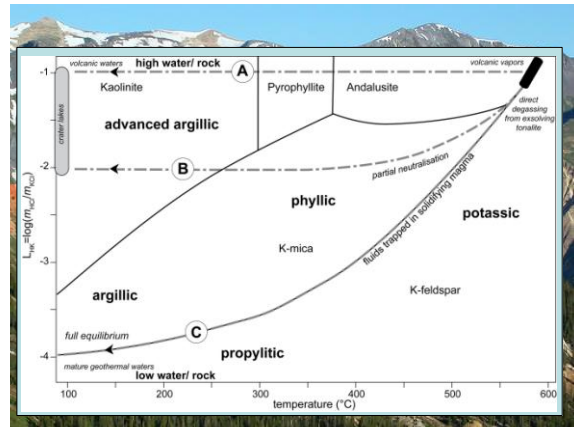
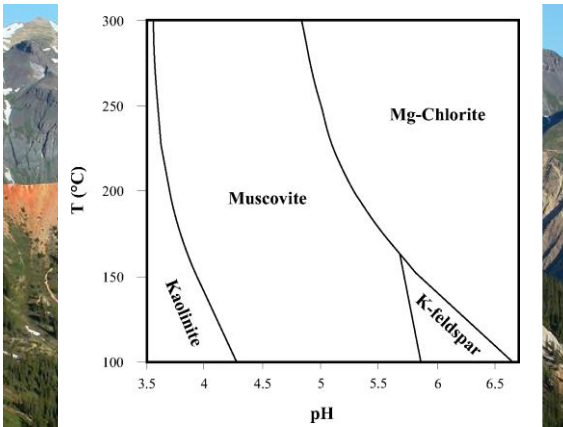
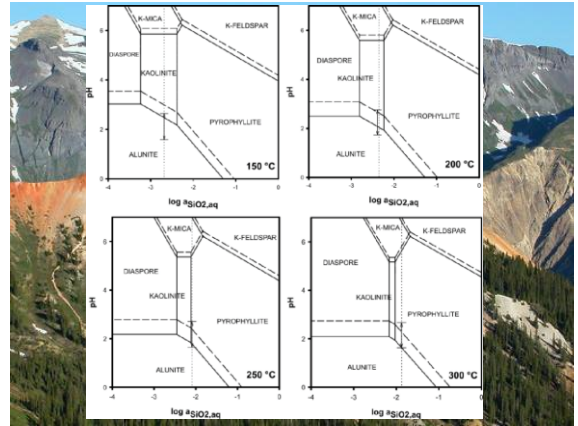
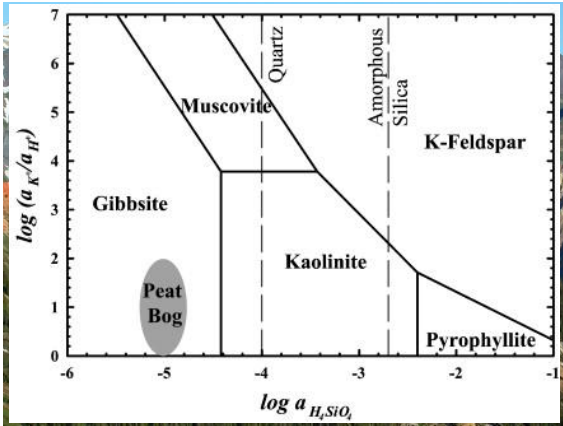
A hidrólise básica é uma reação semelhante a uma dissociação de uma base.

$NH_3 + H_2O \rightleftharpoons NH_4^+ + OH^-$
 Amônia + água \rightleftharpoons amônio + hidroxila







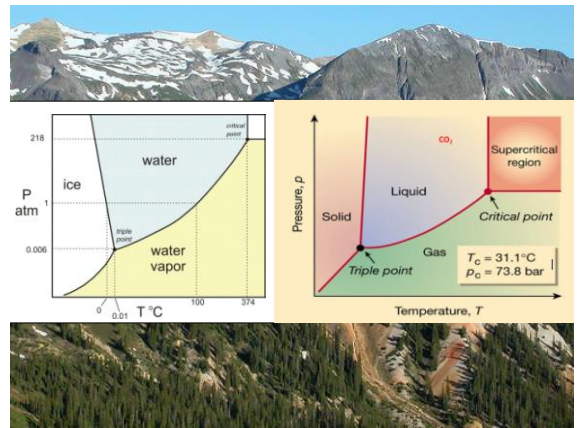


2 SOLUÇÕES HIDROTERMAIS

Fluido hidrotermal é uma solução aquosa quente cuja temperatura pode variar de 50 a mais de 500 °C e que contém como componentes principais Na, K, Ca e Cl. Como componentes secundários podem estar presentes Mg, Mn, B, S, Sr, Fe, CO₂, SO₂, H₂S, NH₃, NH₄, Cu, Pb, Zn, Sn, Mo, Ag, Au, etc (White, 1974; Skinner, 1979).

Embora o sentido estrito do termo fluido refira-se a uma fase na temperatura supercrítica na qual um líquido não pode mais existir, o termo é amplamente utilizado em referência a soluções hidrotermais.

De fato, apenas em determinadas condições na natureza uma solução hidrotermal é um fluido (Pirajno, 1992). A pressão necessária para provocar condensação em uma dada temperatura supercrítica chama-se pressão crítica.



SOLUÇÕES HIDROTÉRMICAS MODERNAS E ANTIGAS

Element	Modern solutions			Ancient solutions		
	1	2	3	4	5	6
Cl	155,000	157,000	158,200	87,000	46,500	295,000
Na	50-400	76,140	59,500	40,400	19,700	152,000
Ca	28,000	19,708	36,400	8,600	7,500	4,400
K	17,500	409	538	3,500	3,700	67,000
Sr	400	636	1,110	—	—	—
Ba	235	—	61	—	—	—
Li	215	7.9	—	—	—	—
Rb	135	1.0	—	—	—	—
Cs	14	0	—	—	—	—
Mg	54	3,080	1,730	5,600	570	—
B	390	—	—	<100	185	—
Br	120	526.5	870	—	—	—
I	18	31.7	—	—	—	—
F	15	—	—	—	—	—
NH ₄ ⁺	409	—	39	—	—	—
HCO ₃ ⁻	>150	31.9	—	—	—	—
H ₂ S	16 ^a	0	—	—	—	—
SO ₄ ²⁻	5	309	310	1,200	1,600	11,000
Fe	2,290	14.0	298	—	—	8,000
Mn	1,400	46.5	—	450	690	—
Zn	540	3.0	300	10,900	1,330	—
Pb	102	9.2	80	—	—	—
Cu	8	1.4	—	9,100	140	—

^a Not determined.
^b Sulfide present; all S reported as H₂S.

Skinner (1975). Quando não especificado, os valores são dados em ppm.

2.2 Partição de Elementos Metálicos nas Soluções Hidrotérmicas

2.3 Transporte de Metais

a) Complexos Iônicos e Ligantes

	Hard	Borderline	Soft
A	H ⁺ Li ⁺ Na ⁺	Fe ²⁺ Co ²⁺ Ni ²⁺	Cu ⁺ Ag ⁺ Au ⁺
C	K ⁺ Rb ⁺ Cs ⁺	Cu ²⁺ Zn ²⁺ Sn ²⁺	Cd ²⁺ Hg ²⁺ Hg ²⁺
I	Ca ²⁺ Mg ²⁺ Ba ²⁺	Pb ²⁺ Sb ³⁺ Bi ³⁺	M ⁿ (metal atoms)
D	Tl ³⁺ Sn ⁴⁺ MoO ₄ ²⁻	SO ₂	
S	WO ₄ ²⁻ Fe ³⁺ CO ₂		
B			
A	NH ₃ , H ₂ O OH ⁻	Br ⁻	CN ⁻ CO
S	CO ₃ ²⁻ NO ₃ ⁻		H ₂ S HS ⁻
E	PO ₄ ³⁻ SO ₄ ²⁻		I ⁻
S	F ⁻ Cl ⁻		

Classificação dos metais e dos ligantes, de acordo com a sua dureza (Brimhall & Crerar, 1987).

A sigla **HSAB** deriva das iniciais do conceito "hard and soft (Lewis) acids and bases", também conhecido com conceito de ácido/base de Pearson.

É comumente utilizado na química para explicar a estabilidade de compostos, mecanismos das reações e as seqüências das reações químicas.

Os íons 'Hard' são pequenos, com estado de carga alto (o critério da carga se aplica principalmente para os ácidos e minoritariamente para as bases) e fracamente polarizáveis.

Os íons 'Soft' são grandes, com baixos estados de carga e fortemente polarizáveis.

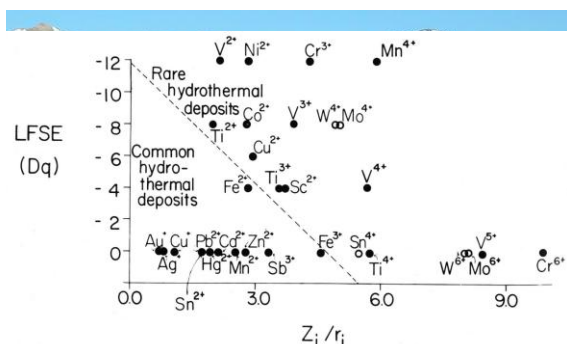
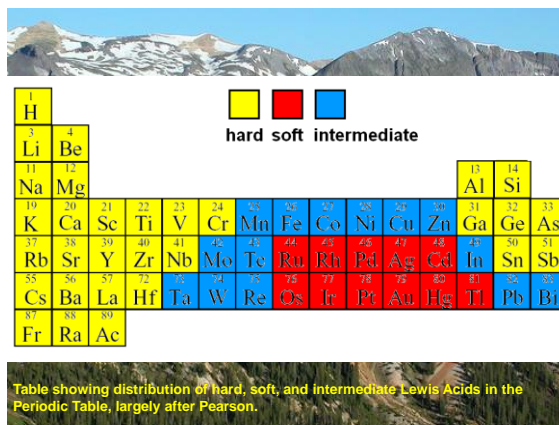


Diagrama que mostra a distribuição dos metais de transição em dois campos diferenciados, aqueles que comumente e raramente formam depósitos hidrotermais, considerando as variáveis energia de estabilização dos ligantes (LFSE) versus potencial iônico (Crerar et al., 1985).

b) Íons Complexos dos Sistemas Hidrotérmicos

Metal	Low Chloride		High Chloride
	Low pH	High pH	
Fe	Fe ²⁺	FeOH ⁺ , Fe(OH) ₂ ⁰	FeCl ²⁻ⁿ / n=0-3
Zn	Zn ²⁺	ZnOH ⁺ , Zn(OH) ₂ ⁰	ZnCl ²⁻ⁿ (n=0-3)
Pb	Pb ²⁺	PbOH ⁺ , Pb(OH) ₂ ⁰	PbCl ⁿ⁻²⁻ⁿ (n=0-3)
Bi	Bi ³⁺	Bi(OH) ₂ ⁺ , Bi(OH) ₃ ⁰	BiCl ⁿ⁻²⁻ⁿ (n=0-2)
Au	AuHS ⁰ or HAU(HS) ₂ ⁰	Au(HS) ₂ ⁻	AuCl ⁺
Ag	AgHS ⁰ or HAg(HS) ₂ ⁰	Ag(HS) ₂ ⁻	AgCl ⁺
Mo	H ₂ MoO ₄	HMoO ₄ ⁻	MoO ₄ ²⁻
		or	
	Mo-bicarbonate or -carbonate complexes		
Sb	Sb ³⁺ (aq), HSbS ₂ , H ₂ SbS ₄	Sb(OH) ₂ ⁺ , Sb(OH) ₃ ⁰	Unchanged

Comportamento de oito metais em soluções hidrotermais com baixa e alta concentração de cloretos, levando também em consideração a variável pH (Crerar et al., 1985).

3 DEPOSIÇÃO DE METAIS

(A) Mudanças na temperatura

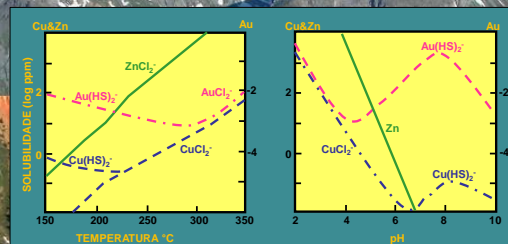
- Afeta a solubilidade de sulfetos e óxidos
- Afeta a formação e a estabilidade dos complexos iônicos transportadores dos diversos metais
- Influencia nas constantes de hidrólise dos diversos ligantes

(B) Variações na pressão e ebulição (boiling)

- Variações na pressão mudam a solubilidade dos constituintes dissolvidos, mas é necessária uma variação de pressão muito grande, da ordem de 1.000 bars, para provocar precipitações significativas. Isto geralmente só acontece quando há separação de uma fase de vapor.

- A ebulição separa os constituintes voláteis da solução, deixando um resíduo mais alcalino, incapaz de transportar metais e aumenta a concentração dos solutos na solução.

FLUIDOS HIDROTERMAIS TRANSPORTE DE METAIS



► Estabilidade de ligantes ► T, P, pH, salinidade e composição

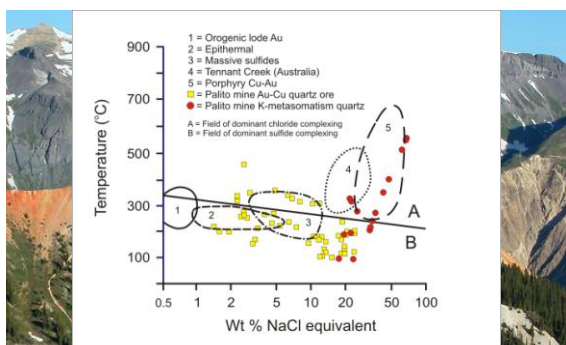


Diagrama temperatura versus salinidade, mostrando a maior estabilidade dos complexos clorados em altas temperaturas (A) e dos sulfetados em baixas temperaturas (B). Neste campo observa-se o gradiente dos seguintes depósitos hidrotermais: 1) Au em depósitos arqueanos; 2) Au-Ag epitermal; 3) Depósitos de sulfetos maciços; 4) Depósito de Au-Cu de Tennant Creek, Austrália; 5) Depósitos porfíricos de Cu-Au. (Large et al. 1988).

C) Reações entre as encaixantes e a solução

É a principal causa de precipitação dos constituintes das soluções.

Três diferentes tipos de reações são importantes:

- **Metassomatismo do H⁺**, onde os íons da solução são trocados por cátions liberados pelas encaixantes. A maioria das soluções hidrotermais comportam-se como ácidos fracos e, portanto, a extração do íon H⁺ tende a reduzir a estabilidade dos complexos clorados. Se há disponibilidade de uma quantidade suficiente de S para reagir com os metais liberados pelos silicatos metassomatizados, haverá uma precipitação de sulfetos. As reações mais comuns são geradas pela solubilização de carbonatos e hidrólise de feldspatos e de minerais máficos, gerando minerais hidratados, como micas e argilo-minerais.

- Adição, na solução, de componentes das encaixantes, podendo provocar a precipitação de sulfetos.

- Reações que provocam uma mudança no estado de oxidação da solução e, portanto, na valência de certos metais, especialmente do Fe, Cu e U, comprometendo a estabilidade de alguns complexos iônicos. O processo de serpentinização e a adição de material carbonáceo são dois processos importantes que podem influenciar no estado de oxidação da solução.

D) Mudanças químicas causadas por mistura de fluidos

Segundo Barnes (1979), a deposição de metais a partir de complexos clorados pode ser conseqüência de:

- Aumento da concentração de H₂S
- Aumento do pH (que pode ser causado por ebulição)
- Diminuição na concentração dos cloratos e diminuição da temperatura

A causa da deposição de complexos sulfetados são:

- Alívio da pressão e ebulição
- Processo de oxidação que diminui o conteúdo de sulfetos e o pH

4 ALTERAÇÃO HIDROTERMAL

No processo de alteração hidrotermal os fluidos atacam quimicamente os minerais das rochas encaixantes, havendo um intercâmbio de componentes químicos entre ambos, o que resulta na formação de novas assembléias minerais em equilíbrio com as novas condições.

Os principais fatores que controlam estes processos de alteração, segundo são:

- Natureza das encaixantes
- Composição dos fluidos
- Concentração, atividade e potencial químico dos componentes presentes no fluido (do H⁺, CO₂, O₂, K⁺, S₂, etc)
- Pressão e temperatura

Exemplo

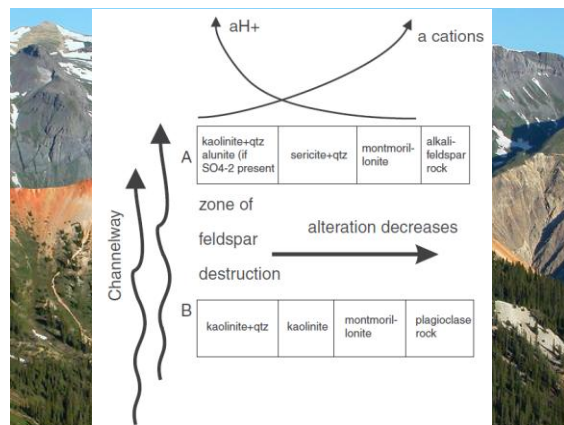
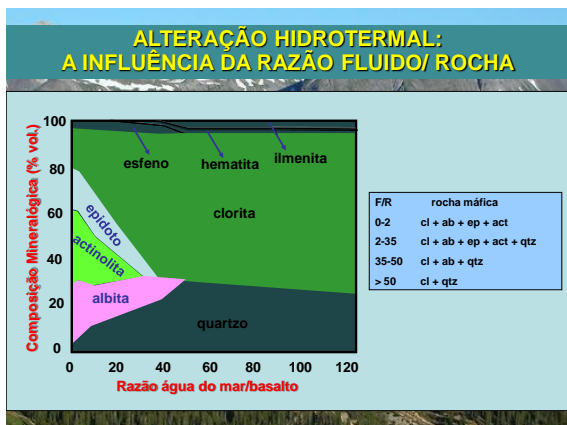
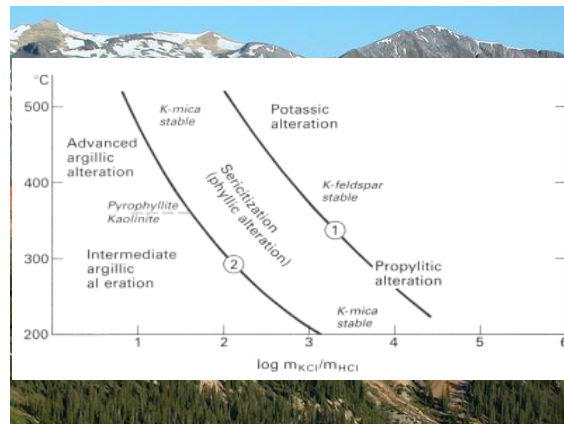
(1) $1,5 \text{ KAlSi}_3\text{O}_8 + \text{H}_2\text{O} = 0,5 \text{ KAl}_3\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2 + \text{K}^+ + 3 \text{ SiO}_2 + \text{OH}^-$

(2) $\text{H}^+ + \text{OH}^- = \text{H}_2\text{O}$

Soma das duas equações anteriores

$1,5 \text{ KAlSi}_3\text{O}_8 + \text{H}^+ = 0,5 \text{ KAl}_3\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2 + \text{K}^+ + 3 \text{ SiO}_2$

K-feldspato K-mica Quartzo

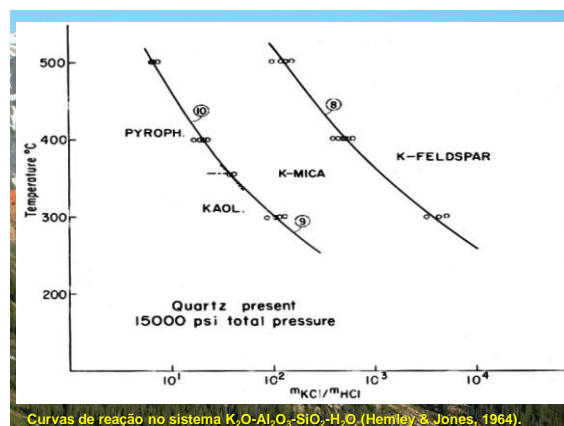


a) Sistema $\text{K}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$

$1,5 \text{ KAlSi}_3\text{O}_8 + \text{H}^+ = 0,5 \text{ KAl}_3\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2 + \text{K}^+ + 3 \text{ SiO}_2$
K-feldspato K-mica Quartzo

$0,5 \text{ KAl}_3\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2 + \text{H}^+ + 1,5 \text{ H}_2\text{O} = 1,5 \text{ Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4 + \text{K}^+$
K-mica Caolinita

$0,5 \text{ KAl}_3\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2 + \text{H}^+ + 3 \text{ SiO}_2 = 1,5 \text{ Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 + \text{K}^+$
K-mica Quartzo Pirofilita



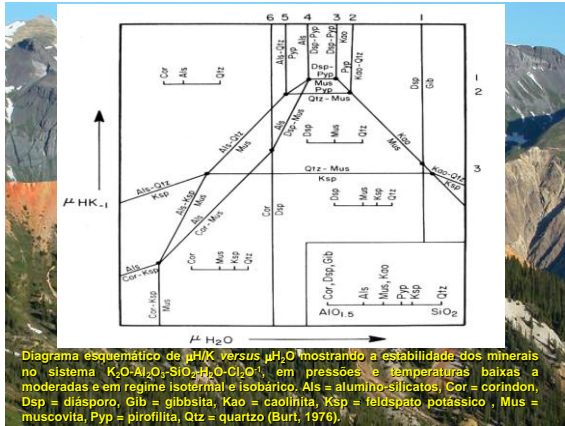
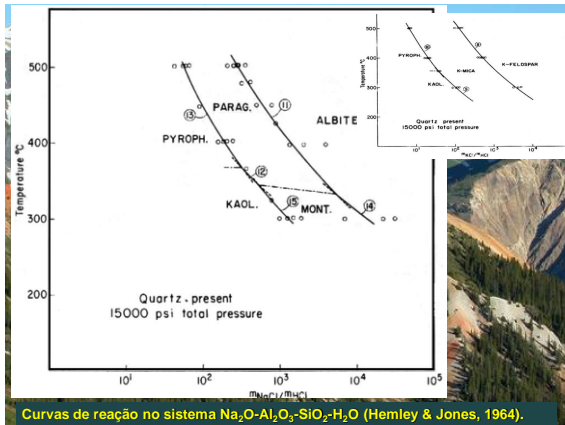
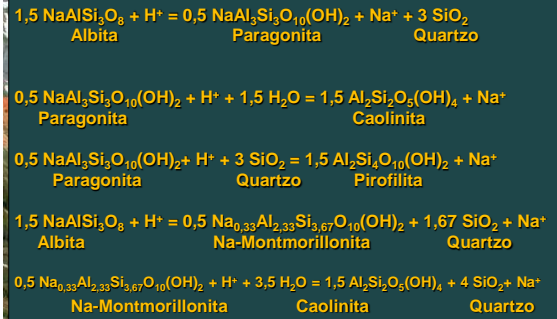
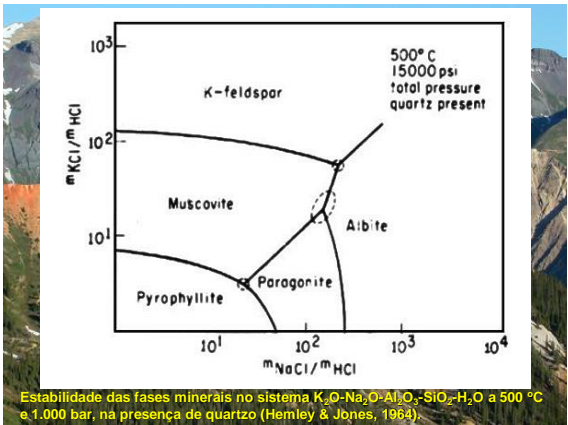


Diagrama esquemático de pH-K versus aH₂O mostrando a estabilidade dos minerais no sistema K₂O-Al₂O₃-SiO₂-H₂O em pressões e temperaturas baixas a moderadas e em regime isométrico e isobárico. Als = aluminossilicatos; Cor = corundon; Dip = diásporo; Gib = gibbsita; Kao = caolinita; Ksp = feloespato potássico; Mus = muscovita; Pyp = pirofilita; Qtz = quartzo (Burt, 1976).

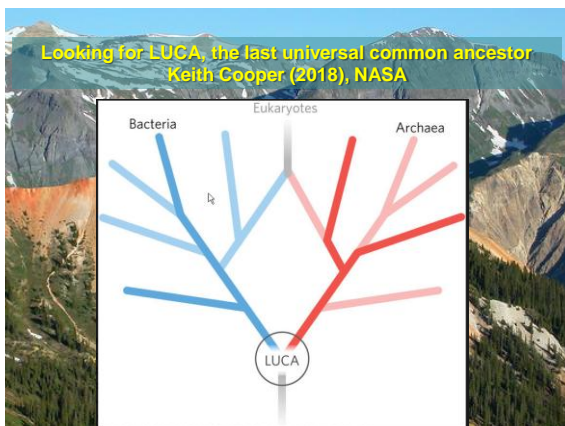
b) Sistema Na₂O-Al₂O₃-SiO₂-H₂O



Curvas de reação no sistema Na₂O-Al₂O₃-SiO₂-H₂O (Hemley & Jones, 1964).



Estabilidade das fases minerais no sistema K₂O-Na₂O-Al₂O₃-SiO₂-H₂O a 500 °C e 1.000 bar, na presença de quartzo (Hemley & Jones, 1964).

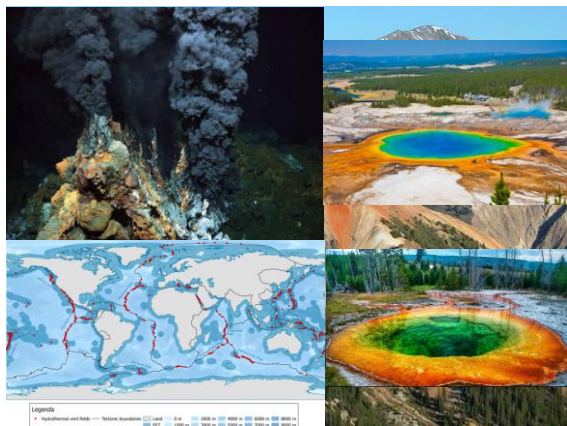


Around 4 billion years ago there lived a microbe called LUCA — the Last Universal Common Ancestor. There is evidence that it could have lived a somewhat 'alien' lifestyle, hidden away deep underground in iron-sulfur rich hydrothermal vents. Anaerobic and autotrophic, it didn't breath air and made its own food from the dark, metal-rich environment around it. Its metabolism depended upon hydrogen, carbon dioxide and nitrogen, turning them into organic compounds such as ammonia. Most remarkable of all, this little microbe was the beginning of a long lineage that encapsulates all life on Earth.

life MDPI

Review
Serpentinization: Connecting Geochemistry, Ancient Metabolism and Industrial Hydrogenation

Martina Preiner ^{1,*}, Joana C. Xavier ¹, Filipa L. Sousa ², Verena Zimorski ¹, Anna Neubeck ³, Susan Q. Lang ⁴, H. Chris Greenwell ⁵, Karl Kleinermanns ⁶, Harun Tüysüz ⁷, Tom M. McCollom ⁸, Nils G. Holm ⁹ and William F. Martin ^{1,*}

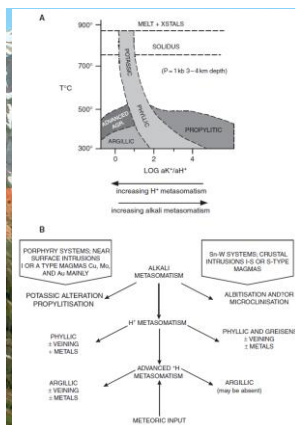


METASSOMATISMO ALCALINO

Nos estágios finais da consolidação de uma massa ígnea desenvolvem-se **fluidos alcalinos altamente salinos**, com temperaturas em torno de 800 a 600 °C, que provocam uma ampla alteração **potássica ou sódica**. Estes fluidos promovem reações de troca e crescimento *subsolidus* de novas fases minerais.

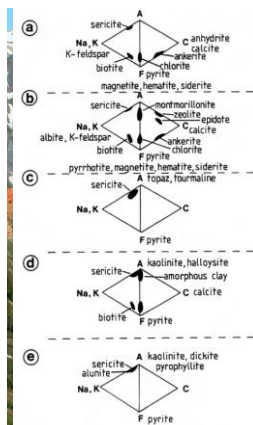
Os processos *subsolidus* que ocorrem neste tipo de alteração incluem:

- um intercâmbio de base nos feldspatos, especialmente de Na por K ou de K por Na
- mudanças no estado estrutural dos feldspatos
- Albitização
- Microclinização
- Crescimento de micas tri-octaédricas.



(A) Esquema da evolução de um sistema hidrotermal como função da temperatura e das atividades do K⁺ e do H⁺ (Guilbert & Park, 1985, em Pirajno, 1992; Burnham & Ohmoto, 1980, em Pirajno, 1992). A medida em que o sistema evolui para temperaturas e pressões mais baixas há um progressivo aumento de H⁺ e uma evolução progressiva do tipo de alteração alcalina para argílica.

(B) O metassomatismo alcalino libera H⁺ havendo, como consequência, uma diminuição na razão álcalis/H⁺, com subsequente desestabilização dos feldspatos e micas e crescimento de novas fases minerais (zonas de alteração greissen e sericitica). Um intenso metassomatismo do íon de H⁺ deve-se à entrada de água no sistema, provocando mais oxidação e produção de H⁺. A este processo podem ser associadas as zonas de alteração argílica (Pirajno, 1992).



Diagramas ACF (Al₂O₃-CaO-FeO) e AKF (Al₂O₃-Na₂O+K₂O-FeO) onde podem ser observadas as assembléias minerais dominantes dos diversos tipos de alteração hidrotermal.

A: Alteração potássica de silicatos.
B: Alteração propilítica.
C: Alteração sericitica.
D: Alteração argílica intermediária.
E: Alteração argílica avançada

Segundo Meyer & Hemley (1967).

ALBITIZAÇÃO

(alteração ou metassomatismo sódico)

- Albita se forma também nas **alterações propilíticas** típicas pela concentração do Na liberado a partir da quebra do plagioclásio mais cálcico.
- Entretanto, Meyer & Hemley (1967) reservam o termo albitização para processos onde o sódio é introduzido metassomáticamente.
- Quando o metassomatismo sódico é intenso quase todo o material aluminoso é convertido para plagioclásio branco rico em Na (pode ser vermelho, principalmente em IOCGs ou em pórfiros de rochas evoluídas, relativamente mais ricas em ferro), podendo localmente estar associado a um anfibólio rico em Na.
- A composição do novo plagioclásio varia entre albita pura e oligoclásio sódico e podem ser encontrados os minerais mais típicos da alteração propilítica, especialmente epidoto.
- Em rochas intensamente albitizadas os sulfetos normalmente não são abundantes, estando comumente presentes óxidos de Fe
- Mineral diagnóstico: Albita/oligoclásio
- Minerais associados: Quartzo-(magnetita)-(carbonatos). Sem sulfetos
- Vênulas: Albita/oligoclásio, magnetita

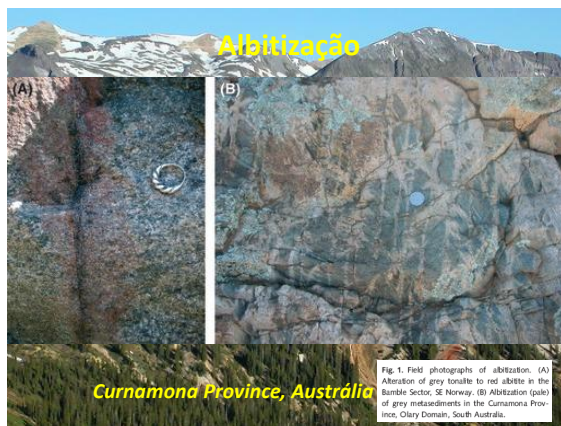
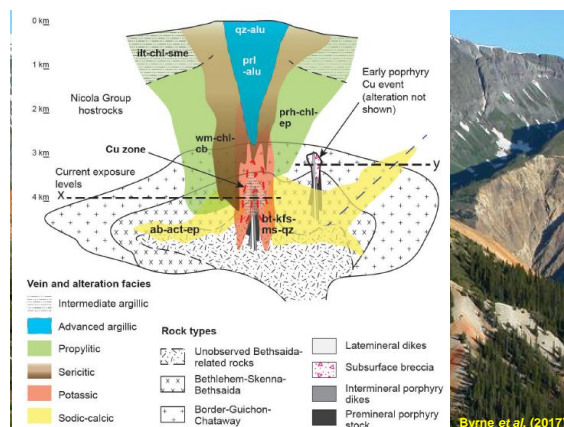
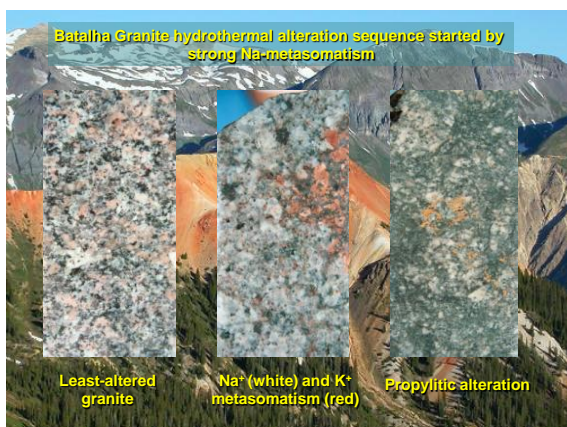
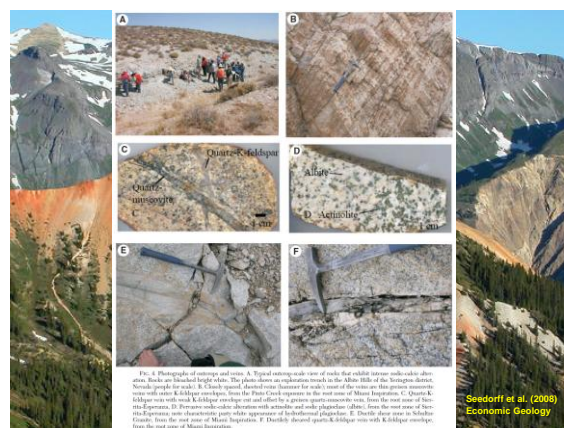


Fig. 3. Field photographs of albitization. (A) Alteration of grey tourmaline to red albitite in the Bumble Sector, SE Norway. (B) Albitization (pale) of grey metasediments in the Curnamona Province, Olary Domain, South Australia.



ALTERAÇÃO SÓDICO-CÁLCICA

- Muito comum e abundante em sistemas IOCG.
- Importante e amplamente distribuída nas raízes dos pórfiros, concentrado nas partes superiores dos flancos da cúpulas, abaixo e lateralmente aos corpos de minérios.
- Temperatura entre 480 e 360 °C
- Plagioclásio sódico (albita/oligoclásio) substitui feldspato potássico e actinolita, clorita, epidoto, andalusita e titanita substituem biotita e magnetita.
- Geralmente zonas esbranquiçadas com faixas nítidas verdes com bordas ricas em actinolita ou epidoto.
- Minerais diagnósticos: Albita/oligoclásio, actinolita, (Na-hornblenda)
- Minerais associados: Magnetita-quartzo-(diopsídio)-(epidoto)-(granada)-(escapolita)-(Mg-clorita)-(Fe-clorita)
- Vênulas: Albita/oligoclásio, magnetita ± actinolita



ALTERAÇÃO POTÁSSICA

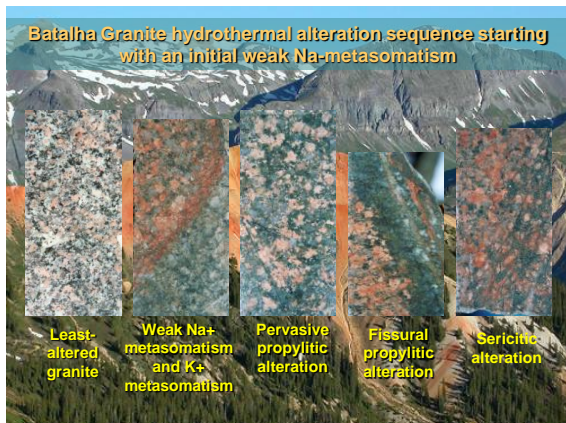
(ou metassomatismo potássico)

- Muito comum e abundante em sistemas IOCG.
- Importante e amplamente na parte superior e lateral proximal dos pórfiros.
- Tipicamente forma feldspato potássico (comumente microclínio) que substitui os feldspato ígneos (preferencialmente o plagioclásio) e biotita secundária, que substitui anfibólios e/ou biotita ígnea
- O feldspato hidrotermal pode ser branco ou cinza, mas mais comumente é rosa ou vermelho, estes em rochas muito evoluídas, relativamente ricas em Fe.
- Minerais diagnósticos: Feldspato potássico e biotita
- Minerais associados: Actinolita-epidoto-sulfetos-(sericita)-(andalusita)-(albita)-(carbonato)-(turmalina)-(magnetita)
- Vênulas: Feldspato potássico, biotita, quartzo-biotita-sericita-feldspato potássico-sericita-sulfetos, quartzo-sulfetos-magnetita e quartzo-molibdenita-pirita-calcopirita-bornita

Alteração potássica (FK) na Copper King Gold Mine



Batalha Granite hydrothermal alteration sequence starting with an initial weak Na-metasomatism



Least-altered granite

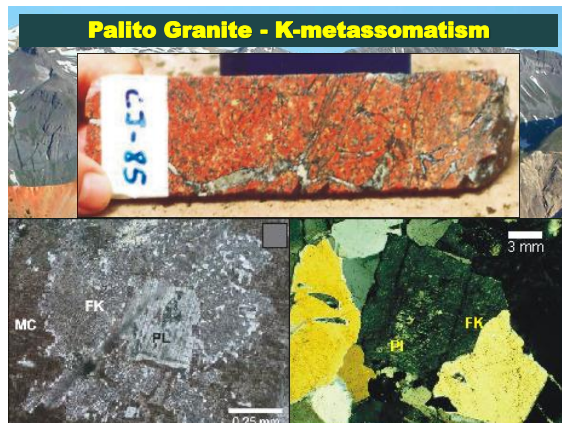
Weak Na-metasomatism and K+ metasomatism

Pervasive propylitic alteration

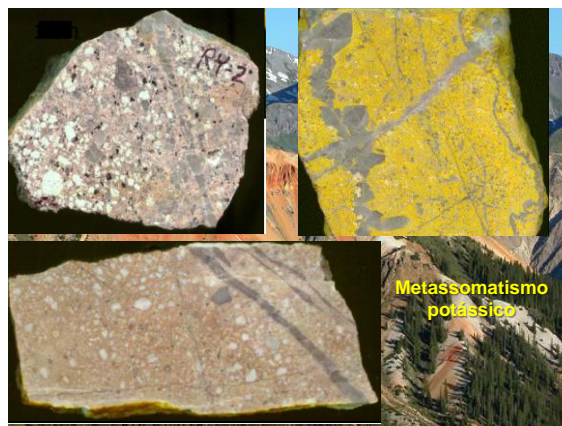
Fissural propylitic alteration

Sericitic alteration

Palito Granite - K-metasomatism



Pórfiro alcalino - Xingu



Metassomatismo potássico

BIOTITIZAÇÃO (alteração potássica)

- Predomina nas rochas mais máficas.
- Forma-se em temperaturas relativamente mais baixas e com maior atividade de água.

Wry et al. (2010) Economic Geology

Alterações do tipo porfírio com biotitização (alteração potássica)

Wry et al. (2010) Economic Geology

ALTERAÇÕES CÁLCICA E CÁLCICA-POTÁSSICA

Tabela 2. (Cont.)

Processo or tipo de alteração	Definição	Características	Distribuição espacial	Características distintivas
Sódica	Al replace lig and plag; chl, ep, act, bar, and py replace mafic minerals; lower temperature than calcic alteration	Qtz, ps, and faser veins with envelopes of alb + chl; minor fluid inclusions may contain spss + act + sulfides with chl + alb envelopes	Peripheral, cutting through outcrops and extending to higher levels, where it may grade upward into calcic alteration and downward into more iron-rich, chloritic overprints	Weakly leucocratic zones containing alb and chl with py and/or spss
Cálcica	Metasomatic addition of Ca, characterized by pl, ps, plag, and py in igneous porphyries	Sulfide-poor replacement of igneous rocks by calc-silicate minerals; similar to calc-silicate except that carbonate rocks may never have been in the vicinity	Present in most zones, generally concentrated on flanks of cupolas	Mantle, basal, g-f bearing rock with primary quartziferous altered rock may be gray-poor with qtz replaced by calc-silicate minerals
Cálcica-potássica	Metasomatic addition of Ca and K, characterized by calc-silicate minerals and lig or bar in igneous porphyries	Presence of both potassic and calcic minerals, such as lig, bar, ep, chry, act, py, apatite, act, and act; bar and act may be present but less common; porphyry copper systems associated with alkalic rocks	Generally within or somewhat lateral to potassic alteration, continuously within the outcrops	act, ps, or gt with lig and/or bar

Note: Some differences occur for other classes of porphyry deposits, as noted in text, and especially for other types of hydrothermal ore deposits, see table 2 of Seedorf et al. (2008).
 Abbreviations: alb = albite; act = actinolite; acth = actinolite; bar = barite; bi = biotite; ca = calcite; chl = chlorite; ep = epidote; faser = faserite; g = garnet; gl = glaucophane; hbl = hornblende; hls = hornblende; lig = ligonite; mnt = manganite; mus = muscovite; op = opal; pl = plagioclase; ps = pyroxene; py = pyrite; qtz = quartz; ser = sericite; spss = spessartite (special kyanite); th = thauasite (thauasite); tr = tremolite.

Seedorf et al. (2008) Economic Geology

