

***Depósitos de sulfetos maciços hospedados em rochas vulcânicas  
(VHMS)***



# SISTEMAS HIDROTERMAIS SUBMARINOS E DEPÓSITOS DE SULFETOS MACIÇOS DE Cu-Zn-Pb-(Au)

## DESCARGA DE SOLUÇÕES HIDROTERMAIS NO ASSOALHO OCEÂNICO

- **Depósitos associados ou hospedados em rochas vulcânicas**

*Volcanogenic massive sulfide* ou **volcanic-exhalative massive sulfide deposits** (VMS) ou *Volcanic-associated or volcanic-hosted deposits* (**VHMS**)

**Importante fonte de metais base:  
Cu, Zn, Pb, Ag, Au (Sn, Cd, Sb, Bi)**

## Depósitos VMS ou VHMS

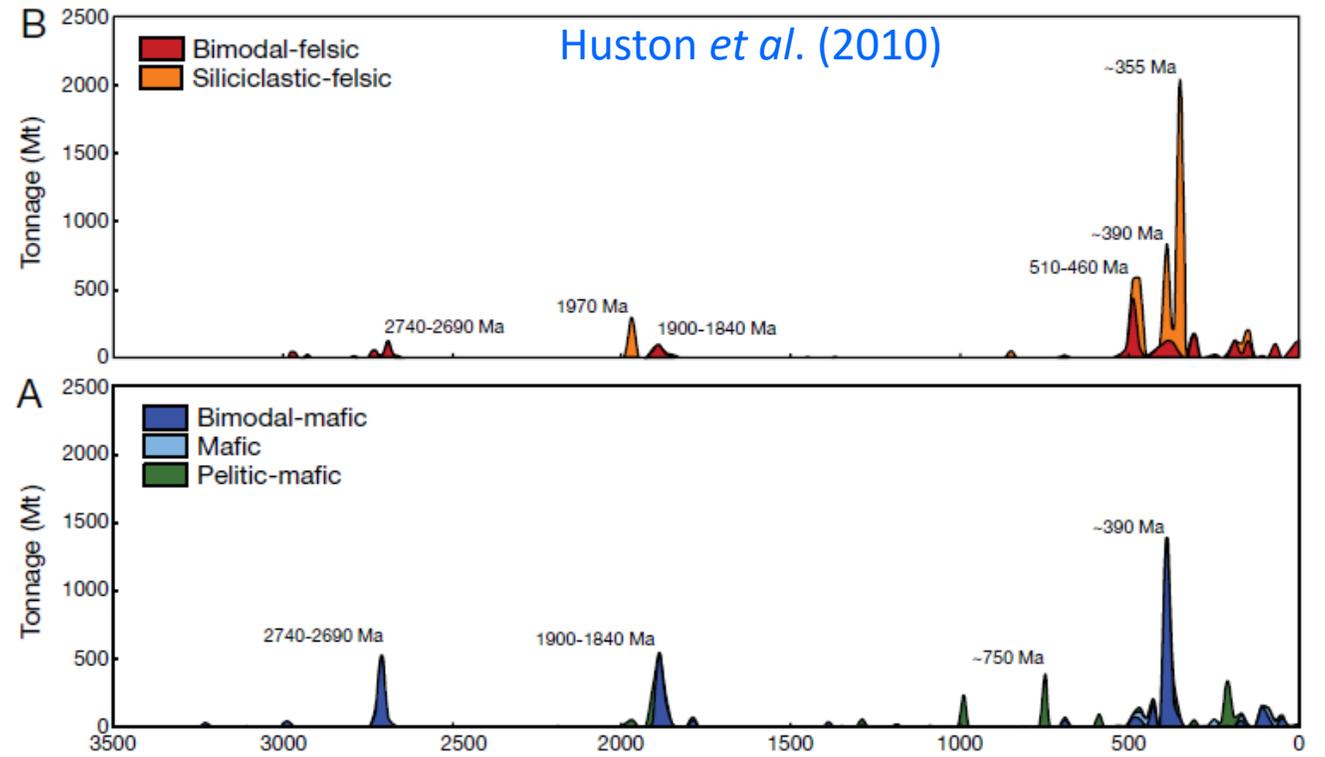
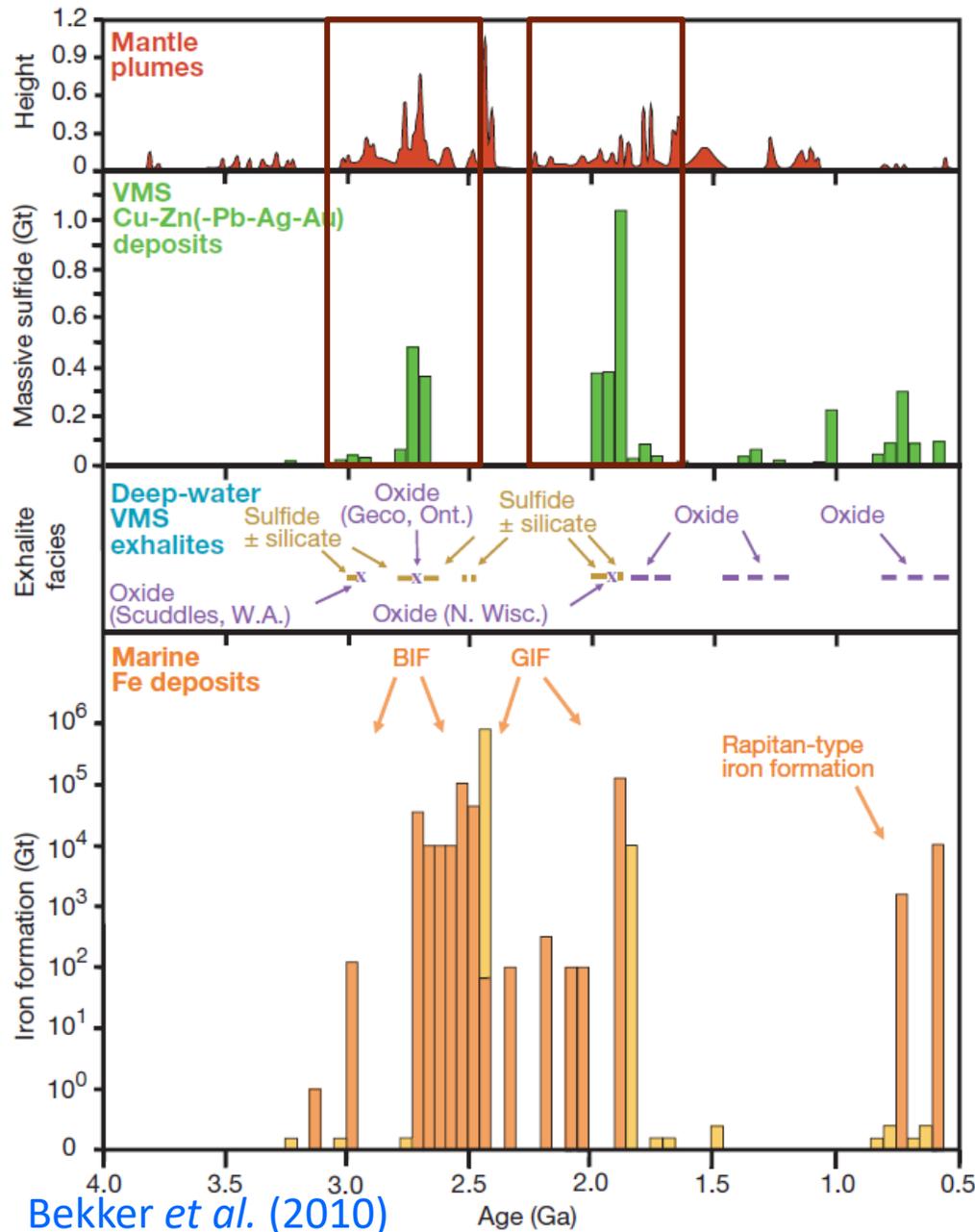
São depósitos de **sulfetos** maciços e disseminados, intimamente associados a **rochas vulcânicas** diversas e, por vezes, com os sedimentos, em **fundo oceânico**.

Possuem sulfetos variados, principalmente, de **Cu (calcopirita)**, **Pb (galena)**, **Zn (esfalerita)**, com **Au e Ag**.

**Mineralogia:** pirita, calcopirita, esfalerita, pirrotita galena, além de tetrahedrita, tennantita, arsenopirita, bornita, magnetita

# DISTRIBUIÇÃO TEMPORAL DOS DEPÓSITOS VHMS (VMS)

Depósitos VHMS mais antigos: Pilbara, Austrália e Barberton, África do Sul (ca. 3,45 Ga) – *Greenstone Belts!*



Depósitos precambrianos: ca. 2,7 Ga e ca. 1,88 Ga  
Arqueano: sistemas de arco e back-arco primitivos e rifts

# MUDANÇAS DOS DEPÓSITOS VHMS AO LONGO DO TEMPO GEOLÓGICO

**Depósitos fanerozoicos:** têm a **pirita** como principal sulfeto de ferro;

**Depósitos de sulfeto maciço pré-cambriano:** contém **pirita** e **pirrotita** em quantidades iguais;

Essa diferença é interpretado como reflexo da presença de águas mais reduzidas e **menor teor total de enxofre dos oceanos** que prevaleciam no Arqueano e início do Proterozoico;

**Concentrações crescentes de sulfato na água do mar** e presença de **crosta mais evoluída** são refletidas por abundantes minerais ricos em sulfato e maior **teor de Pb em depósitos fanerozoicos**.

**Barita** está presente localmente em alguns dos depósitos mais antigos, mas torna-se abundante após 1,8 Ga, rastreando a **oxigenação** dos oceanos pré-cambrianos tardios (Huston et al., 2010a).

# Conteúdo metalífero

- Zn + Pb (Ag, As, Sb, Hg): associações de rochas **félsicas e sedimentares**;
- Zn-Pb-Cu: associações bimodais (**máficas e félsicas**);
- > Cu (Co, Se, Ni, Bi): podem relação direta com sucessões máficas ou com derivação direta de magmas subvulcânicos félsicos;

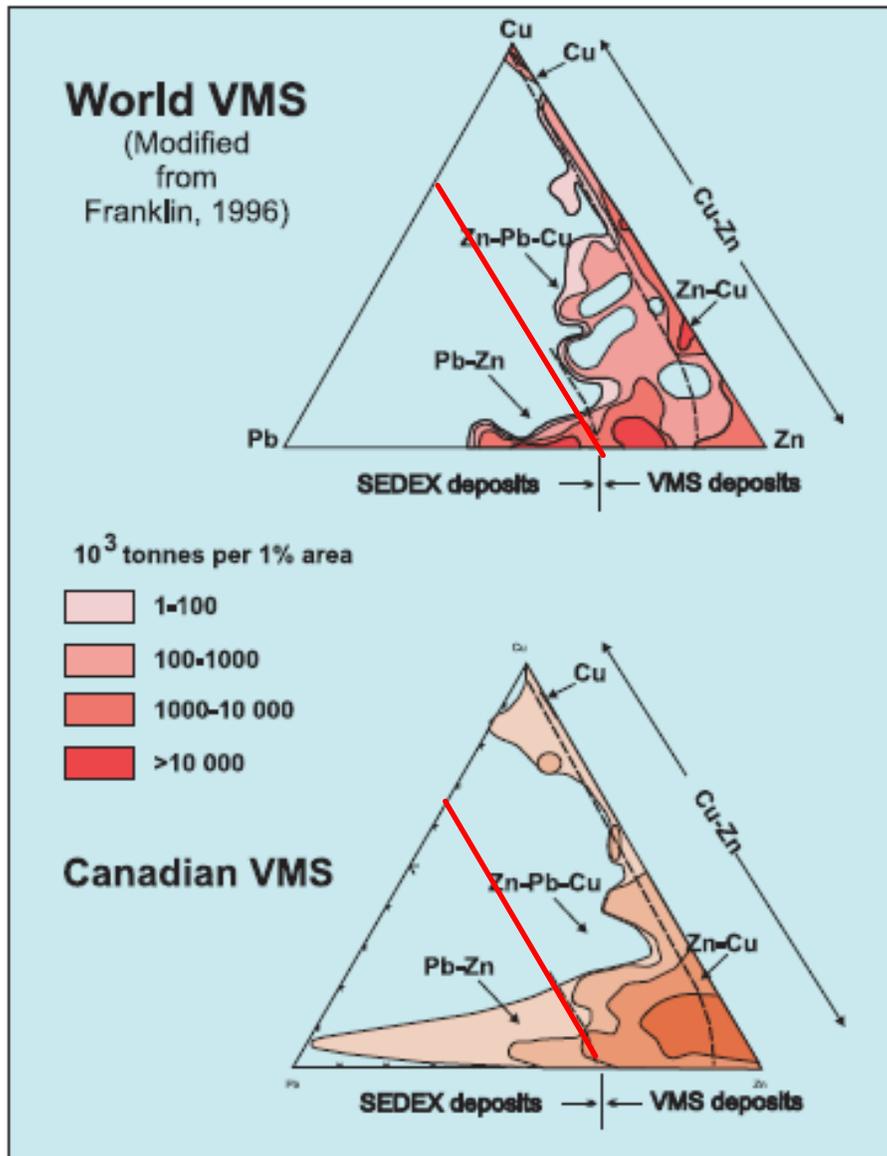
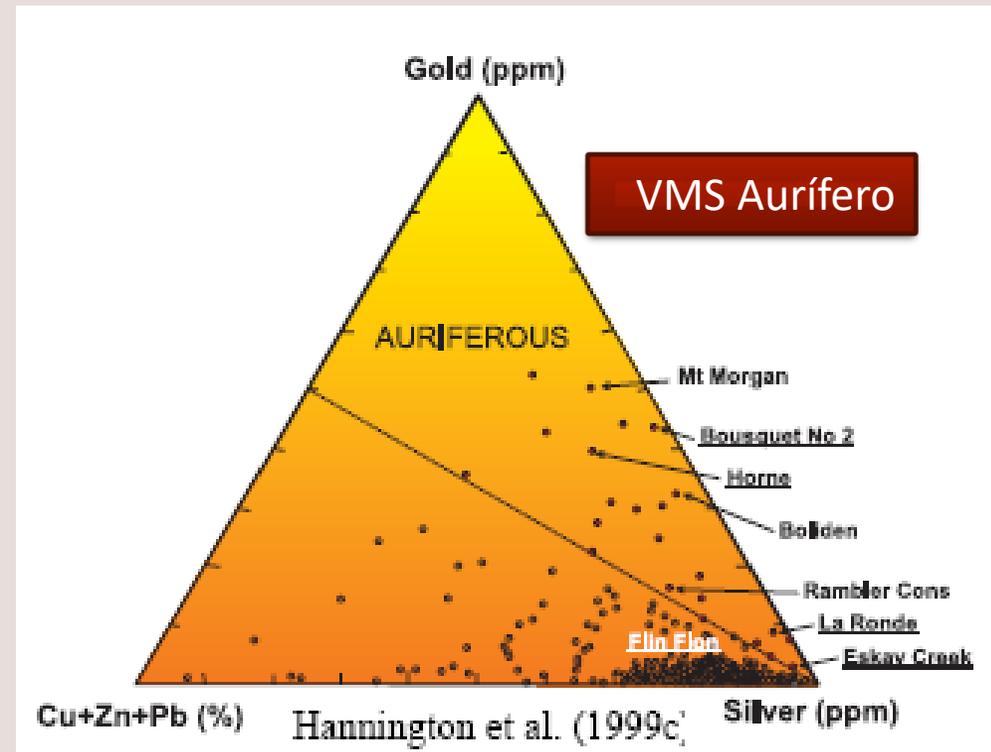


FIG. 2. Base metal classification of worldwide and Canadian VMS deposits as defined first by Franklin et al. (1981) and modified by Large (1992) to include the Zn-Pb-Cu class. The preponderance of Cu-Zn and Zn-Cu VMS deposits in Canada is due to the abundance of Precambrian primitive oceanic arc settings. Worldwide there is a larger proportion of felsic-hosted, more Pb-rich continental and continent margin arc settings.



# Depósitos VMS Gigantes e Supergigantes

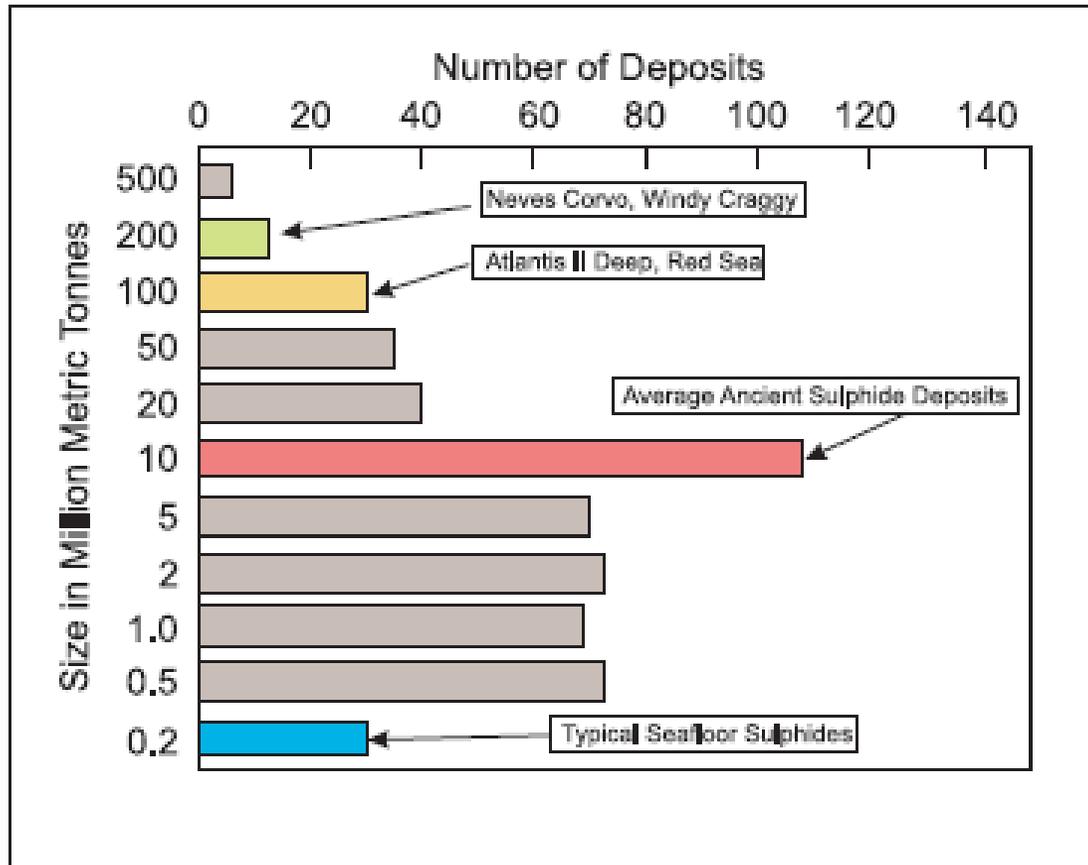


FIG. 8. Worldwide size distribution for VMS deposits, with deposits over 50 Mt considered "giant", and those over 150 Mt considered "supergiant". Atlantis Deep is considered the largest modern example of a seafloor massive sulphide deposit, with Neves Corvo and Windy Craggy ancient examples of supergiant deposits. Modified from Hannington et al (1995).

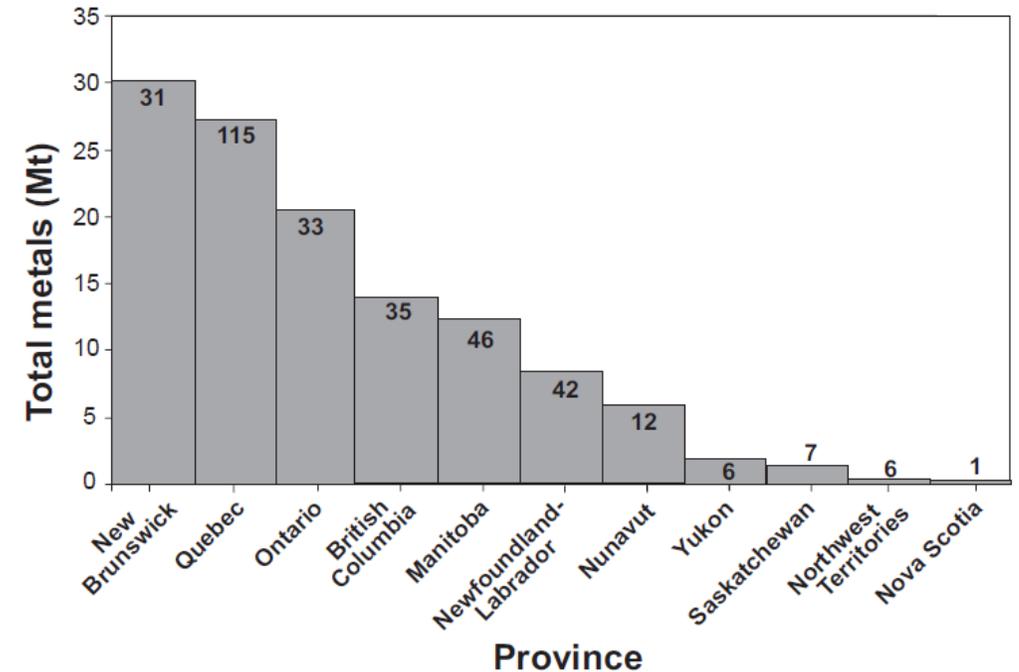
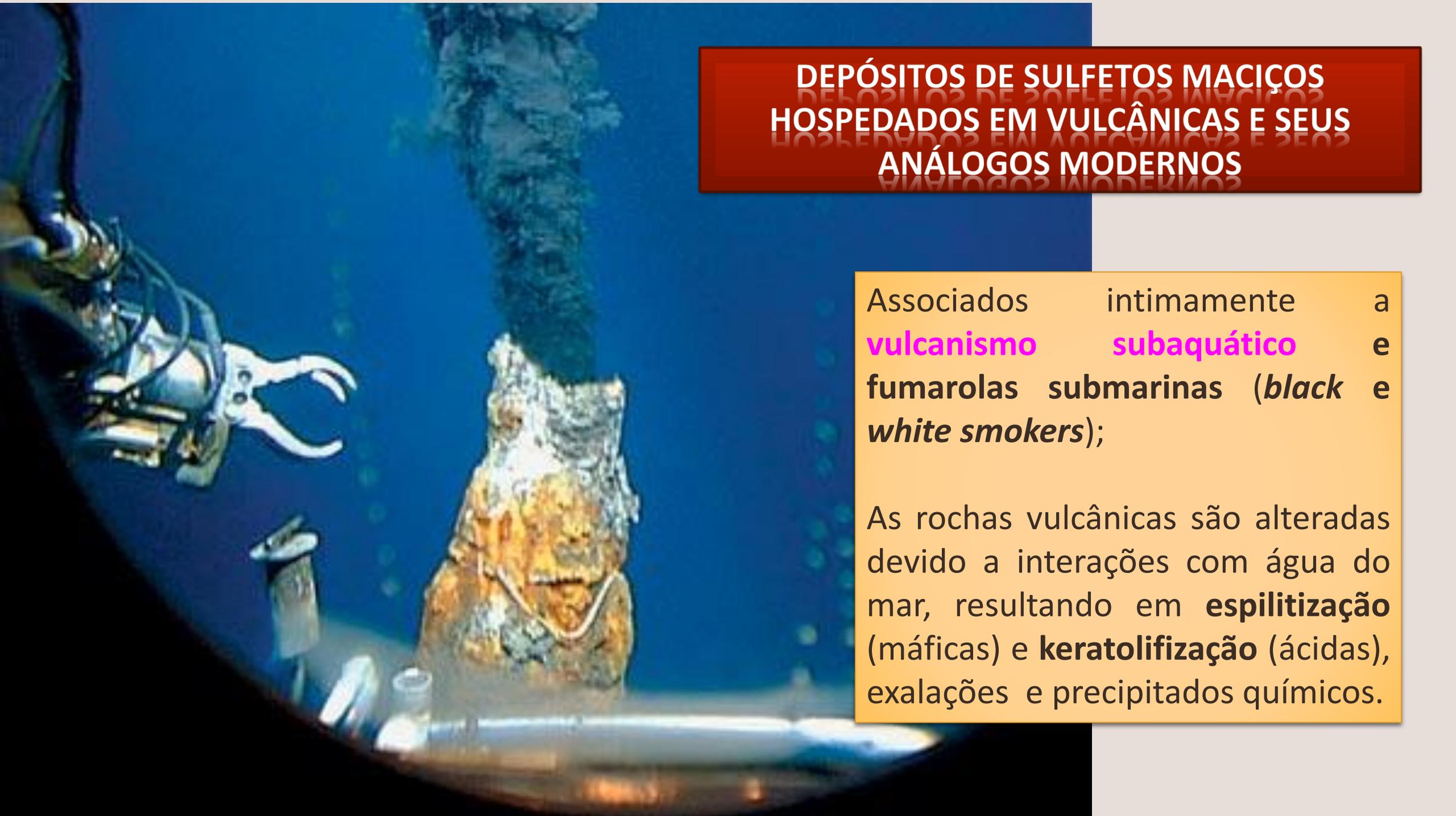


FIGURE 7. Histogram of the total tonnage of base metals from known VMS deposits per province; also shown are the number of deposits. The aggregate tonnage was calculated by total metals represent divided by geological reserves (proven, possible, and probable; non 43-101 compliant).

Mais de 1000 depósitos de tamanhos variáveis já foram explorados (14 bilhões de toneladas);  
 > 50% da produção de Zn+Pb, 7% de Cu e 18% de Ag



## DEPÓSITOS DE SULFETOS MACIÇOS HOSPEDADOS EM VULCÂNICAS E SEUS ANÁLOGOS MODERNOS

Associados intimamente a **vulcanismo subaquático** e fumarolas submarinas (*black* e *white smokers*);

As rochas vulcânicas são alteradas devido a interações com água do mar, resultando em **espilitização** (máficas) e **keratolifização** (ácidas), exalações e precipitados químicos.

# Vents hidrotermais modernos

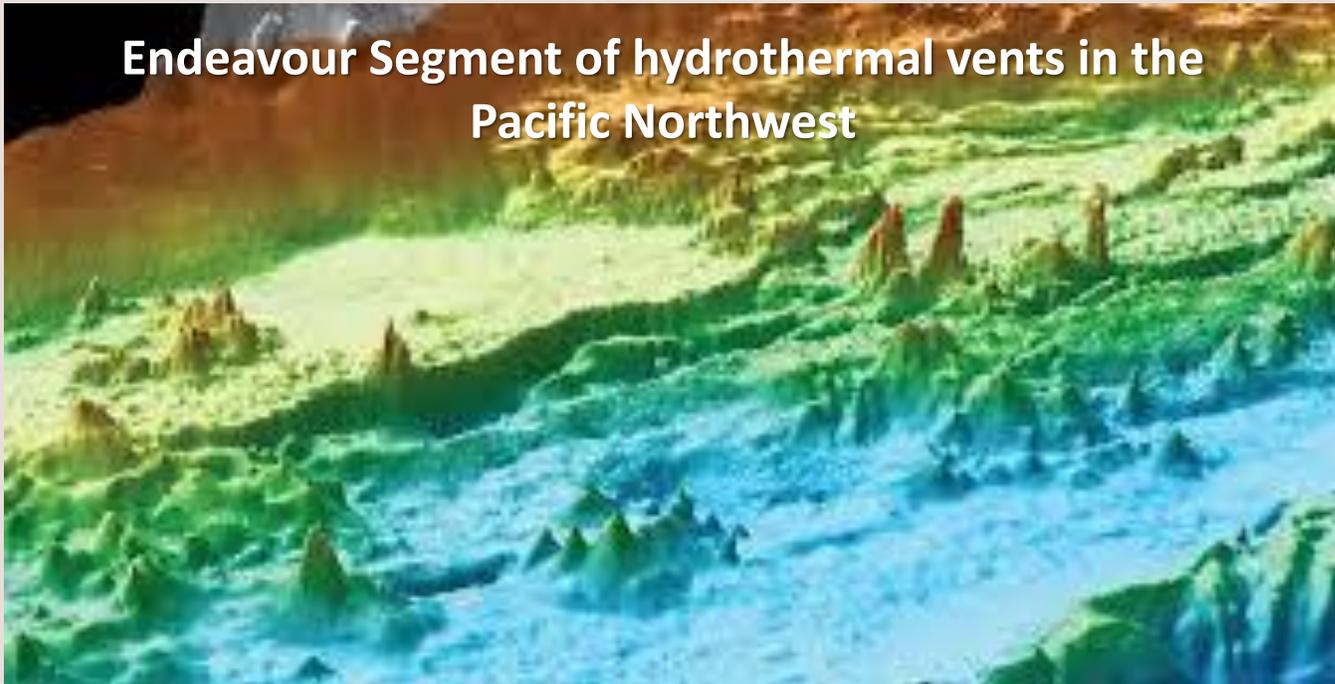


O segmento Endeavour está localizado no extremo norte do Juan de Fuca Ridge, a cerca de 350 km a NW de Washington

## O que são “vents” hidrotermais?

Os “vents” hidrotermais ocorrem em locais nas profundezas do oceano, onde câmaras magmáticas em profundidade superaquecem a água do mar. Essa **água do mar superaquecida** interage com as rochas em sub-superfície e circula em sistemas convectivos, lixiviando das rochas **metais** e minerais de seus arredores. Quando a água fervente penetra no fundo do mar e se mistura com as águas geladas dos oceanos profundos, os metais presentes na água do mar modificada se condensam e formam estruturas subaquáticas (**chaminés**) que continuam a bombear a água superaquecida e vapor para o oceano.

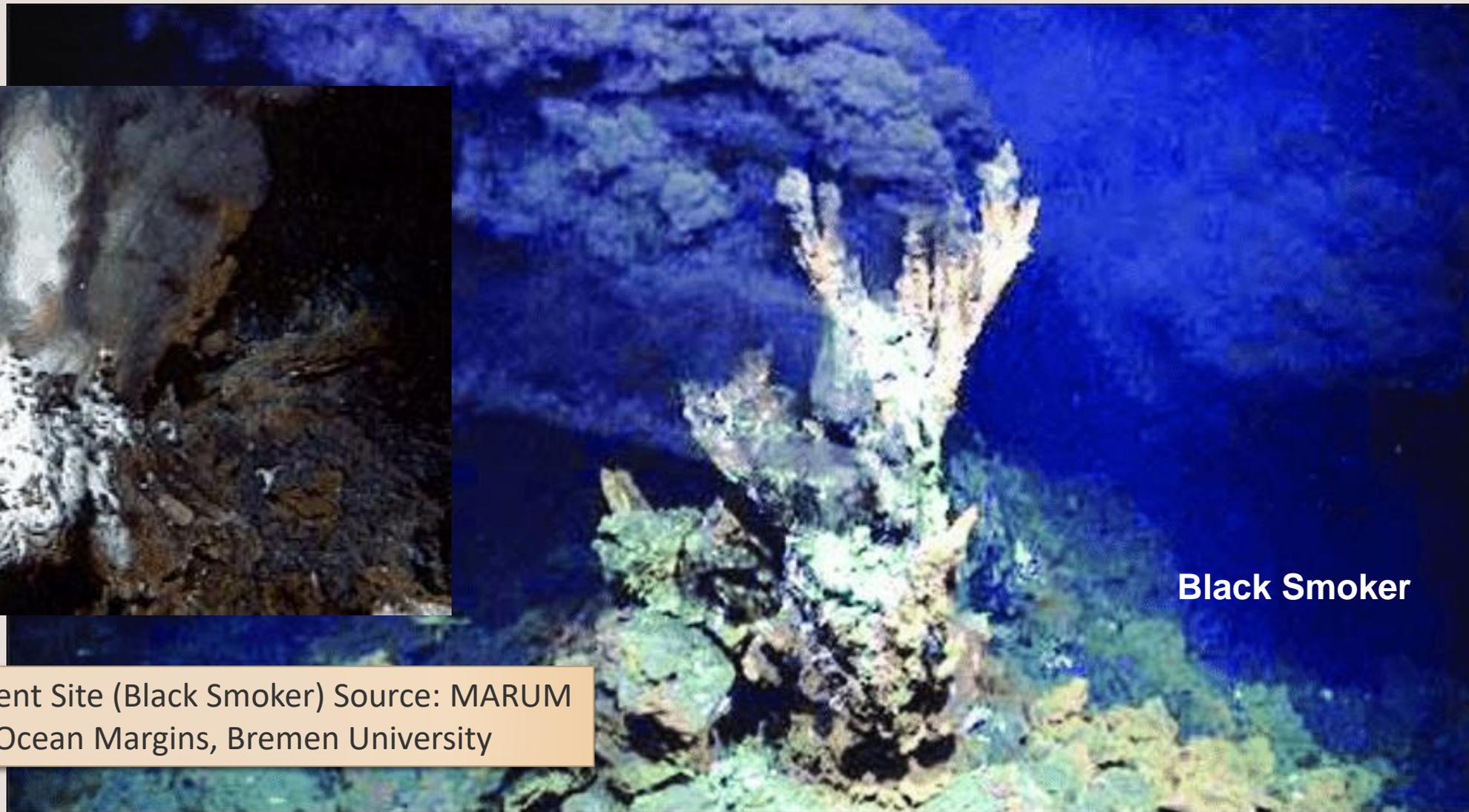
## Endeavour Segment of hydrothermal vents in the Pacific Northwest



Mapa de alta resolução de 572 chaminés (vents hidrotermais) de Endeavour, Pacífico

<https://marinemadness.blog/2020/06/12/new-map-gives-us-our-best-look-yet-at-hydrothermal-vents/>

# Exemplos modernos de descarga de soluções hidrotermais no assoalho oceânico: “black and white smokers”



Active Hydrothermal Vent Site (Black Smoker) Source: MARUM  
Research Center Ocean Margins, Bremen University

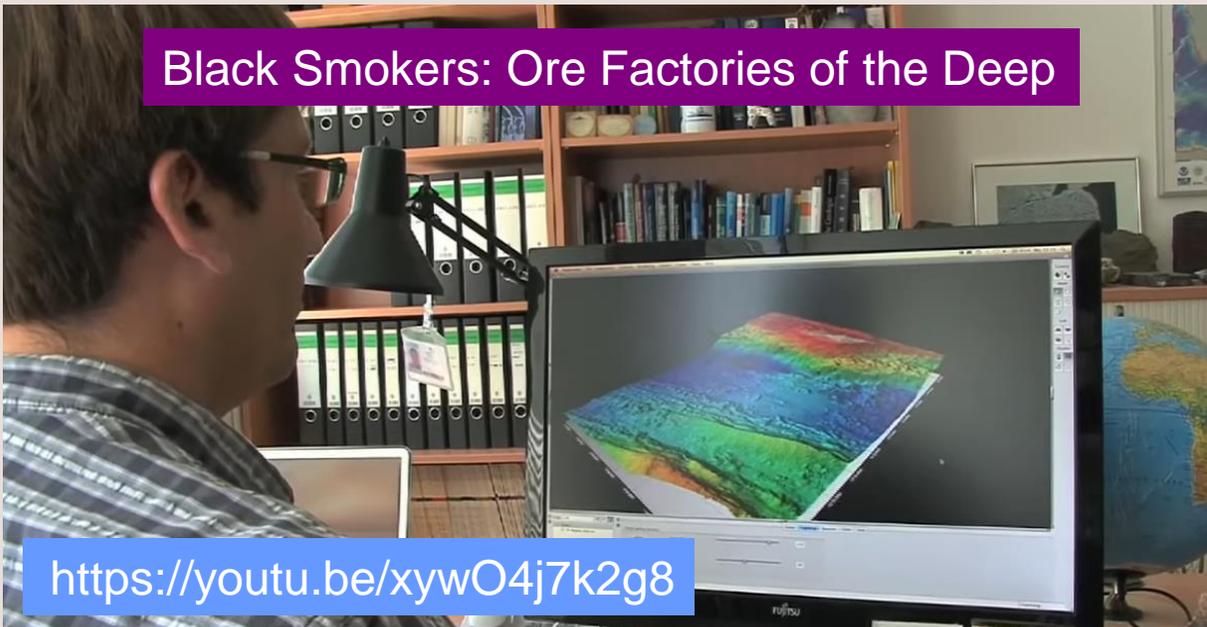
# Trans-Atlantic Geotraverse (TAG) Hydrothermal Vent



Sugestões de Vídeos

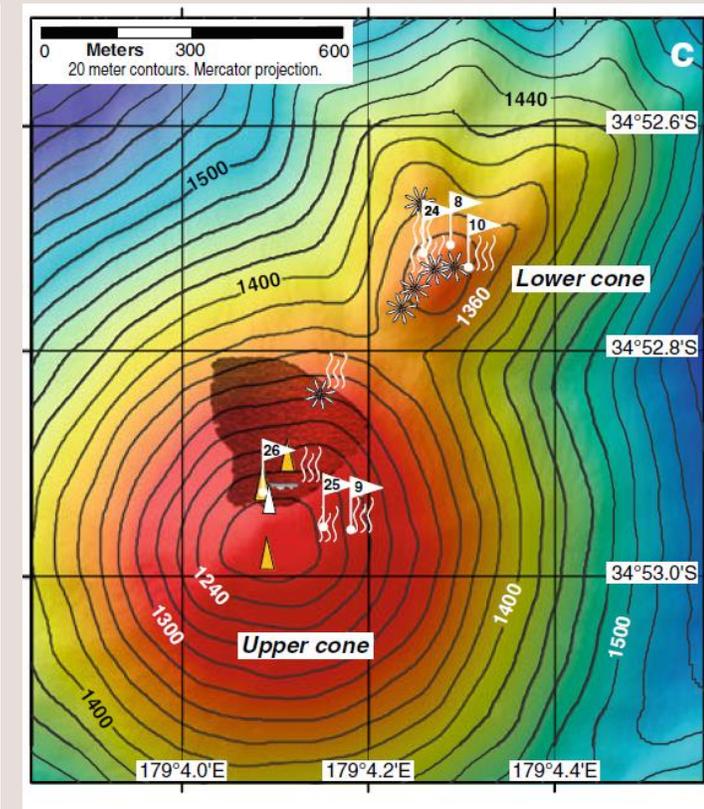
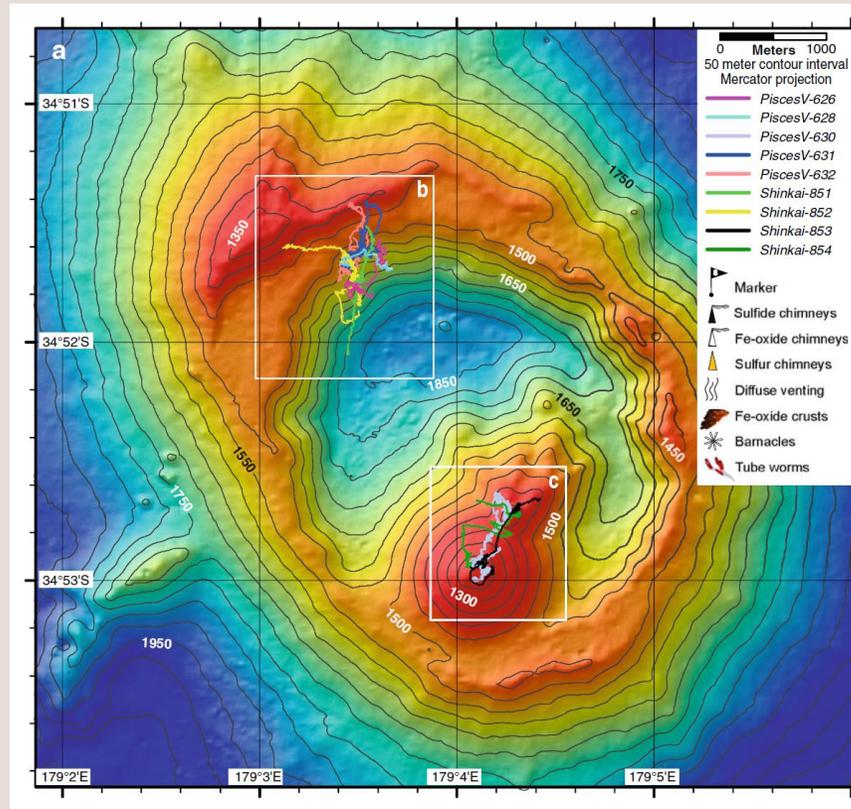
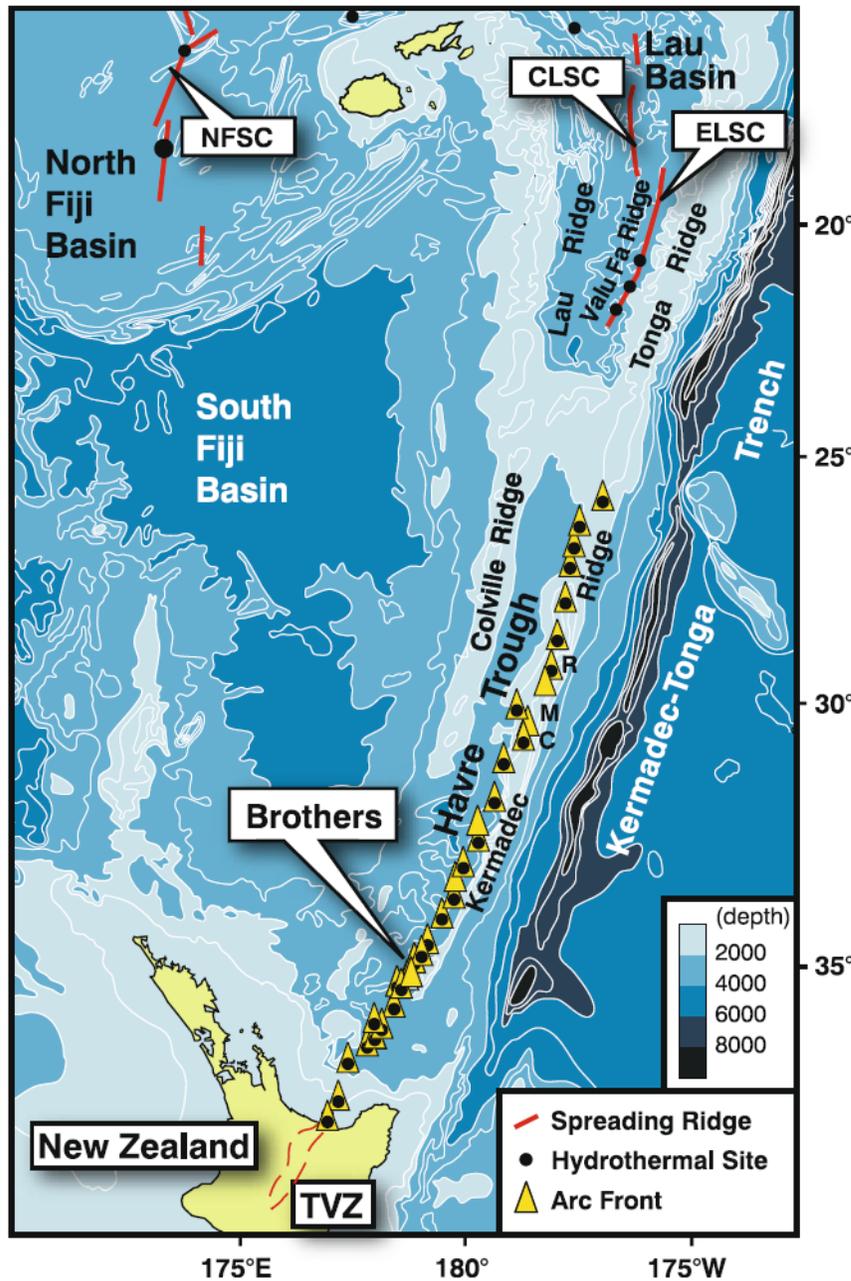


# Black Smokers: Ore Factories of the Deep



# EXEMPLO: SISTEMA DE ARCO DE ILHA TONGA-KERMADEC E RETRO-ARCO

Ambiente tectônico do sistema de arco-retroarco de Tonga-Kermadec com a placa australiana a oeste e a placa do Pacífico a leste

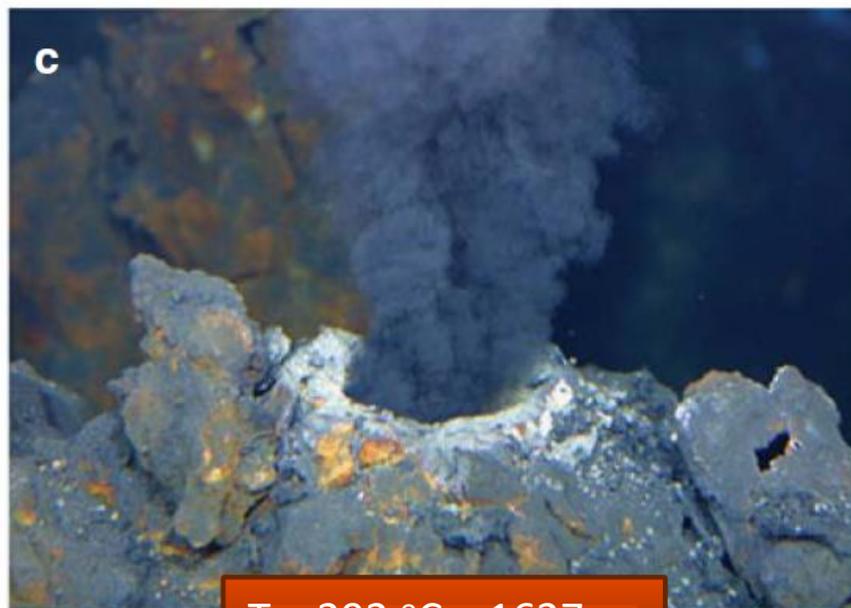
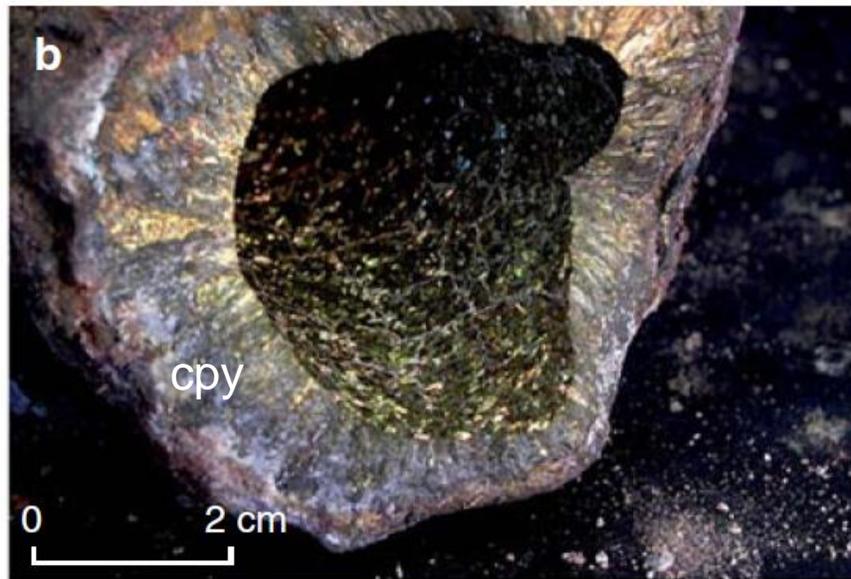


Cone (Brothers): fumarolas, chaminés ricas em sulfetos, crostas com óxidos de ferro

# SISTEMA DE ARCO DE ILHA TONGA-KERMADEC E RETRO-ARCO



T = 302 °C a 1665 m

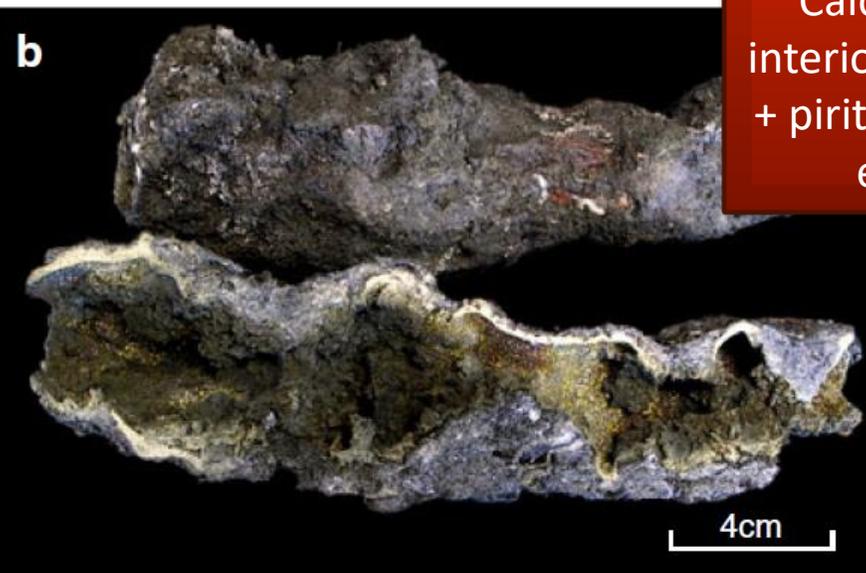


T = 292 °C a 1627 m



# CHAMINÉS

Descarga de fluidos a 300 °C;  
Chaminé cresceu por 4 anos;  
Evidências de fluidos  
magmáticos;  
Deposição de Cu e Au (até 71  
ppm)



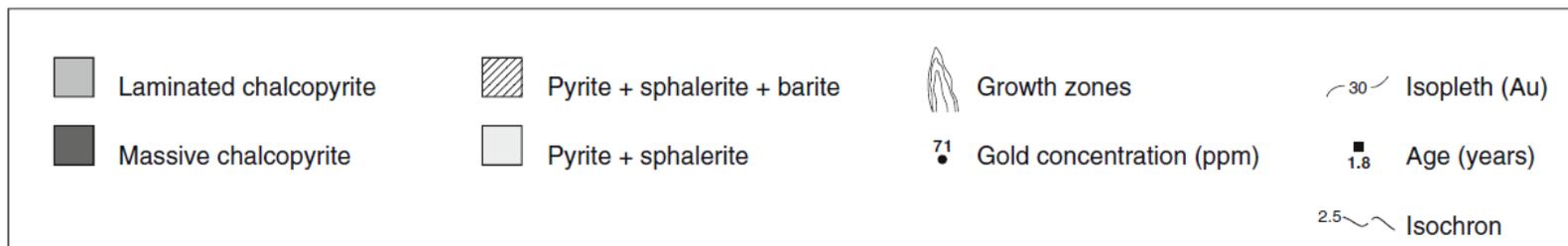
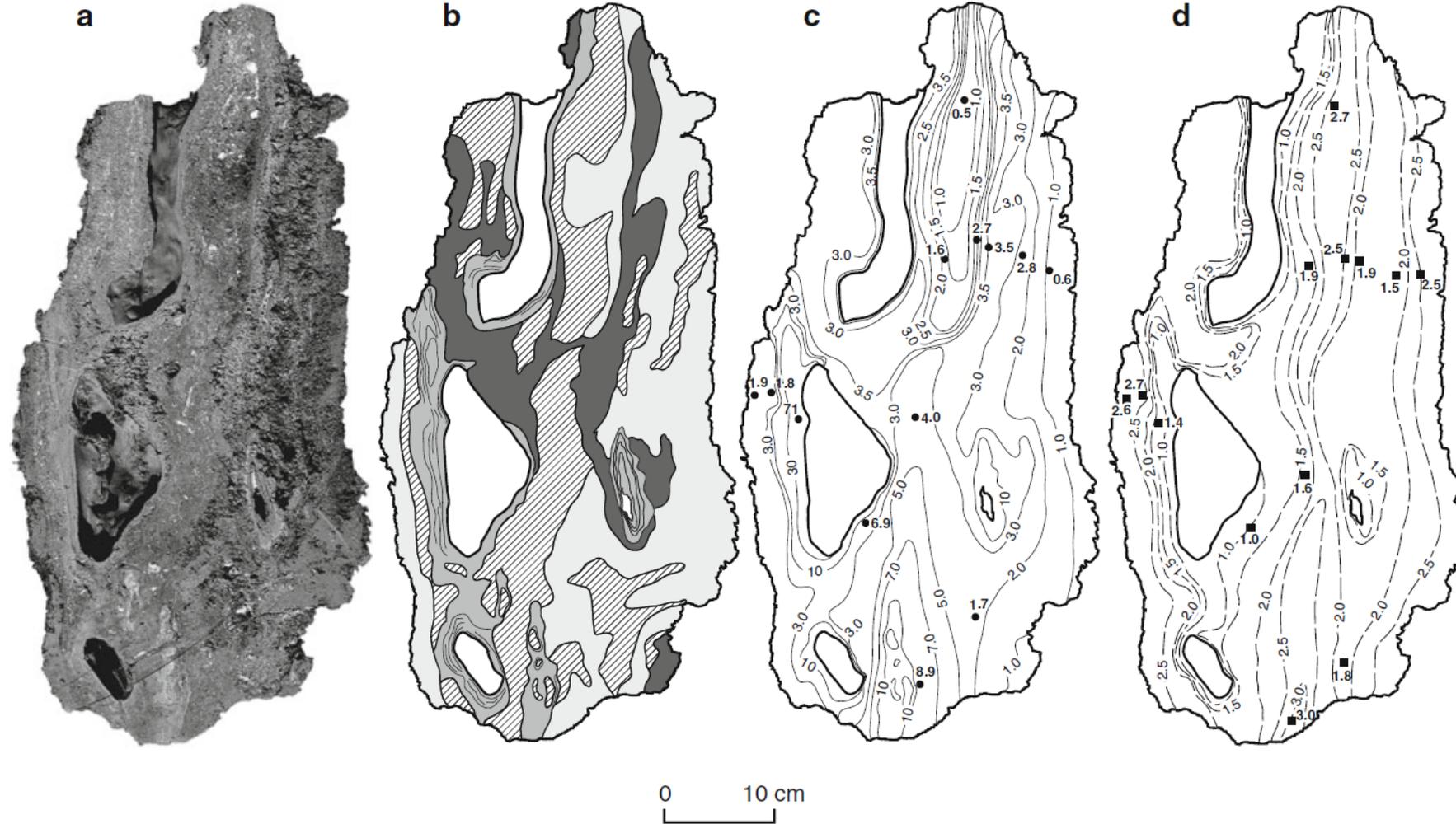
Calcopirita no  
interior e esfalerita  
+ pirita e barita no  
exterior

Esfalerita no  
interior e barita  
no exterior



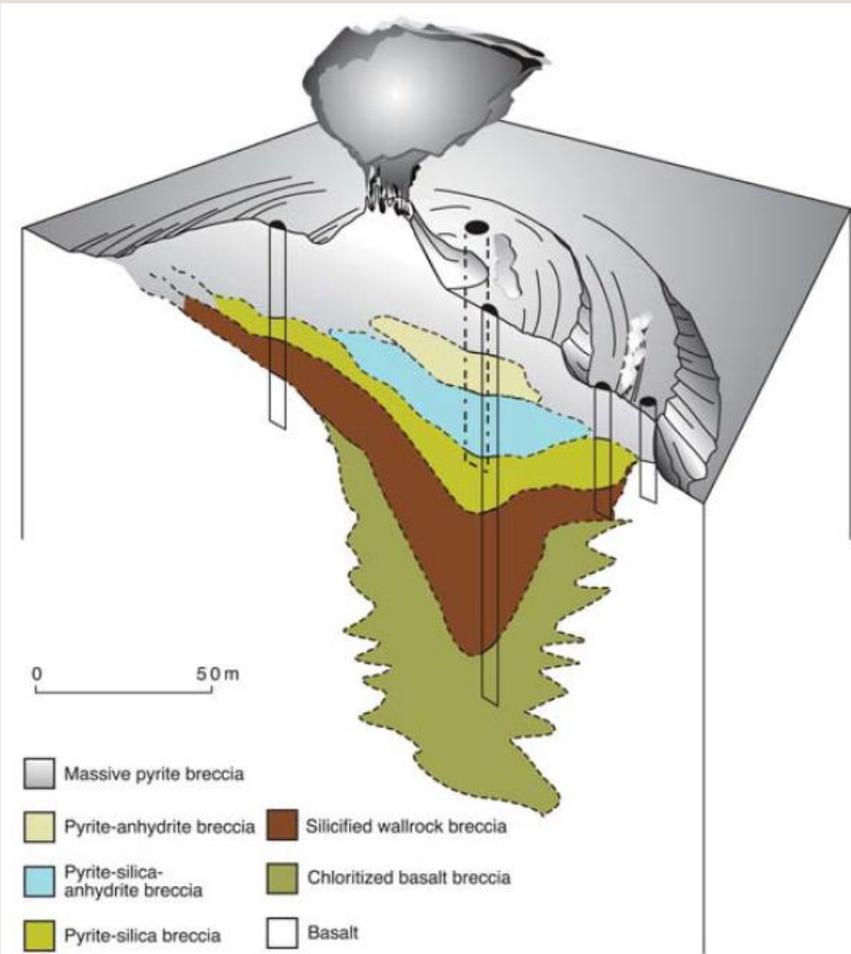
# SISTEMA DE ARCO DE ILHA TONGA- KERMADEC E RETRO-ARCO

## CHAMINÉ “LENA”

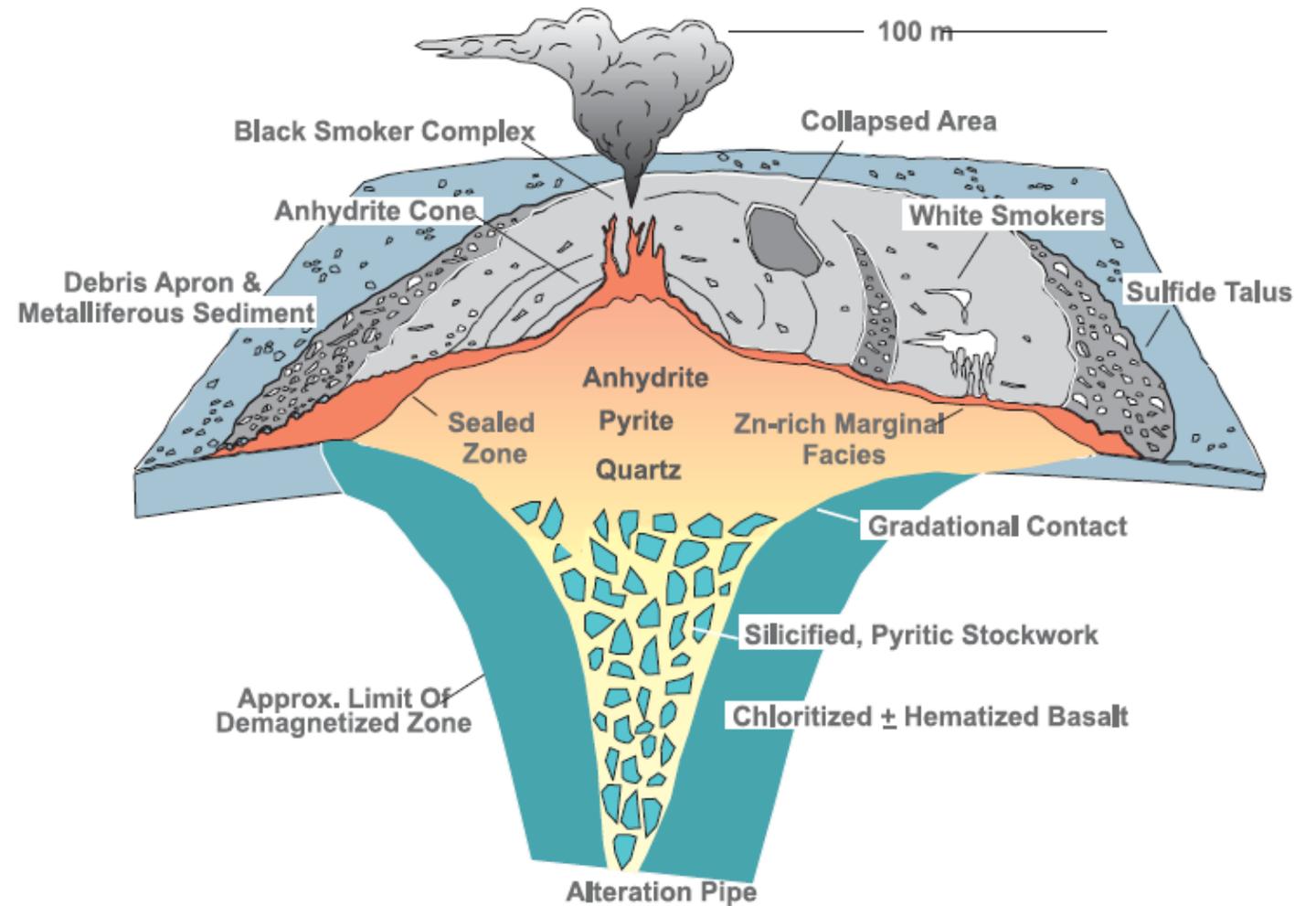




# Trans-Atlantic Geotraverse (TAG) Hydrothermal Vent

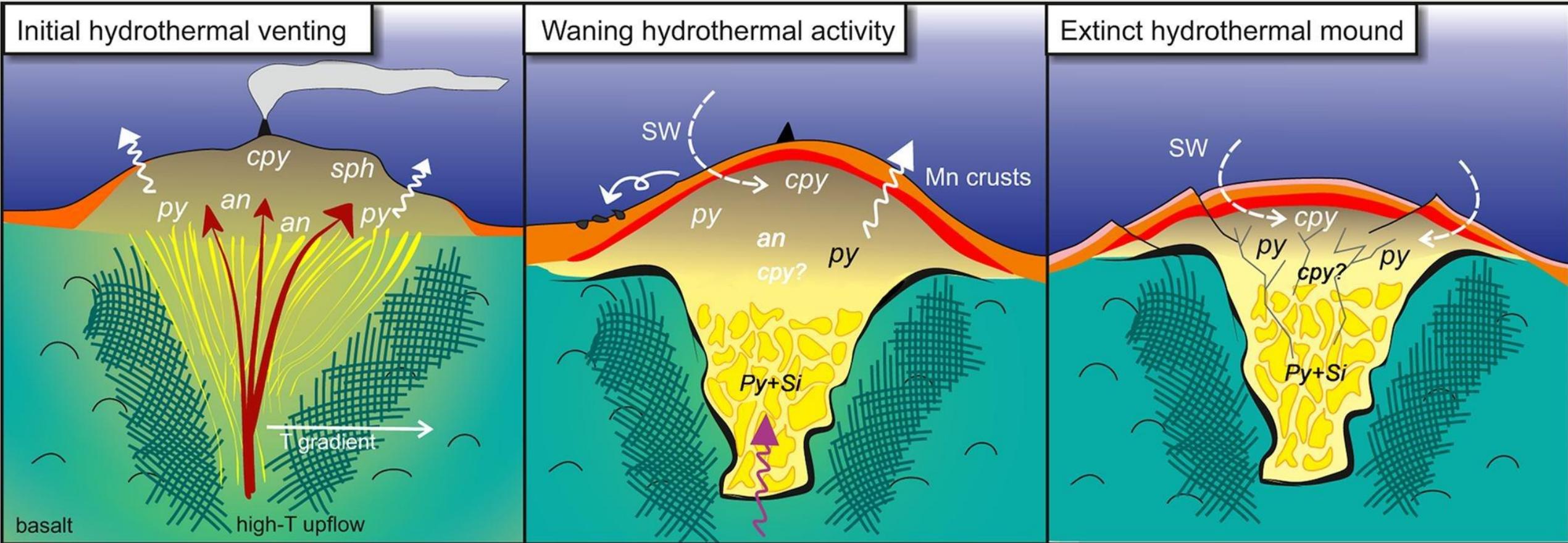


**FIGURE 2** A schematic cross section through the TAG hydrothermal mound and the underlying sulfide-rich zone based on drill holes. The basement underneath TAG reveals a vertical and concentric zoning typical of hydrothermal upflow zones, with a silicified and sulfidized central upper part and chloritized peripheral and lower zones. Modified from Humphris et al. (1995)



**FIG. 1.** Schematic of the modern TAG sulphide deposit on the Mid-Atlantic Ridge represents a classic cross-section of a VMS deposit, with a concordant semi-massive to massive sulphide lens underlain by a discordant stockwork vein system and associated alteration halo, or "pipe". From Hannington et al (1996).

# EVOLUÇÃO DAS CHAMINÉS E PRECIPITAÇÃO DE SULFETOS



- |                    |                |                         |                      |                     |                         |
|--------------------|----------------|-------------------------|----------------------|---------------------|-------------------------|
| Chloritised basalt | Stockwork      | Pelagic sediments       | Low-T diffuse flow   | <i>py</i> Pyrite    | <i>cpy</i> Chalcopyrite |
| Massive sulphides  | Silicified cap | Metalliferous sediments | Seawater penetration | <i>an</i> Anhydrite | <i>sph</i> Sphalerite   |
|                    |                |                         | Mass wasting         |                     |                         |

# DISTRIBUIÇÃO GLOBAL DOS VENTS HIDROTERMAIS

## Mid-ocean ridge

● Active

● Unconfirmed

## Arc volcano

▲ Active

▲ Unconfirmed

## Back-arc spreading center

■ Active

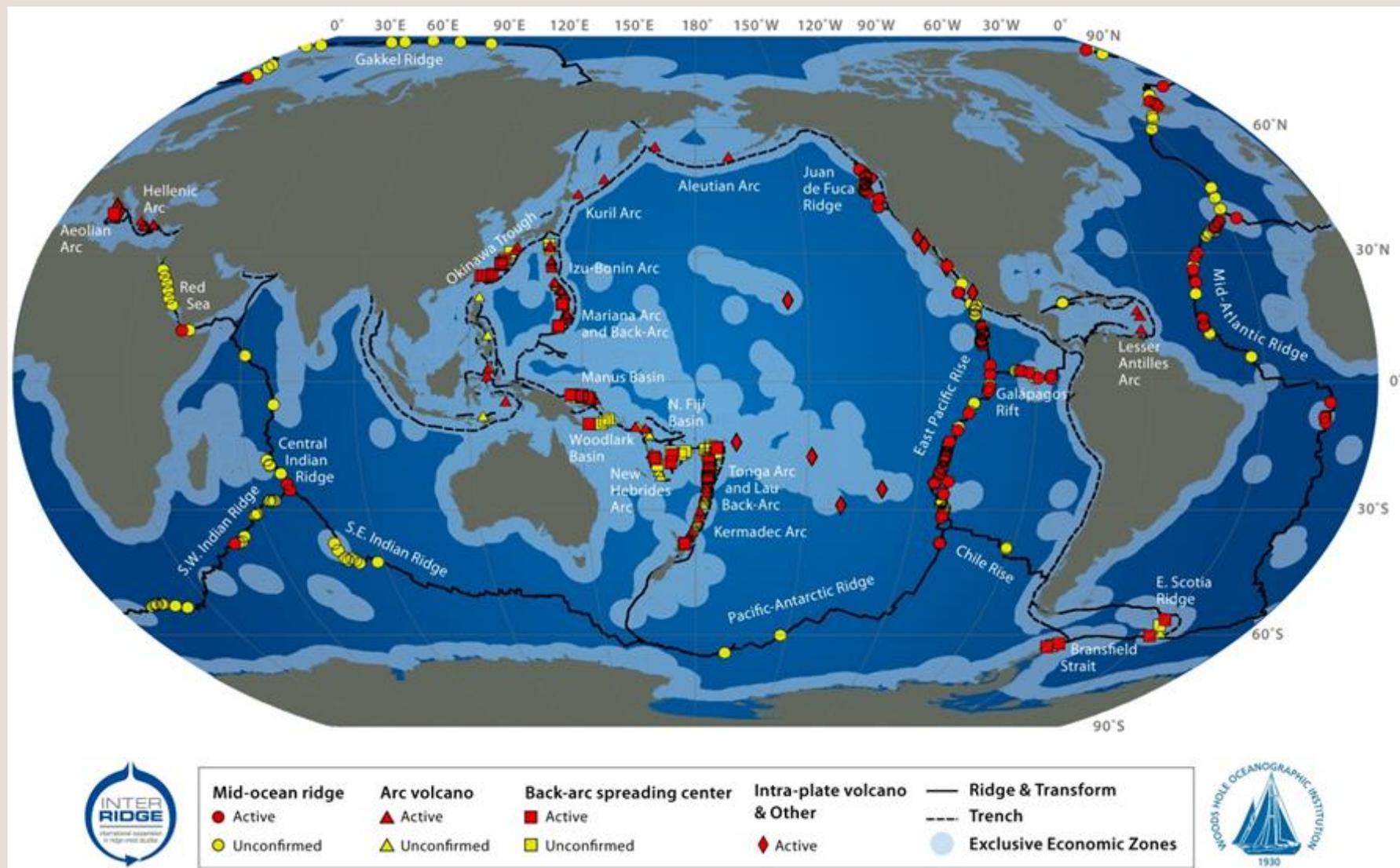
■ Unconfirmed

## Intra-plate volcano & Other

◆ Active

Seafloor massive sulphide  
(SMS) deposits

Hydrothermally extinct seafloor  
massive sulphide (eSMS)  
deposits



# DISTRIBUIÇÃO GLOBAL DOS DEPÓSITOS VHMS

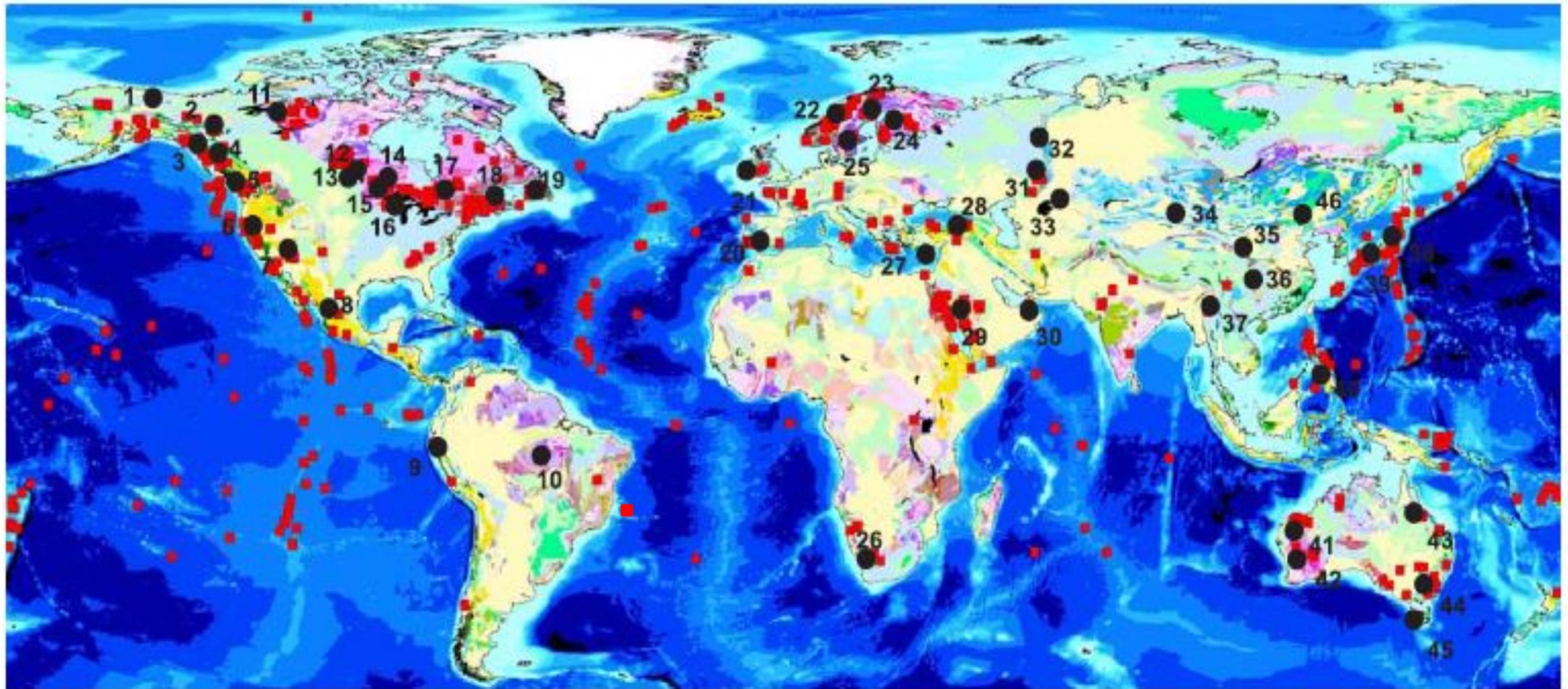
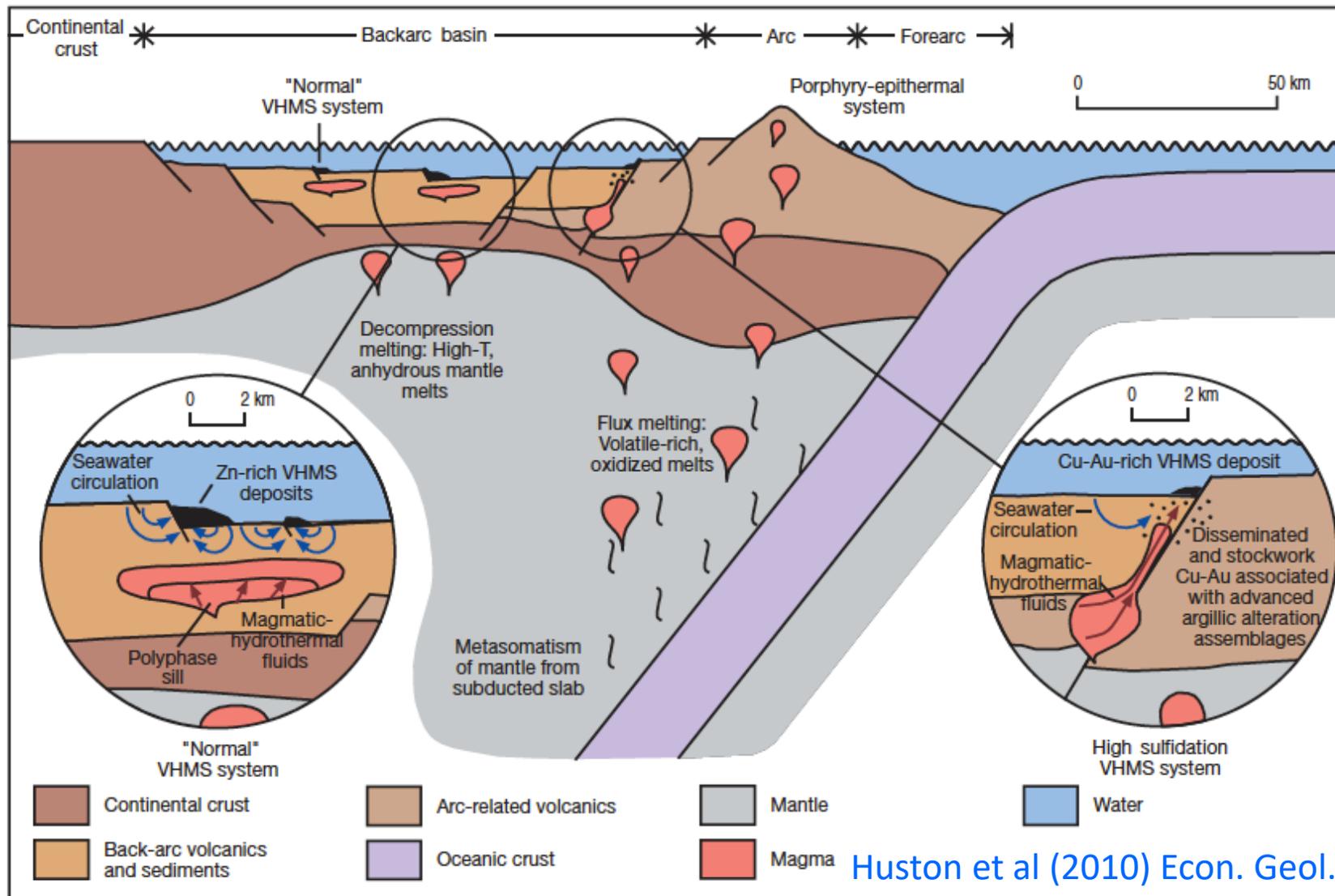


FIG. 5. Distribution of ancient and modern VMS deposits, with major districts highlighted with respect to known aggregate geological reserves. From GSC World Minerals Project.

*São conhecidos mais de 800 depósitos no mundo*

# VHMS: Bacias de retro-arco



Huston et al (2010) Econ. Geol.

FIG. 1. Diagrams showing possible settings of volcanic-hosted massive sulfide deposits in convergent margins.

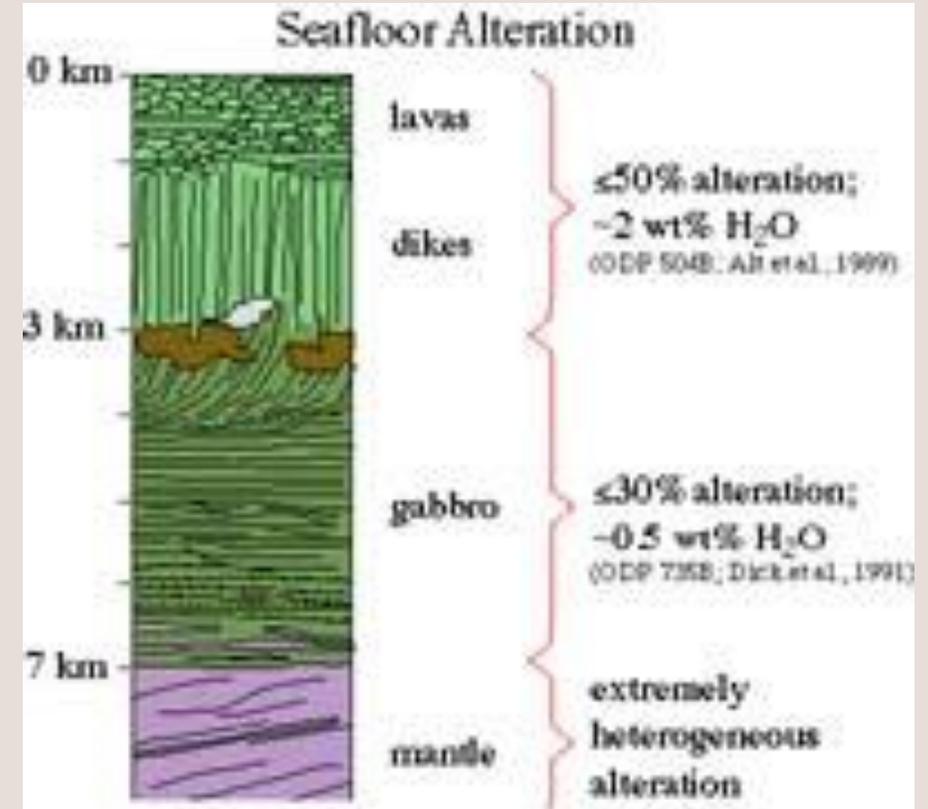
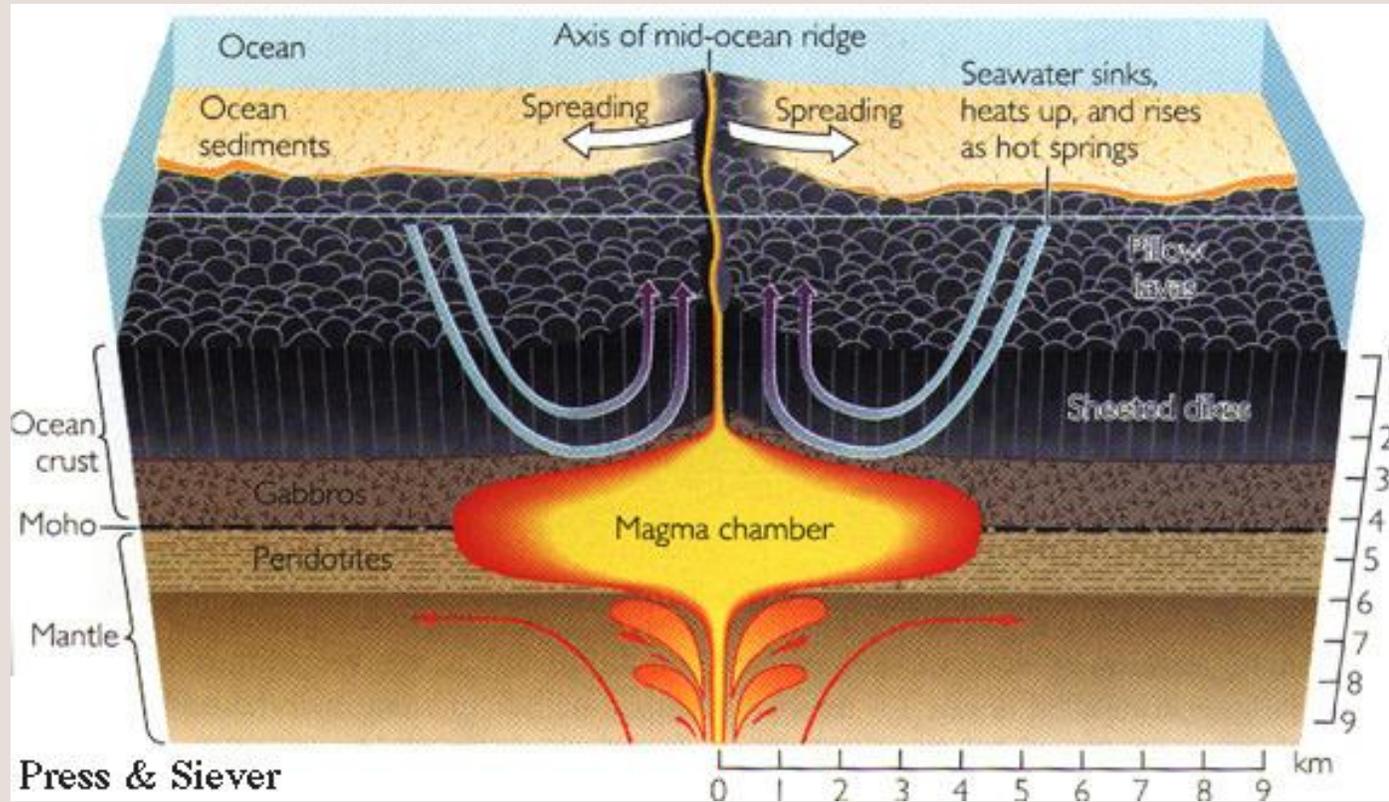
Depósitos VMS em bacias de retro-arco compartilham uma sucessão estratigráfica, com:

- (i) **Vulcanismo submarino** relacionado ao arco;
- (ii) Rápida extensão e **subsidência** para condições marítimas profunda;
- (iii) Desenvolvimento do **back-arc** durante a formação dos depósitos e;
- (iv) Retorno à compressão com **fechamento da bacia**.

Um segmento da sequência de back-arc é preservado durante a amalgamação dos arcos ou entre margem ativa e continente, preservando assim o depósitos maciços de sulfeto.

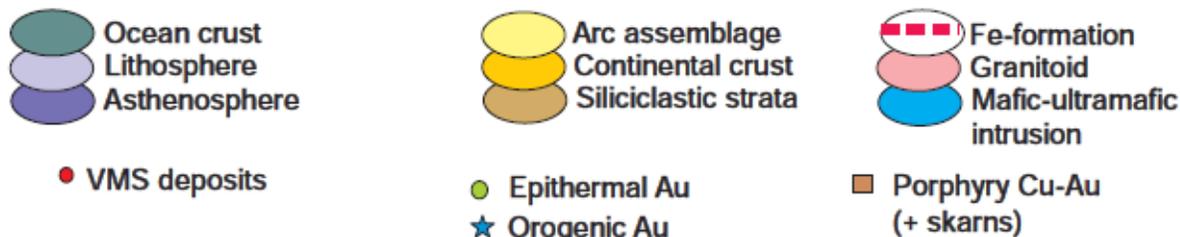
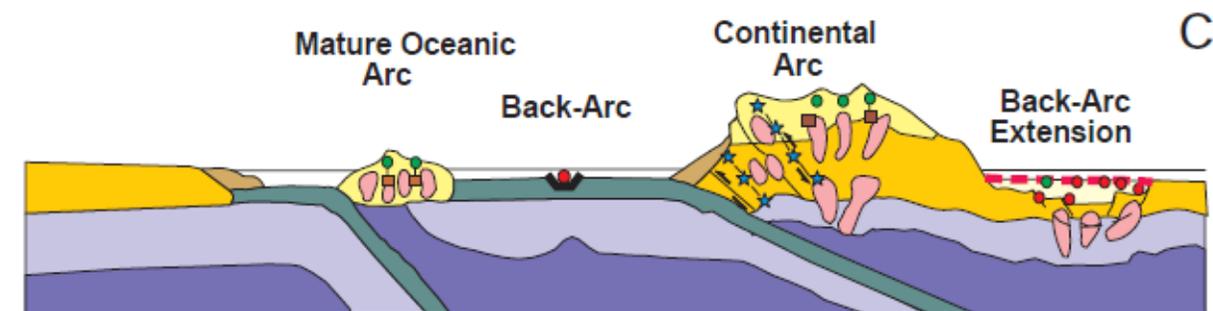
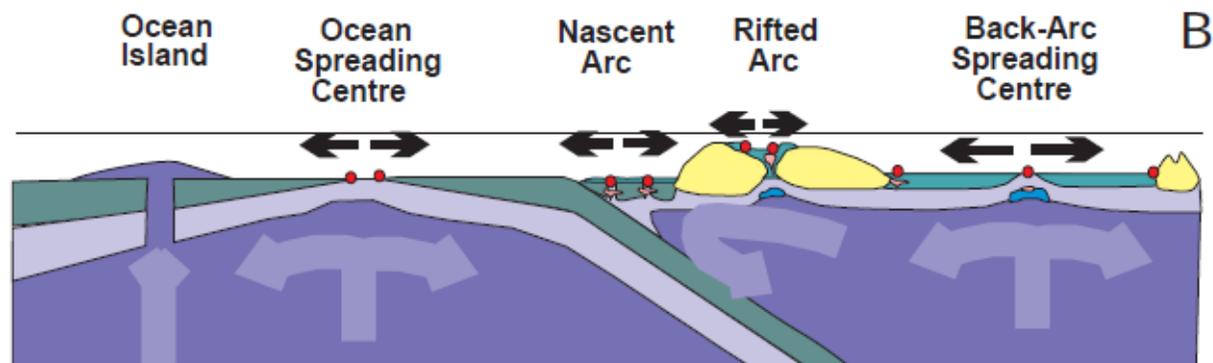
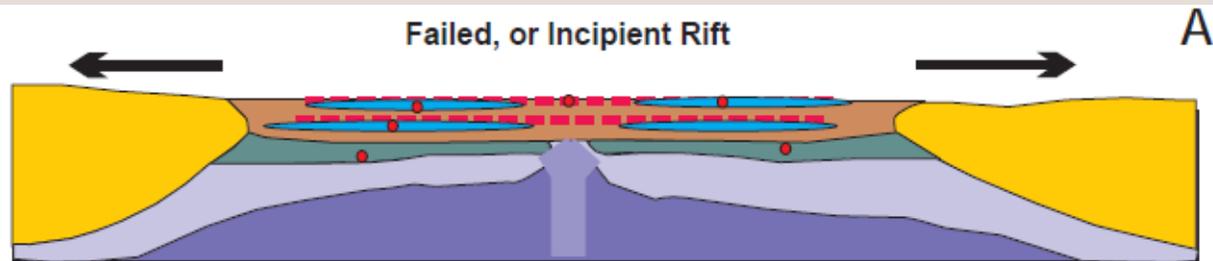
# Dorsais meso-oceânicas

(Press & Siever, 2002)



Associado à evolução das dorsais meso-oceânicas, é gerado pelo aquecimento da crosta oceânica em margens divergentes

Forte hidratação de rochas básicas em profundidades superiores a 3 km e temperaturas de 350 a 400 °C



(A) **Arqueano**: atividade de plumas mantélicas, rifteamento e formação de bacias e **crosta oceânica inicial** com **basaltos primitivos** e komatiítos, associados a BIFs e sills máfico-ultramáficos; **Fanerozoico**: análogos em **bacias de retro-arco** (rifteamento)

(B) Formação de bacias oceânicas associadas às **dorsais meso-oceânicas** com predominância de **rochas máficas**. Nos **arcos oceânicos** rochas **vulcânicas bimodais** também podem hospedar VMS.

(C) **Arcos maduros e subducção oceano-contidente** resulta na formação de depósitos hospedados por rochas **vulcânicas félsicas** e por **vulcânicas bimodais com rochas siliciclásticas**.

# DEPÓSITOS DE SULFETOS MAÇICOS DE Cu-Zn-Pb-(Au) (VMS ou VHMS)

Exemplos de depósitos de metais base VMS gigantes (> 50 Mt):  
Kidd Creek, Flin Flon, Brunswick (Canadá), Rio Tinto e Neves  
Corvo (Espanha)

- Os depósitos VMS podem ser:
- Depósitos de **Cu-Zn (componentes máficos mais importantes)**
  - Depósitos de **Cu-Zn-Pb-(Au)**

- Os depósitos VMS podem ser divididos em:
  - Depósitos do **tipo Noranda**
  - Depósitos do **tipo Kuroko**
  - Depósitos do **tipo Besshi**
  - Depósitos do **tipo Chipre**
- Os depósitos VMS, em geral, apresentam tamanho médio **(8 a 10 Mt)** e teores médios de **5 a 8 % de Cu + Pb + Zn.**



Depósito Rio Tinto, Iberian Pyrite Belt,  
Espanha

# DEPÓSITOS DE SULFETOS MAÇICOS HOSPEDADOS EM ROCHAS VULCÂNICAS

## Tipo Chipre

Cu (Zn)

- Associado com rochas **vulcânicas básicas e ofiolitos** em centros de expansão do assoalho oceânico (**meso-oceânicas**) e em bacias de retro-arco.
- Lentes ou montes de pirita maciça, sobrepostos por zonas ricas em cobre composta por veios anastomosados de quartzo e sulfetos em basaltos cloritizados

*Pirita, calcopirita*

## Tipo Besshi

Cu-Zn (Au)

- Ocorrem em ambientes mistos, associado com **sedimentos e vulcanismo** basáltico a dacítico relacionado ao estágio inicial de magmatismo cálcio-alcálico **de arcos de ilha**.
- Ocorrem em ambientes estruturais complexos.
- Zonas mineralizadas são ricas em pirrotita e pirita: pouco espessas e lateralmente extensivas.

*Pirita, calcopirita e esfalerita*

## Tipo Kuroko

Cu-Zn-Pb (Ag - Au)

Associado com **vulcanismo mais félsico** (dacítico a riolítico) relacionados aos estágios finais extensionais de evolução de arcos de ilha (**bacias de retro-arco**). Zonas de veios e *stockwork* são sotopostas ao minério que apresenta zoneamento geoquímico bem definido (Zn-Pb-Ag) verticalmente e lateralmente.

*Galena, esfalerita, calcopirita  
(± pirita, tetraedrita)*

# AMBIENTE TECTÔNICO VS. ASSOCIAÇÃO LITOESTRATIGRÁFICA

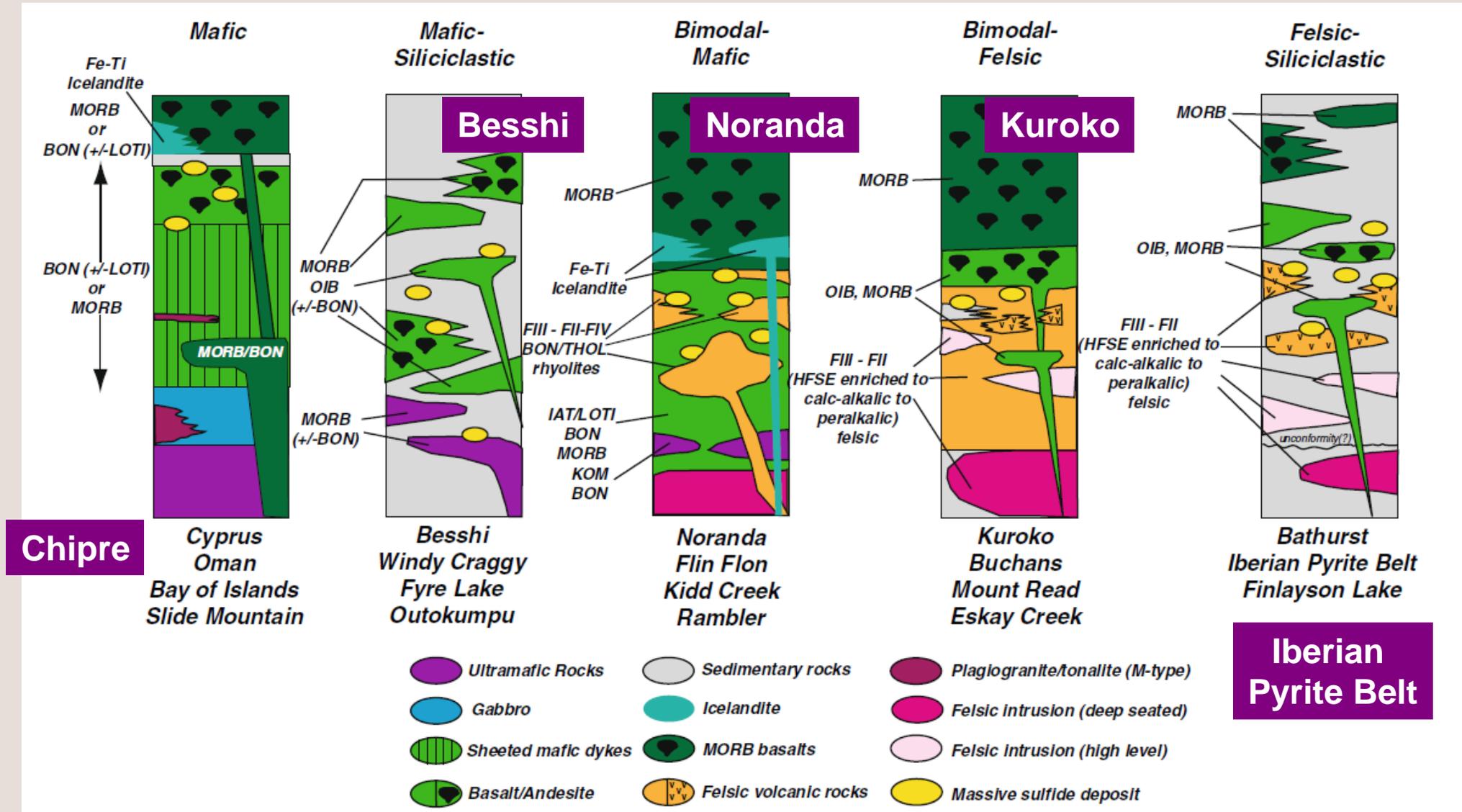
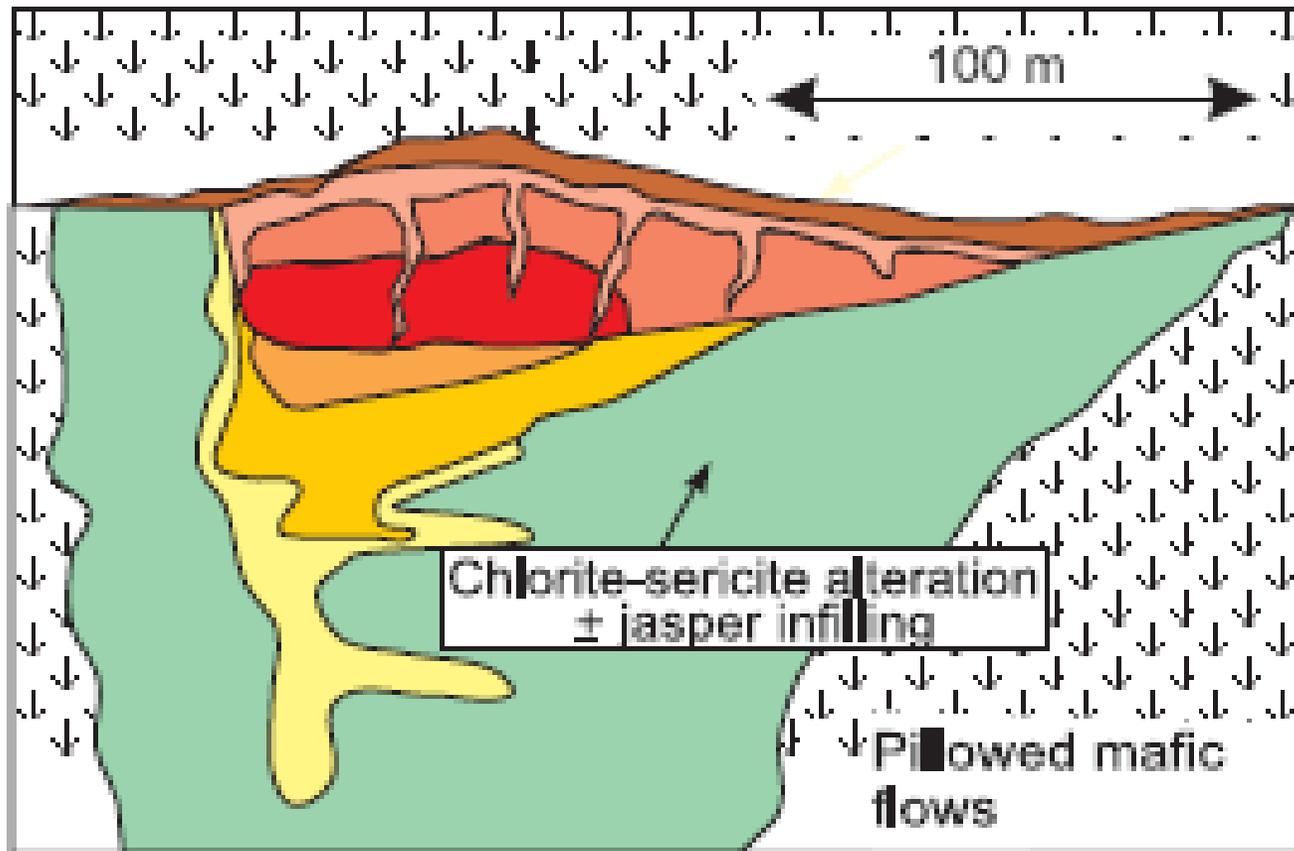


Fig. 1 Stratigraphic relationships and potential chemostratigraphic associations (i.e., petrochemical assemblages) for different VMS deposit groups. Modified from Piercey (2010)

# TIPO CHIPRE: ROCHAS VULCÂNICAS MÁFICAS



## MAFIC-DOMINATED

Avg: 1.3 Mt  
Med: 2.3Mt  
Cdn. average grade

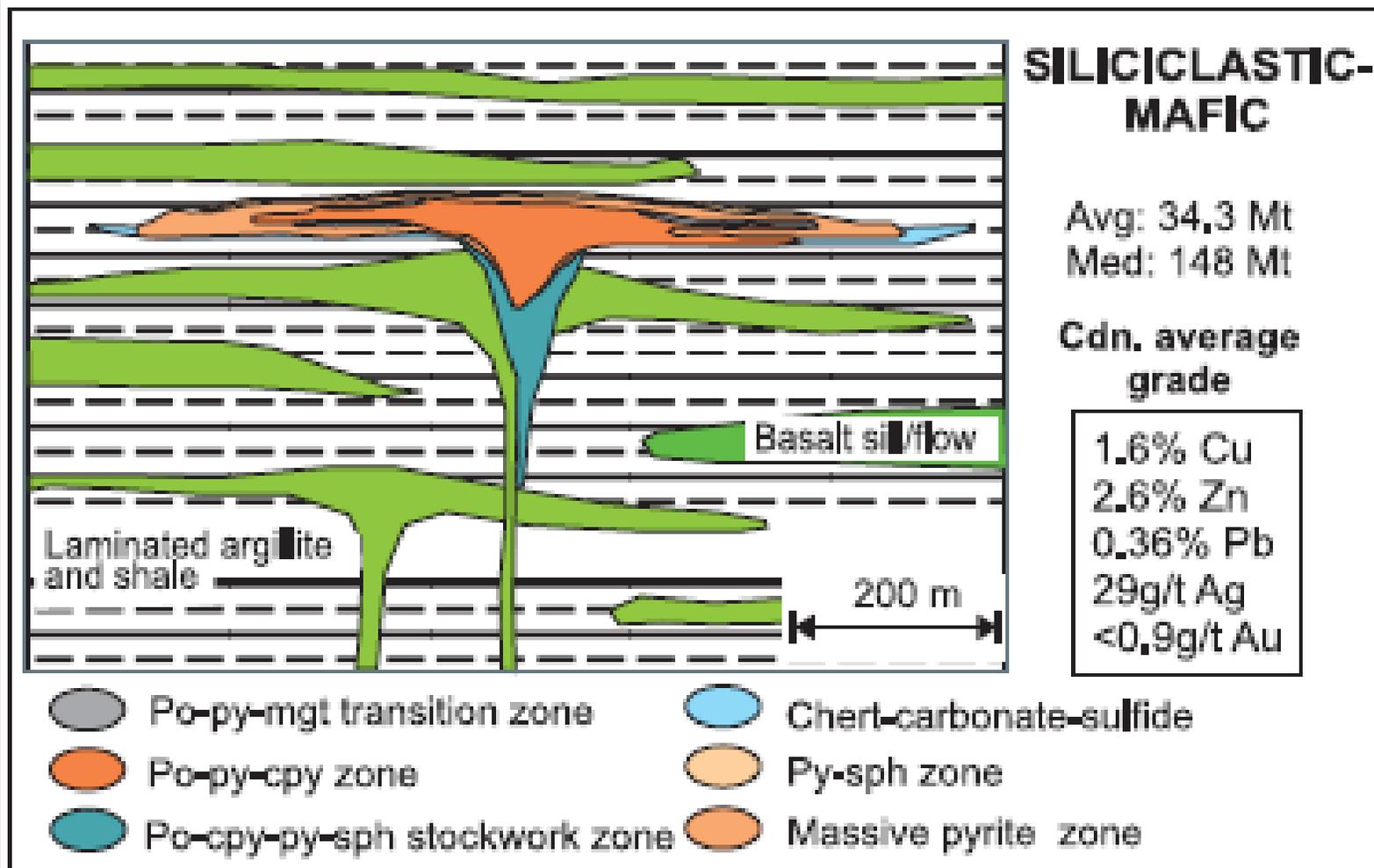
3.2% Cu  
1.9% Zn  
0.0% Pb  
15g/t Ag  
2.5g/t Au

- |                             |                   |                           |
|-----------------------------|-------------------|---------------------------|
| Banded jasper-chert-sulfide | Sp-cp-rich margin | Pyrite-qtz insitu breccia |
| Pyrite-quartz breccia       | Massive pyrite    | Quartz-pyrite stockwork   |
| Chlorite-pyrite stockwork   |                   |                           |

Depósitos VHMS associados com ambientes geológicos dominados por **rochas máficas** formas em ambientes de **dorsais meso-oceânicas: sequências ofiolíticas**

Exemplos: Chipre, Oman e Newfoundland, no Apalaches

# TIPO BESSHI: VULCÂNICAS MÁFICAS E ROCHAS SILICICLÁSTICAS



*Depósitos VHMS associados com proporções quase iguais de rochas vulcânicas máficas e siliciclásticas;*

*Rochas félsicas podem ser um componente secundário e rochas intrusivas máficas (e ultramáficas) são comuns.*

*Os depósitos Besshi no Japão e Windy Craggy, BC, representam distritos clássicos deste grupo.*

# TIPO BESSI: VULCÂNICAS MÁFICAS E ROCHAS SILICICLÁSTICAS

Chemie der Erde 78 (2018) 40–57



ELSEVIER

Contents lists available at ScienceDirect

Chemie der Erde

journal homepage: [www.elsevier.com/locate/chemer](http://www.elsevier.com/locate/chemer)



## Mineralogy, microchemistry and fluid inclusion studies of the Besshi-type Nudeh Cu-Zn VMS deposit, Iran

Sajjad Maghfouri<sup>a</sup>, Ebrahim Rastad<sup>a,\*</sup>, David R. Lentz<sup>b</sup>, Fardin Mousivand<sup>c</sup>, Flavien Choulet<sup>d</sup>

<sup>a</sup>Department of Geology, Faculty of Basic Sciences, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran  
<sup>b</sup>Department of Earth Sciences, University of New Brunswick, New Brunswick, Canada  
<sup>c</sup>School of Geosciences, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran  
<sup>d</sup>Chrono-Environnement, Université de Franche-Comté/CNRS, 25030 Besançon Cedex, France

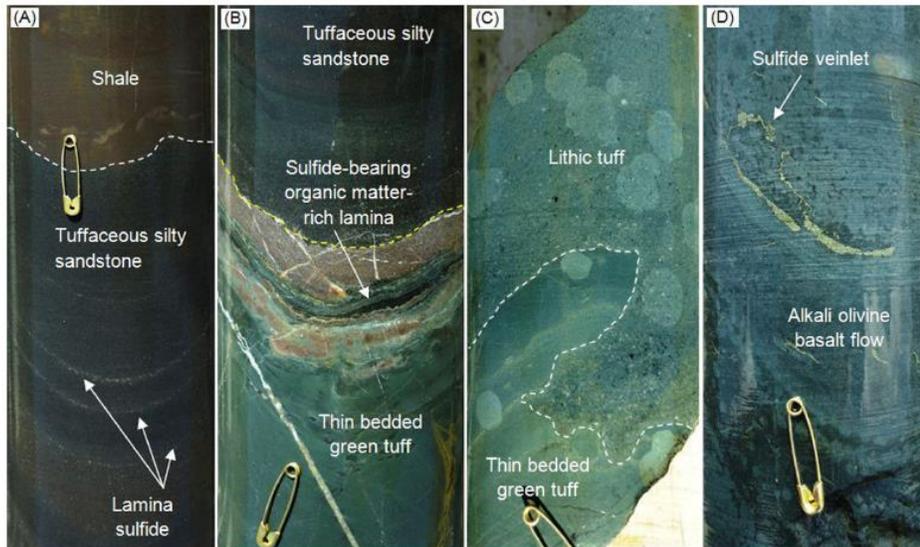
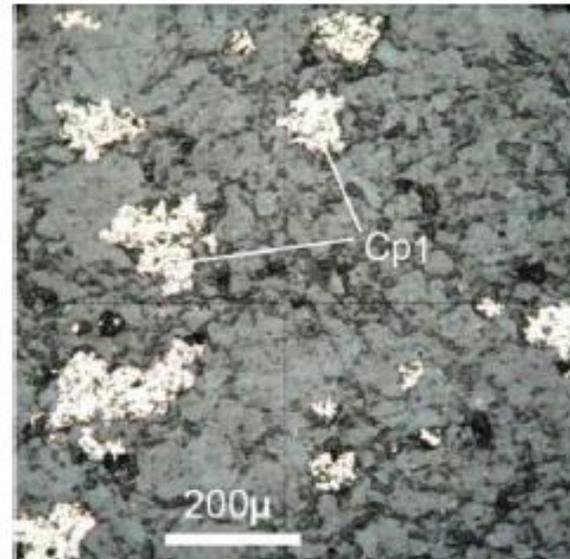
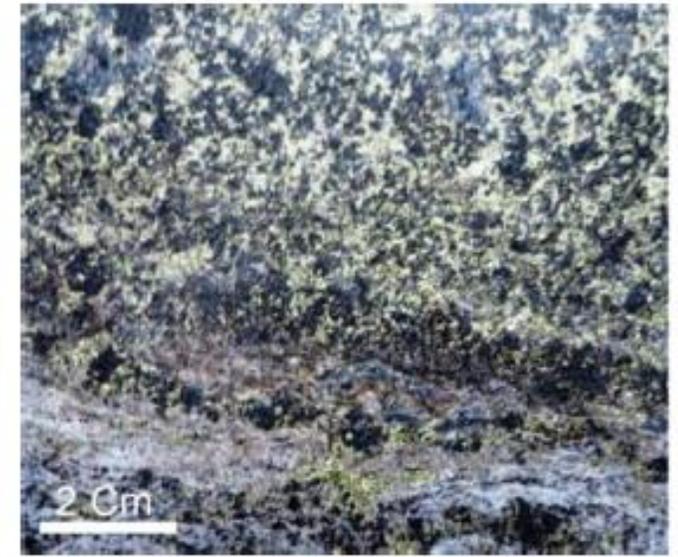
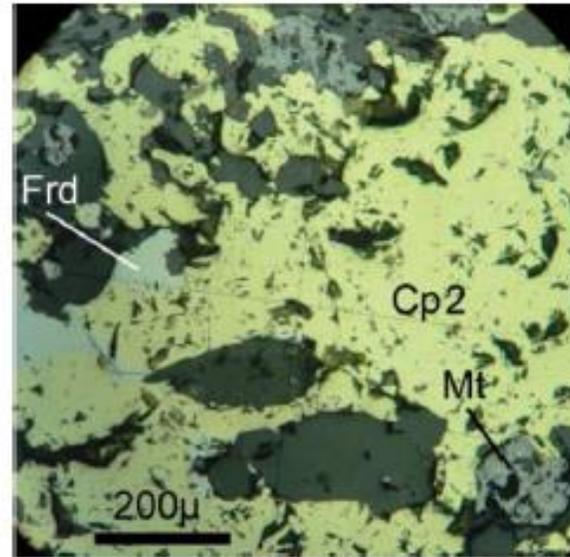


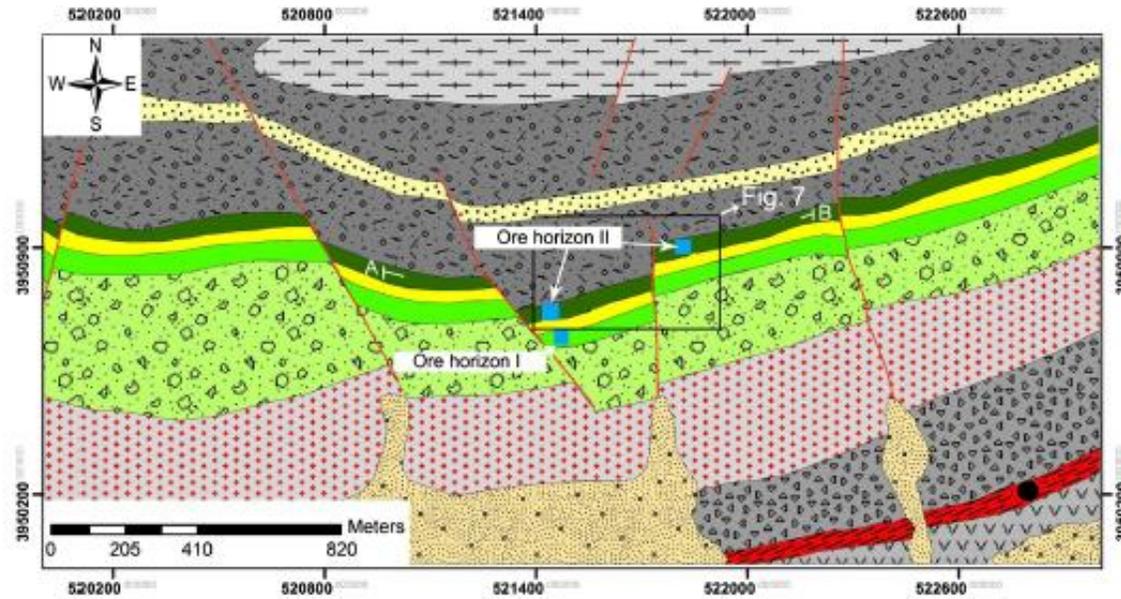
Fig. 5. Representative images of selected drill cores. A) Banded sulfide ore that commonly occurs on top of tuffaceous silty sandstone in the member 4. B) Sulfide-bearing organic matter-rich lamina in the host rock. C) Lateral facies changes from thin bedded green tuff to lithic tuff. D) Veinlet sulfide ore that occurs in the alkali olivine basalt flow. (For interpretation of the references to colour in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)



# TIPO BESSHI: VULCÂNICAS MÁFICAS E ROCHAS SILICICLÁSTICAS

S. Maghfouri et al. / Journal of Asian Earth Sciences 125 (2016) 1–21

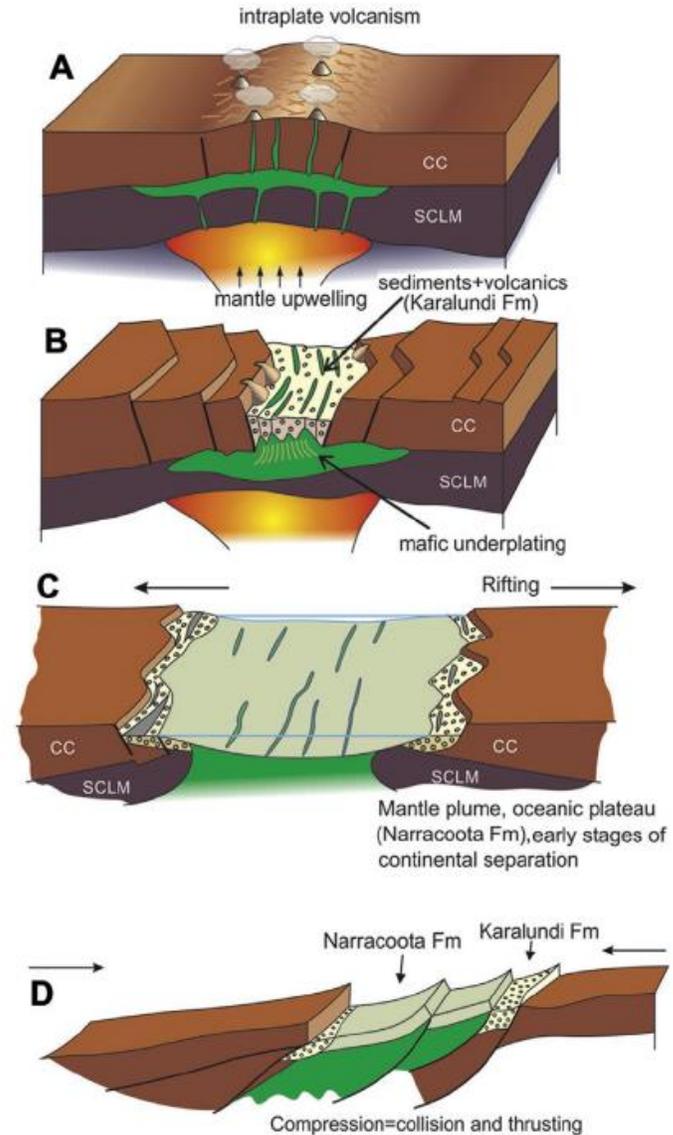
7



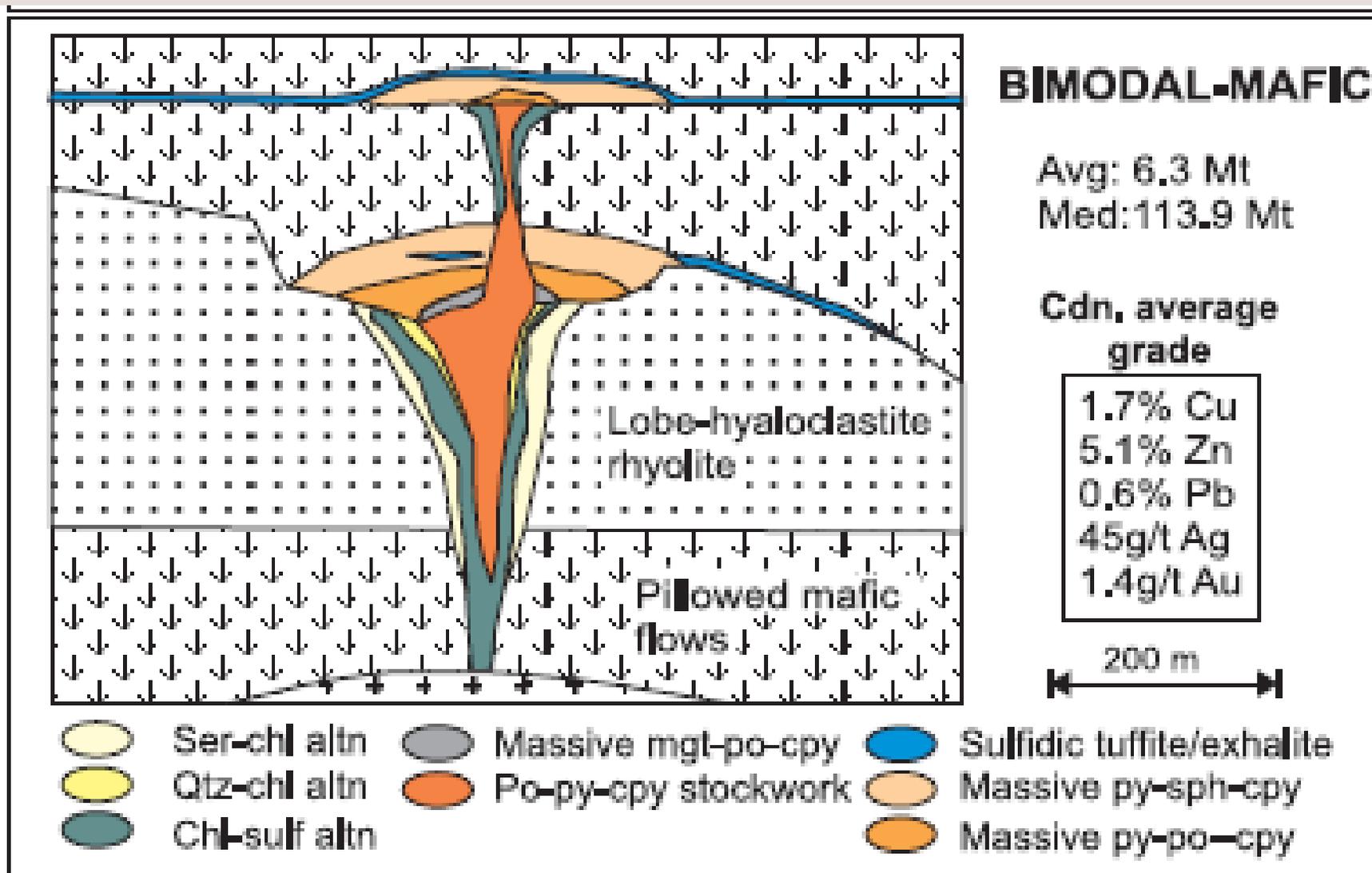
## Legend



Fig. 5. Geology map of the Nudeh deposit showing the location of Mn deposits in the red tuff and Cu-Zn VMS deposits in the alkali olivine basalt flow and tuffaceous silty sandstone (outlined rectangle is the area shown in Fig. 7).



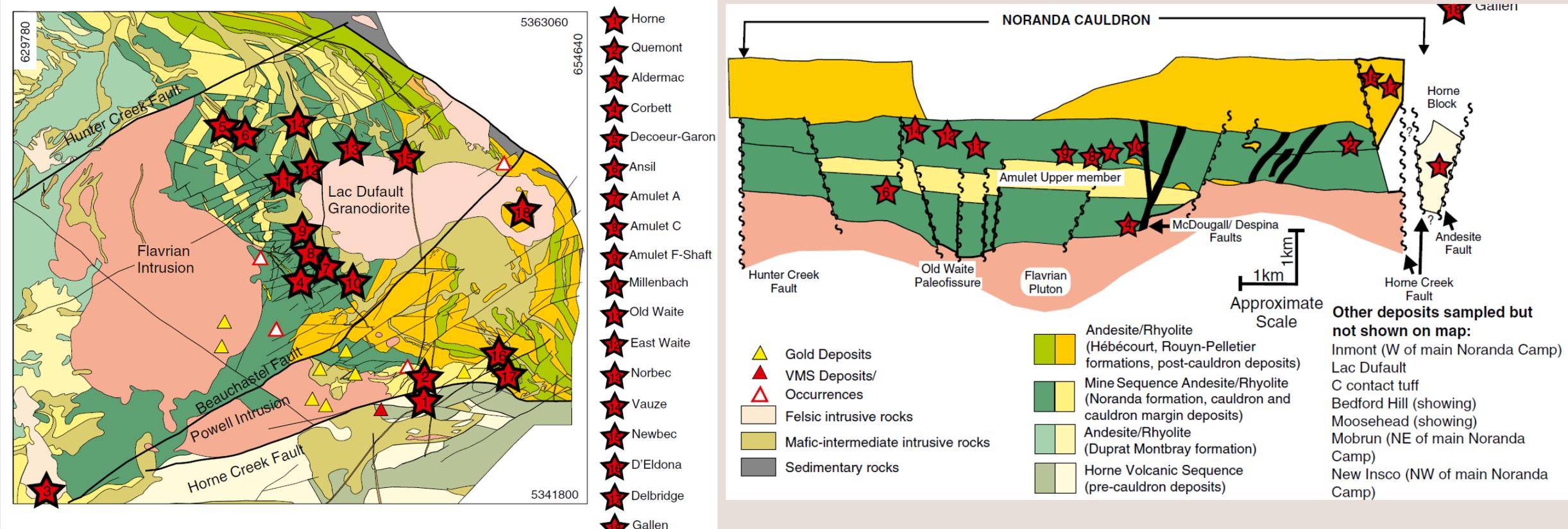
# TIPO NORANDA: ROCHAS VULCÂNICAS MÁFICAS – BIMODAIS (ARQUEANOS)



*Depósitos VHMS associados com ambientes dominados por rochas vulcânicas máficas, mas com até 25% rochas vulcânicas félsicas.*

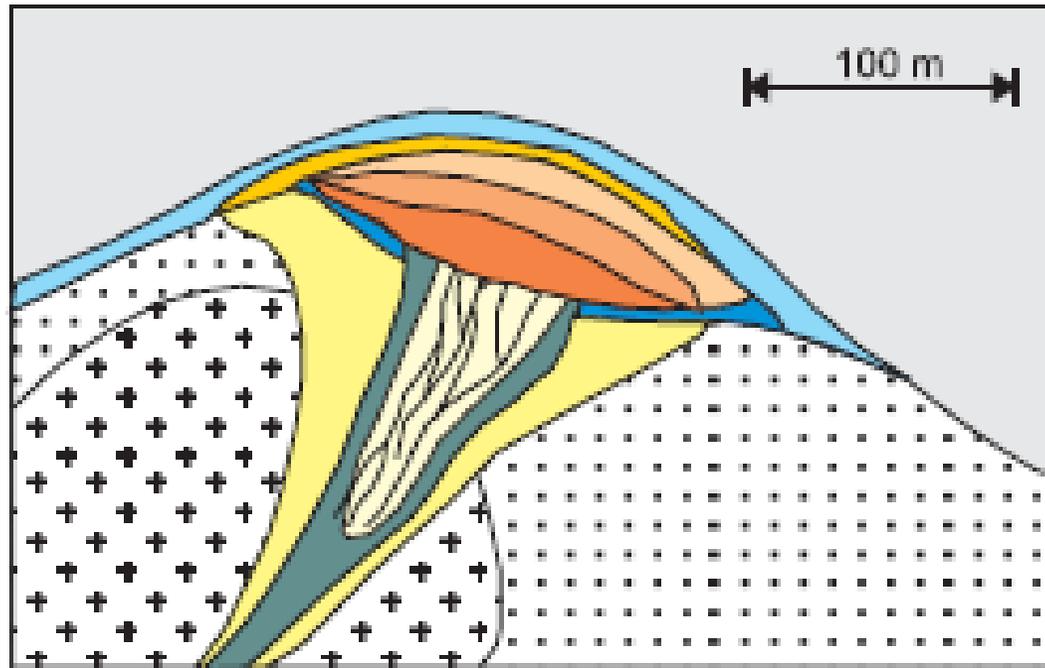
***Noranda, Flin Flon-Snow Lake e Kidd Creek.***

# NORANDA: VMS ARQUEANO



**Fig. 2** Geological map of the main Noranda camp and associated E-W schematic cross section, with *red stars* indicating locations that have been sampled for this study (modified from Gibson and Galley 2007; Santaguida et al. 1998)

# TIPO KUROKO: VULCANISMO BIMODAL-FÉLSICO



## BIMODAL-FÉLSICO

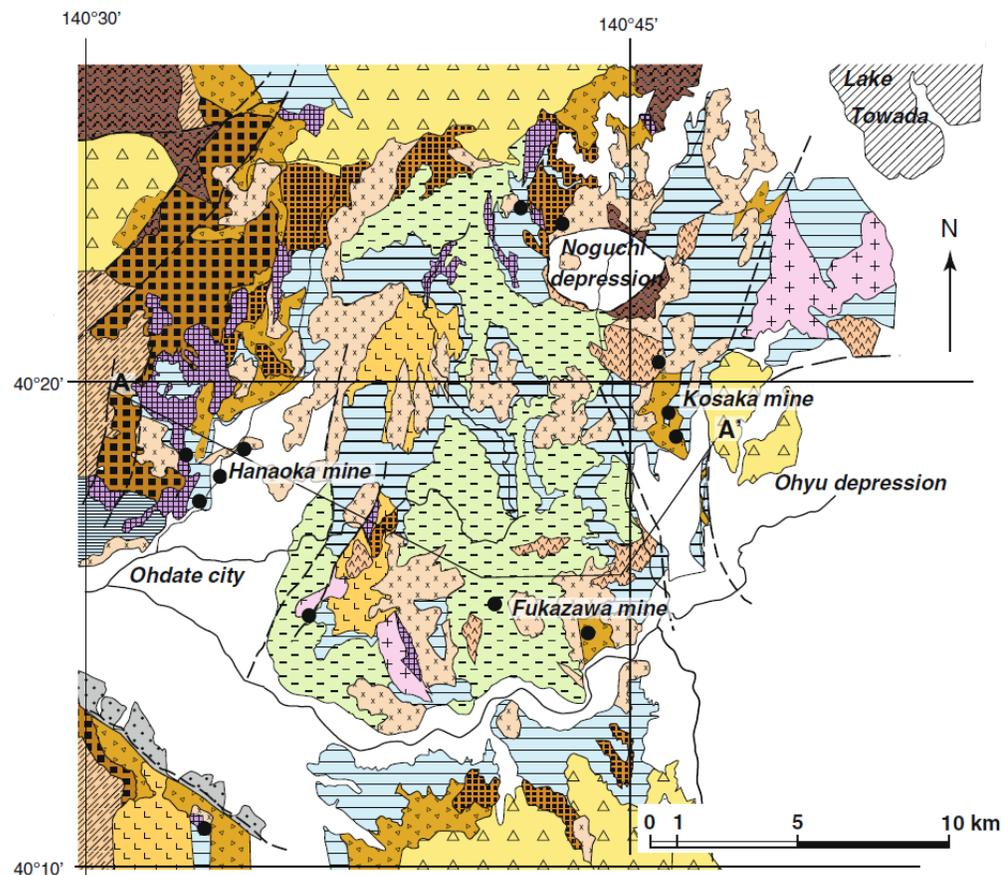
Avg: 5.5 Mt  
Med: 14.2 Mt  
Cdn. average grade

1.3% Cu  
6.1% Zn  
1.8% Pb  
123g/t Ag  
2.2g/t Au

- |                          |                               |
|--------------------------|-------------------------------|
| Sericite-quartz Detrital | Py-sph-gn-tet-boul-bour-Au-Ag |
| Chlorite-sericite Msv.   | Py-sph-gn                     |
| Quartz-chlorite Sulf.    | Py-sph-cpy                    |
| Cpy-py veins             | Barite (Au)                   |
|                          | Carbonate/gypsum              |

Depósitos VMS associados com sequências vulcânicas bimodais, onde **rochas félsicas** estão em maior abundância que rochas máficas, e tem apenas pequenas porções de rochas sedimentares.

Os depósitos de: **Kuroko**, Japão; **Buchans**, Canadá; e **Skellefte**, Suécia são distritos clássicos deste grupo.



#### Post-Kuroko formation

- Quaternary Alluvium and volcanic debris
- Pliocene lake sediments
- Pliocene explosion tuff breccia

#### Middle to Late Miocene

- Alternating bed of fine tuff and mudstone
- Alternating bed of pumice tuff and mudstone
- Rhyolite lava
- Basaltic pyroclastic rocks

#### Pre-Kuroko formation

##### Middle Miocene

- Rhyolitic tuff breccia
- Rhyolitic hyaloclastite (mainly rhyolite lava)
- Mudstone
- Basalte lava and sill

##### Early Miocene

- Andesite lava and tuff breccia

##### Pre-Tertiary

- Phyllite and chert

#### Lava dome and dyke

- Andesite
- Dacite
- Dolerite
- Tonalite and Quartz porphyry
- Fault
- Pliocene depression
- Kuroko deposits
- A — A Cross section line

## ASSOCIAÇÃO DE ROCHAS VULCÂNICAS E DEPÓSITOS DO TIPO KURUKO

**Distrito de Hokuroku:** caldera **submarina** formada no estágio tardio de rifte/retro-arco associado ao arco Honshu;

**Caldera:** **vulcânicas bimodais** com *pillow lavas* e hioloclastitos basálticos recobertos por lavas riolíticas a dacíticas e brechas vulcânicas;

**Domos riolíticos, tufos félsicos e brechas piroclásticas** cortam e recobrem a sequência bimodal: **pré a sin-mineralização VMS;**

**Depósitos VMS:** recobertos por lamitos e tufos de púmice gerados no início do estágio de vulcanismo do estágio de arco de ilha.

Fig. 5 Geologic map of the Hokuroku district (modified after Yamada and Yoshida 2004)

Yamada &  
Yoshida  
(2011)

# ASSOCIAÇÃO DE ROCHAS VULCÂNICAS E DEPÓSITOS DO TIPO KURUKO

**Depósitos VMS do tipo Kuroko:** relacionados à mudanças na atividade vulcânica (composição do magma, estilo da atividade e volume da erupção) e no ambiente tectônico;

**Estágios 1 e 2:** vulcanismo de margem continental (0,7 a 1 km);

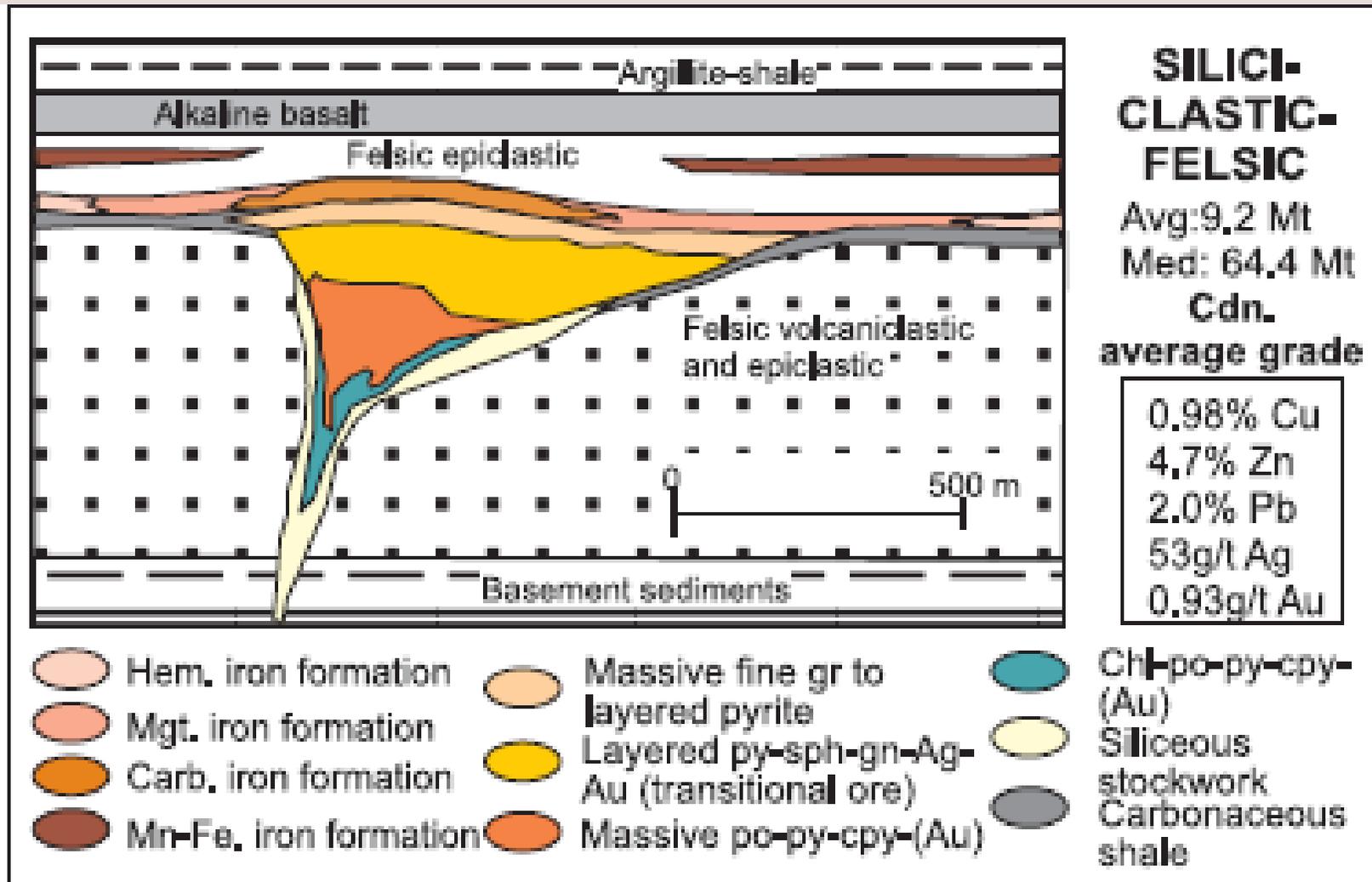
**Estágio 3:** início da bacia de retro-arco (300-500 m) – basaltos com *pillow lavas* e sedimentos;

**Estágio 4:** estágio tardio de rifteamento na bacia de retro-arco (> 5 km de basaltos, rochas vulcanoclásticas, rochas vulcânicas basálticas-andesíticas e sequências sedimentares);

**Estágios 5 e 6:** formação da caldeira – púmice, domos riolíticos, atividade piroclástica, tufos soldados félsicos e brechas;

- Quase todos os depósitos **VMS do tipo Kuroko** se formaram em um período de 15 a 14 Ma
- Formação dos depósitos coincide com a transição do estágio extensional da bacia de retro-arco ao estágio de arco de ilha;
- Mudança do vulcanismo: de volumosos derrames basálticos e vulcanismo bimodal a púmice félsico em caldeiras em ambiente de águas rasas a terrestre;
- Depósitos associados à colocação de riólitos em 14 Ma;
- Rápida sedimentação clástica foi favorável à preservação dos depósitos VMS;

# CINTURÃO PIRITOSO DA IBÉRIA: VULCÂNICAS FÉLSICAS-SILICICLÁSTICAS



Depósitos VMS associados predominantemente por rochas sedimentares siliciclásticas com abundantes rochas félsicas e menos de 10% de material máfico.

São muitas vezes ricos em xistos félsicos-siliciclásticos ou siliciclásticos bimodais.

Bathurst, New Brunswick, Canadá; Ibérian Pyrite Belt, Espanha e Portugal; e Finlayson Lake, Yukon, Canadá, são os distritos clássicos deste grupo

# Cinturão Piritoso da Ibéria



Sulfetos maciços gerados pela substituição de: (a) rochas vulcanoclásticas substituídas por polimetálicas sulfetos, de Aguas Teñidas, mostrando rochas vulcânicas dacíticas incrustadas e substituídas por sulfetos (galena, esfalerita, pirita e calcopirita) e carbonatos; e (b) folhelhos pretos de Cueva de la Mora, na qual agregados de pirita substituem amplamente o rocha.

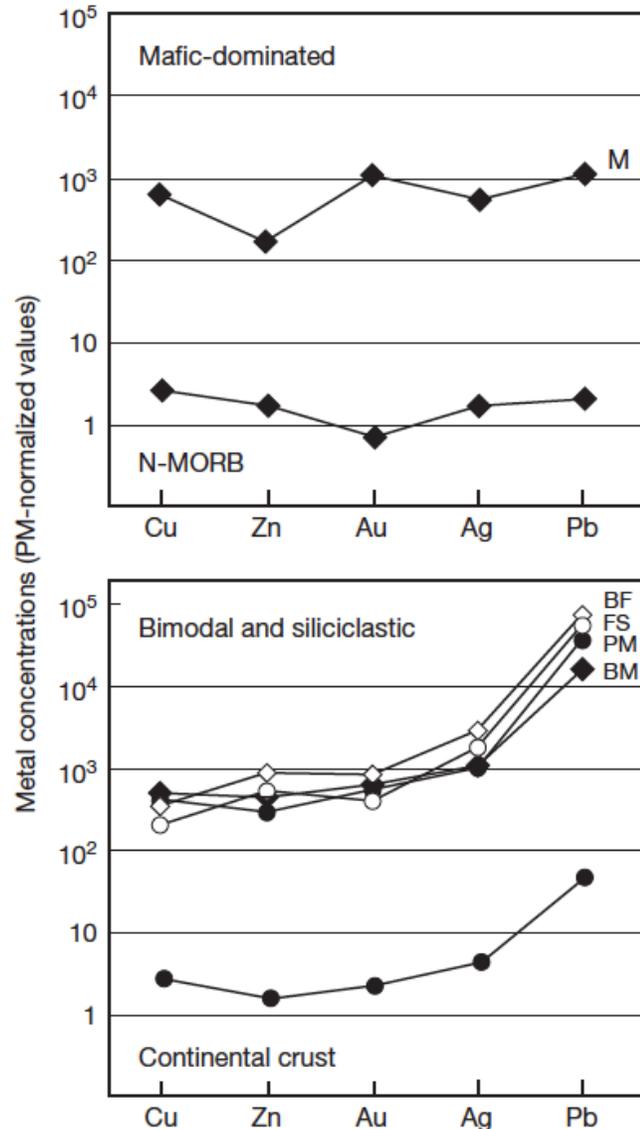
# Relação entre o conteúdo metalífero e natureza das rochas hospedeiras: evidências do papel das rochas vulcânicas como fonte de metais

**Table 1** Geometric mean concentrations of metals in VMS ores according to host-rock type

	<i>Mafic</i>	<i>Bimodal mafic</i>	<i>Mafic–pelitic</i>	<i>Bimodal felsic</i>	<i>Felsic–siliciclastic</i>
Cu (wt%)	1.82 <b>Chipre</b>	1.24 <b>Noranda</b>	1.23 <b>Besshi</b>	1.04 <b>Kuroko</b>	0.62 <b>Iberian Pyrite Belt</b>
Zn (wt%)	0.84	2.32	1.58	4.36	2.70
Pb (wt%)	0.02	0.30	0.68	1.14	1.09
Au (ppm)	1.40	0.81	0.75	1.06	0.59
Ag (ppm)	11	21	19	56	39
Total ore (tonnes)	2 699 466	3 421 075	4 721 093	3 320 784	7 139 305
Total metal (tonnes)	63 035	128 515	132 968	198 461	324 748
<i>N</i>	76	291	90	241	106

Source: Franklin JM, Gibson HL, Jonasson IR, and Galley AG (2005) Volcanogenic massive sulfide deposits. In: Hedenquist JW, Thompson JFH, Goldfarb RJ, and Richards JP (eds.) *100th Anniversary Volume of Economical Geology*, pp. 523–560. Littleton, CO: Society of Economic Geologists.

# Relação entre o conteúdo metalífero e natureza das rochas hospedeiras: evidências do papel das rochas vulcânicas como fonte de metais



Distribuição dos metais nos depósitos hospedados por **rochas vulcânicas máficas** é semelhante à dos **basaltos N-MORB**;

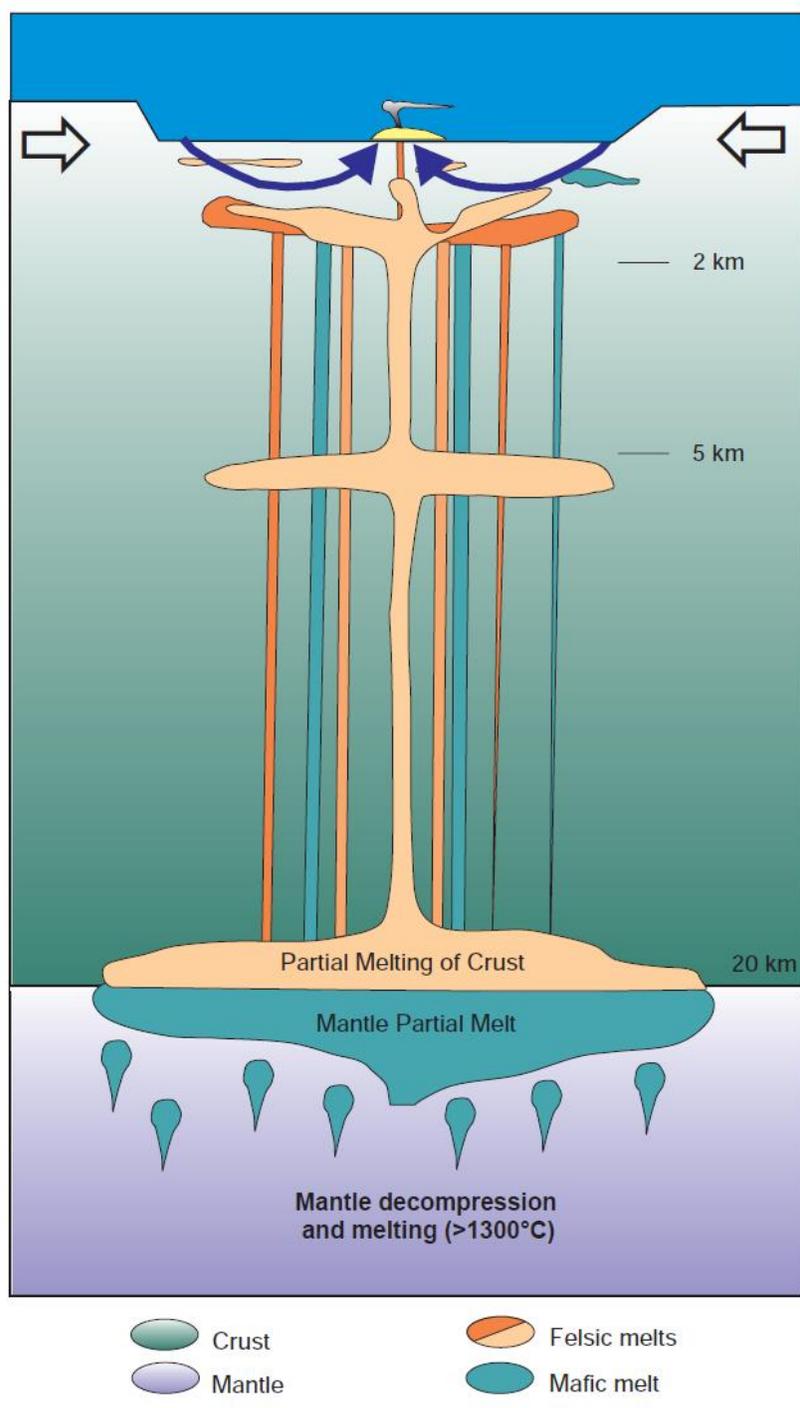
Distribuição dos metais nos depósitos hospedados por rochas **félsicas ou sedimentares** é semelhante à da **crosta continental**;

**Figure 4** Primitive-mantle normalized values of average Cu, Zn, Au, Ag, and Pb concentration in different types of VMS deposits (Table 1), compared with those in N-MORB and average continental crust. Metal contents of deposits hosted by mafic volcanic rocks generally match the pattern for N-MORB, whereas those with a significant amount of felsic volcanic rocks (bottom panel) or sediment more closely match that of the average continental crust (primitive mantle values and average metal contents of N-MORB and continental crust from the compilation of Barrie and Hannington, 1999). M, mafic-dominated; BM, bimodal mafic; PM, pelitic mafic; BF, bimodal felsic; FS, felsic siliciclastic.

# Depósitos VHMS: relações com magmatismo félsico e exhalitos

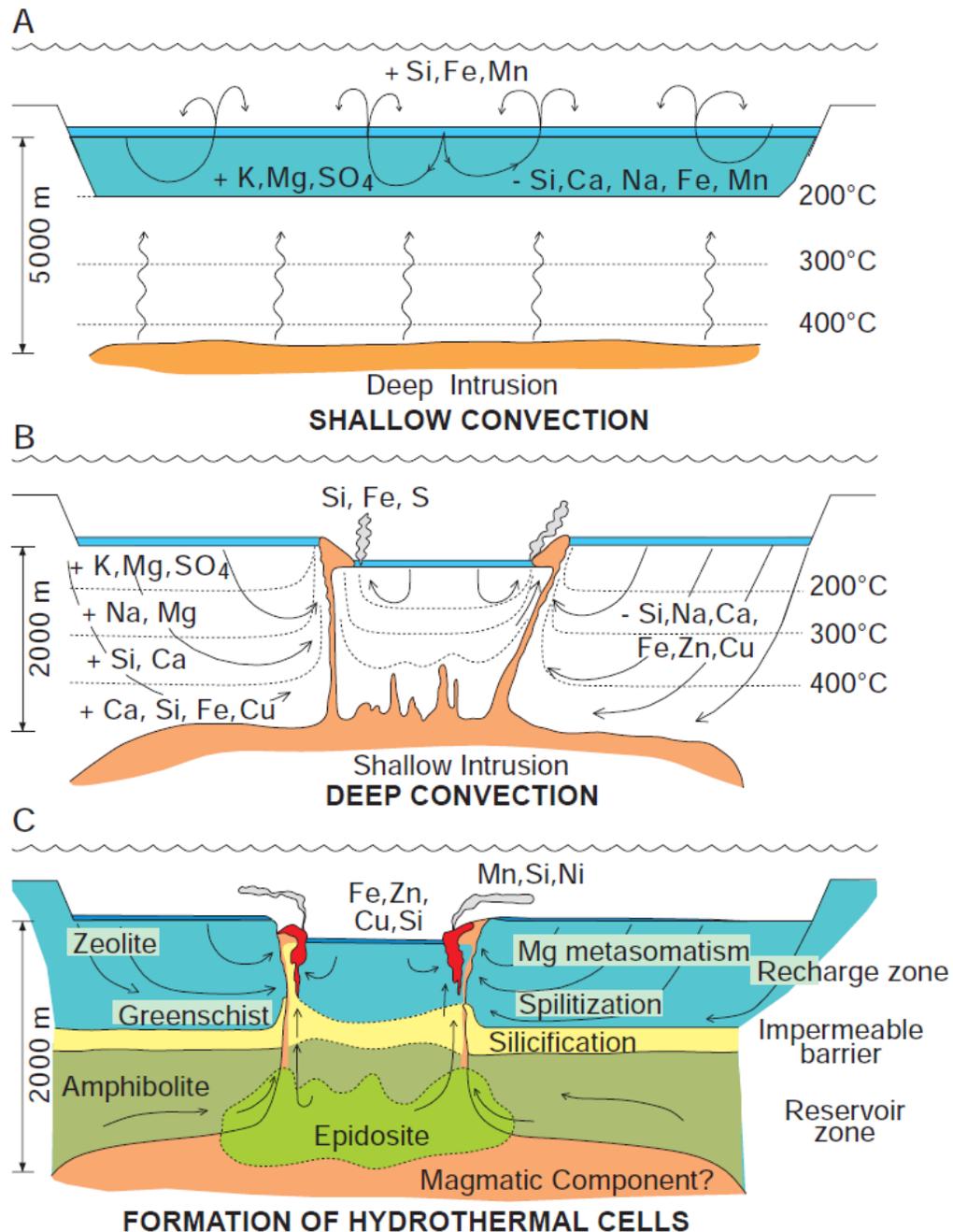
- Associação espacial com **rochas vulcânicas félsicas**: reflete um fluxo de calor anômalo durante a extensão e fusão parcial da crosta basáltica, gerando pequenos volumes de magma félsico;
- A maioria dos depósitos VMS se limita a relativamente **estreitos intervalos estratigráficos** comparados com o período de tempo de atividade nas principais sucessões arco e retro-arco;
- Muitas sequências espessas de rochas vulcânicas predominantemente máficas são frequentemente desprovidas de depósitos VHMS;
- Uma explicação alternativa é que a formação de minério está diretamente ligada aos **fluidos exsolvidos dos magmas félsicos**;
- Os depósitos são tipicamente formados imediatamente após a **cessação da atividade vulcânica** ou durante lacunas ou hiatos no vulcanismo, que representam períodos em que as câmaras de magma subvulcânicas profundas passam por resfriamento e fracionamento;
- A posição estratigráfica relacionada ao minério às vezes é ocupado por rochas **sedimentares químicas** (formação ferrífera em fácies de *chert* ou óxido, silicato e carbonato), que representam os **produtos distais da descarga hidrotermal**

## PROCESSOS GENÉTICOS ASSOCIADOS AOS DEPÓSITOS VMS



- Tectônica Extensional;
- Afinamento crustal
- Despressurização mantélica
- Fusão do manto: magma basáltico
- Acúmulo de magma basáltico na base da crosta: fusão crustal
- Magmas graníticos
- Ascensão do magma
- Calor para sistemas hidrotermais convectivos;

# PROCESSOS GENÉTICOS ASSOCIADOS AOS DEPÓSITOS VMS

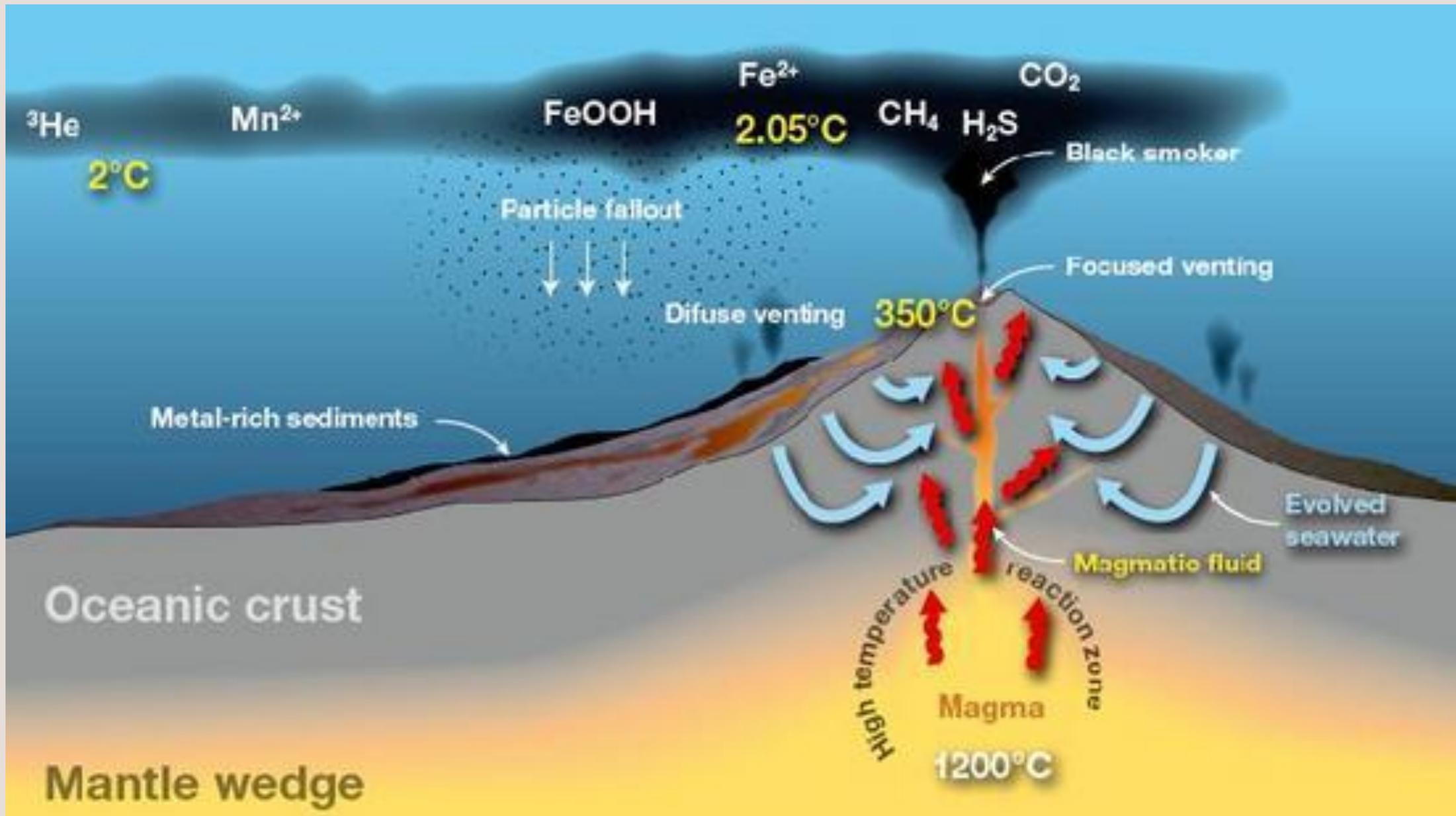


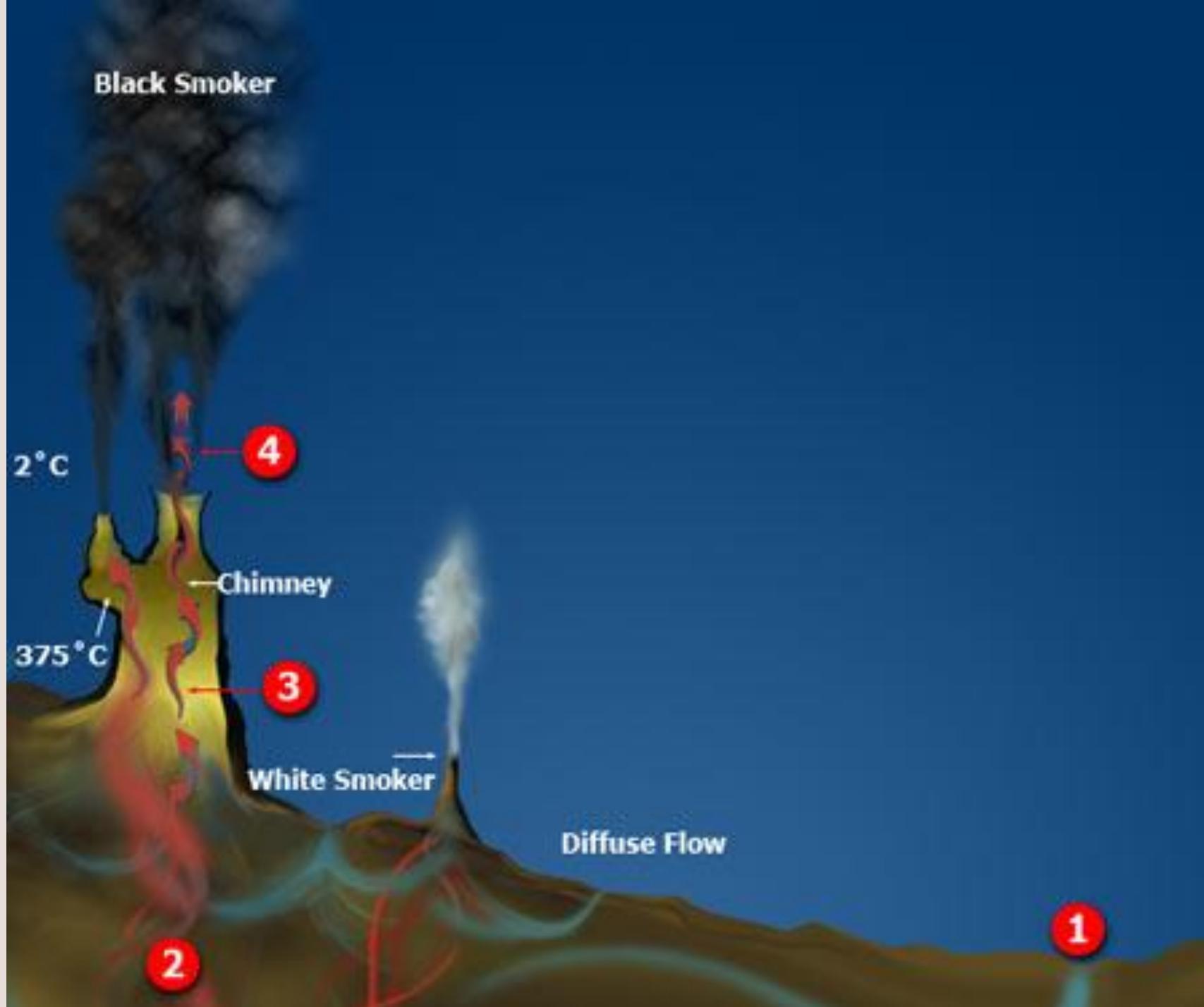
(A) Intrusões subvulcânicas abaixo de uma caldeira estabelecem um **sistema convectivo** de baixa temperatura envolvendo a **água do mar**, resultando em **alteração de fundo oceânico e exalitos**;

(B) Intrusão em níveis crustais rasos gera **sistemas hidrotermais convectivos**;

(C) Sistema hidrotermal maduro com **zonas de alteração hidrotermal** bem desenvolvidas. A zona de reação de alta temperatura mais próxima da intrusão permite influxo episódico de fluidos metalíferos para o assoalho oceânico e **precipitação de metais**, formando os depósitos VMS.

# PROCESSOS GENÉTICOS ASSOCIADOS AOS DEPÓSITOS VMS





# Oceanic hydrothermal vents



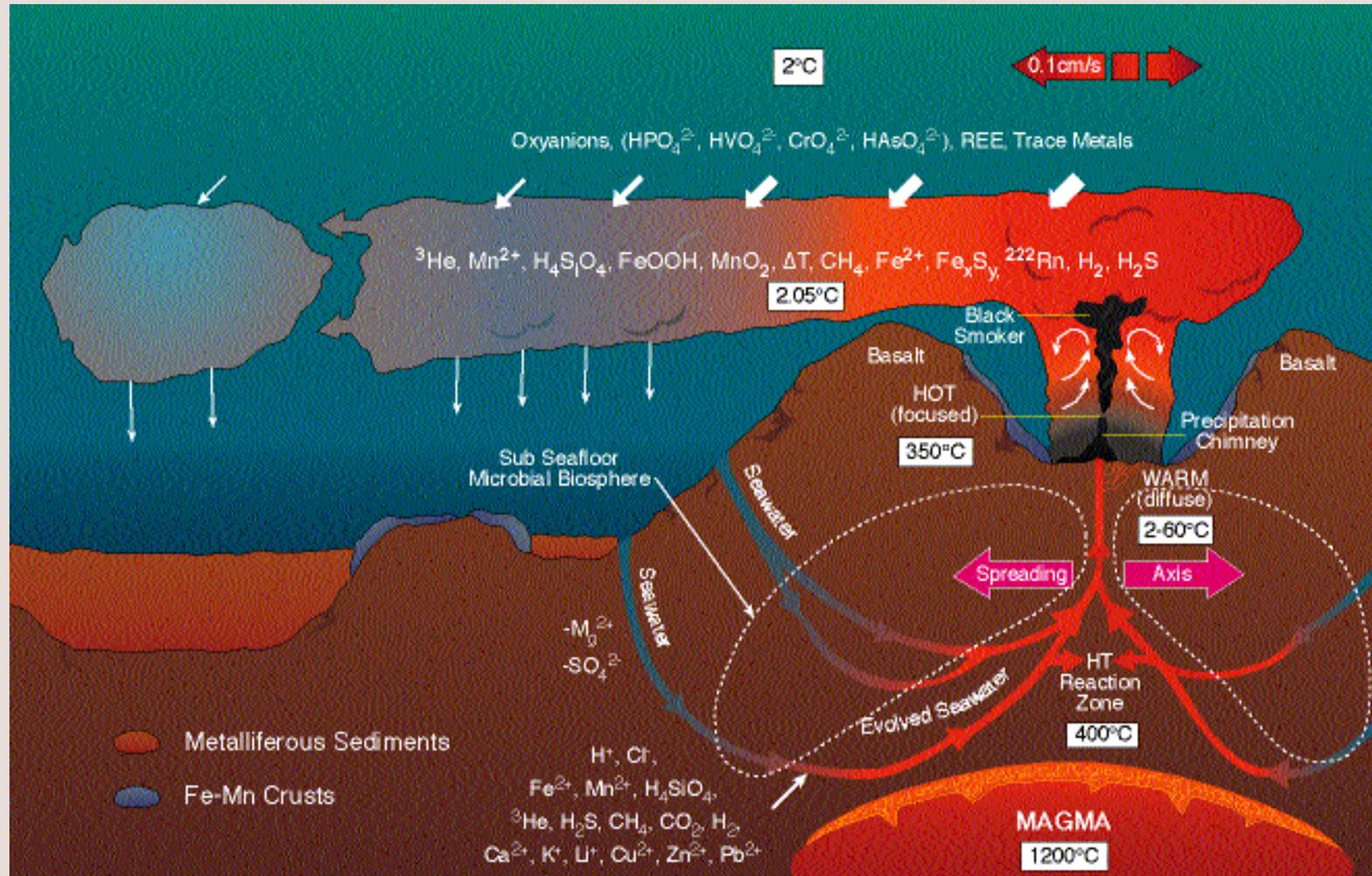
Oxygen removed, dissolved metals and H<sub>2</sub>S picked up

Metals condense out in cold seawater

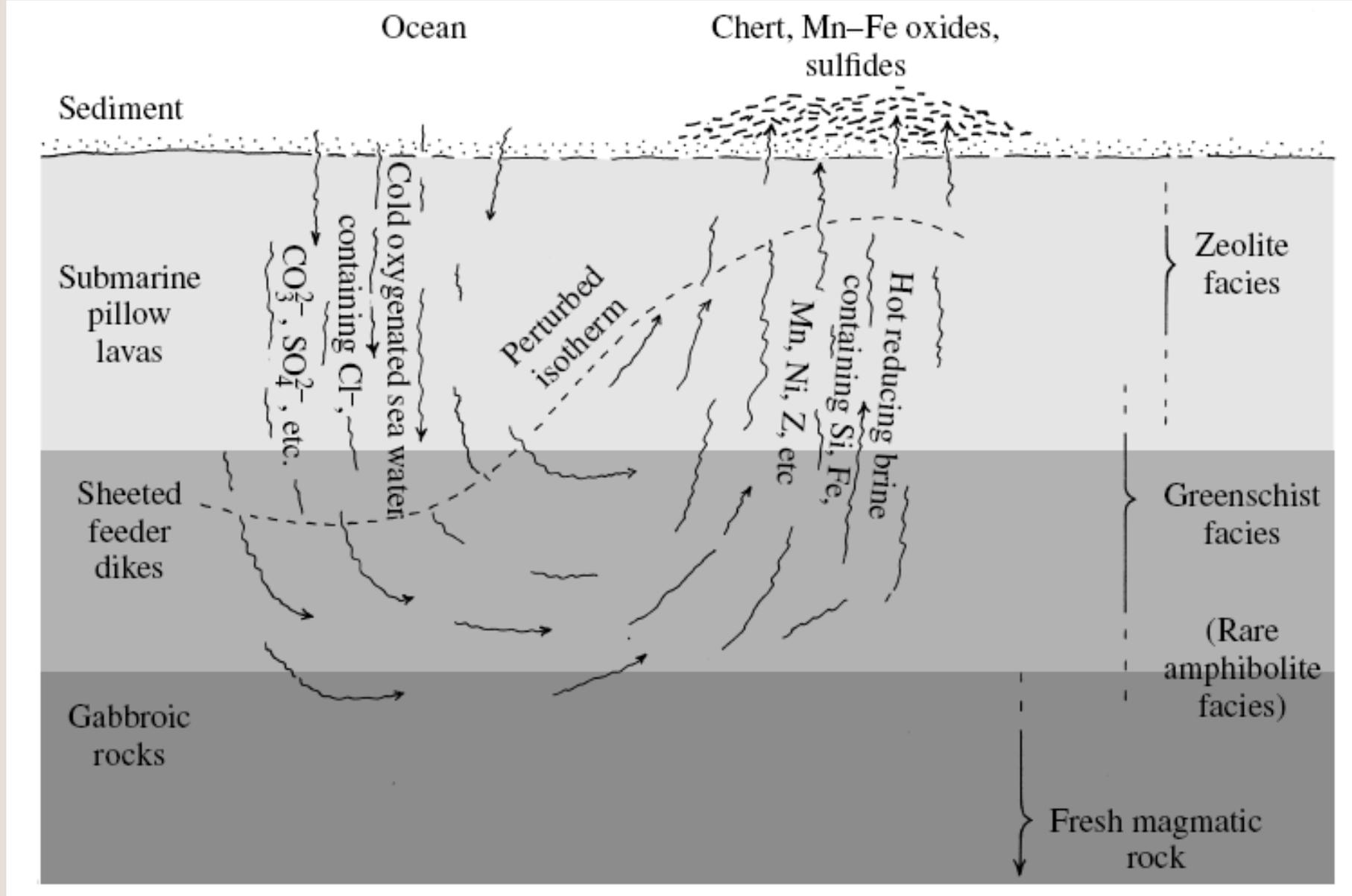
Hot, mineral rich fluids rise

Cold sea water seeps into ocean floor cracks

# PROCESSOS GENÉTICOS ASSOCIADOS AOS DEPÓSITOS VMS



# Modelo conceitual para o metamorfismo de fundo oceânico



# Interação Fluido-Rocha: Equilíbrio Fluido-Mineral

**Reação inicial da água do mar com as rochas vulcânicas** inicia-se a baixa T, e progressivamente ocorre a maiores temperaturas;

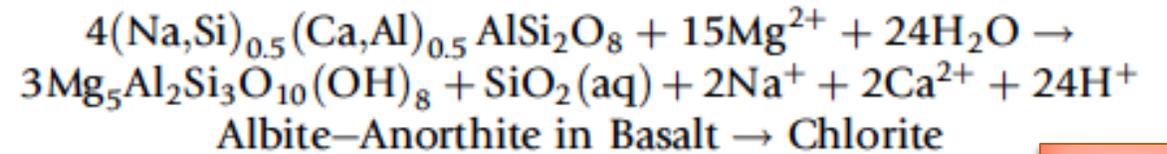
**100 °C:** vidro vulcânico é substituído por argilo-minerais, fixando álcalis (K, Rb, Cs) na rocha;

**150 °C:** álcalis são lixiviados e substituídos por Ca, Mg e Na.

Mg: primeiro é incorporado na **Mg-esmectita** e depois na **clorita**, que substitui o plagioclásio, a **200 °C**;

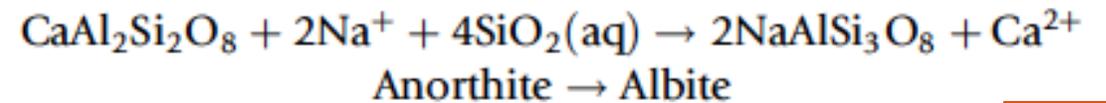
**250 °C:** Na é fixado na **albita (espilitização)**;

**350 °C** (partes + quentes do sistema): cálcio é fixado, formando **epidoto** e **plagioclásio** secundário



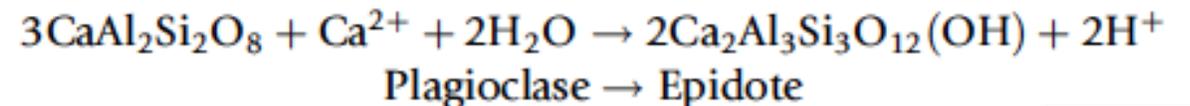
Cloritização

200 °C



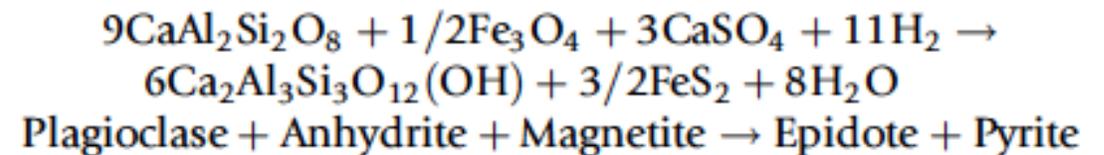
Espilitização

250 °C



Epidotização

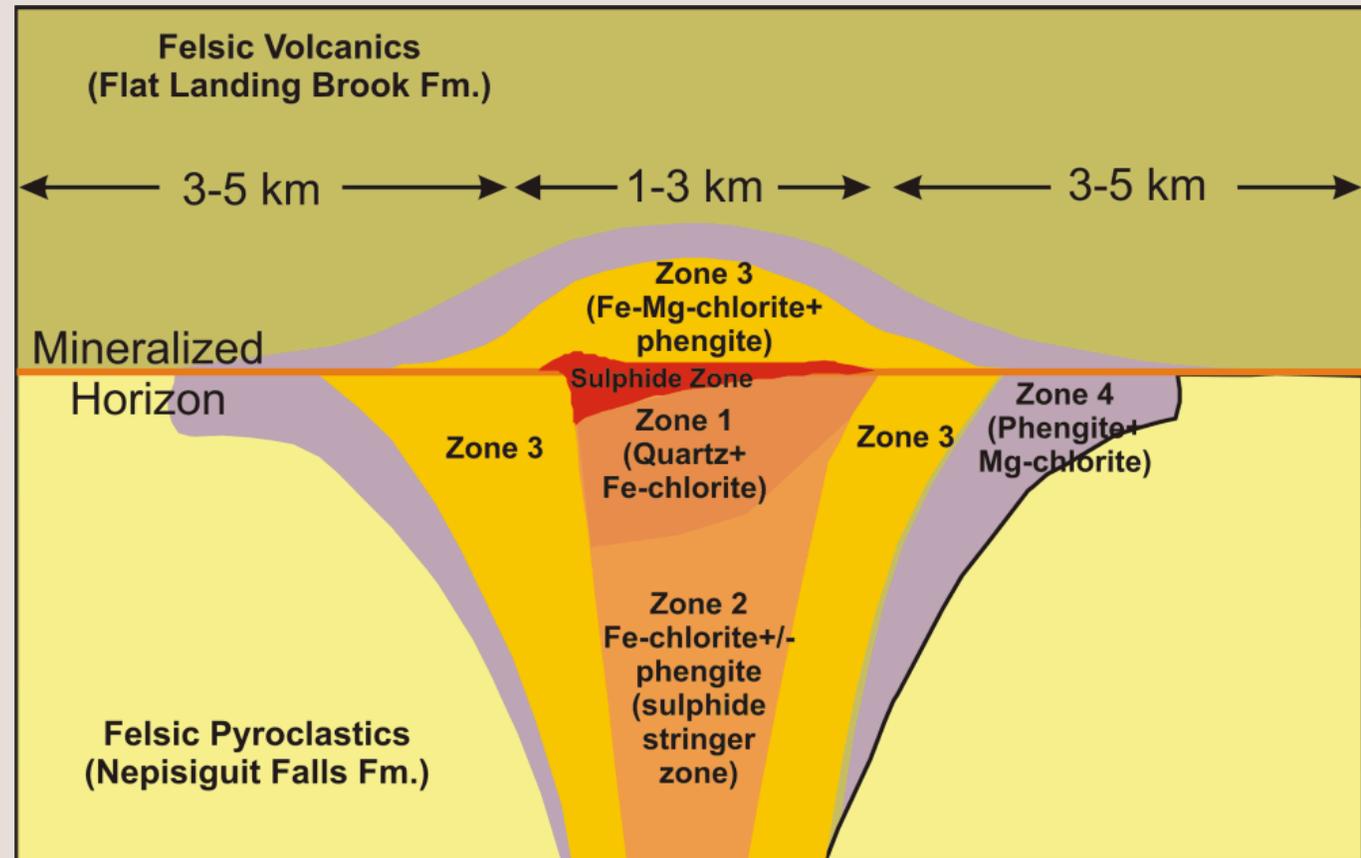
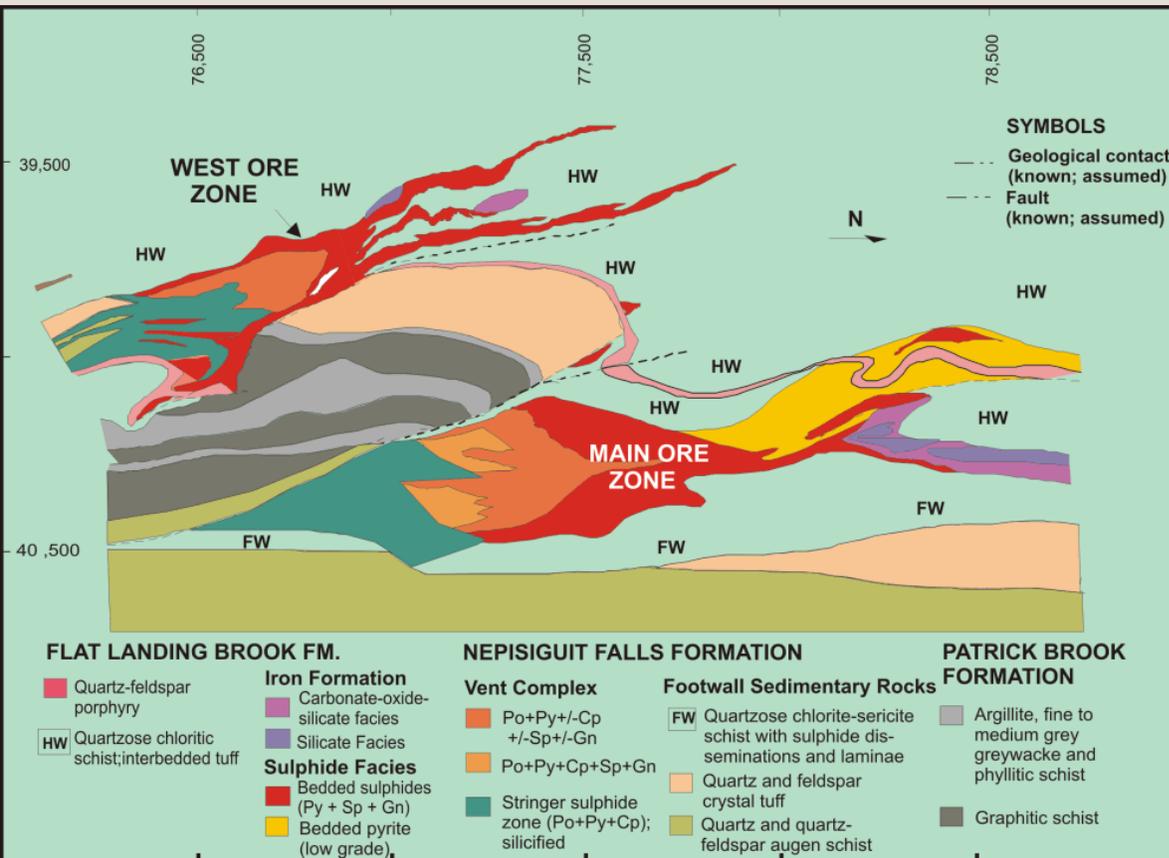
350 °C



[4]

# ALTERAÇÃO HIDROTERMAL

## VMS: Bathurst Mining Camp, Northern New Brunswick



Depósito de Brunswick No. 12 mostrando as zonas de minério (Luff et al., 1992)

# Alteração hidrotermal

Cloritização



Clorita xistos derivados da alteração de riólitos (Depósito de Cu-Zn Ártico, Alasca)

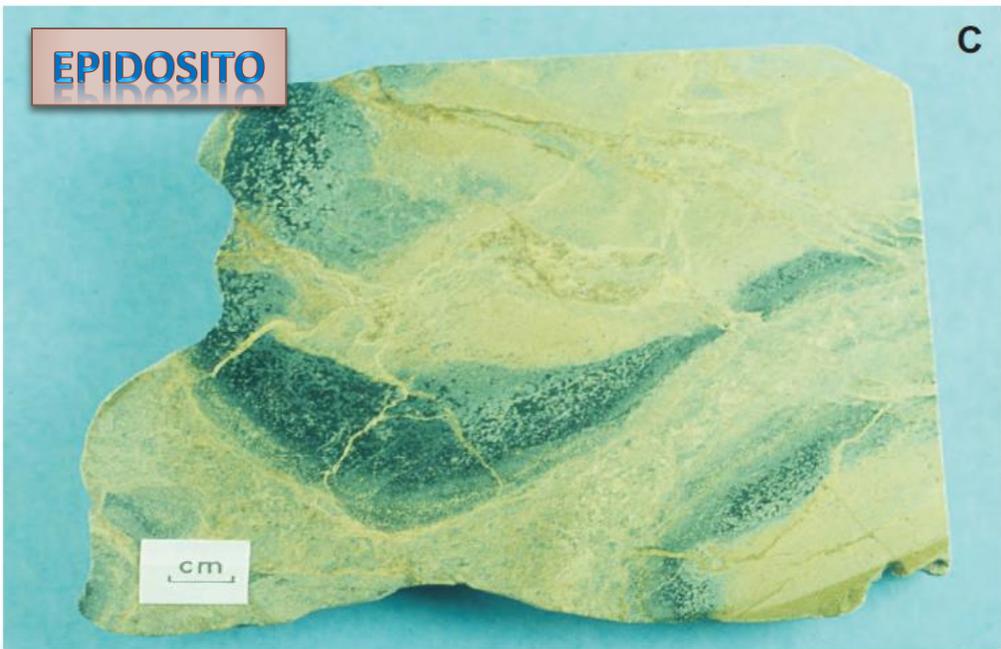


Pillow-lavas (Depósito de Noranda, Canadá)

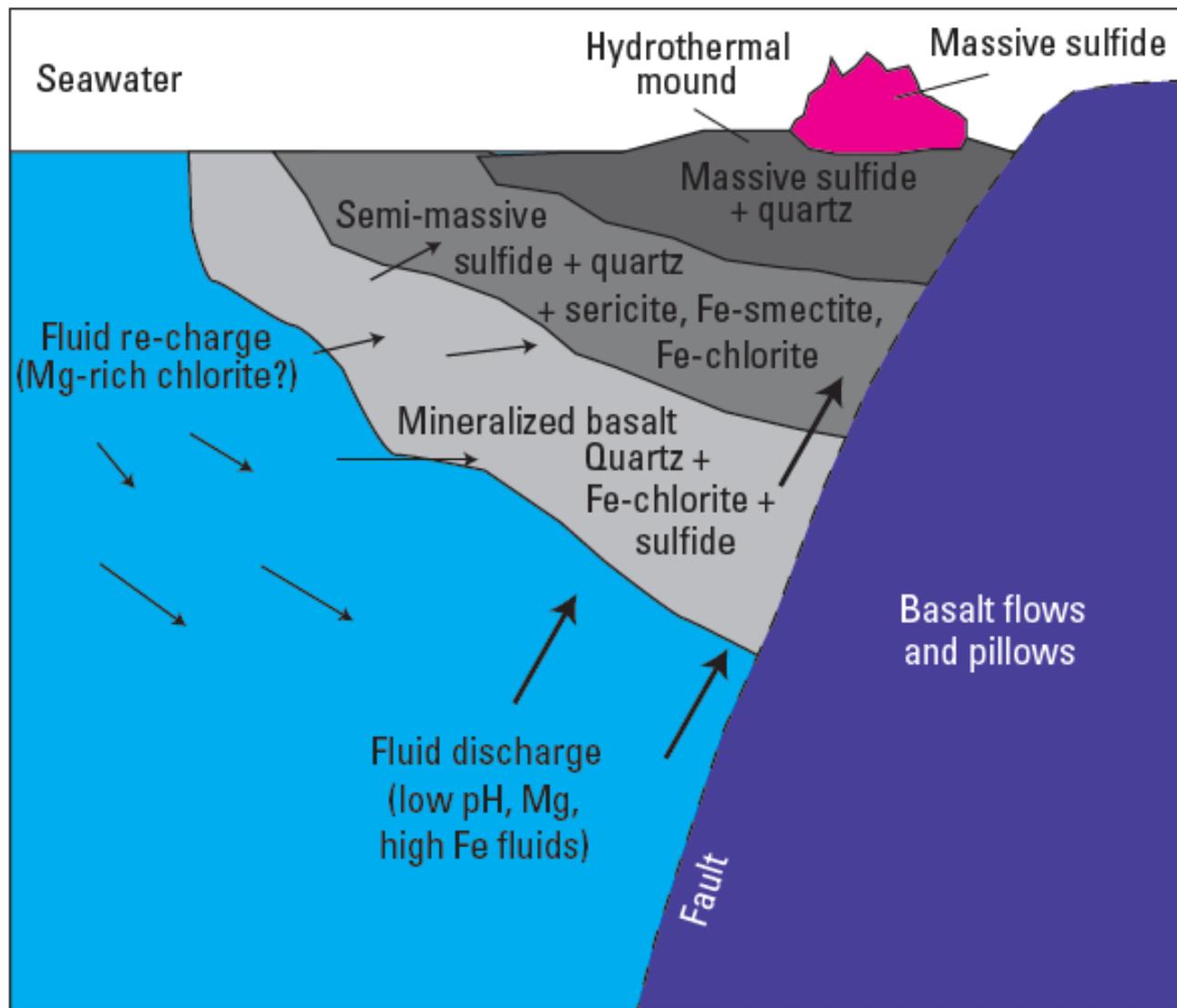


Brecha riolítica cloritizada

# ALTERAÇÃO HIDROTHERMAL

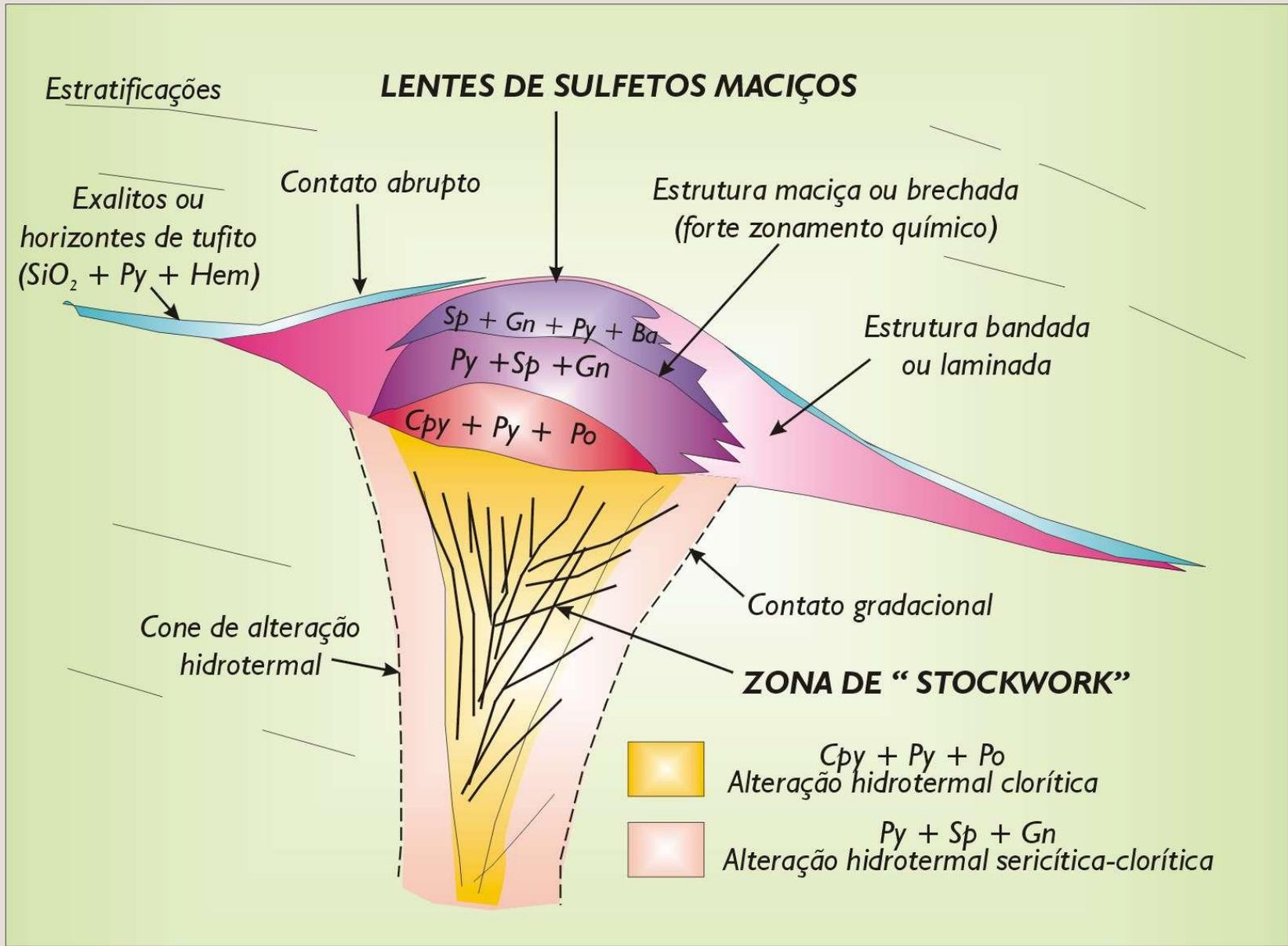


# ALTERAÇÃO HIDROTHERMAL



Alteração hidrotermal em rochas máficas em sequência ofiolítica com pilha de hialoclastitos

# Halos de Alteração Hidrotermal na Zona de Stockwork

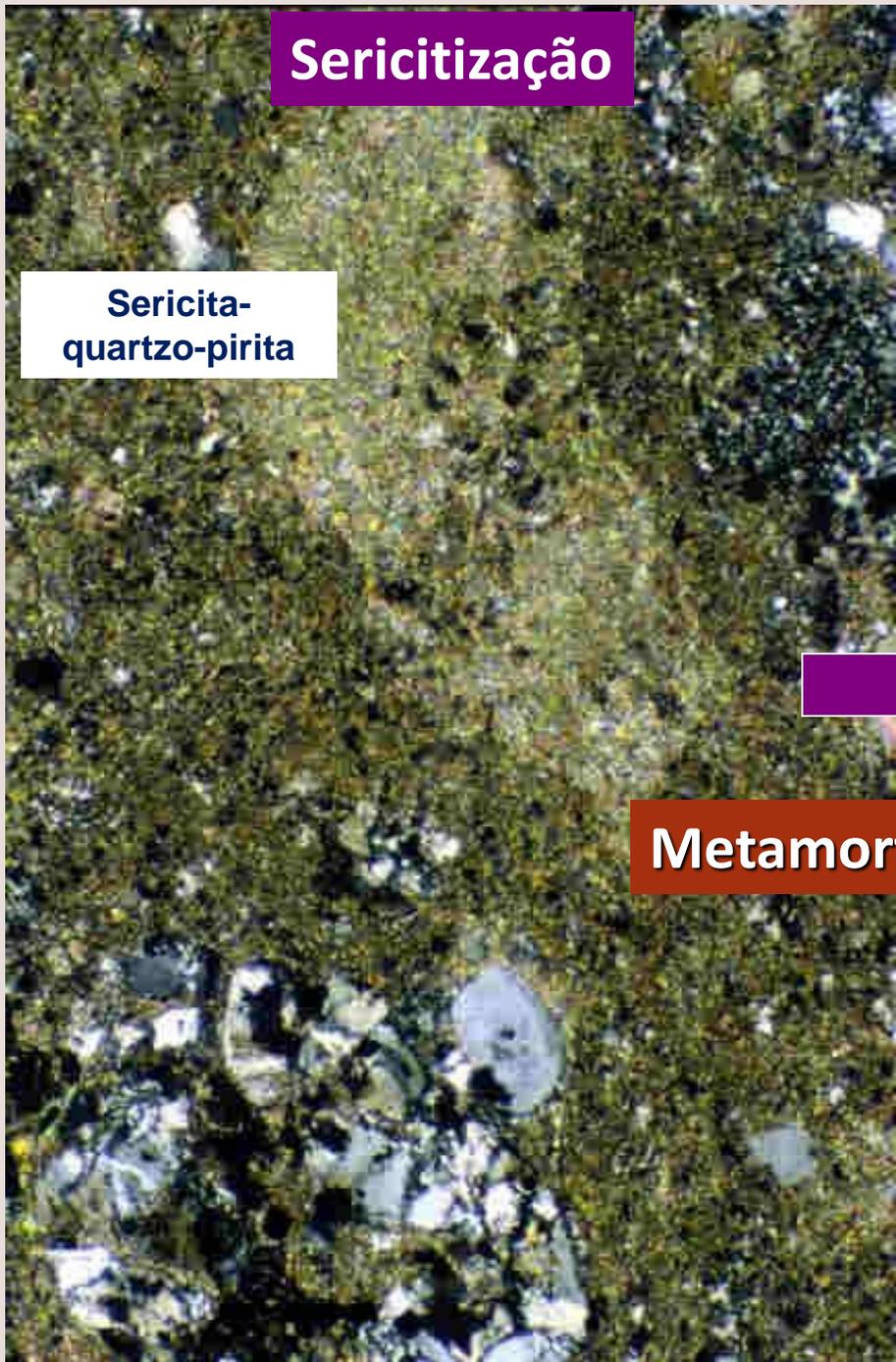


Pipe de alteração no footwall - centenas de metros abaixo do depósito

Alteração regional propilítica: epidoto-qtz-actinolite Alta T (400°C)

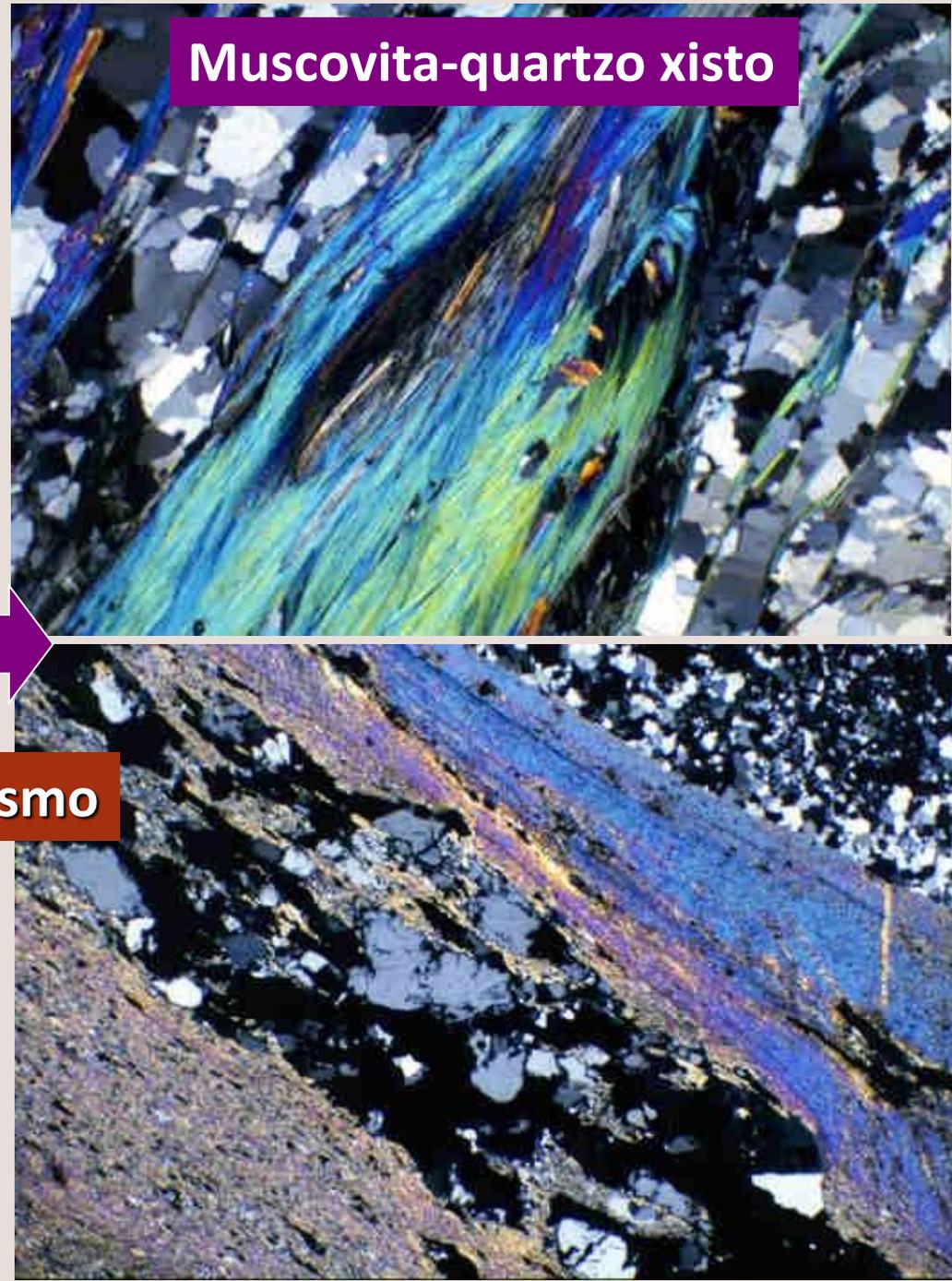
Outros tipos de alterações comuns:  
 Mg smectita → zeolita → carbonato → silicificação  
 espilitização - propilitização com o aumento de T (profundidade) e alumino-silicatos (andaluzita).

# Alteração hidrotermal



Sericitização

Sericita-quartzo-pirita



Muscovita-quartzo xisto

Metamorfismo



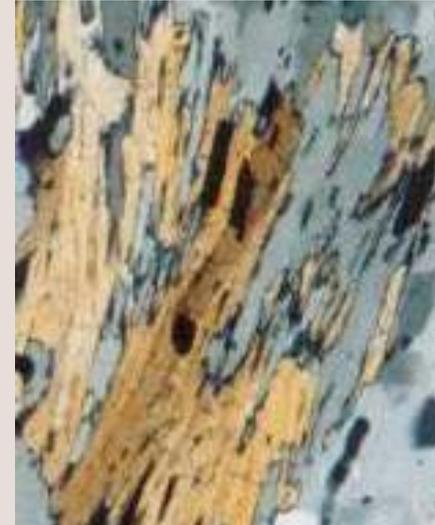
# Halos de Alteração Hidrotermal

*Minério  
(VMS)*

*Assembléia  
hidrotermal*

*Assembléia  
metamórfica*

Proximal  
Cu-Zn (Pb)  
Pirita,  
Calcopirita



Distal  
Zn (Pb)  
Esfalerita  
Galena



Cloritização  
Clorita fina +  
quartzo



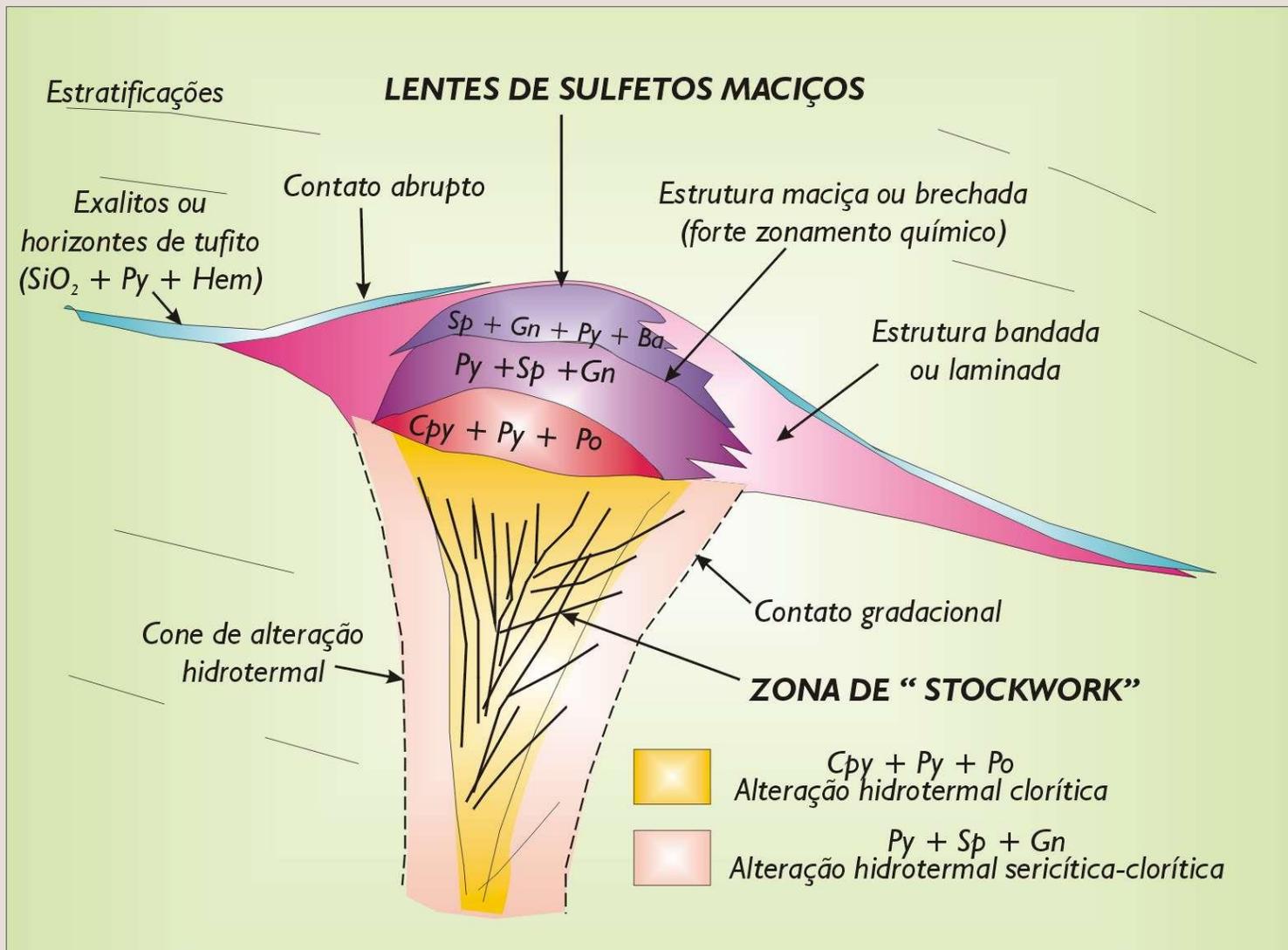
Cummingtonita +  
antofilita

Sericitização  
sericita fina +  
quartzo



Muscovita +  
quartzo

# Zoneamento Metálico



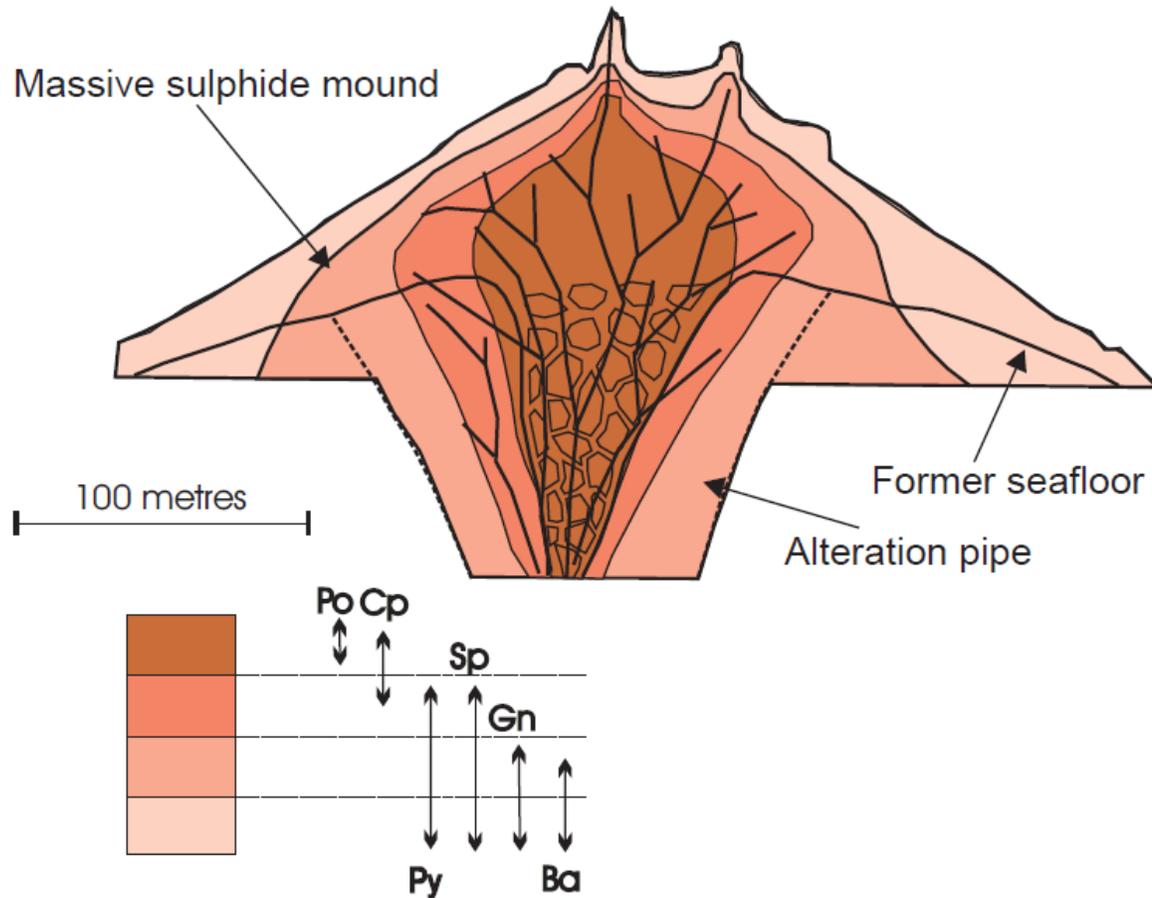
Maior concentração de Cu ou de Pb-Zn

pH baixo e altas T

Zoneamento relacionado à solubilidade da cpy e da esfalerita com a temperatura

Cpy deposita-se a temperatura mais altas que a esfalerita durante o resfriamento do fluido que tende a ser rápido

# Zonamento Metálico



**FIGURE 20.** Mineral zonation commonly observed within VMS deposits; this zoning is largely a function of hydrothermal fluid temperature and composition. Temperature gradient results in the zoning of sulphide minerals within both the discordant stockwork zone and the conformable sulphide mound. From Lydon (1984).

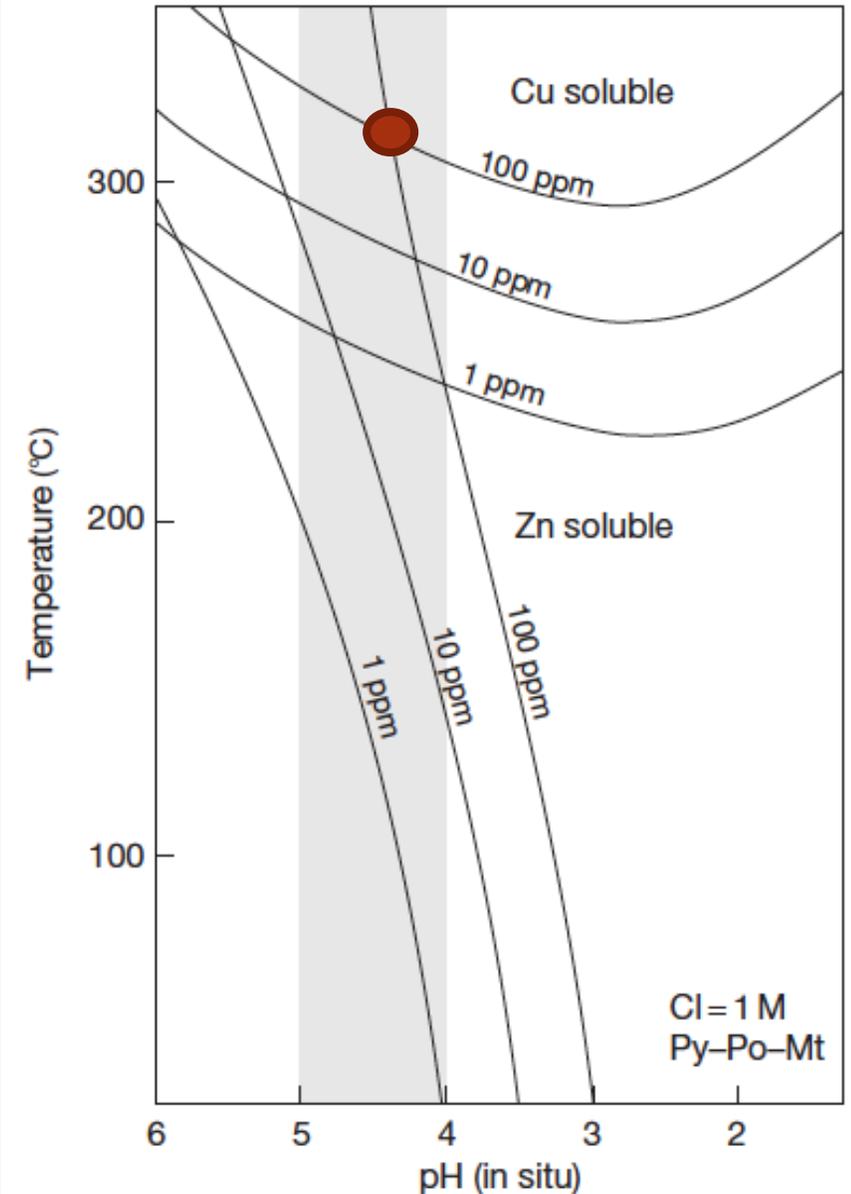
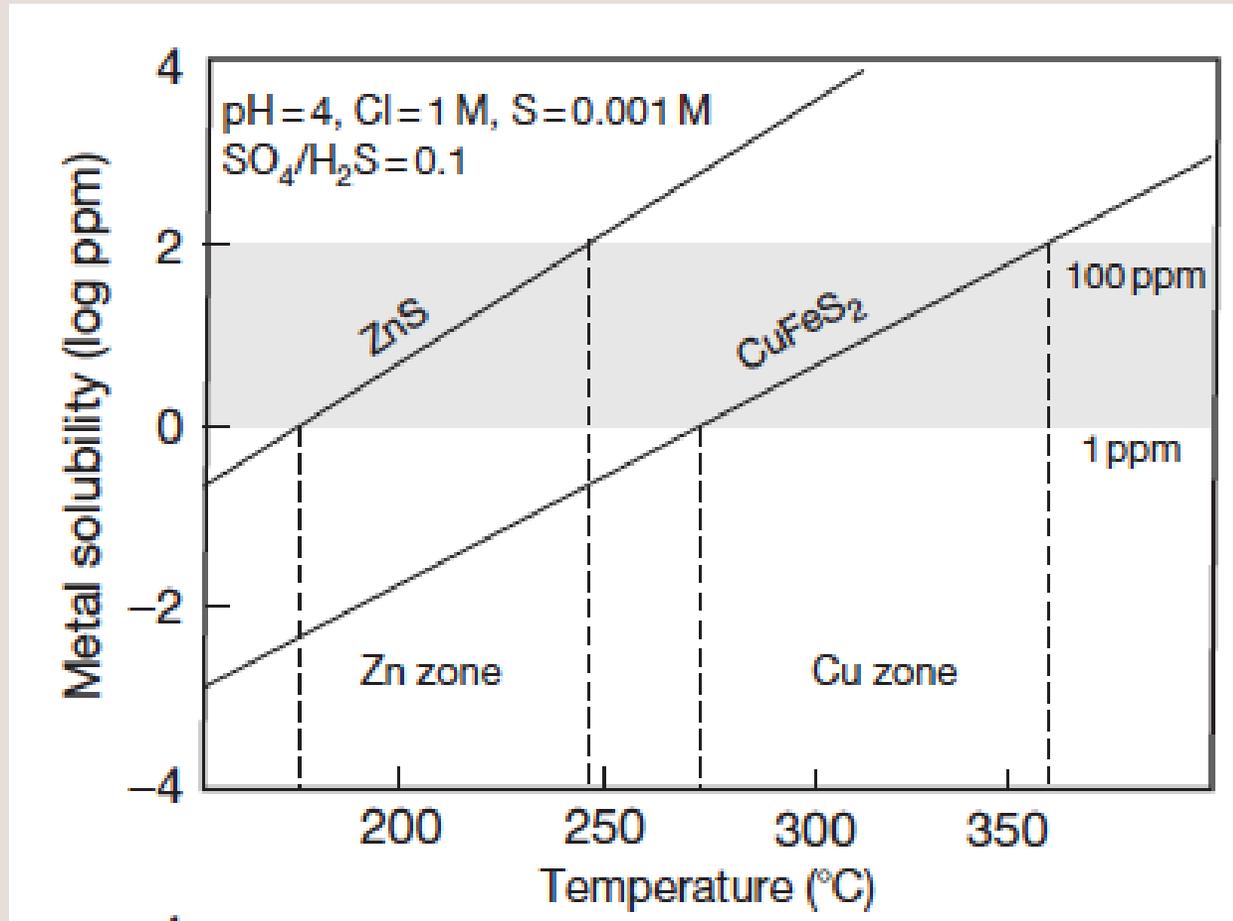
Zoneamento é controlado pela solubilidade dos metais e temperatura;

**Zona rica em Cpy:** apresenta Mt-Po

**Zona rica em Sp:** apresenta Py

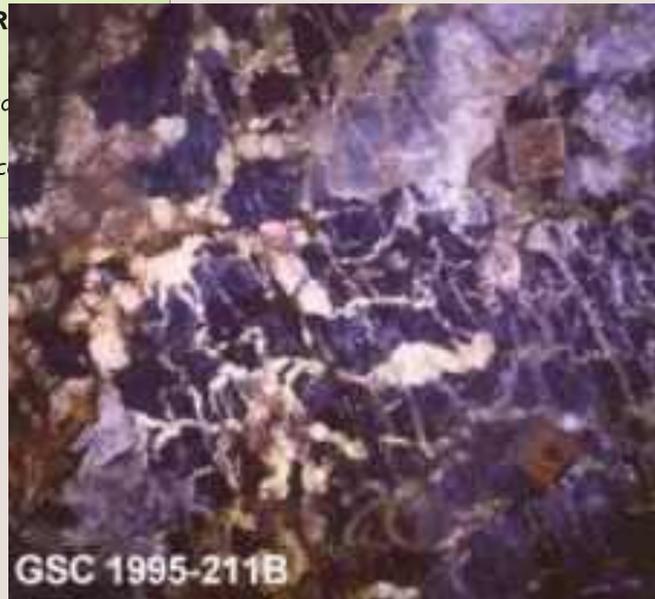
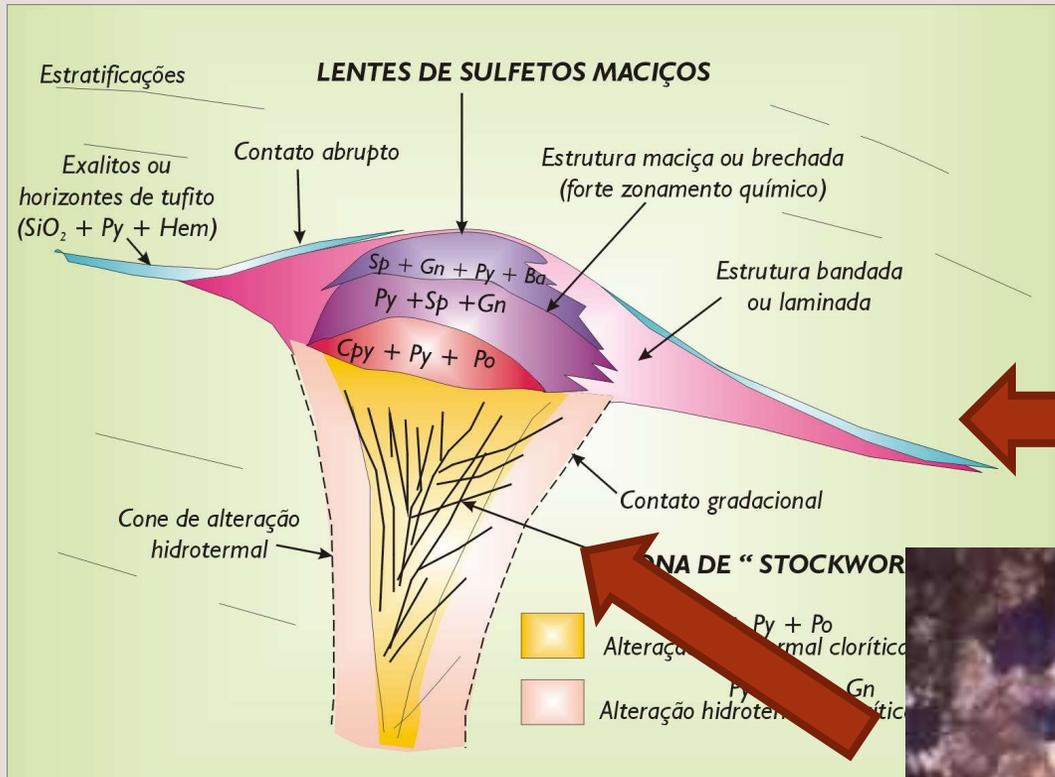
**Depósitos proximais** em relação à zona de descarga dos fluidos: **maiores razões Cu/Cu+Zn;**

# Zonamento Metálico & Solubilidade

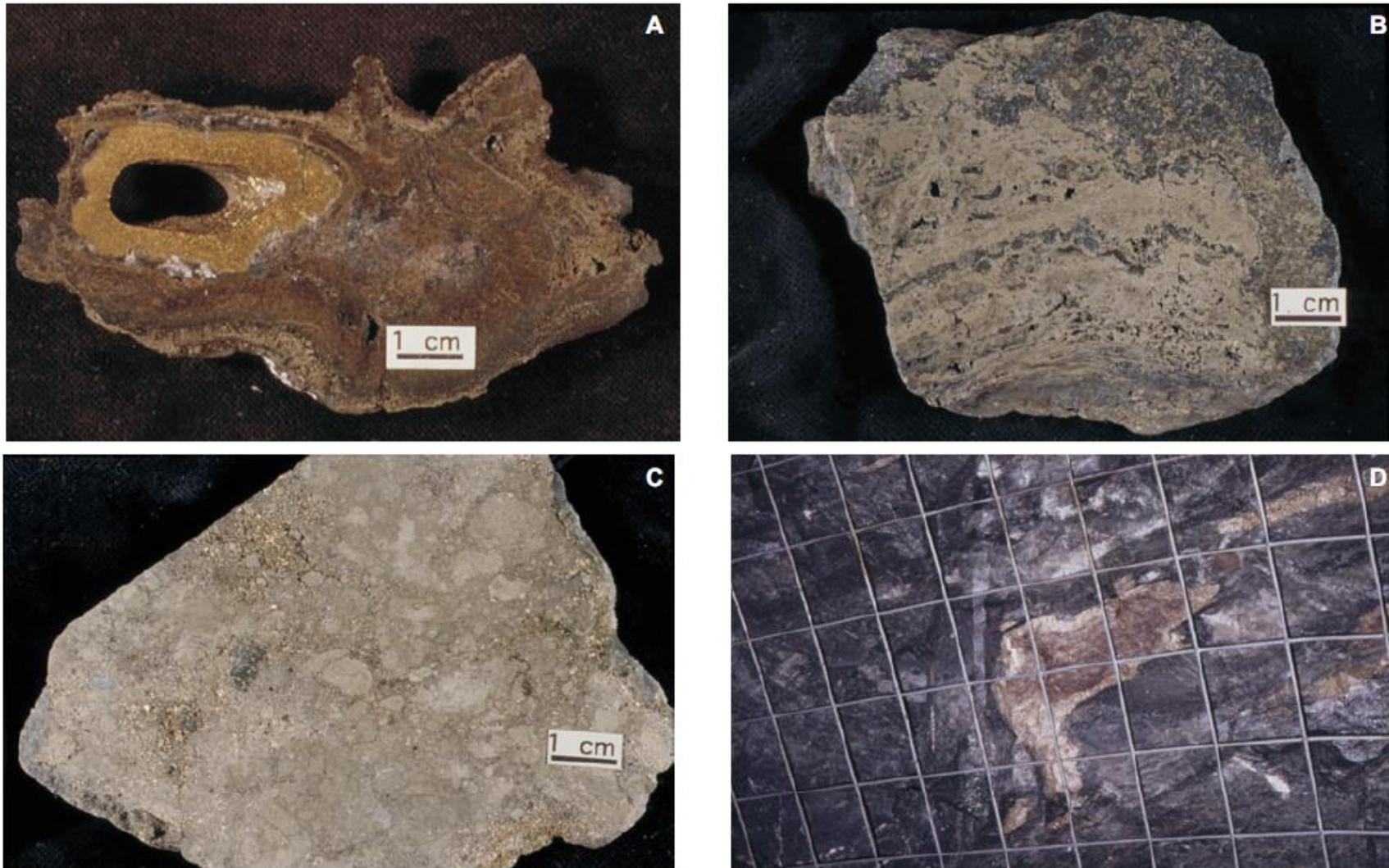


**Figure 12** Solubilities of chalcopyrite and sphalerite in fluids buffered by pyrite-pyrrhotite-magnetite as a function of pH (in situ) and temperature (left panel). Solubilities of chalcopyrite range from 1 to 100 ppm Cu in fluids at 250–350 °C; solubilities of sphalerite range from 1 to 100 ppm Zn at temperatures up to 250 °C. During mixing and cooling, chalcopyrite and sphalerite are deposited in sequence according to their respective solubilities as a function of decreasing temperature and increasing pH (right panels). A typical ore-forming fluid will become saturated with respect to chalcopyrite at high temperatures and precipitate a Cu-rich zone; the same fluid at lower temperatures will eventually become saturated with respect to sphalerite and precipitate a Zn-rich zone. Adapted from Large RR (1992) Australian volcanic-hosted massive sulfide deposits: Features, styles, and genetic models. *Economic Geology* 87: 549–572.

# DEPÓSITOS DE SULFETOS MAÇICOS



## SULFETOS MACIÇOS EM CHAMINÉS



**FIGURE 19.** (A) Example of a zoned sulphide chimney from the Endeavour Ridge vent field (I.R. Jonasson). (B) Typical textures from a massive sulphide mound, Main vent field, Juan de Fuca Ridge. Mineralogical banding is due to incremental chimney growth, with ovoids representing worm casts. Fragment cemented by later sulphide growth during mound collapse and subsequent invasion by hydrothermal fluid. (C) Clastic sandy sulphide ore from Cretaceous Aarja deposit, Semail ophiolite, Oman. This common texture is created by repeated mound collapse resulting from anhydrite dissolution and recementing with later sulphide (photo by I.R. Jonasson). (D) Pyrite-sphalerite clast as part of a proximal debris flow, Louvicourt, Val d'Or. 15 cm metal grid for scale.

g

Calcopirita  
+ pirita

ESE

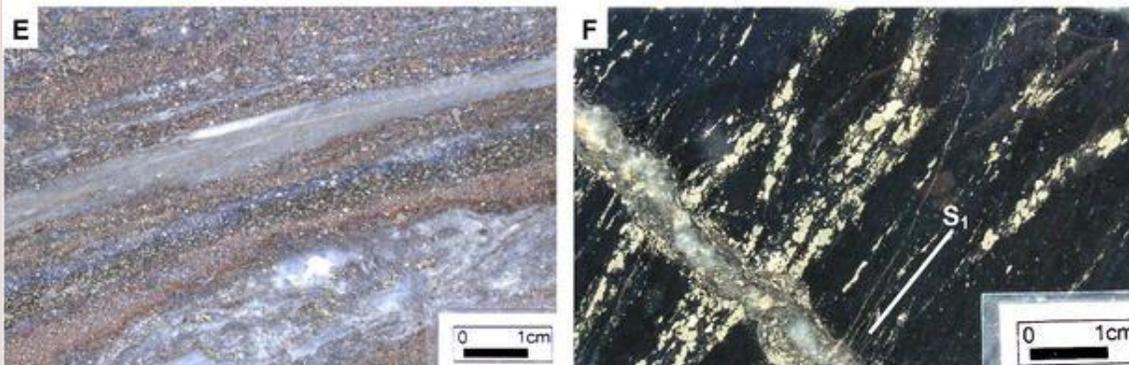
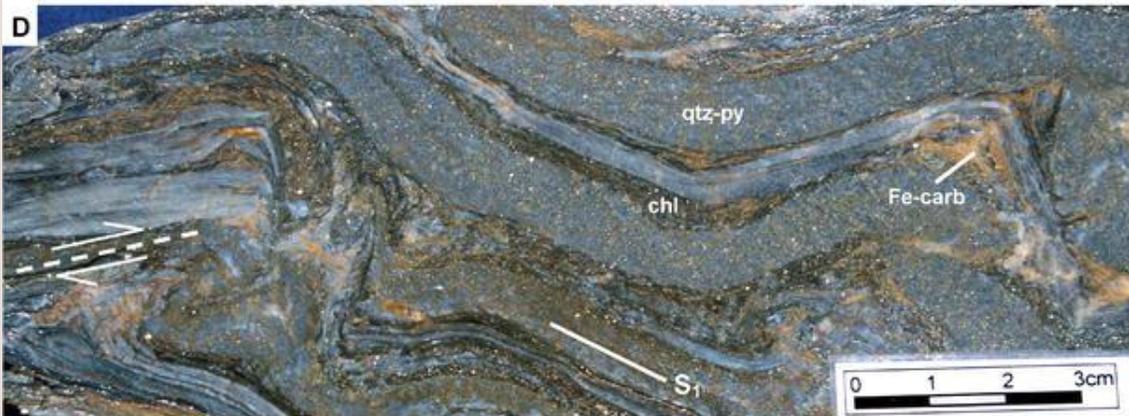
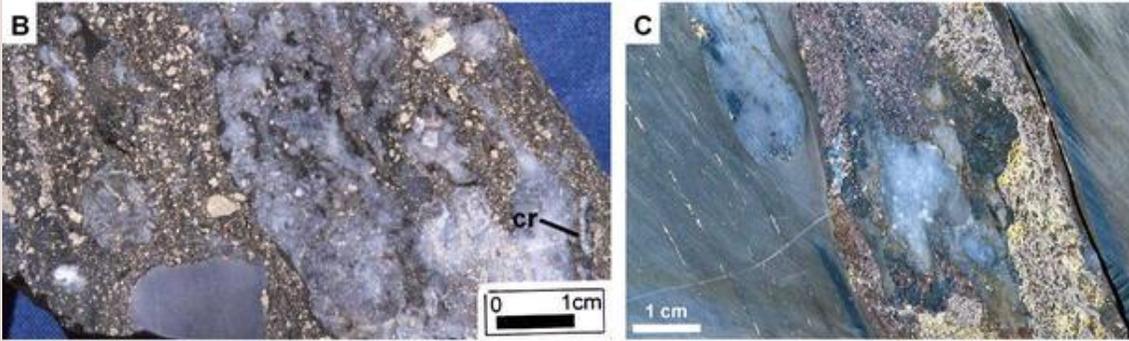
WNW

Esfalerita

rhyolitic clast with  
green mica alteration



10 cm



# Texturas dos sulfetos

Finamente laminados,  
maciço

Agnew et al. 2005. Lewis Ponds, a hybrid carbonate and volcanic-hosted polymetallic massive sulphide deposit, New South Wales, Australia. *Mineralium Deposita* 39:822 - 844

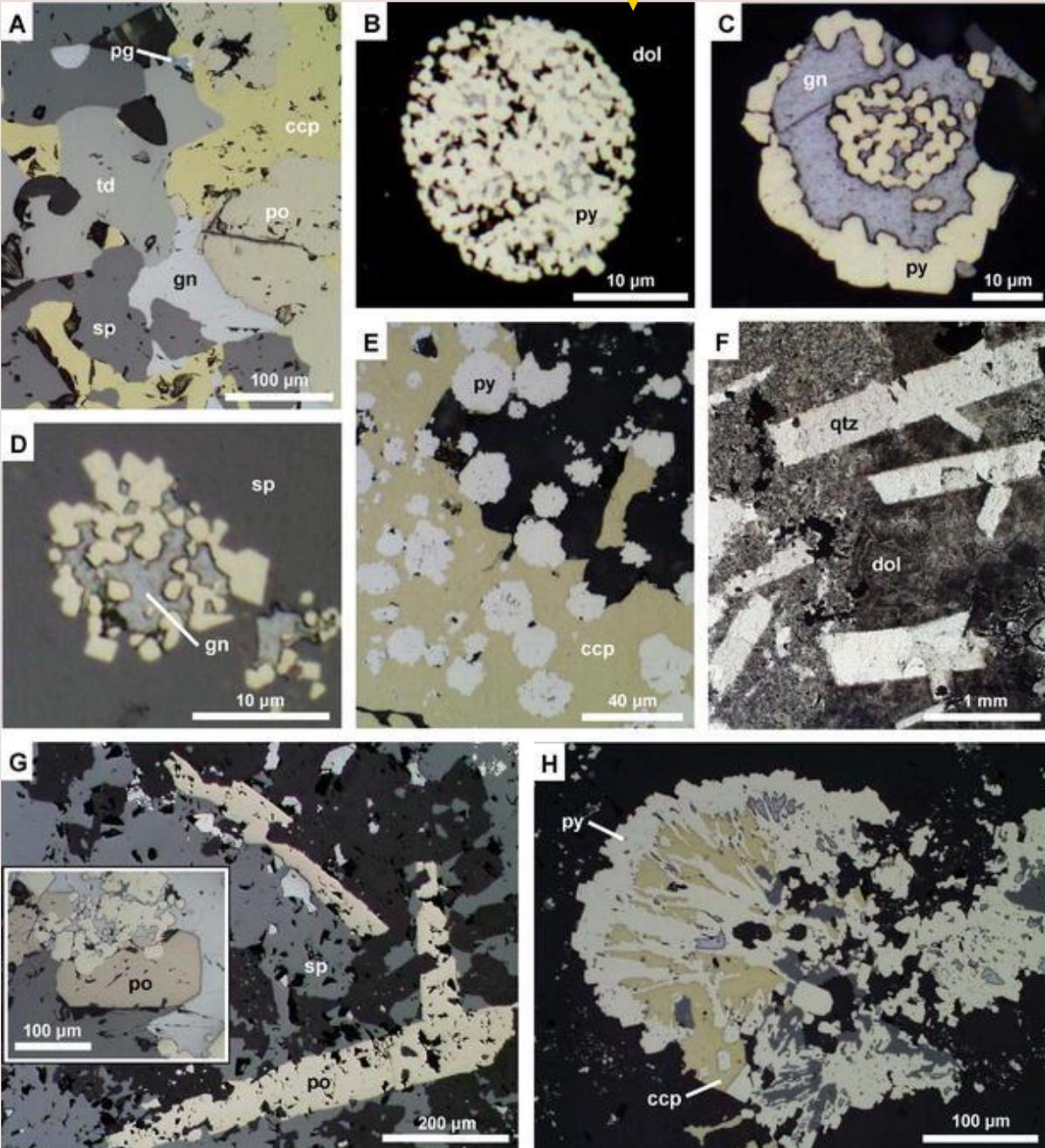
## Pirita framboidal

*Outras texturas comuns nos sulfetos dos depósitos vulcanogênicos*

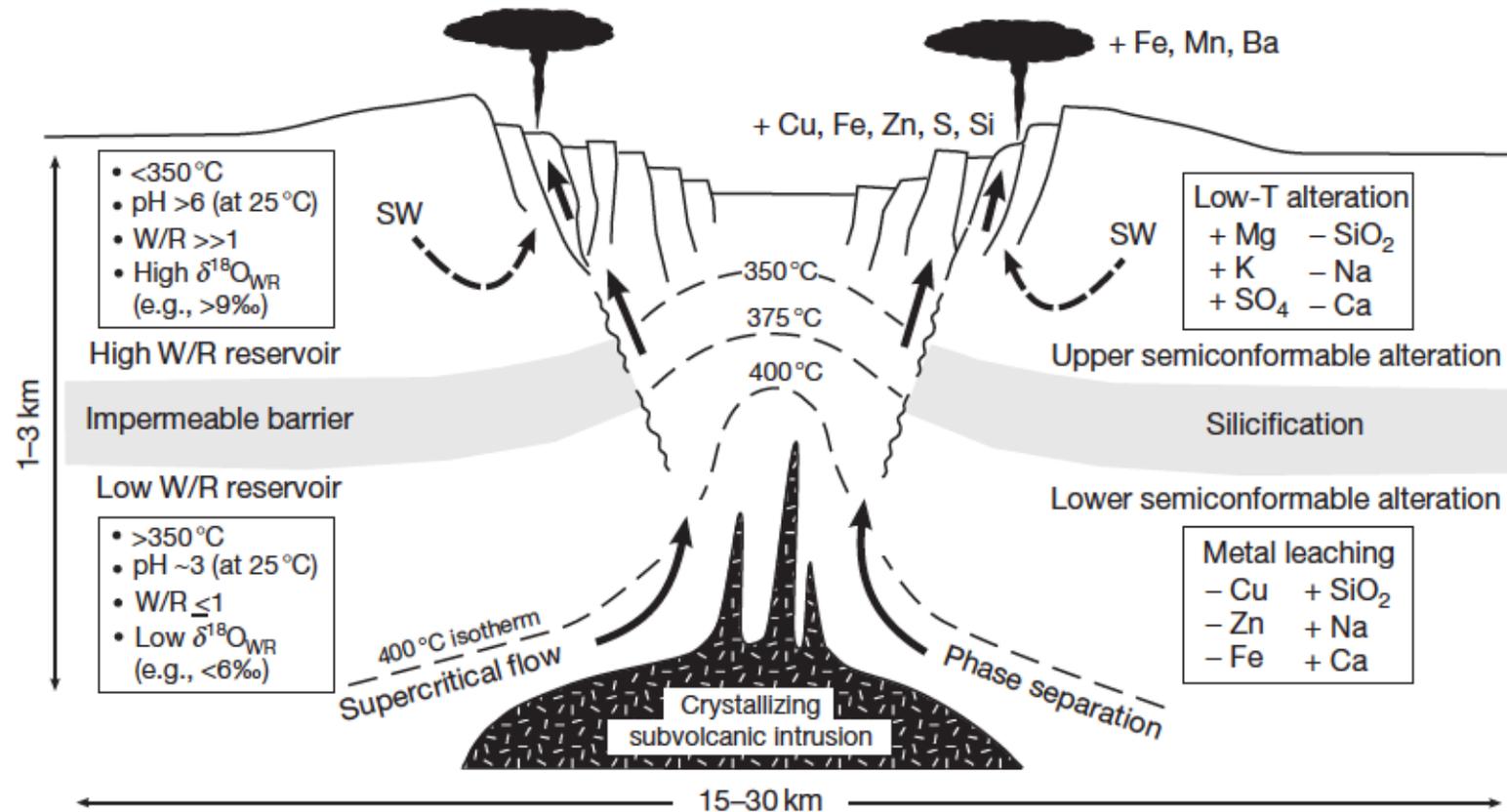


## Pirita dendrítica

Agnew et al. 2005. Lewis Ponds, a hybrid carbonate and volcanic-hosted polymetallic massive sulphide deposit, New South Wales, Australia. *Mineralium Deposita* 39:822 - 844

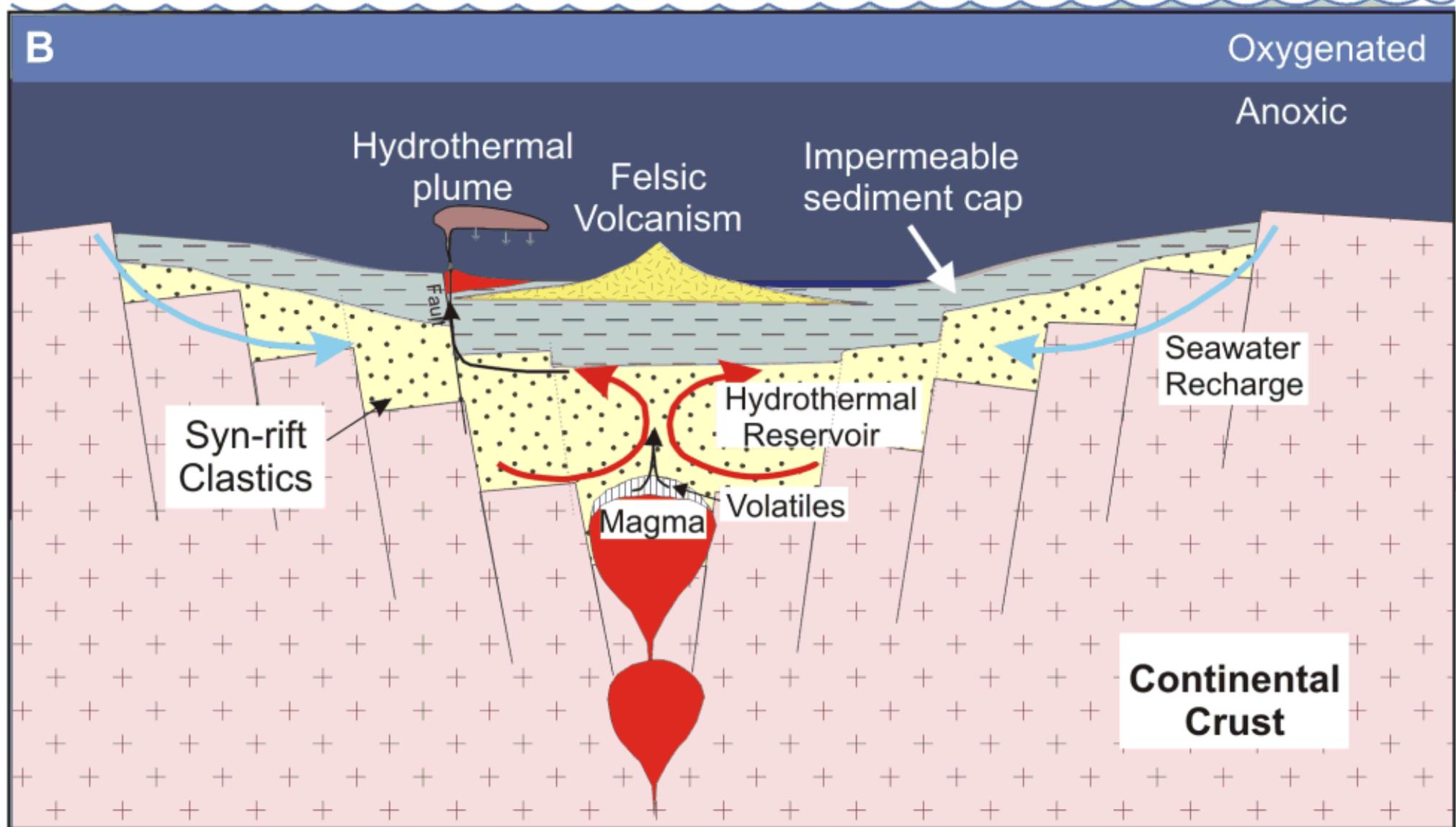


## Síntese do Modelo Genético (VMS, SMS, eSMS)

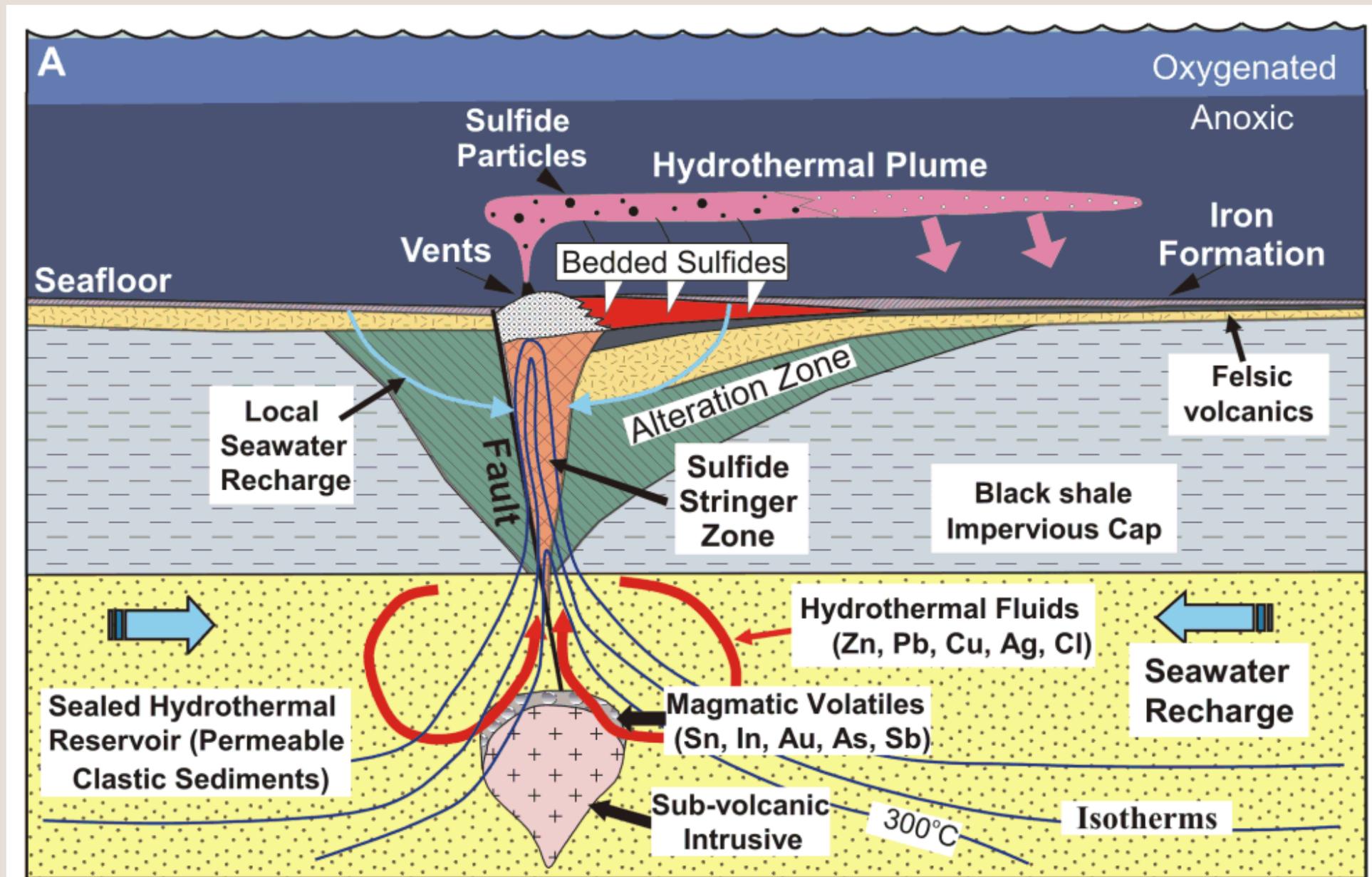


**Figure 16** Summary of the main features of convective hydrothermal systems responsible for forming VMS deposits, including compositions of hydrothermal fluids in the recharge zone and high-temperature reaction zone, major mass gains and losses of elements in different parts of the hydrothermal alteration system, and the distribution of large-scale semiconformable alteration zones. Reproduced from Galley AG (1993) Semi-conformable alteration zones in volcanogenic massive sulfide districts. *Journal of Geochemical Exploration* 48: 175-200; Franklin JM, Gibson HL, Jonasson IR, and Galley AG (2005) Volcanogenic massive sulfide deposits. In: Hedenquist JW, Thompson JFH, Goldfarb RJ, and Richards JP (eds.) *100th Anniversary Volume of Economic Geology*, pp. 523-560. Littleton, CO: Society of Economic Geologists.

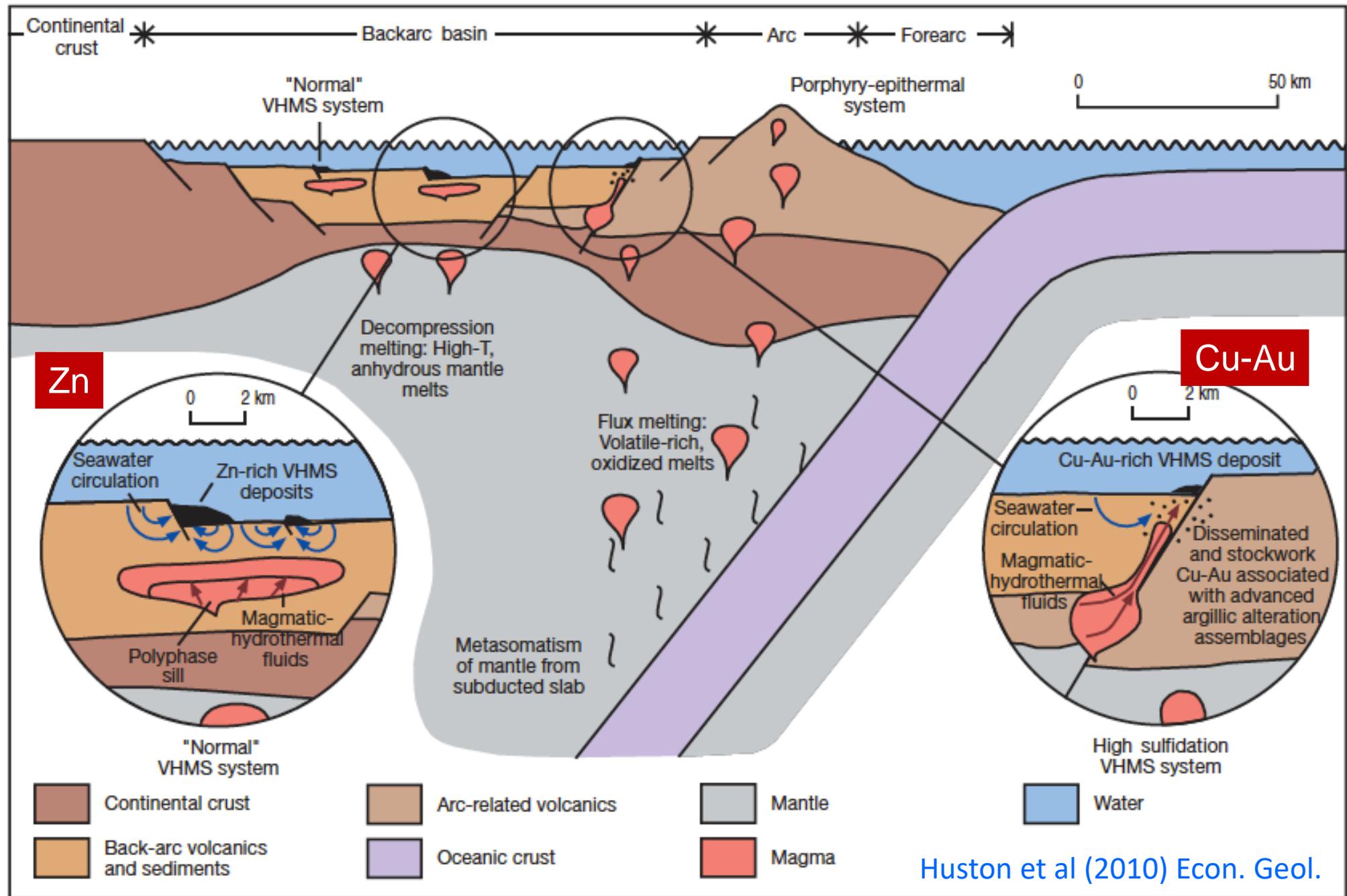
## Síntese do Modelo Genético (VMS, SMS, eSMS)



## Síntese do Modelo Genético (VMS, SMS, eSMS)

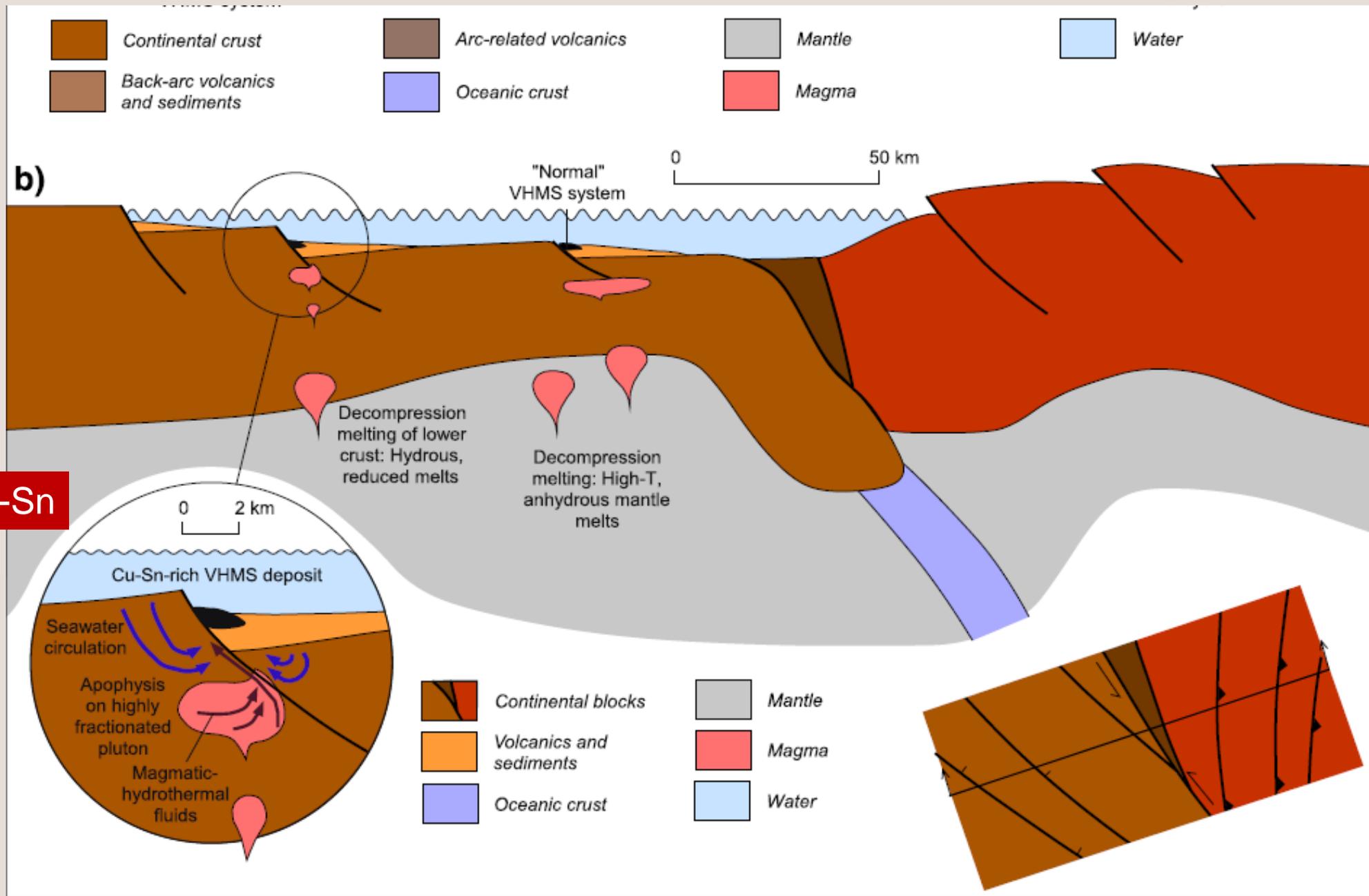


# VHMS: Bacias de retro-arco



Huston et al (2010) Econ. Geol.

FIG. 1. Diagrams showing possible settings of volcanic-hosted massive sulfide deposits in convergent margins.

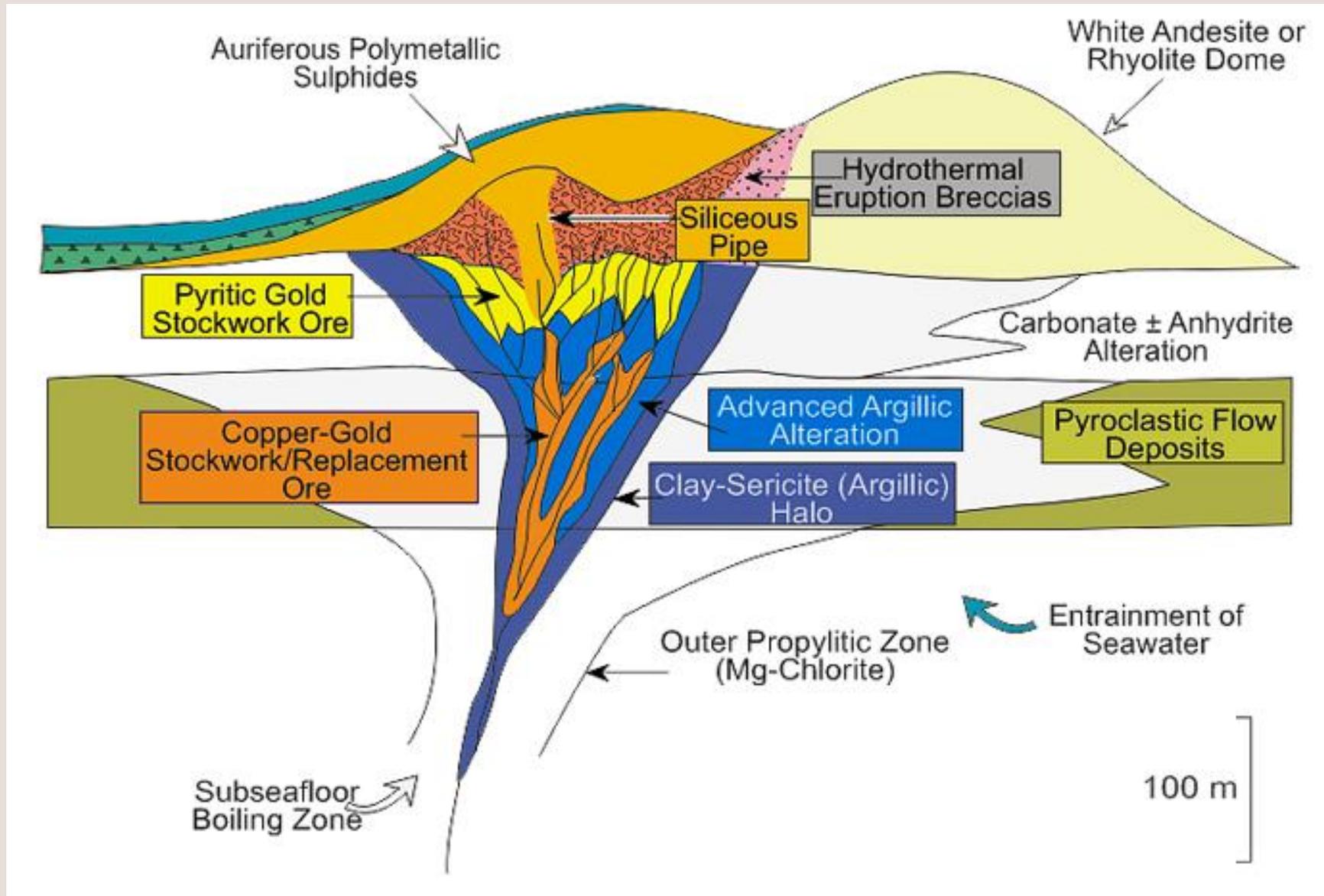


## ***Depósitos VMS ricos em ouro***

- Depósitos singenéticos hospedados em rochas vulcânicas pobres em ouro, com **mineralização aurífera sobreposta** associada ao metamorfismo regional e deformação
- Depósitos VMS caracterizados por fluidos hidrotermal quimicamente distintos devido à **maior contribuição magmática** e/ou precipitação em **condições de águas rasas ou subaéreas**, equivalentes às condições epitermais, nas quais processo de *boiling* são efetivos.

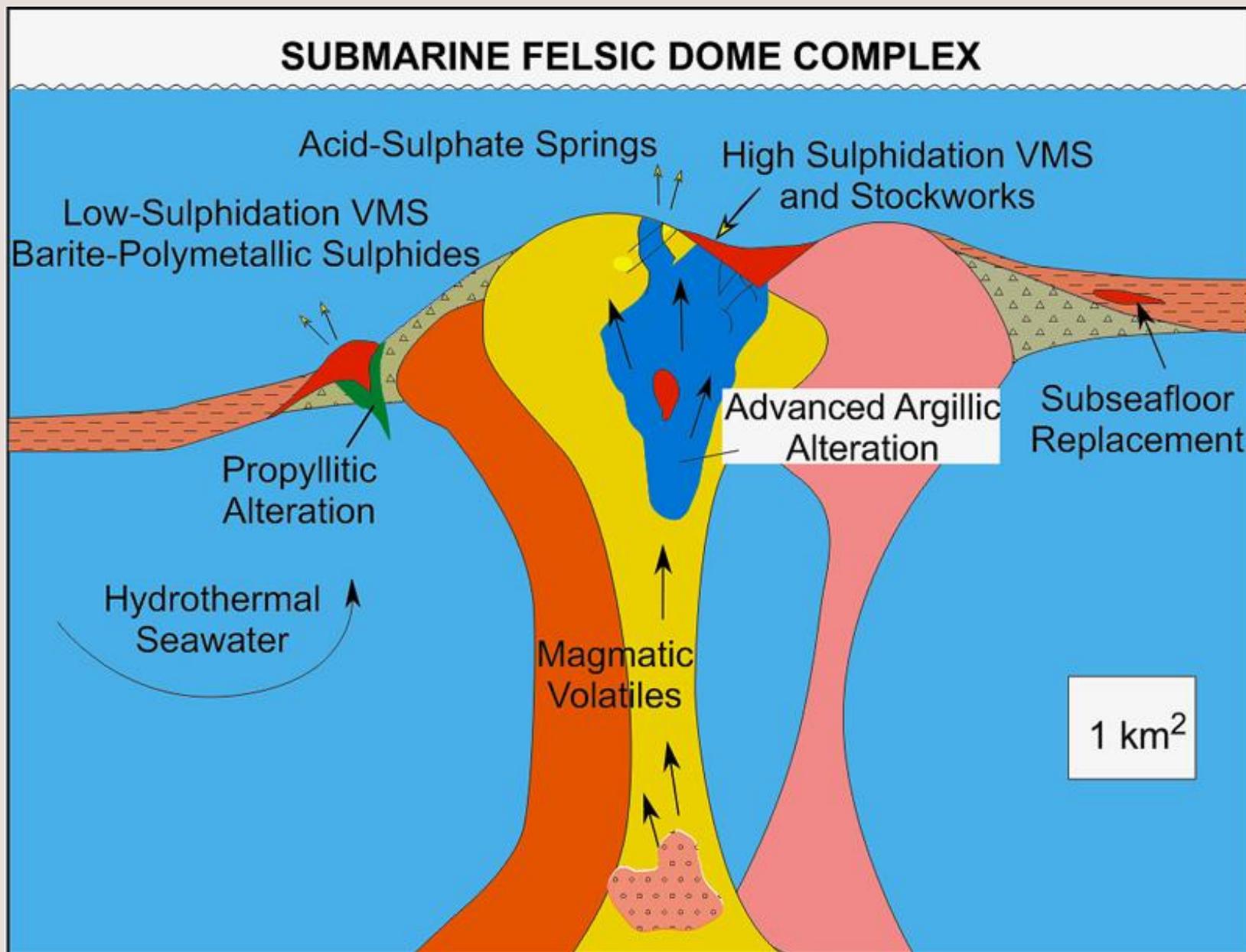
***Deformação em terrenos antigos obscureceu o caráter da mineração: singenético vs. sin-tectônico.***

# Depósitos de ouro associados a sulfetos maciços vulcanogênicos



Schematic illustration of geological setting and hydrothermal alteration associated with Au-rich high-sulphidation volcanogenic massive sulphide hydrothermal systems (from Hannington et al., 1999).

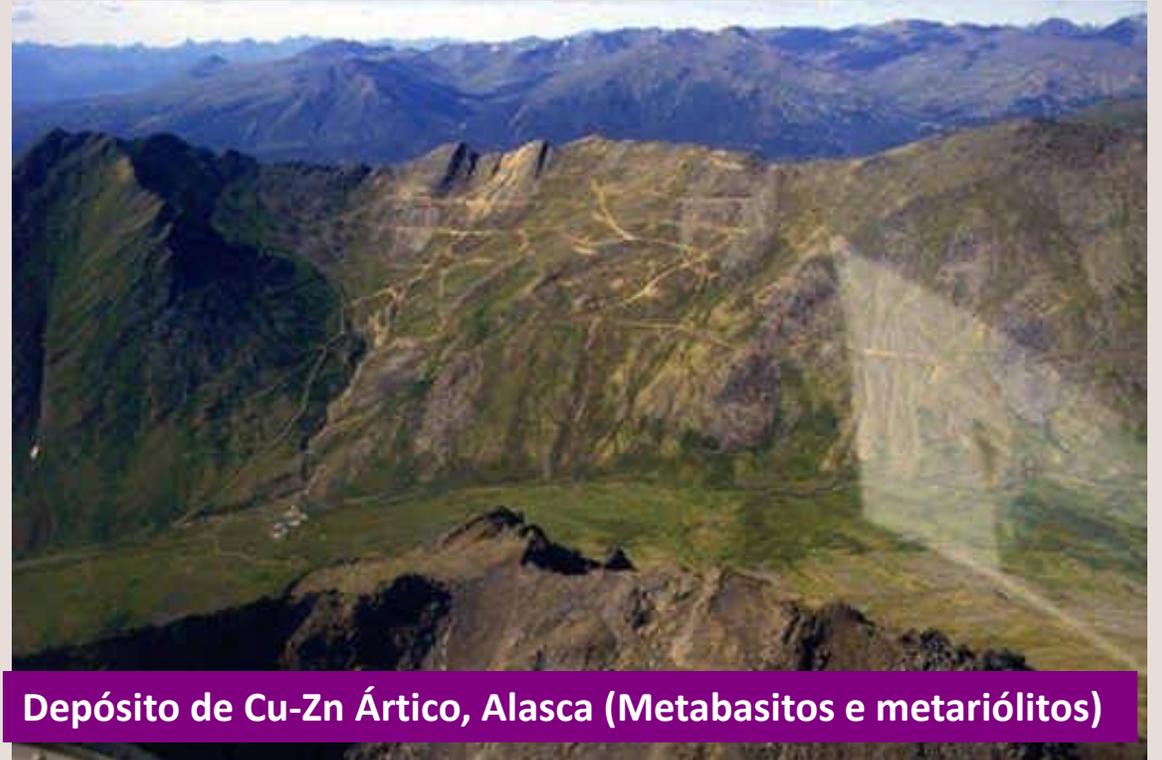
## Depósitos VMS ricos em ouro



Schematic section showing the position of high- and low-sulphidation volcanogenic massive sulphide environments in relationship to the submarine volcanic setting (from Sillitoe et al., 1996).

## GUIAS DE EXPLORAÇÃO

1. Identificação de rochas **vulcânicas submarinas**. Importante: presença de “pillow lavas” e sedimentos químicos (chert, formações ferríferas, carbonatos)
2. Evidências de **falhas sin-sedimentares** que possam ter atuado como zonas de alimentação (“debris flow”, mudança de fácies abrupta, variações na espessura).
3. Zonas de reação de alta temperatura (quartzo-epidoto-albita). Podem estar associadas à lixiviação de metais das rochas vulcânicas.



Depósito de Cu-Zn Ártico, Alasca (Metabasitos e metariólitos)

4. **Atividade exalativa** (chert com concentrações anômalas de Mn, Fe, Na, Ba, Zn, Pb). Em terrenos metamórficos, granada rica em Mn e estauroлита rica em Zn.