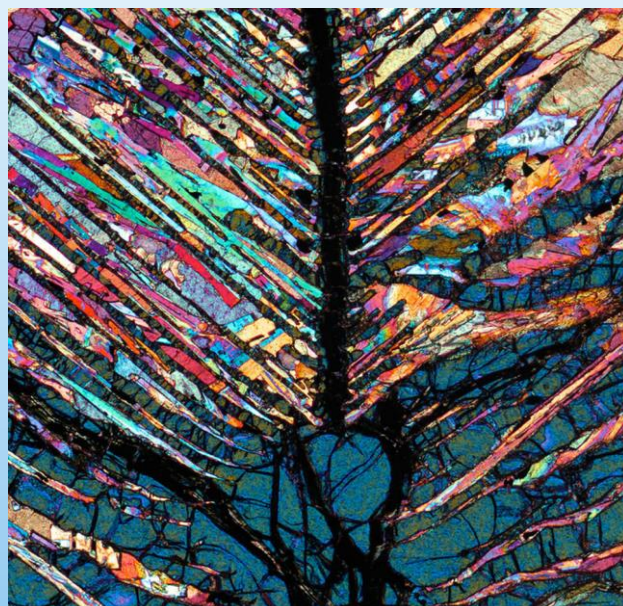


Vulcanismo ultramáfico

Komatiitos & Greenstone Belts

Prof. Caetano Juliani
Profa. Lena Virgínia Soares Monteiro



MAGMATISMO MÁFICO-ULTRAMÁFICO

Comumente compreende rochas intrusivas!



Dunito com textura cumulática

Cumulate-textured dunite of the Kluane Ranges Mafic-Ultramafic Suite (TrK), Tatamagouche Mafic-Ultramafic Complex (NTS 115G/06). <http://www.geology.gov.yk.ca>



Gabro cumulático com cristais cumuláticos de plagioclásio e augita



Lherzolito cumulático

Cumulate lherzolite, Jimberlana, Norseman, Dundas Shire, Western Australia, Australia, Asia; <https://www2.imperial.ac.uk>

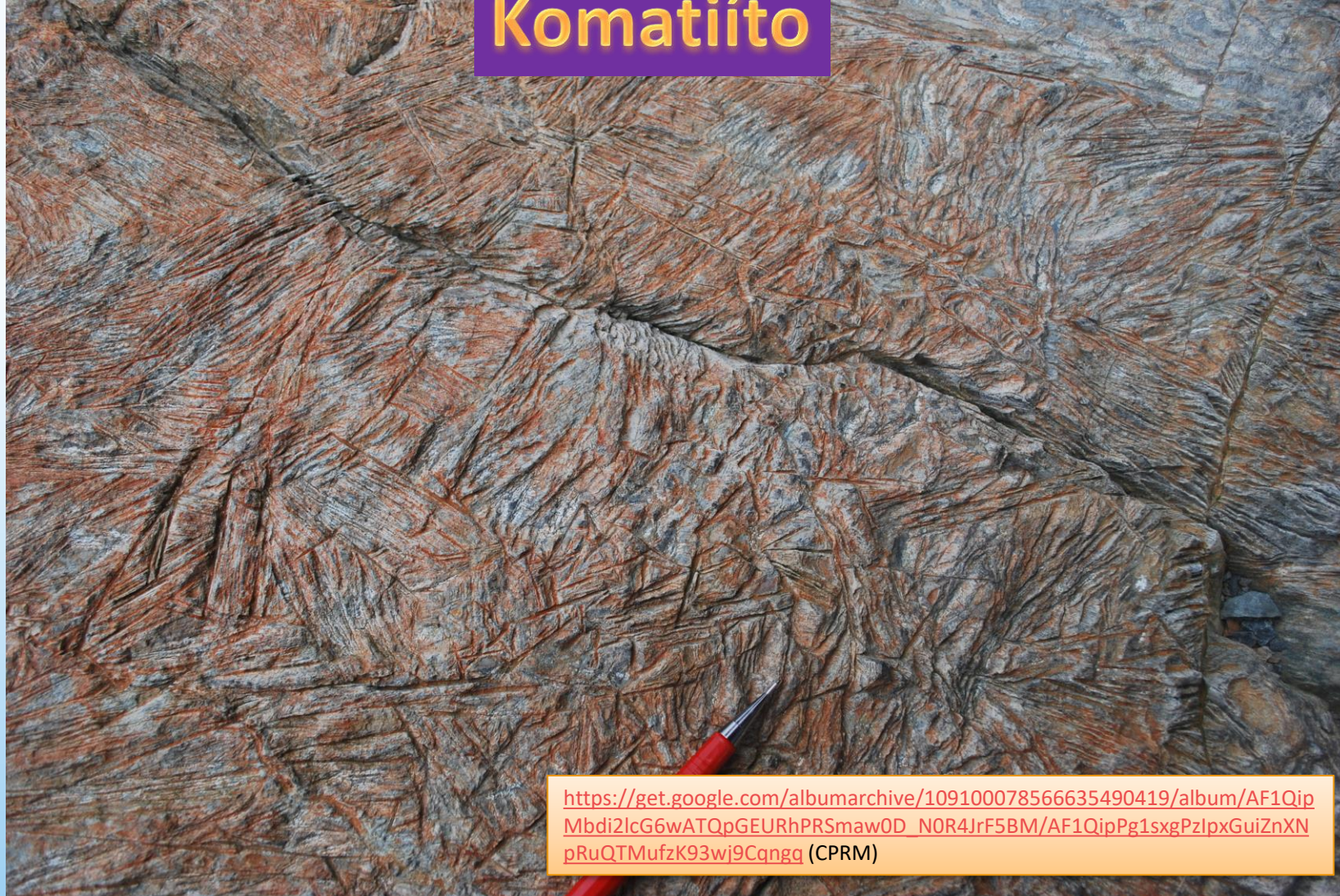
Existem rochas ultramáficas vulcânicas???

Greenstone Belts são formadas por:

- 1) Derrames komatiíticos na base, seguidos por basaltos tholeiíticos, sedimentos químicos (*chert*, formações ferríferas) e terrígenos, geralmente vulcanogênicos;
- 2) Basaltos tholeiíticos na base e raros derrames komatiíticos, seguidos por derrames e rochas vulcanoclásticas cálcio-alcalinas, intermediárias a félsicas intercalados a sedimentos químicos (*chert*, formações ferríferas) e terrígenos imaturos.

Comumente as rochas evidenciam **metamorfismo de baixo grau**, comumente na fácies xisto verde. Cor verde: minerais metamórficos: clorita, epidoto, actinolita e outros anfibólios.

Komatiíto



https://get.google.com/albumarchive/109100078566635490419/album/AF1QipMbdi2lcG6wATQpGEURhPRSmaw0D_N0R4JrF5BM/AF1QipPg1sxxgPzlpXGuiZnXNpRuQTMufzK93wj9Cqngq (CPRM)

Greenstone Belt & Rochas Vulcânicas

GREENSTONE BELT:

associações
vulcanossedimentares que
ocorrem em meio a terrenos
granito-gnáissicos nas regiões
cratônicas da Terra.

**Comuns no Arqueano, mas
exemplos são conhecidos no
Proterozoico.**

Exemplos de rochas raras,
típicas dos *greenstone belts*
(komatiitos) são também
conhecidos no Cretáceo.

Greenstone belts: contém rochas
vulcânicas derivadas de magmas
de origem mantélica extravasados
em ambientes (sub)-marinhos

Basalto tholeiítico (pillow lavas)



Basalto komatiítico (pillow lavas)



Esferulitos em basaltos komatiíticos

Basalto andesítico



Chert em "lava tubes"



Greenstone Belts: Crátons Arqueanos

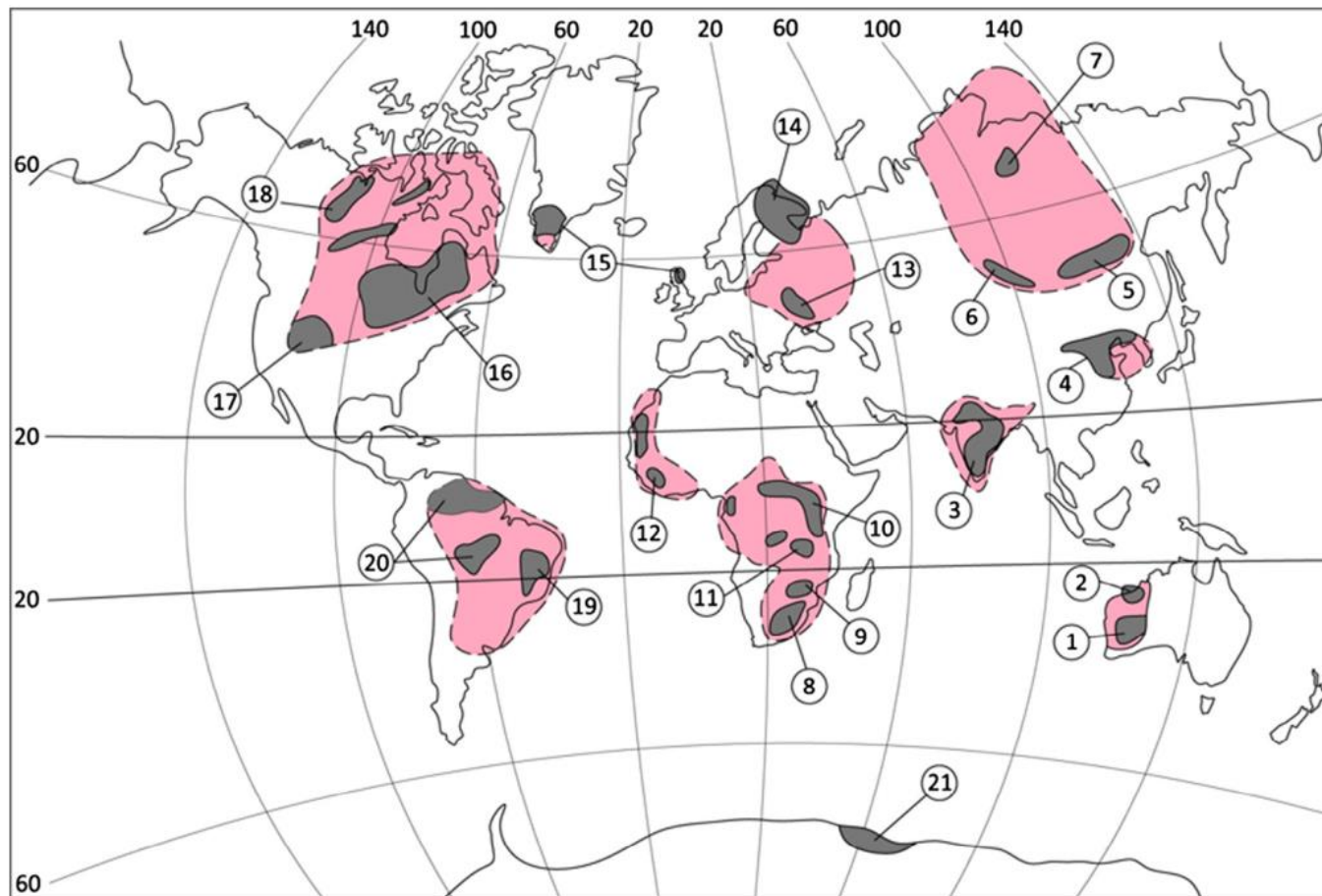
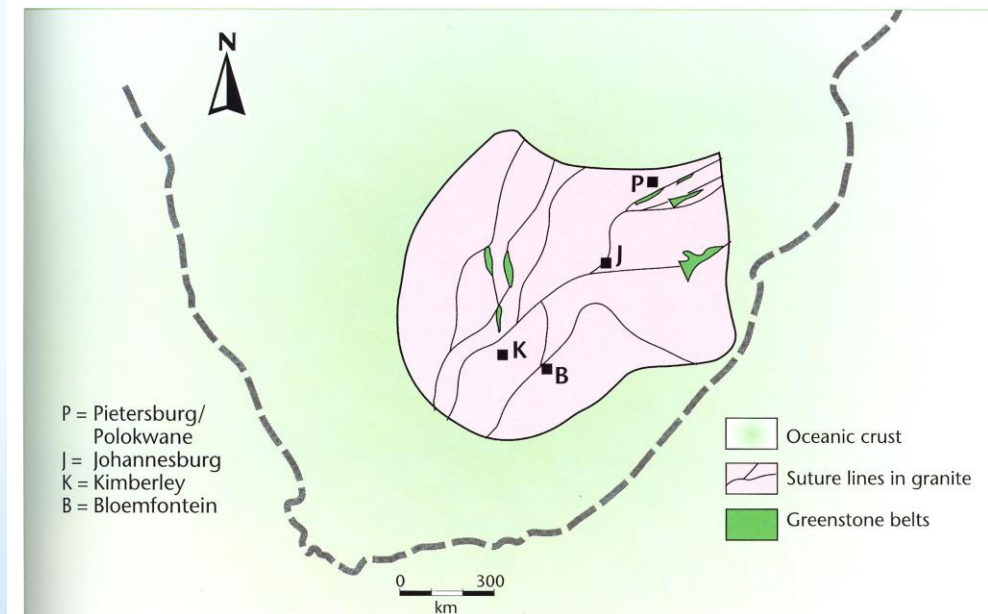


Fig. 1. Map showing the distribution of exposed Archean provinces or cratons worldwide (dark grey). The areas shown in pink are poorly known, but are considered to be underlain mostly by Archean-Proterozoic terranes. Key to major provinces: 1 = Yilgarn, 2 = Pilbara, 3 = Indian, 4 = North China, 5 = Aldan-Stanovik, 6 = Yenisei, 7 = Anabar, 8 = Kaapvaal, 9 = Zimbabwe, 10 = Central African (Tanzanian and northeastern Zaire), 11 = Kasai, 12 = West African (Liberia, Sierra Leone, Mauritania), 13 = Ukranian, 14 = Baltic-Svecofennian (Inari-Kola, Karelian), 15 = North Atlantic (Greenland, Scotland), 16 = Superior, 17 = Wyoming, 18 = Slave, 19 = São Francisco, 20 = Amazonian (Guiana, Guaporé), 21 = East Antarctica (map modified after [Condie, 1981, 2007](#); [Goodwin, 1991](#)).



Cráton Kaapvaal: formado pela aglutinação de vários microcontinentes.

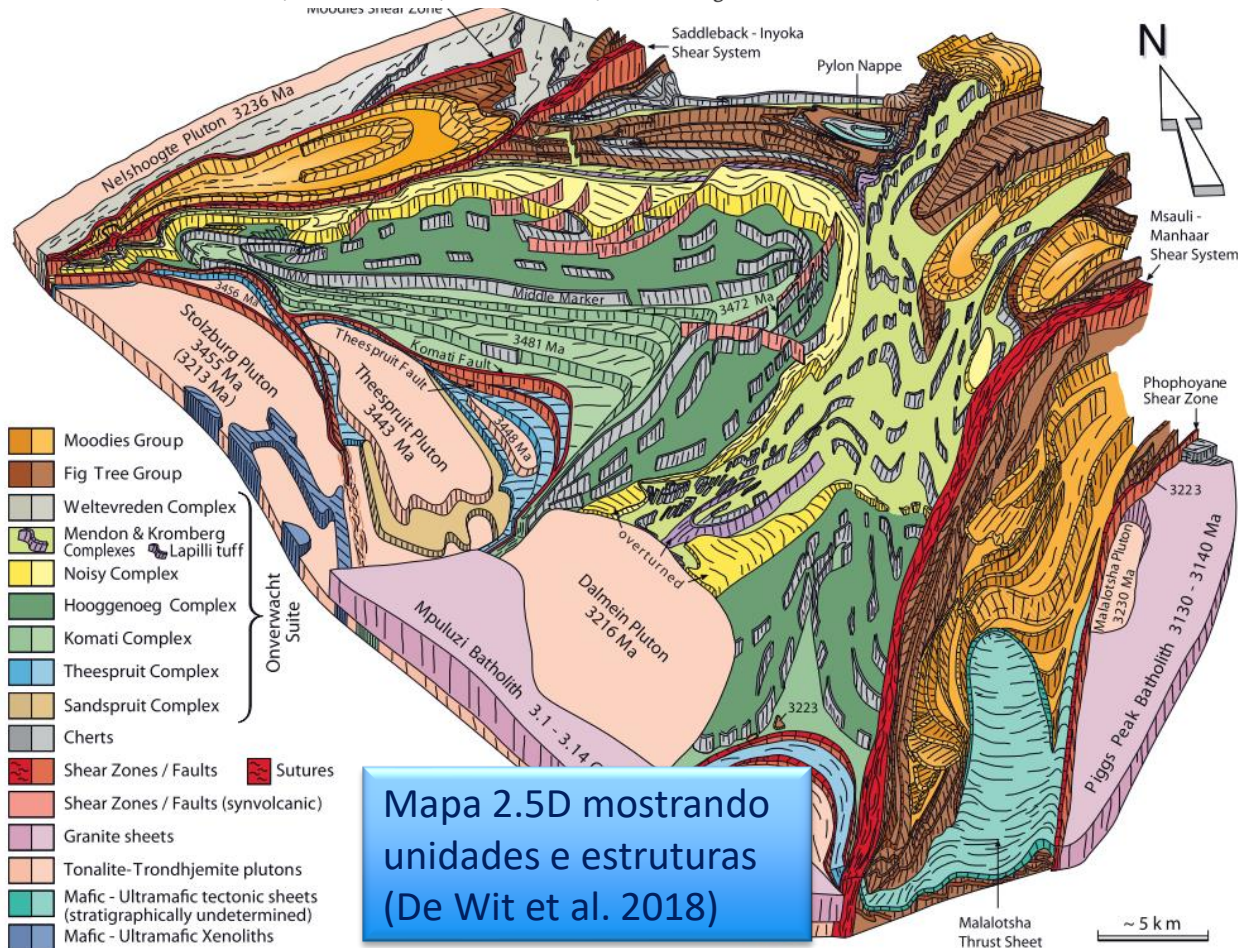
Greenstone belts marcam as linhas de sutura entre os fragmentos.

Fonte: Maarten de Wit.

Research Paper

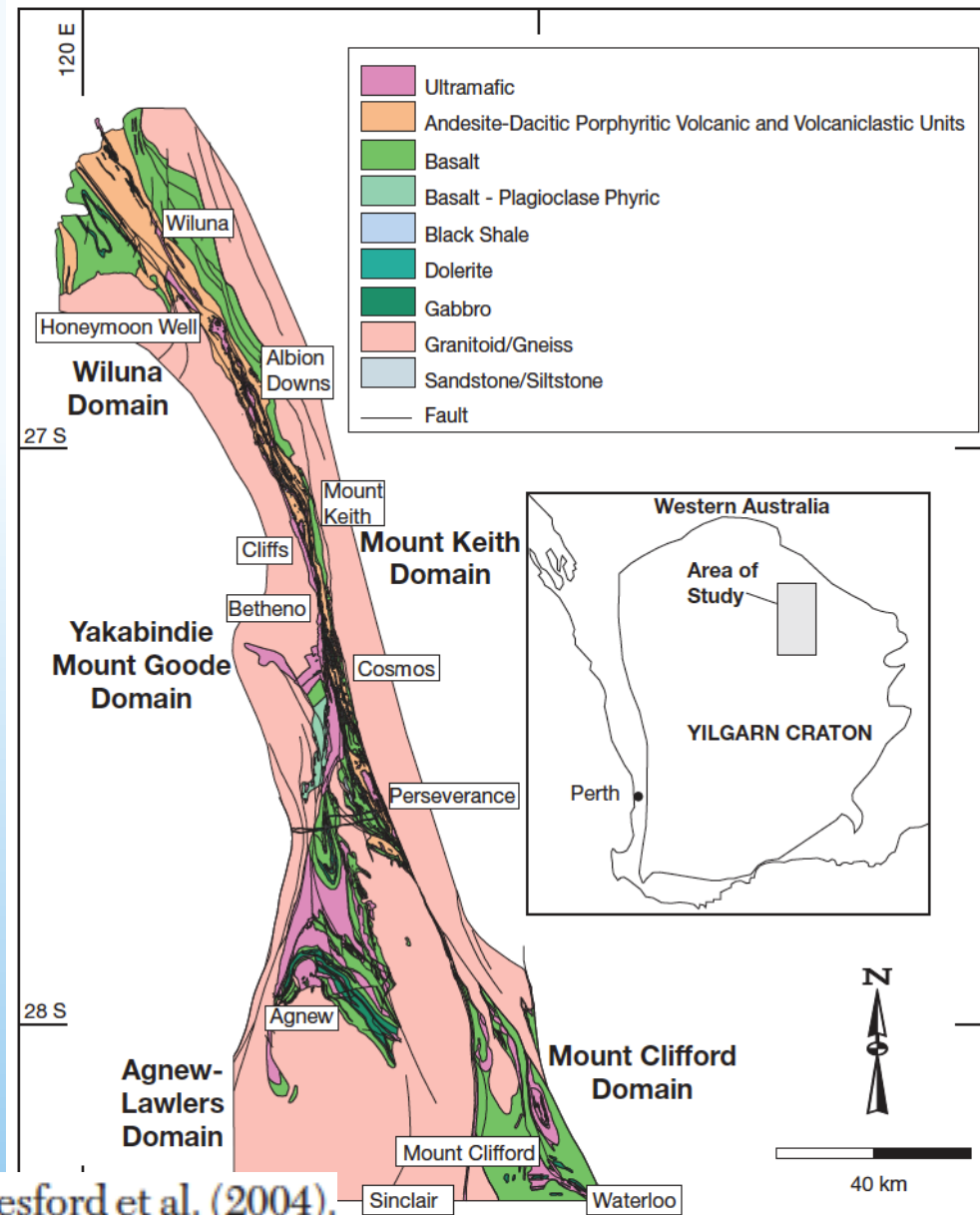
Paleoarchean bedrock lithologies across the Makhonjwa Mountains of South Africa and Swaziland linked to geochemical, magnetic and tectonic data reveal early plate tectonic genes flanking subduction margins

Maarten de Wit^{a,*}, Harald Furnes^b, Scott MacLennan^{a,c}, Moutar Doucouré^{a,d}, Blair Schoene^c, Ute Weckmann^e, Uma Martinez^{a,f}, Sam Bowring^g



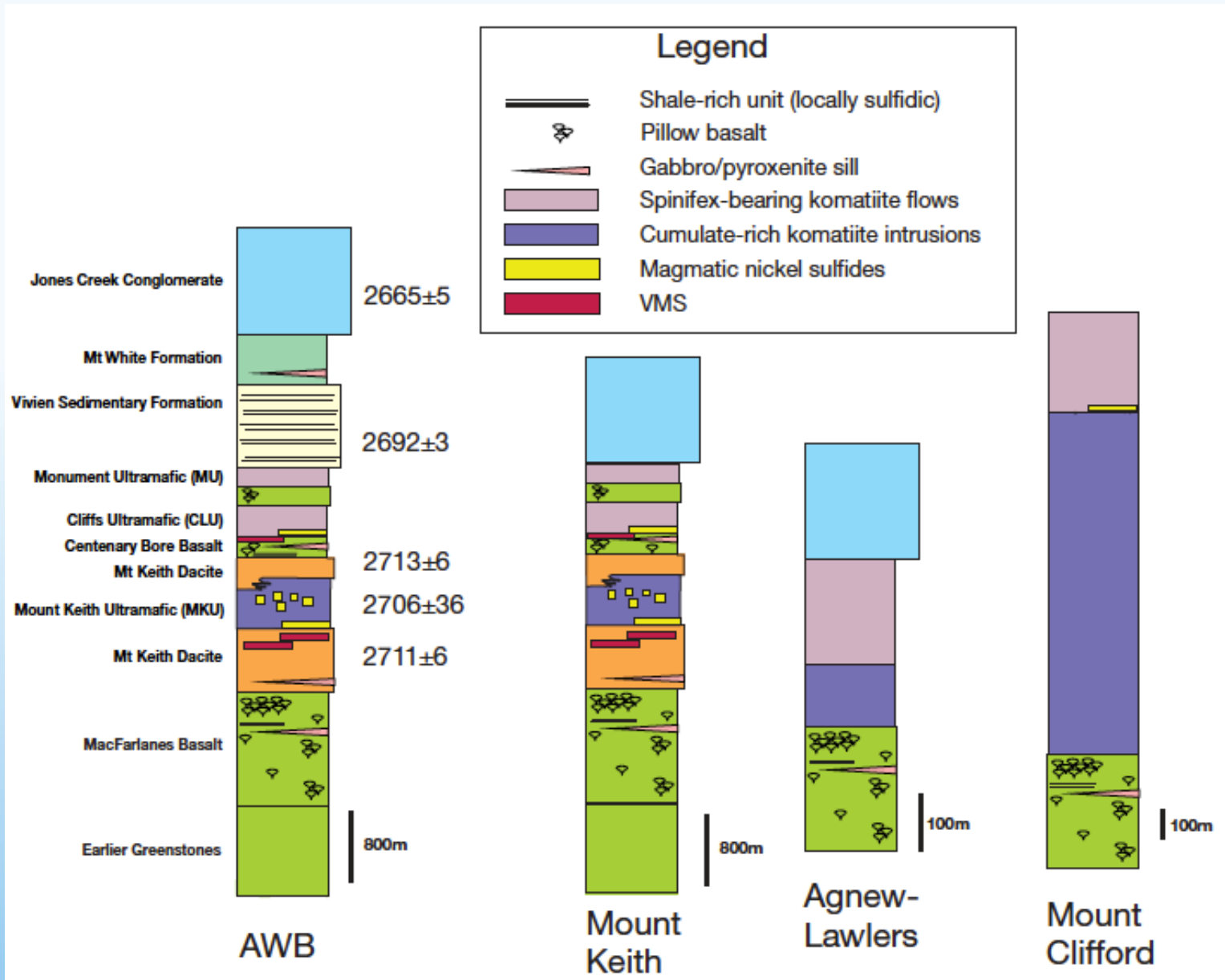
Mapa 2.5D mostrando unidades e estruturas (De Wit et al. 2018)

Greenstone Belt Agnew-Wiluna (Austrália)



Beresford et al. (2004).

Estratigrafia do Greenstone Belt Agnew-Wiluna (Austrália)



Idade: 2,7 Ga

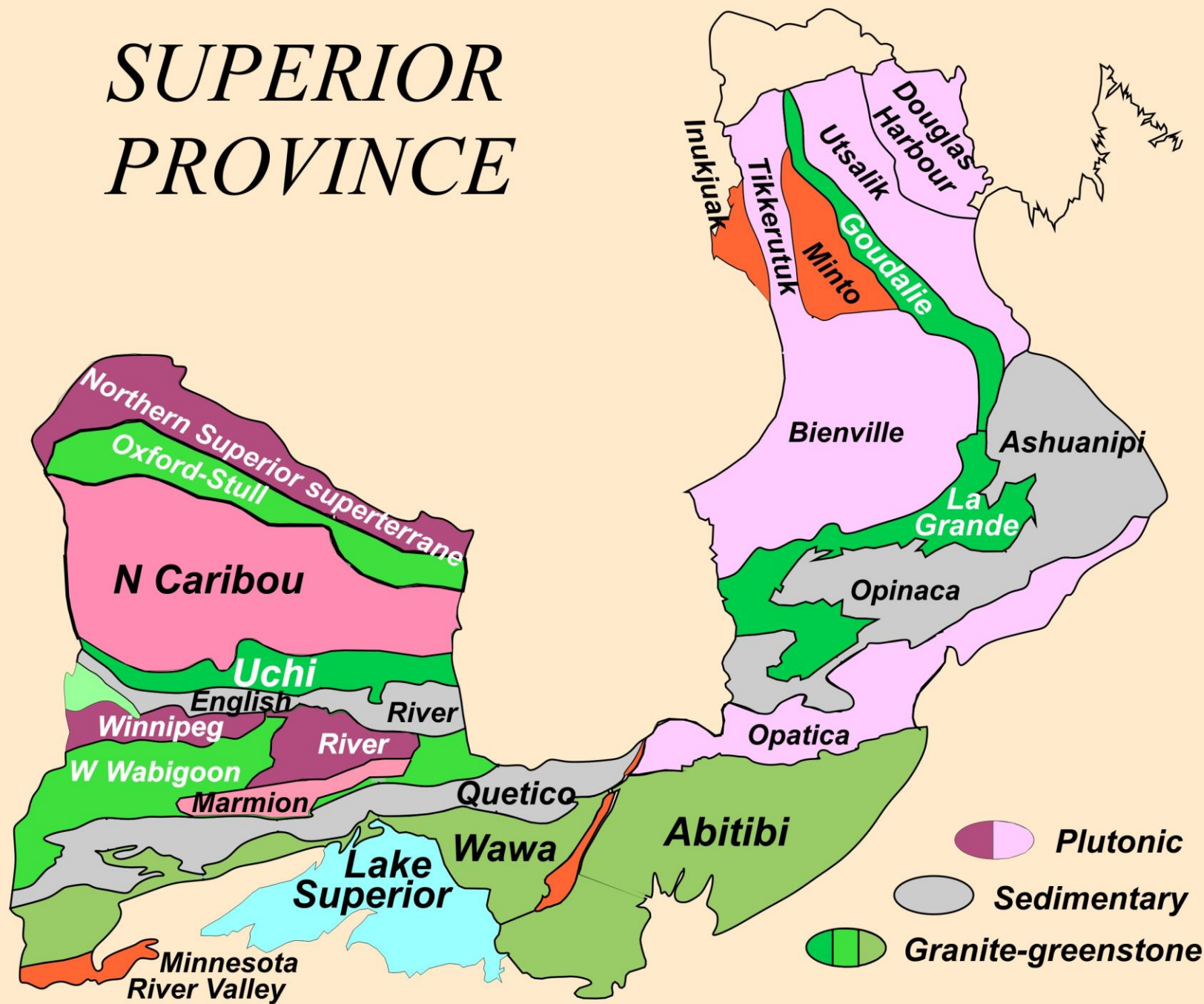
Rochas vulcânicas basálticas e félsicas, vulcanoclásticas, folhelhos carbonosos sulfetados, exhalitos e komatiitos com textura “spinifex”

Depósitos de níquel de classe mundial: Mount Keith e Perseverance

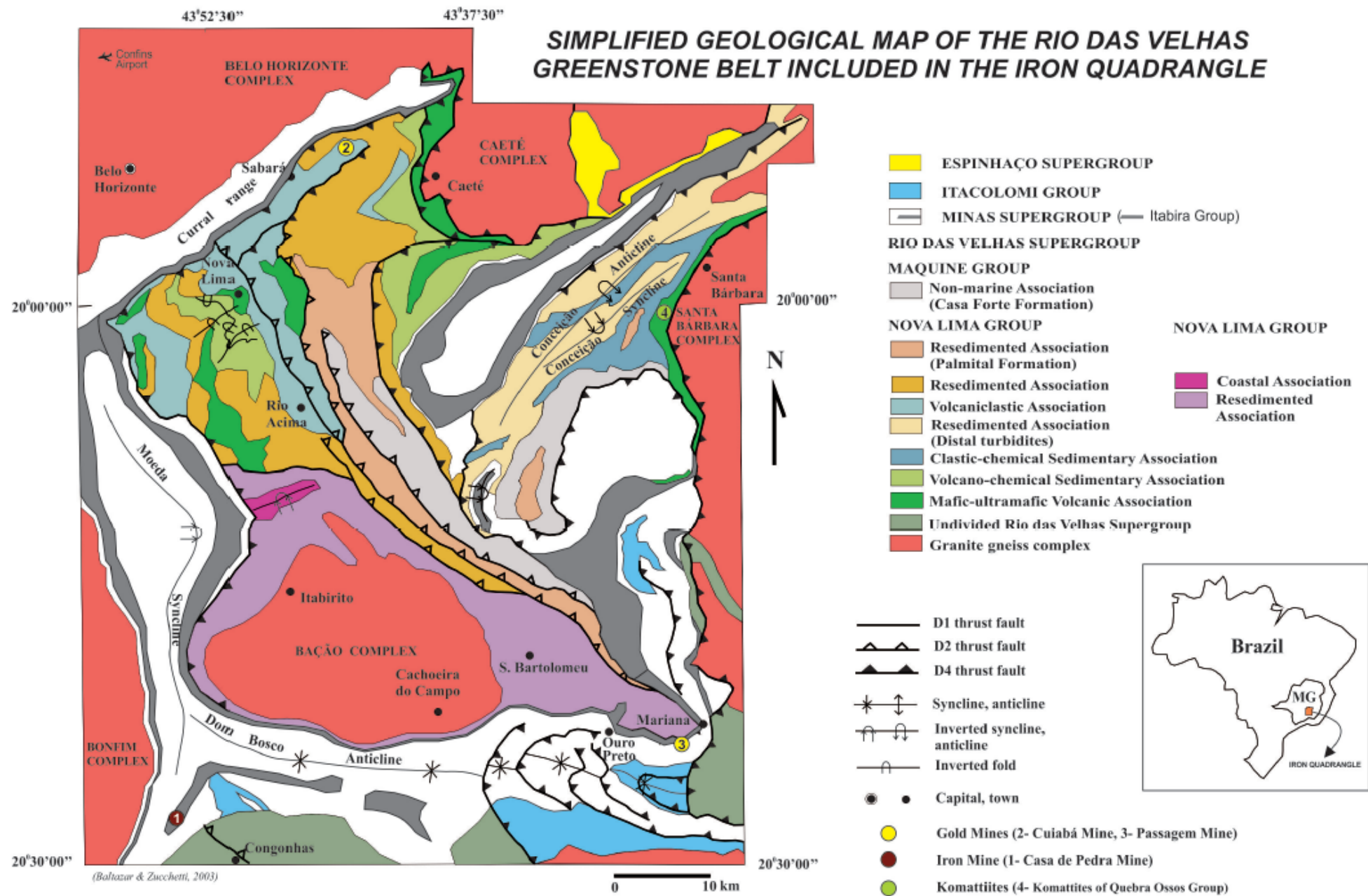
Fiorentini *et al.* (2012)

Beresford *et al.* (2004).

SUPERIOR PROVINCE



Quadrilátero Ferrífero



Baltazar & Zuchetti
(2003)

Komatiíto

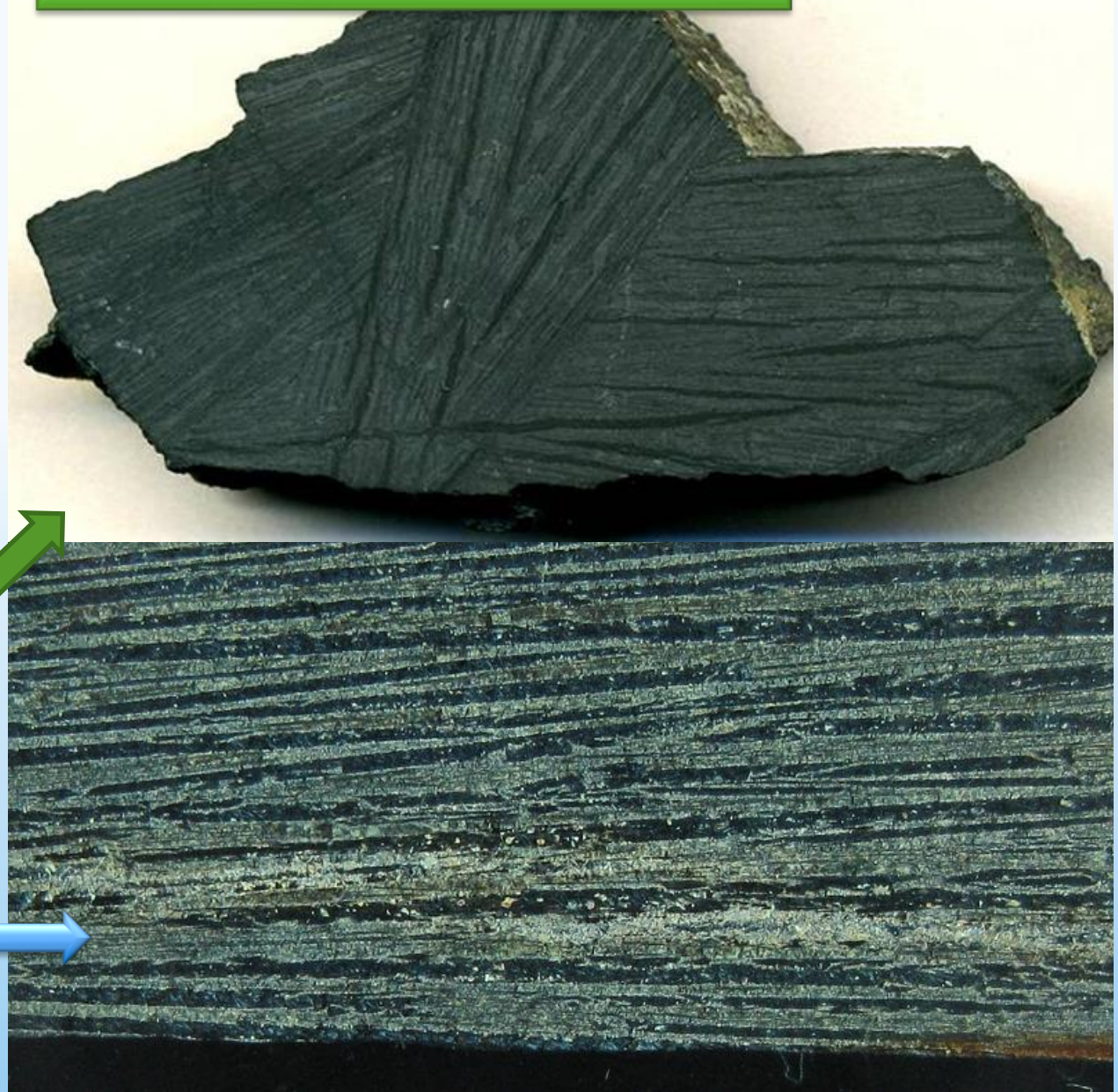
Reconhecidos no final dos anos 1960 no *Greenstone Belt* Barberton, África do Sul (Viljoen & Viljoen, 1969).

Komatiíto: rocha vulcânica ultramáfica com > 18% de MgO e baixo conteúdo de sílica (40-45 %) com textura *spinifex* ou associada a derrames com essa textura;

Komatiite do Komati river (África) com textura spinifex.
From James St. John.
<http://www.alexstrekeisen.it/english/vulc/komatiite.php>

Essa amostra representa uma rocha ultrabásica com textura fina e fenocristais esqueletais de olivina em matriz constituída por clinopiroxênio, cromita e clorita. Os fenocristais de olivina apresentam > 4 cm e foram quase que completamente substituídos por serpentina.

Komatiito com textura *spinifex*



Komatiito & Basalto komatiítico

Komatiito: Formado a partir de erupções a altíssimas temperaturas resultantes de taxas de fusão de 30-50% do manto;

IMPORTANTES PARA A COMPREENSÃO DA EVOLUÇÃO TERMAL DA TERRA

Comumente apresentam idades de 3,5 Ga a 1,5 Ga
Exemplo raro: Gorgona, Colômbia (88 Ma)

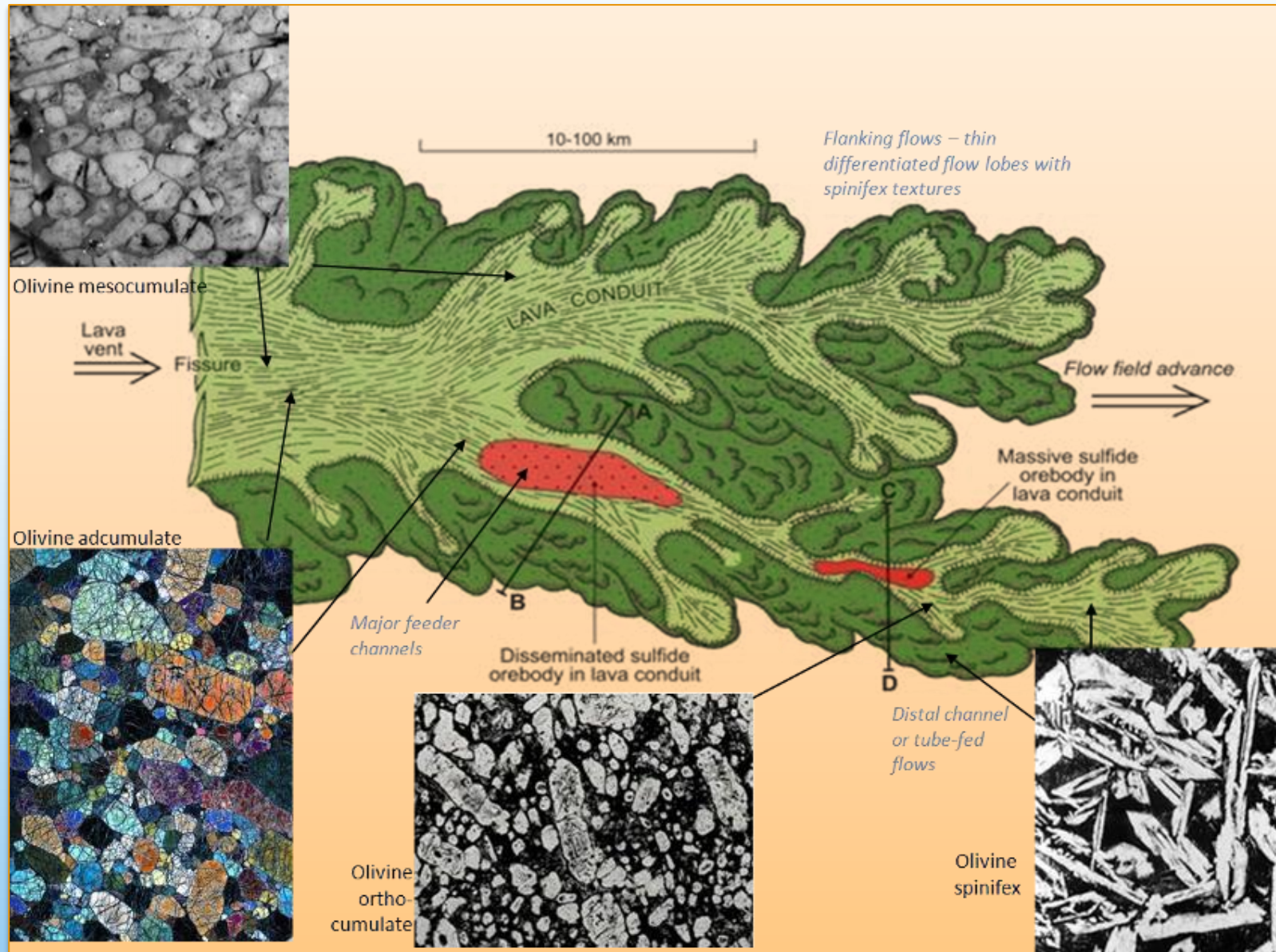
Dois modelos:

- 1) Fusão anidra do manto peridotítico a alta T e P ($>1600\text{ }^{\circ}\text{C}$, 18 GPa);
- 2) Fusão na presença de fase fluida a menores T, em ambiente de subducção;



Spinifex Texture in a komatiite Sample from Munro, Canada. From Nick Arndt

Komatiito & Basalto komatiítico



CONDUTOS PARA O MAGMA:

olivina cumulos a adcumulos formados a partir de magmas com > 32% de MgO de altíssima temperatura (> 1600 °C)

TUBOS DE LAVAS enriquecidos em olivina alimentam os derrames komatiíticos

Tipos texturais de komatiitos:

Komatiitos cumuláticos;
Komatiitos com Spinifex;
Komatiites não cumuláticos

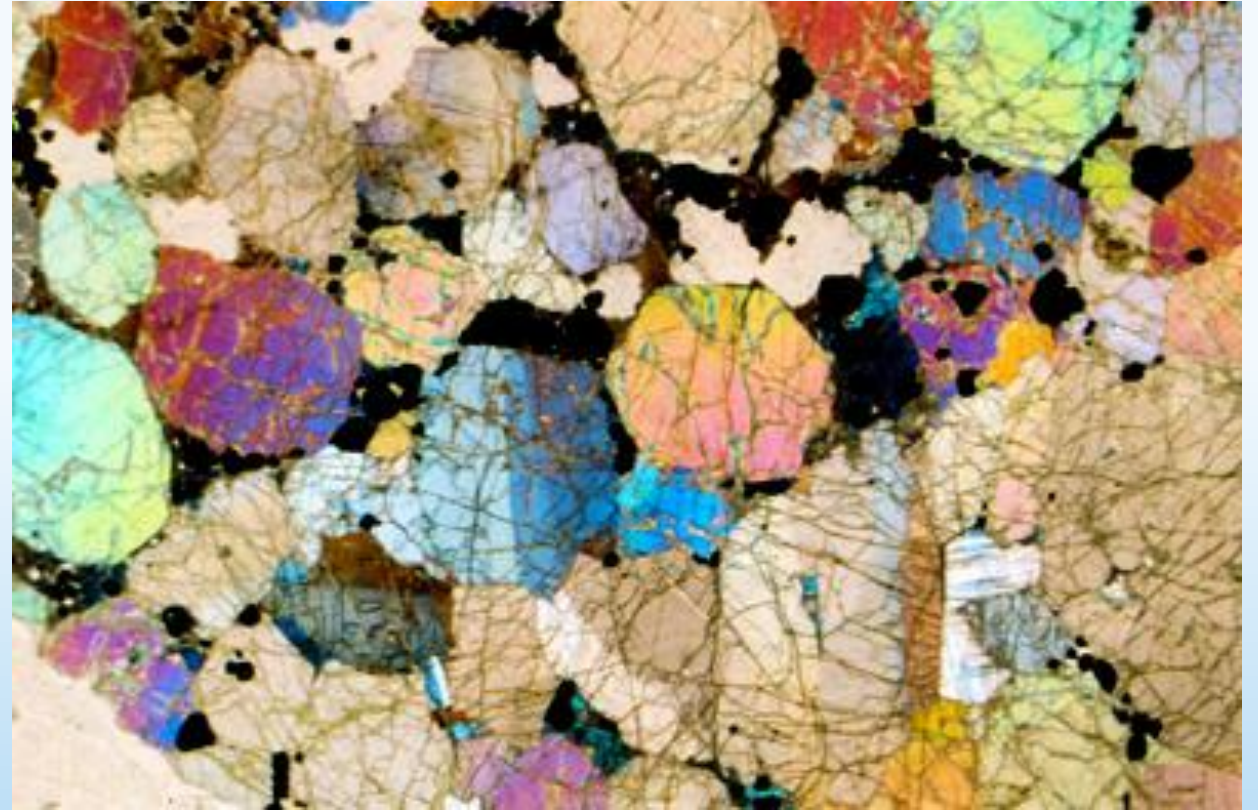
Condutores para o magma: rochas cumuláticas

Rochas ígneas formadas pela acumulação por gravidade dos minerais cristalizados inicialmente a partir do magma

ROCHAS ORTOCUMULÁTICAS: líquido intercumulus é diferente das fases cumuláticas e forma minerais intercumulus distintos.

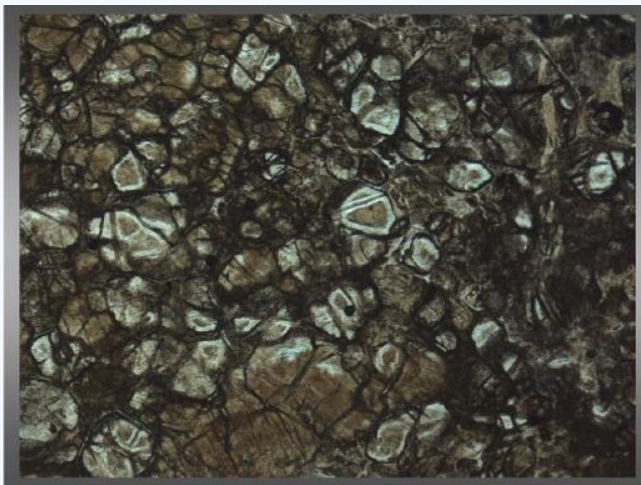
ROCHAS ADCUMULÁTICAS: líquido intercumulus é semelhante às fases cumuláticas, formando rochas monominerálicas.

ROCHAS MESOCUMULÁTICAS: intermediárias entre orto e adcumulados.



Orthocumulate texture - Harzburgite with cumulate olivine and chromite and intercumulus plagioclase. Stillwater Layered Intrusion. Width = 8 mm. Image © T. E. Bunch, 2007.

QUADRILÁTERO FERRÍFERO: SUPERGRUPO RIO DAS VELHAS



Vale do Rio Quebra Osso



Dunitos maciços com textura adcumulática indicando fluxo canalizado das lavas komatiíticas com fácies de brechas. Devido ao metamorfismo as paragêneses ígneas resultaram em serpentinitos e clorita-talco xisto, mas relíquias de olivina ígnea estão ainda presentes.

Contato tectônico entre rochas metaultramáficas (a esquerda) e BIF (direita)

Estruturas *pillow-lava* e textura “variolítica”

Komatiíto & Basalto Komatiítico

Komatiíto: rochas vulcânicas com $> 18\%$ MgO (Arndt *et al.*, 2008)

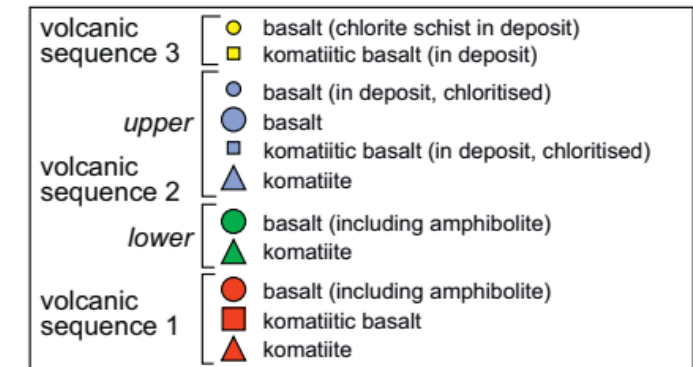
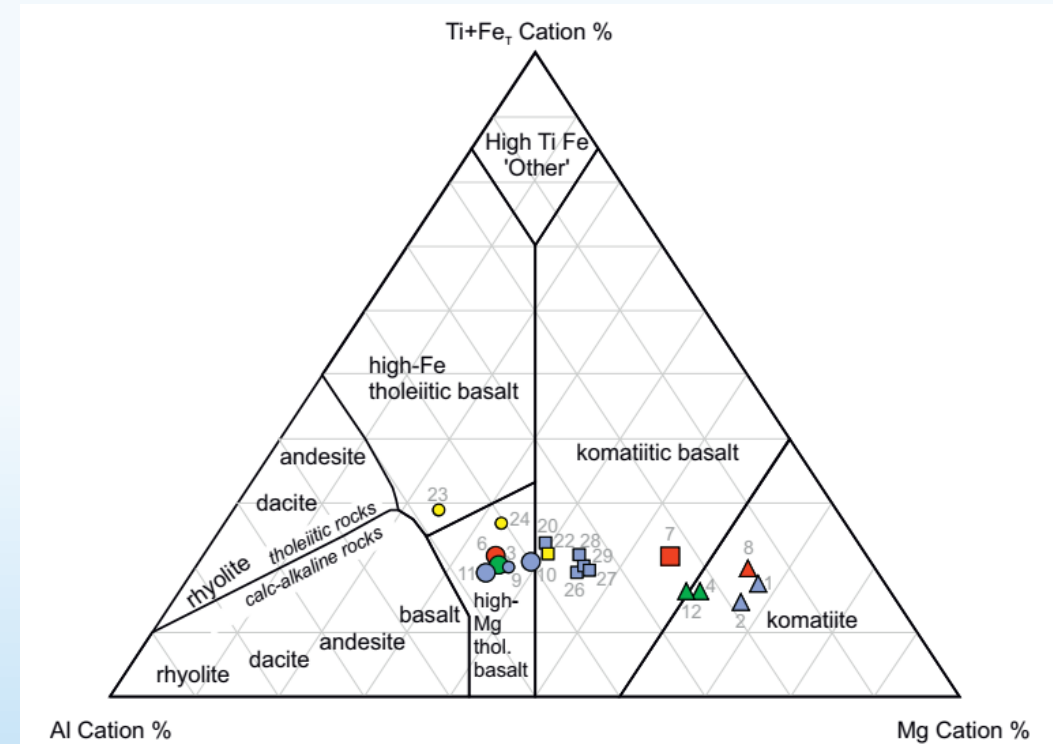
Komatiitos: apresentam razões de $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$, $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ e Gd/Yb HREE variadas;

Barberton: alta razão $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ (>1) ou baixa razão $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ (10–15), enquanto komatiitos de outras localidades tem razão $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ próxima de 20 (Arndt *et al.*, 2008).

Tipos de komatiitos (Sun and Nesbitt, 1978; Nesbitt *et al.*, 1979; Jahn *et al.*, 1982):

- 1) **“AL-DEPLETED KOMATIITES”**: baixa razão Al/Ti, alta concentração de elementos incompatíveis e empobrecidos em ETRP;
- 2) **“AL-UNDEPLETED KOMATIITES”**: razão Al/Ti condrítica e distribuição de ETRP “flat”;
- 3) **“AL-ENRICHED KOMATIITES”**: alta razão Al/Ti, baixa concentração de elementos incompatíveis, enriquecidos em ETRP e muito empobrecidos em ETRL;

Os diferentes tipos de komatiitos podem se formar sincronicamente a partir de fontes diferentes.



Al₂O₃/TiO₂ vs (Gd/Yb)_N diagram

Y-axis: Al₂O₃/TiO₂ (0 to 70)

X-axis: (Gd/Yb)_N (0.5 to 3.5)

Legend:

- volcanic sequence 3**
 - basalt (chlorite schist in deposit) (yellow circle)
 - boninitic (chlorite schist in deposit) (yellow diamond)
- upper**
 - basalt (in deposit, chloritised) (blue circle)
 - basalt (in deposit, chloritised) (blue diamond)
 - boninitic (in deposit, chloritised) (blue diamond)
 - komatiite (in deposit, chloritised) (blue triangle)
 - komatiite, AUK (blue triangle)
- volcanic sequence 2**
 - lower
 - boninitic (green diamond)
- volcanic sequence 1**
 - basalt (including amphibolite) (red circle)
 - komatiite, ADK (red triangle)

Regions and Samples:

- Abitibi boninites:** High Al₂O₃/TiO₂ (40-65), low (Gd/Yb)_N (0.5-1.0).
- Kambalda:** (Gd/Yb)_N ≈ 0.8, Al₂O₃/TiO₂ ≈ 20.
- Forrestania:** (Gd/Yb)_N ≈ 0.9, Al₂O₃/TiO₂ ≈ 15.
- Kolar Schist Belt:** (Gd/Yb)_N ≈ 1.0, Al₂O₃/TiO₂ ≈ 10.
- Abitibi AUK and ADK:** (Gd/Yb)_N ≈ 1.1, Al₂O₃/TiO₂ ≈ 15.
- Barberton:** (Gd/Yb)_N ≈ 1.5, Al₂O₃/TiO₂ ≈ 5.
- Lumby Lake belt:** (Gd/Yb)_N > 2.0, Al₂O₃/TiO₂ < 5.

Al-undepleted (above dashed line)
Al-depleted Ti-enriched (below dashed line)

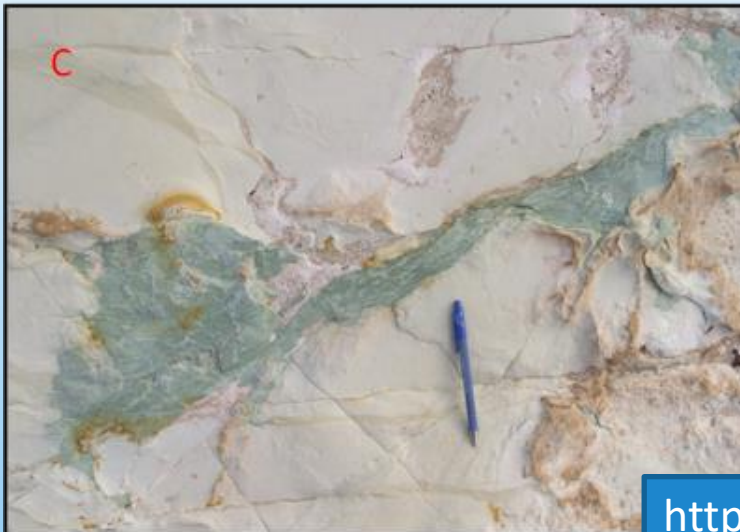
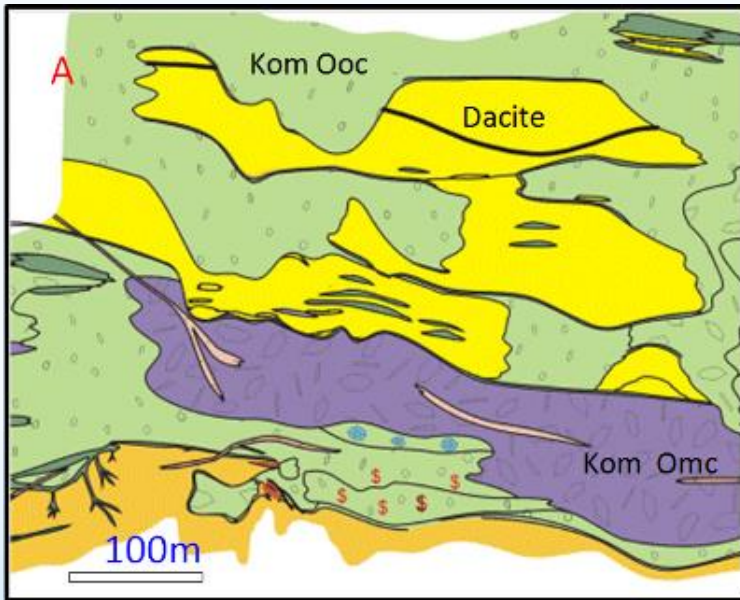
Komatiitos empobrecidos em Al_2O_3
($\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2 \sim 10$);
Separação do magma da fonte a **grandes profundidades** (450-300 km);
Tipo de komatiito mais comum entre **3,5 Ga e 2,7 Ga**

Komatiitos não empobrecidos em Al_2O_3
($\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2 \sim 20$);
Separação do magma do manto a partir
do qual foi gerado a profundidades **< 300
km**;
Altas taxas de fusão ocorrem comumente
a profundidades **< 150 km**

TIPO GORGONA

Komatiíto & Dacitos: *magma mingling*

Komatiíto com estruturas *pillow lavas*,
Formação Theespruit (3,53 Ga),
Greenstone Belt Barberton, África do Sul



<http://www.largeigneousprovinces.org/12aug>

Basaltos com pillow lavas, Grupo
Warrawoona Group, Cráton Pilbara



Basalto com estruturas pillow lavas e feições
radiais de degaseificação, Greenstone Belt
Barberton



Pillow basaltos deformados, Greenstone Belt Wabigoon, Craton Superior, Canadá



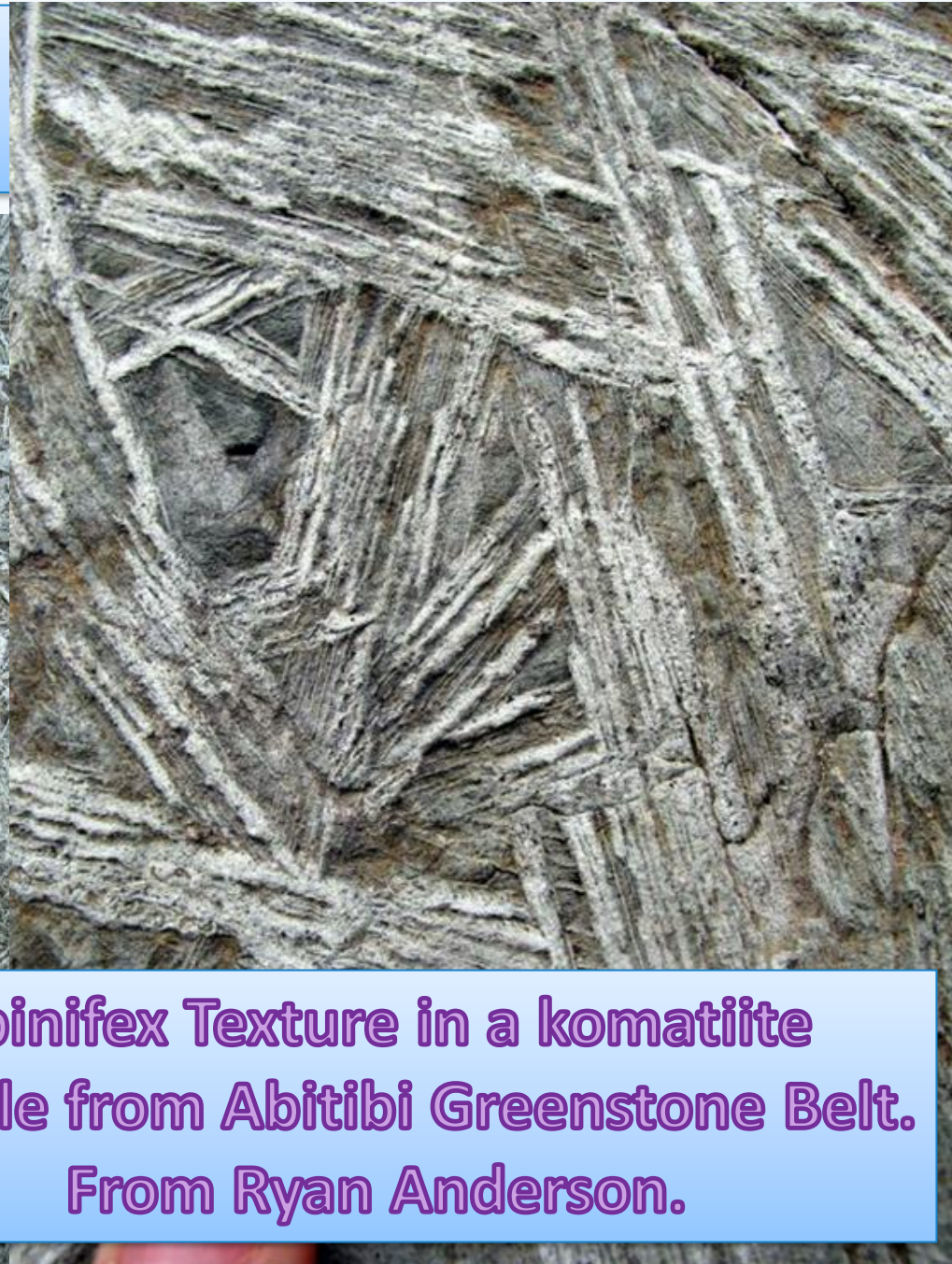


Estruturas de *pillow lavas*
tubulares, Greenstone Belt
Barberton



Pillow breccia,
Grupo Warrawoona,
Polo Norte

Textura *spinifex* em komatiíto de 3,45 Ga
(rio Komati, África do Sul)



Spinifex Texture in a komatiite
Sample from Abitibi Greenstone Belt.
From Ryan Anderson.

**GRAMA SPINIFEX EM KOMATIÍTO,
GREENSTONE BELT PILBARA,
AUSTRALIA**

Textura *Spinifex*

Arranjo de **cristais esqueléticos** em forma de **agulhas de olivina ou piroxênio** que ocorre por dezenas de centímetros a metros no top dos derrames komatiíticos.

Hábito dos cristais é sugestivo de **resfriamento muito rápido** na margem dos derrames.



Textura Spinifex: Definição

Arndt (1994):

“**SPINIFEX** é a textura caracterizada por **olivina ou piroxênio** (pigeonita/augita) esqueléticos, dendríticos, acicular, “platy” ou “bladed” encontrada nas **partes superiores de derrames komatiíticos** ou, menos comumente, nas margens de sills ou diques.

A textura é formada durante a **cristalização *in situ* rápida de líquidos ultramáficos** ou altamente máficos

Cristais tipicamente são anisótropos com centímetros de comprimento e milímetros de espessura

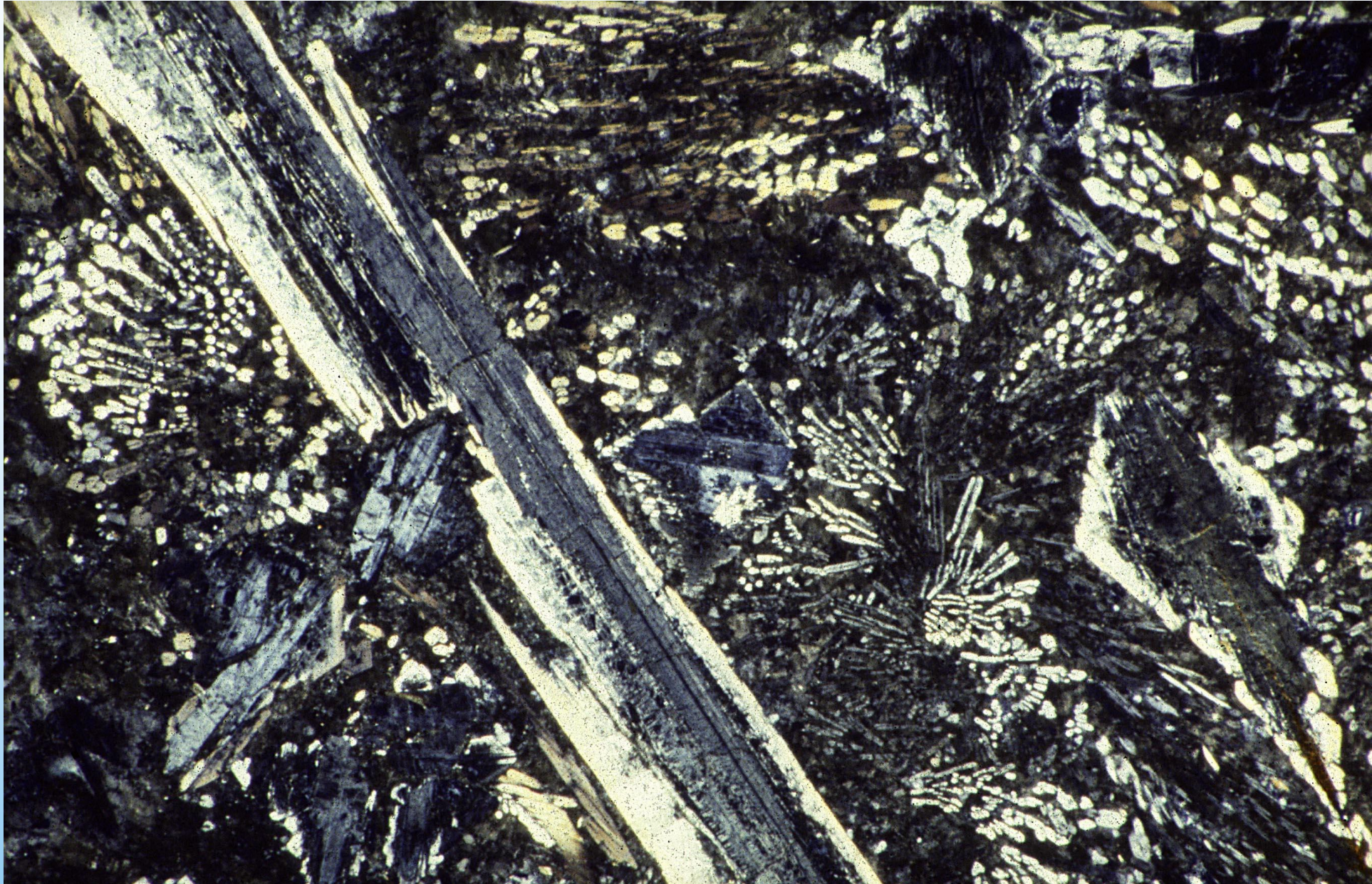
PARADOXO: textura de resfriamento rápida formada no interior de derrames

Textura pode refletir gradiente térmico (diferença de temperatura entre a curva do *liquidus* e do *solidus*) durante o resfriamento

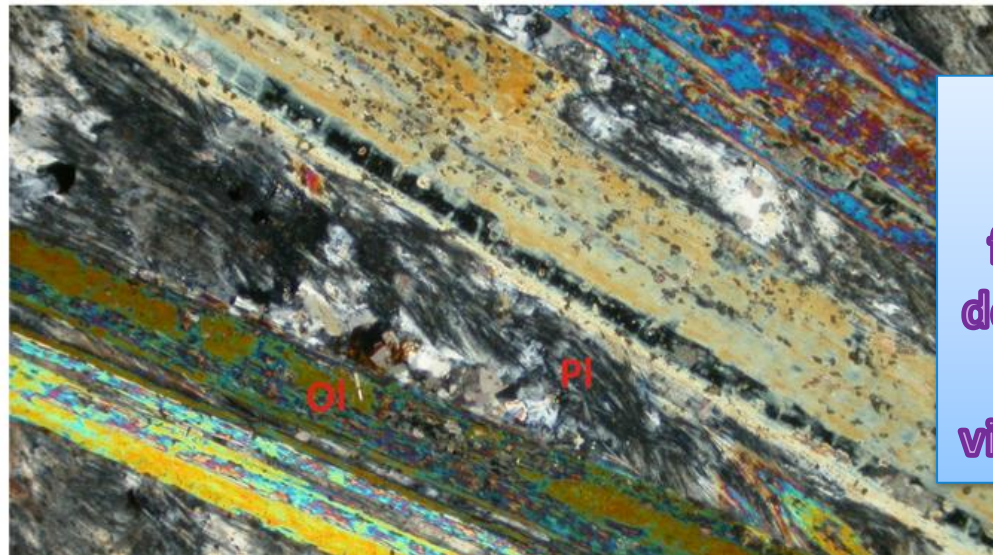
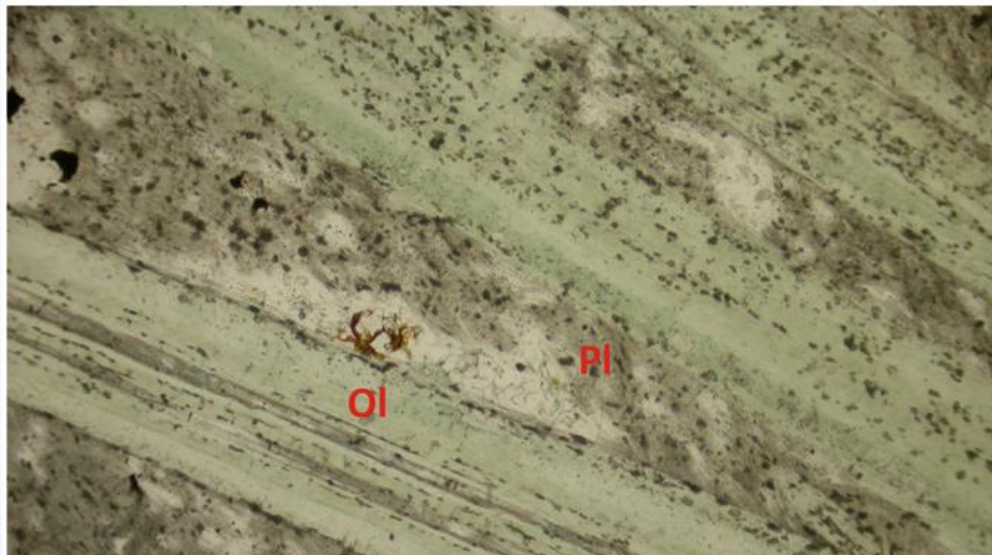
REFLETE AS CONDIÇÕES DE MAGMAS FORMADOS TÍPICAMENTE NO ARQUEANO

Komatíto, Grupo Warrawoona, Cráton Pilbara, Australia

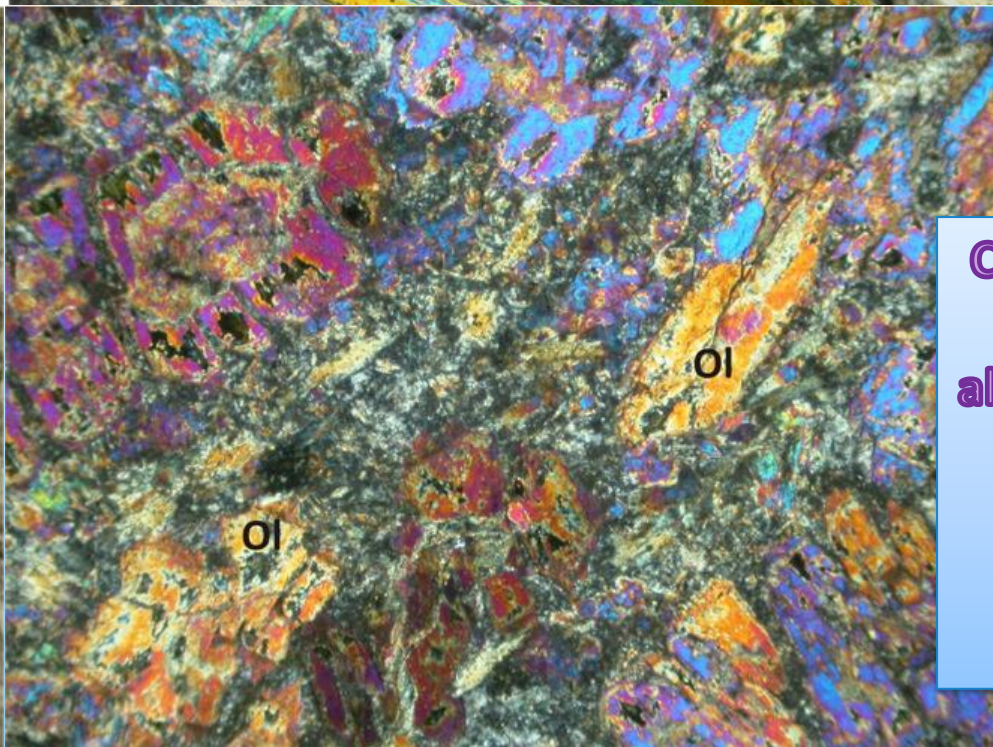
Textura *spinifex* em komatíto,
Greenstone Belt Barberton, África do Sul



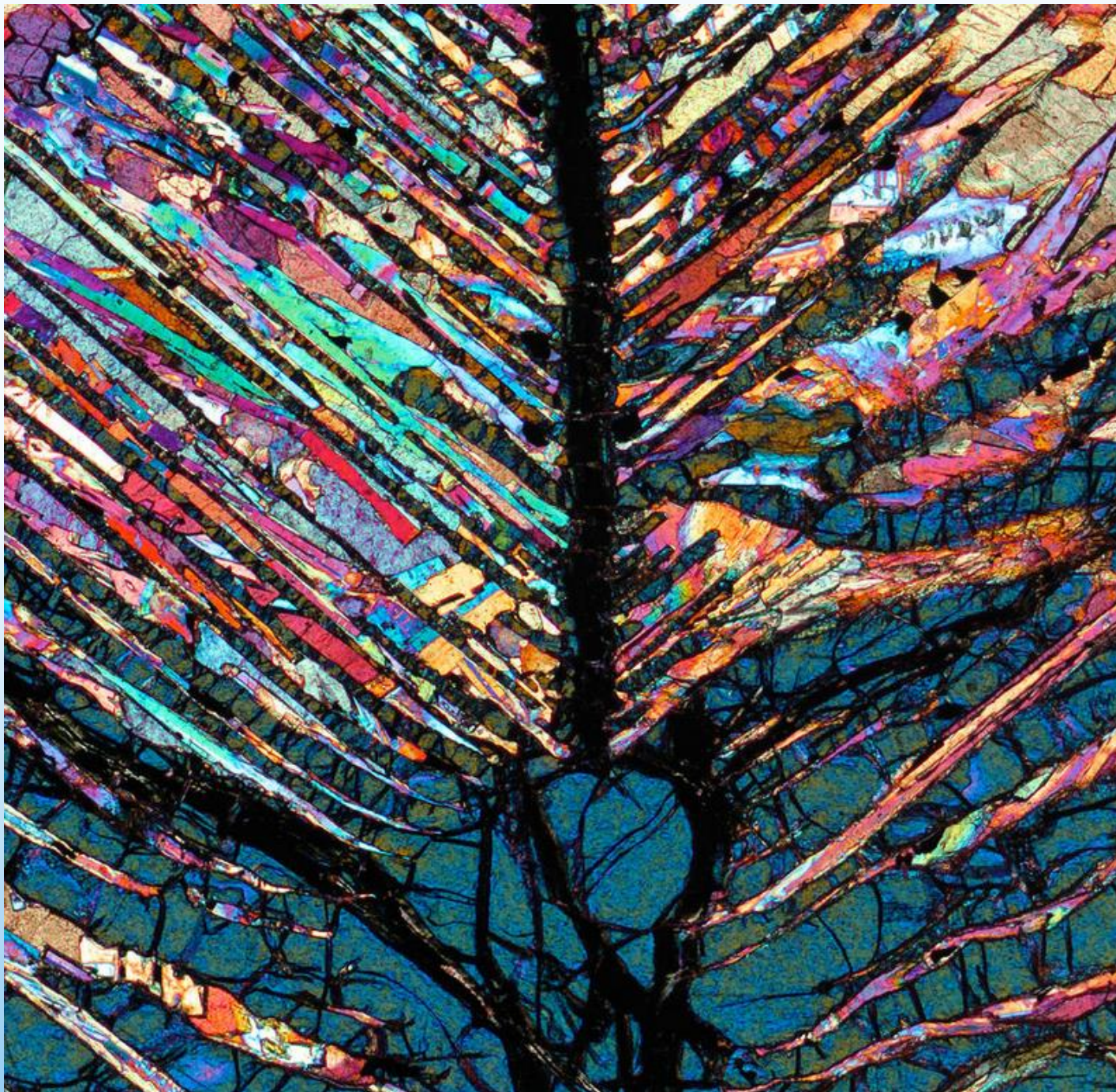
Textura spinifex em komatilito



Fenocristais alongados em forma de agulhas de olivina em matriz constituída por vidro e plagioclásio.



Corte perpendicular aos fenocristais alongados de olivina, mostrando grãos arredondados ou prismas curtos de olivina.



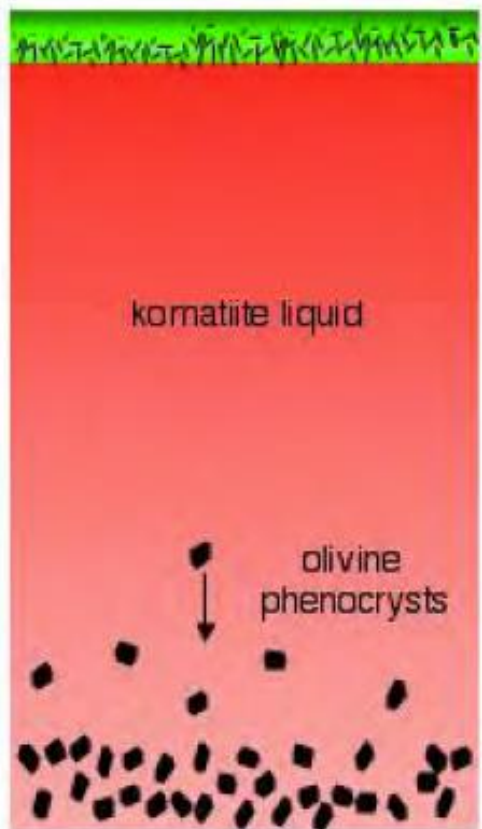
Komatiíto de Gorgona, Colômbia

Bernardo Cesare

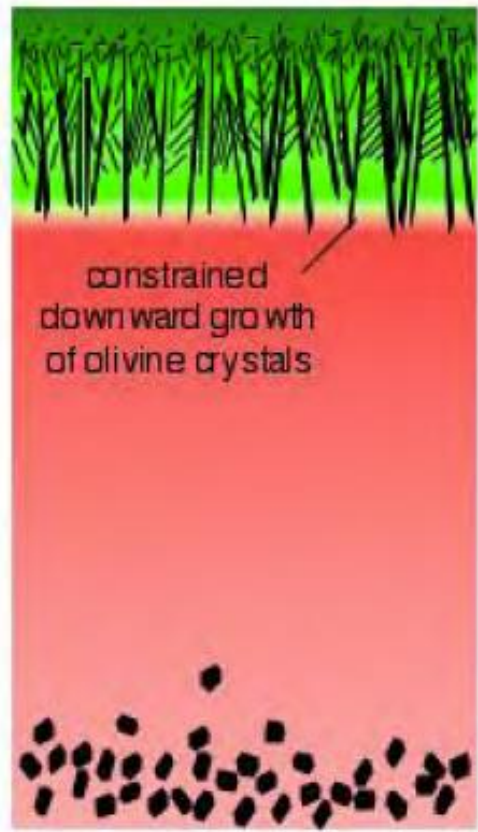
<http://fineartamerica.com/featured/komatiite-bernardo-cesare.html>

Textura *spinifex* em komatítito

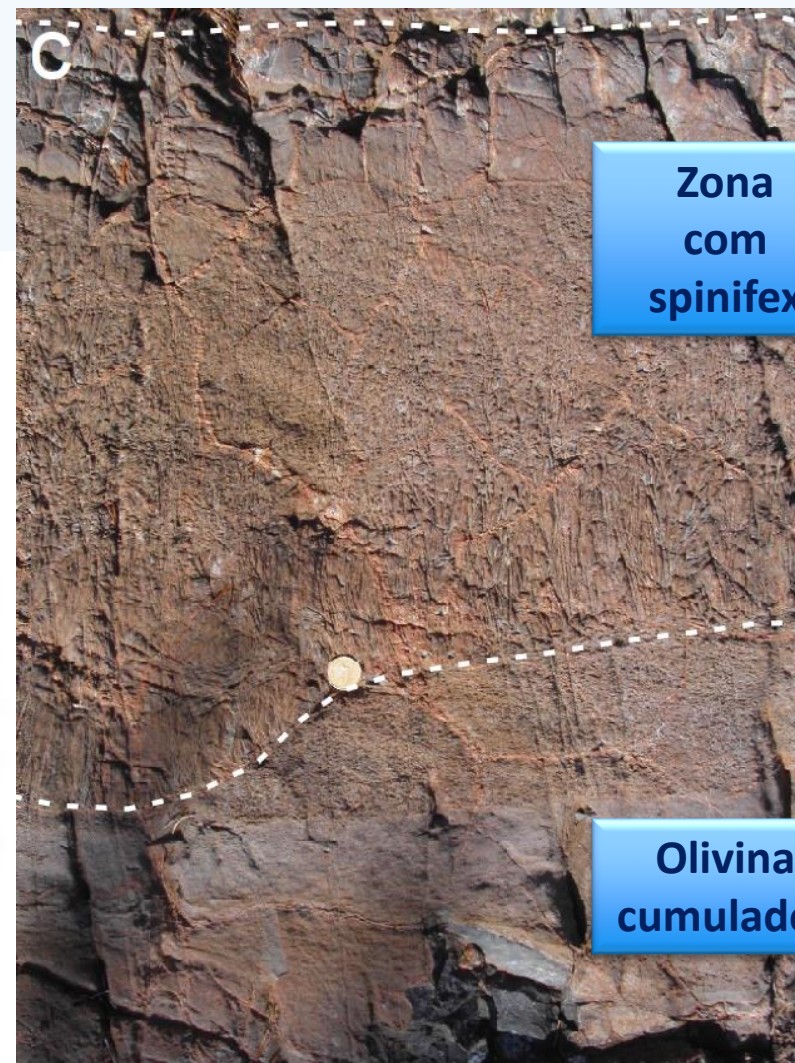
Estágio 1: fenocristais acumulam-se na base ao derrame; crosta fina forma-se no topo



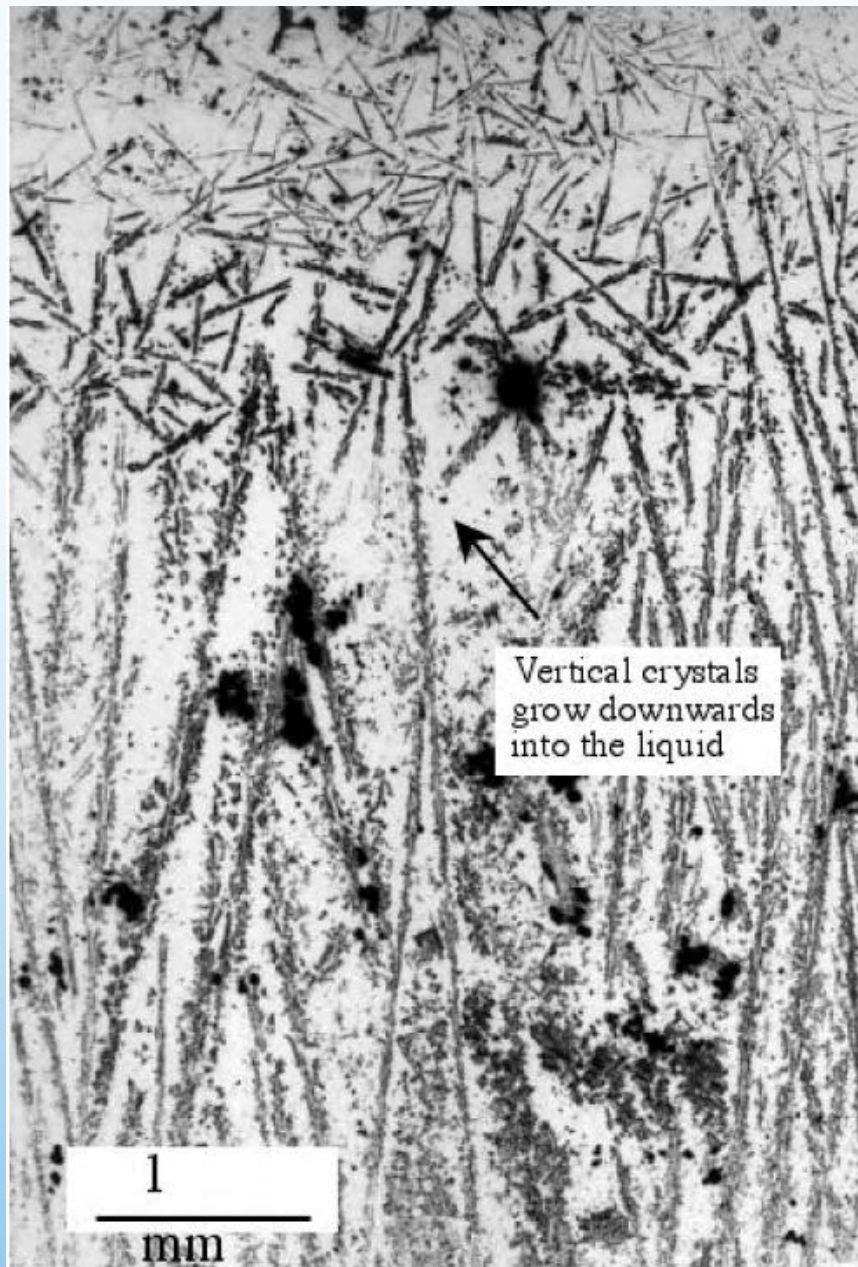
Estágio 2: textura *spinifex* forma-se a partir do crescimento de fenocristais de olivina em direção às partes internas do derrame.



Estágio 3: acumulação de líquido de menor densidade expelido das partes basais condiciona o hábito e composição dos cristais de olivina com textura *spinifex*



TEXTURA SPINIFEX EM KOMATIÍTO



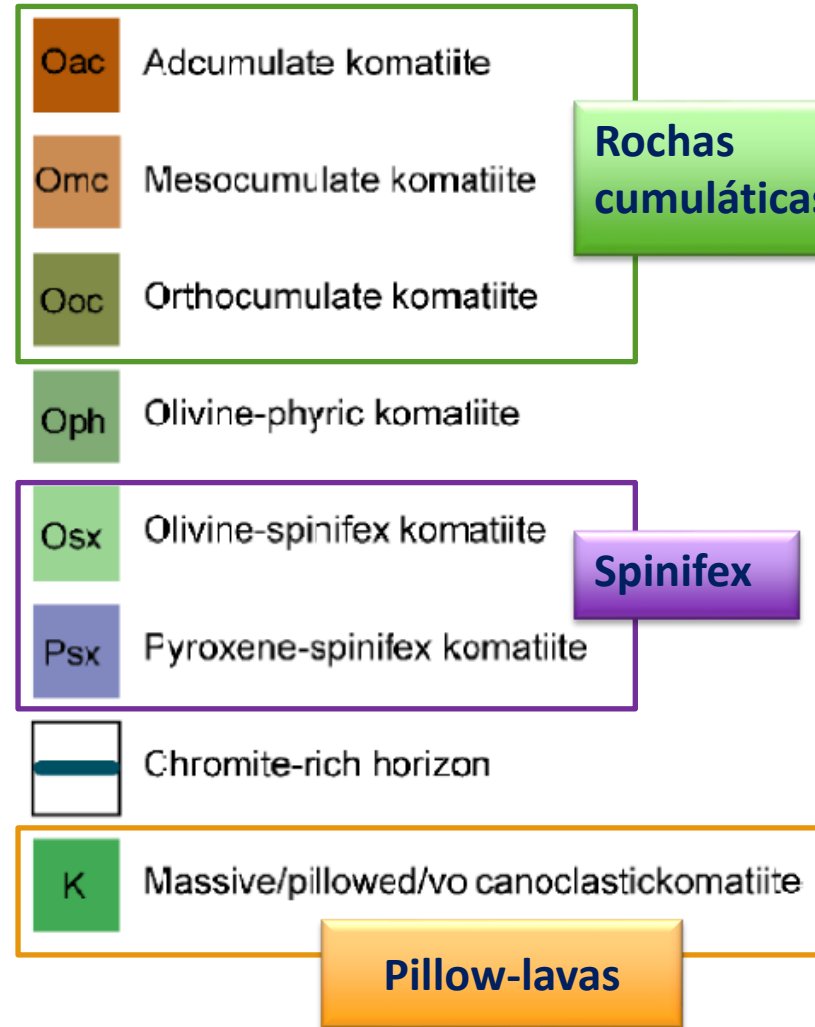
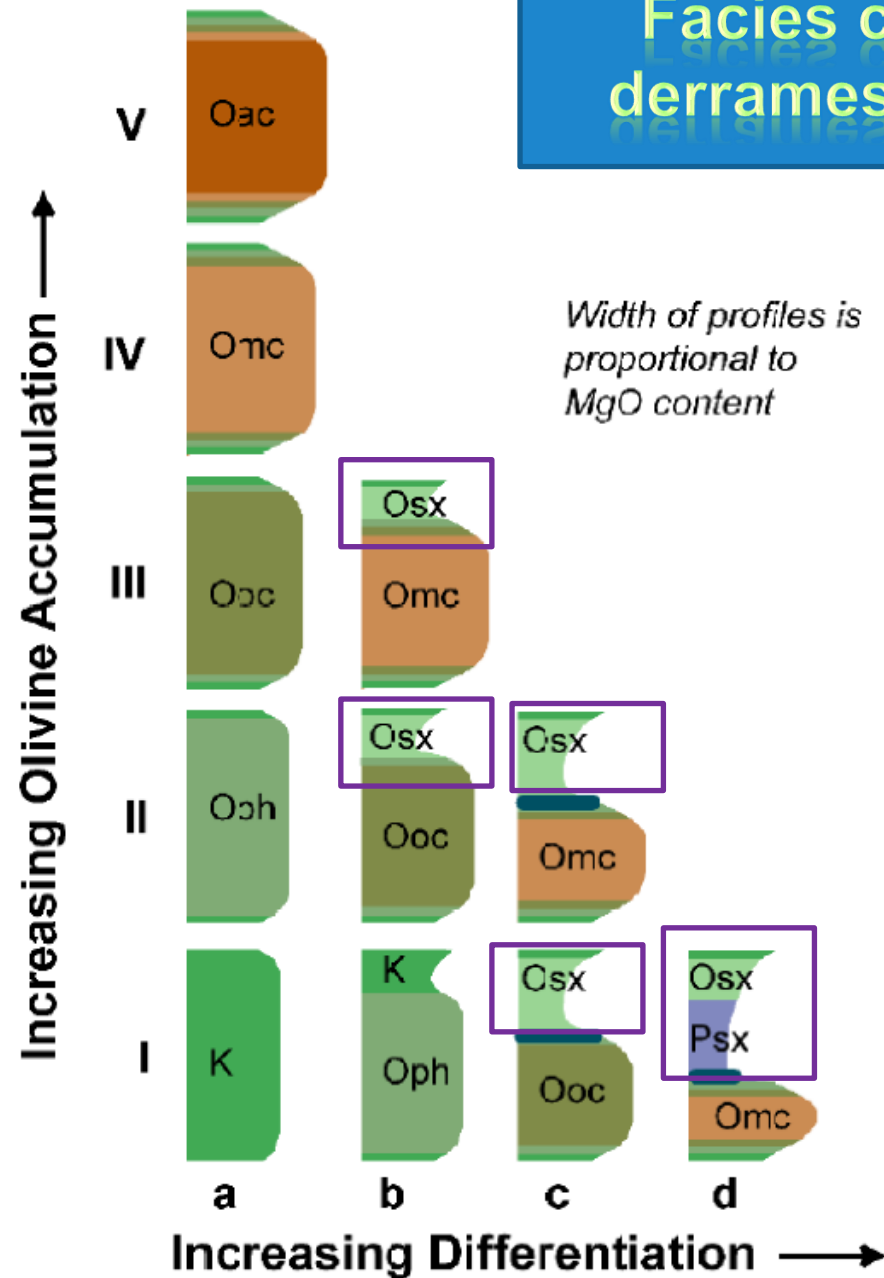
Vertical crystals
grow downwards
into the liquid

Cristais de olivina com textura spinifex mais fina e com distribuição aleatória no topo do derrame

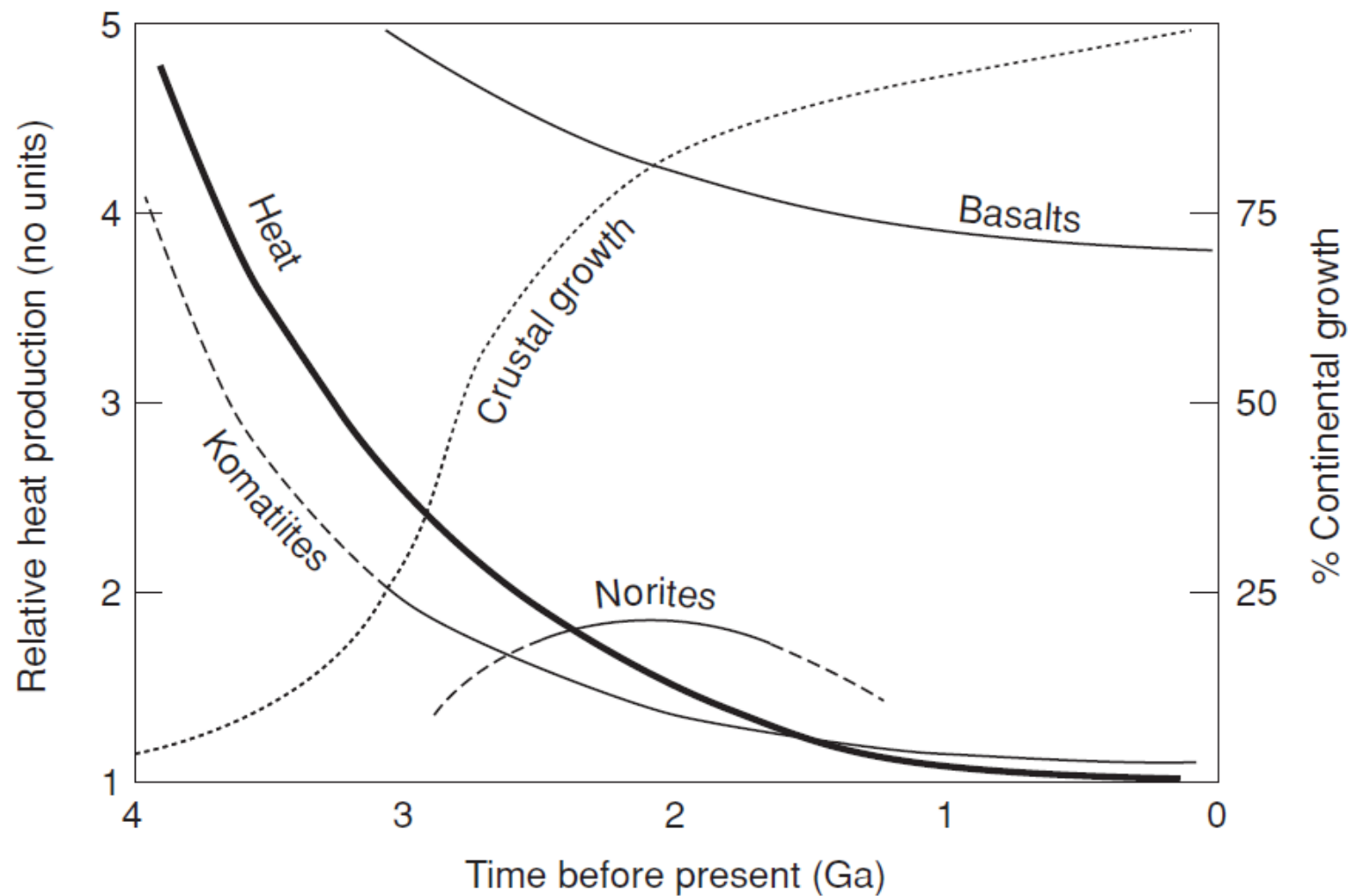
Cristais verticais de olivina com textura spinifex crescem para baixo no líquido de menor densidade

Facies composicionais em derrames e sills komatiíticos

N.T. Arndt¹ and C.M. Lesher²

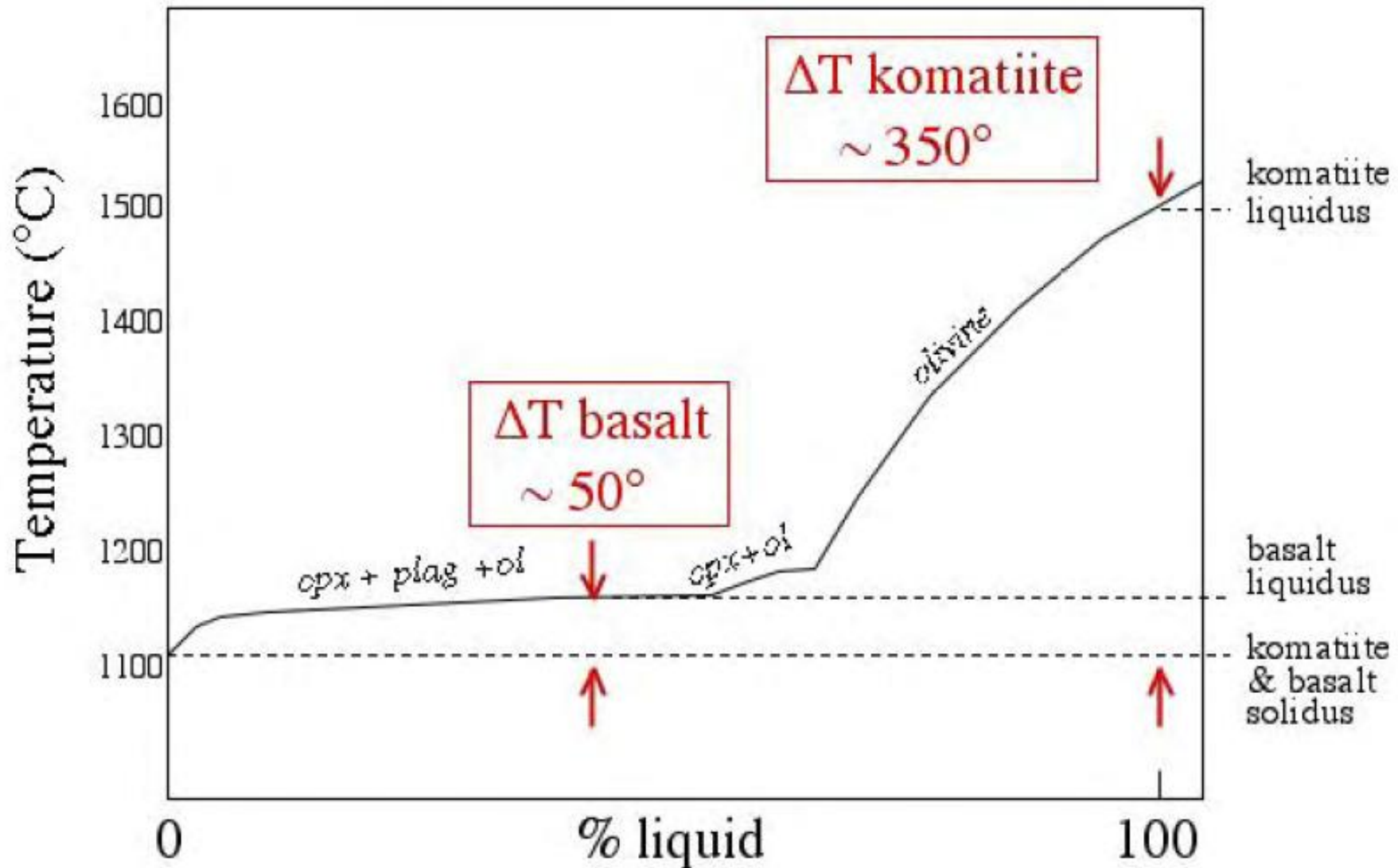


Decréscimo global da produção de calor



Hall and Hughes, 1993

Textura *spinifex* em komatiito: resposta ao gradiente termal



Textura variolítica & VARIOLITOS



Sample of Variolite,
Olympic Peninsula,
Washington USA

Textura variolítica (termo útil em trabalhos de campo): estruturas globulares centimétricas visíveis na superfície intemperizada de rochas basálticas, comumente afíricas (Fowler *et al.* 2002)

São mais preservadas do intemperismo em relação à rocha basáltica

HIPÓTESES PARA A ORIGEM

- **Imiscibilidade magmática**
- **Esferulitos de plagioclásio** que cristalizaram-se diretamente a partir do magma

TEXTURA VARIOLÍTICA & VARIOLITOS



Esferulito constituído por plagioclásio

**Rochas ultramáficas miloníticas (talco-carbonato xisto)
em Zona de cisalhamento, Greenstone Belt Barberton,
Africa do Sul**



OUTROS LITOTIPOS PRESENTES NAS SEQUÊNCIAS DE *GREENSTONE BELTS*



**AGLOMERADO VULCÂNICO (3,45 GA) DO
GREENSTONE BELT BARBERTON, ÁFRICA DO SUL**



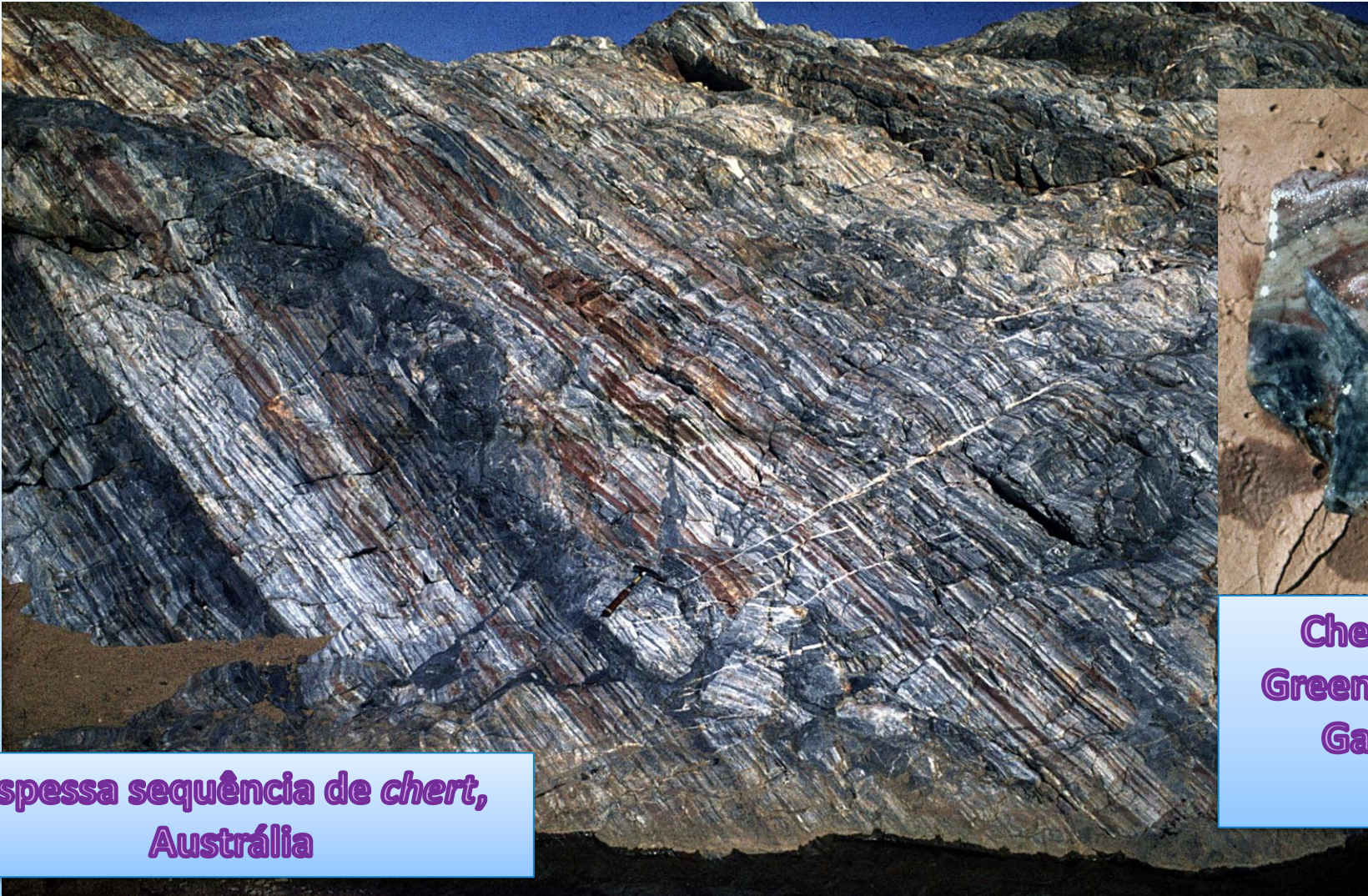
**Brecha vulcânica
de rochas do Grupo Whim Creek (ca. 3,0
Ga), Pilbara, incluindo blocos de granito
do embasamento.**

Estrutura em chamas (*flame*) em tufo no Greenstone Belt Barberton (3,45 Ga),
África do Sul



BANDAMENTO EM ROCHAS VULCANOCLÁSTICAS (3,12
GA), GRUPO WHUNDO, CRÁTON PILBARA

OUTROS LITOTIPOS PRESENTES NAS SEQUÊNCIAS DE *GREENSTONE BELTS*



Espessa sequência de *chert*,
Austrália



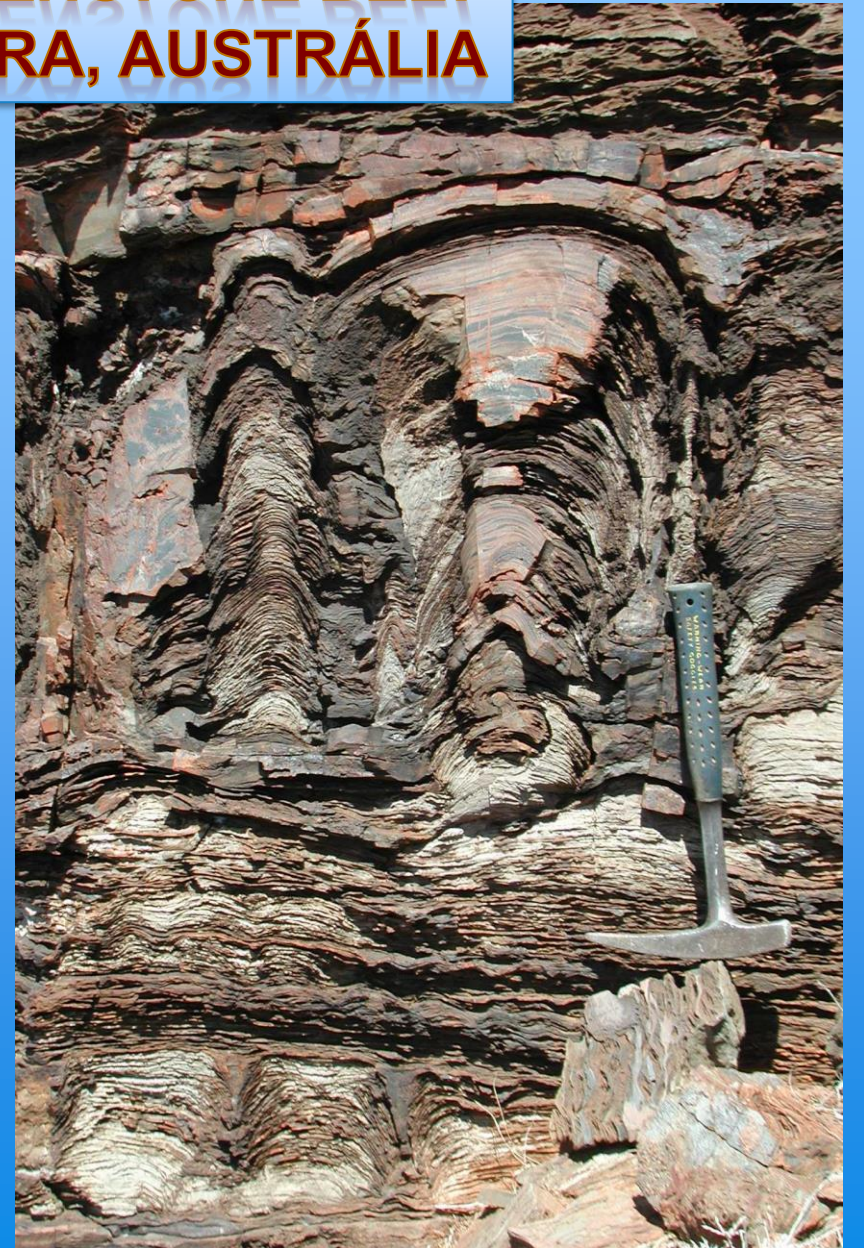
Chert com cristais de gipsita no
Greenstone Belt Warrawoona (3,45
Ga), Pilbara Craton, Australia
(Evaporitos)

*Chert com material carbonoso intercalado a komatiítos,
Greenstone Belt Barberton, África do Sul*



**Fragmentos de chert em aglomerado vulcânico félsico,
Greenstone Belt Barberton**

**ESTROMATÓLITOS COLUNARES NO *GREENSTONE BELT*
WARRAWOONA (3,45 GA), CRÁTON PILBARA, AUSTRÁLIA**



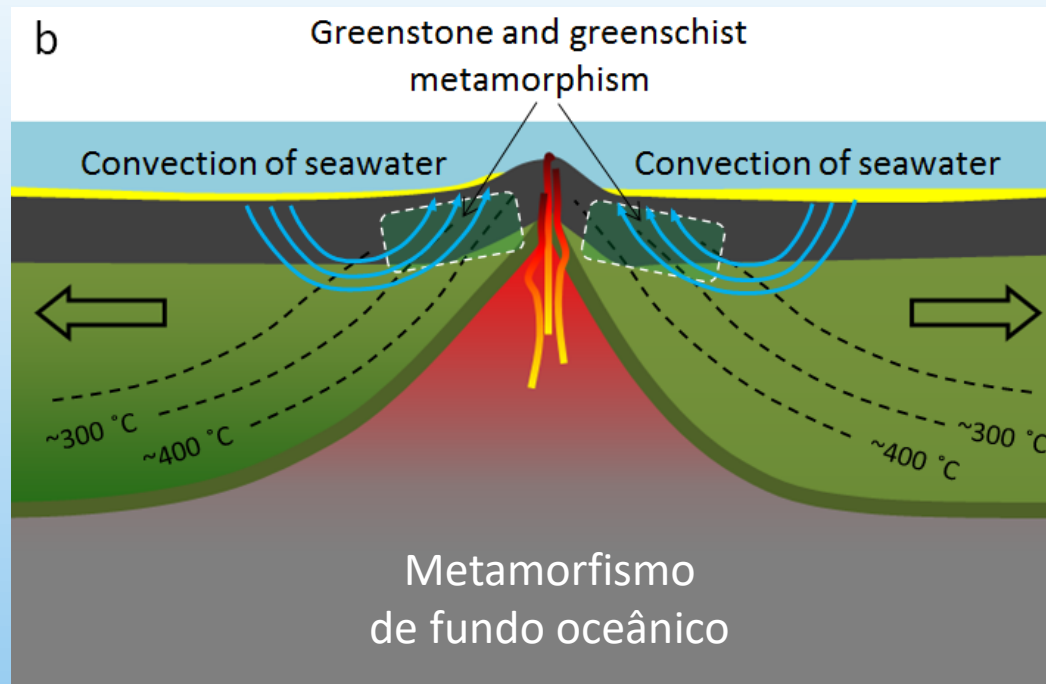
ALTERAÇÃO DE FUNDO OCEÂNICO: ESPILITIZAÇÃO

Espilitização: alteração de fundo-oceânico (**metamorfismo de fundo-oceânico**) devido à interação das lavas quentes máficas e ultramáficas com a água do mar;

Processo metassomático em rochas máficas: resulta em mobilidade de elementos maiores e traços. Aumento do conteúdo de **Na_2O (H_2O , Li, NH^+ , B e ETR)** e decréscimo de CaO .

Resulta em rocha com concentrações elevadas de **plagioclásio (Ab), epidoto, clorita, actinolita, calcita e prehnita**.

Espilito: produto da espilitização de basaltos, nos quais o plagioclásio tornou-se mais albitico.



Keratófiro

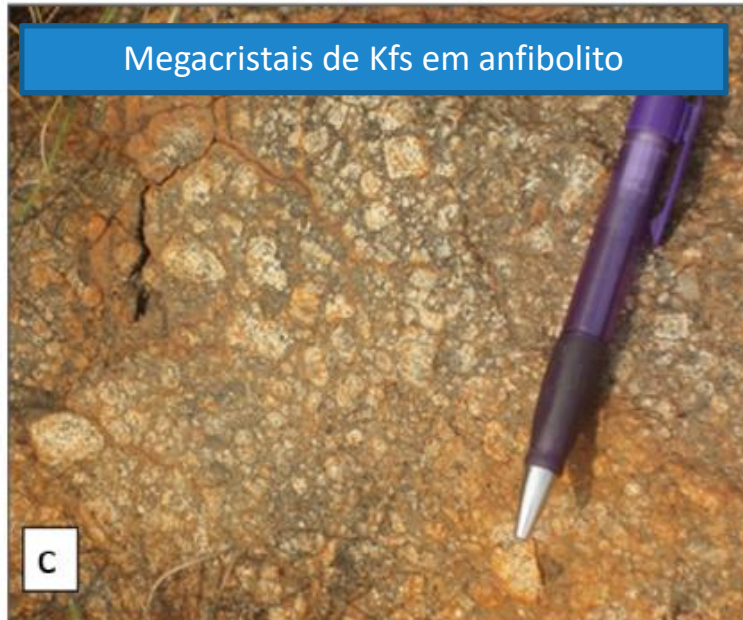
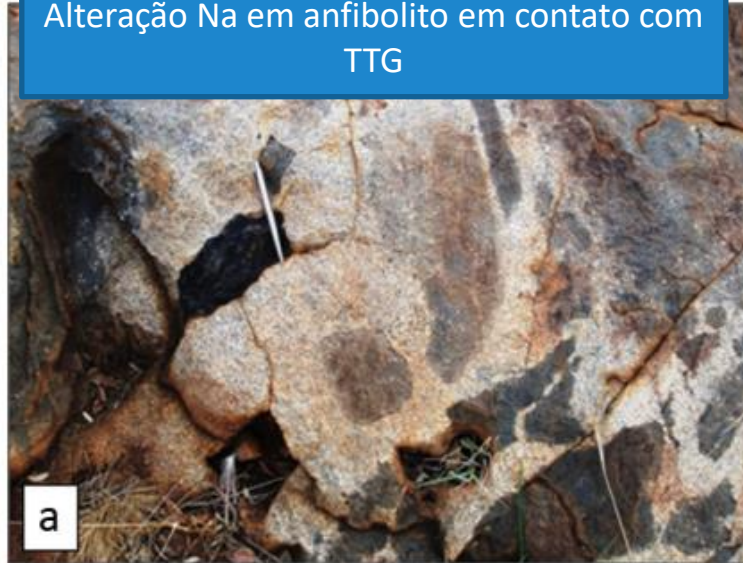
Rocha vulcânica ácida que sofreu metamorfismo de fundo oceânico. Apresenta feldspatos sódicos e/ou potássicos.

Metassomatismo em Rochas (Meta)-ultramáficas

- Associação com deformação, metamorfismo e interação com fluidos exsolvidos de magmas graníticos;

- Silicificação;
- Carbonatização;
- Serpentinização;
- Alteração Na e K
- Alteração Ca
- (rodingitos: com hidrogrossulária, vesuvianita, tremolita, diosídeo)

Alteração Na em anfibolito em contato com TTG



Megacristais de Kfs em anfibolito



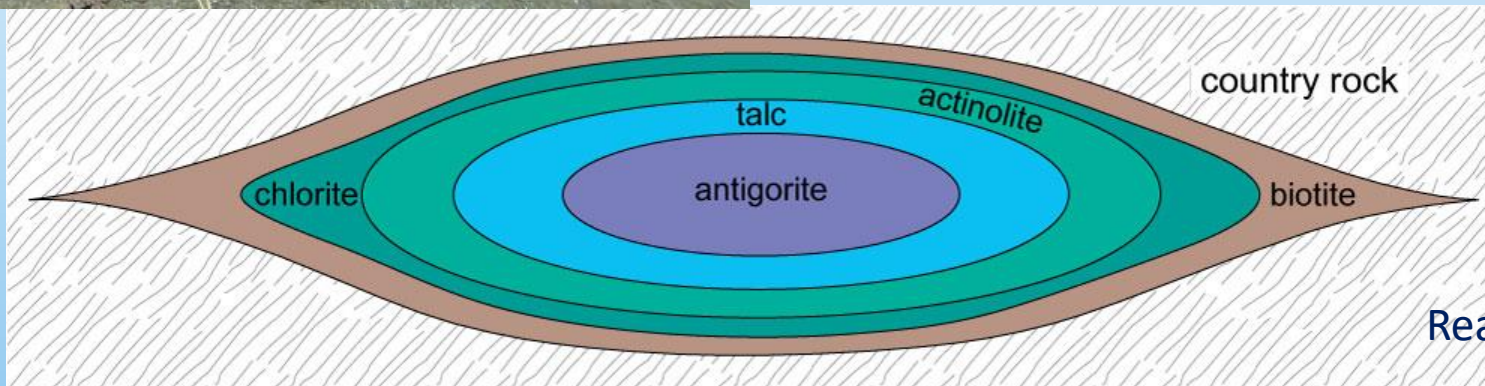
Carbonatização



Metassomatismo: Zonas de “BLACK WALL”



Grande gradiente químico entre rochas graníticas (ou fluidos) e rochas metaultramáficas

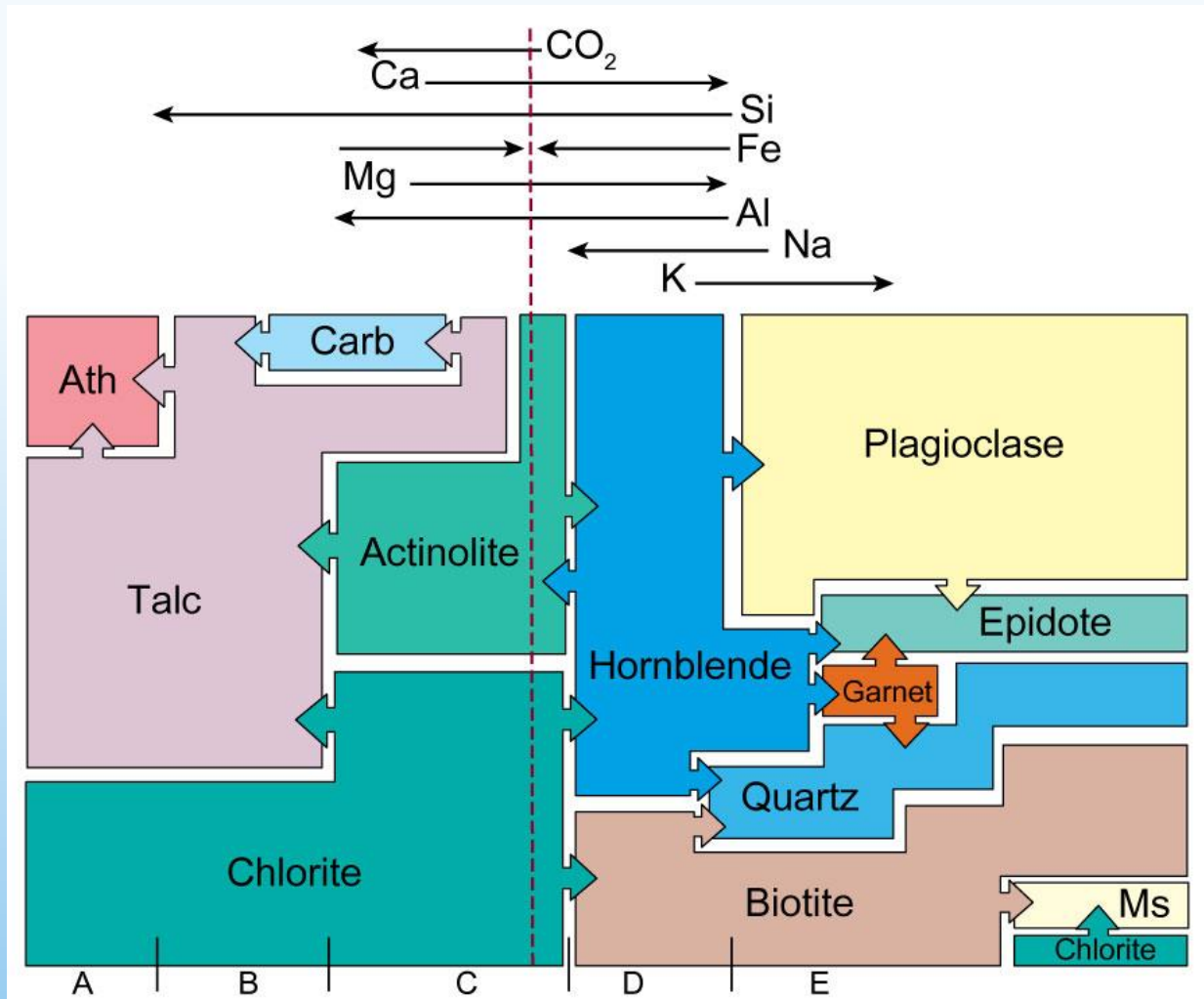


Read (1934)

- Actinolitos
- Clorititos
- Rochas ricas em Biotita

Metassomatismo: Zonas de “BLACK WALL”

Antofilita – Actinolita – Tremolita - Clinocloro – Biotita



Reações entre principais minerais silicáticos e fluxo de componentes associado com metassomatismo de um corpo ultramáfico em Grafton, Vermont, EUA.

(Sanford 1982)

Greenstone Belts: Ambiente tectônico

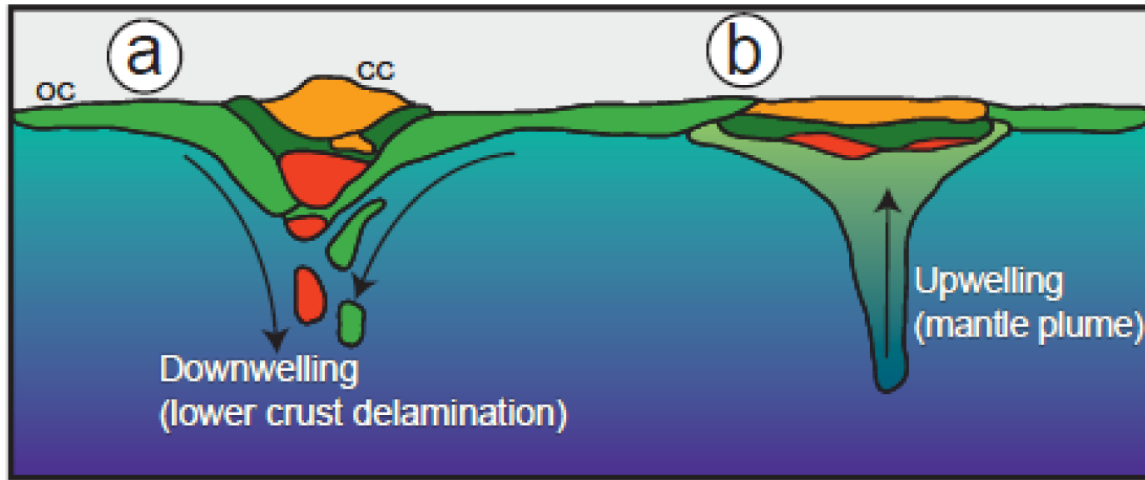
HIPÓTESES INICIAIS: tectônica vertical explicaria a estruturação de domos e quilhas (*dome-and-keel*), na qual os *greenstone belts* representariam calhas engolfadas entre domos granítico-gnáissicos devido à densidade contrastante entre a pilha vulcânica e as rochas gnáissicas circundantes.

Os domos gnáissicos teriam ascendidos em forma de cogumelos pressionados pelo afundamento da pilha vulcânica mais densa: **MODELO DE DIAPIRISMO**

Atualmente, muitos autores consideram que a formação dos *greenstone belts* não requer processos tectônicos especiais, diferentes da tectônica de placas atual..

OS GREENSTONE BELTS PODEM TER SE FORMADO EM DIFERENTES AMBIENTES, TAIS COMO RIFTES CONTINENTAIS EVOLUÍDOS, BACIAS MARGINAIS, ARCOS DE ILHA, BACIAS DE RETRO-ARCO, ILHAS OCEÂNICAS ASSOCIADAS A PLUMAS, PORÉM SEMPRE RELACIONADOS A VULCANISMO SUBMARINO.

TECTÔNICA VERTICAL



Modelos de tectônica vertical

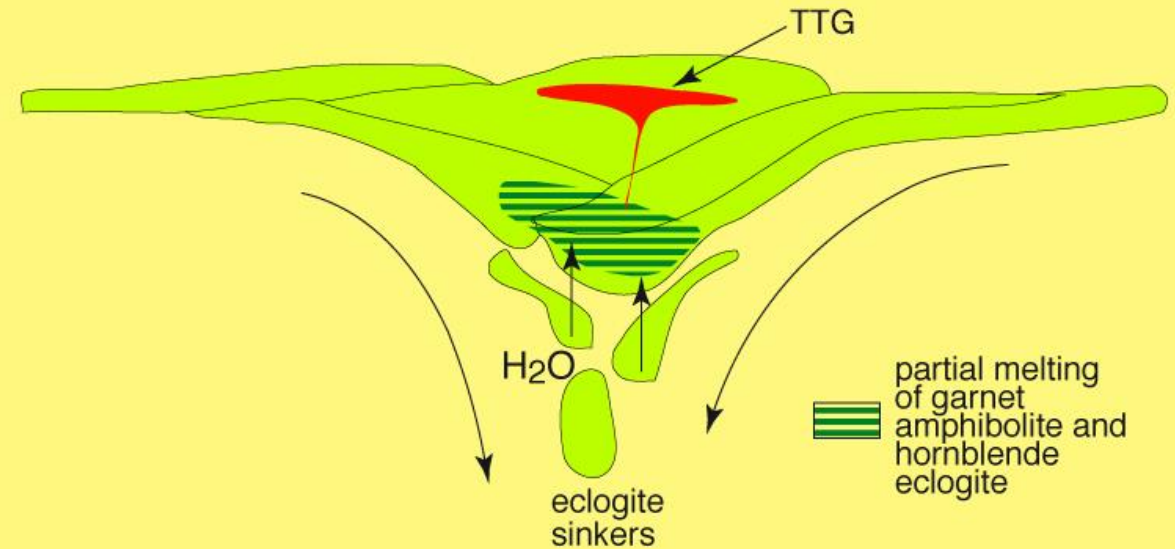
a) Acima de uma zona de subsidência.

b) Ascensão do manto gera um platô oceânico espesso, que pode sofrer fusão na sua base gerando TTG

Modificados de Condie & Abbott (1999).

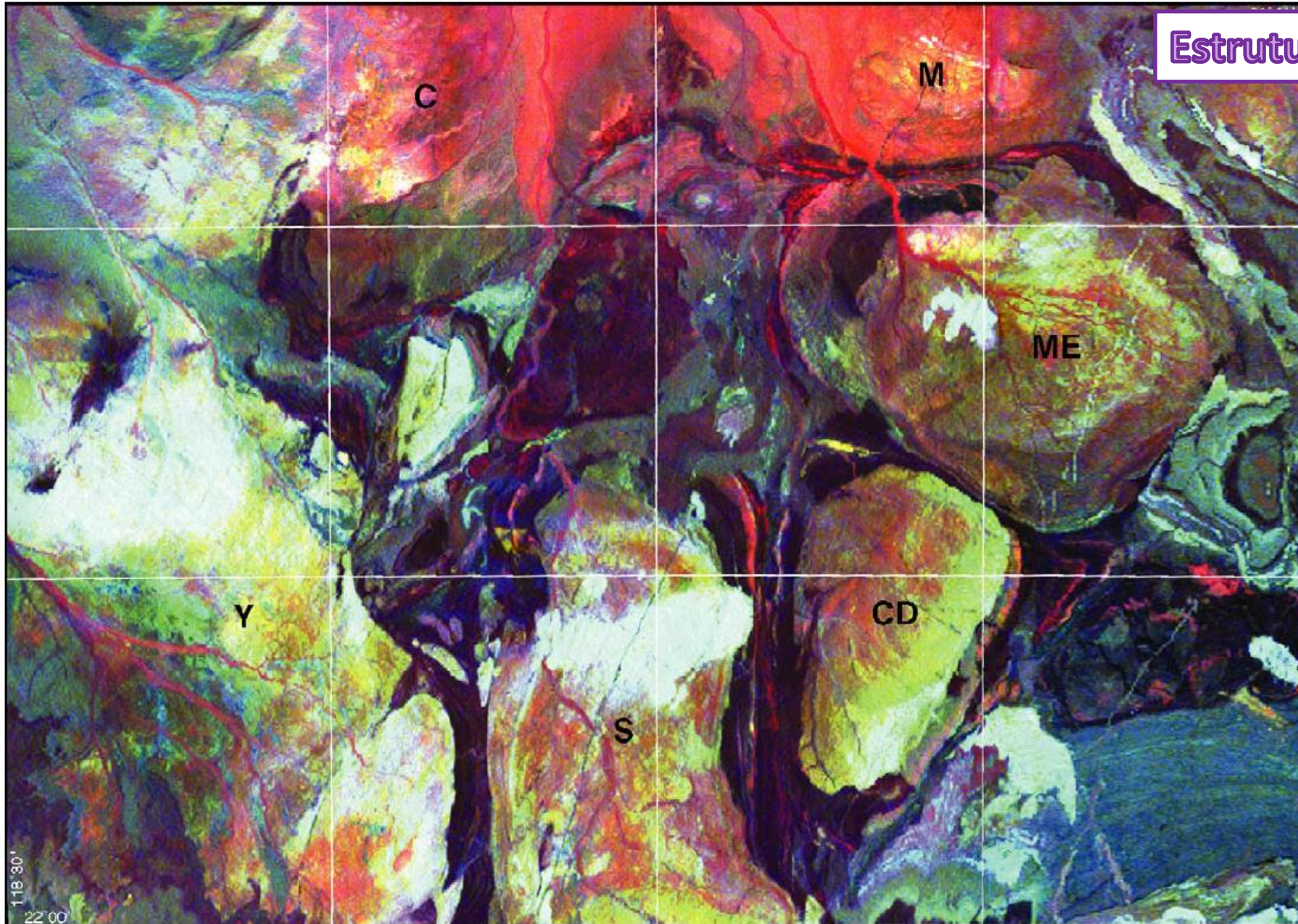
A 2.7 Ga DOWNWELLING "Log-jam Tectonics"

Stacked slices of hydrated
oceanic crust, plateaus, arcs



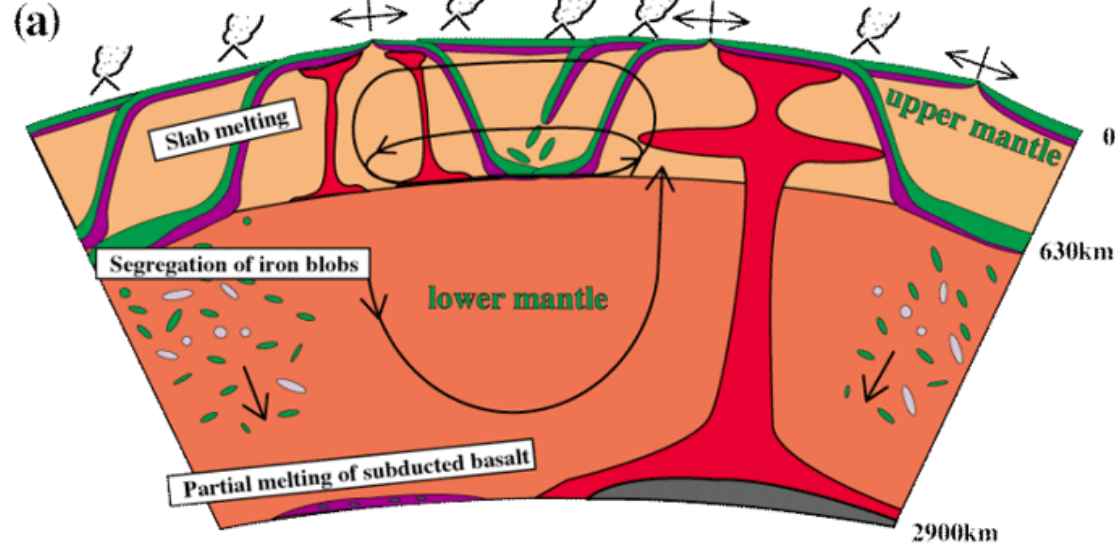
Estrutura de domos e quilhas

Precambrian Research (2004)

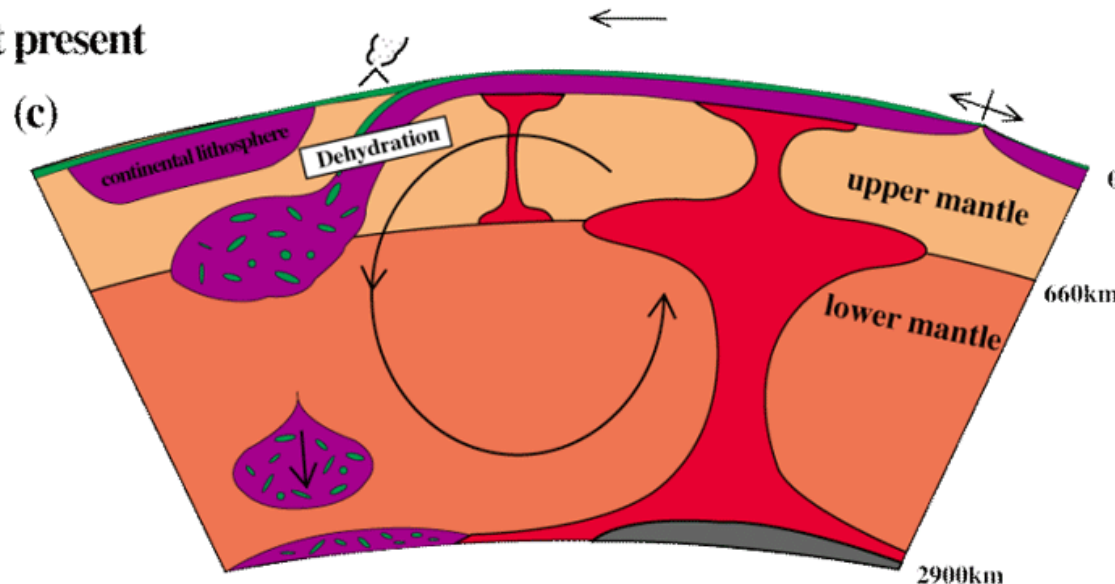


MUDANÇAS NOS REGIMES/PROCESSOS TECTÔNICOS

In the Archean



At present



(a) Arqueano: Litosfera oceânica fina com **CROSTA OCEÂNICA ESPESSA** é subductada abaixo de pequenos arcos de ilhas oceânicos em muitos lugares. Importante papel das **PLUMAS MANTÉLICAS**;

(b) Fanerozoico: litosfera oceânica espessa com **CROSTA OCEÂNICA MAIS FINA** subducta abaixo de grandes placas continentais (Fukao *et al.*, 1992).



Onset of Plate Tectonics by the Eoarchean

Brian F. Windley ^{a, b}✉, Tim Kusky ^a👤✉, Ali Polat ^{c, a}✉

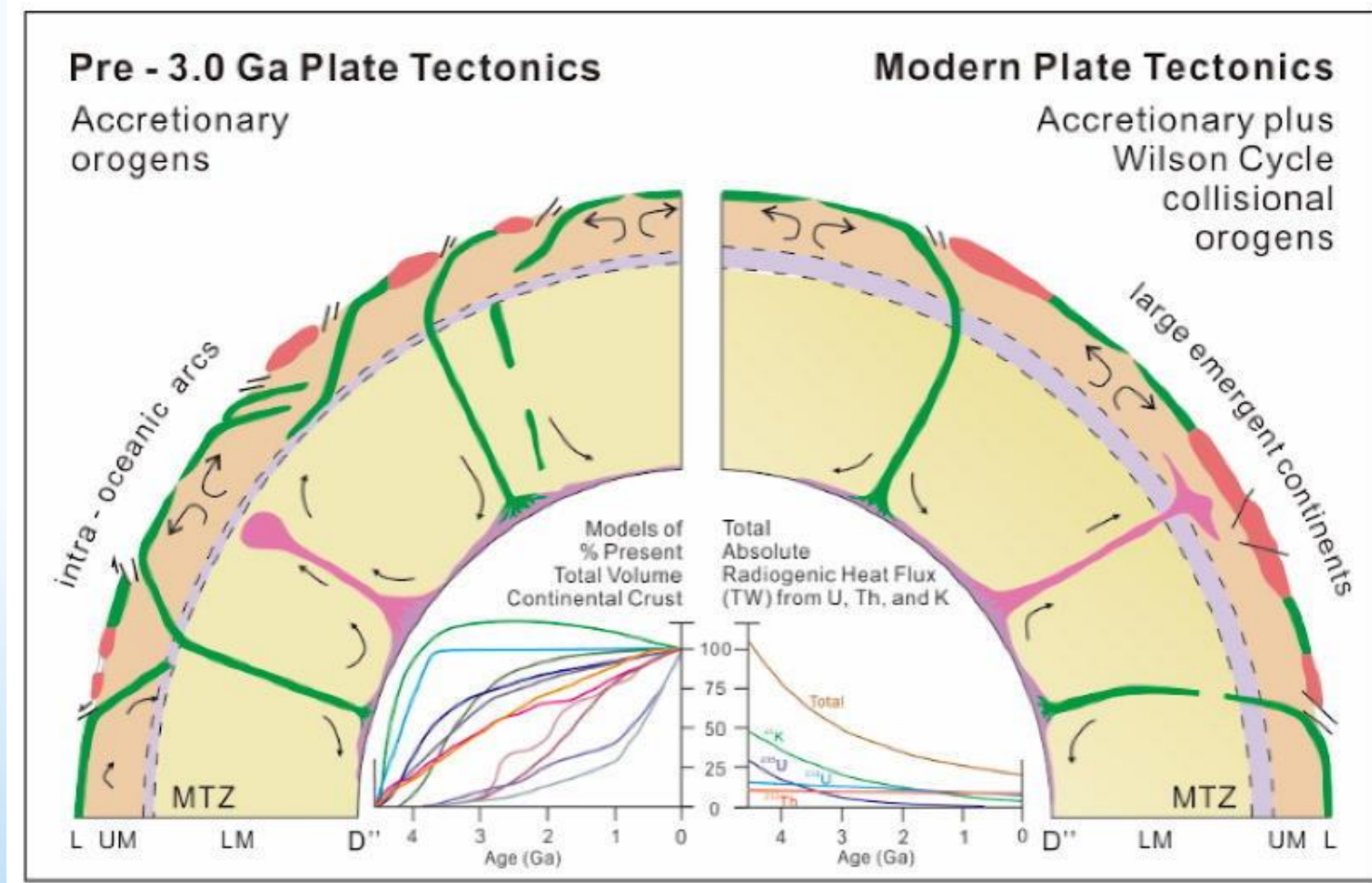
Show more ▾

<https://doi.org/10.1016/j.precamres.2020.105980>

Get rights and content

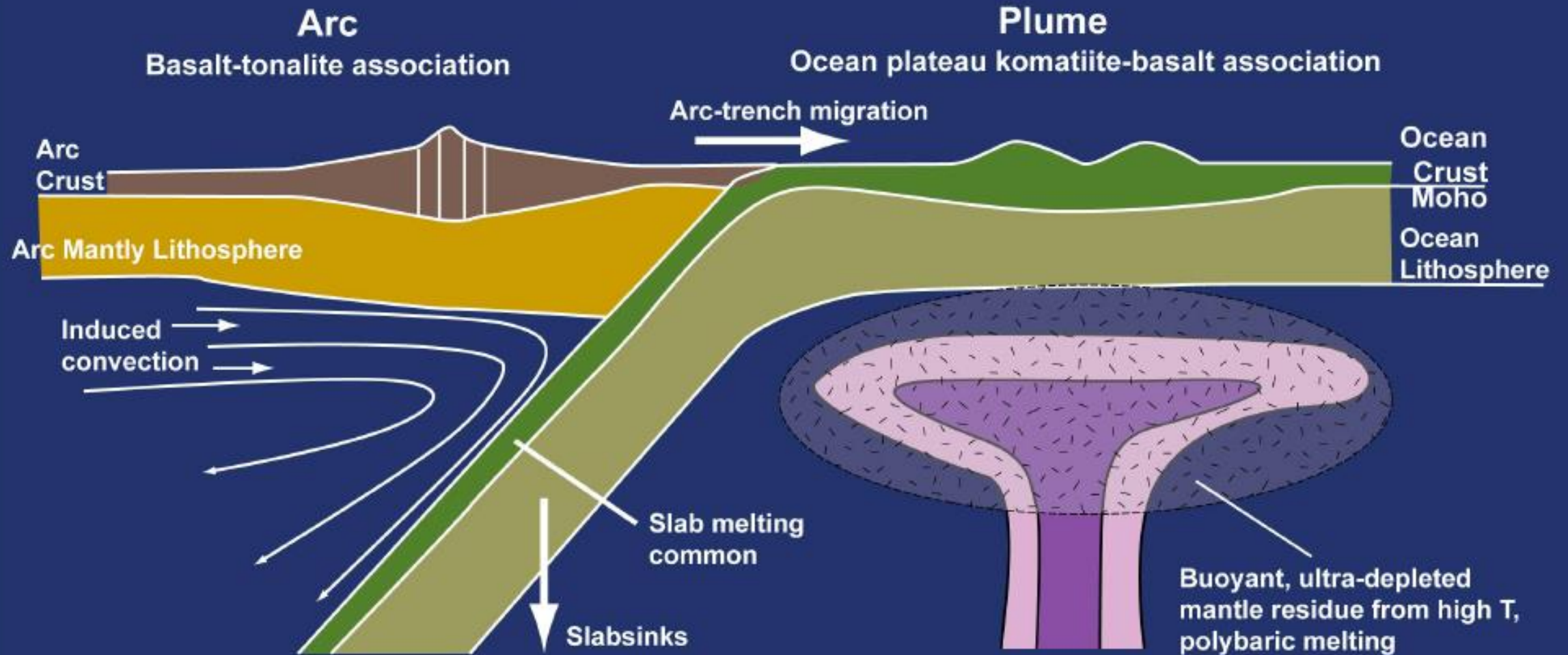
Highlights

- Geological archives show that plate tectonics operated since at least the Eoarchean.
- Accretionary cycle plate tectonics operated from > 4.0 Ga - 0 Ga, with intraoceanic arcs and accretionary orogens.
- Continental margin magmatism became stronger by 3.2 Ga - 0 Ga with larger accreted arcs and more crust-mantle wedge mixing and melting.



Dois tipos de placas tectônicas: pré-3,0 Ga, dominada por arcos intra-oceânicos e orógenos acrescionários, e tectônica de placas moderna pós-2,7-2,5 Ga, que inclui tanto orógenos acrescionários como Ciclo de Wilson.

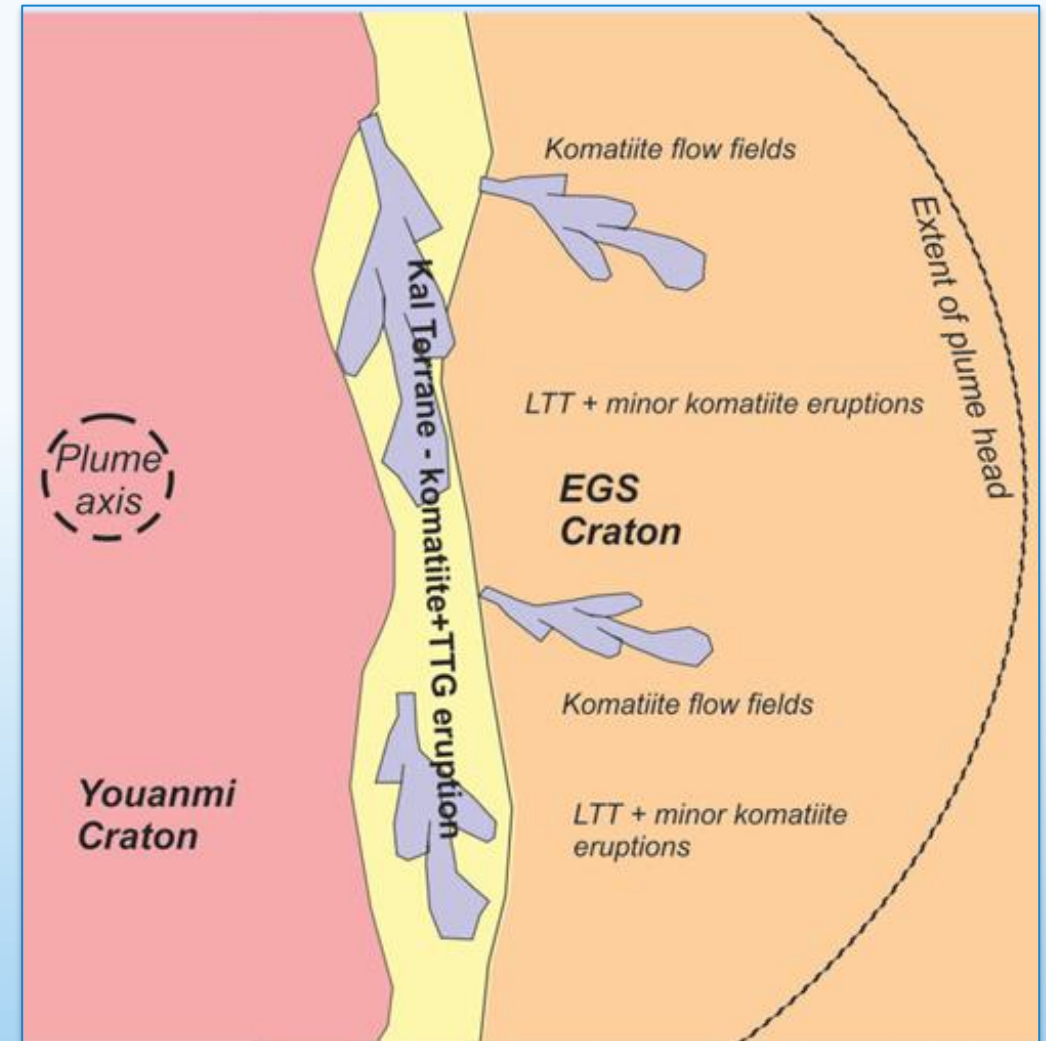
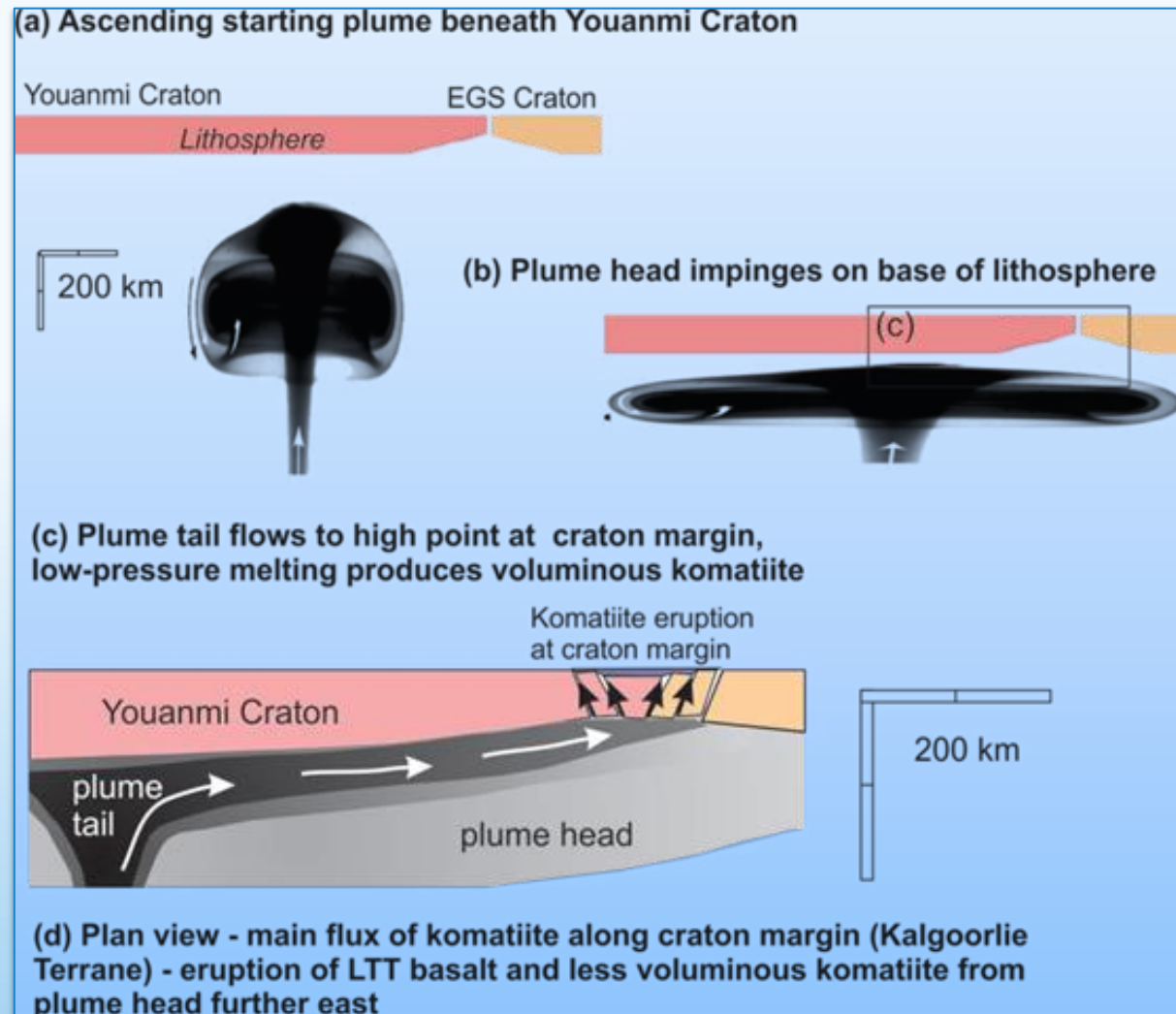
Construction of Archean Continental Lithosphere



Plumas mantélicas e Greenstone Belts

IMPORTANTE MAGMATISMO KOMATIÍTICO NA MARGEM CRATÔNICA

<http://www.largeigneousprovinces.org/12aug>



Plume impingement model, drawn approximately to the same vertical and horizontal scale, after Barnes et al. (2012) for origin of the EYLLIP by interaction of a starting plume with the margin of the Youanmi cratonic nucleus.

CRÁTON YILGARN, AUSTRÁLIA

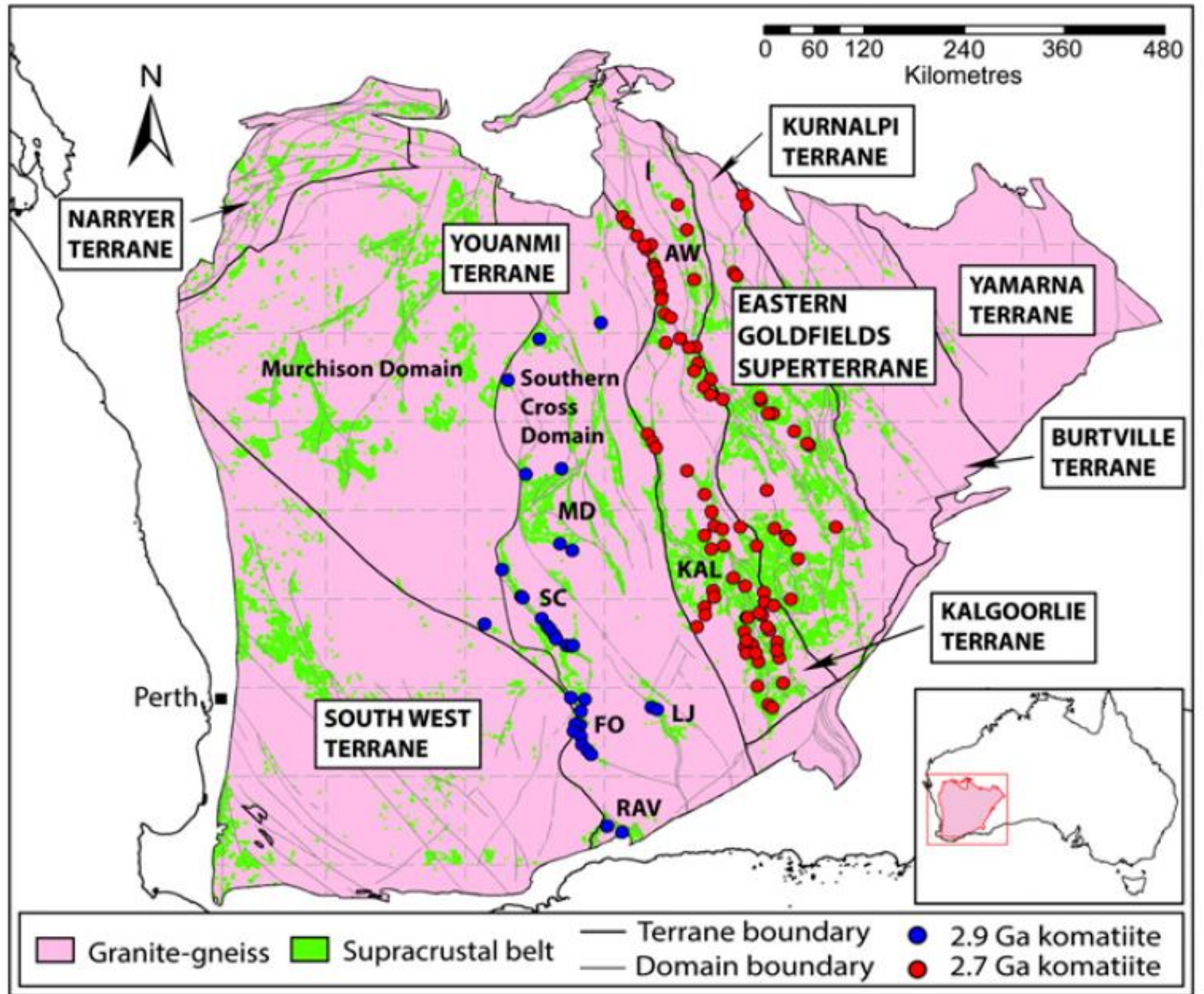
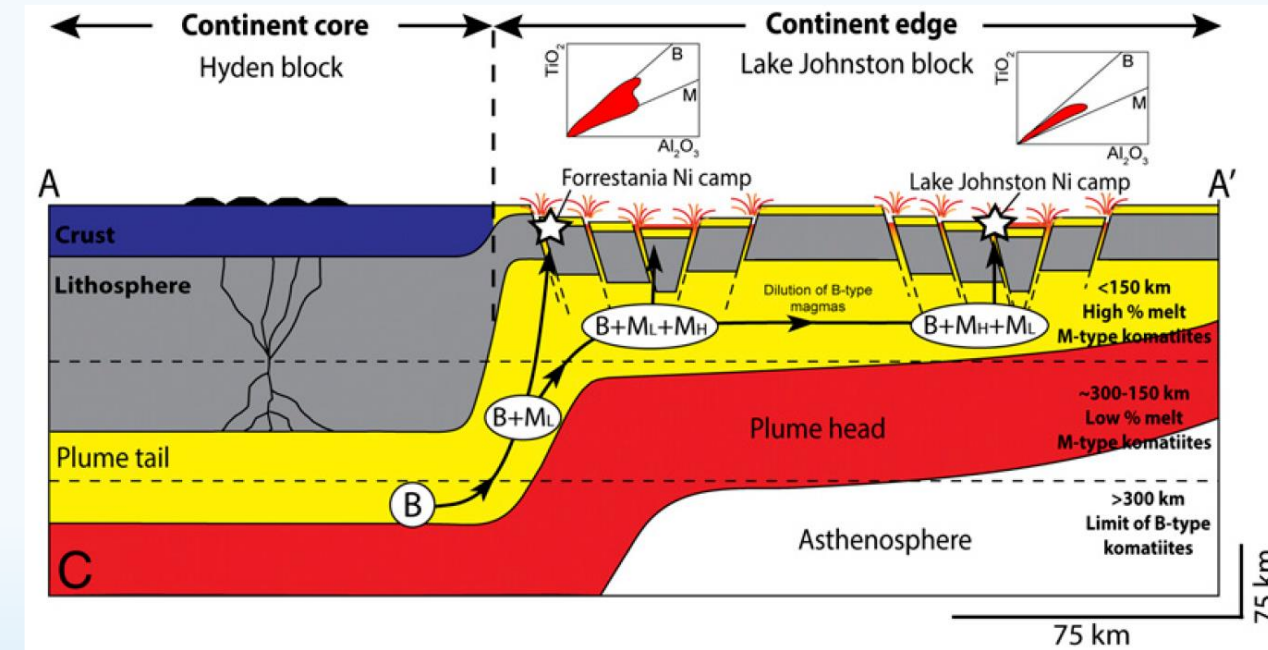


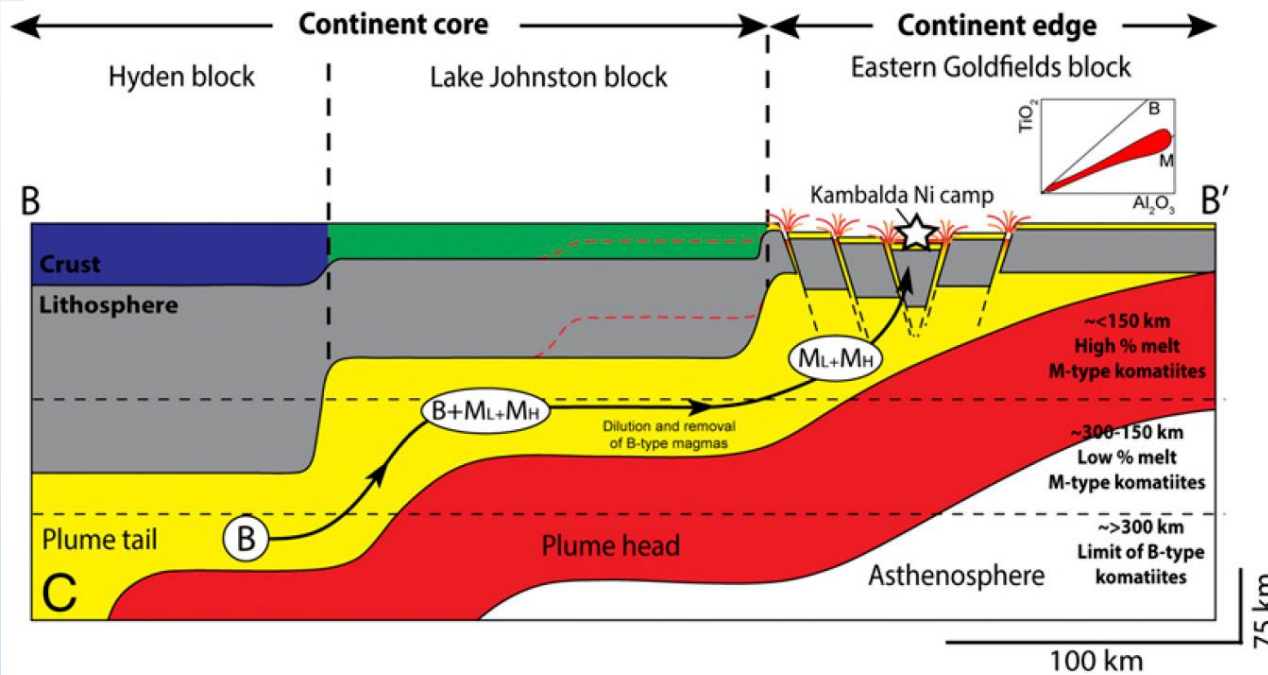
Fig. 1. Map of the Archean Yilgarn Craton showing the basic granite-greenstone bedrock geology and location of the ~2.9 and 2.7 Ga komatiite localities. Individual terranes/domains (39, 40) are labeled. Greenstone belts are labeled as follows: MD, Marda-Diemals; SC, Southern Cross; FO, Forrestania; LJ, Lake Johnston; RAV, Ravensthorpe; AW, Agnew-Wiluna; and KAL, Kalgoorlie/Kambalda. Komatiite localities are from Barnes and Fiorentini (10) (Table S4).

KOMATIÍTOS NO CRÁTON YILGARN, AUSTRÁLIA



2,9 GA

Estrutura da litosfera: geração de magma a partir da fusão do manto peridotítico em grandes profundidades (> 300 km; **B**) e homogeneização do magma para leste devido à interação com magmas gerados a menores profundidades (**M**). Erupção dos komatiitos foi favorecida pela extensão relacionada com a pluma no limite de blocos cratônicos



2,7 GA

Predominância de magma formado a menores profundidades (**M**) para a geração dos komatiitos de Kambalda



Greenstone Belts: PLUMAS MANTÉLICAS E SUBDUCÇÃO

No início da tectônica das placas, a Terra foi dominada pela formação de crosta juvenil em centros de expansão oceânica e arcos oceânicos juvenis, com orógenos acrescionários formando-se em zonas de subducção, com acréscimo de sedimentos oceânicos e camadas superiores da litosfera oceânica, fusão de sedimentos, e magmatismo de arco devido à fusão da cunha do manto hidratado. Os arcos cresceram gradualmente, amalgamaram e formaram arquipélagos grandes o suficiente para hospedar arcos de margem continental. Grandes massas de terra continentais surgiram por volta de 2,7-2,5 Ga, com o primeiro aparecimento generalizado de sequências de margem passiva, divisão de grandes continentes (supercontinentes?) e colisão desses fragmentos dispersos em orógenos colisionais de estilo alpino, marcando o início do Ciclo de Wilson.

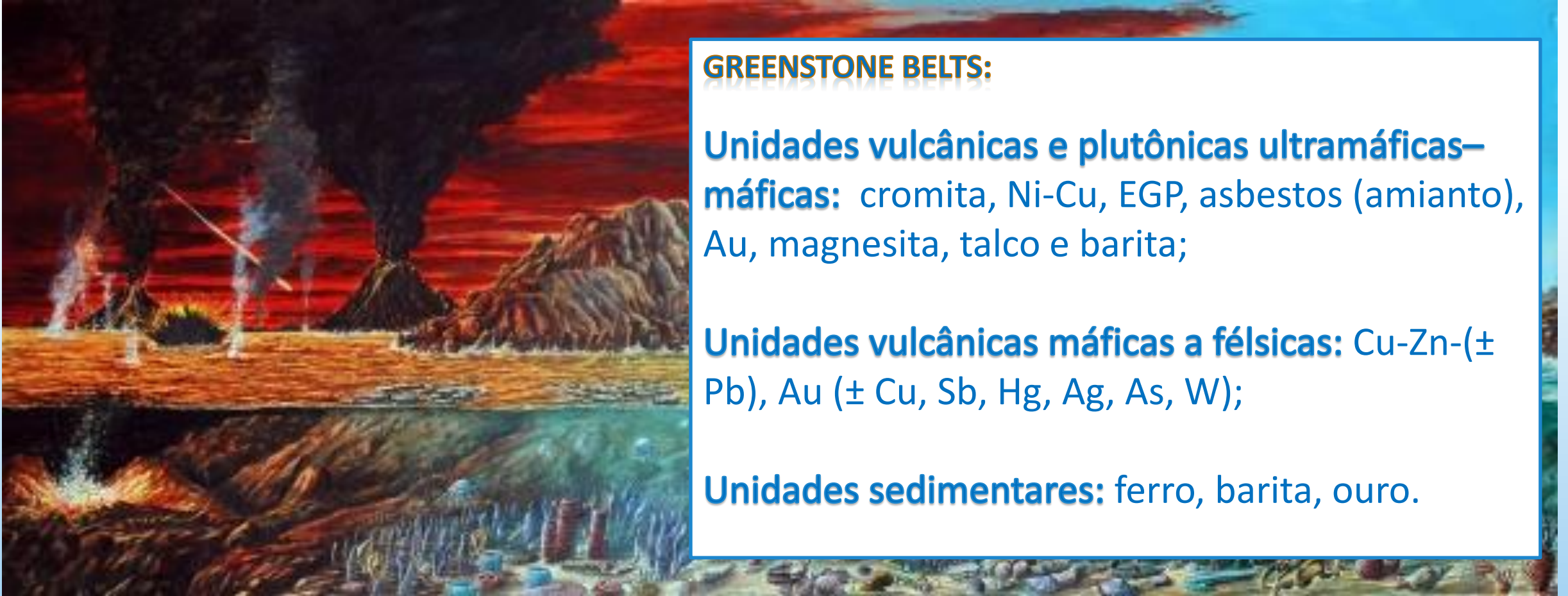
Várias mudanças profundas ocorreram na Terra entre 2,7 Ga e 2,6 Ga:

Intensa atividade ígnea, um pico na produção de crosta continental juvenil e formação generalizada de **depósitos de ouro orogênico** e de **sulfeto maciço (VMS)** (Barley et al., 1998; Condie, 1998; Reddy e Evans, 2009);

Pluma mantélica em ca. 2,7 Ga, seguida de aumento da taxa de subducção; desenvolvimento de orógenos acrescionários, colisão entre blocos continentais, retrabalhamento crustal e, possivelmente, formação do **primeiro supercontinente Kenorland** (Condie, 1998, 2004; Barley et al., 2005);

Greenstone Belts Neoarqueanos (2,7–2,5 Ga): janela para a compreensão dessas mudanças profundas;

Arqueano & Formação de depósitos minerais



GREENSTONE BELTS:

Unidades vulcânicas e plutônicas ultramáficas—máficas: cromita, Ni-Cu, EGP, asbestos (amianto), Au, magnesita, talco e barita;

Unidades vulcânicas máficas a félsicas: Cu-Zn-($\pm$ Pb), Au ($\pm$ Cu, Sb, Hg, Ag, As, W);

Unidades sedimentares: ferro, barita, ouro.

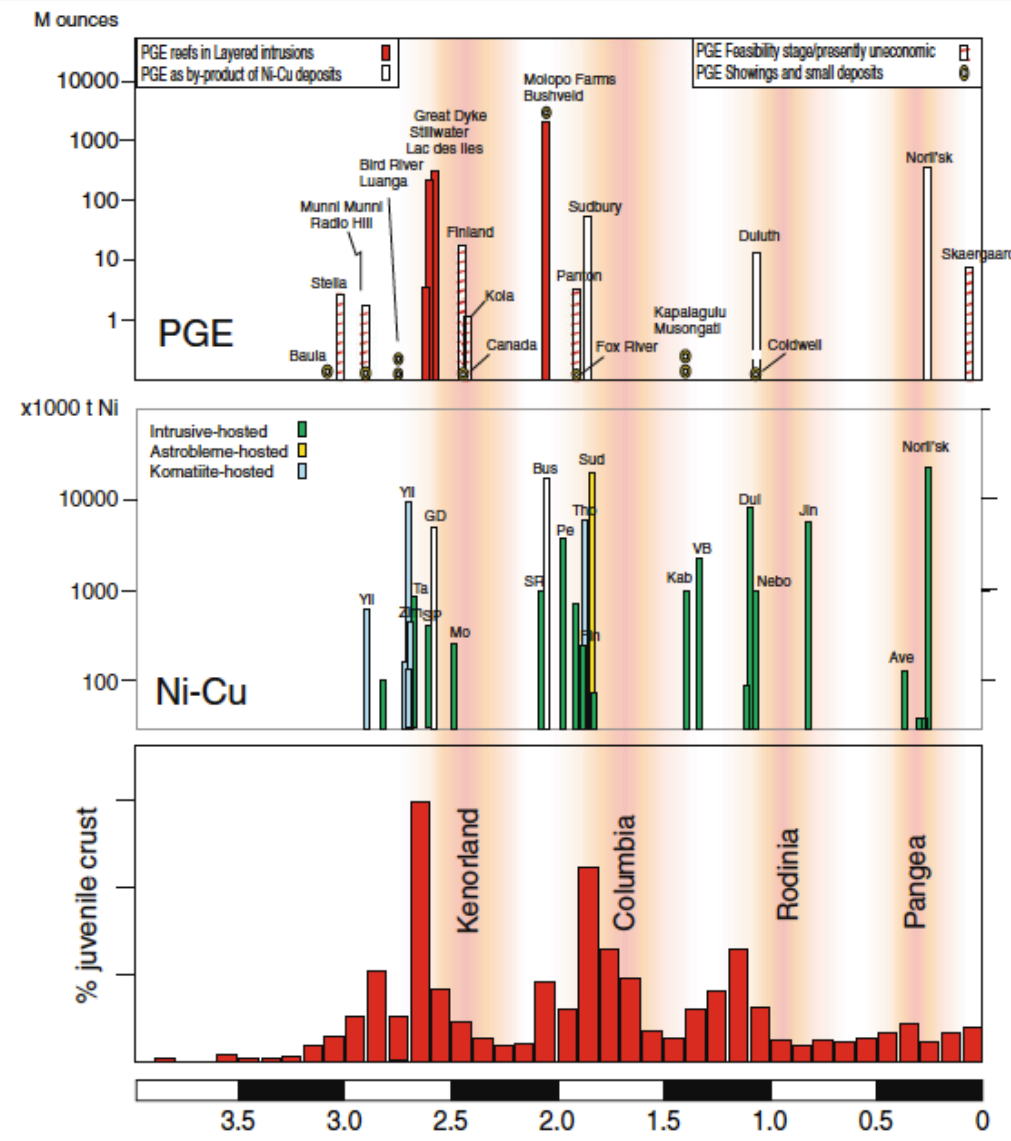
DECRÉSCIMO GLOBAL DA PRODUÇÃO DE CALOR FORMAÇÃO DE DEPÓSITOS MINERAIS



Maior produção de calor
no Arqueano

Komatiitos com
“spinifex” em *greenstone belts*

Depósitos de níquel
magmático
Exemplo: depósito de Ni-
Cu de Kambalda,
Austrália



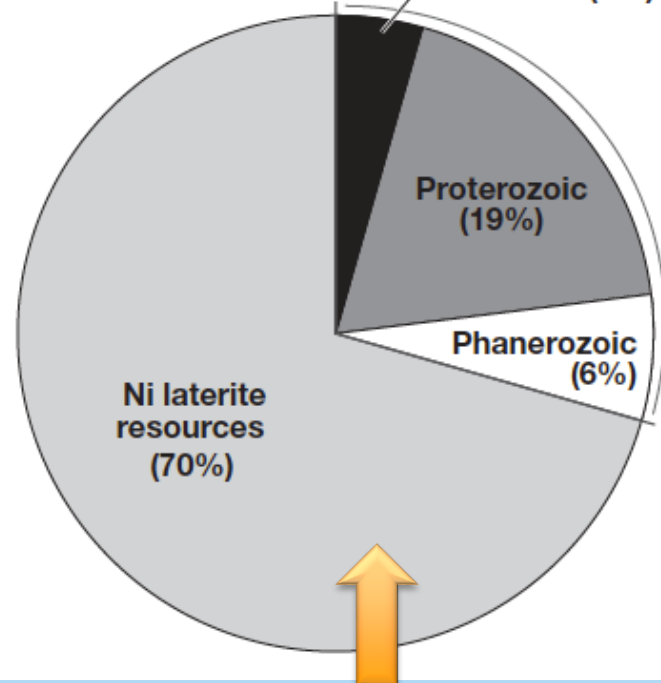
DEPÓSITOS DE NÍQUEL

Depósitos de níquel sulfetado – 30%
Depósitos de níquel laterítico – 70%

A

Global Ni sulfide resource
distribution through time
Ni content (t)

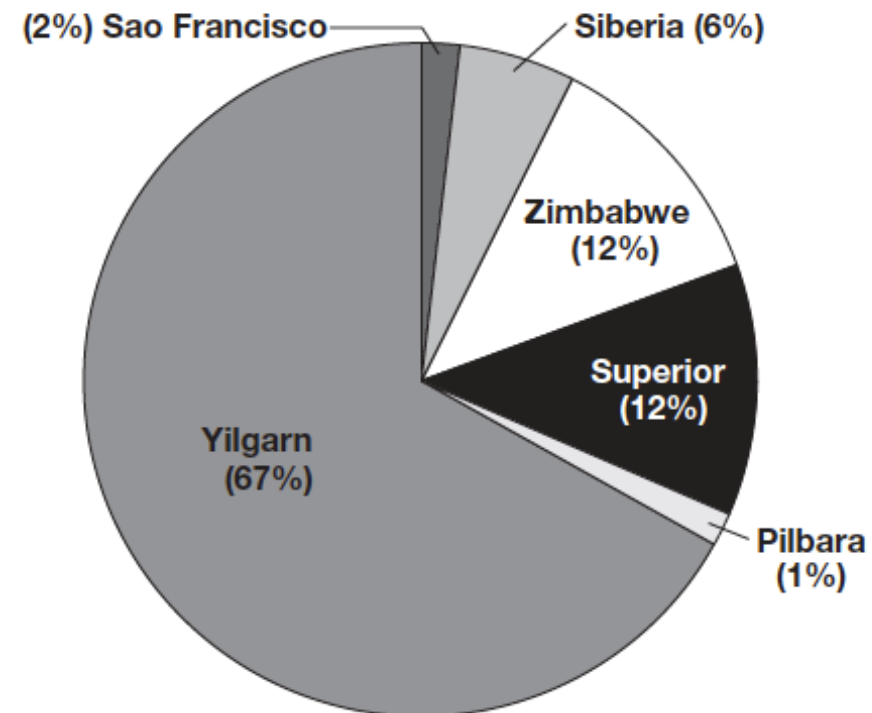
Ni sulfide resource



Depósitos de níquel arqueanos:
relacionados principalmente a komatiitos
em sequências de *greenstone belts*

B

Global Ni sulfide resource
distribution per Archean craton
Ni content (t)



Poucos crátons arqueanos hospedam
importantes depósitos de níquel sulfetados

Conteúdo de
MgO das
rochas
hospedeiras
de depósitos
de níquel
sulfetado
associados a
komatiitos

Mount Keith e
Perseverance: >
45% de MgO
(adumulados
grossos de
olivina)

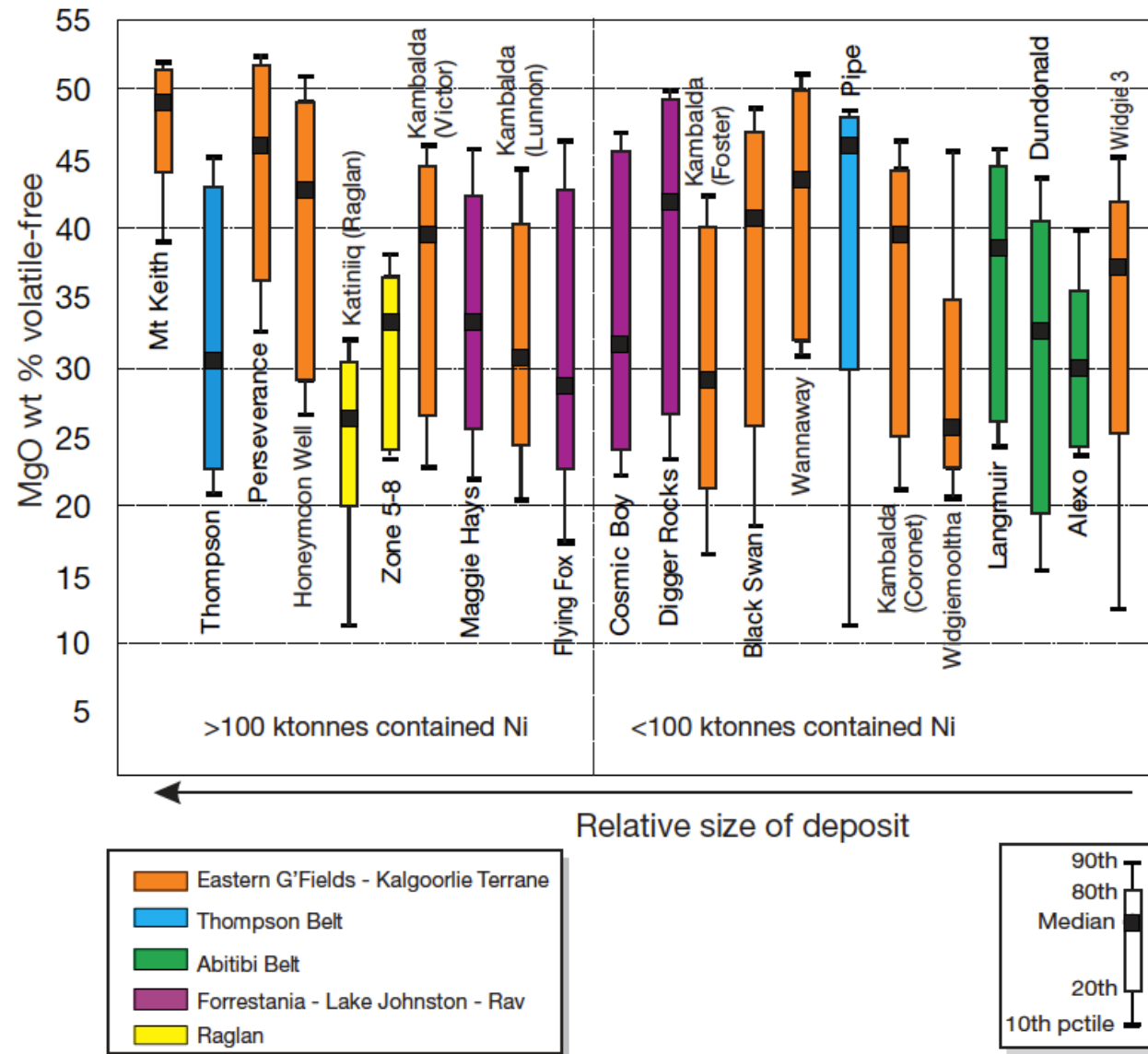
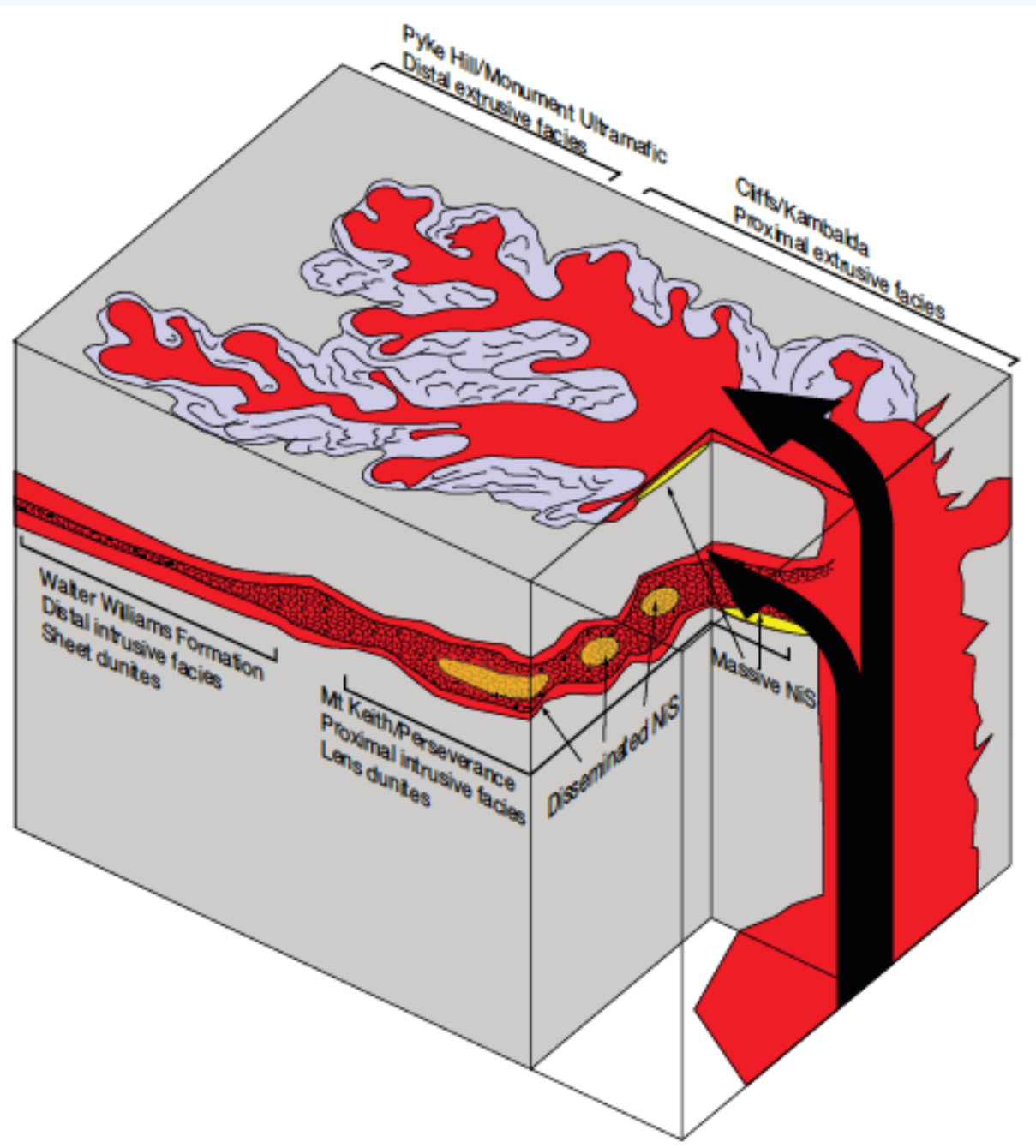


FIG. 3. Statistics on the MgO content (whole rock, wt % volatile free) of host-rock sequence to komatiite-associated Ni sulfide deposits, in order of deposit size measured by tons of contained Ni. Host unit refers to the specific flow sequence (as defined at the level of stratigraphic member) or subvolcanic intrusive body which directly hosts the ore. Data restricted to well-studied deposits where at least 20 whole-rock analyses of the host unit are available. Data source Eastern Goldfields, Youanmi: this study; Abitibi: Barnes et al. (2007).



Relações entre sistemas intrusivos e extrusivos no *Greenstone Agnew-Wiluna*

Mineralização de níquel é associada com partes proximais dos condutos para o magma

Fluxo do magma é mais importante para a formação dos depósitos de níquel que a composição do magma

Imiscibilidade Líquida

- **IMISCIBILIDADE:** segregação de duas **frações líquidas coexistentes** a partir de um magma homogêneo originalmente.
- Mais comum em porque o resfriamento rápido impede a re-homogeneização dos produtos segregados.
- Exemplos: PGE em Mereski Reef, Bushveld; **rochas extrusivas** Ni-Cu em Kambalda , Austrália e em Sudbury, Canadá

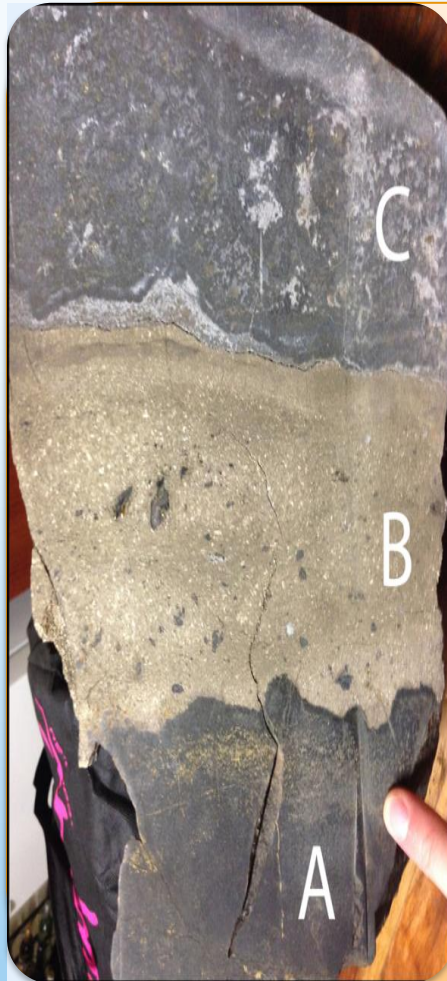


Sistema $\text{SiO}_2\text{-FeO-FeS}$: líquido silicático pode coexistir com líquido sulfetado;

Solubilidade de enxofre no magma é função da atividade de FeO no magma (que diminui com aumento da $f\text{O}_2$);

Saturação pode ser atingida com diminuição de temperatura, aumento de $f\text{O}_2$, adição de enxofre externamente derivado ou ingresso de novo magma.

IMISCIBILIDADE SILICATO-SULFETO



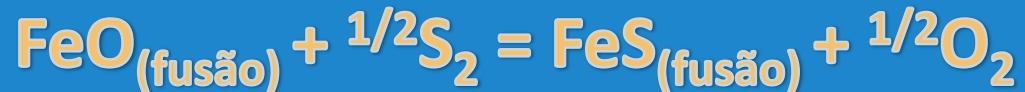
Depósitos de Ni, Cu, Co, EGP

Formação substancial de **fase imiscível sulfetada**;
Glóbulos sulfetados imiscíveis podem interagir
com grande volume do magma silicático;
Acumulação da fase sulfetada imiscível em um
nível único, coeso

The mineralised base of a komatiite lava river, from Kambalda, Western Australia. A: the underlying basalt with evidence of melting by the overlying komatiite. B: the massive nickel sulphide ore that pools at the base of the komatiite lava river. C: the overlying komatiite lava flow. Image: David Mole

IMISCIBILIDADE SILICATO-SULFETO

Solubilidade de enxofre no magma



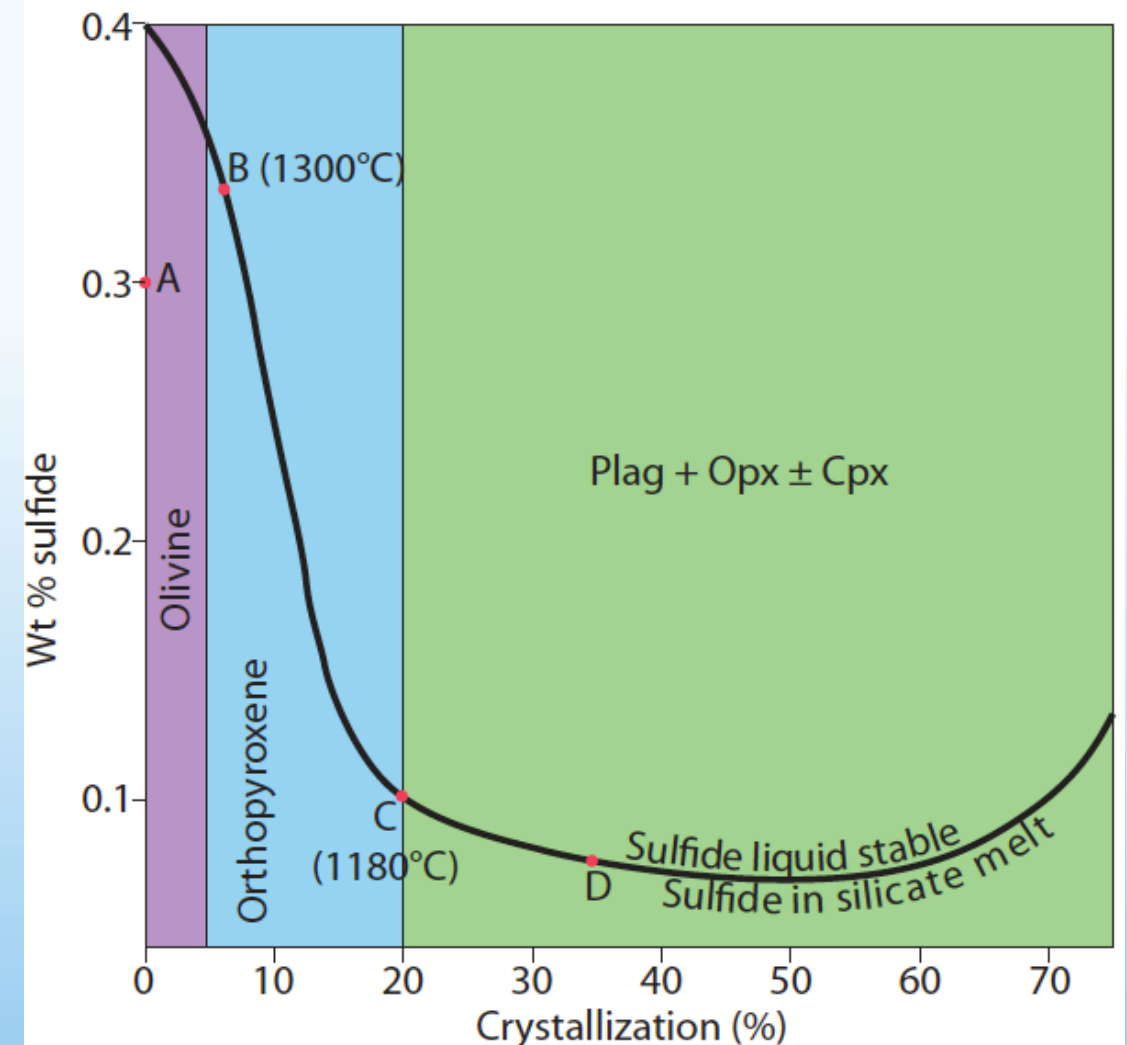
Solubilidade do enxofre diminui com aumento da $f\text{O}_2$, conteúdo de SiO_2 e pressão;

Solubilidade aumenta com aumento de temperatura e conteúdo de FeO do magma;

Variação na solubilidade da fase sulfetada é função da cristalização progressiva de um magma máfico.

Extração das primeiras fases minerais formadas (Ol, Opx) aumenta o conteúdo relativo da fase sulfetada no magma residual e o limite de saturação é atingido.

Com a saturação, glóbulos imiscíveis da fase líquida sulfetada são formados. Se os glóbulos são extraídos do magma por procesos de deposição gravitacional, a partição de elementos traços entre os líquidos sulfetados e silicático pode ser modelada em termos de mecanismos de cristalização fracionada.



IMISCIBILIDADE SILICATO-SULFETO



Partição dos metais entre líquidos silicático e sulfetado:

Metais calcófilos (**Cu, Ni, Co**) apresentam tendência de se particionar para a fase sulfetada, assim como **PGE (que tem concentrações muito baixas no magma)**;

Mecanismos de concentração desses elementos depende da interação química entre a fase líquida sulfetada e todo o reservatório magmático que contém metais;

Elementos compatíveis, principalmente Ni, podem ser incorporados aos minerais formados inicialmente, antes da saturação ser atingida

IMISCIBILIDADE SILICATO-SULFETO



FATORES QUE PROMOVEM A IMISCIBILIDADE

Adição de enxofre de fontes externamente derivadas

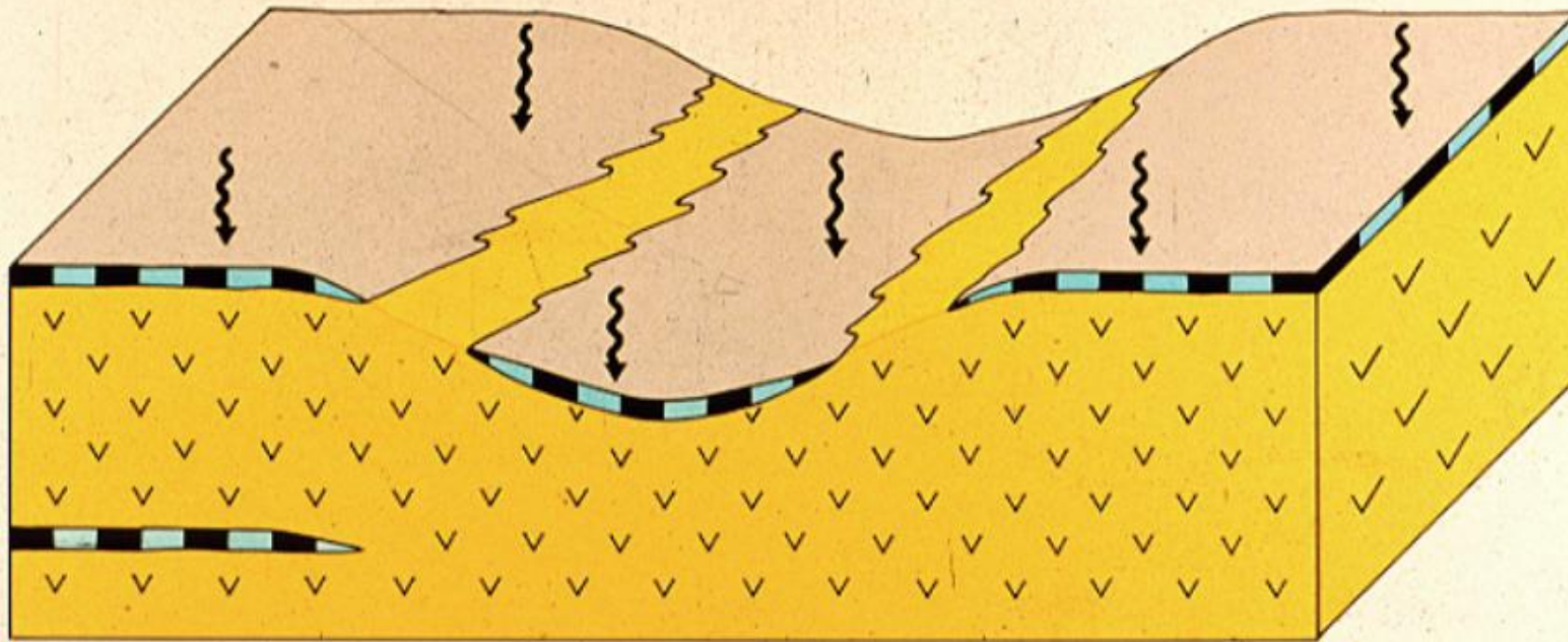
Exemplo: Depósito de **Ni-Cu** de Kambalda, Austrália, hospedado por **komatiitos** em contato com chert, folhelhos e BIFs.

Lavas komatiíticas provocam **erosão termal**

Minério de Ni-Cu associado no *footwall*

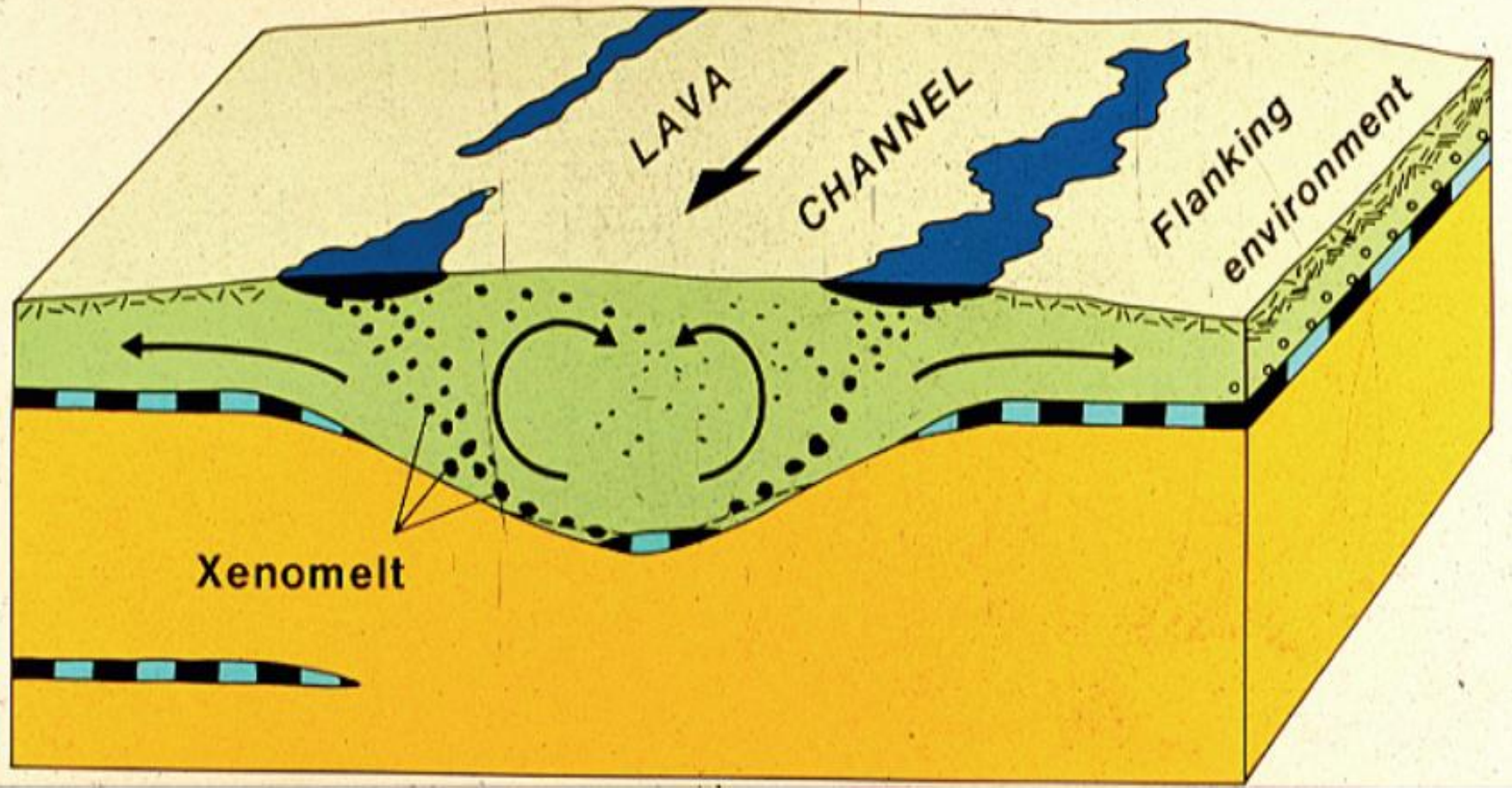
KOMATIÍTOS & EROSÃO TÉRMICA

Topografia pré-derrame



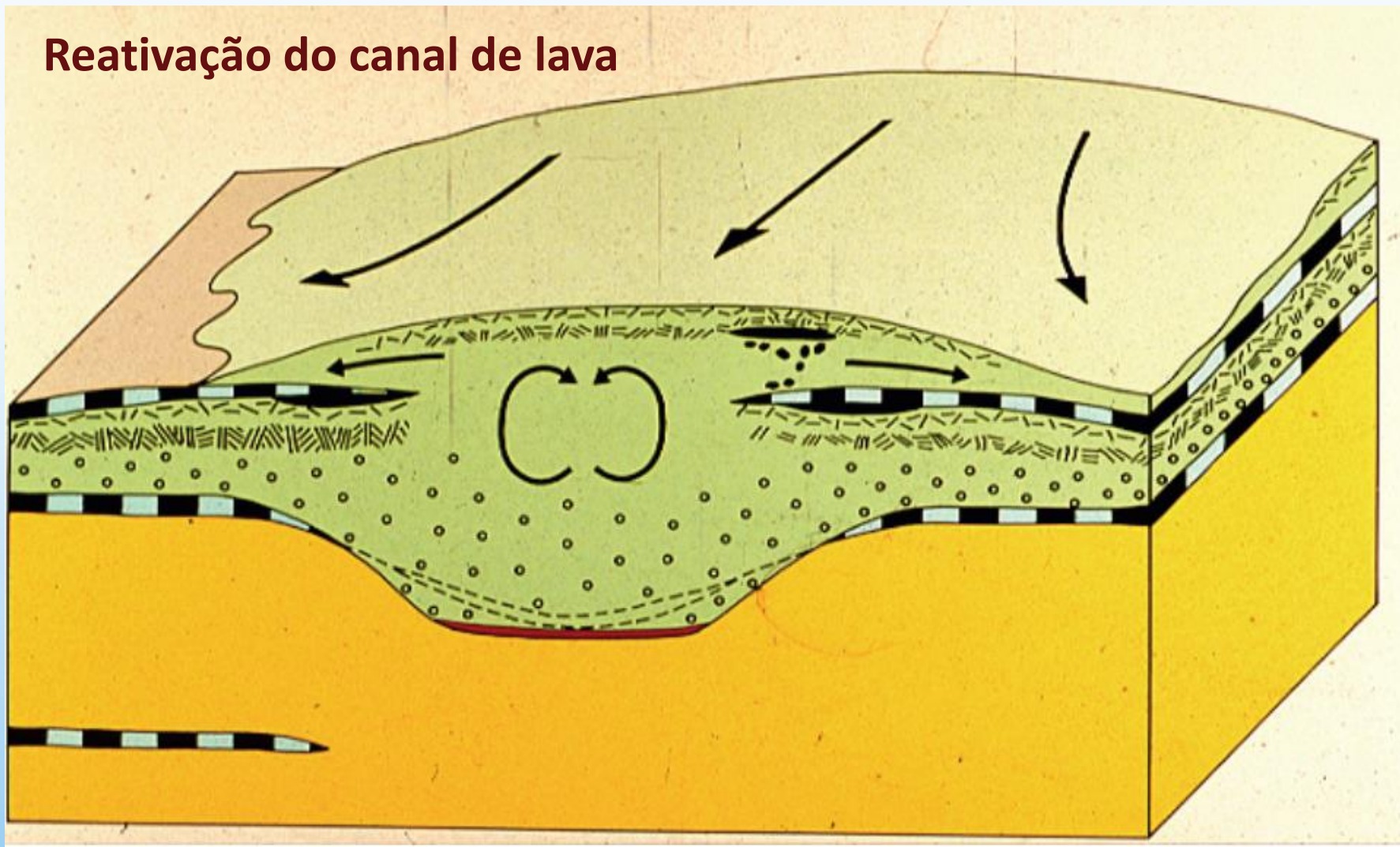
KOMATIÍTOS & EROSÃO TÉRMICA

Derrame komatítico



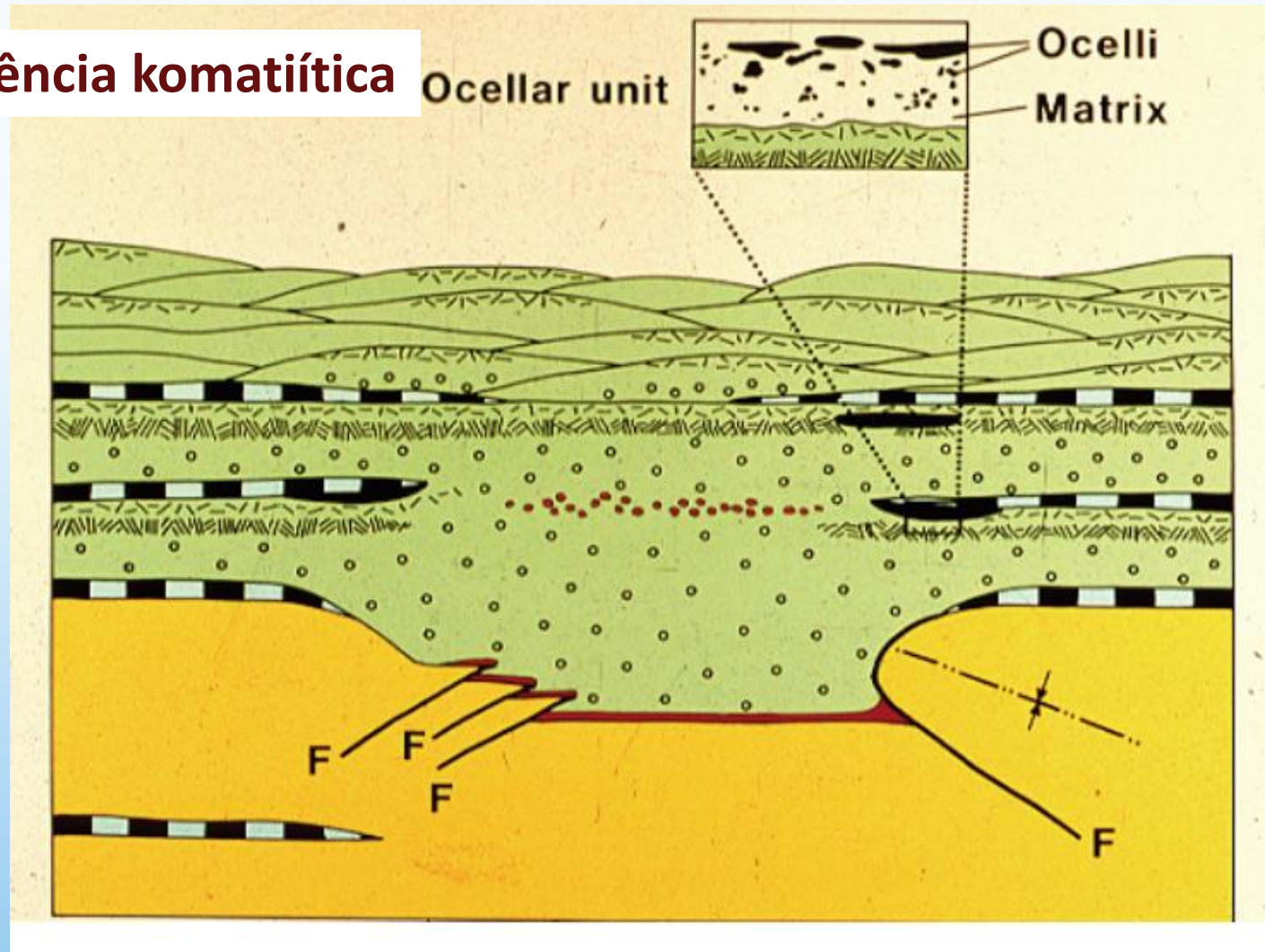
KOMATIÍTOS & EROSÃO TÉRMICA

Reativação do canal de lava



KOMATIÍTOS & EROSÃO TÉRMICA

Sequência komatiítica

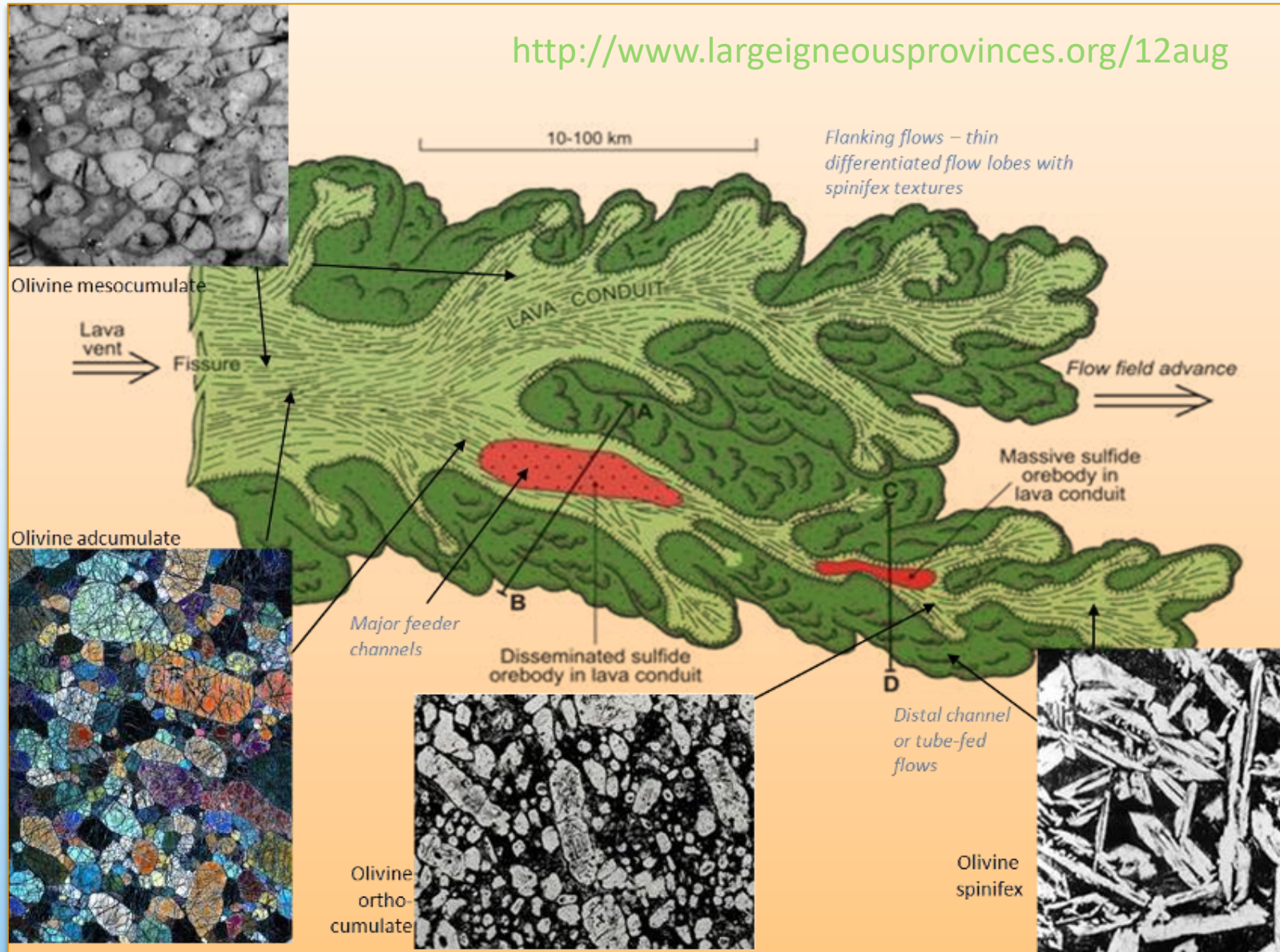


FONTES DE ENXOFRE

- **ADIÇÃO DE ENXOFRE** crustal é importante para a:
 - Saturação em enxofre no magma
 - Formação de fase imiscível sulfetada
 - Formação de sulfetos de níquel (e fases de EGP);
- Mecanismo de colocação do magma/lavas pode favorecer **CONTAMINAÇÃO CRUSTAL** em profundidade (saturação em S durante a cristalização fracionada)
- **FONTES ALTERNATIVAS:** exalitos e mineralizações de sulfetos maciços VHMS associadas a domos félsicos coevos com o vulcanismo komatiítico (Fiorentini *et al.* 2012);

Komatiito & Basalto komatiítico

<http://www.largeigneousprovinces.org/12aug>



Mapa geológico da porção norte da unidade ultramáfica do Greenstone Belt Mount Keith, Austrália

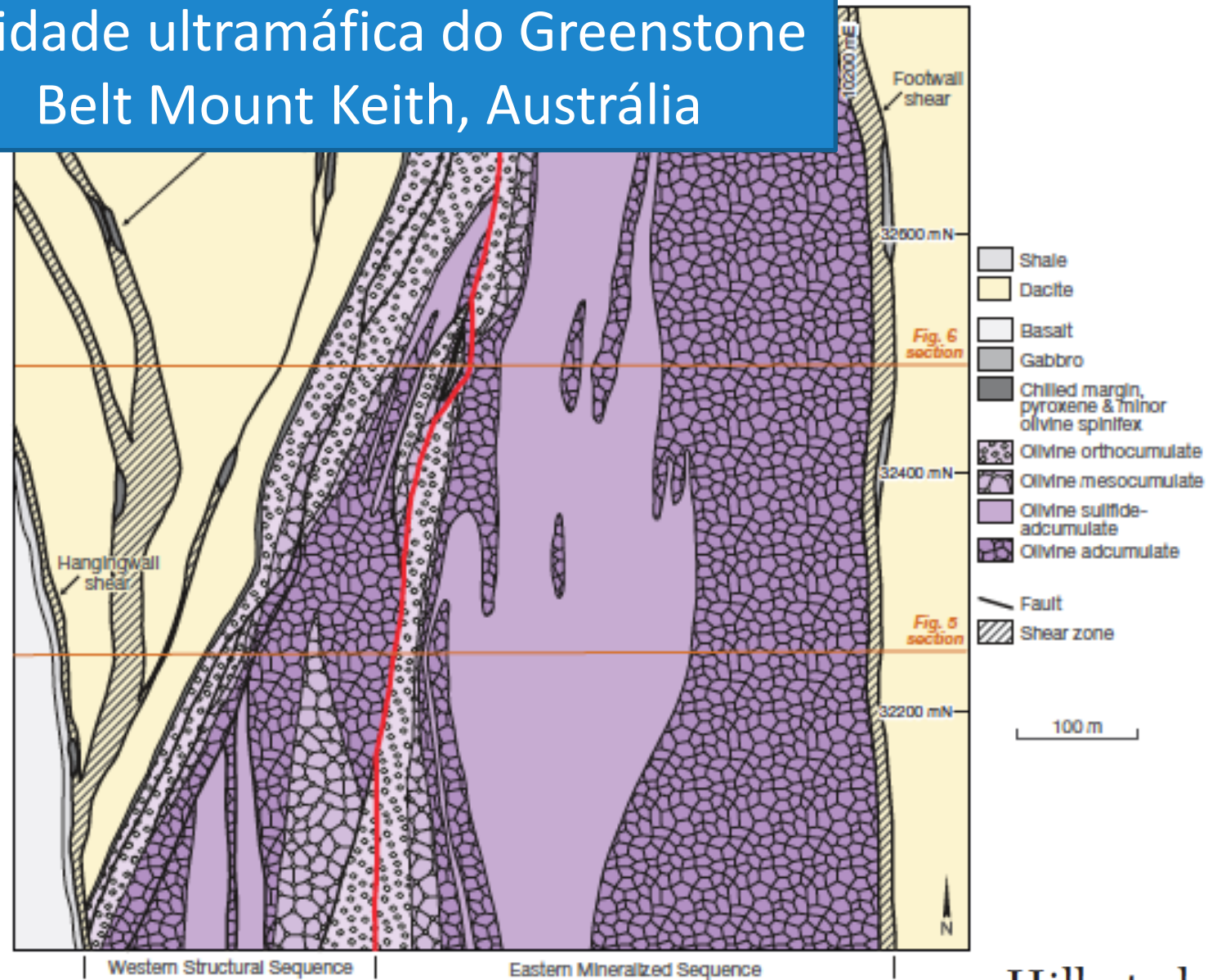


FIG. 3. Geology plan at 400 mRL of the study area shown in Figure 2.

Hill et al. (1995)

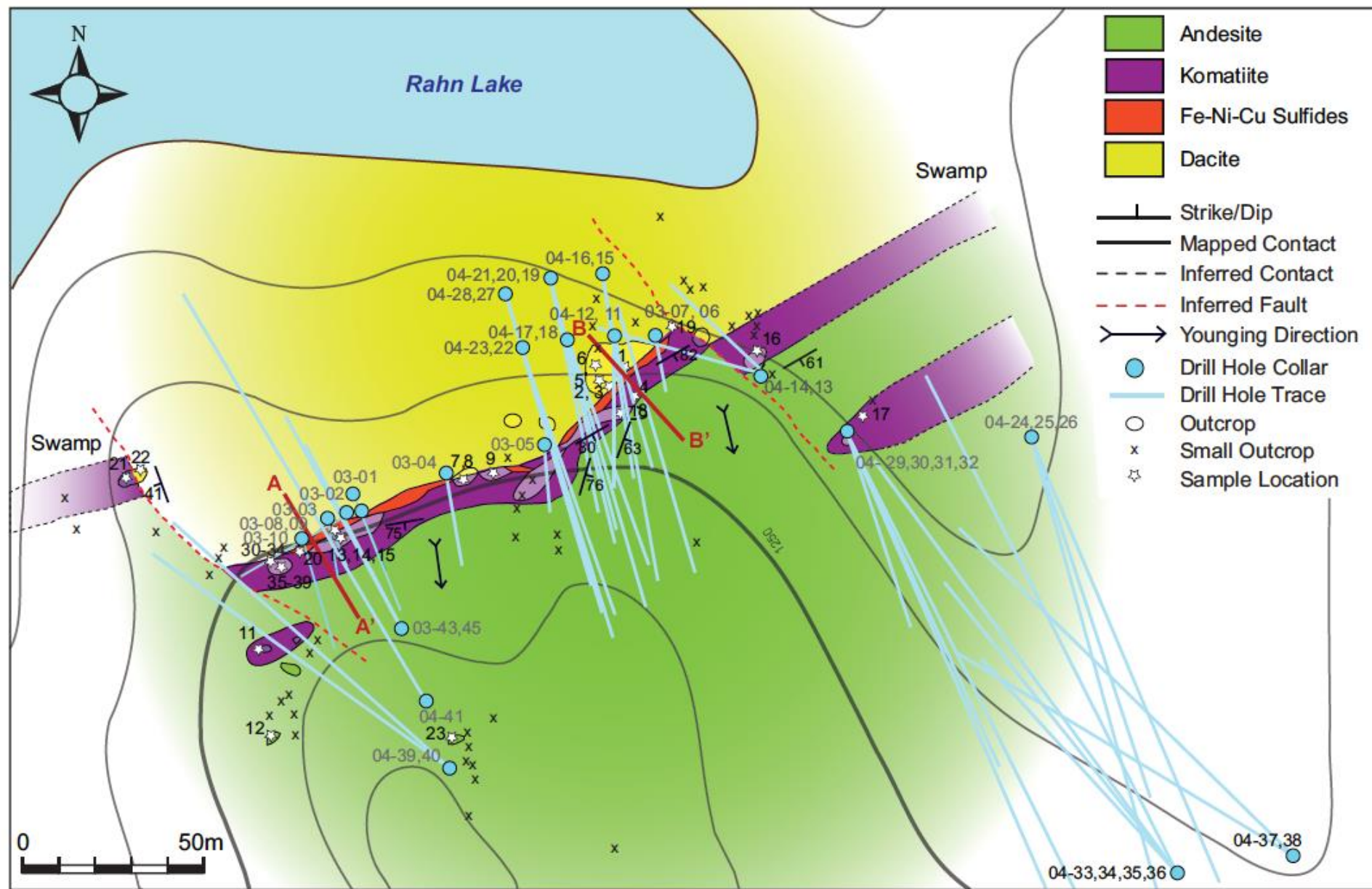
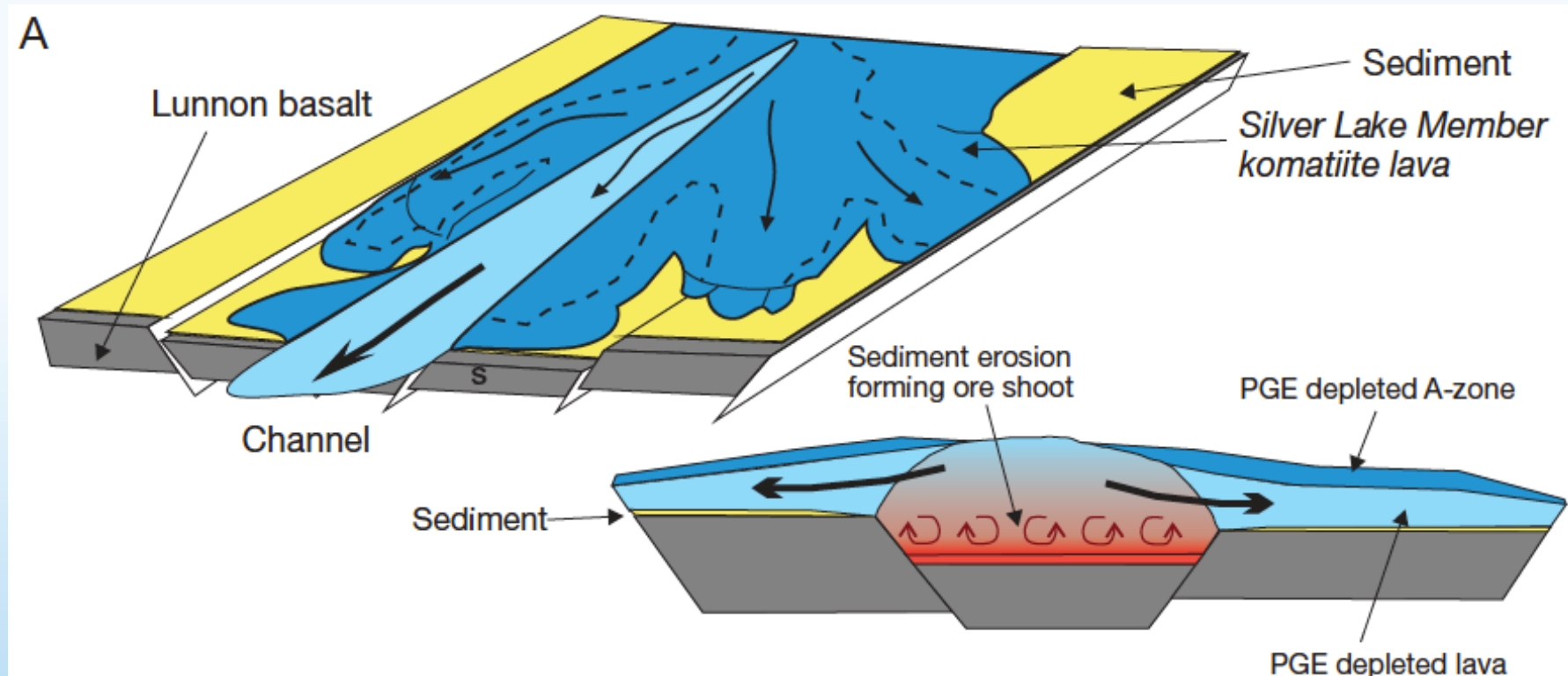


FIG. 3. Geologic map of the C zone derived from surface mapping and selected drill core logging information.

Estágio I

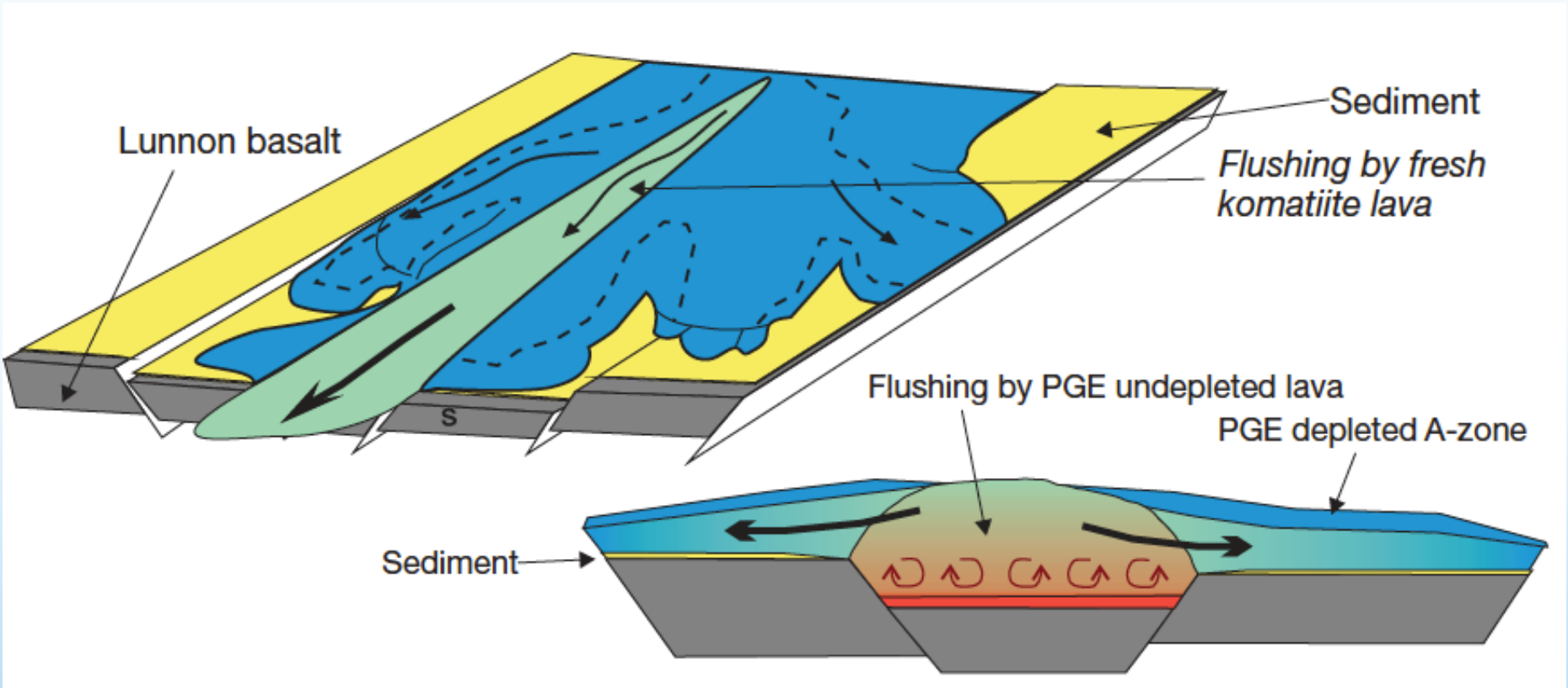
Barnes *et al.* (2013)



Erupção do derrame basal, inflação do canal, erosão termomecânica de sedimentos com sulfetos e formação de minério.

Estágio II

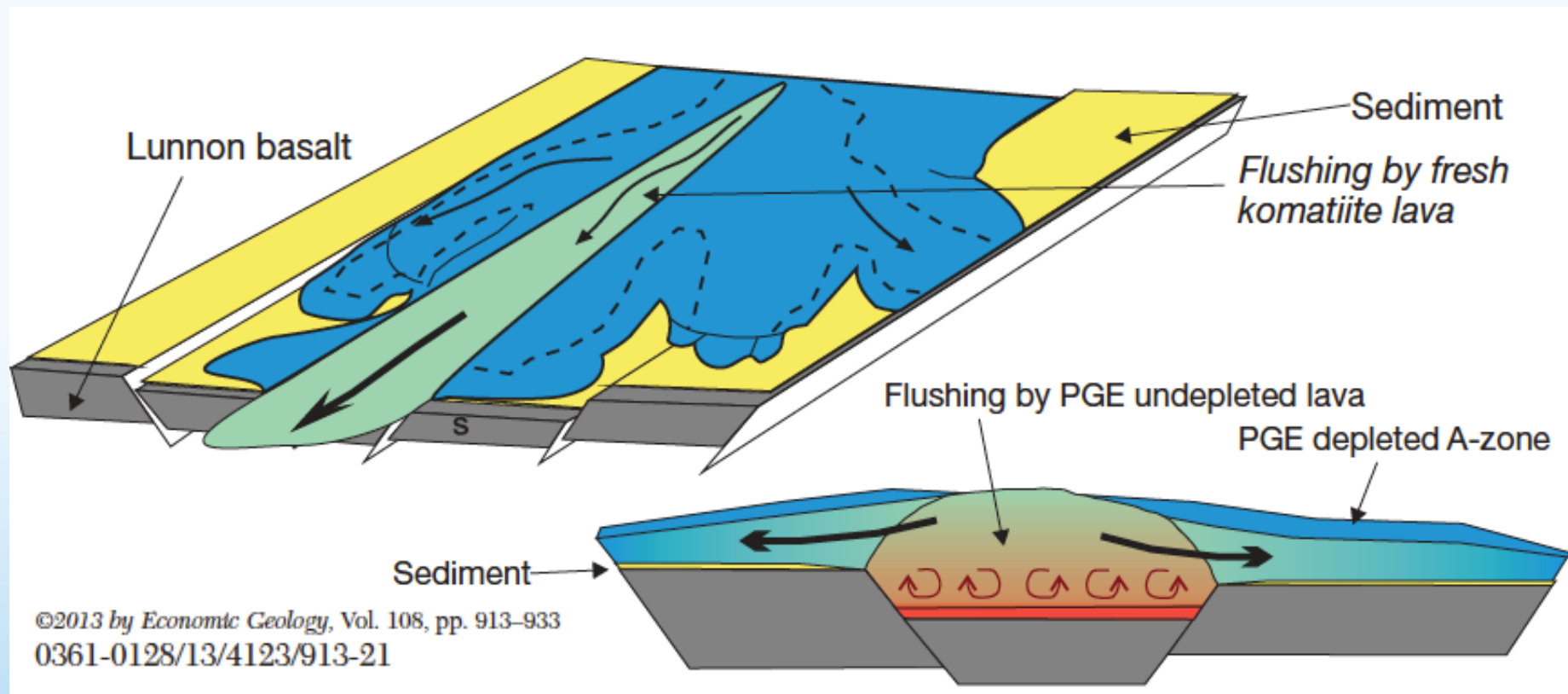
Barnes *et al.* (2013)



Continuidade da erupção, magma inicial pobre em EGP é preservado nos flancos (zona A).

Estágio III

Barnes *et al.* (2013)



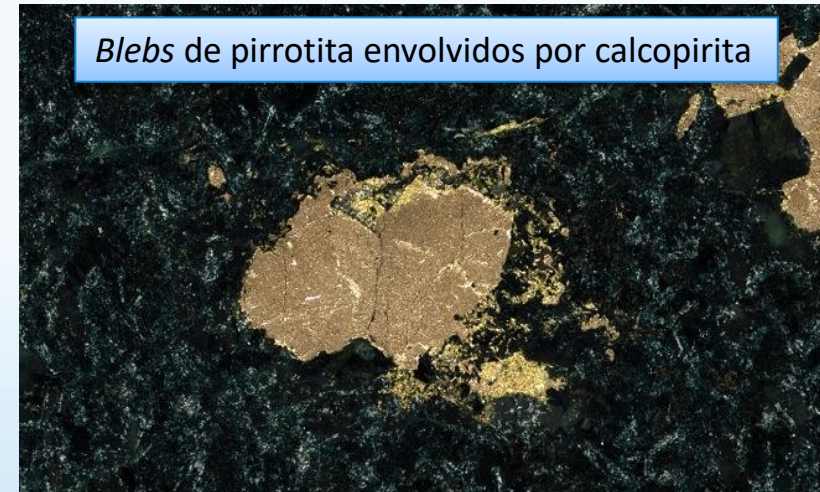
Declínio do fluxo da erupção e sobreposição de derrames. Derrame basal é solidificado como suite composicionalmente zonada de cumulos de olivina.

MINÉRIO DE NI-CU-(EGP)



Pentlandita (Kambalda, Austrália)

Associação de minério: pirrotita, pentlandita $[(Fe,Ni)_9S_8]$, Co-pentlandita, millerita (NiS), vaesita, calcopirita, magnetita



Blebs de pirrotita envolvidos por calcopirita

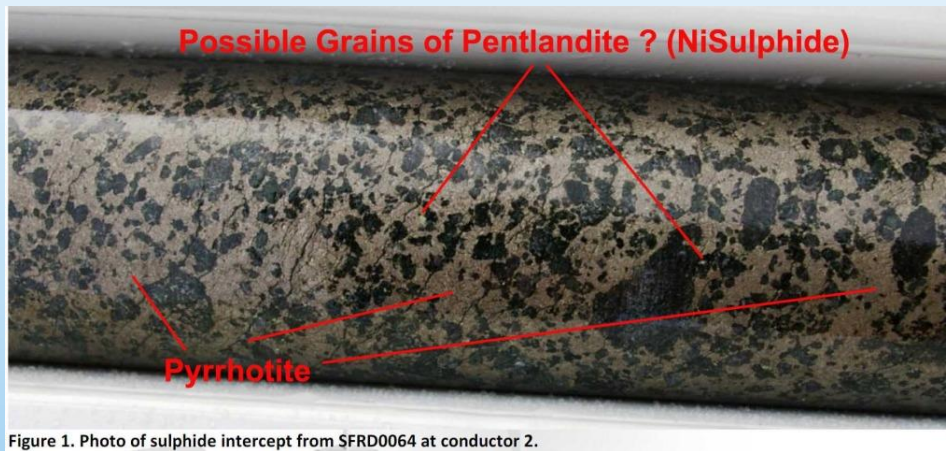


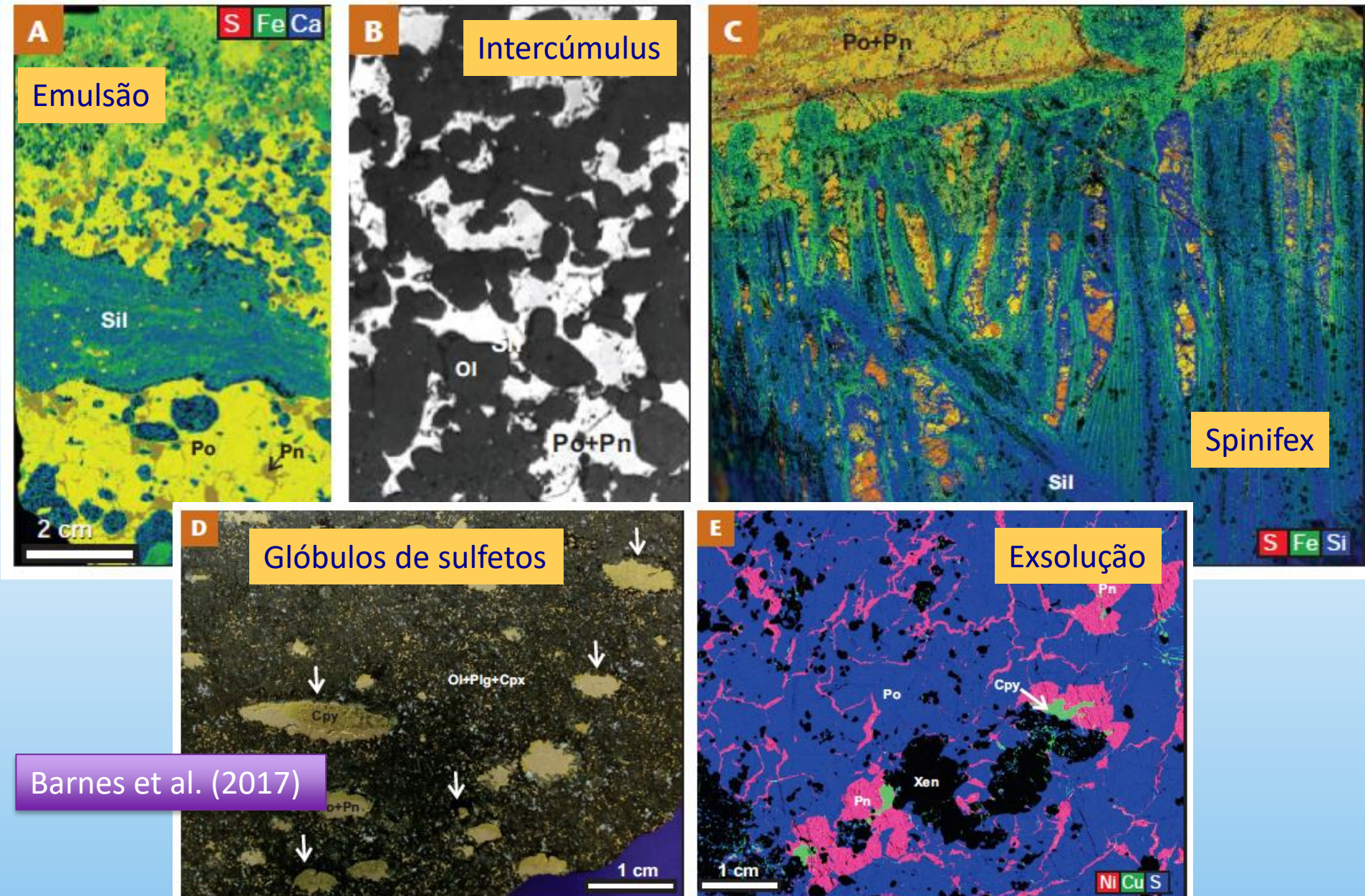
Figure 1. Photo of sulphide intercept from SFRD0064 at conductor 2.

Pirrotita com inclusões ou “flames” de pentlandita



Flame de pentlandita e pirrotita

Texturas indicativas da origem magmática dos sulfetos

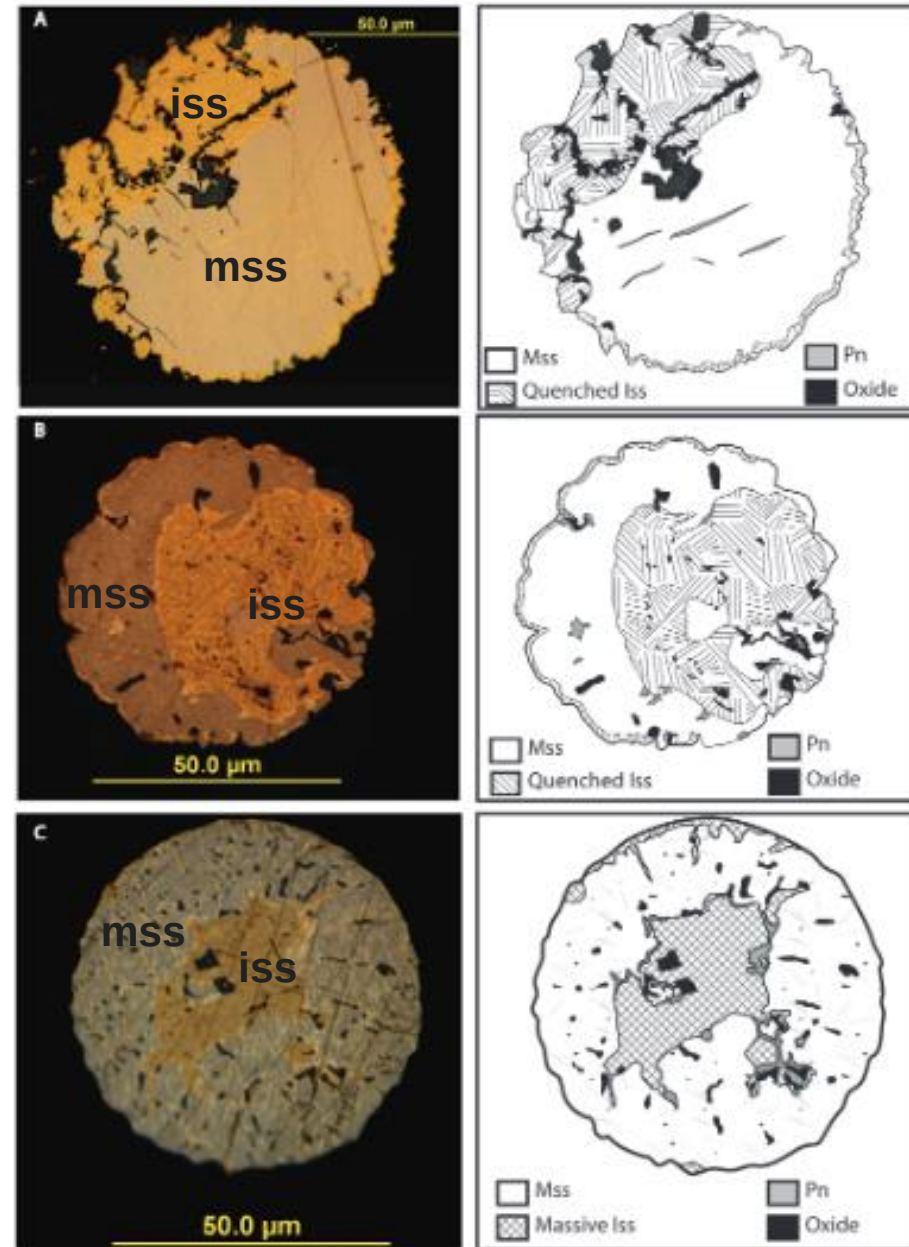


Variações texturais em gotas de sulfeto (basalto de dorsais meso-oceânicas)

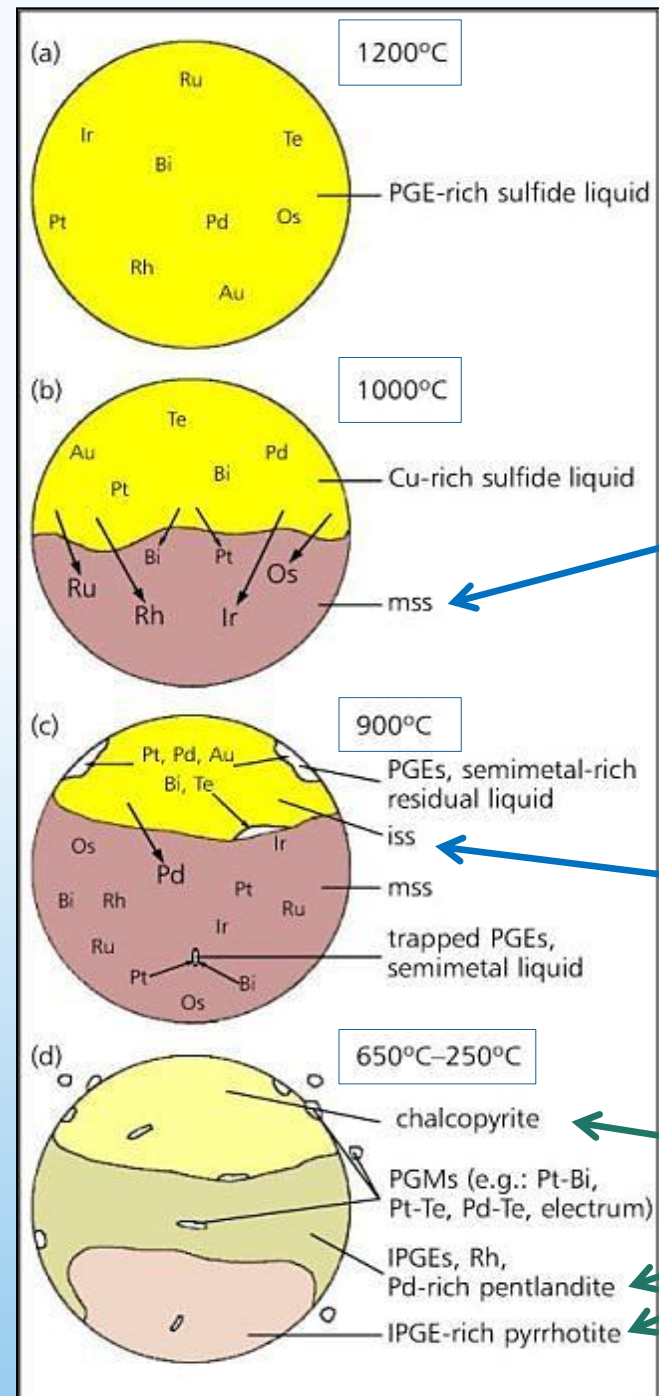
textura zonada: grãos segregados de mss e iss

MSS = monosulfide solid solution
(Ni, Fe)S

ISS = intermediate solid solution
 FeCuS_2



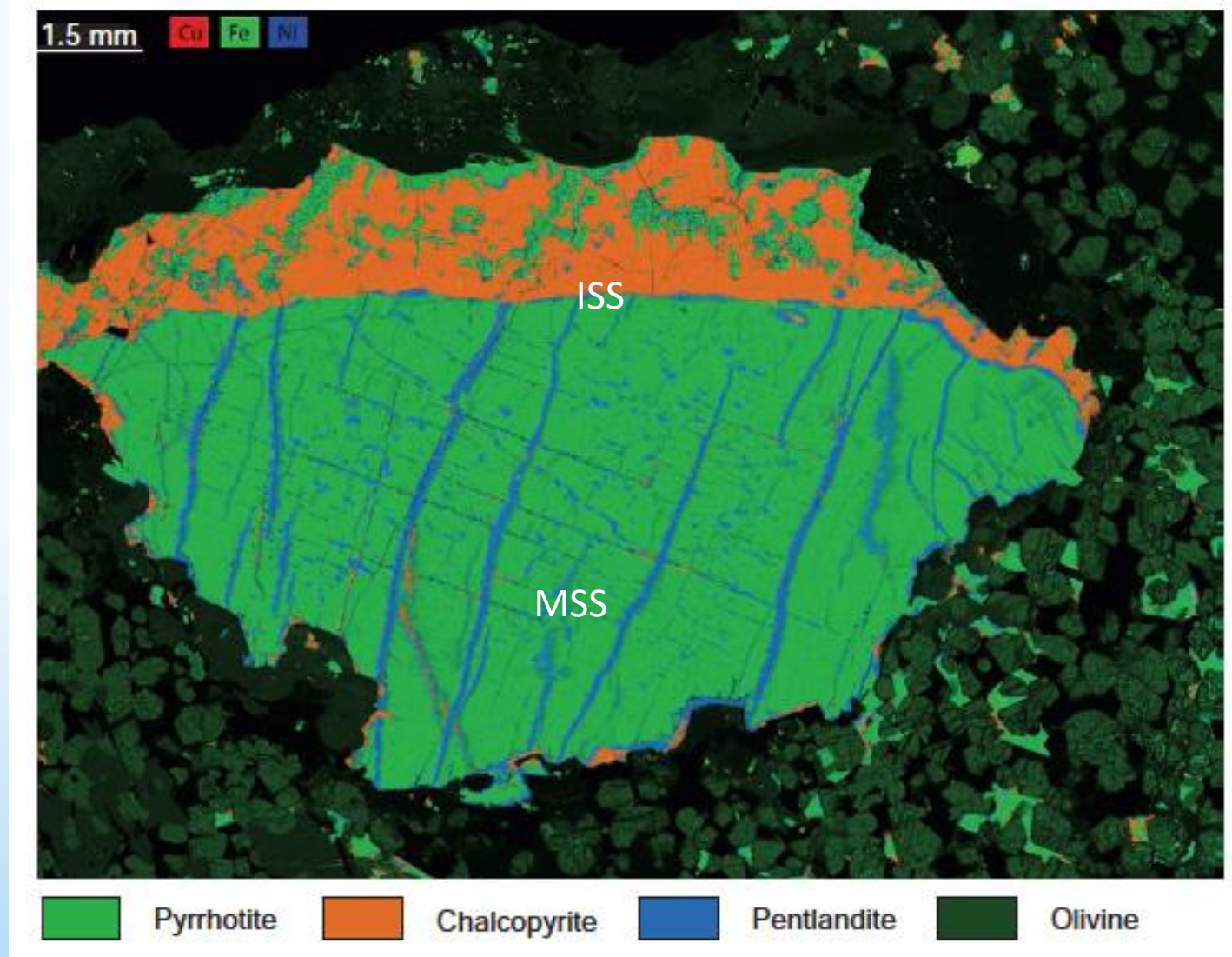
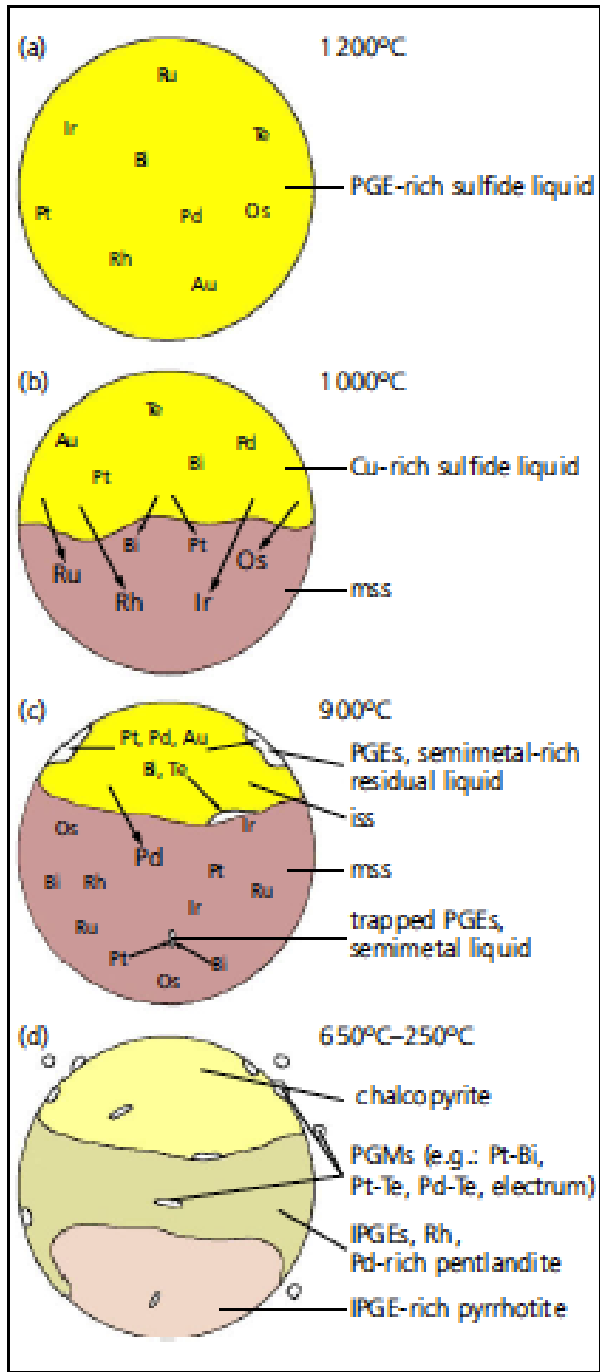
Representação
esquemática do
fracionamento de
um glóbulo de
sulfeto com ênfase
no comportamento
dos EGP em
temperaturas
magmáticas



Fe, Ni, Cu, EGP,
Co, Au, Bi, Te, etc.,
dissolvidos na
fusão imiscível de
sulfeto

fases minerais
cristalizadas

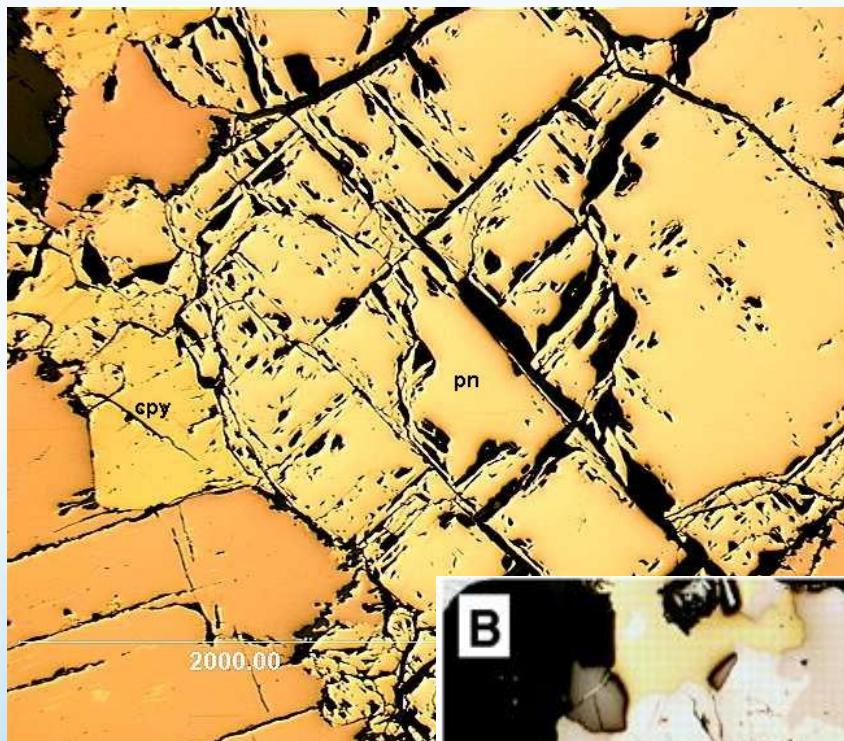
Holwell, D.A., McDonad, I. 2010. A review of Platinum Group Elements within Natural Sulfide Ore systems. Platinum Metals Rev., 54: 26-36.



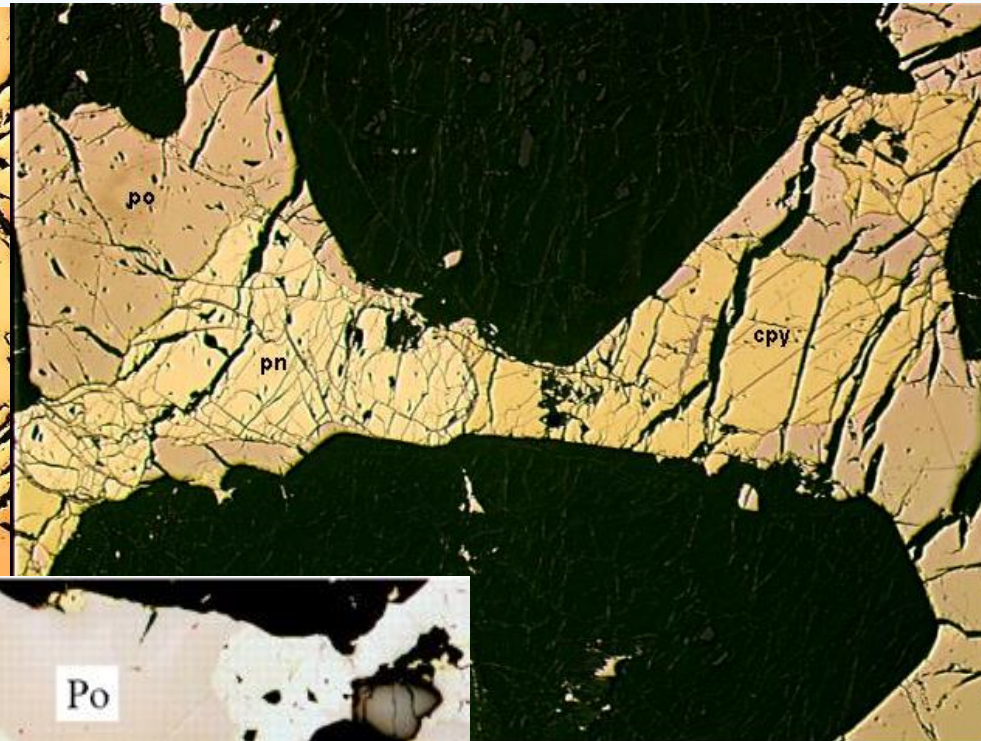
Barnes, S.J., Holwell, D.A., Le Vaillant, M. 2017. Magmatic Sulfide Ore Deposits. Elements, 13:89-95.

Holwell, D.A., McDonad, I. 2010. A review of Platinum Group Elements within Natural Sulfide Ore systems. Platinum Metals Rev., 54: 26-36.

MINÉRIO DE Ni-Cu-(EGP)



Idiomorphic pentlandite grain. f



2.05m. Photo Kari Kojonen.

