

Origen del MRN (NRM)

- **Ferromagnetismo de las partículas**
Anisotropía, dominios magnéticos, histéresis, tiempo de relajación, superparamagnetismo
- **Tipos de MRN (en la roca)**
 - TRM: magnetización termoremanente
 - CRM: magnetización remanente química
 - DRM: magnetización remanente detrítica
 - VRM: magnetización remanente viscosa
 - IRM: magnetización remanente isotérmica

Magnetización remanente termoviscosa (TVRM)

Magnetización viscosa adquirida a altas temperaturas durante un tiempo prolongado

Para estimar qué temperatura de bloqueo en laboratorio, es necesaria para remover una TVRM:

$$\tau_1 = \frac{1}{C} \exp \frac{[\mu_o H_c M_s v]}{[2kT_1]} \quad \tau_2 = \frac{1}{C} \exp \frac{[\mu_o H_c M_s v]}{[2kT_2]}$$

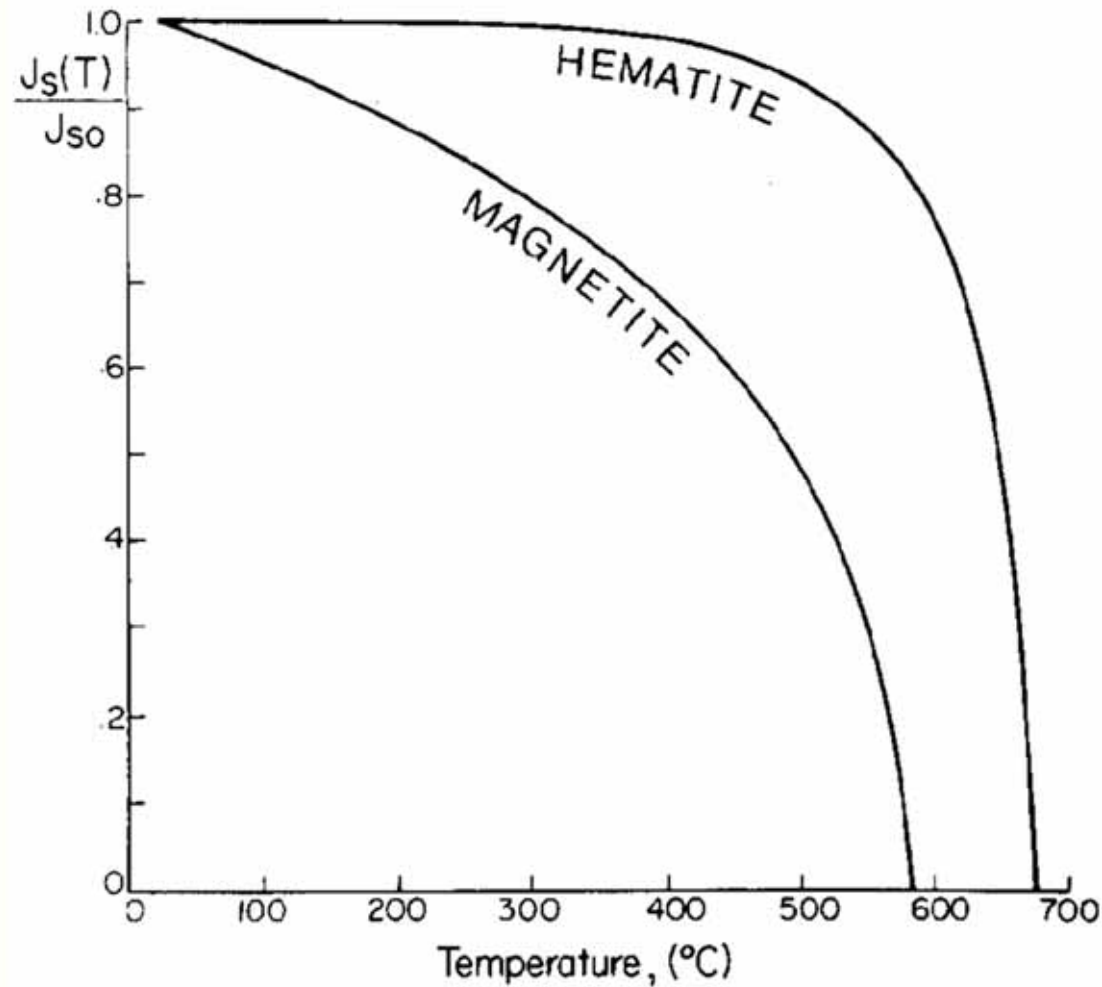
asumiendo H_c , M_s y v constantes:

$$T_1 \ln C\tau_1 = T_2 \ln C\tau_2$$

Pero H_c y M_s no varían juntas con T , entonces:

$$\frac{T_1 \ln C\tau_1}{M_s(T_1)H_c(T_1)} = \frac{T_2 \ln C\tau_2}{M_s(T_2)H_c(T_2)}$$

Variación de J_s con la temperatura



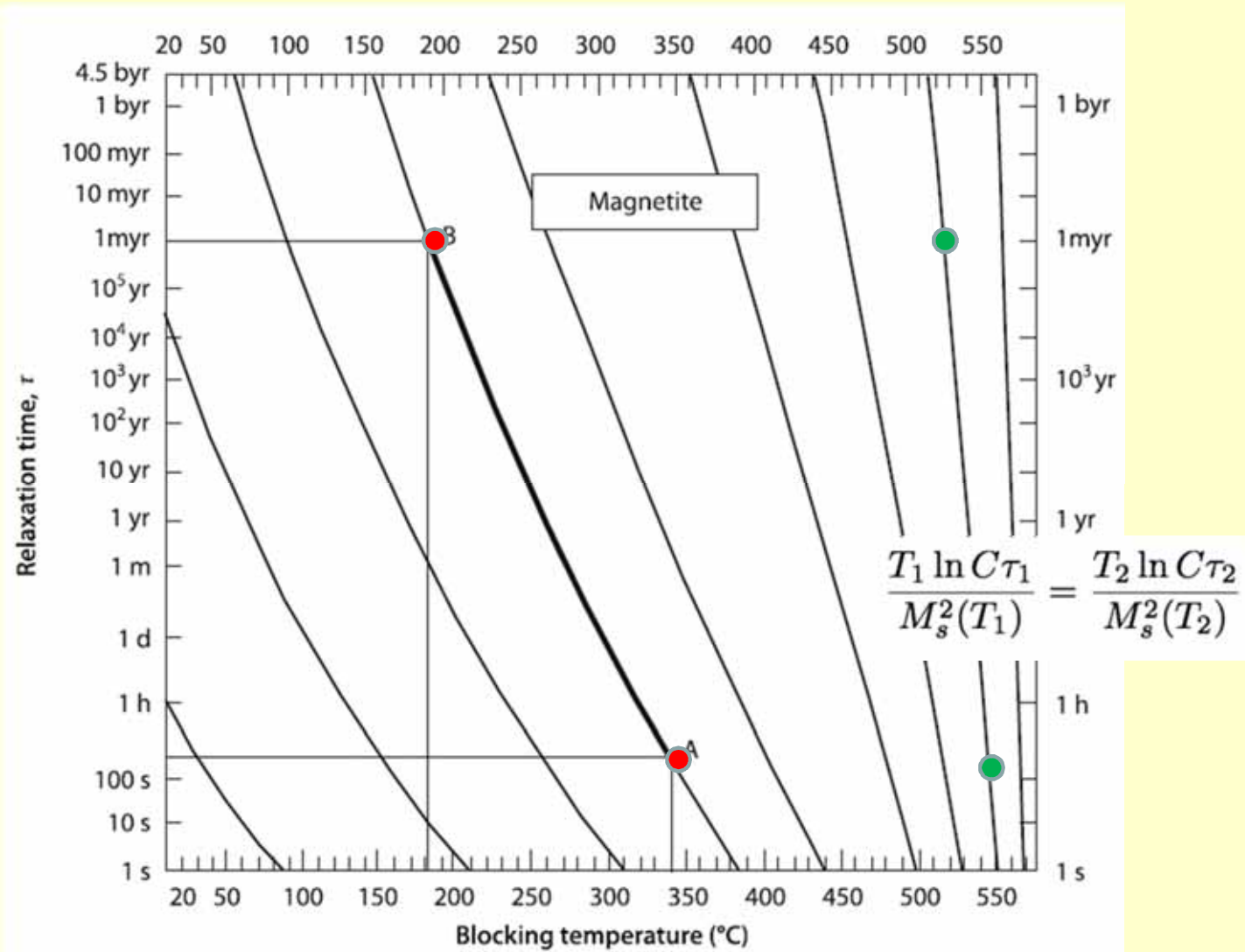
Dependencia de H_K y M_s con la temperatura

- Magnetita (anisotropía de forma): $H_K(T)$ proporcional a $M_s(T)$, entonces se simplifica a

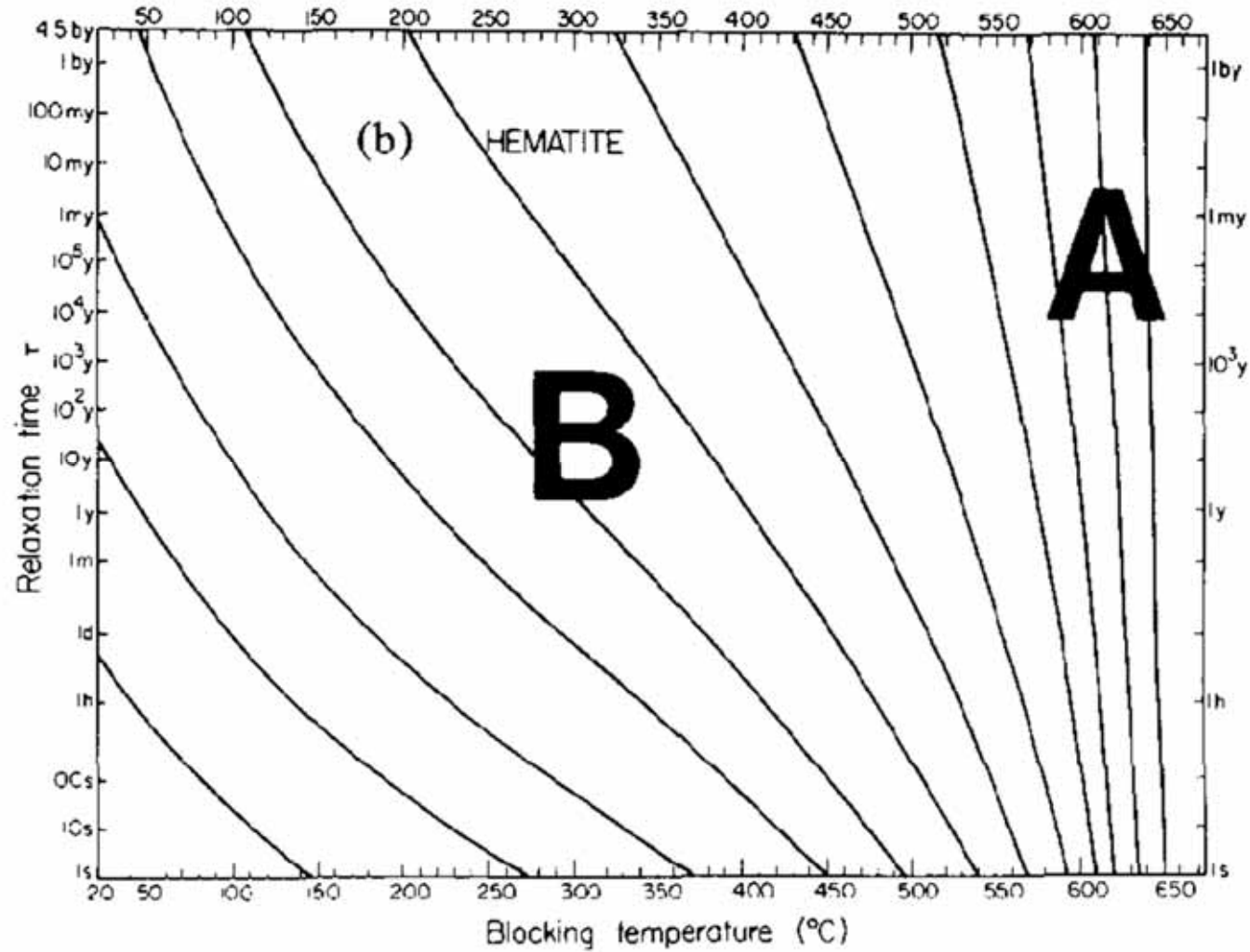
$$\frac{T_1 \ln C \tau_1}{M_s^2(T_1)} = \frac{T_2 \ln C \tau_2}{M_s^2(T_2)}$$

- Hematita (anisotropía magnetocristalina / por esfuerzos): $H_K(T)$ proporcional a $M_s^3(T)$

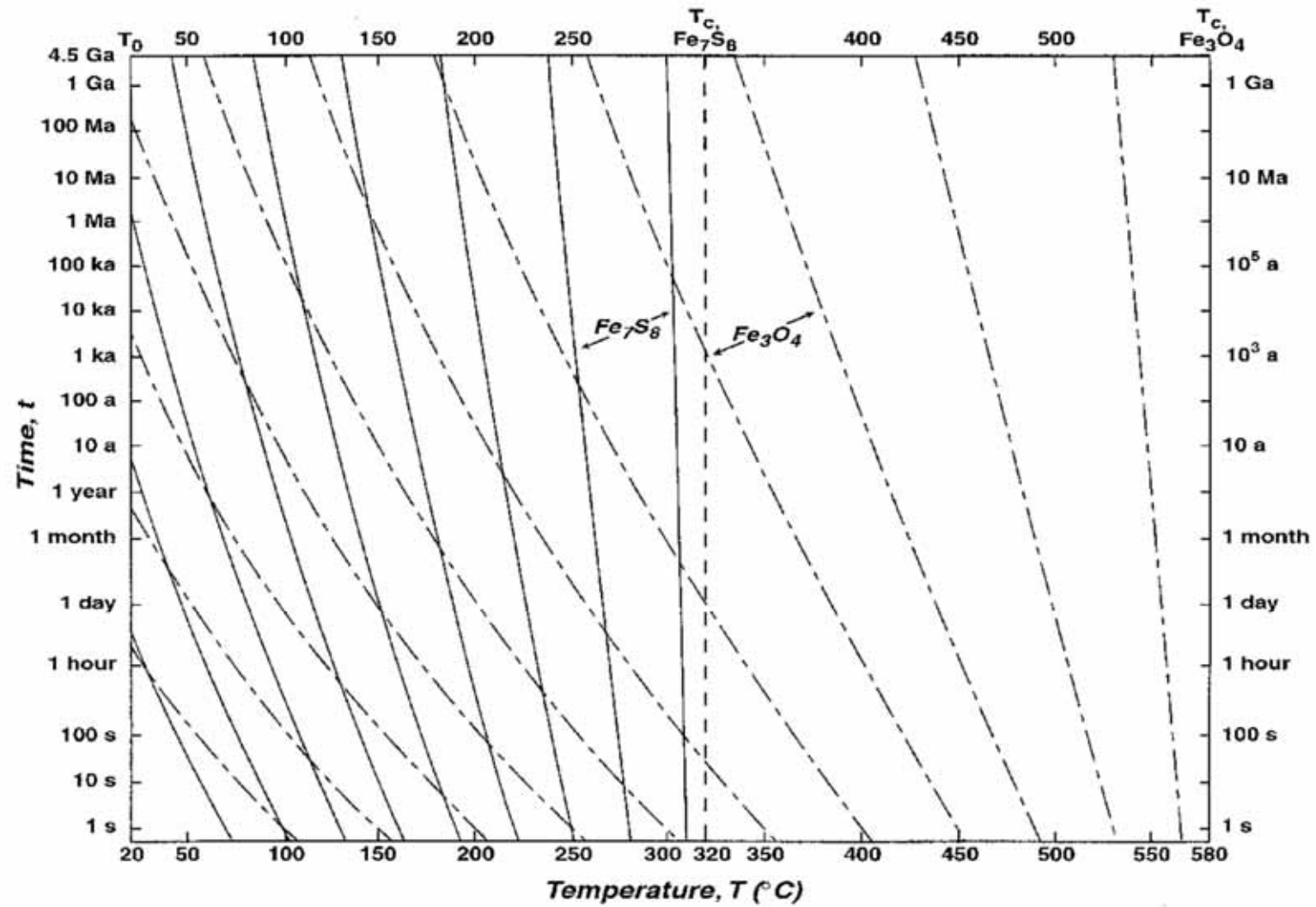
Nomograma para magnetita (Pullaiah et al. 1975)



Nomograma para hematita



Nomograma para pirrotina y magnetita



Partículas con temperaturas de bloqueo unos 100° por debajo de la temperatura de Curie son estables (sólo pueden ser desbloqueadas calentando a temperaturas similares)

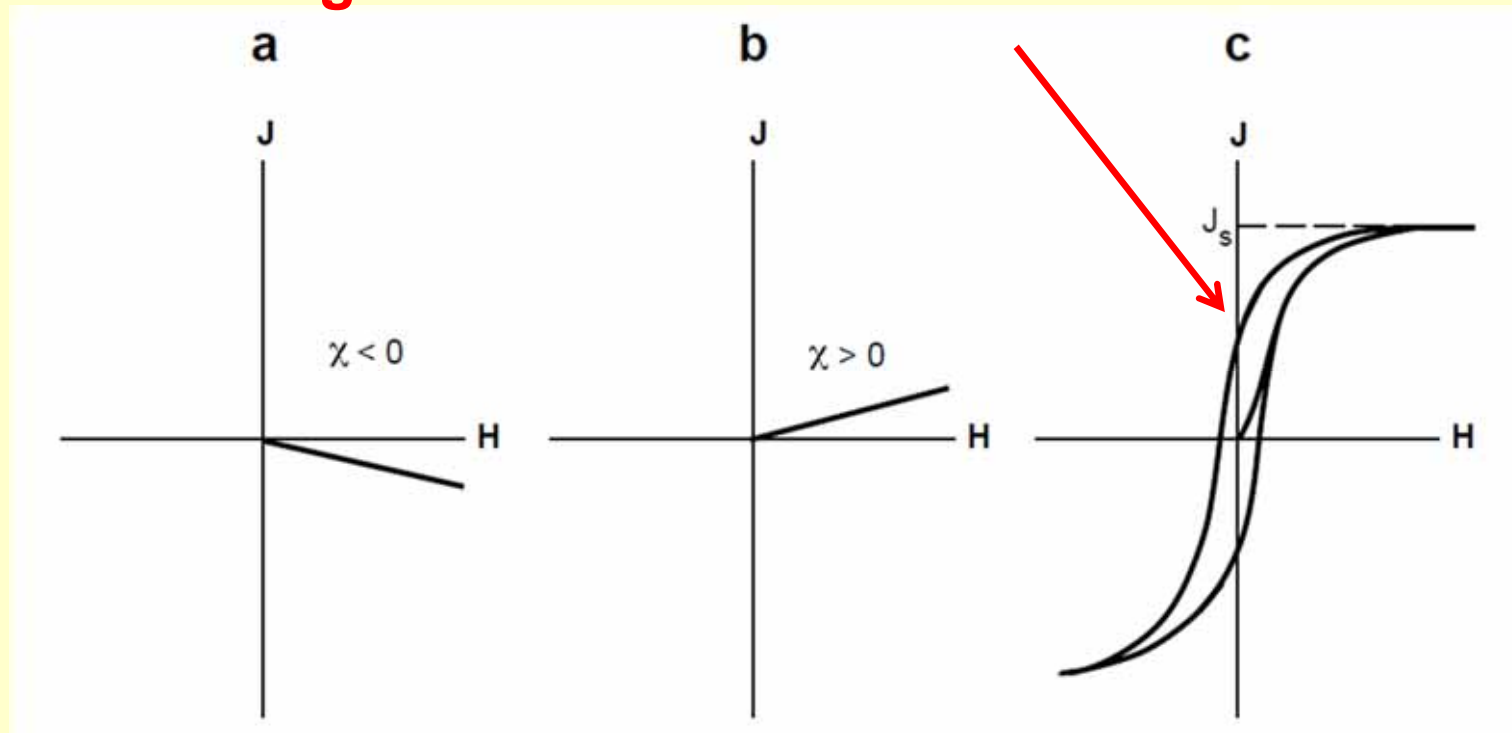
Partículas con temperaturas de bloqueo menores, son más inestables (pueden desbloquearse con calentamiento a temperaturas modestas).

El metamorfismo regional puede resetear completamente la remanencia

La teoría precedente no funciona para partículas MD. Las partículas MD adquieren VRM o TVRM por la activación térmica de las paredes de dominio. Las partículas de menor coercitividad son las que más fácilmente adquieren VRM.

Una VRM es generalmente una magnetización secundaria, menos estable que una TRM, DRM o CRM.

Magnetización remanente isotérmica



Diamagnetismo

Paramagnetismo

Ferromagnetismo

$$\kappa = J/H$$

$$J = \kappa H$$

Histéresis

(susceptibilidad no depende linealmente del campo)

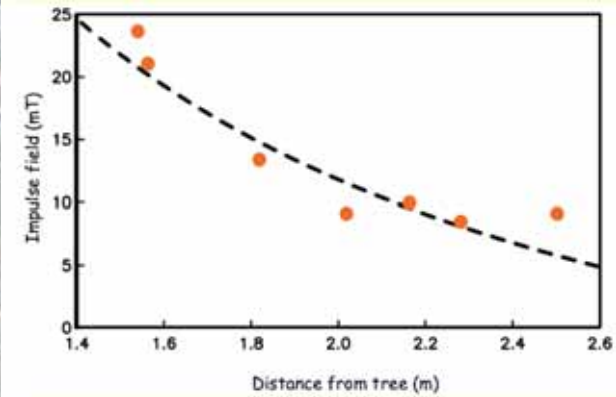
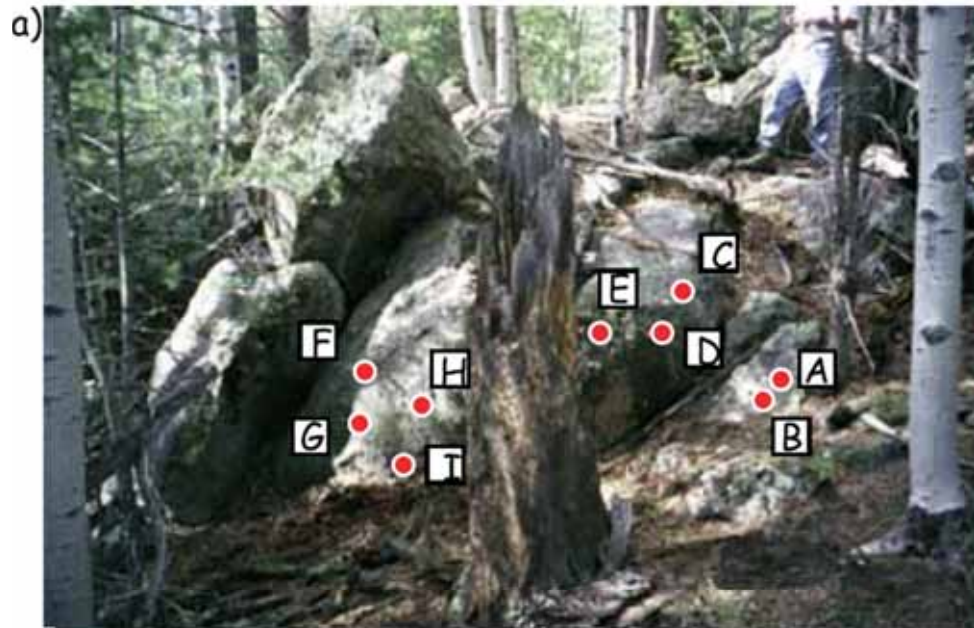
Magnetización remanente isotérmica

Adquisición por exposición de corta duración a un campo magnético intenso, a temperatura constante.

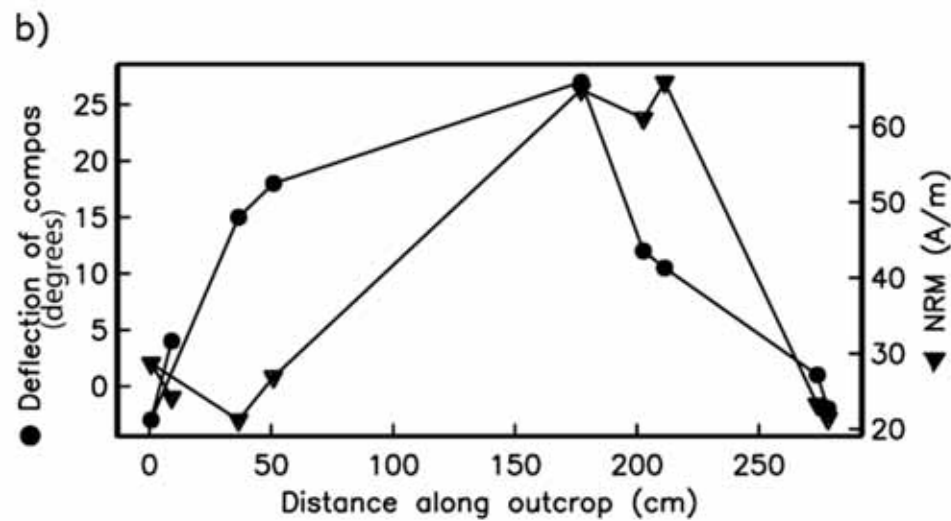
En el laboratorio se consigue a través de campos magnéticos generados por electroimanes. Útil para reconocimiento de minerales.

En la naturaleza se produce por la exposición a campos magnéticos generados por la caída de rayos. El campo magnético en el metro que circunda al punto de descarga puede ser de 10-100 mT.

La probabilidad de incidencia de rayos aumenta en sitios expuestos (puntos elevados o sobresalientes).



(CMT actual $\approx 0,05$ mT)



$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$$

Se estima que el rayo produjo una descarga de 300000 Amperes.

Tauxe et al. 2003, G3

Origen del MRN (NRM)

- **Ferromagnetismo de las partículas**
Anisotropía, dominios magnéticos, histéresis, tiempo de relajación, superparamagnetismo
- **Tipos de MRN (en la roca)**
 - TRM: magnetización termoremanente
 - CRM: magnetización remanente química
 - DRM: magnetización remanente detrítica
 - VRM: magnetización remanente viscosa
 - IRM: magnetización remanente isotérmica

TRM: El material se enfría desde temperaturas superiores a su temperatura de Curie, en presencia de campo magnético.

CRM: Los granos magnéticos crecen a temperatura constante en presencia de campo magnético.

DRM: Los granos magnéticos se depositan en un medio acuoso en presencia de campo magnético.

VRM: El material es expuesto a un campo magnético por un tiempo prolongado (a temperatura constante)

IRM: El material es expuesto a un campo magnético intenso por un tiempo corto, a temperatura constante.

Otras: magnetización piezorremanente, ARM, GRM, RRM

Varias poblaciones de temperaturas de bloqueo pueden convivir en la misma muestra, y por lo tanto, varias componentes de magnetización adquiridas en distintos momentos de la historia geológica.

Los granos de menor fuerza coercitiva tienen tiempo de relajación más corto.

Los granos con menor temperatura de bloqueo tienen tiempo de relajación más corto.

ASUMIENDO MINERALOGÍA ÚNICA Y HOMOGÉNEA

$$\tau = \frac{1}{C} \exp\left(\frac{V h_c j_s}{2kT}\right)$$

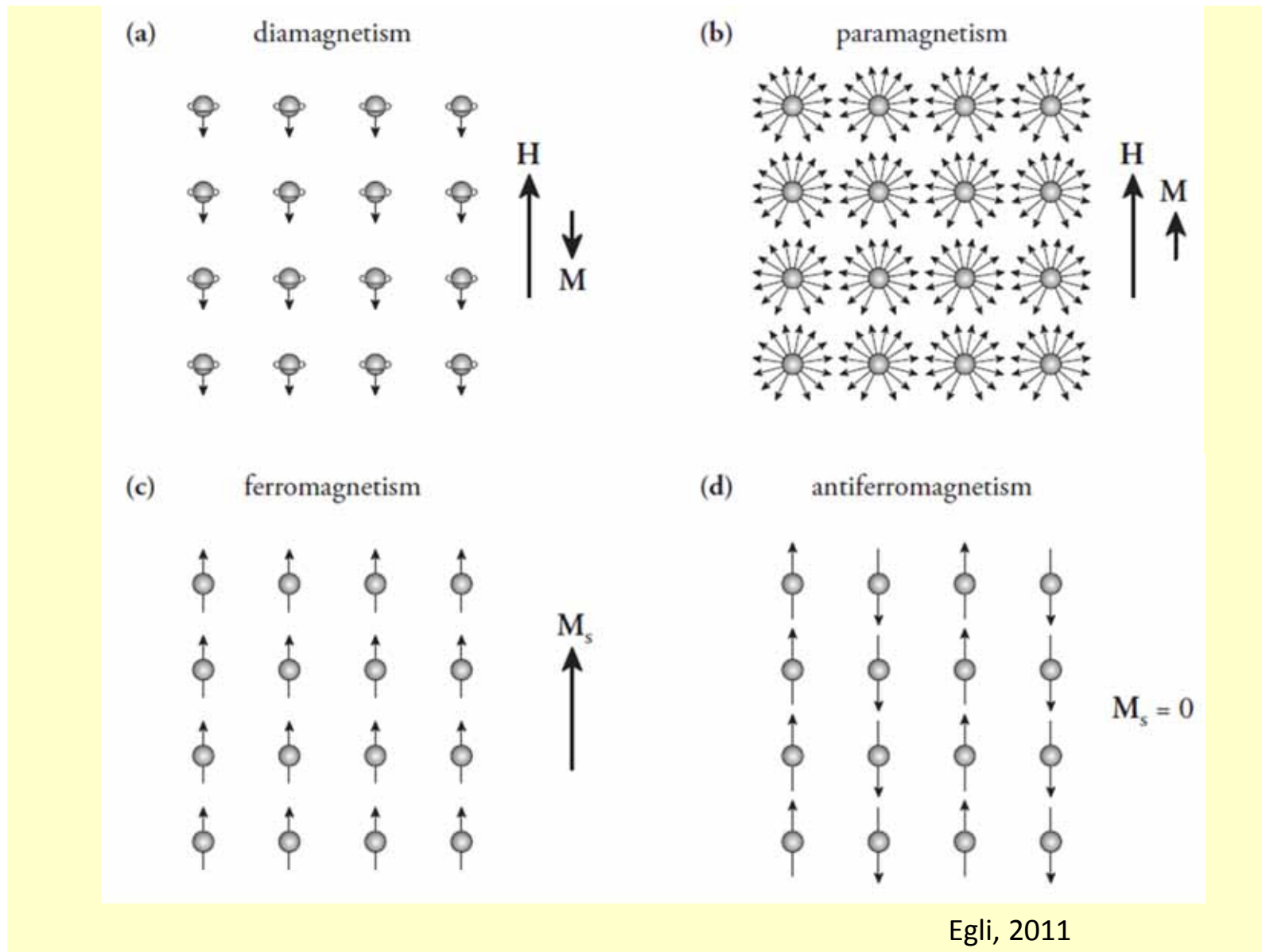
Magnetización remanente natural (MRN)

$$M = M_{\text{inducida}} + M_{\text{remanente}}$$

$$\text{MRN} = \text{MRN primaria} + \text{MRN secundaria}$$

Útil para
paleomagnetismo,
información sobre el
campo magnético en un
tiempo geológico
determinado

Magnetizaciones parásitas
adquiridas a lo largo de la
historia geológica de la roca



$$M_B = 9,27 \times 10^{-21} \text{ G cm}^3 \quad \text{o} \quad 9,27 \times 10^{-24} \text{ Am}^2$$

	n=0	n=1	n=2					n=3	
Element			3s	3p			3d	4s	
Na			↑	m =					
Mg			↑ ↓	1	0	-1			
Al			↑	↑					
Si				↑	↑				
P				↑	↑	↑			
S				↑ ↓	↑	↑			
Cl				↑ ↓	↑ ↓	↑			
Ar				↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓			
K	1s ²	2s ² 2p ⁶		↑	↑				
Ca					↑	↑			
Sc			↑		↑	↑		↑	
Ti			↑		↑	↑		↑	
V			↑		↑	↑		↑	
Cr			↑		↑	↑	↑	↑	
Mn			↑		↑	↑	↑	↑	
Fe			↑ ↓		↑	↑	↑	↑	
Co			↑ ↓		↑ ↓	↑	↑	↑	
Ni			↑ ↓		↑ ↓	↑ ↓	↑	↑	
Cu			↑ ↓		↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑	
Zn			↑ ↓		↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑	

Abundancia de elementos en la corteza terrestre

Elemento	% en peso aproximado
Oxígeno	46,6
Silicio	27,7
Aluminio	8,1
Hierro	5,0
Calcio	3,6
Sodio	2,8
Potasio	2,6
Magnesio	2,1
Titanio	0,6
Resto	0,9

→ presente en todos los minerales magnéticos naturales

(Manganeso 0,09 %)

$$M_B = 9,27 \times 10^{-21} \text{ G cm}^3 \quad \text{o} \quad 9,27 \times 10^{-24} \text{ Am}^2$$

Element	n=0	n=1	n=2	n=3
			3s 3p 3d	4s
Na			↑	
Mg			↑ ↓	
Al			↑	
Si			↑	
P			↑	
S			↑ ↓	
Cl			↑ ↓	
Ar			↑ ↓	
K	1s ²	2s ² 2p ⁶		
Ca				
Sc				
Ti			3s ²	
V				
Cr				
Mn				
Fe			3p ⁶	
Co				
Ni				
Cu				
Zn				

Susceptibilidad paramagnética de las rocas

$$K_{p\text{-theor}} = -14.6 + d \times [25.2 \times \text{Fe}^{2+} + 33.4 \times \text{Fe}^{3+} + 33.8 \times \text{Mn}^{2+}] \text{ in } 10^{-6}[\text{SI}]$$

depende del contenido de iones Fe y Mn

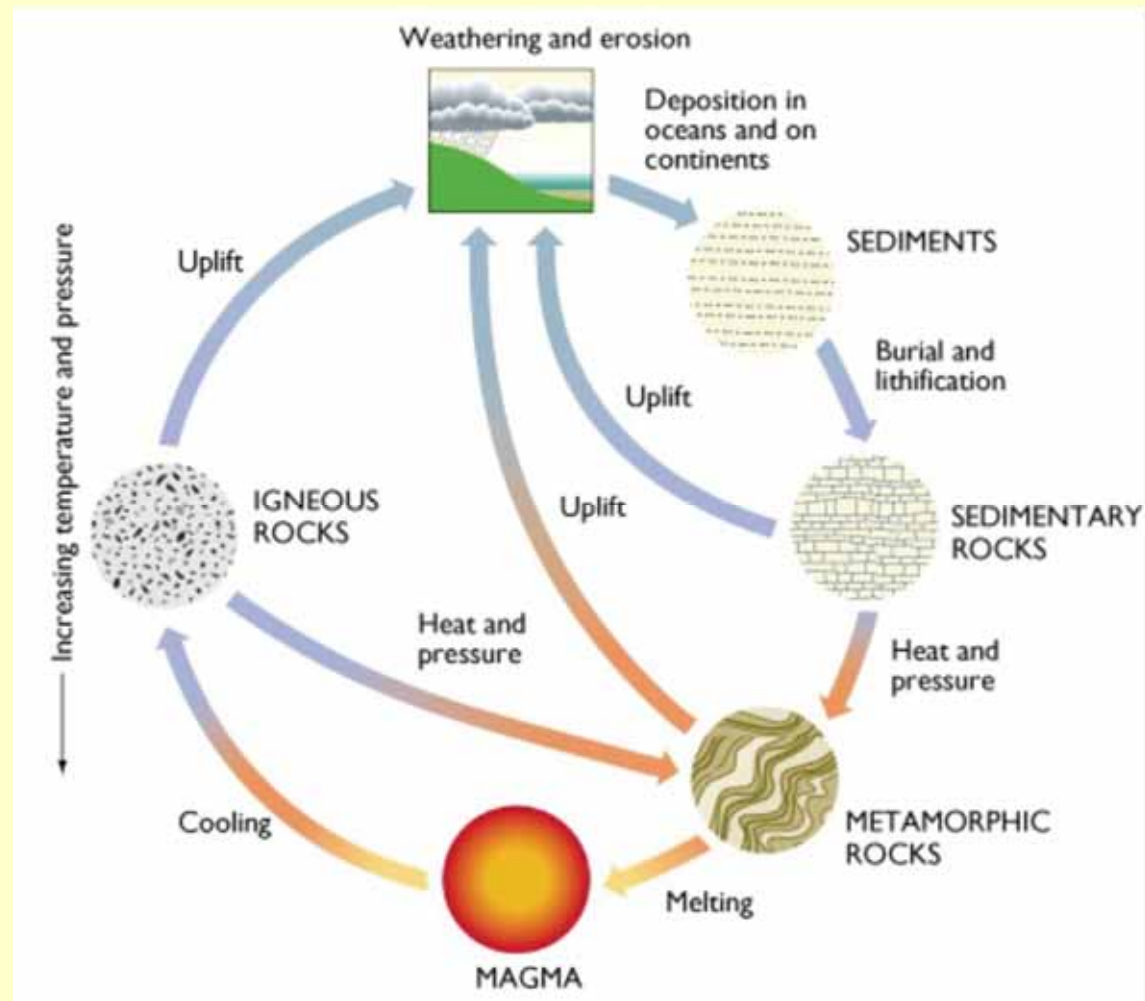
d es la densidad de la roca; elementos en porcentaje en peso

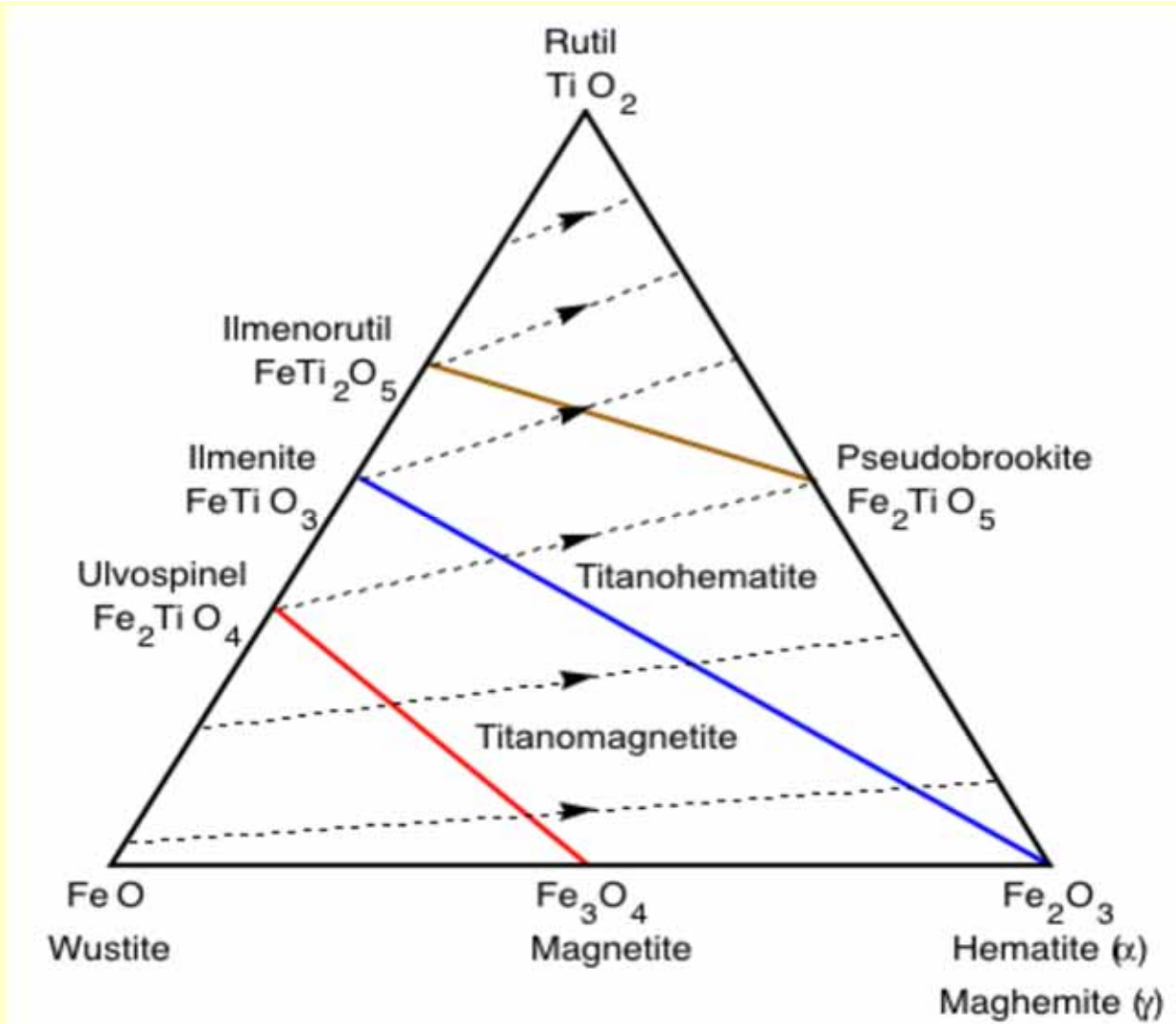
Rochette et al. 1992

Minerales ferromagnéticos (s.l.)

Oxides		Sulfides	oxyhydroxides
Fe/Ti-oxide	Fe/Mn Oxides	Fe-sulfides	Fe-oxyhydroxides
(titano)-magnetite (titano)-maghemite (titano)-hematite	Jacobsite, Magnesioferrite	Pyrrhotite Greigite Troilite	Goethite Lepidocrocite Feroxyhyte
abundant in all types of recorders	sediments	sediments volcanic	soils sediments baked clay

Los minerales magnéticos siguen el ciclo de las rocas

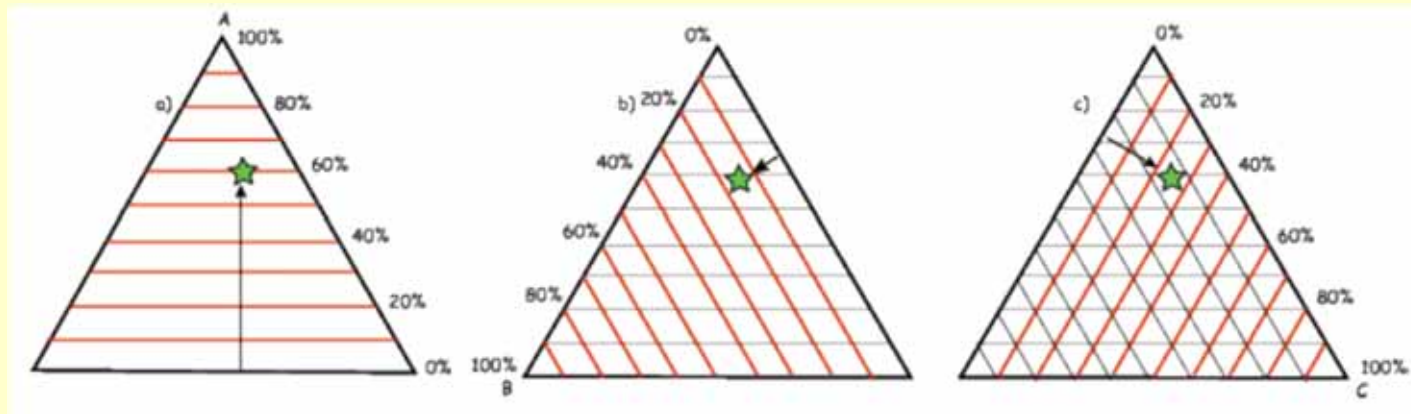
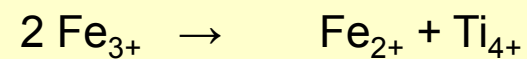




A lo largo de las líneas de oxidación, $\text{Fe}/(\text{Fe}+\text{Ti})$ se mantiene constante

Solución sólida: es una estructura cristalina homogénea en la cual uno o más tipos de átomos o moléculas puede sustituir parcialmente a los átomos y moléculas originales, sin cambiar la estructura.

Ej. en la solución sólida ulvoespinelo-magnetita, se produce la sustitución



Zonas de solución sólida completa a alta T, versus zonas de inmiscibilidad a baja T

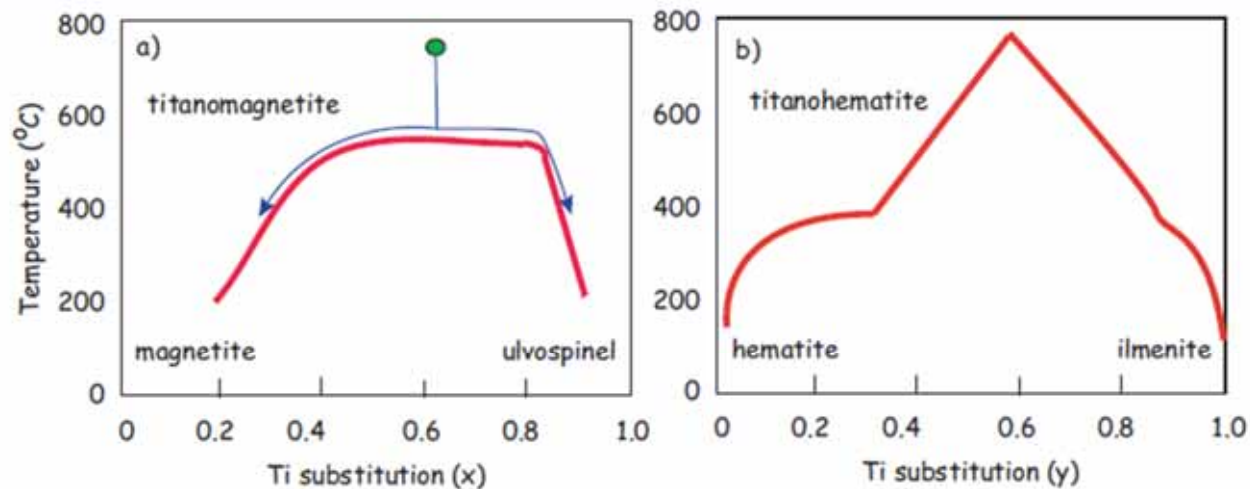


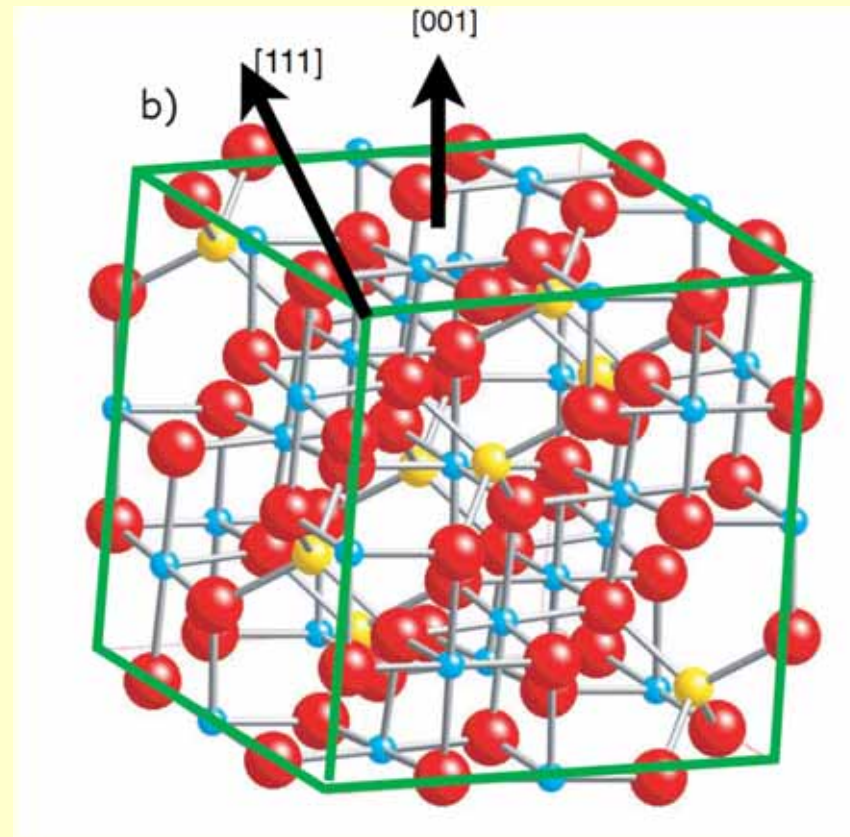
Figure 6.1: Phase diagrams for FeTi oxides. The composition is indicated by x or y . There is complete solid solution above the solid lines. Exsolution begins as the temperature cools below the solid curves. a) Titanomagnetite series. [Redrawn from Nagata, 1961.] b) Titanohematite series. [Redrawn from Robinson et al. 2004.]

Magnetita Fe_3O_4

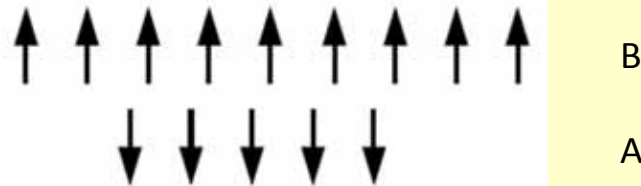
En amarillo sitios A (coordinación tetraédrica). En celeste sitios B (coordinación octaédrica).

La coordinación octaédrica es en la dirección de las caras del cubo.

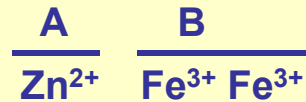
La coordinación tetraédrica es en la dirección de las diagonales del cubo (eje fácil de magnetización).



El Fe^{2+} tiene preferencia por los sitios «B». El Fe^{3+} se reparte en sitios A y B.

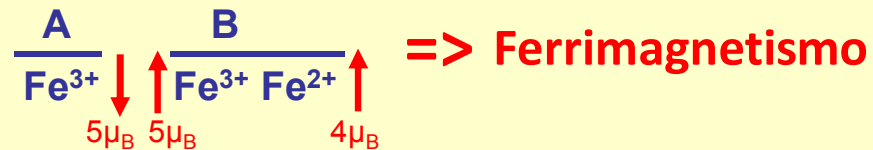


Espinelo normal (ZnFe_2O_4)



En un espinelo normal, el ion metálico divalente ocupa los sitios A, y los dos iones trivalentes, los sitios B

Espinelo inverso (Fe_3O_4)

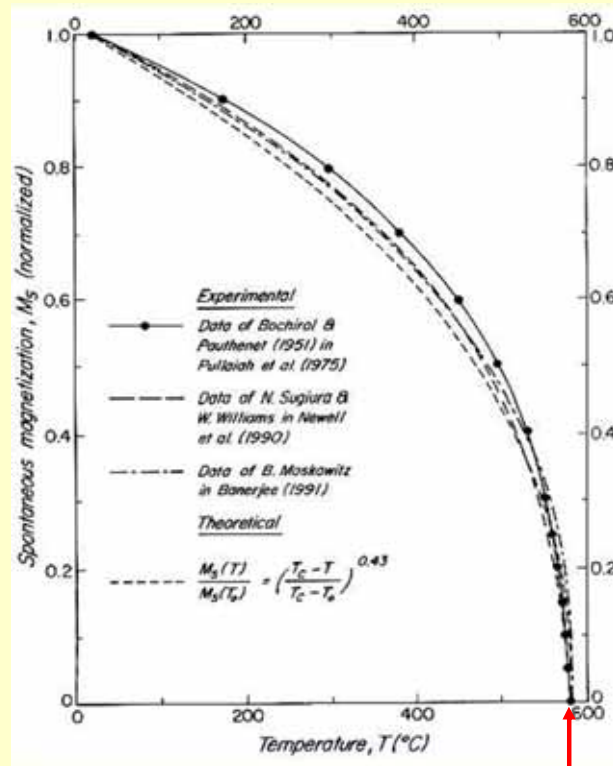


En un espinelo inverso, el ion divalente y uno de los trivalentes intercambian posiciones

La energía de permuta depende de la «distancia» del enlace y del ángulo. El ángulo de enlace más favorable (que genera permuta más fuerte) es entre los sitios A y B.

Magnetita (Fe_3O_4)

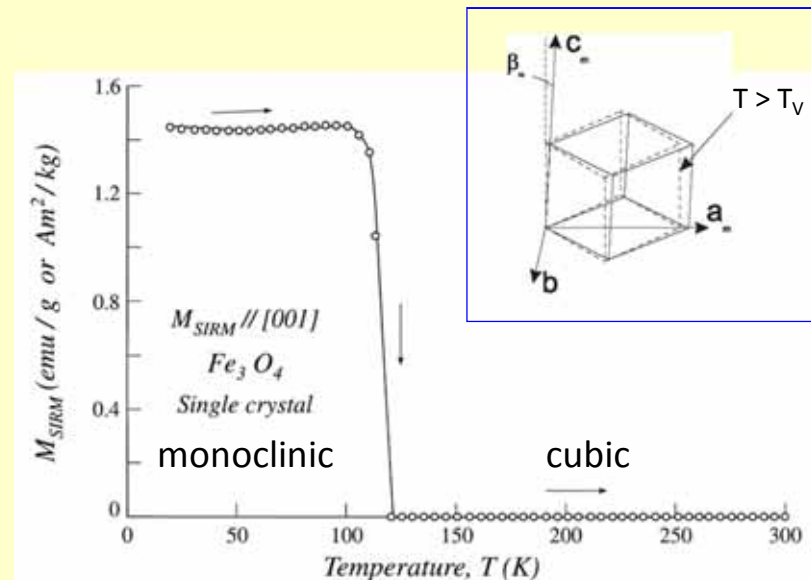
$M_s \approx 480 \text{ kA/m @ 300 K}$

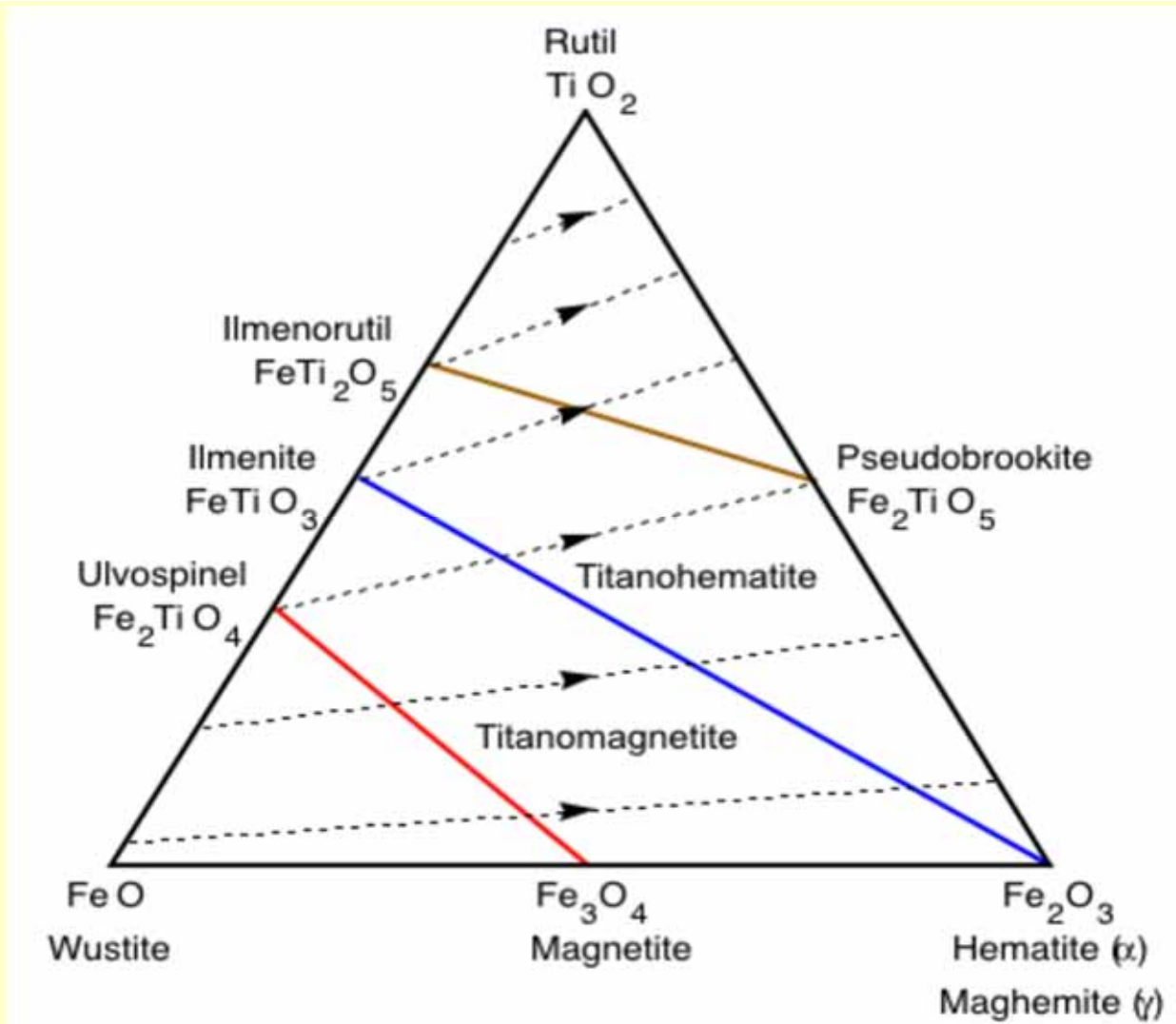


$T_C = 580^{\circ}C$

Fuerza coercitiva $\approx 10 \text{ mT}$

Transición de Verwey ($a \approx 120 \text{ K}$):
simetría cúbica a monoclinica

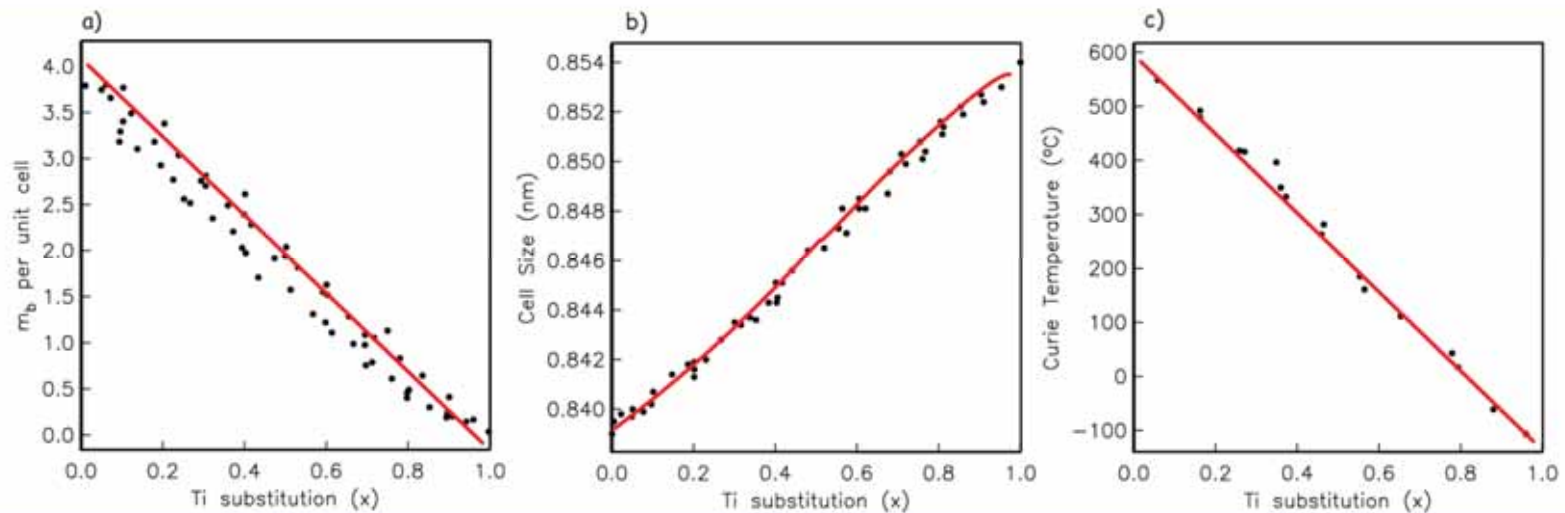




A lo largo de las líneas de oxidación, $\text{Fe}/(\text{Fe}+\text{Ti})$ se mantiene constante

Titanomagnetita

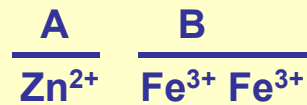
$\text{Fe}_{3-x}\text{Ti}_x\text{O}_4$, $0 < x < 1$



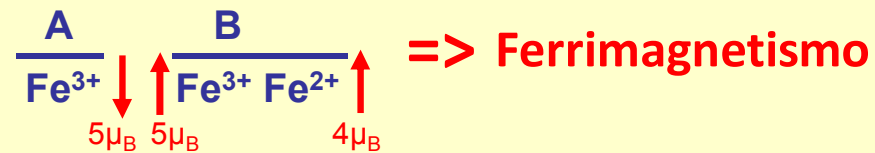
La magnetita pura tiene una magnetización neta de 4 magnetones Bohr por fórmula unidad.

El reemplazo de Fe^{3+} por Ti^{4+} disminuye la magnetización y aumenta el tamaño de la celda unidad.

Espinelo normal (ZnFe_2O_4)



Espinelo inverso (Fe_3O_4)



Espinelo inverso (Fe_2TiO_4)

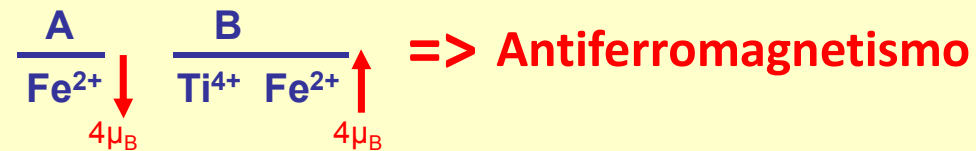
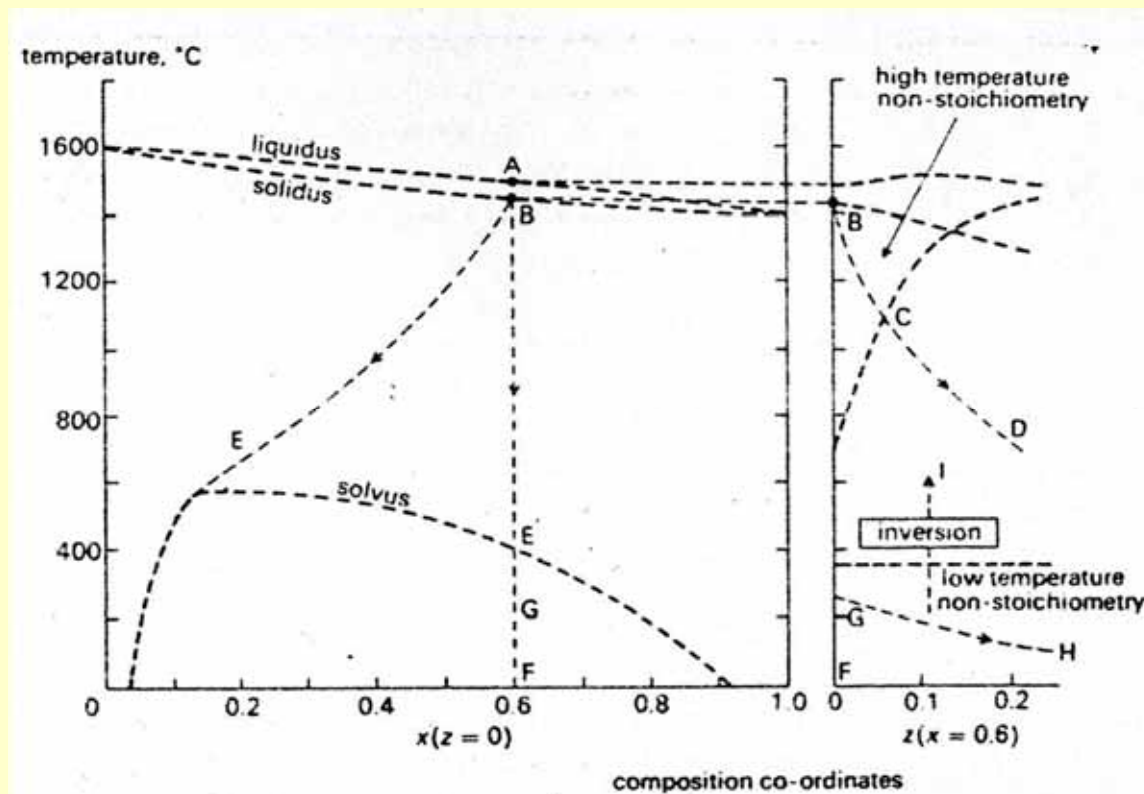


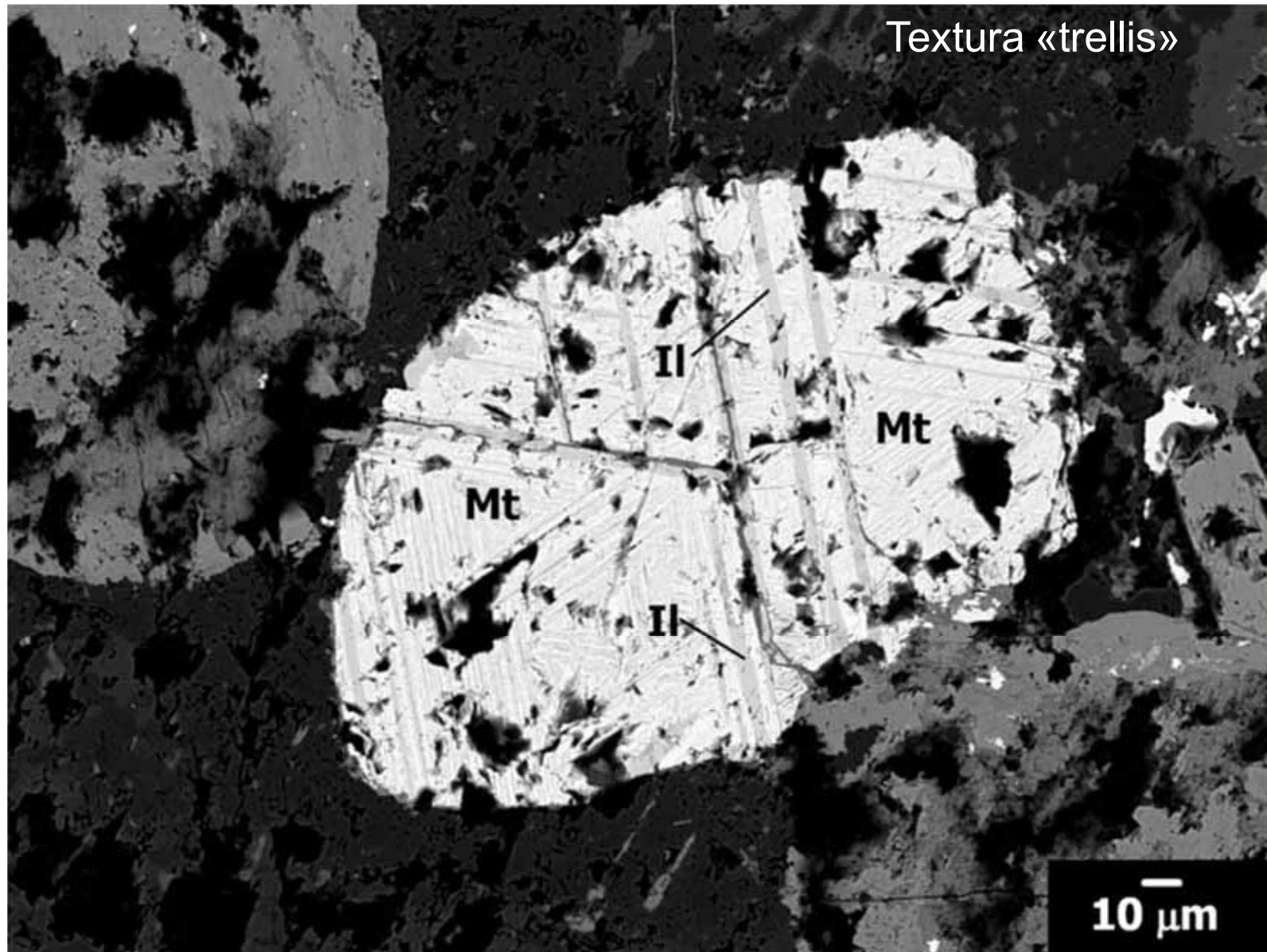
Diagrama de fases para la solución sólida titanomagnetita (O'Reilly 1984)

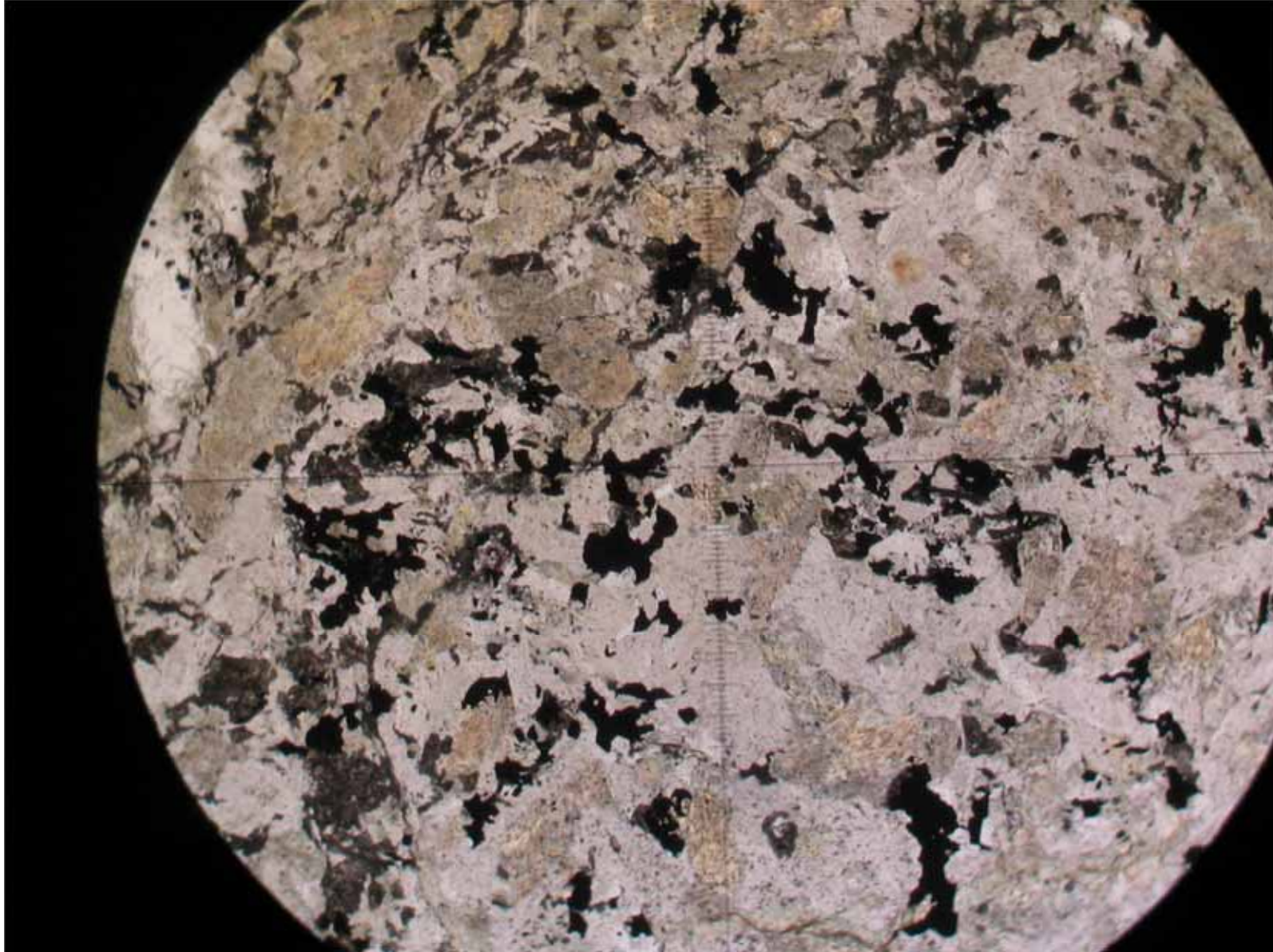
Composición típica de la titanomagnetita de un basalto. A es el liquidus que coexiste con el primer sólido cristalizado desde esa composición. Hasta llegar a B se forman cristales zonados con núcleo más rico en Fe, aunque la zonación desaparece por difusión (excepto enfriamiento repentino).

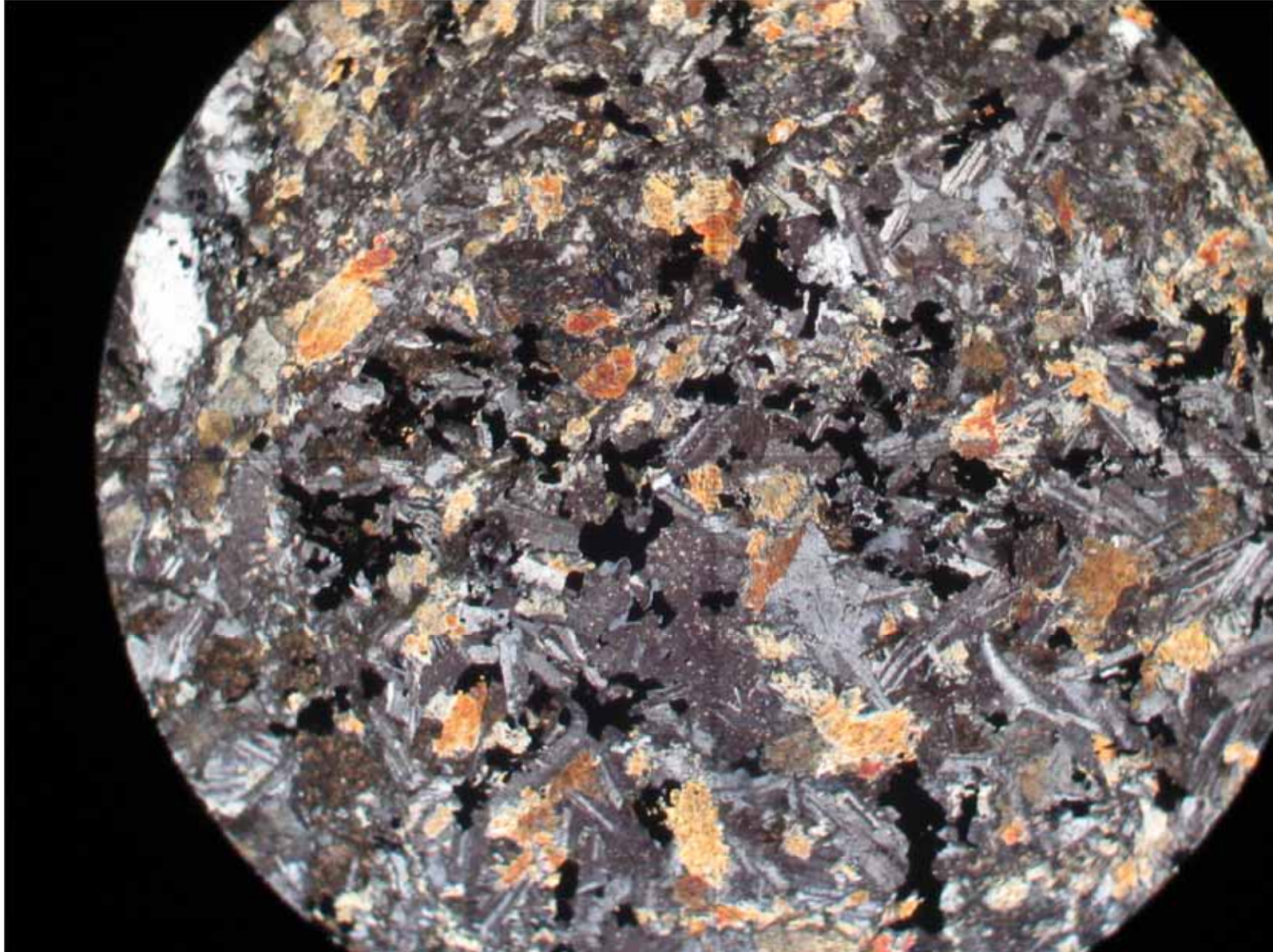


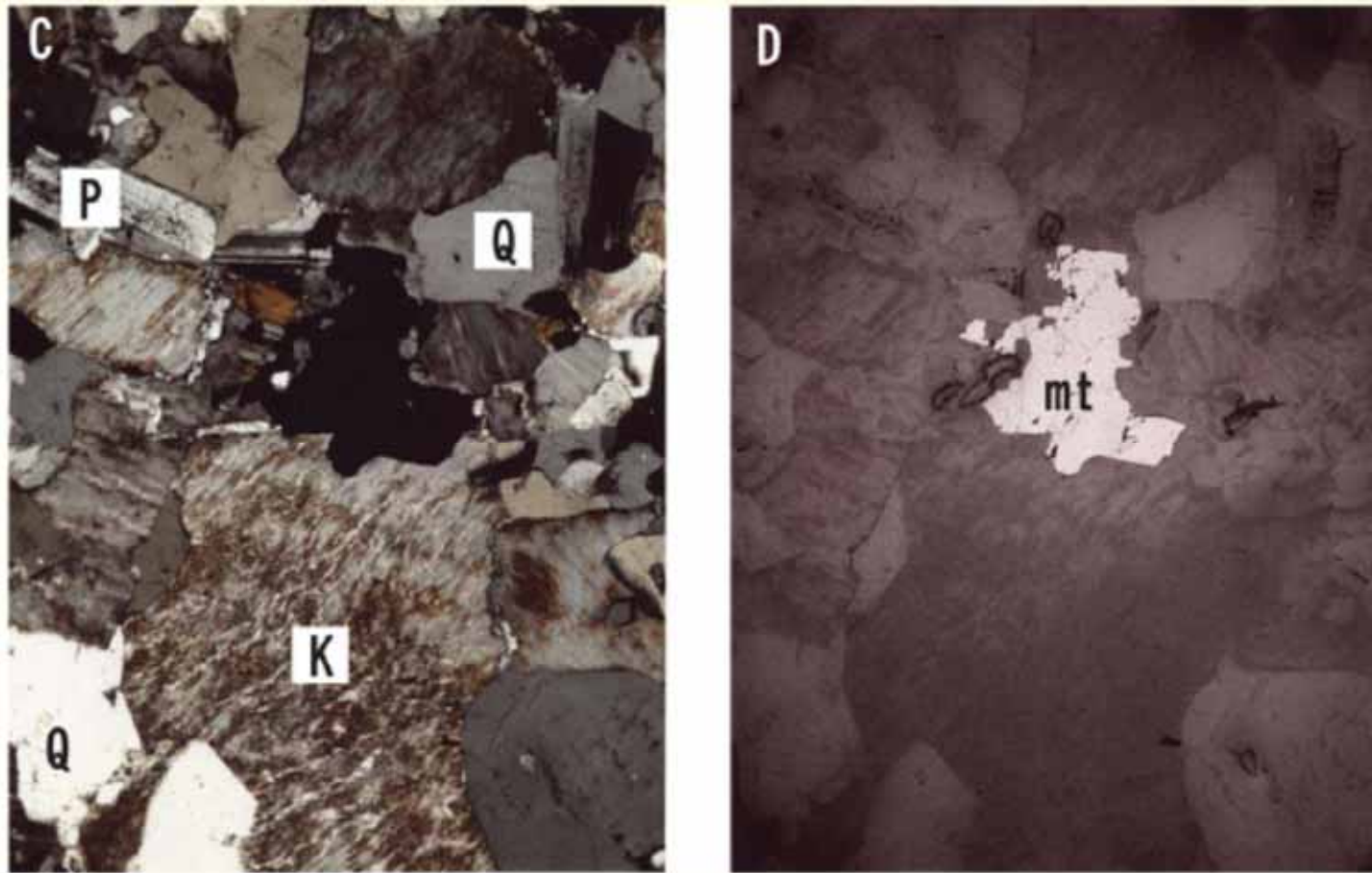
Enfriamiento lento produce oxiexsolución (ambiente oxidante por disociación del vapor).

A bajas temperaturas, maghemitización.

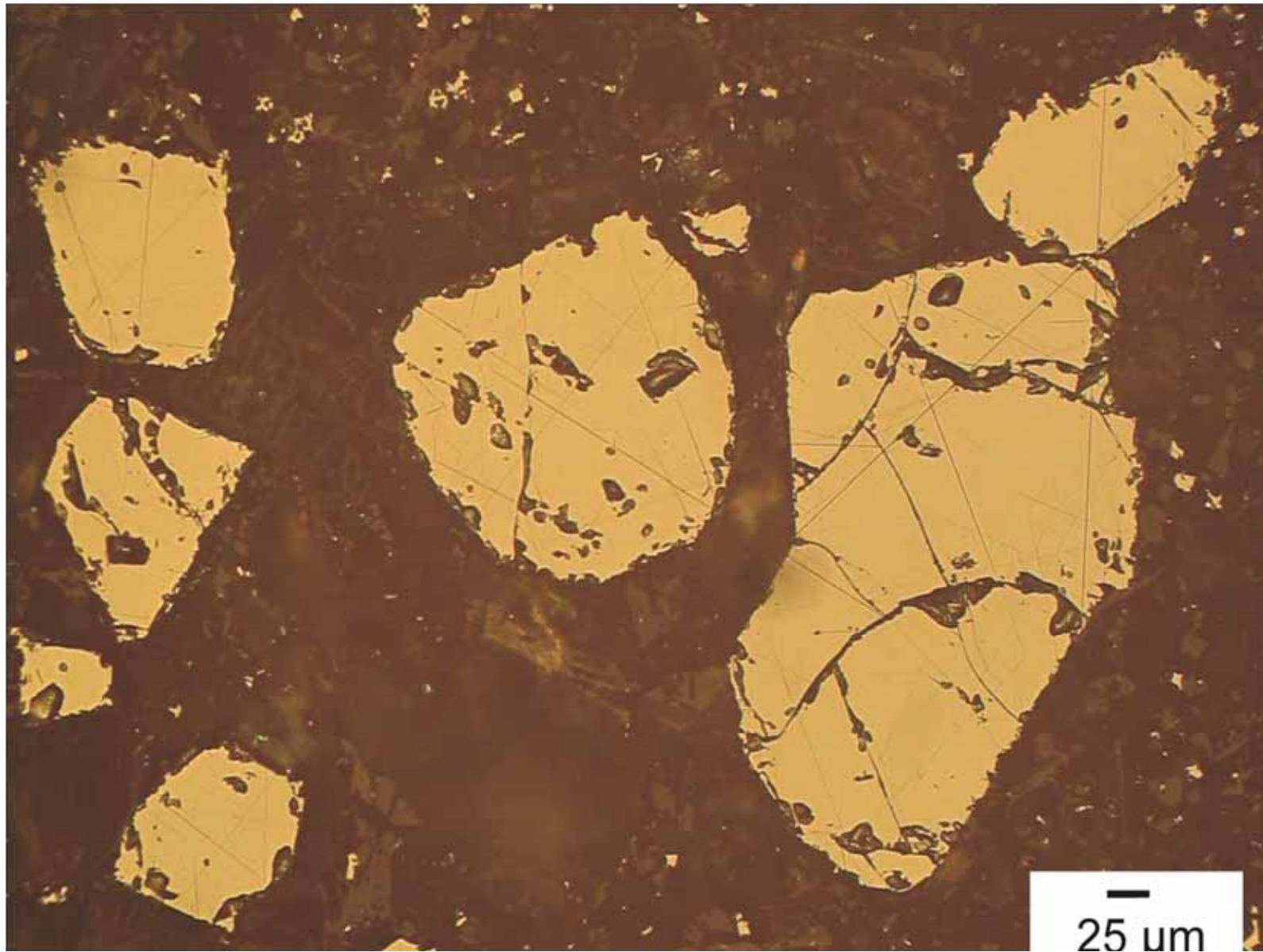


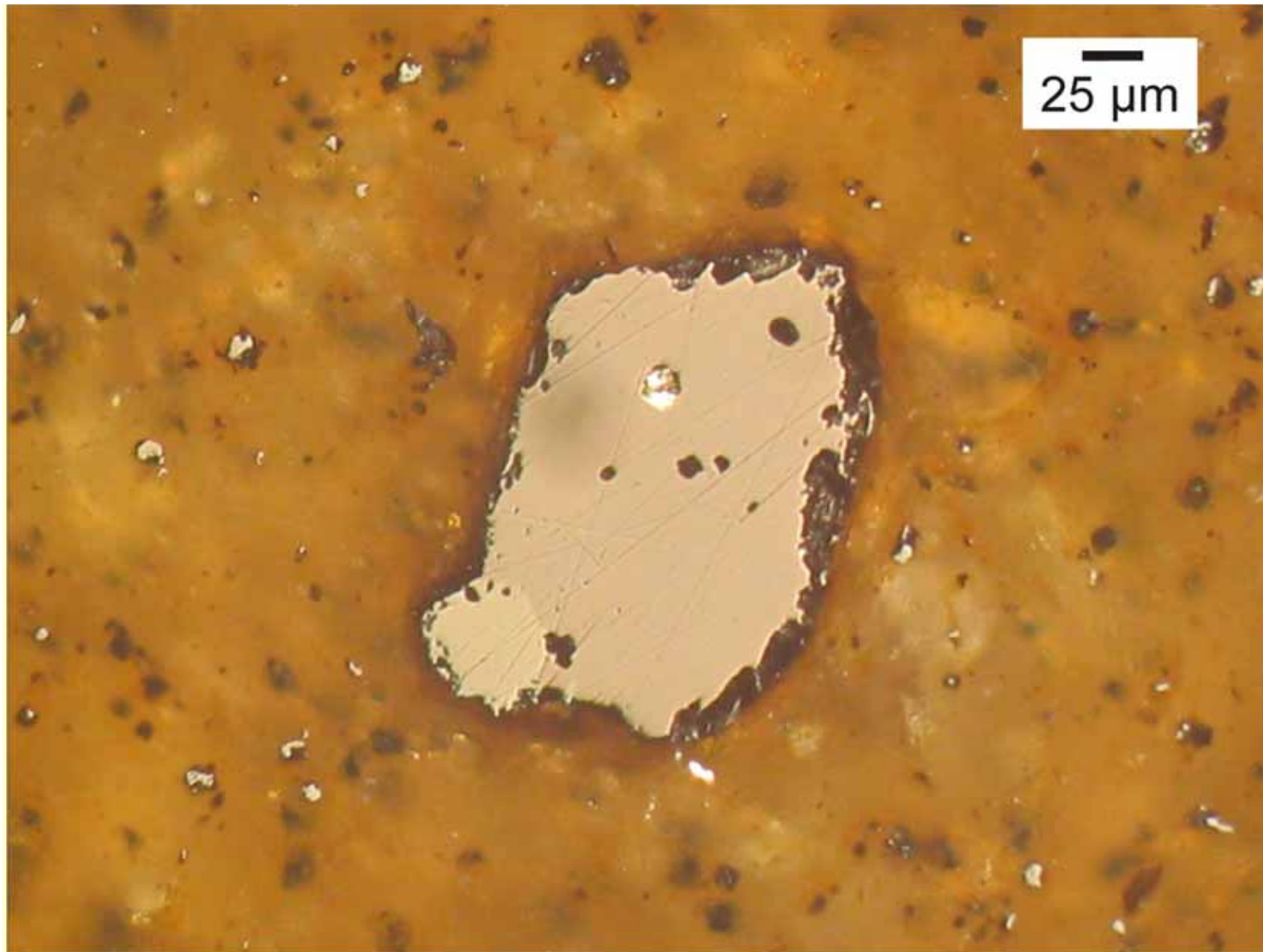


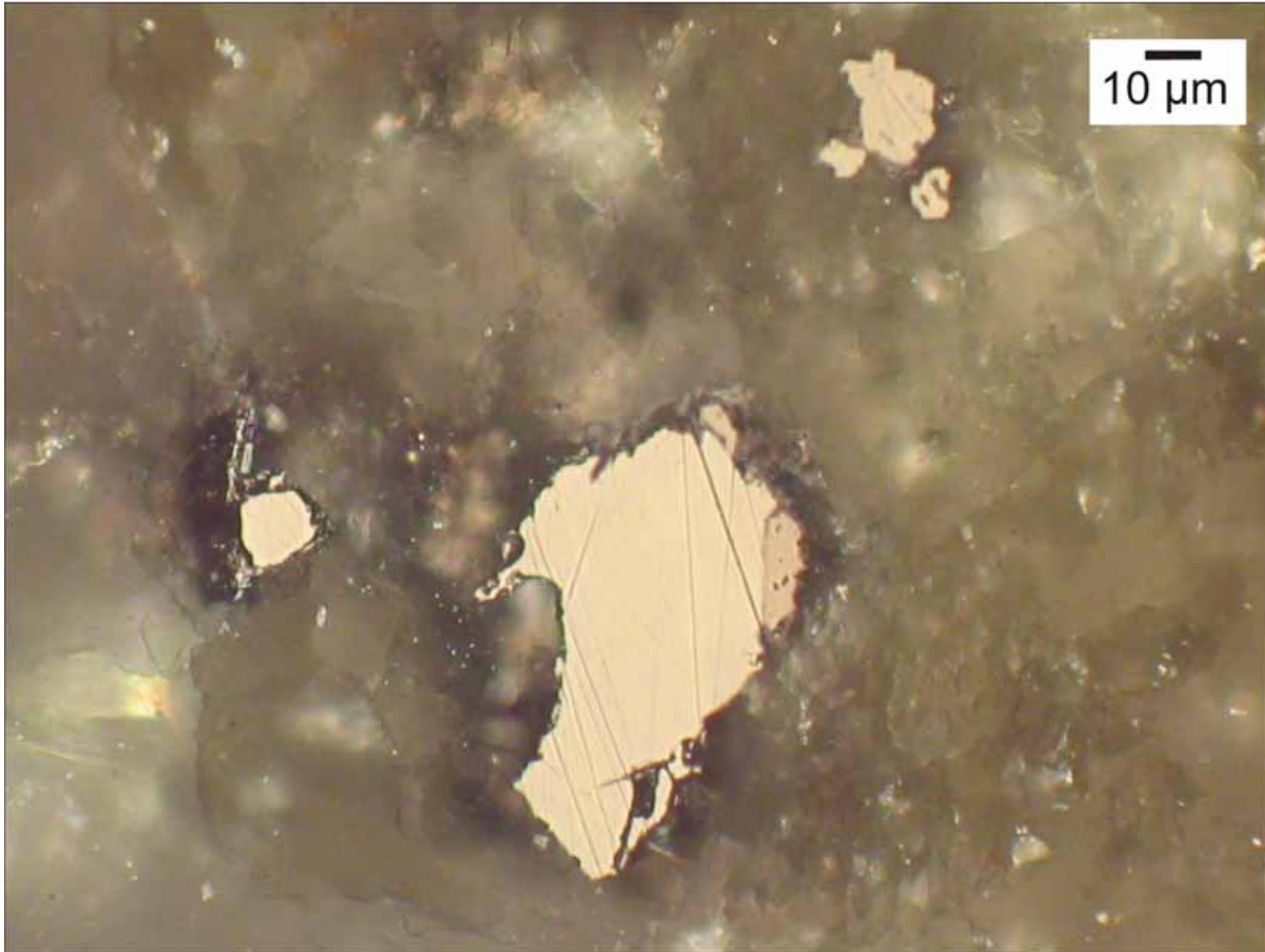


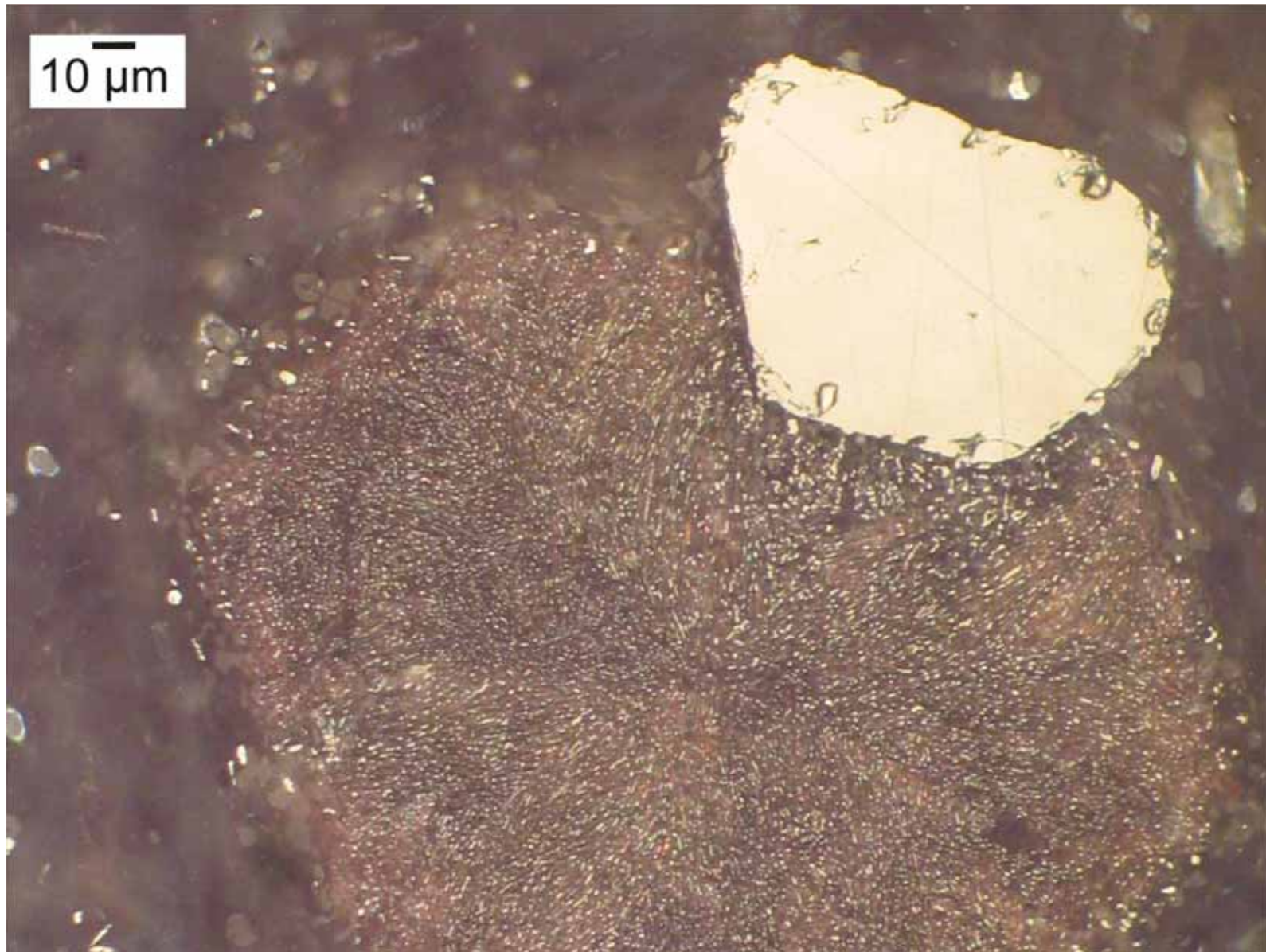


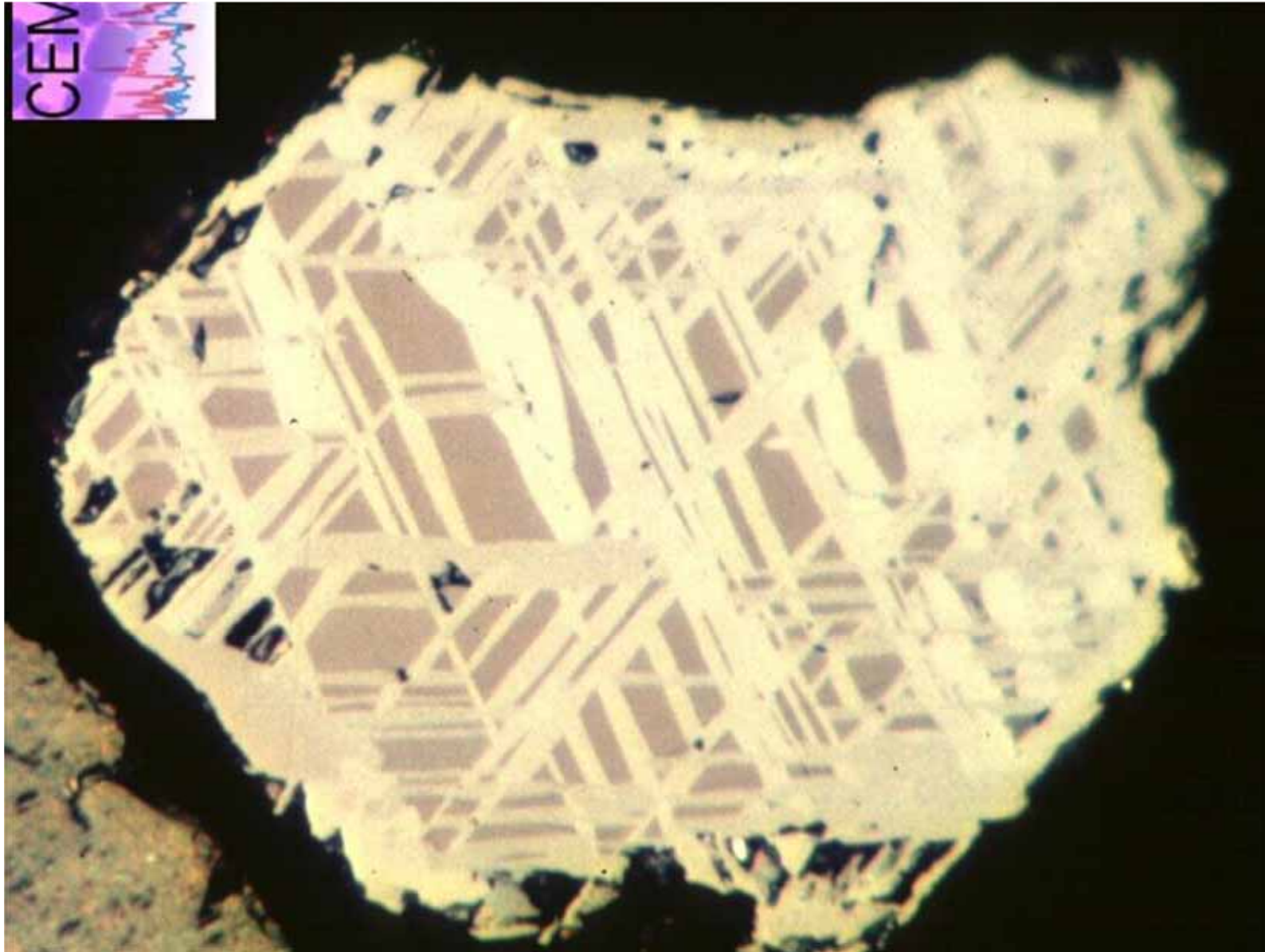
Ishihara et al. 2005











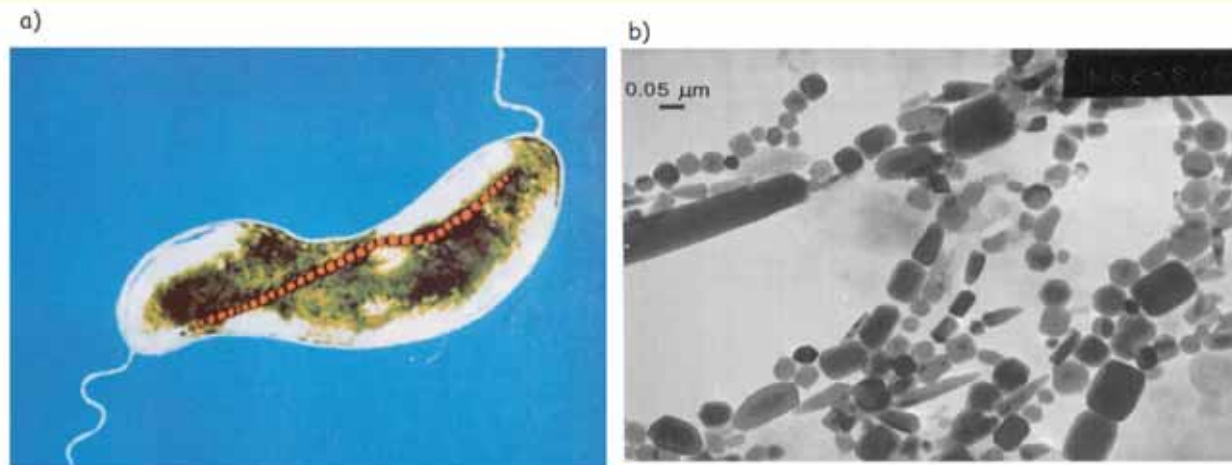
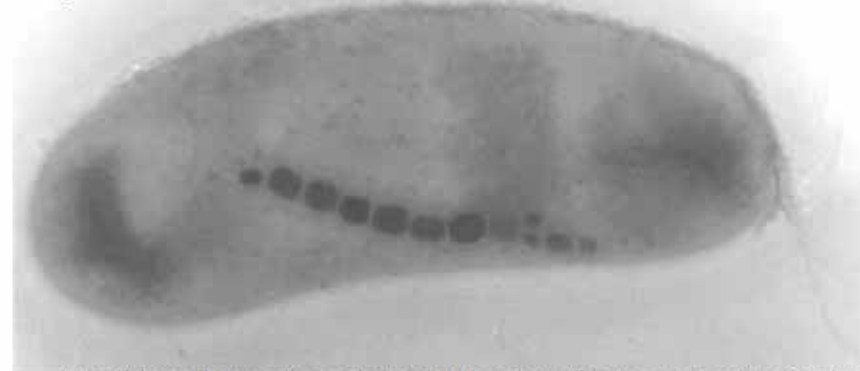


Figure 6.16: Photomicrographs of bacterial magnetites produced by magnetotactic bacteria. a) Intact magnetosome in living bacterium. [From Fassbinder et al., 1990.] b) Chains recovered from ODP Site 1006D in the Bahamas [From Hounslow in Maher and Thompson, 1999.]

magnetotactic bacterium

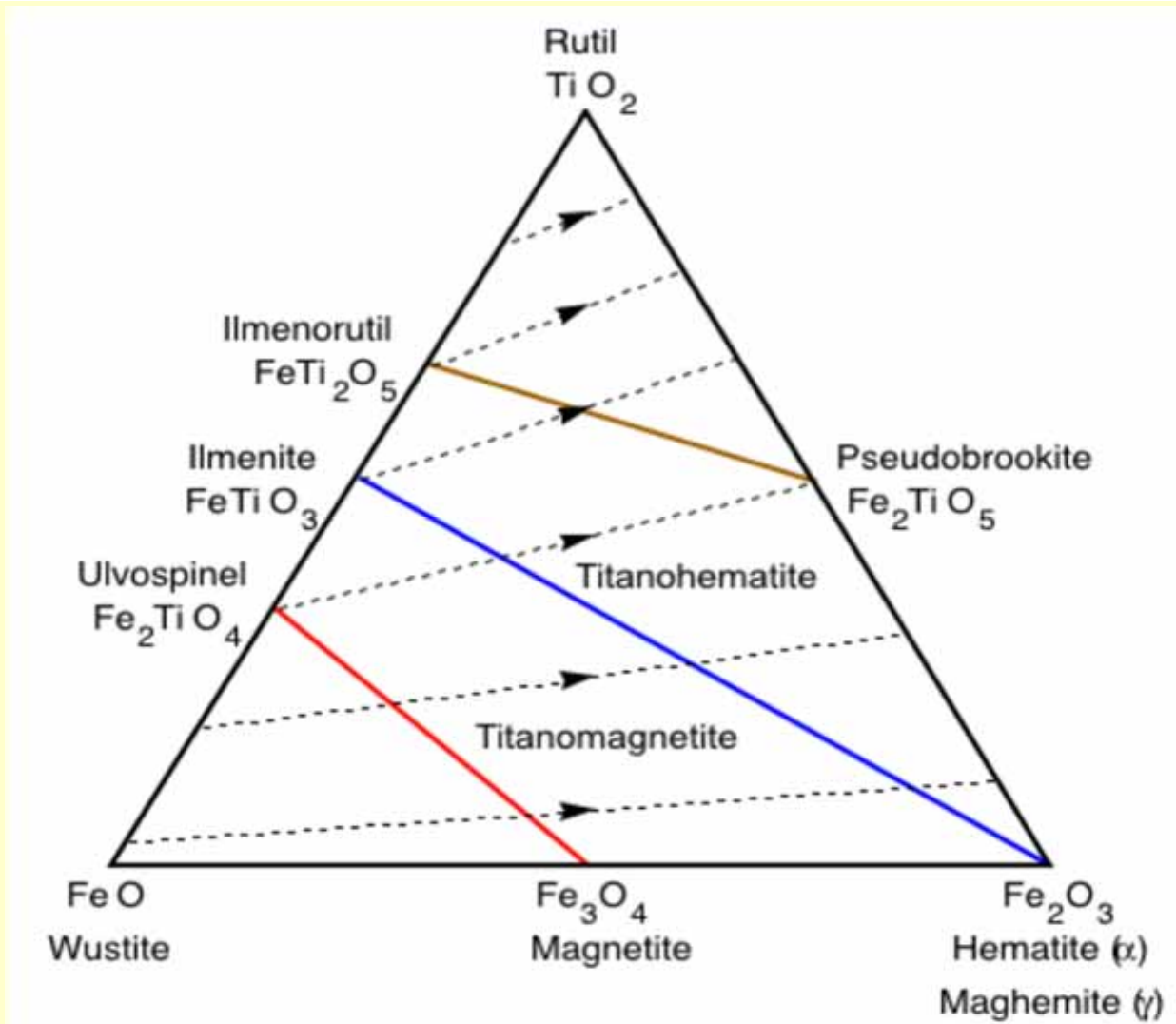


<http://skywalker.cochise.edu/wellerr/students/biomagnetism/project.htm>

Occurencias de magnetita en la naturaleza

Puede estar presente en todos los tipos de roca (ígneas, sedimentaria, metamórfica)

- ◆ Producto de enfriamiento inicial del magma
- ◆ Producto de alteración, hidrotermal
- ◆ Detrítica en rocas sedimentarias
- ◆ Magnetita biogénica



A lo largo de las líneas de oxidación, $\text{Fe}/(\text{Fe}+\text{Ti})$ se mantiene constante

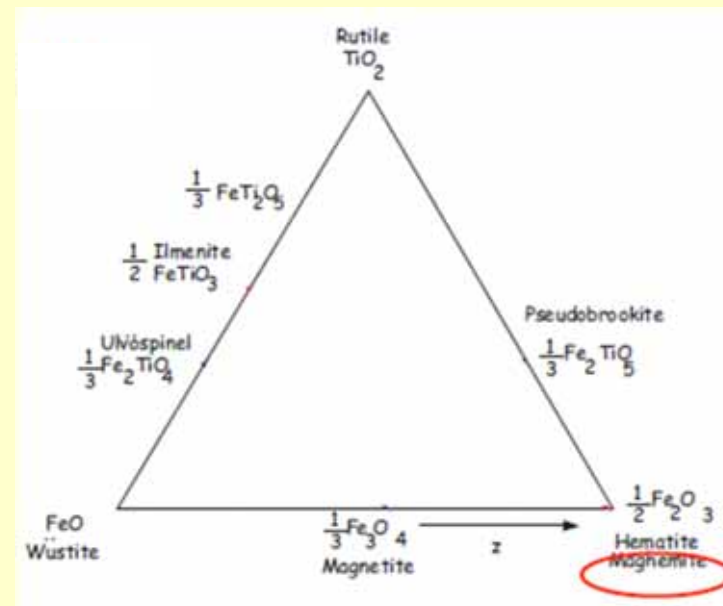
Maghemita ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$)

Conserva la estructura de la magnetita (espinelo inverso)
 En sitios octaédricos, hay un reemplazo de $3\text{Fe}^{2+} \rightarrow 2\text{Fe}^{3+}$
 Quedan sitios vacantes
 Se reduce el tamaño de la celda, y la densidad

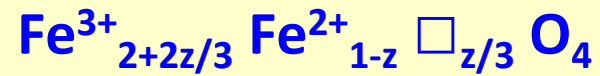
Es un mineral
 metaestable. Al calentar
 se transforma en
 hematita.

$$M_s \approx 380 \text{ kA/m @ } 300 \text{ K}$$

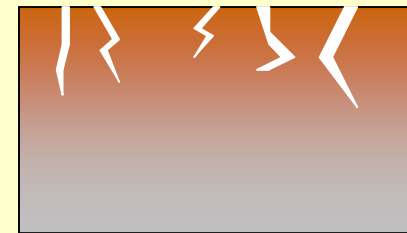
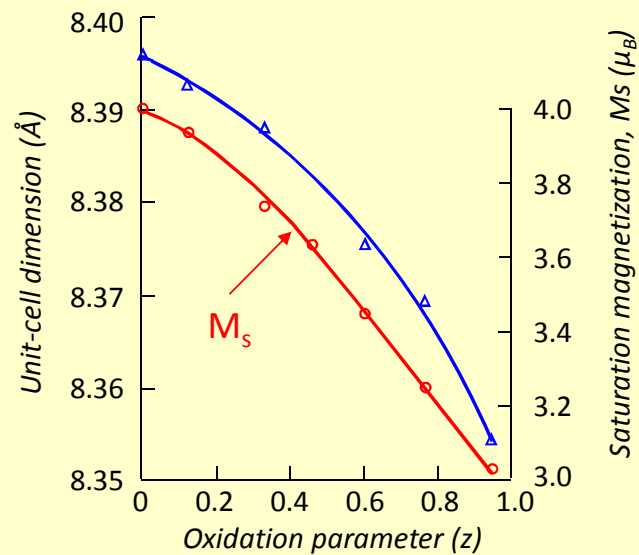
$$T_C = 645\text{-}675 \text{ }^\circ\text{C (estimado)}$$



Serie de oxidación magnetita-maghemita (magnetita deficiente en cationes)

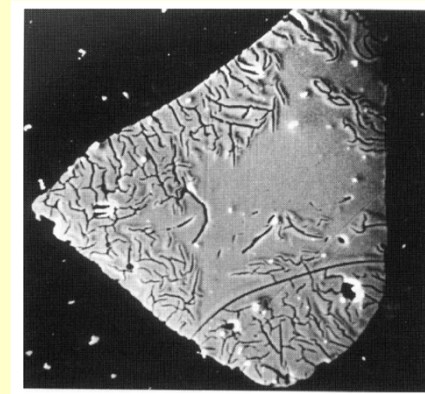


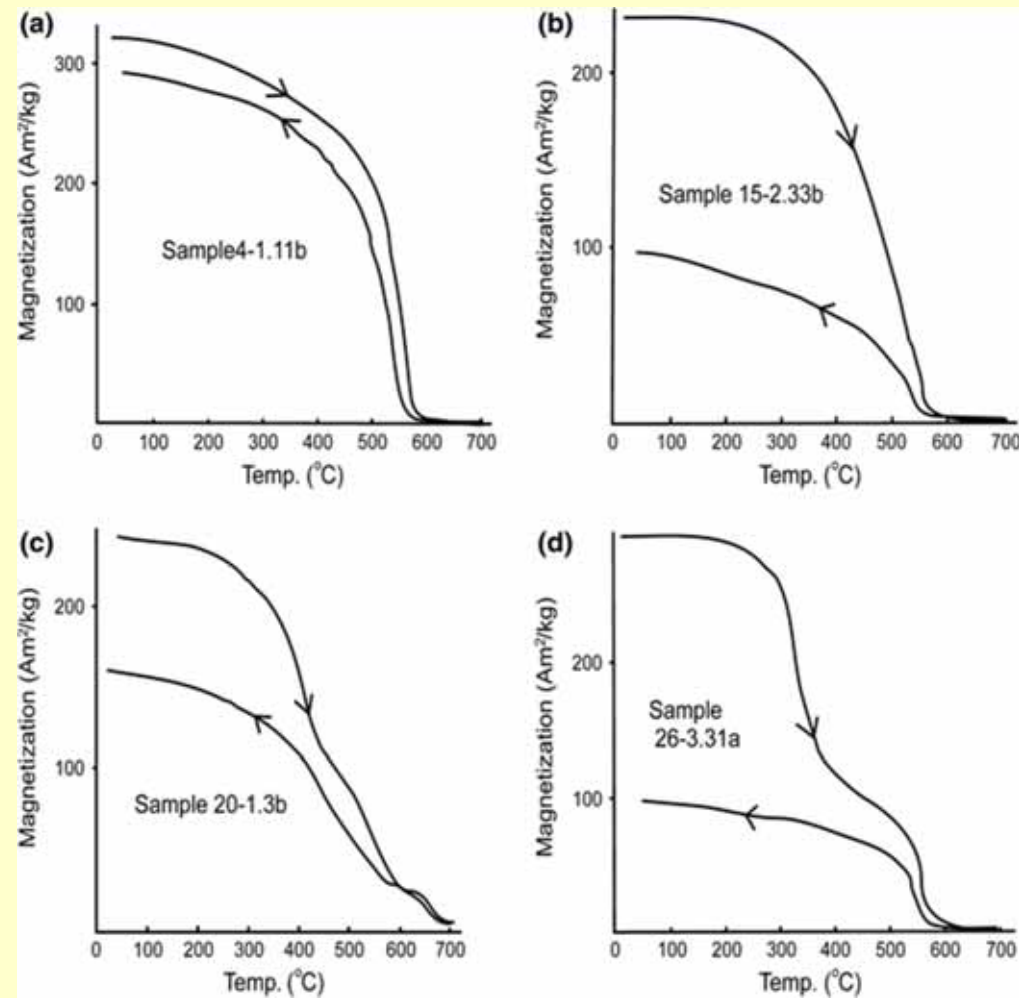
z – parámetro de oxidación



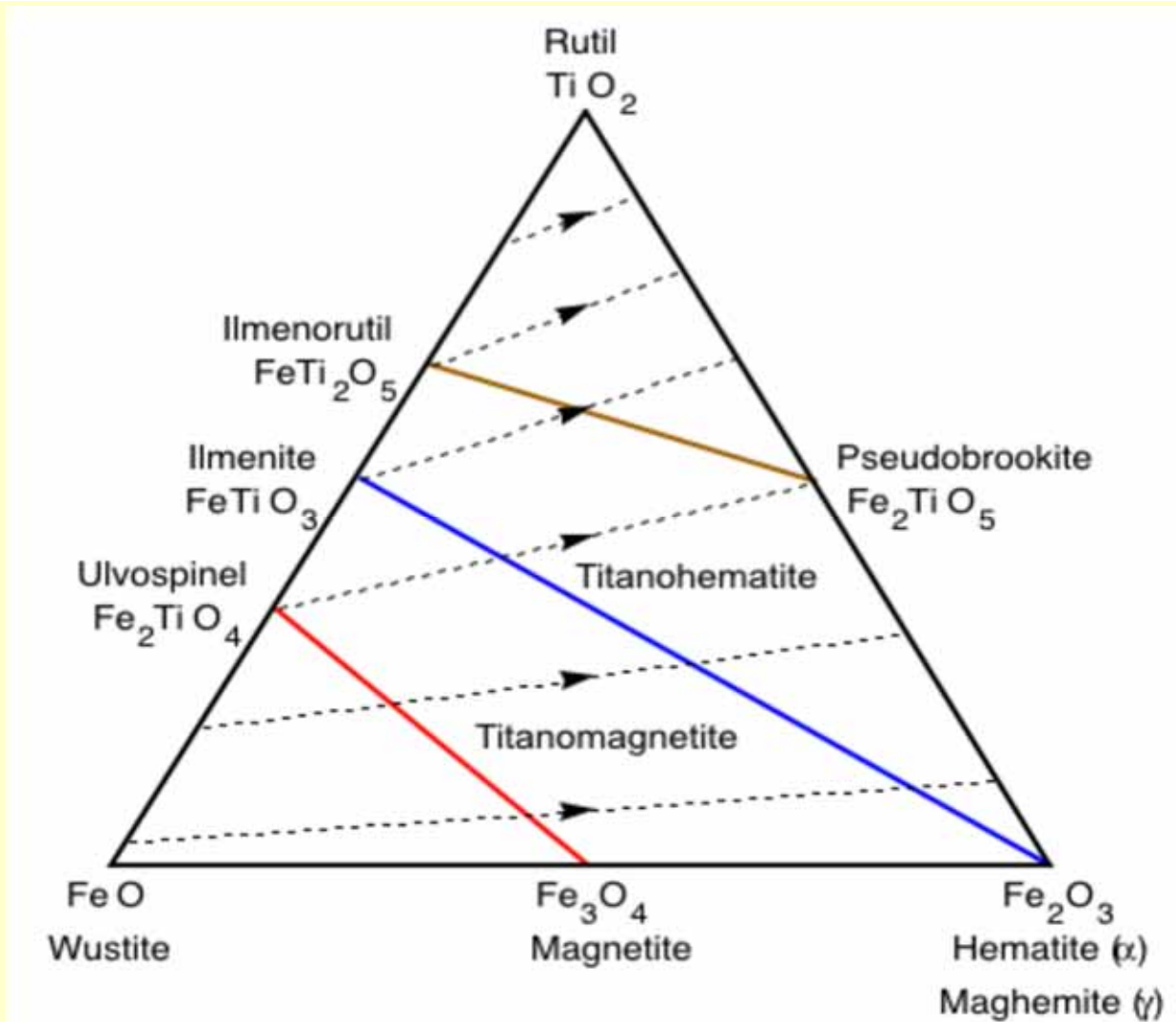
$z \neq 0$

$z = 0$





Al calentar se produce una pérdida irreversible de magnetización, por la transformación a hematita



A lo largo de las líneas de oxidación, $\text{Fe}/(\text{Fe}+\text{Ti})$ se mantiene constante

Titanomaghemitas

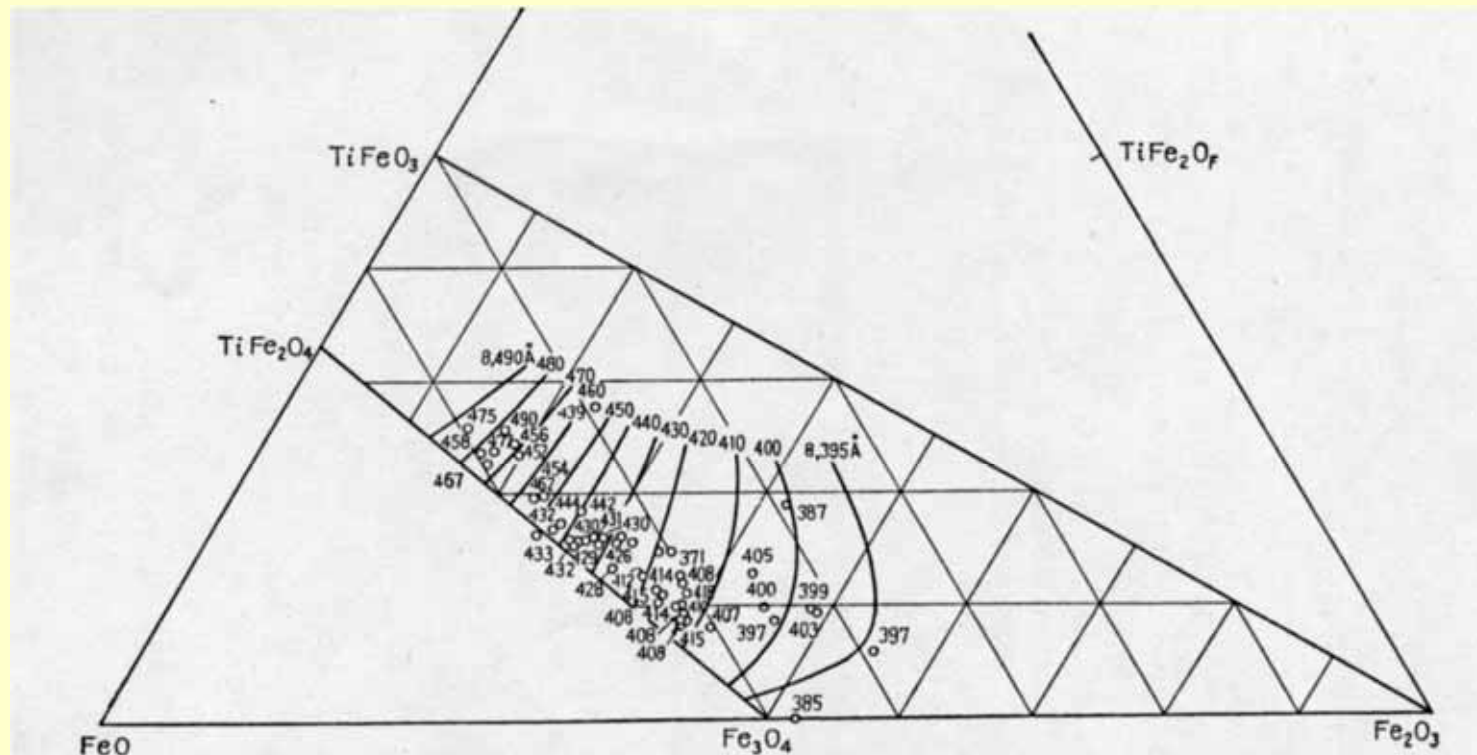
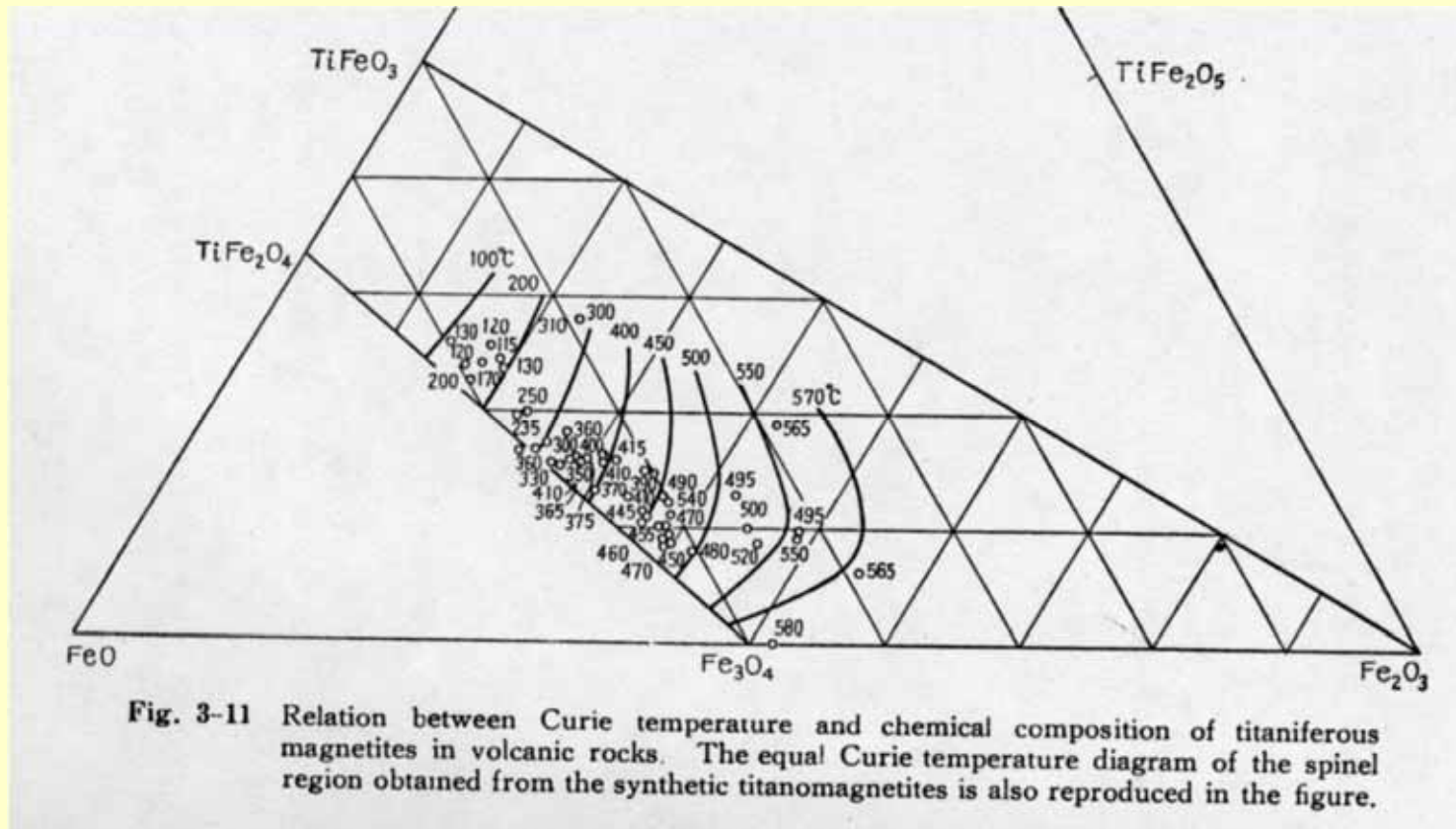


Fig. 3-10 Relation between lattice parameter and chemical composition of titaniferous magnetites in volcanic rocks. The equal lattice parameter diagram of the spinel region obtained from the synthetic titanomagnetites is also reproduced in the figure.

Nagata, 1961

Titanomaghemitas



Nagata, 1961

Titanomaghemitas

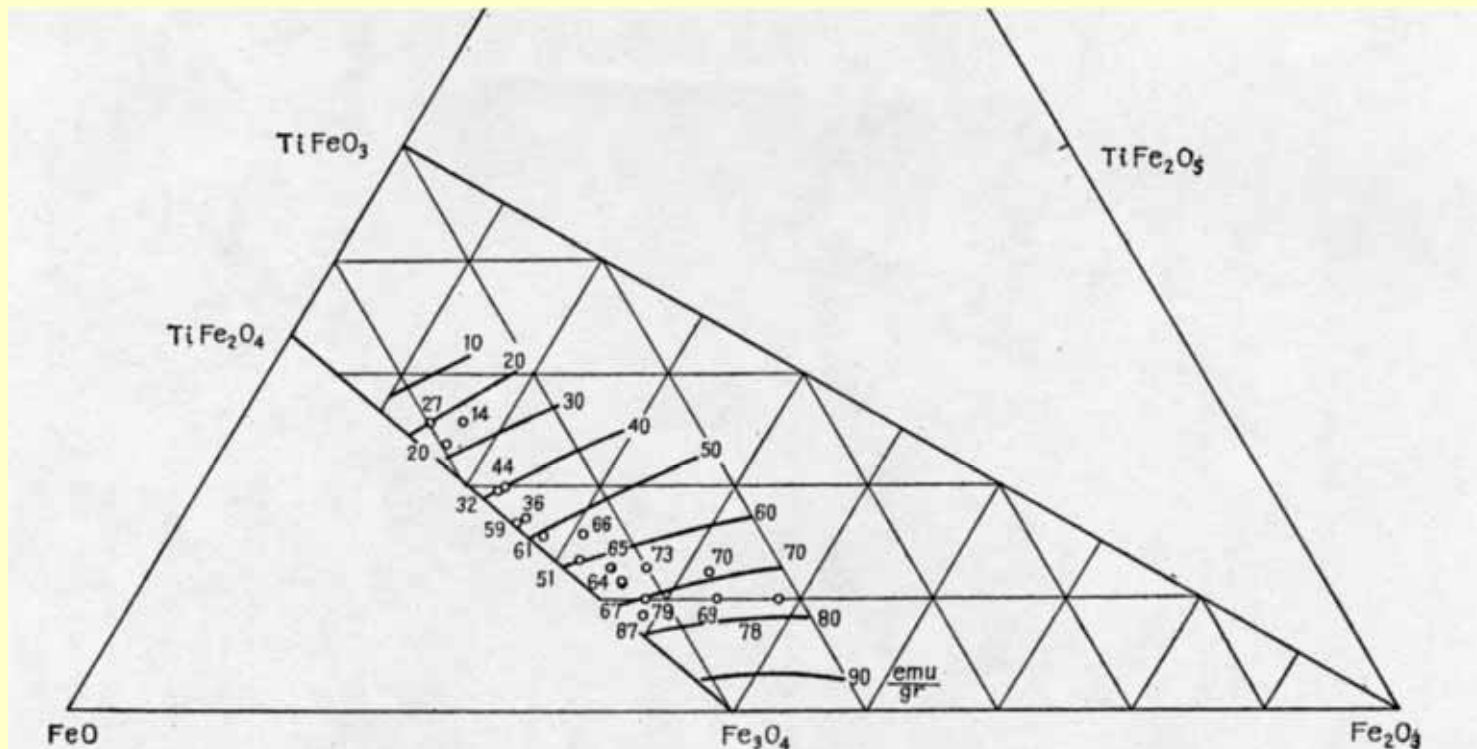
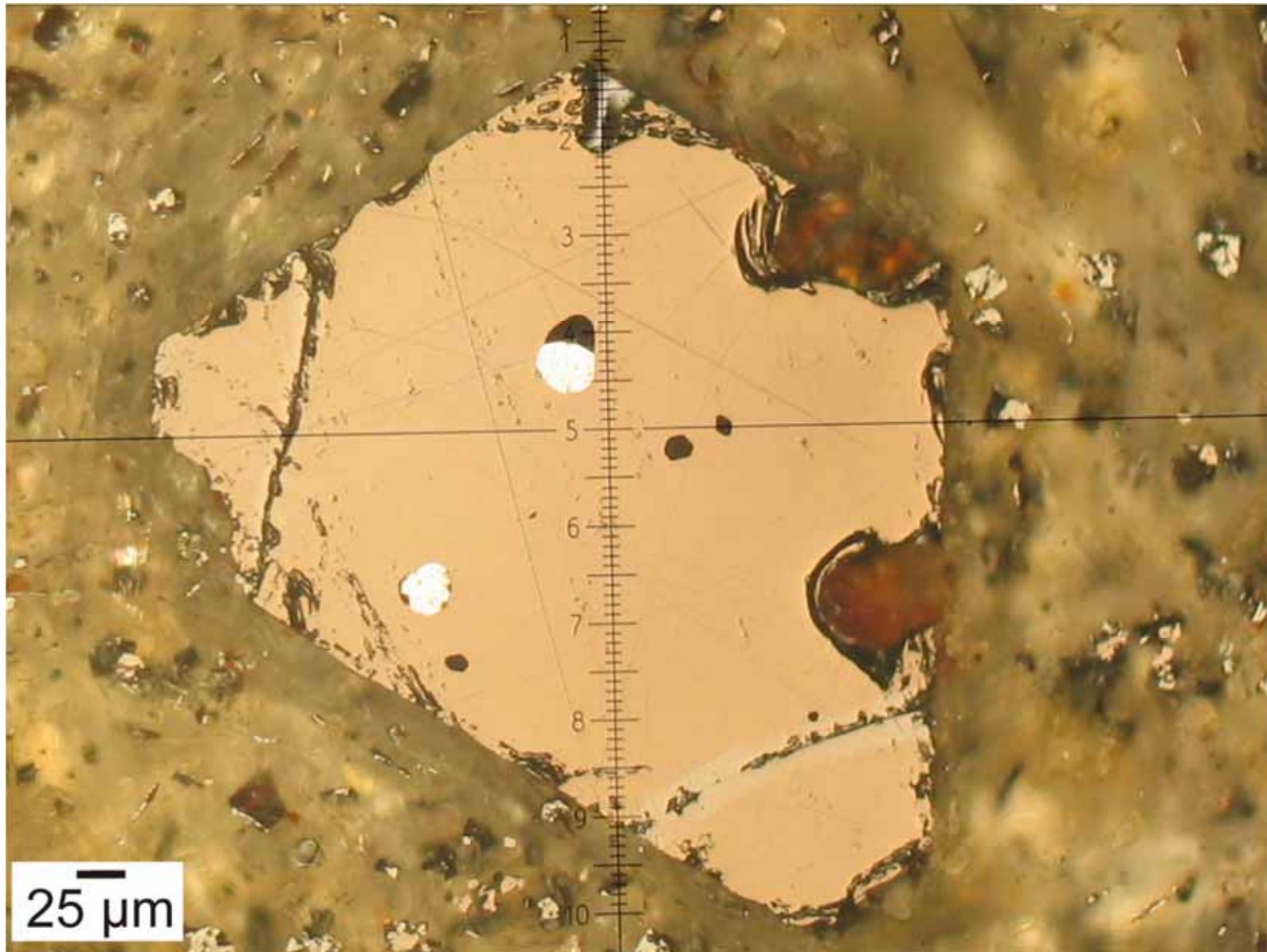
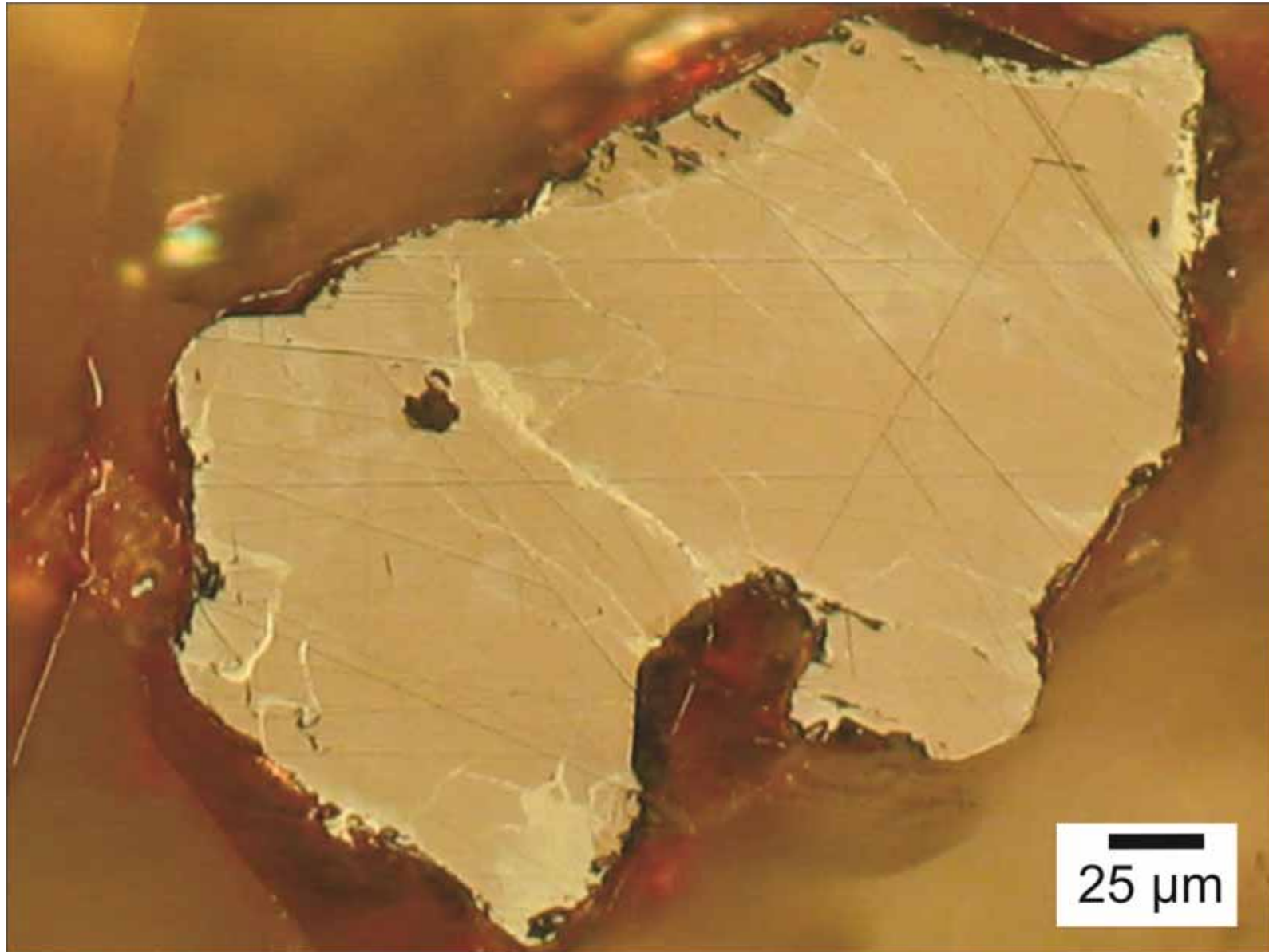
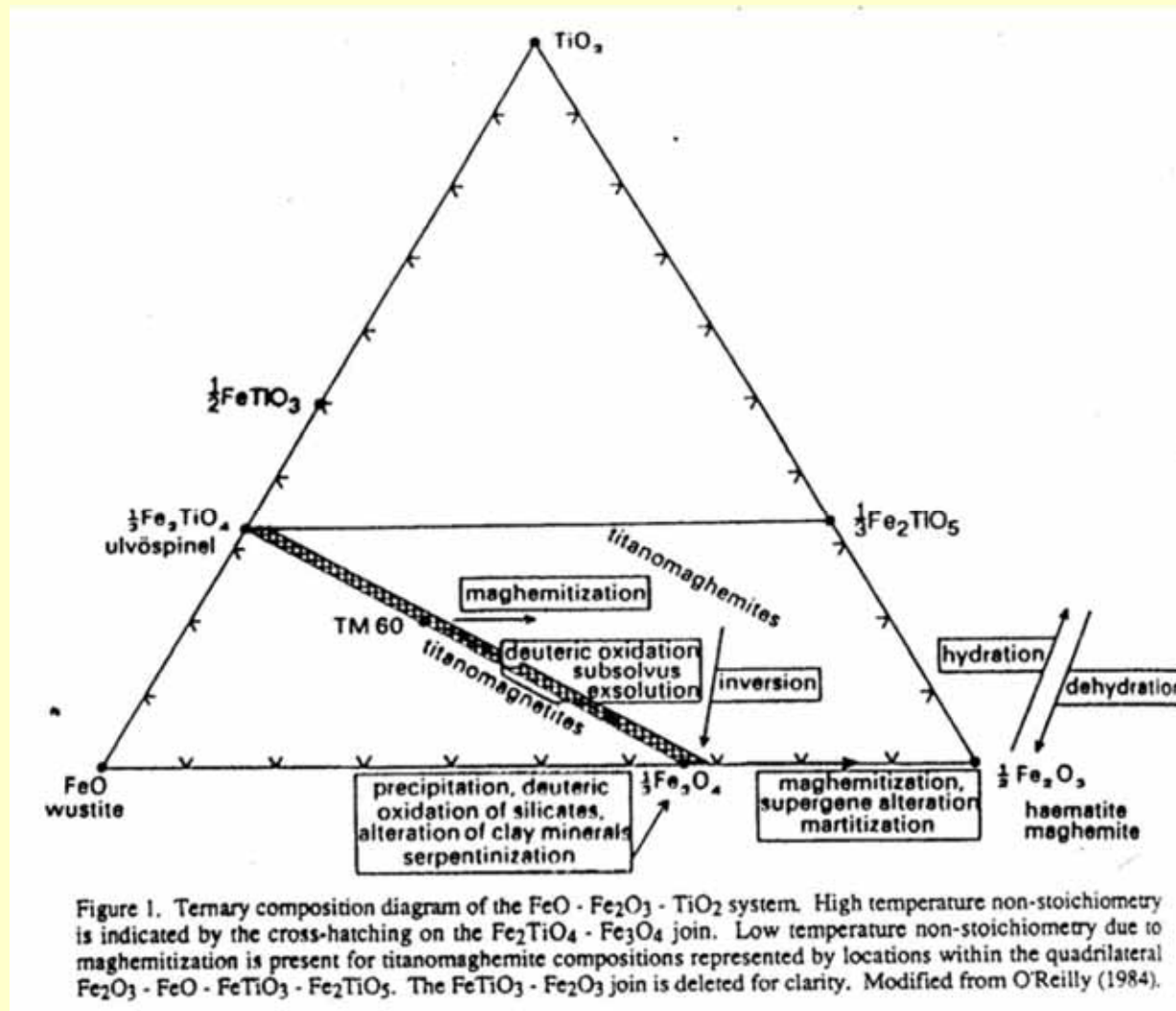


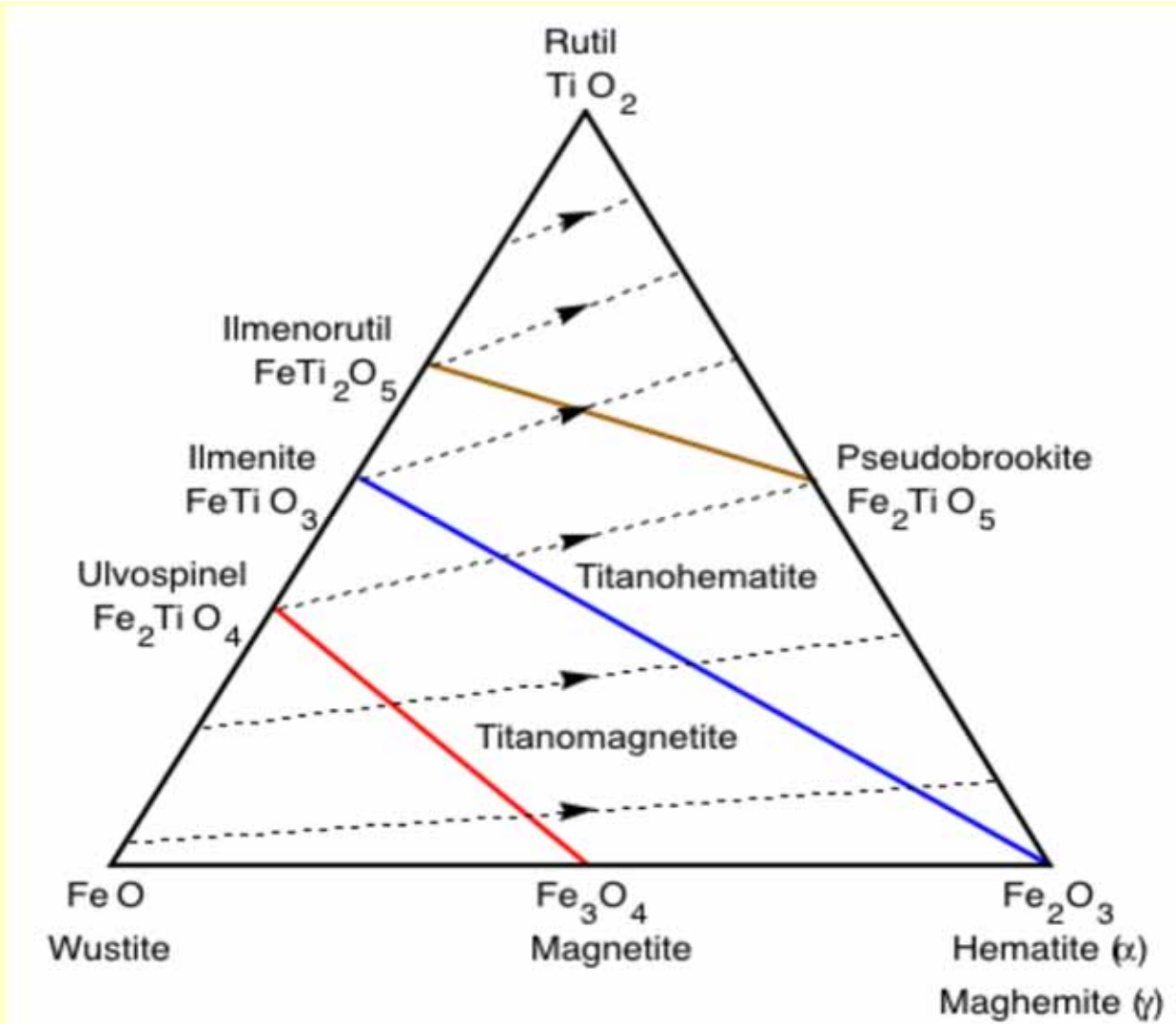
Fig. 3-12 Relation between saturation moment at room temperature and chemical composition of titaniferous magnetites in volcanic rocks. The equal saturation moment diagram of the spinel region obtained from the synthetic titanomagnetites is also reproduced in the figure.

Nagata, 1961





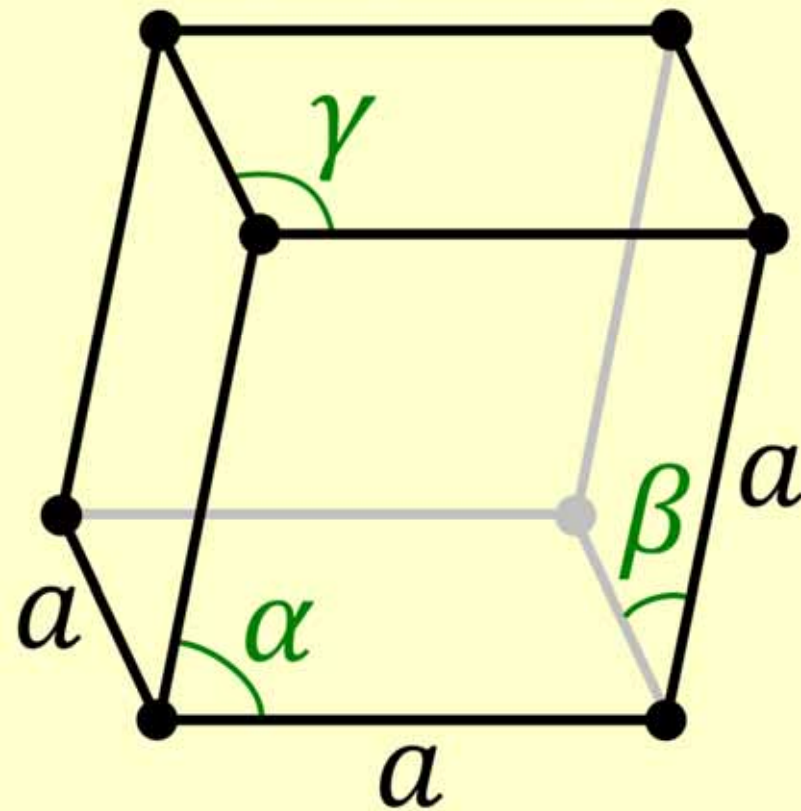




A lo largo de las líneas de oxidación, $\text{Fe}/(\text{Fe}+\text{Ti})$ se mantiene constante

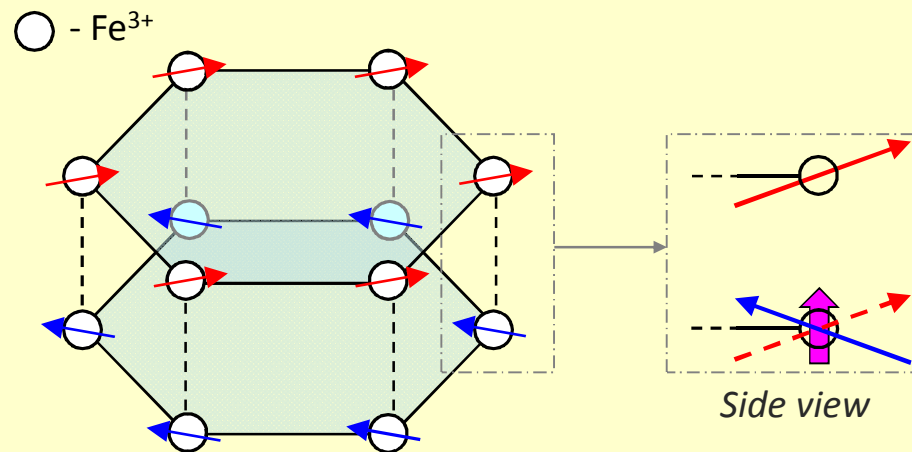
Retículo romboédrico

$$\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$$



Hematita ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$)

Estructura hexagonal apretada, levemente distorsionada. El Fe^{3+} ocupa 2/3 de los intersticios octaédricos en una estructura de panal.



Antiferromagnetismo imperfecto ("spin-canted")

Acoplamiento de permuta es paralelo en cada capa.

Antiparalelo entre capas sucesivas.

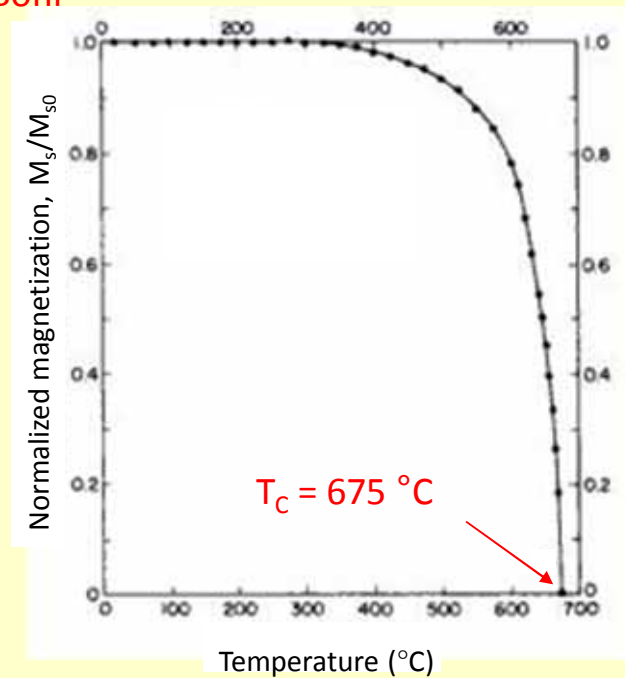
El ángulo entre los momentos magnéticos de capas sucesivas difiere levemente de 180° .

(El reemplazo de Fe^{3+} por $\text{Ti}^{4+} + \text{Fe}^{2+}$ cambia drásticamente las propiedades).

Hematita ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$)

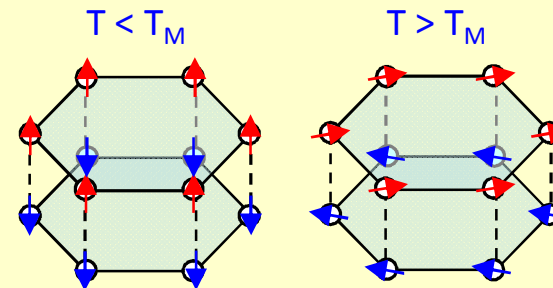
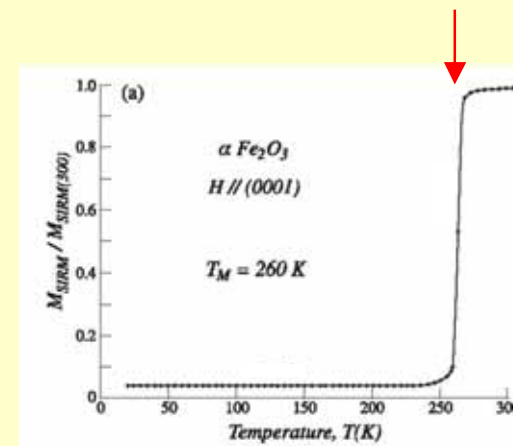
$M_s \approx 2,5 \text{ kA/m @ } 300 \text{ K}$

molecularmente es 0,01 de magnetón de Bohr



Fuerza coercitiva $> 100 \text{ mT}$

A la transición de Morin (transición de fase magnética a $\approx -15 \text{ }^{\circ}\text{C}$): $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ se vuelve un antiferromagneto perfecto



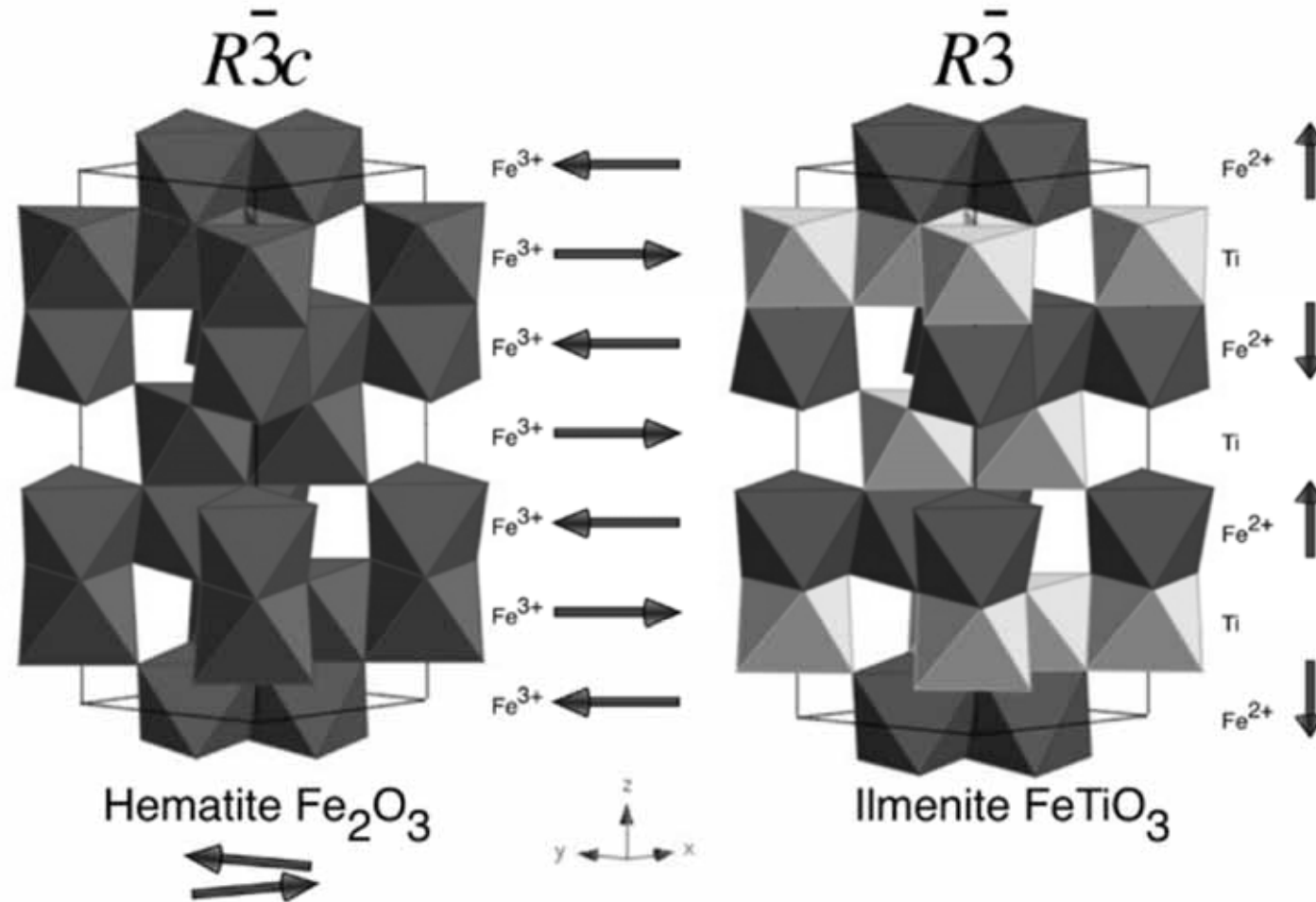
Figuras de Dunlop (1971) y Özdemir y Dunlop (2005)

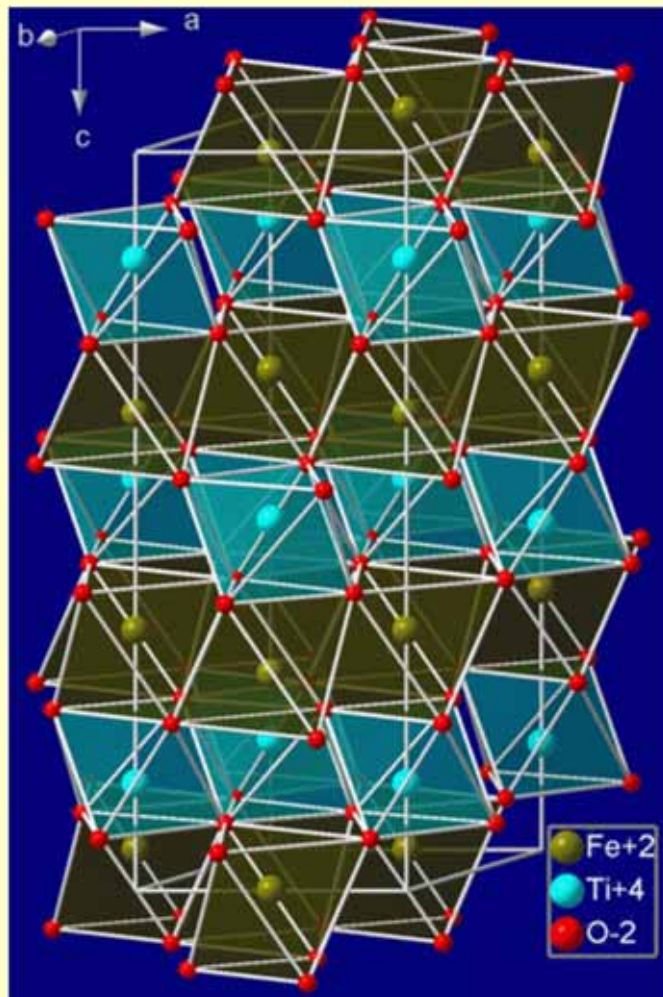
Occurencias de hematita en la naturaleza

Puede estar presente en todos los tipos de roca (ígneas, sedimentaria, metamórfica)

- ◆ Producto de enfriamiento inicial del magma
- ◆ Producto de alteración, hidrotermal
- ◆ Diagenética (en bancos rojos), martitización, deshidratación

Serie de las titanohematitas ($\text{Fe}_{2-y}\text{Ti}_y\text{O}_3$, $0 < y < 1$)





Ilmenita

$FeTiO_3$

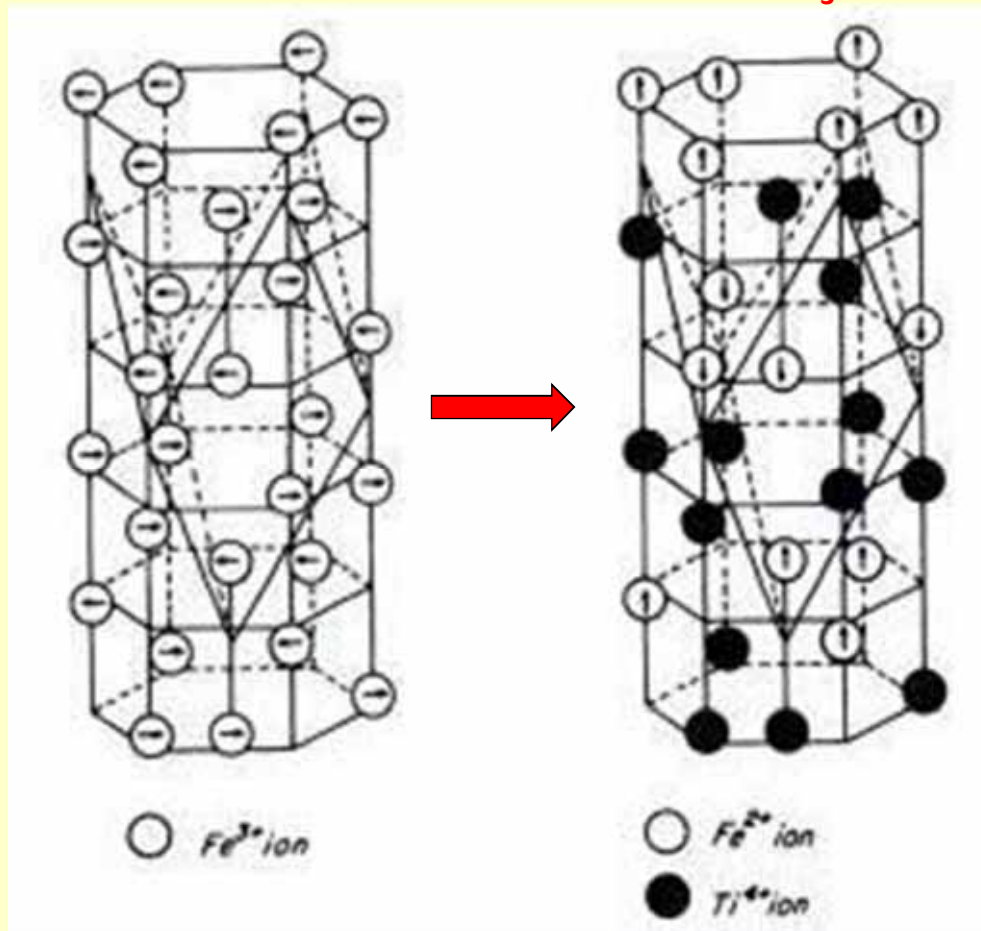


Grupo Espacial:
R3 (rotoinversión ternaria)

Serie de las titanohematitas ($\text{Fe}_{2-y}\text{Ti}_y\text{O}_3$, $0 < y < 1$)

$\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$

FeTiO_3

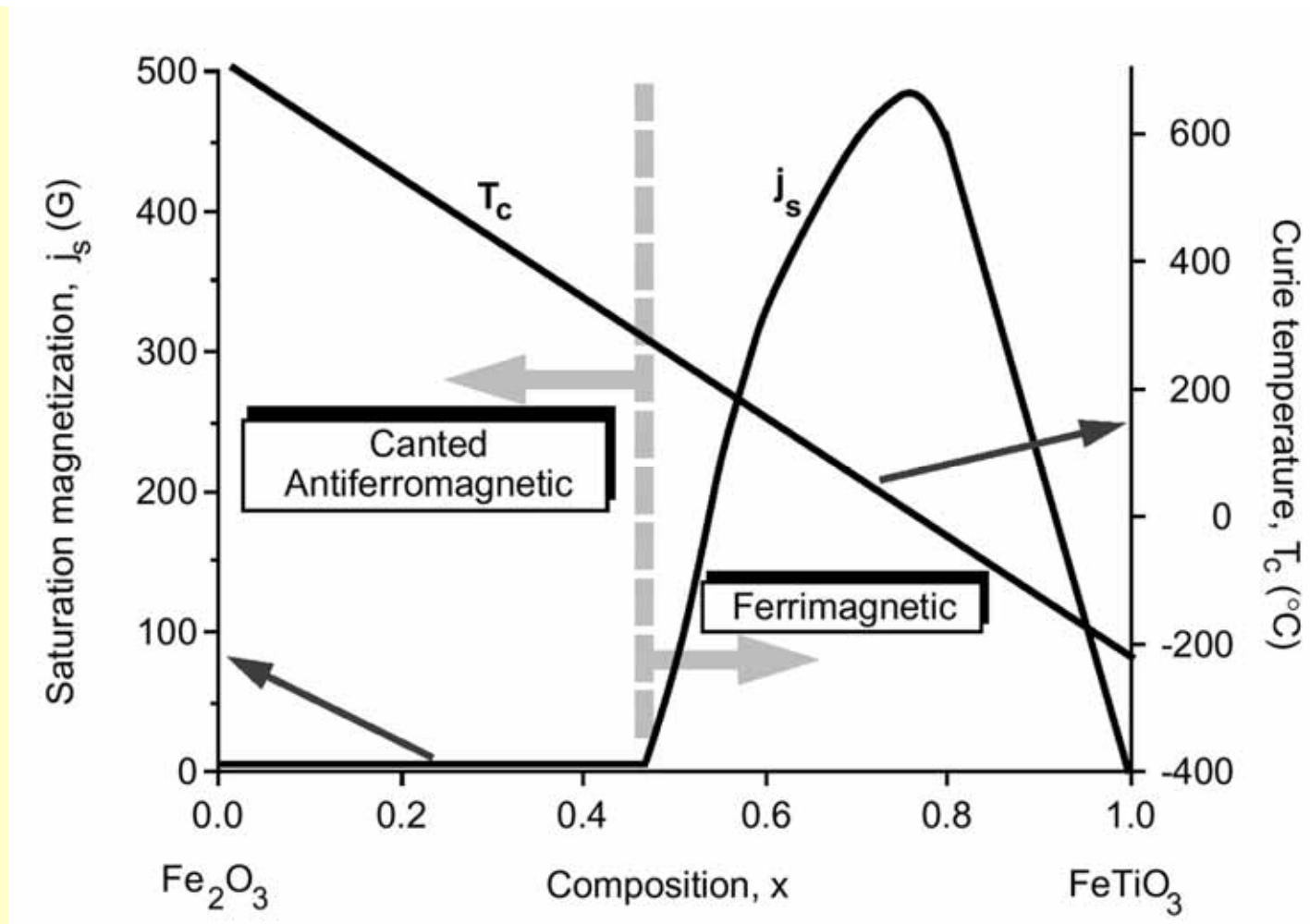


-Hacia ilmenita mayor simetría (variedad ordenada)

-Pura es antiferromagnética

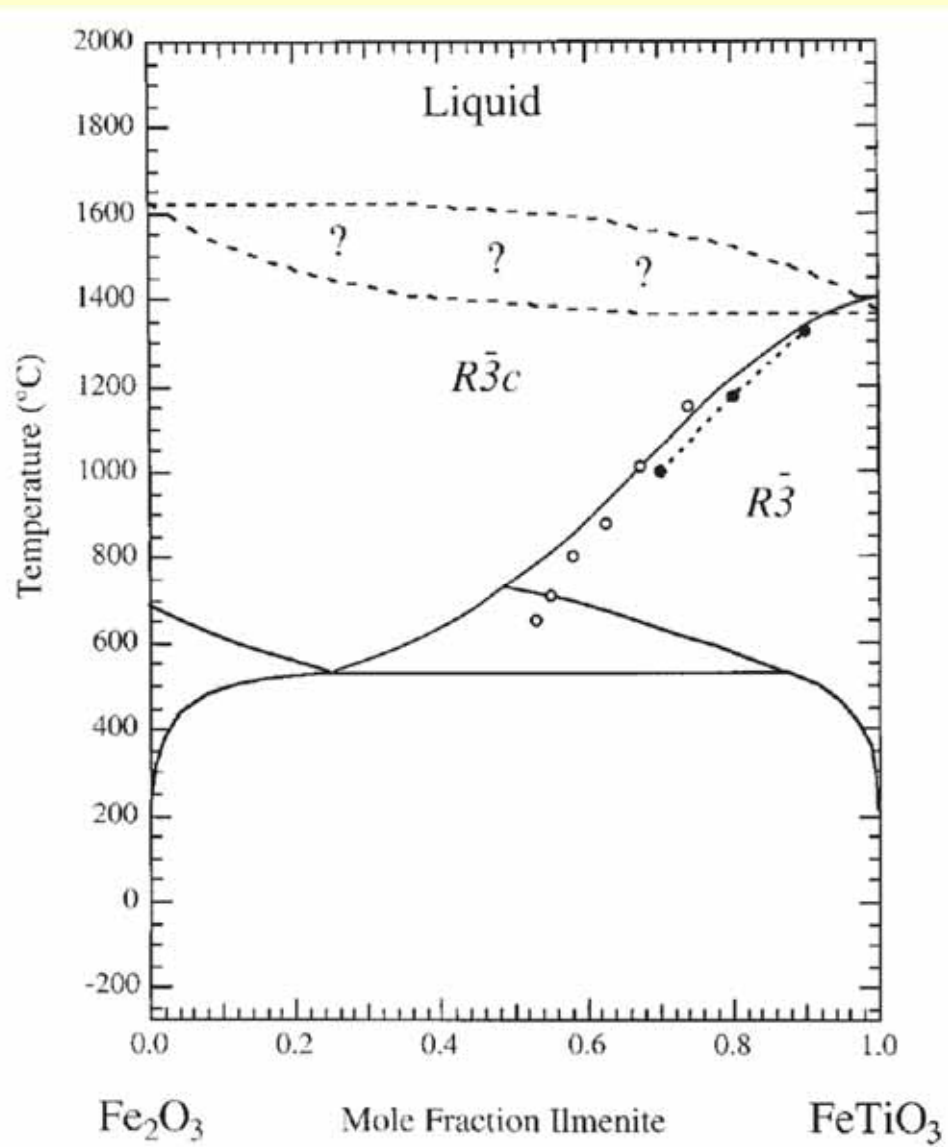
-Disminuye T_c con aumento de Ti

-Ferrimagnética con aumento de Ti

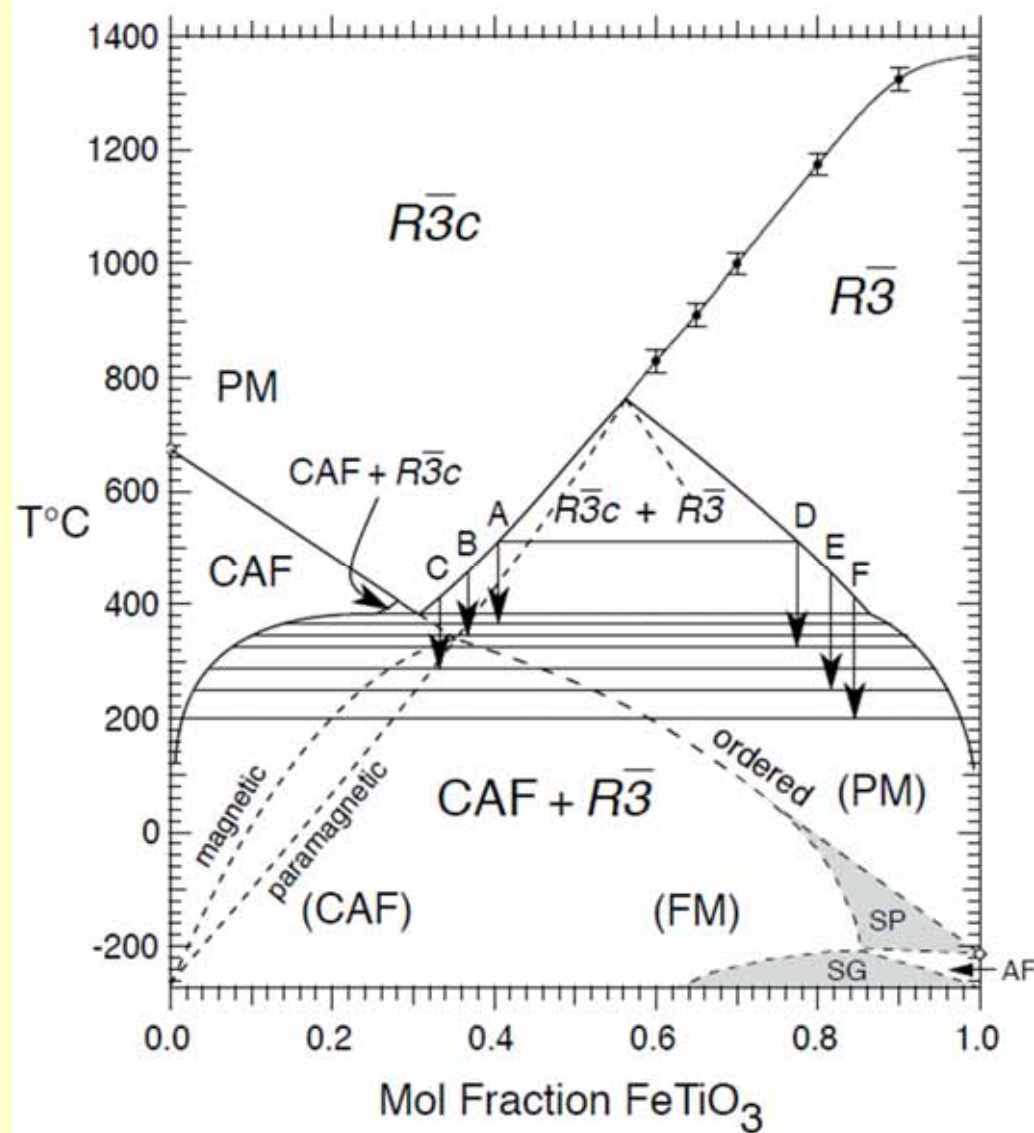


Antiferromagnetismo imperfecto para $0 \leq x \leq 0.5$

Ferrimagnetismo para $0.5 < x \leq 1$ (T_c está por debajo de la temperatura ambiente para $x > 0.7$)



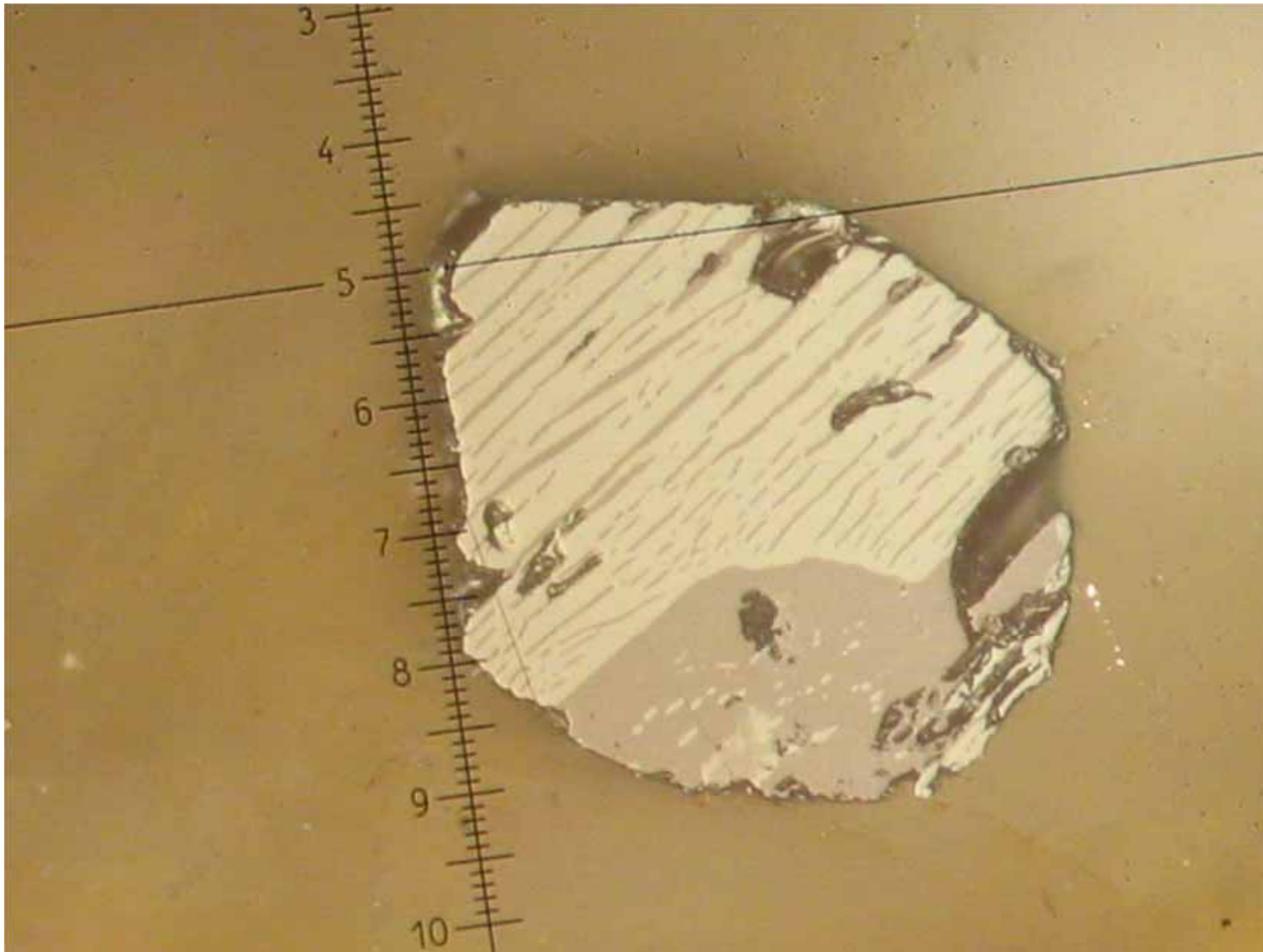
Harrison et al. 2000, Am. Min.



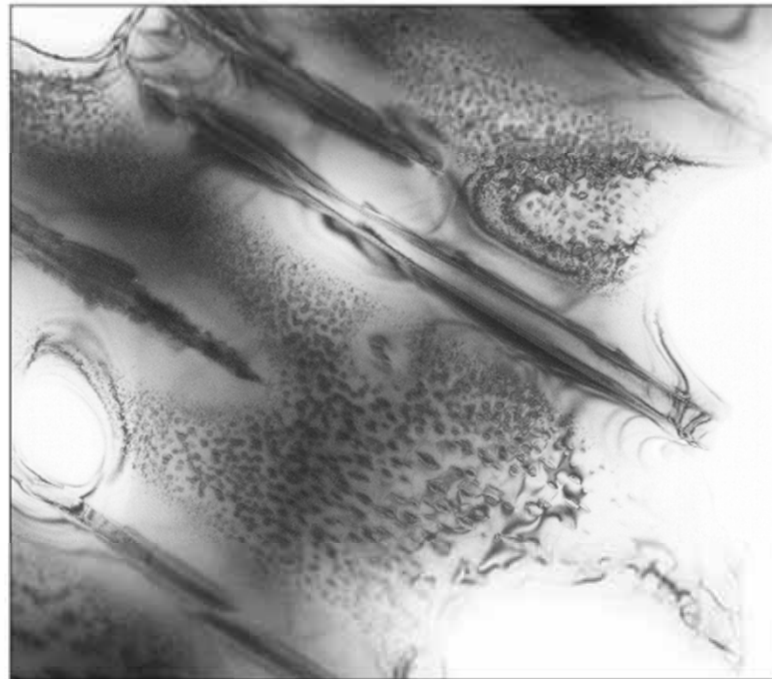
Dos tipos de ordenamiento: cristalográfico ($R\bar{3}c$ vs. $R\bar{3}$) y magnético (paramagnetismo vs. ferromagnetismo)

En $R\bar{3}c$, Ti y Fe ocupan todos los intersticios por igual. En $R\bar{3}$, se ordenan en capas alternadas.

Robinson et al. 2004

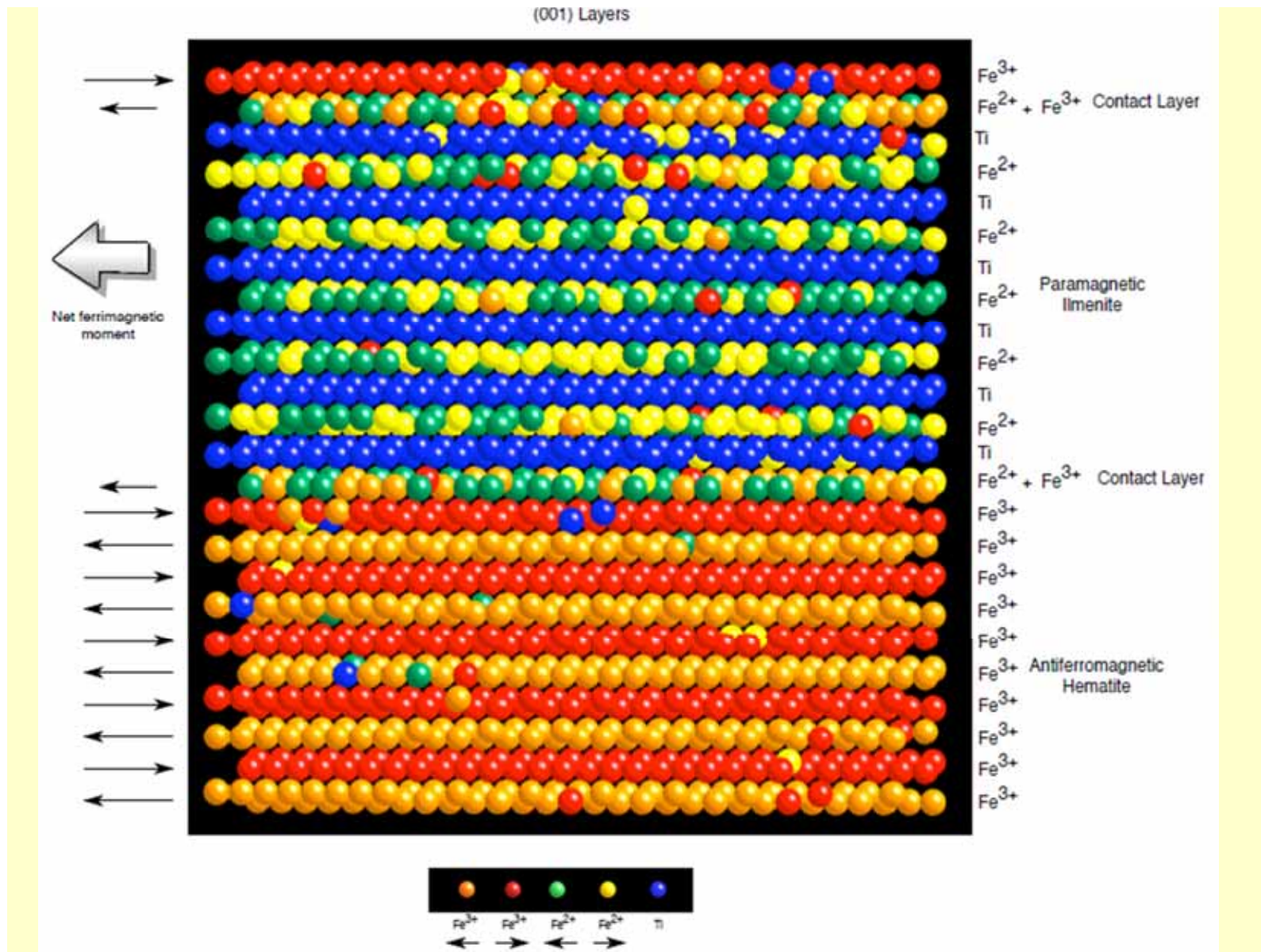


Allard Lake hemo-ilmenite



1 μm

Dark Field TEM image shows hematite lamellae in an ilmenite host. There are stranded diffusion gradients between the larger hematite lamellae. There are coherent strain shadows around the small lamellae and the larger lamellae are incoherent. TEM and analyses by Falko Langenhorst



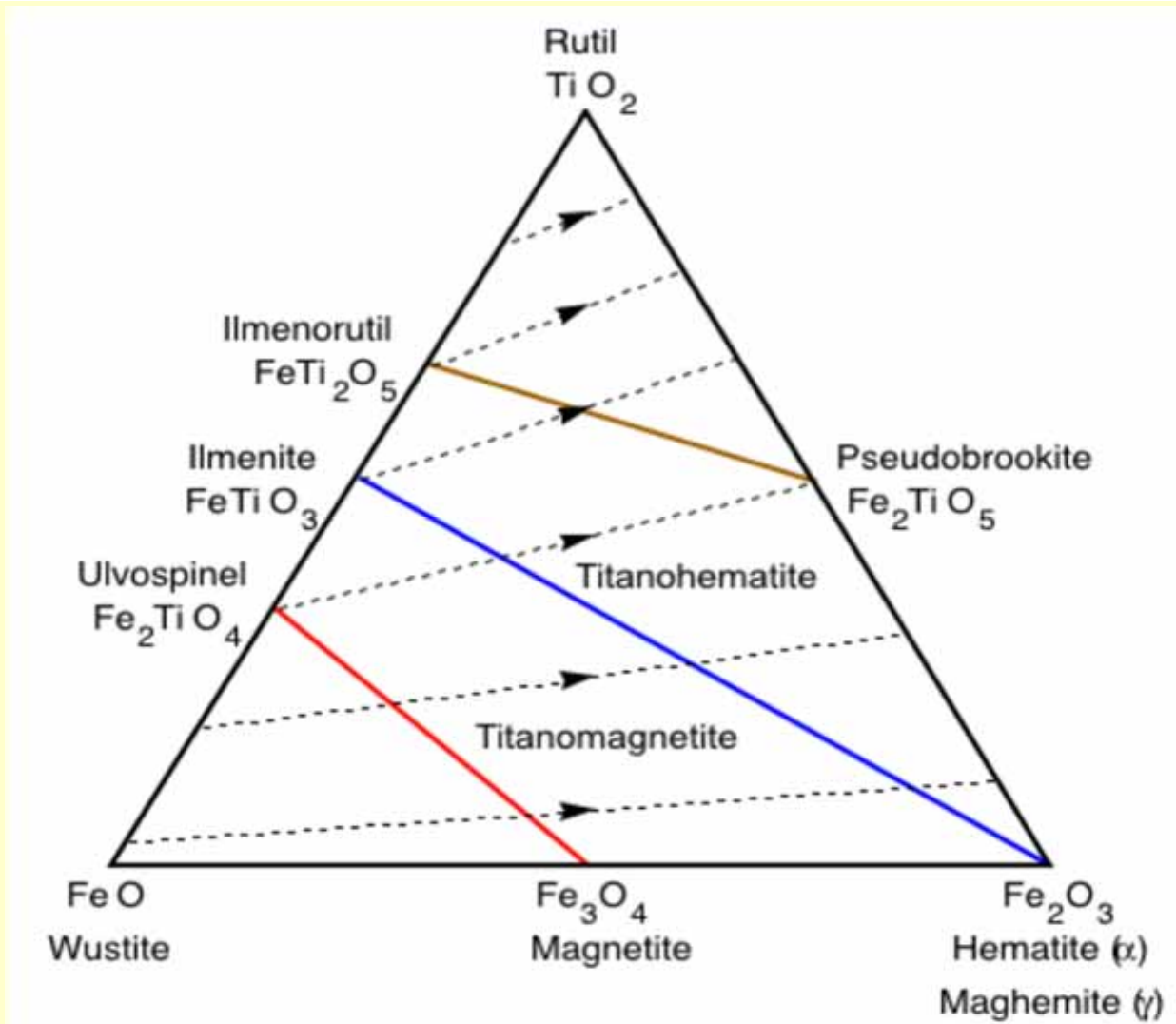
Serie de las titanohematitas ($\text{Fe}_{2-y}\text{Ti}_y\text{O}_3$, $0 < y < 1$)

Peculiaridades de las composiciones intermedias

Enfriamiento lento: La exsolución muy fina de ilmenita/hematita puede generar subestructuras en los óxidos romboédricos, con momentos opuestos y desiguales. Caso particular de ferrimagnetismo denominado «**magnetismo lamelar**».

Mc Enroe et al. 2001, Robinson et al. 2004

Enfriamiento rápido: se generarían zonas de «proto-ordenamiento» incluidas en zonas desordenadas. Las zonas desordenadas (o las interfases) se vuelven antiferromagnéticas a baja T, y las zonas ordenadas, ferrimagnéticas. Las zonas ferrimagnéticas adquieren una magnetización en antifase con las antiferromagnéticas. «**Auto-reversión**» (self-reversal), característico de composiciones intermedias de la serie ilmenita-hematita.



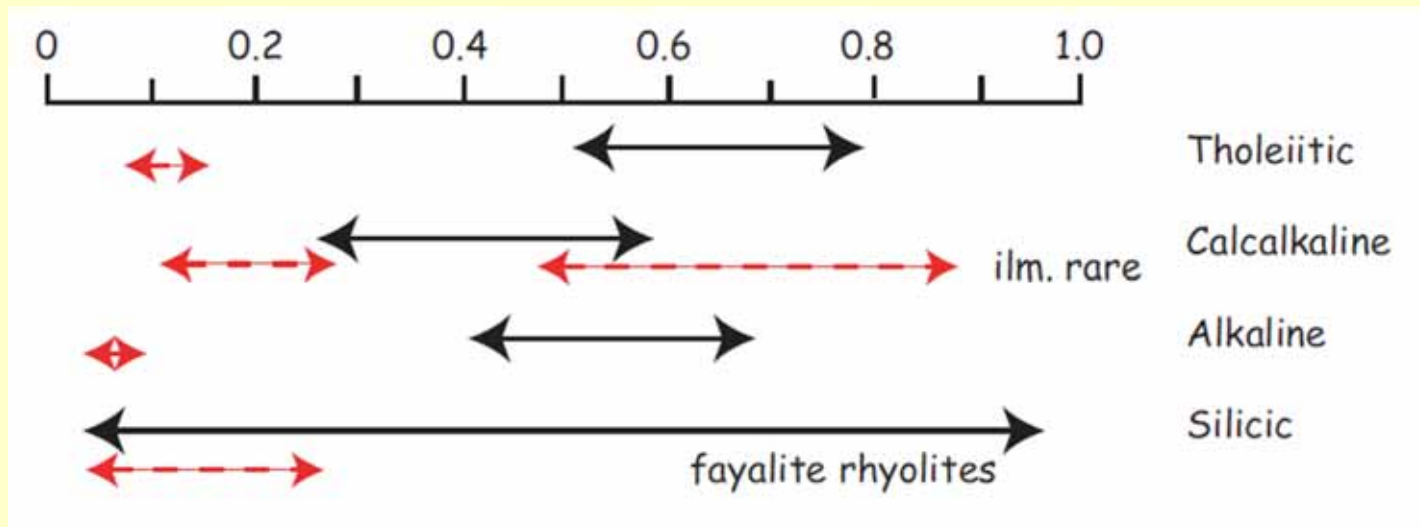
A lo largo de las líneas de oxidación, $\text{Fe}/(\text{Fe}+\text{Ti})$ se mantiene constante



Pares espinelo-óxido romboédrico en rocas ígneas

En negro, componente ulvospinelo en el espinelo de Fe-Ti

En rojo, componente hematita en el óxido romboédrico de Fe-Ti



Tauxe, 2007.

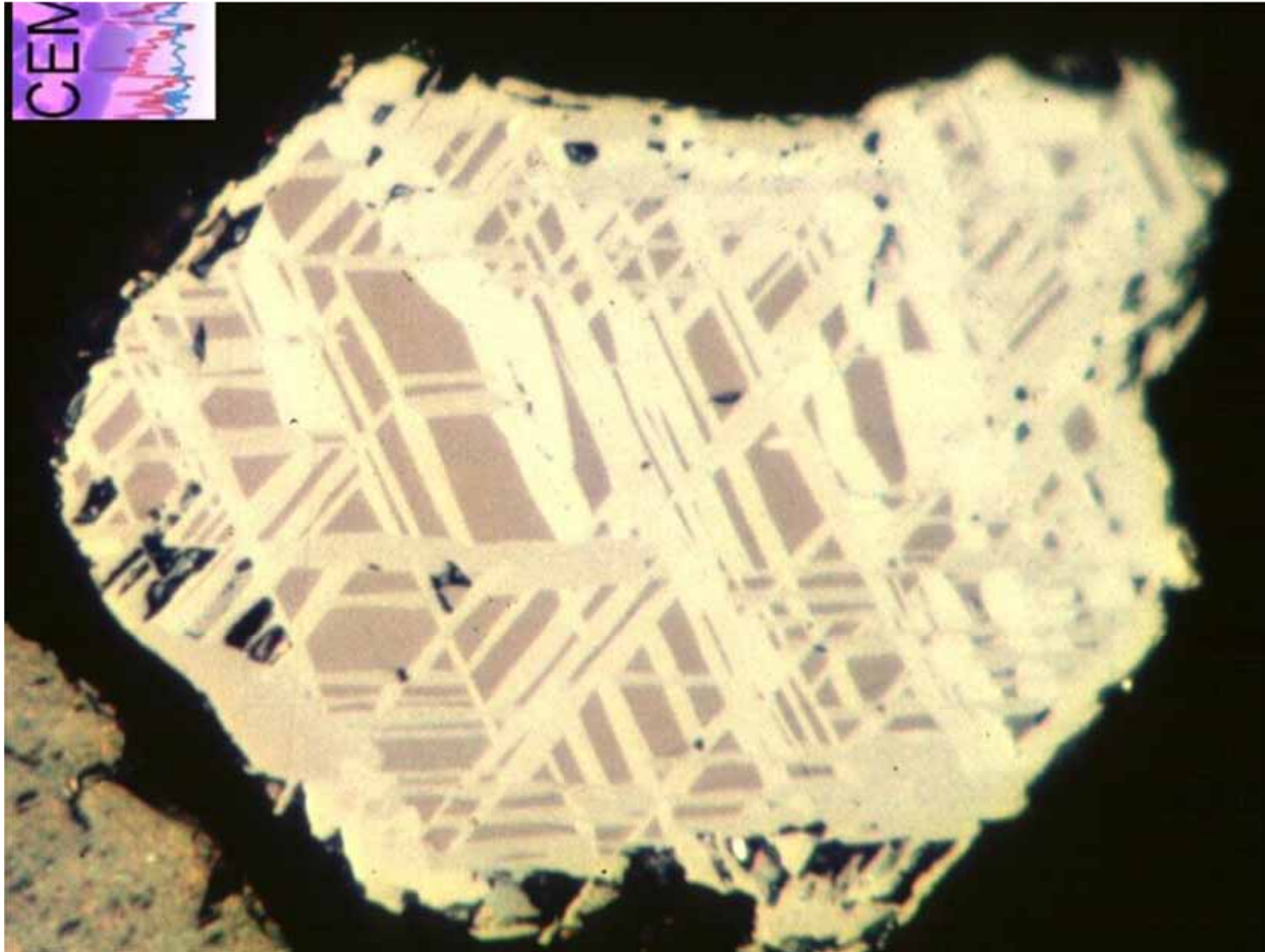
Datos de Frost y Lindsley, 1991.

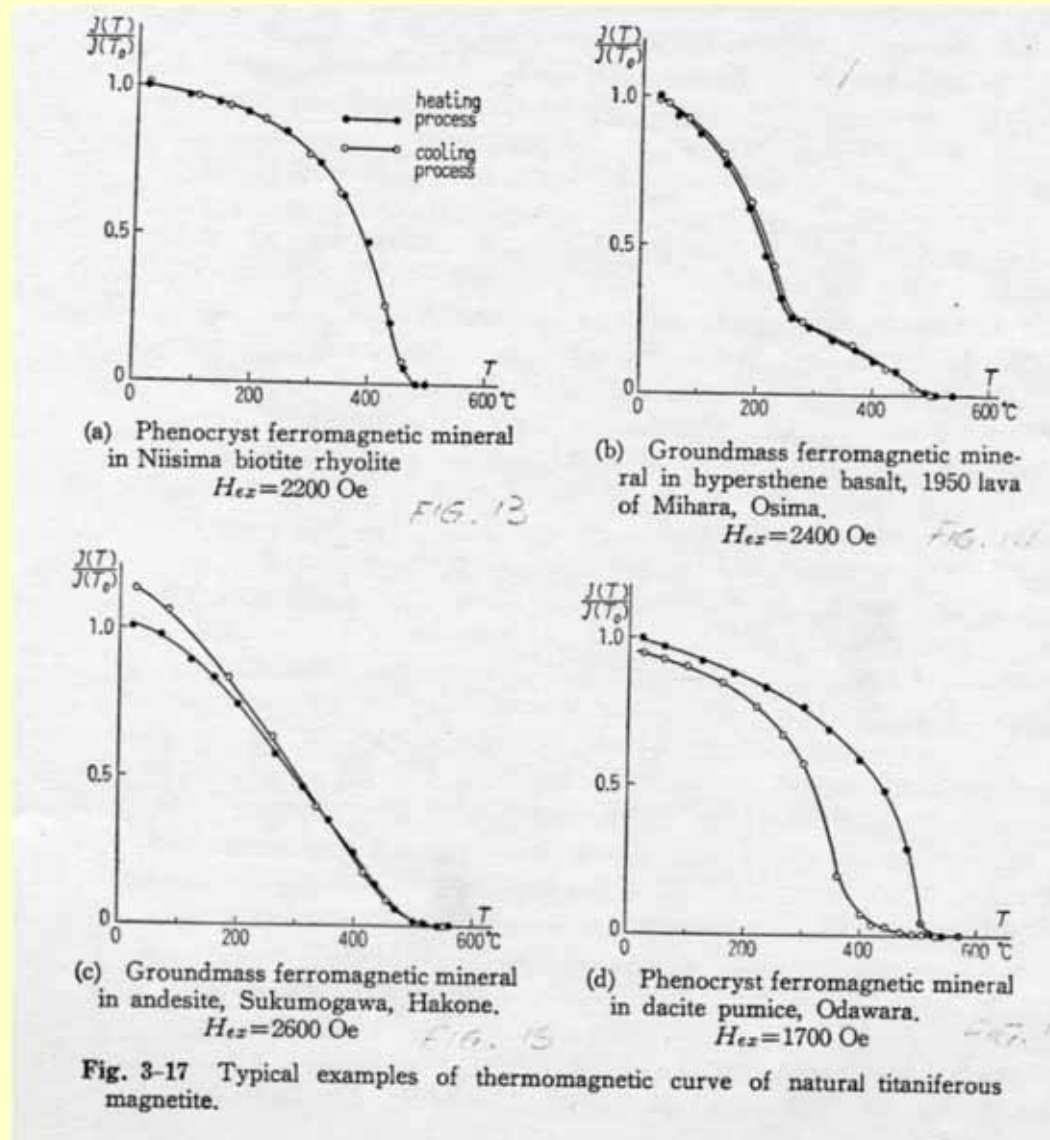


Oxidación

De alta temperatura (deutérica, durante el proceso de enfriamiento del magma)

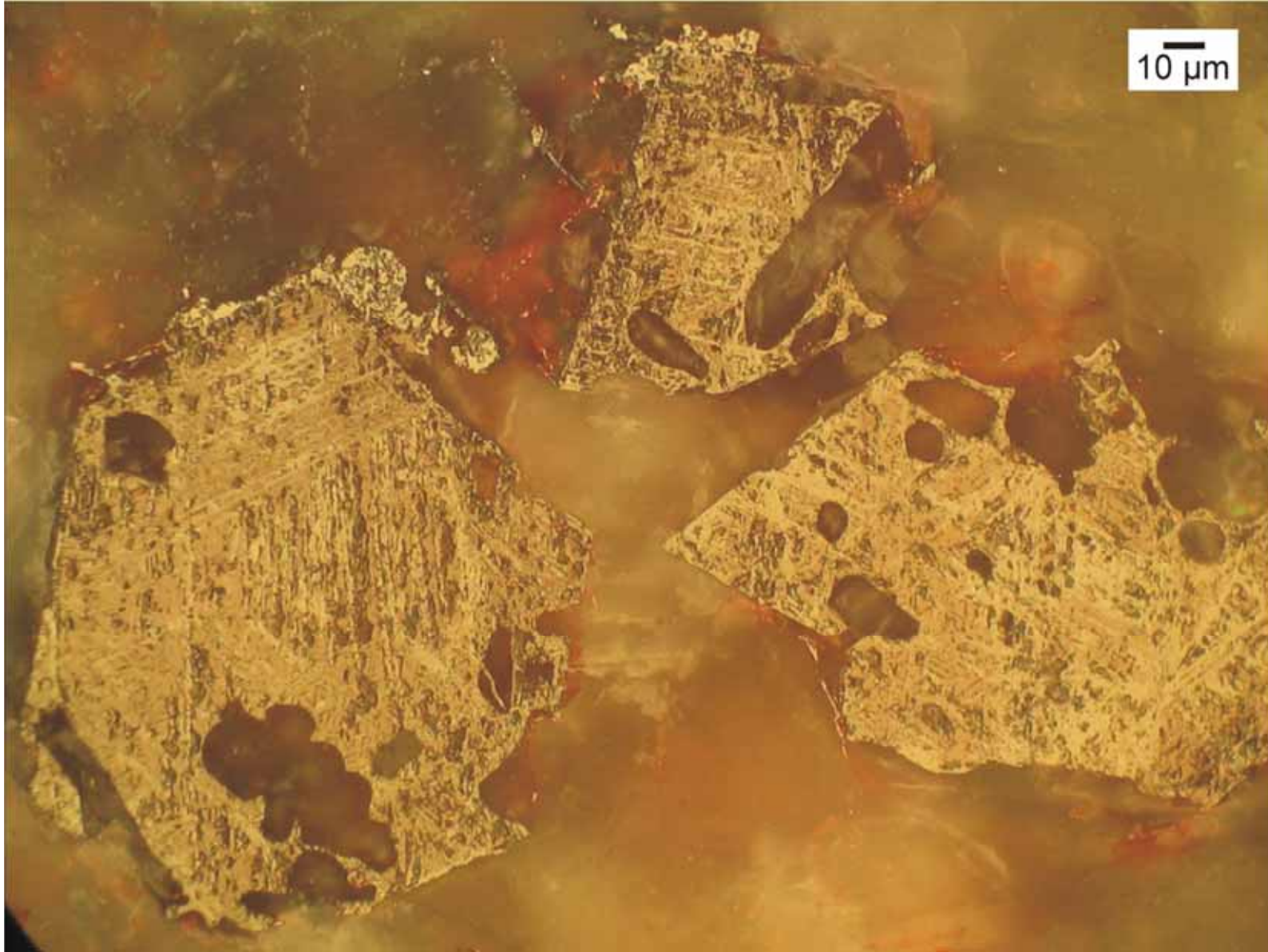
De baja temperatura (por hidrotermalismo, diagénesis, meteorización)

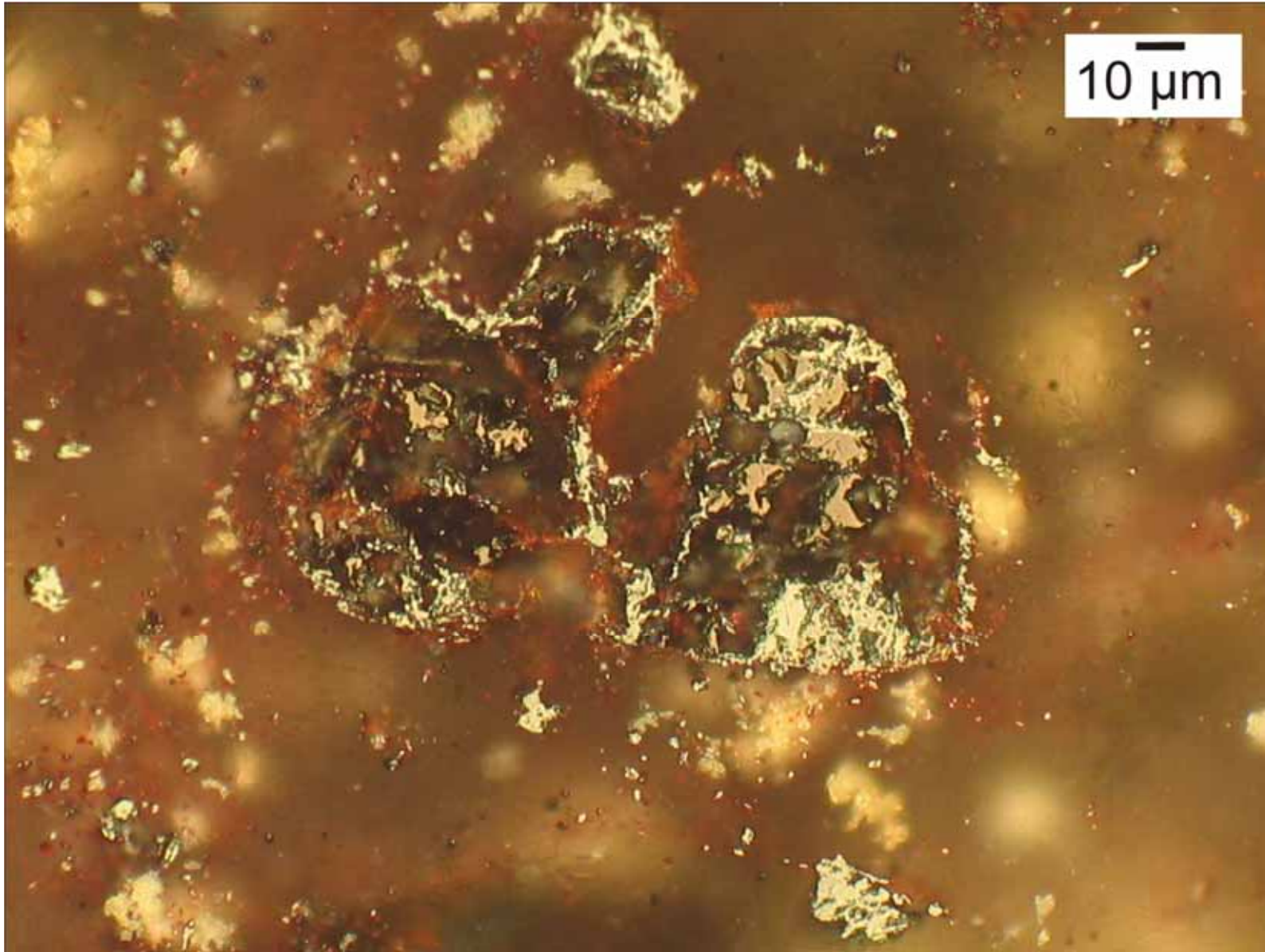


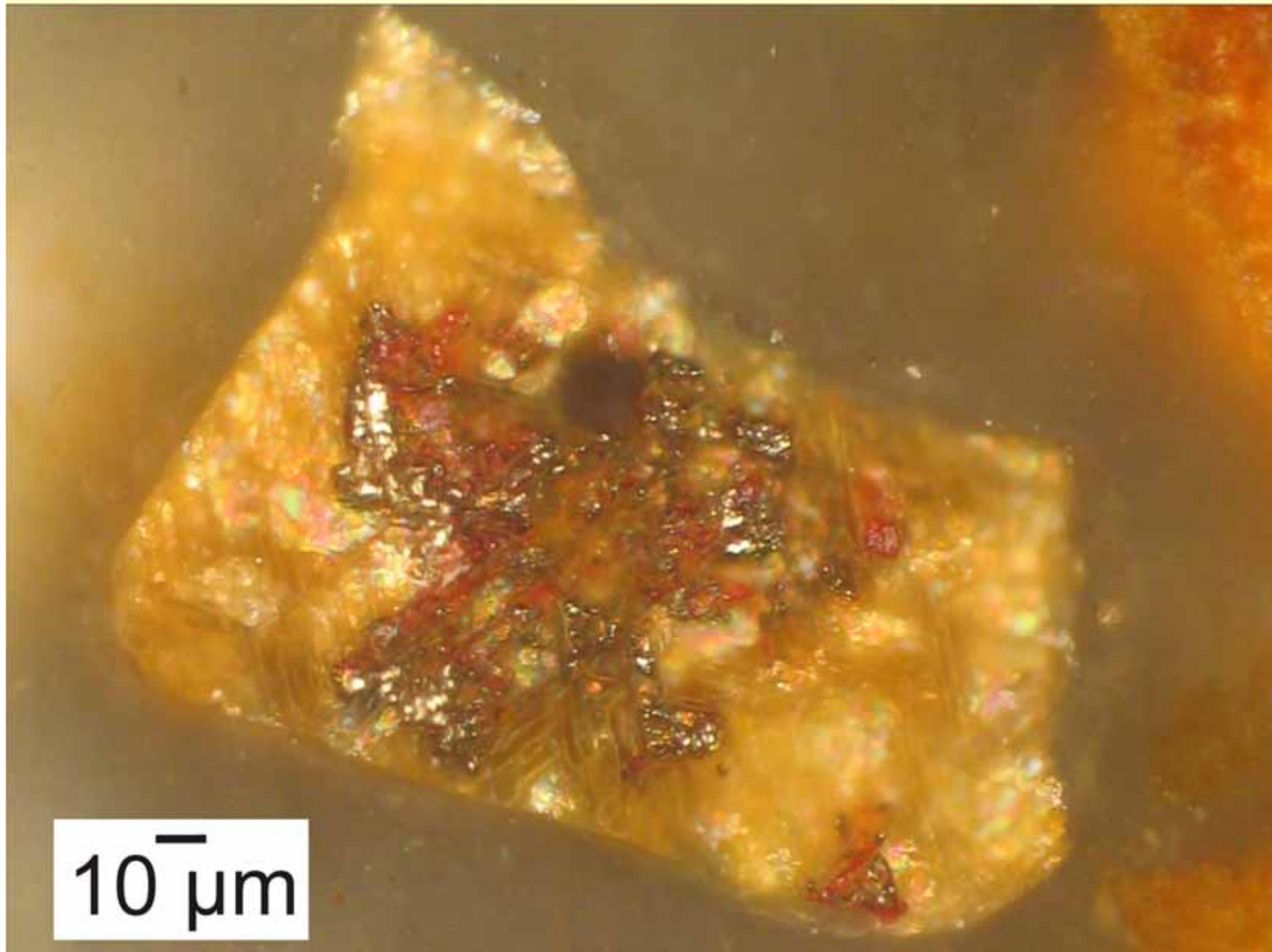


Nagata, 1961



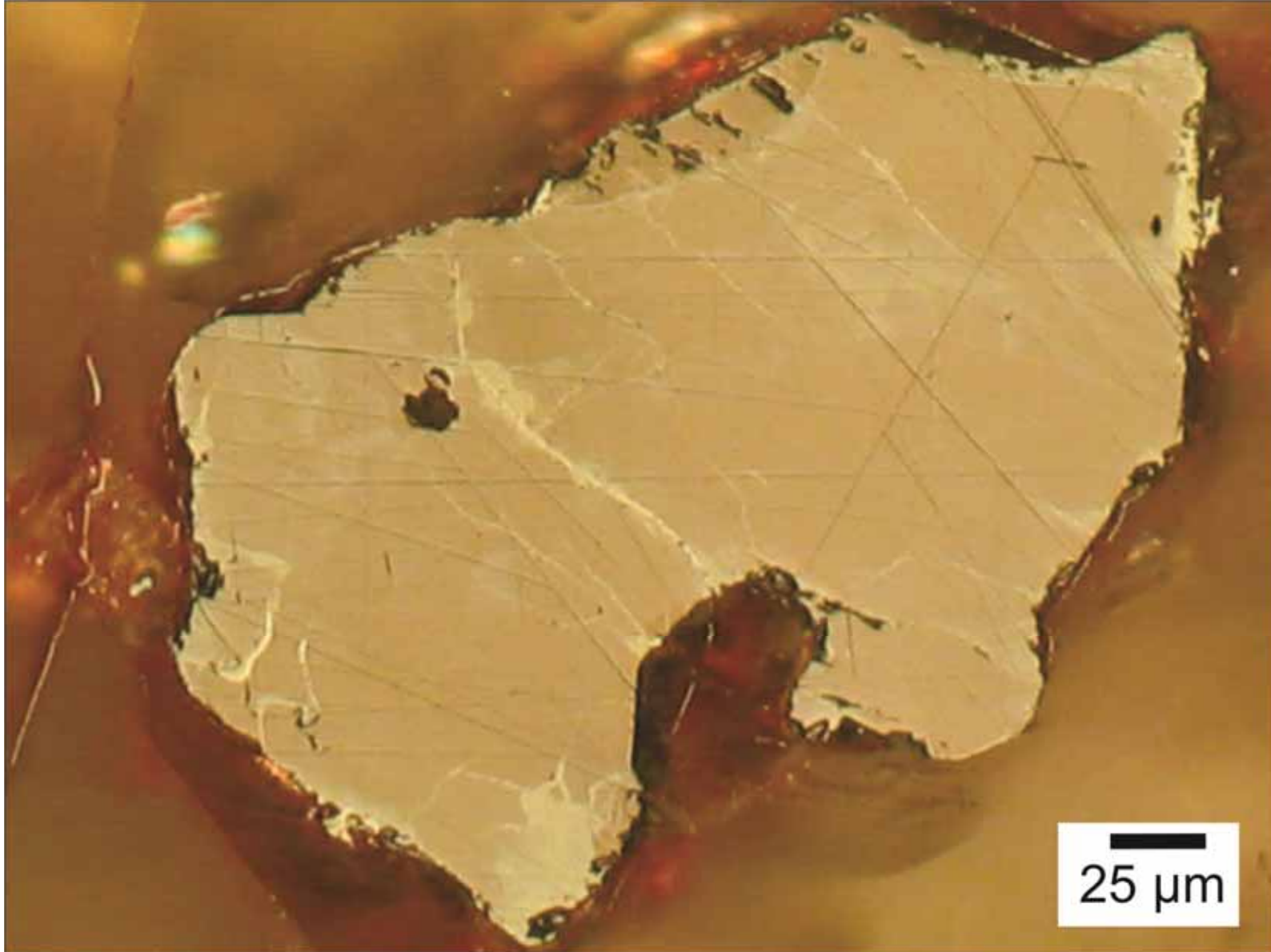


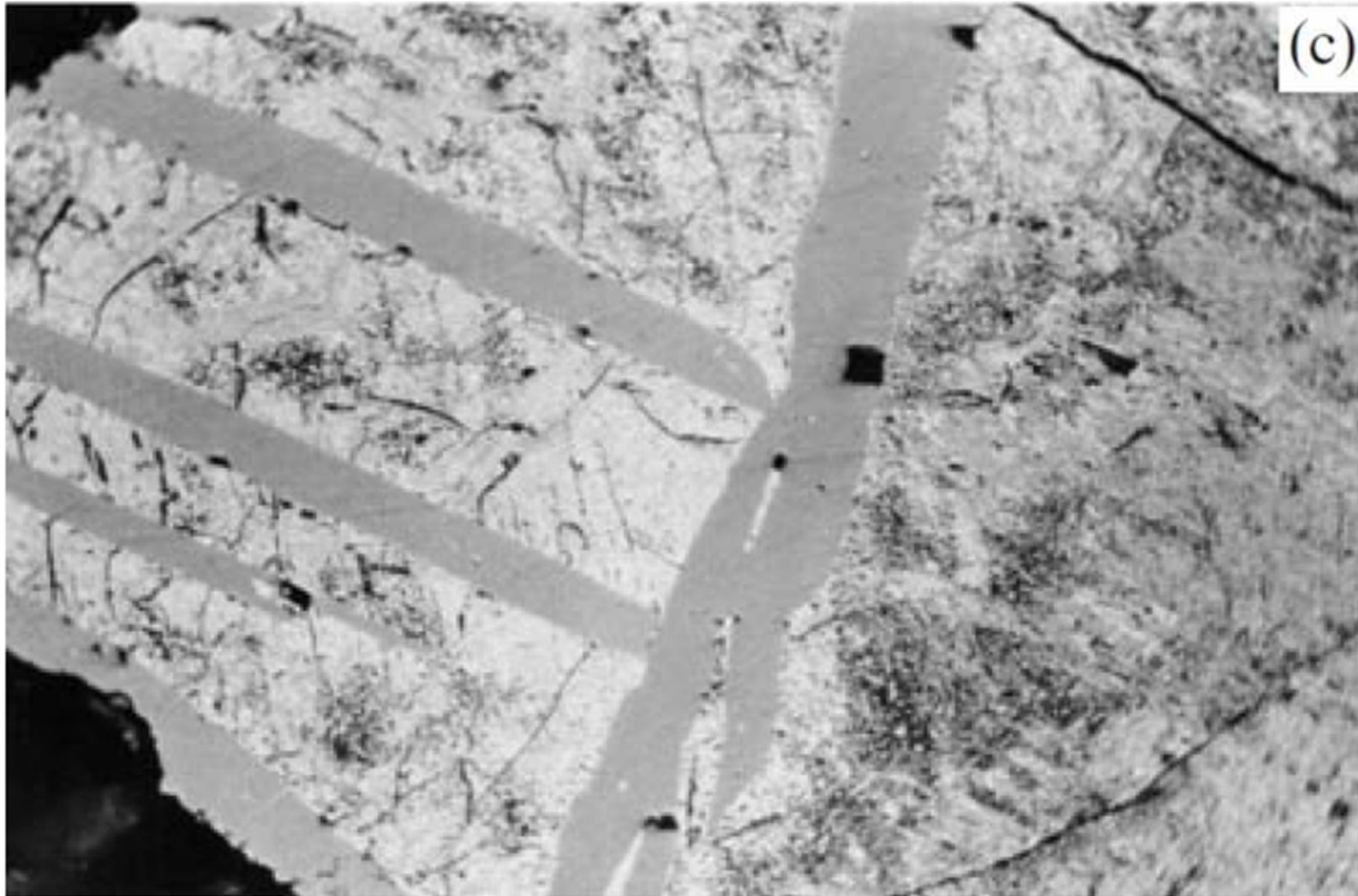












McEnroe y Brown 2000. Exsolución de ilmenita, y posterior granulación y maghemitización de la magnetita



