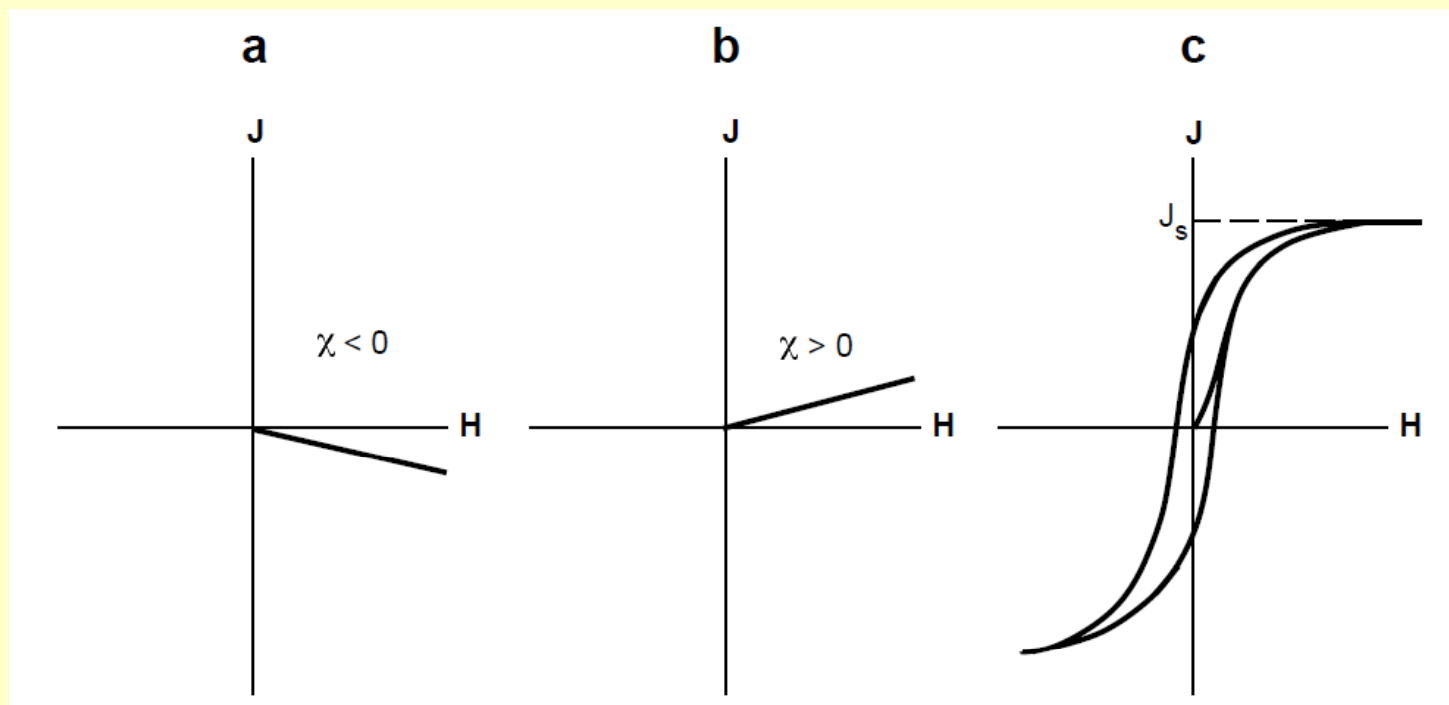


- El campo magnético terrestre como sistema de referencia fijo
- Las rocas como brújulas con capacidad de memorizar el sistema de referencia
- Reconstruyendo las posiciones de los continentes en el pasado con paleomagnetismo



Diamagnetismo

Paramagnetismo

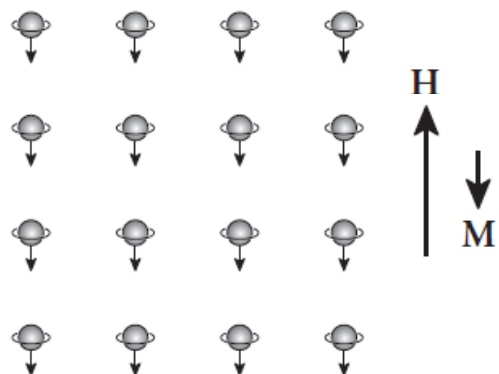
Ferromagnetismo

$$\kappa = J/H$$

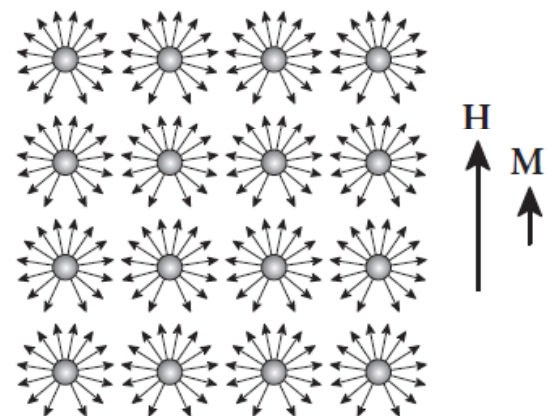
$$J = \kappa H$$

Histéresis

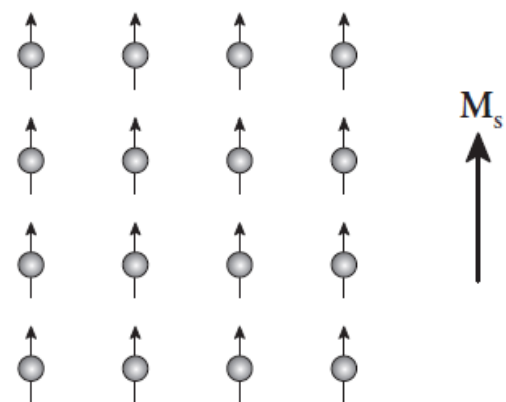
(a) diamagnetism



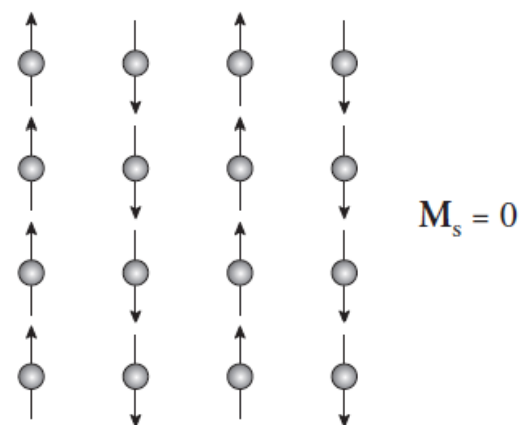
(b) paramagnetism



(c) ferromagnetism



(d) antiferromagnetism



Egli, 2011

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 depositacional
 - VRM: magnetización remanente viscosa

Contribuciones energéticas a nivel partícula

Cada grano busca la configuración de magnetización que minimiza su energía total

Energía de permuta: momentos magnéticos de spin tan paralelos como sea posible

Energía magnetoestática: energía de la partícula debida a su magnetización/momento magnético

Energía anisotrópica: es mínima con la magnetización a lo largo del eje fácil (magnetocristalina, de forma)

Energía de interacción: debida al ángulo entre la dirección de magnetización espontánea de la partícula y el campo aplicado

Anisotropía magnética: barreras entre estados de mínima energía local de las partículas

- **Estructura cristalina: anisotropía magnetocristalina**
- **Forma: anisotropía de forma**
- **Esfuerzos: Anisotropía por deformación**
- **Campo magnético: magnetoestricción**
- **Direcciones fáciles vs. difíciles**

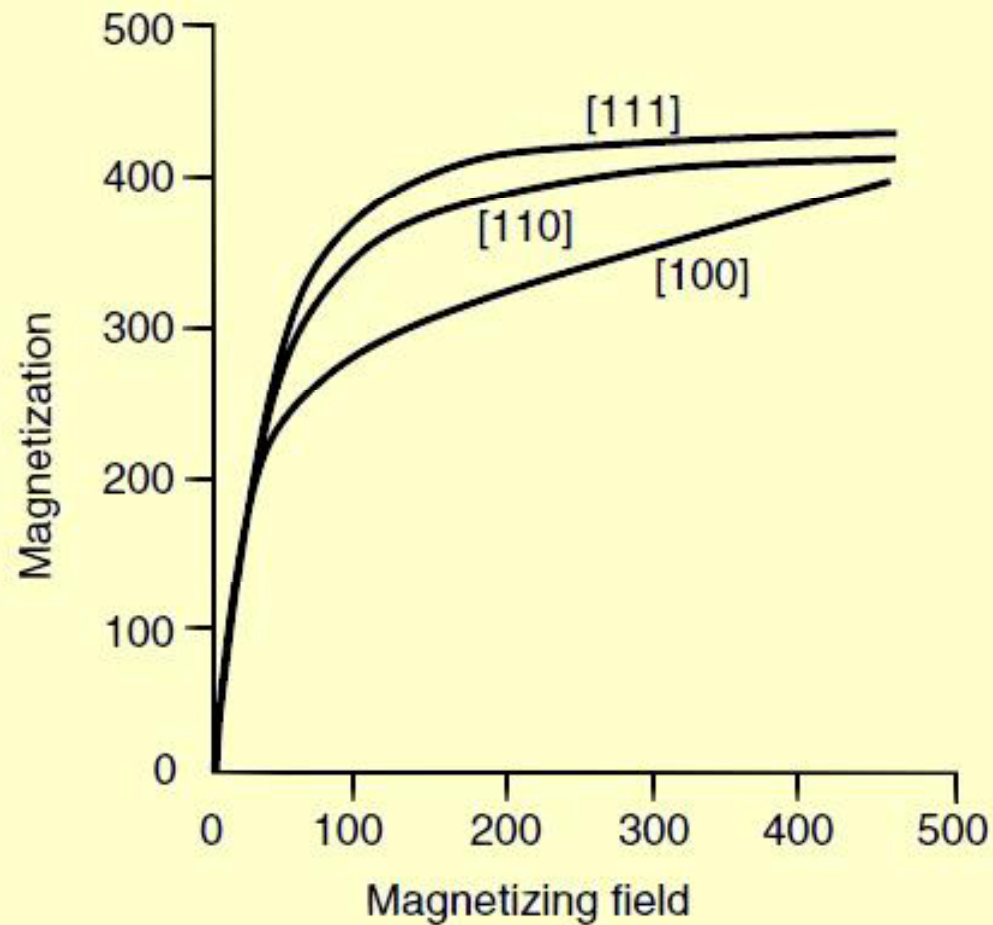
Anisotropía magnetocristalina

Direcciones
cristalográficas
(para magnetita)

[111] = eje fácil

[100] = eje difícil

Se debe a que el
superintercambio es
máximo en la dirección
fácil



Anisotropía magnetocristalina

Direcciones
cristalográficas

Para magnetita:

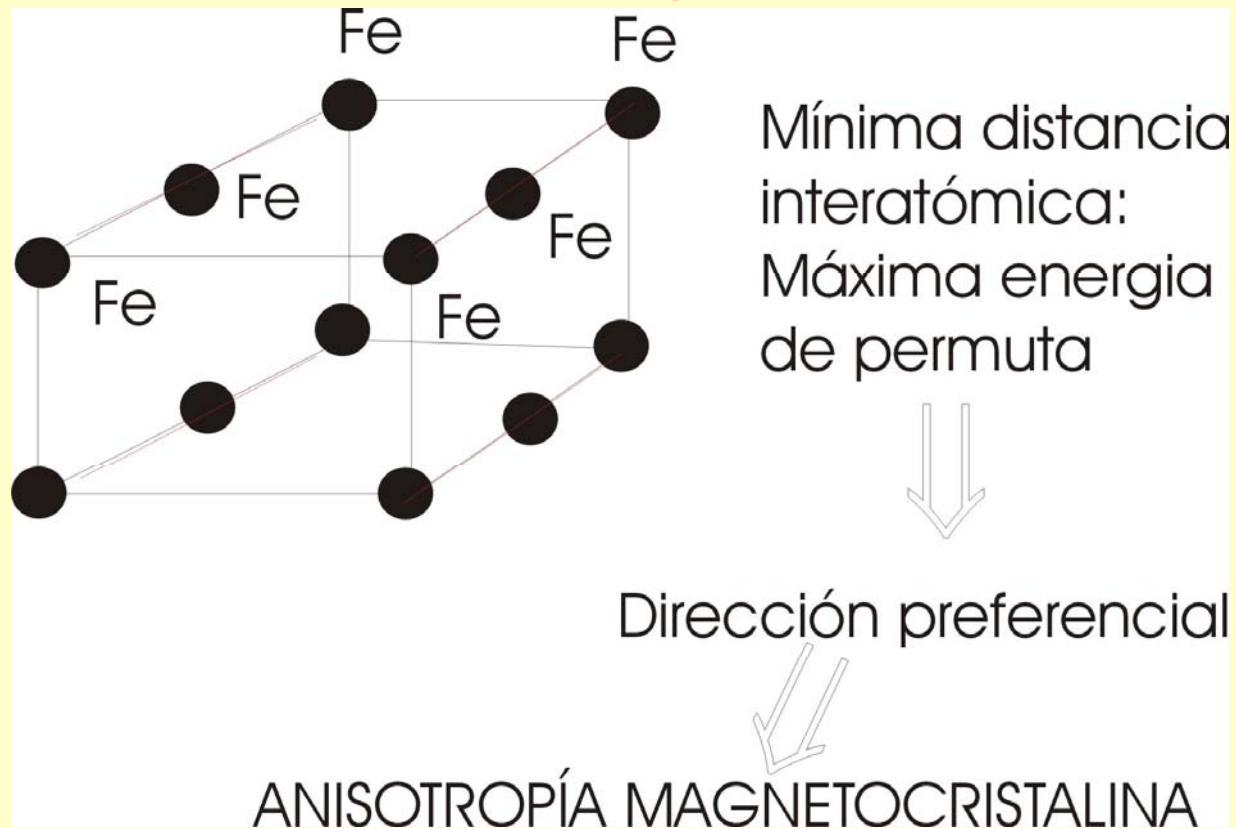
[111] = eje fácil

[100] = eje difícil



Fe_3O_4 (magnetite)

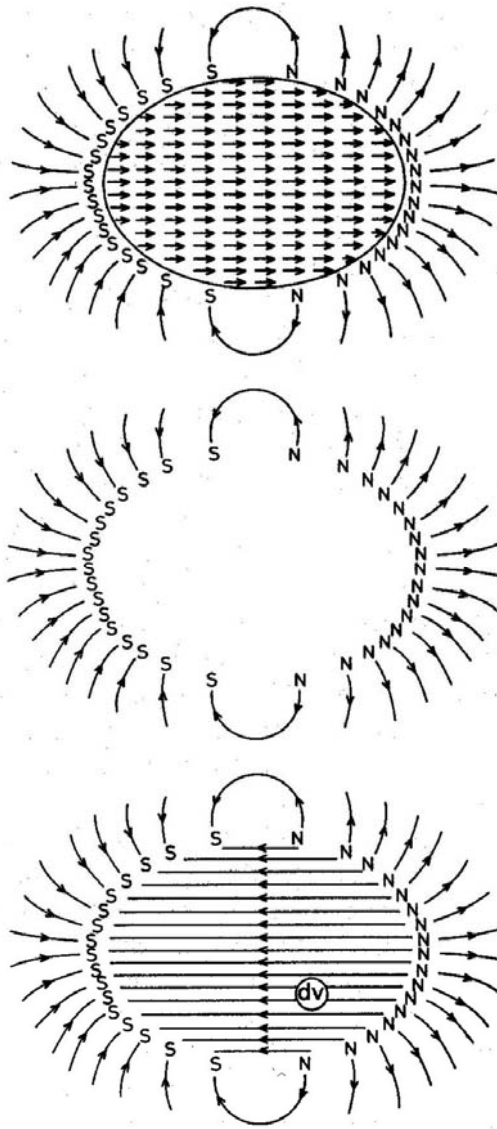
Anisotropía Magnetocristalina



- **Hematita:** domina la anisotropía magnetocristalina

Anisotropía magnética: barreras entre estados de mínima energía local de las partículas

- **Estructura cristalina: anisotropía magnetocristalina**
- **Forma: anisotropía de forma**
- **Esfuerzos: Anisotropía por deformación**
- **Campo magnético: magnetoestricción**
- **Direcciones fáciles vs. difíciles**



Campo desmagnetizante (auto-desmagnetización)

El campo desmagnetizante es proporcional a J y de dirección opuesta.

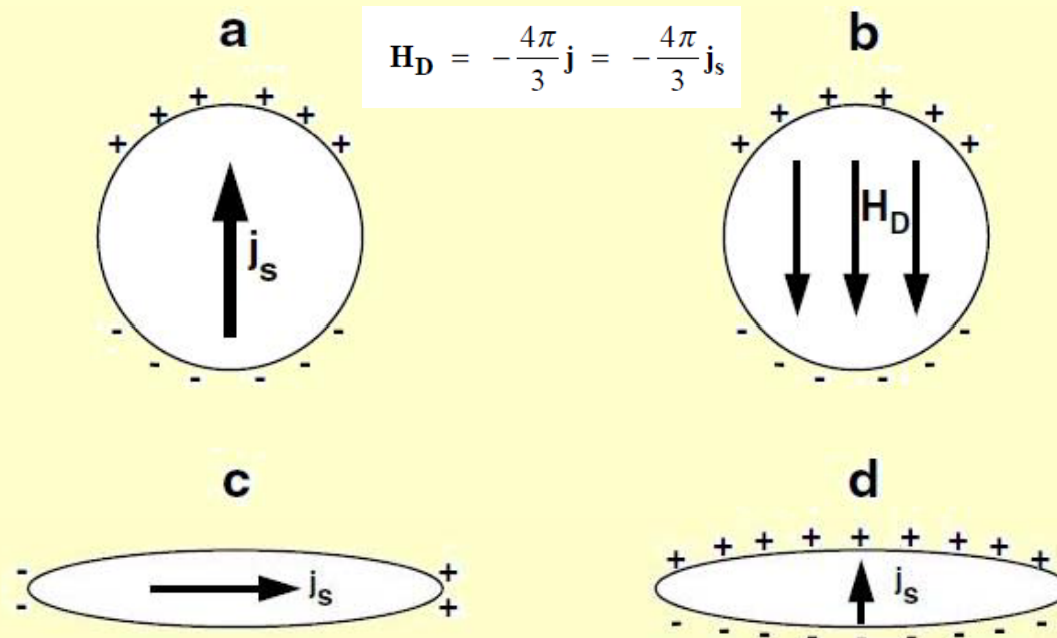
$$H_{\text{ef}} = H_{\text{ex}} - H_{\text{d}}$$

$$H_{\text{d}} = NJ$$

N es el «factor desmagnetizante» y depende de la forma del material

Anisotropía de forma

Campo desmagnetizante: $H_d = NJ$



El factor desmagnetizante N en cierta dirección, es proporcional al porcentaje de superficie cubierto por cargas magnéticas cuando se magnetiza en esa dirección. Esta diferencia en energía magnetoestática es una barrera a la rotación de J . El grano se va a magnetizar siempre en su eje mayor. En la magnetita domina la anisotropía de forma

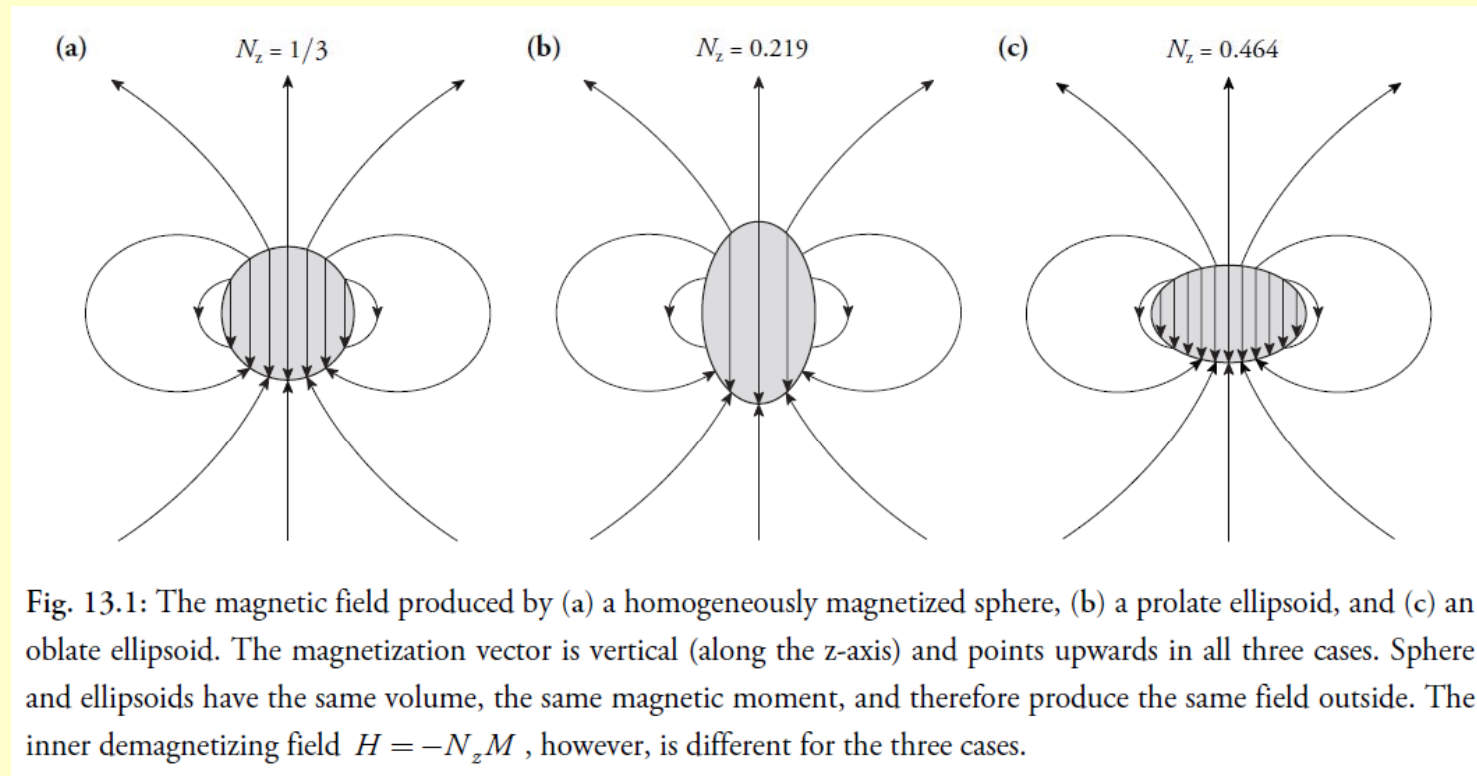
$$\mathbf{J}_e = \frac{\kappa \mathbf{F}_0}{1 + N_b \kappa} = \kappa_e \mathbf{F}_0,$$

$$\kappa_e = \frac{\kappa}{1 + N_b \kappa}$$

$$\kappa = \frac{\kappa_e}{1 - N_b \kappa_e}.$$

El efecto desmagnetizante es despreciable para materiales con susceptibilidad magnética moderada a baja (menor a 0,1 SI).

En materiales con susceptibilidad mayor, el efecto es significativo.



Egli, 2011

Anisotropía magnética: barreras entre estados de mínima energía local de las partículas

- **Estructura cristalina: anisotropía magnetocristalina**
- **Forma: anisotropía de forma**
- **Esfuerzos: Anisotropía por deformación**
- **Campo magnético: magnetoestricción**
- **Direcciones fáciles vs. difíciles**

Fuerza coercitiva o Coercitividad

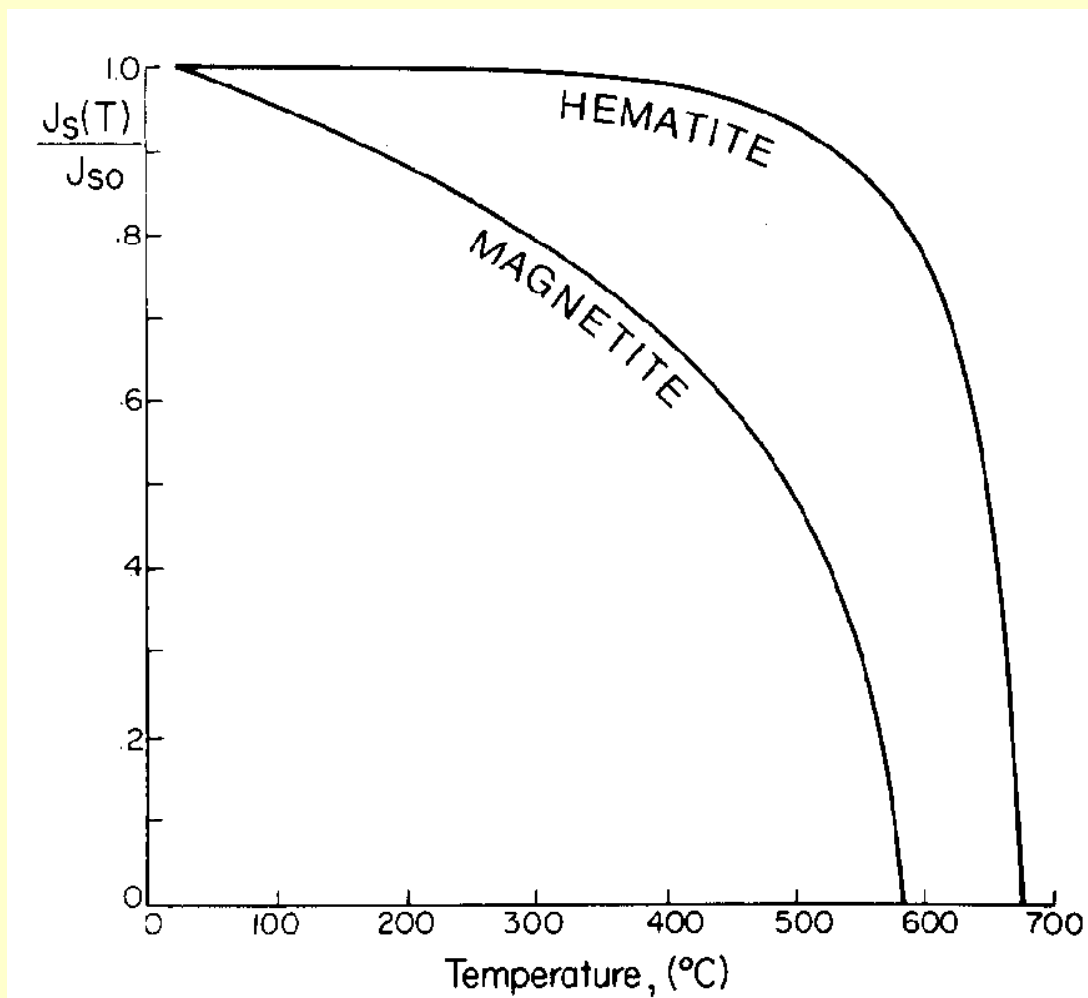
Está dada por la intensidad del campo magnético que hace falta para superar cierta barrera de energía para la rotación de la magnetización.

$$h_c = 2K / j_s$$

La barrera depende de la energía anisotrópica K y de la magnetización

La energía anisotrópica depende de la anisotropía magnetocristalina, de forma, por esfuerzos, etc.

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

Contribuciones energéticas a nivel partícula

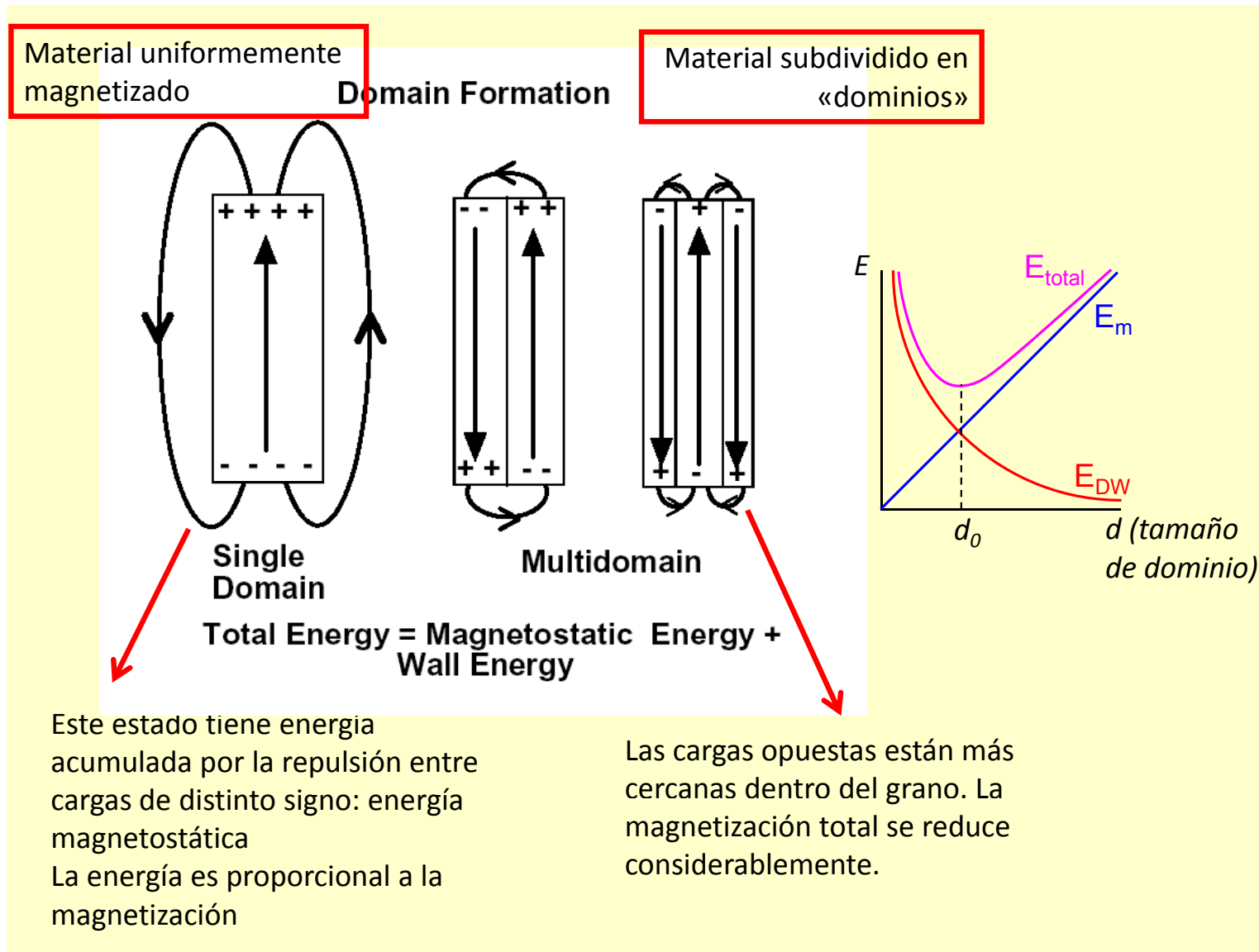
Cada grano busca la configuración de magnetización que minimiza su energía total

Energía de permuta: momentos magnéticos de spin tan paralelos como sea posible

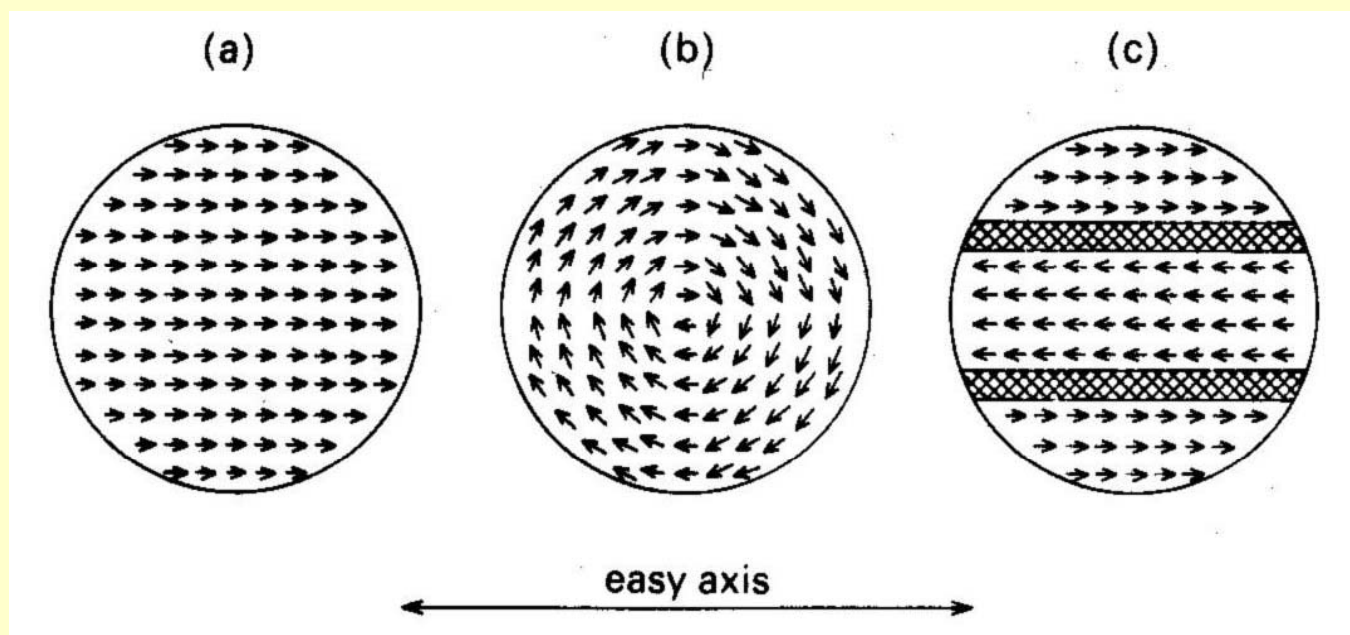
Energía magnetoestática: energía de la partícula debida a su magnetización/momento magnético

Energía anisotrópica: es mínima con la magnetización a lo largo del eje fácil (magnetocristalina, de forma)

Energía de interacción: debida al ángulo entre la dirección de magnetización espontánea de la partícula y el campo aplicado



Estructuras de dominio: minimización de contribuciones de energía magnética



sólo es posible si
la anisotropía es
baja

Paredes de dominio (paredes de Bloch)

Por la energía de intercambio entre átomos adyacentes, el paso de un dominio a otro no es abrupto, sino que se produce gradualmente y en espiral

Fig. 2.8. Progressive spin moment rotation through a domain wall

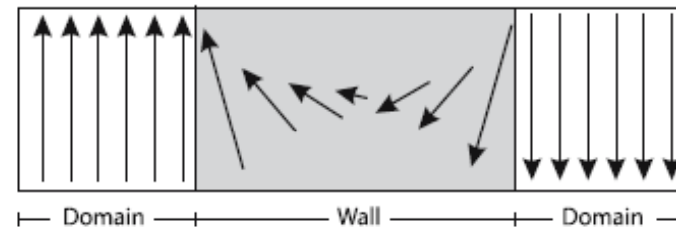
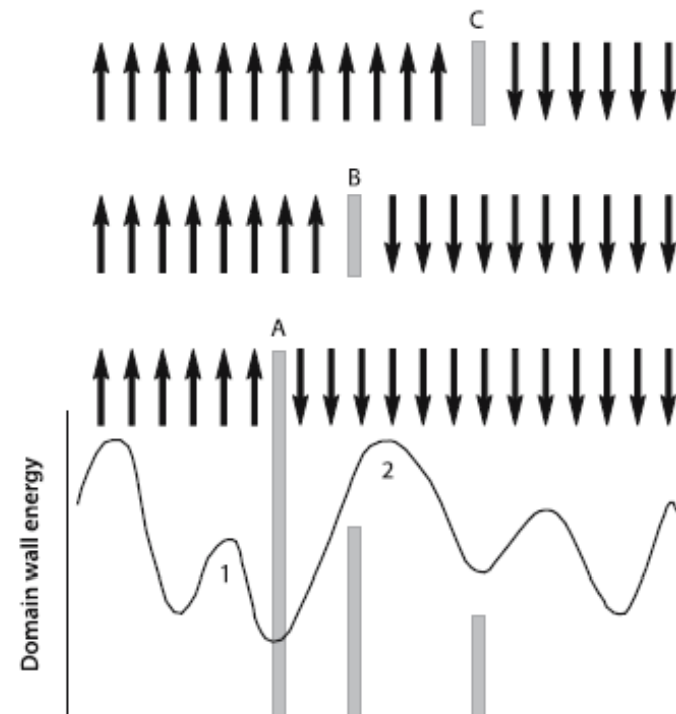
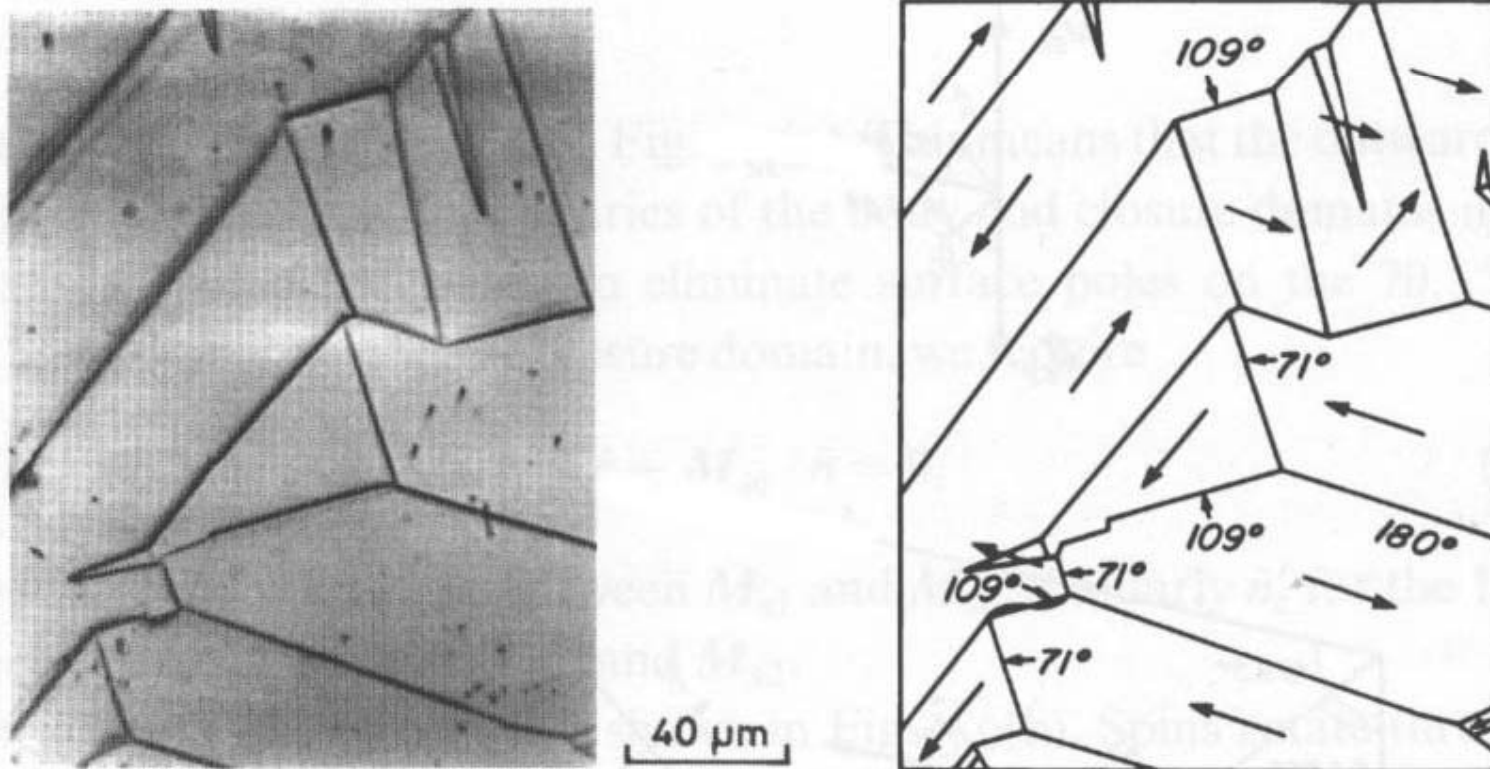


Fig. 2.9. Energy of a domain wall as a function of its position. The wall that separates two domains is in a potential energy minimum (A). An external field causes the left side domain to grow. If the new position of the wall (B) lies between two potential maxima (1-2), then the displacement is reversible and the wall returns to (A) when the field is removed. If the wall crosses a maximum (2), on removal of the field the wall spontaneously migrates to the new minimum (C) (modified after Stacey and Banerjee 1974)

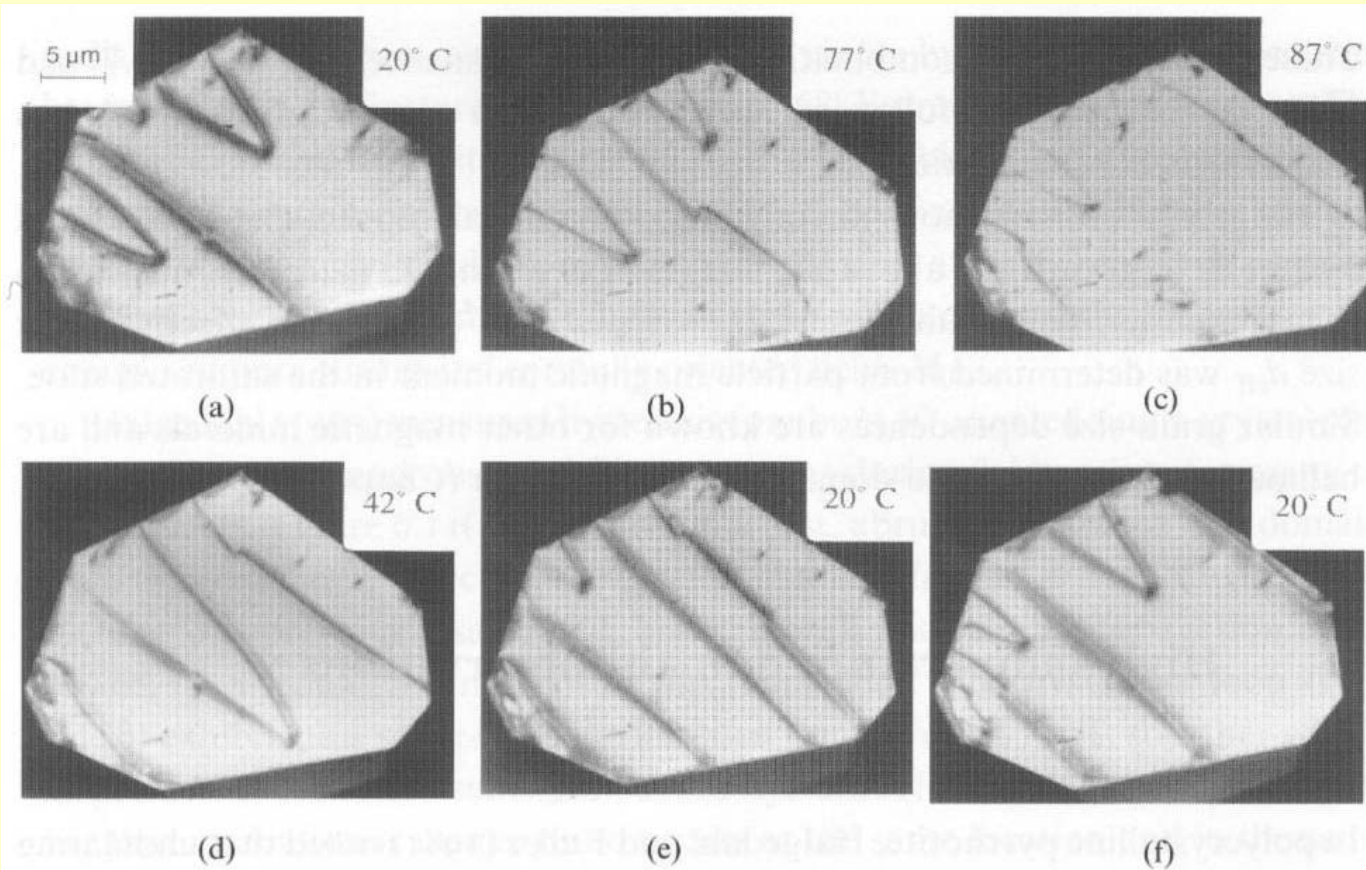


Dominios: patrones de Bitter

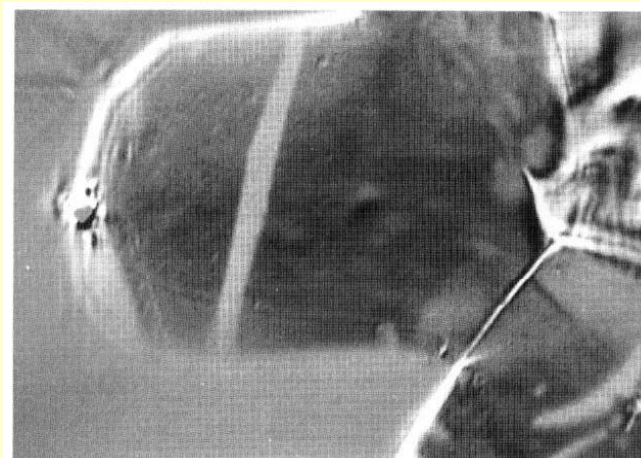
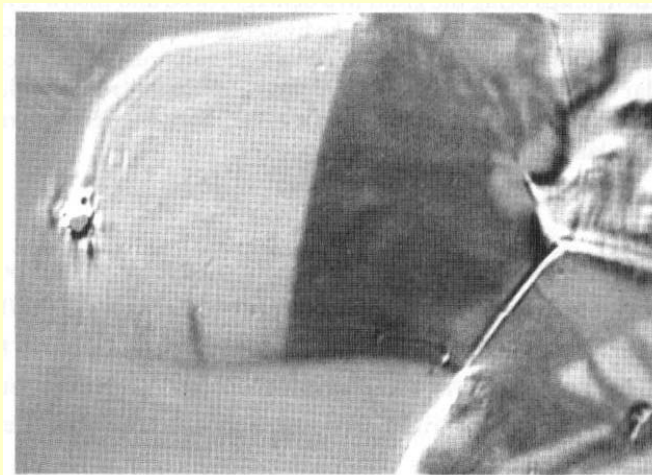
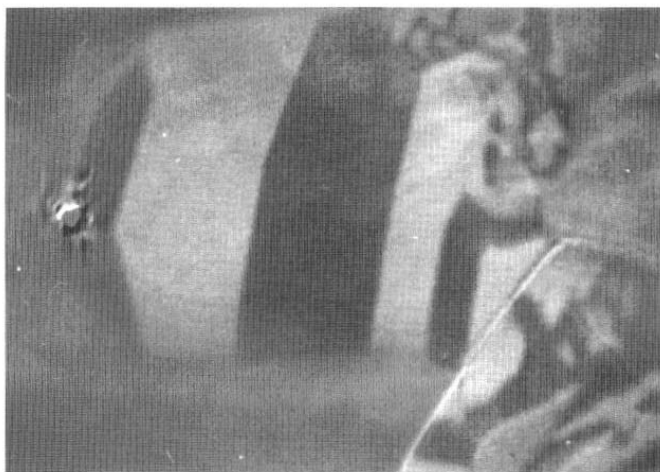
Suspensiones coloidales de partículas ferromagnéticas sobre la superficie del cristal



Bitter patterns vs. temperature



MOKE (magneto-optic Kerr effect)



Si el grano es suficientemente pequeño, la energía requerida para crear una pared de dominio es más grande que la energía magnetoestática.

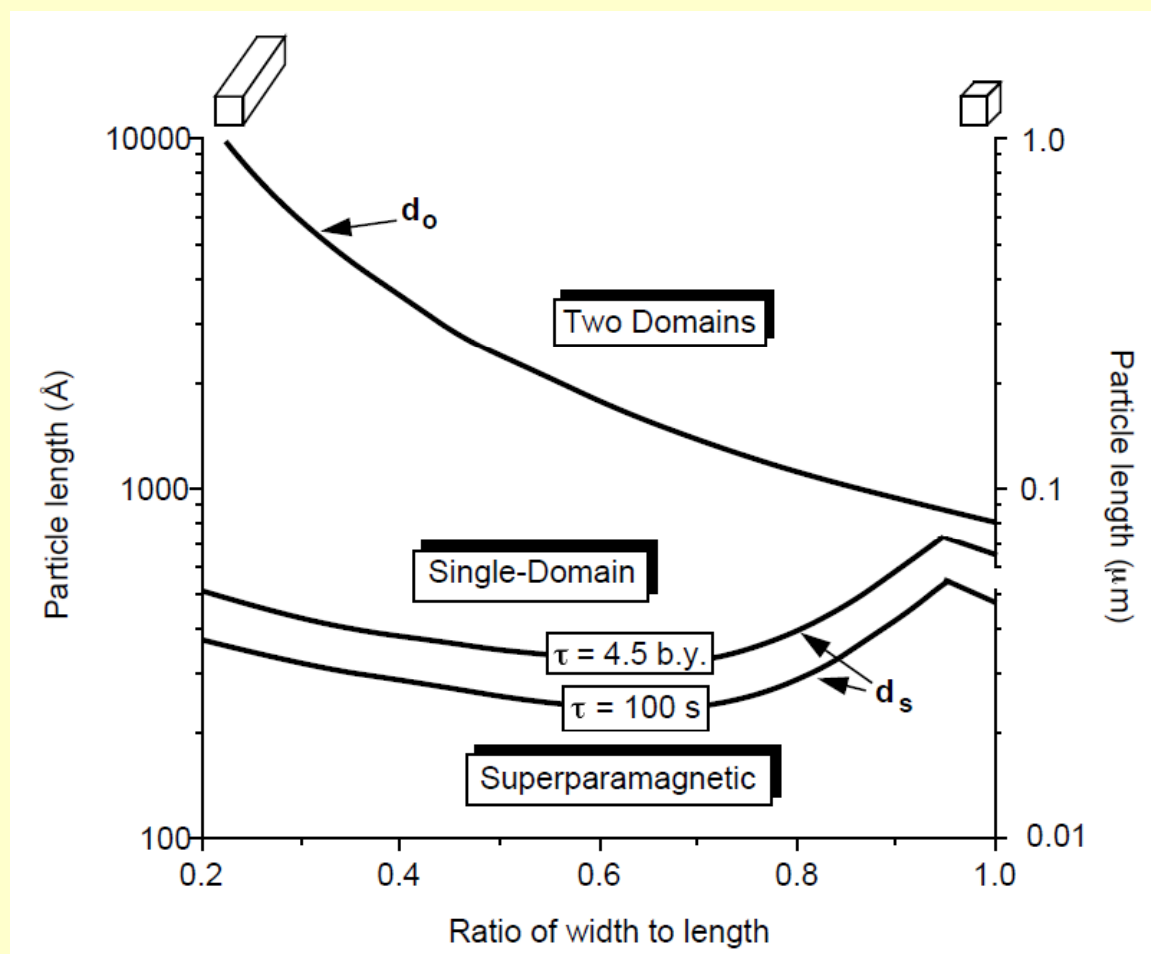
Entonces el grano no se subdivide: grano dominio simple, o single-domain (SD).

El diámetro crítico entre uno y otro comportamiento depende de la forma del grano y de la intensidad de magnetización.

Un mineral con magnetización débil como la hematita, se comporta como SD con tamaños hasta 15 μm .

Un mineral con magnetización fuerte como la magnetita, se comporta como SD con tamaños hasta 0,1 - 1 μm .

(Límites aproximados, dependencia de la forma)



Para paralelepípedos de magnetita a 290K

Contribuciones energéticas a nivel partícula

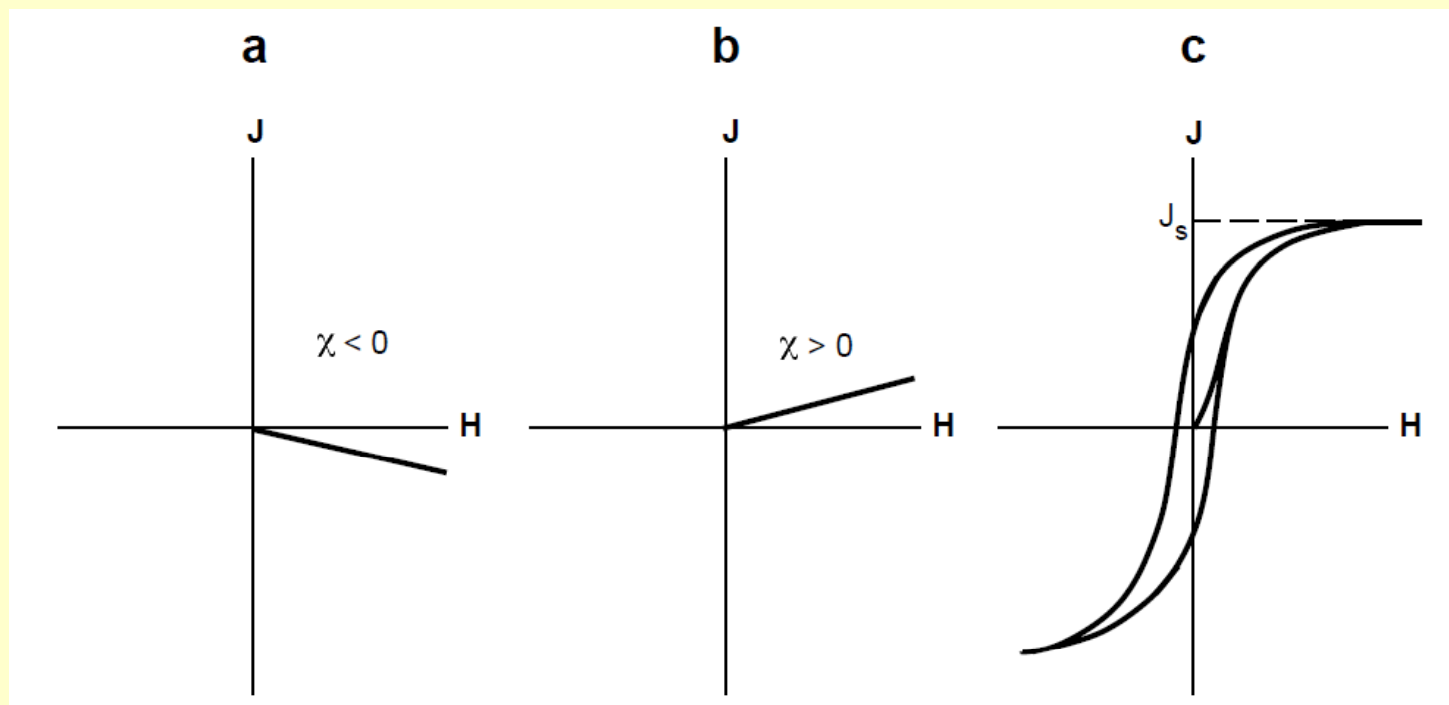
Cada grano busca la configuración de magnetización que minimiza su energía total

Energía de permuta: momentos magnéticos de spin tan paralelos como sea posible

Energía anisotrópica: hematita tiene fuerte anisotropía magnetocristalina, la anisotropía de forma suele dominar en magnetita

Energía magnetoestática: es mínima en granos pequeños, se reduce con división en dominios,

Energía de interacción: debido al ángulo entre la dirección de magnetización espontánea de la partícula y el campo aplicado



Diamagnetismo

Paramagnetismo

Ferromagnetismo

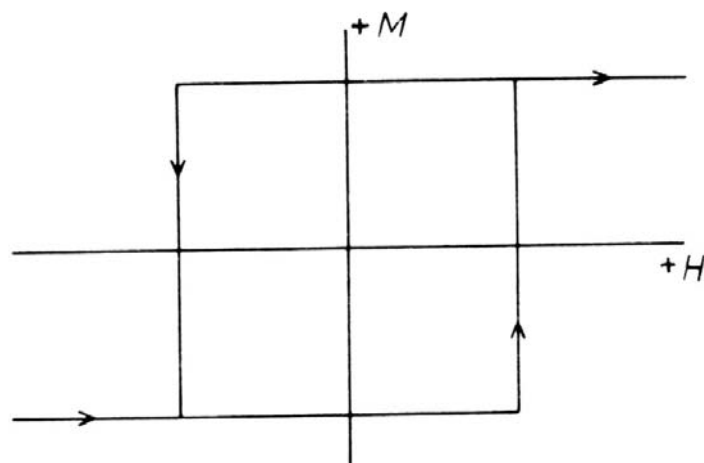
$$\kappa = J/H$$

$$J = \kappa H$$

Histéresis

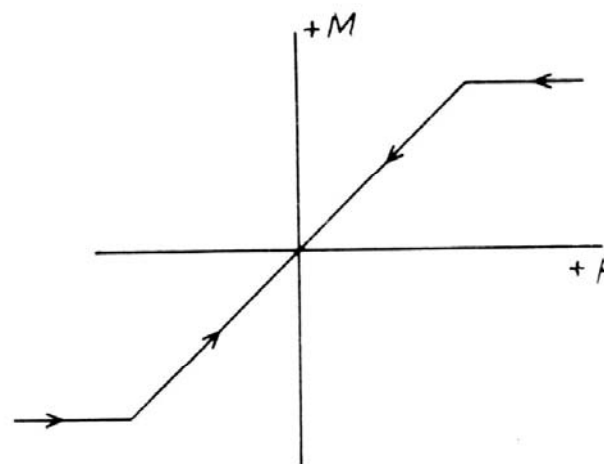
*(susceptibilidad no depende
linealmente del campo)*

Histéresis de partículas SD



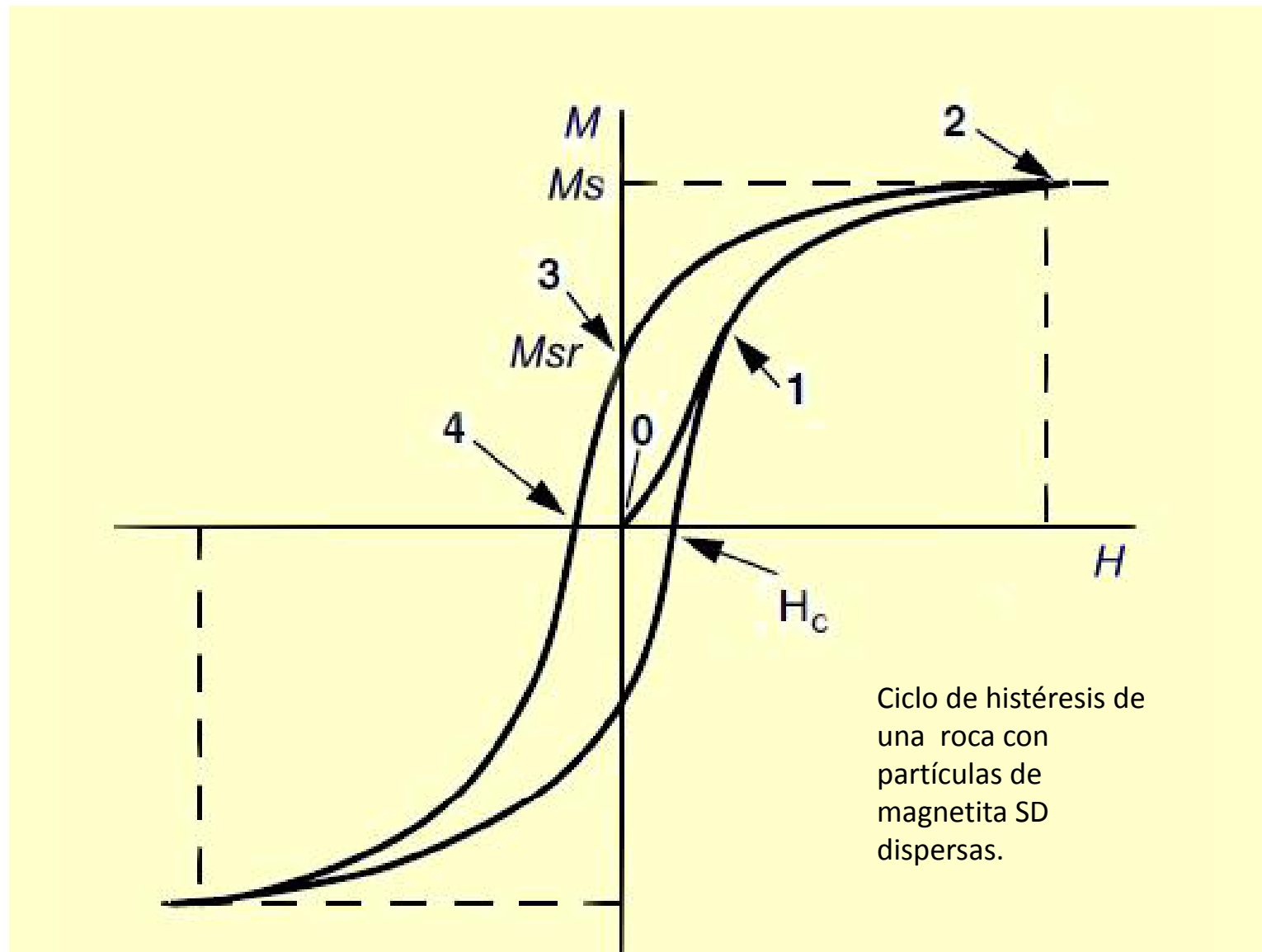
(a)

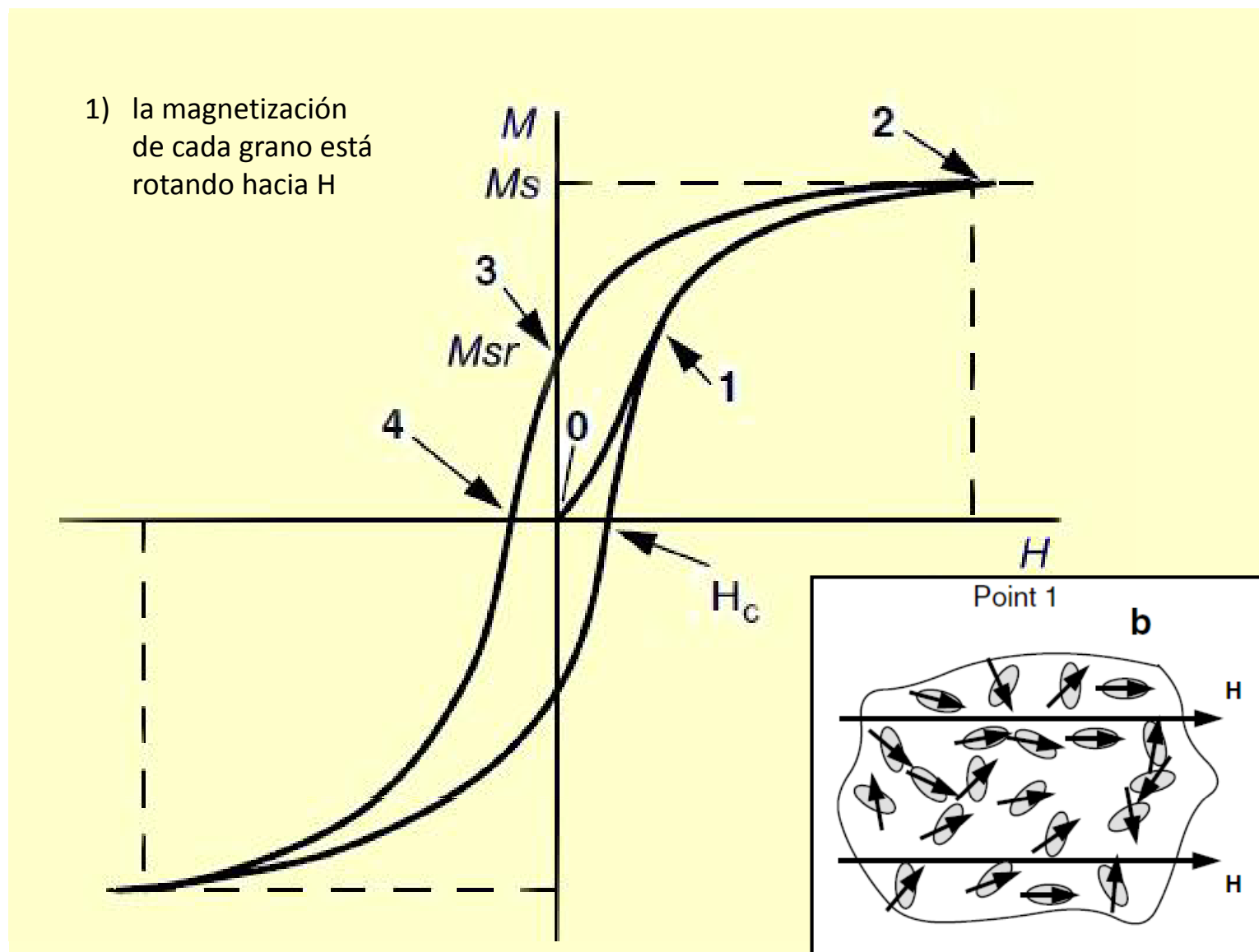
En la dirección fácil

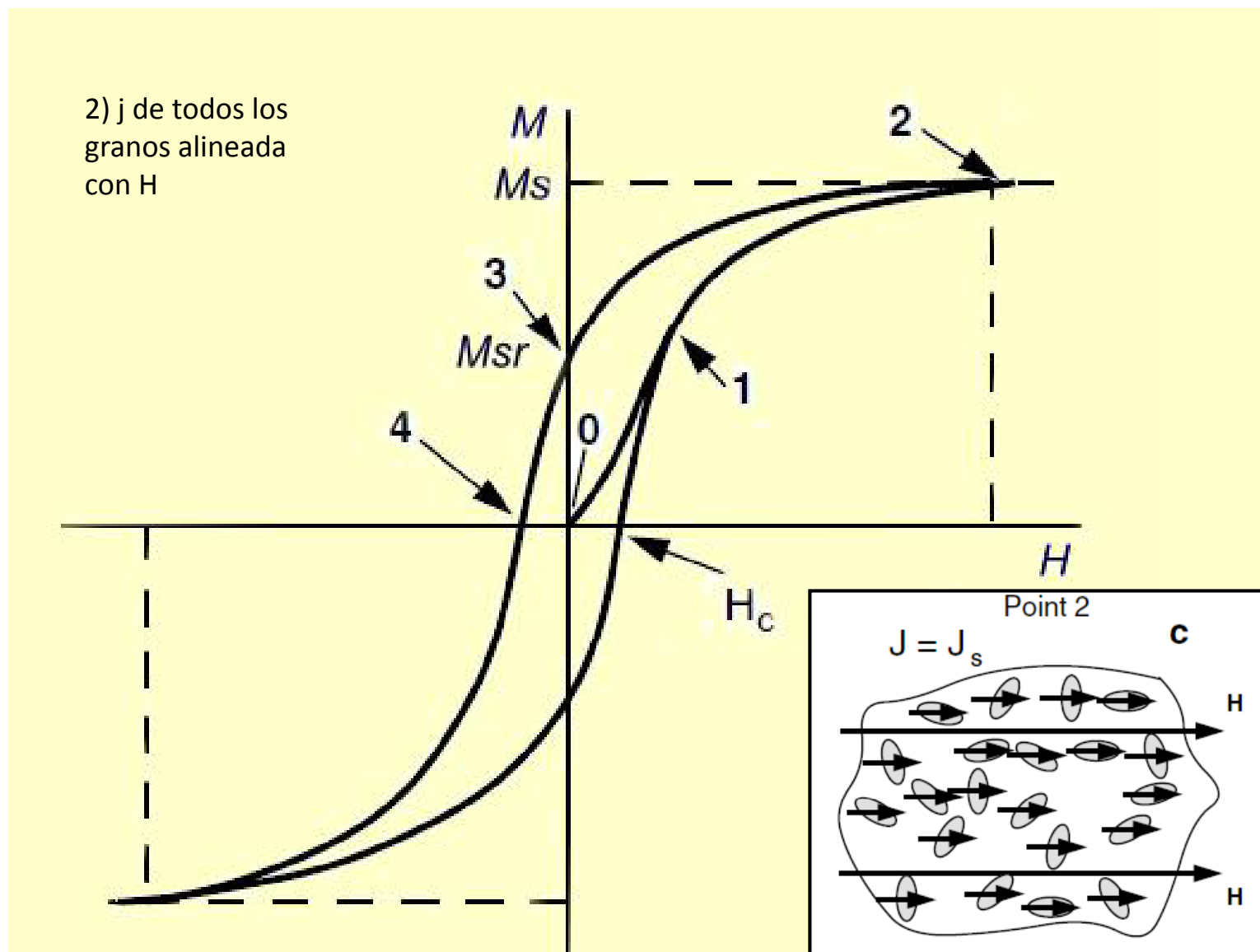


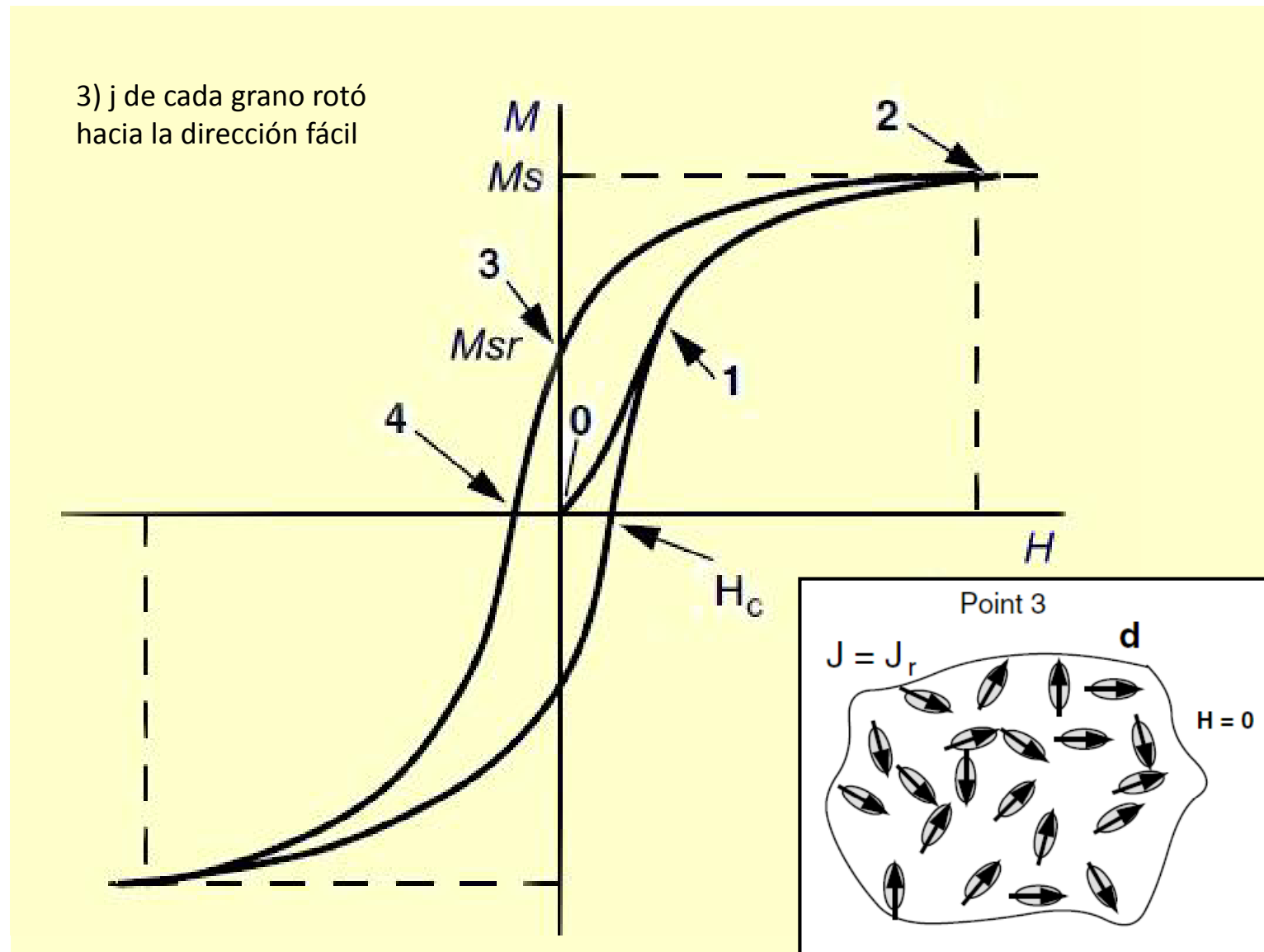
(b)

En la dirección difícil

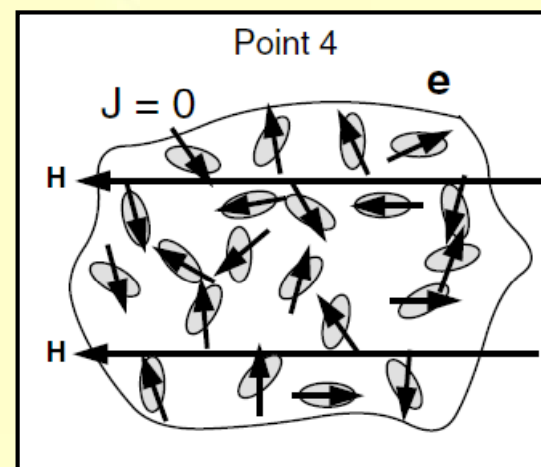
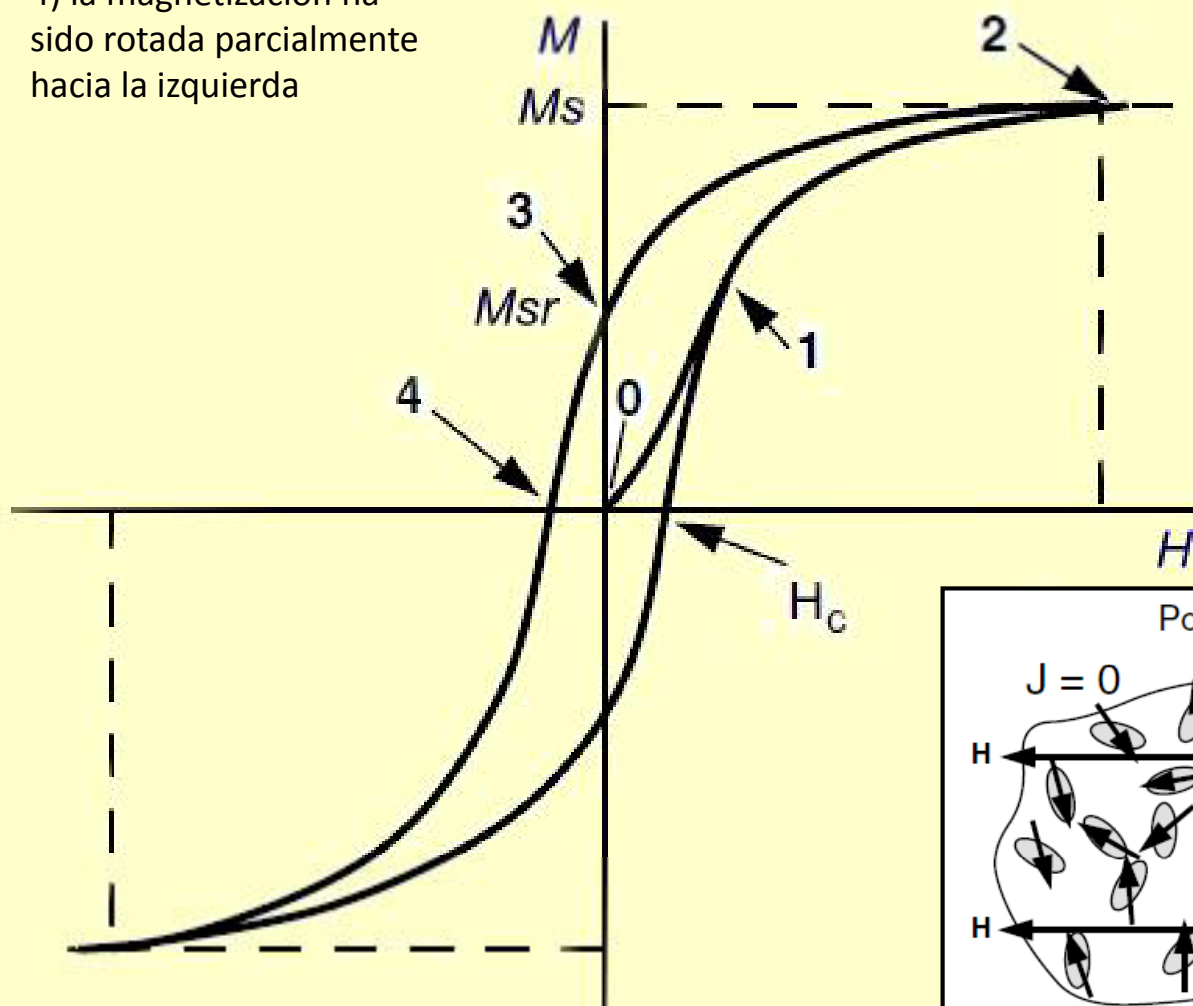




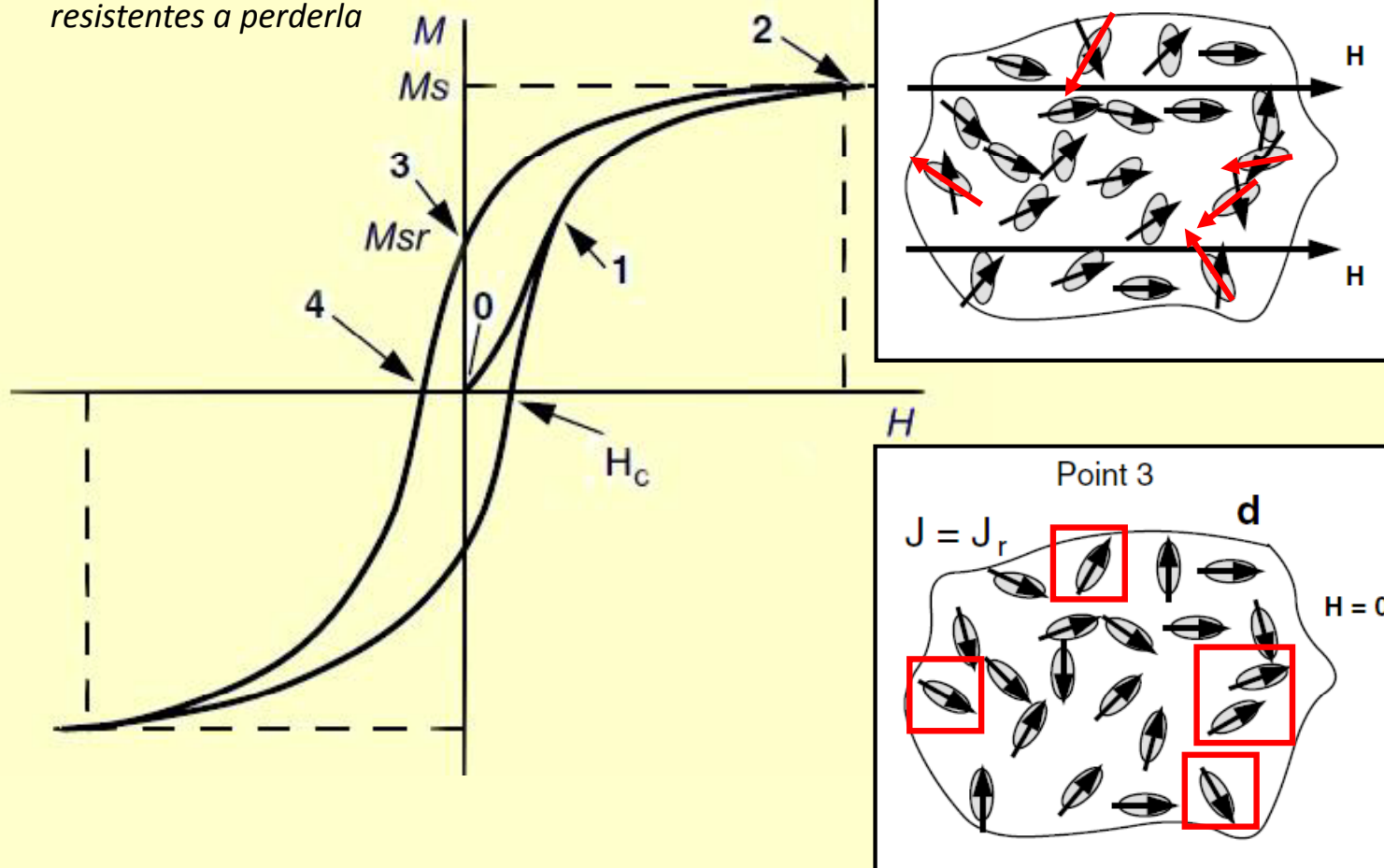


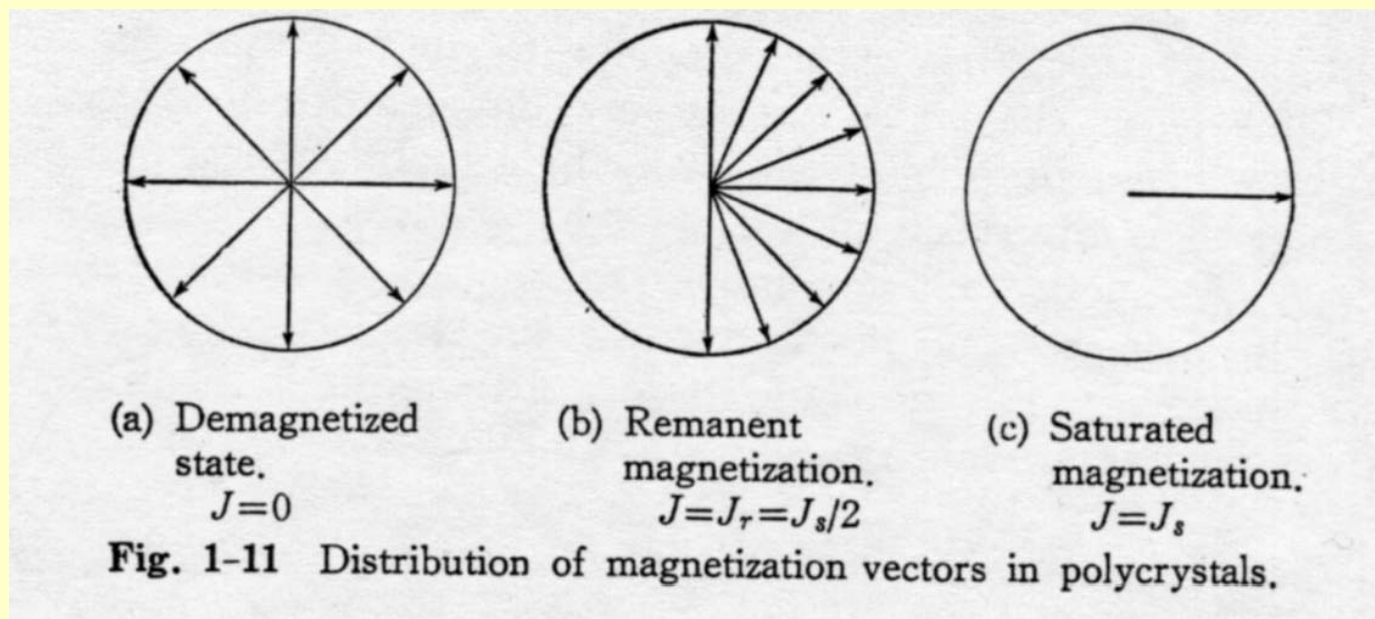


4) la magnetización ha sido rotada parcialmente hacia la izquierda



*Partículas eficientes para
adquirir magnetización
($M_r = 0,5 M_s$!) y
resistentes a perderla*

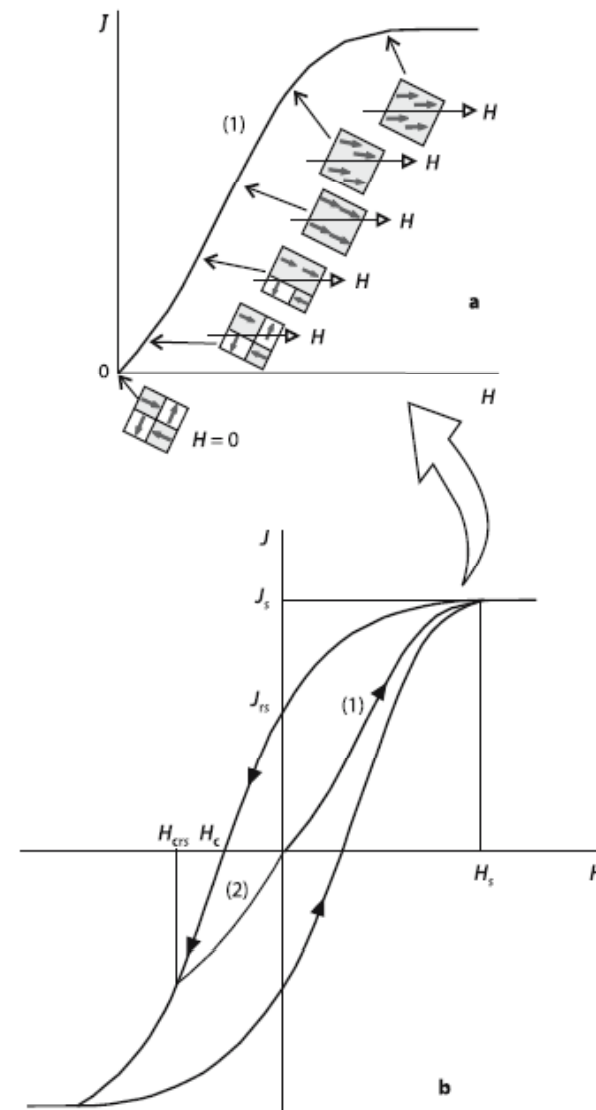
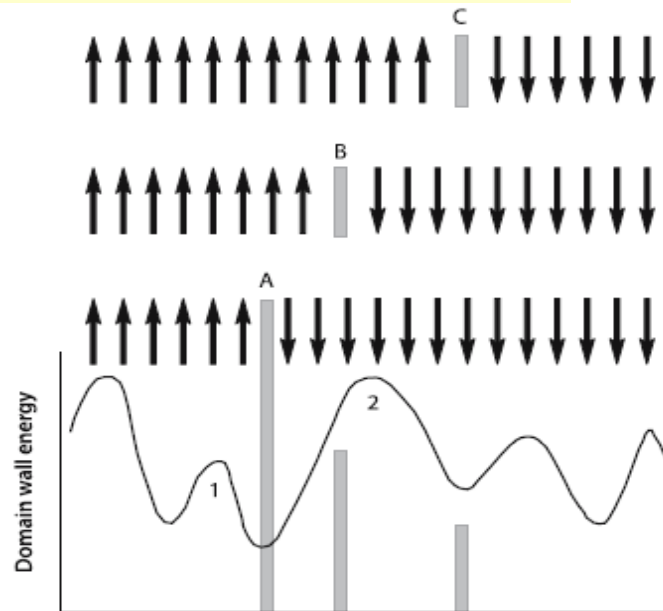




Nagata, 1961

Histéresis de partículas MD

Fig. 2.14. Magnetic hysteresis; a the domains whose magnetization is concordant with an increasing field H first grow at the expense of the others, then rotate their magnetization in the direction of H (Segment 1 of the hysteresis curve); b hysteresis loop. Symbols: H_s , J_s = saturation field and magnetization; J_r = saturation remanence; H_c = coercive force; H_{crs} = coercivity of saturation remanence. H_{crs} is the field that must be applied so that, after the removal of the field itself (Segment 2 of the curve), $J = 0$. If saturation is not reached, the loop is smaller and the remanence and coercivity values are lower, $J_r < J_s$ and $H_{cr} < H_{crs}$.

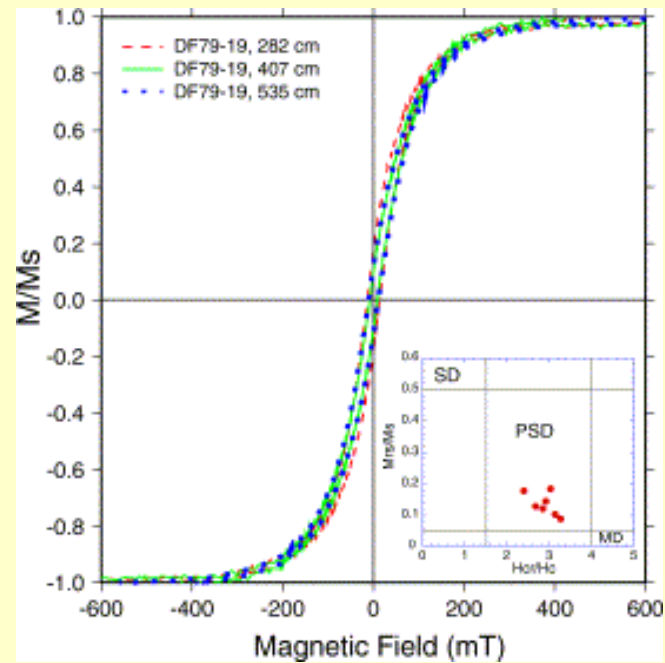


Fuerza coercitiva o Coercitividad

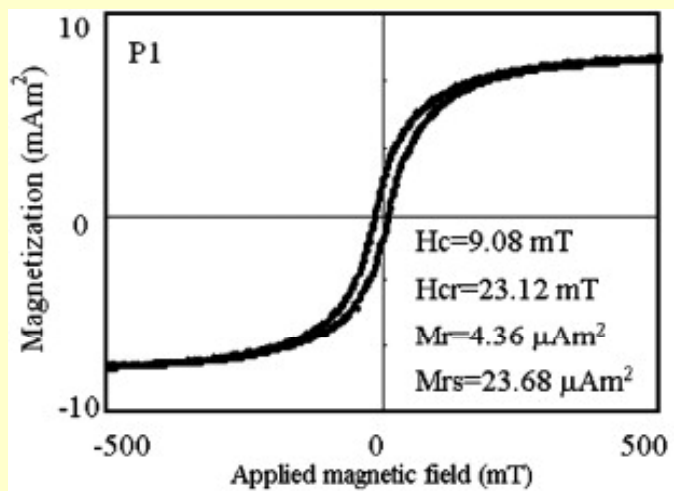
Está dada por la intensidad del campo magnético que hace falta para superar cierta barrera de energía para la rotación de la magnetización.

En el caso de las partículas multidominio, la dirección de magnetización se ajusta a la del campo externo a través de movimientos de las paredes de dominio. Las energías involucradas son menores.

Las fuerzas coercitivas de las partículas multidominio son bajas.



Los ciclos de histéresis donde dominan los granos MD son muy angostos, H_c muy baja
 $M_r \ll M_s$

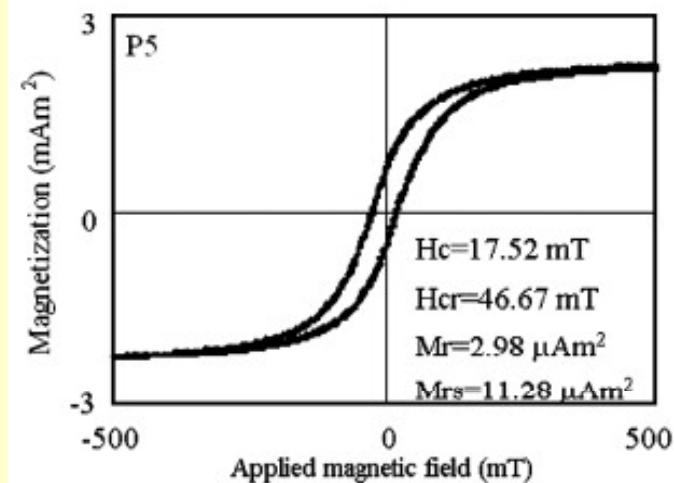


Ningun caso es puro MD, pero probable mayor incidencia en el caso 1

A mayor MD

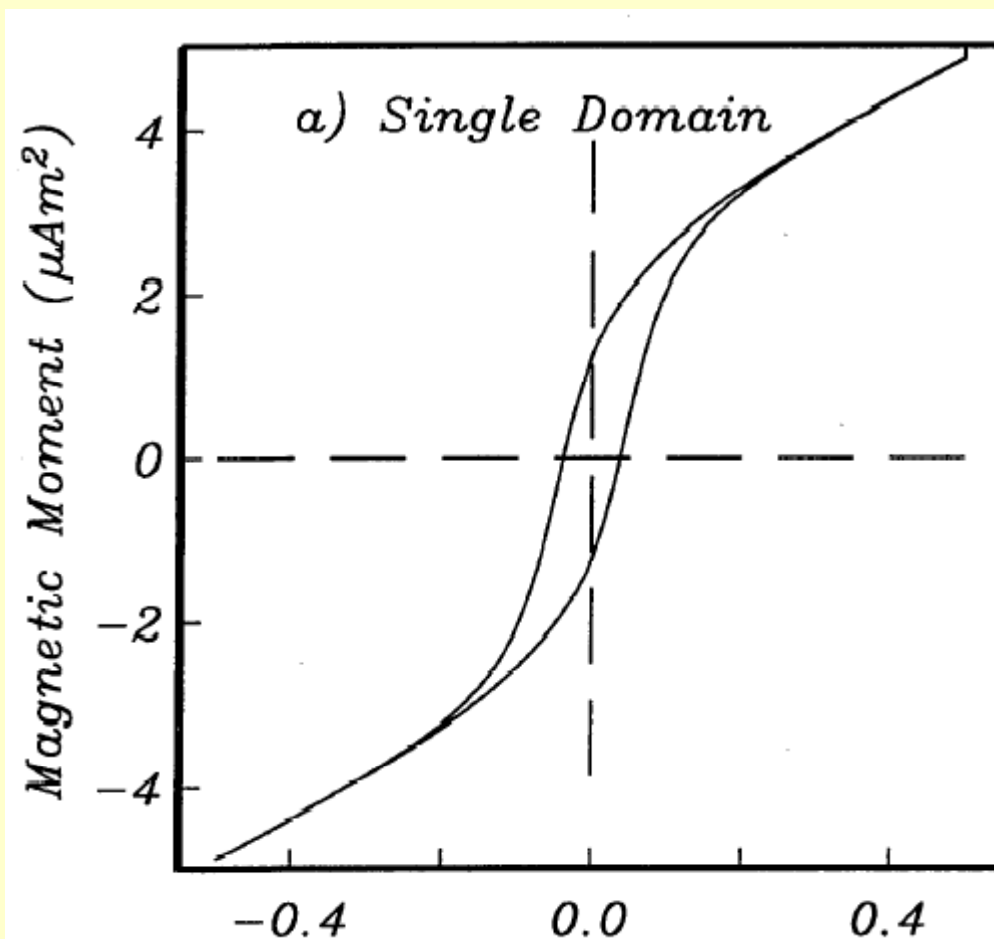
< H_c

> M_s



< M_r/M_s

Ferromagnetismo y paramagnetismo



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 depositacional
 - VRM: magnetización remanente viscosa
 - IRM: magnetización remanente isotérmica

Contribuciones energéticas a nivel partícula

Cada grano busca la configuración de magnetización que minimiza su energía total

Energía de permuta: momentos magnéticos de spin tan paralelos como sea posible

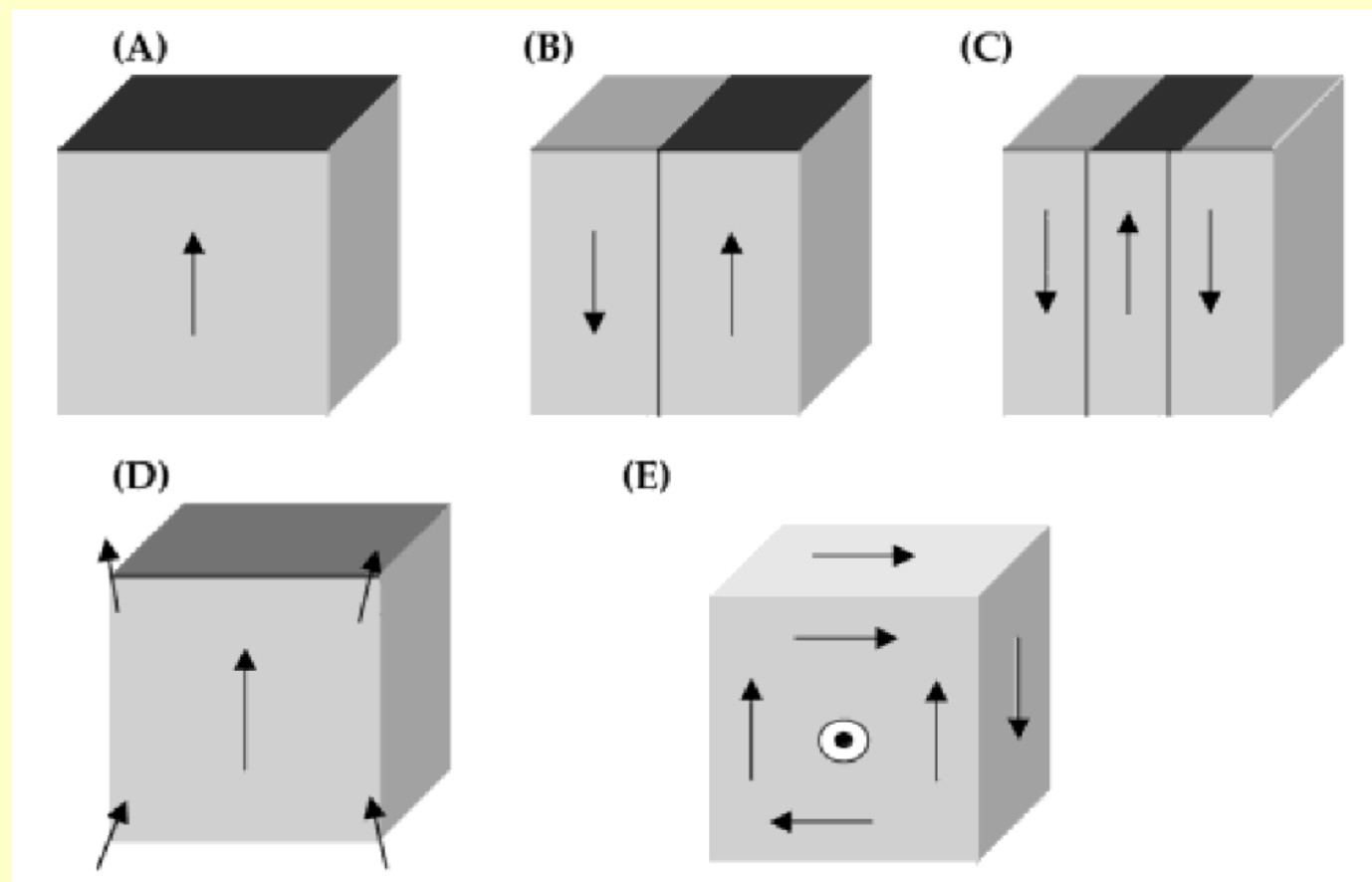
Energía magnetoestática: energía de la partícula debida a su magnetización/momento magnético

Energía anisotrópica: es mínima con la magnetización a lo largo del eje fácil (magnetocristalina, de forma)

Energía de interacción: debida al ángulo entre la dirección de magnetización espontánea de la partícula y el campo aplicado

Estructuras de dominio y tamaño de grano

- De menor a mayor:
 - (Superparamagnetismo)
 - Dominio simple
 - (Estado flor)
 - (Estado vortex)
 - Pseudo-dominio simple
 - Multidominio



En a) dominio simple uniformemente magnetizado. d) estado flor, dominio simple en el que la energía se minimiza por la divergencia de los espines hacia los vértices del dominio. e) estado vortex, reemplaza al estado flor y tiene menor energía por la configuración cerrada en las tres dimensiones. De Miller y Drillon 2006.

Límites superior e inferior para el estado dominio simple (SD) en granos equidimensionales a 20°C

Mineral	Superparamagnetic size, d_s (μm)	Critical single-domain size, d_0 (μm)
Iron	0.008 ¹	0.023 ¹
	0.026 ²	0.017 ²
Magnetite	0.025–0.030 ^{3–5}	0.05–0.06 ^{4,6} 0.079–0.084 ^{7,8}
Maghemite		0.06 ⁹
Titanomagnetite ($x = 0.55$ – 0.6)	0.08 ¹⁰	0.2 ¹⁰ ≈ 0.6 ^{11,12}
Titanomaghemite ($x = 0.6, z = 0.4$)	0.05 ¹²	0.75 ¹²
($x = 0.6, z = 0.7$)	0.09 ¹²	2.4 ¹²
Hematite	0.025–0.030 ^{13,14}	15 ^{14,15}
Pyrrhotite		1.6 ¹⁶

de Dunlop y Özdemir, 1997

Energía térmica

Provoca agitación térmica en la estructura cristalina.

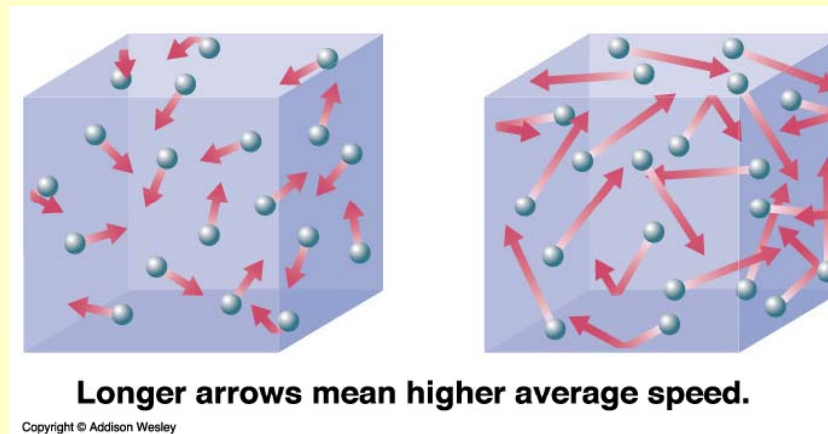
Agitación térmica: Movimiento aleatorio de átomos y moléculas en cualquier objeto que está a temperaturas por encima de cero absoluto

Debido a la energía térmica, las direcciones de los momentos magnéticos oscilan rápida y aleatoriamente

$$E = k T$$

Donde T = temperatura en grados Kelvin

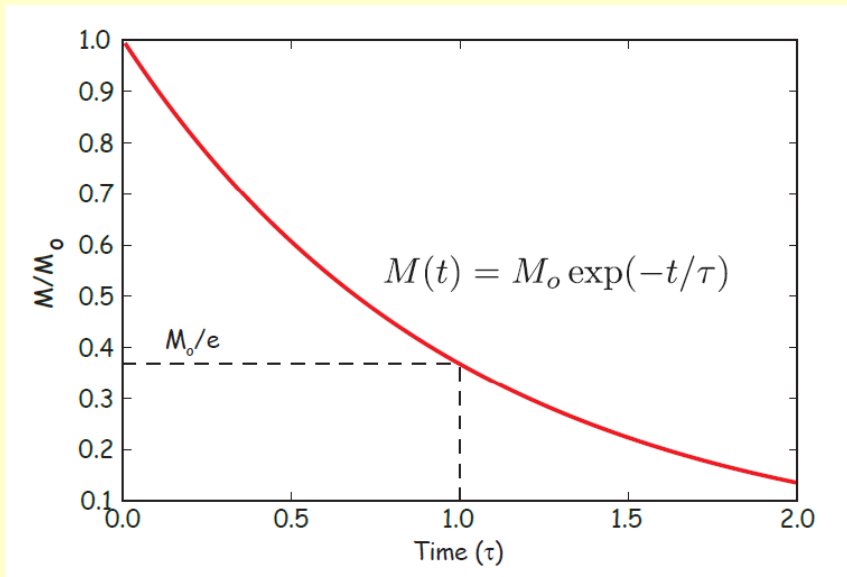
k = constante de Boltzmann ($1,38 \times 10^{-23}$ J/K)



En términos estadísticos, la probabilidad de encontrar una partícula con suficiente energía como para vencer la energía anisotrópica (y rotar su magnetización) es

$$P = \exp\left(\frac{-E_a}{E_T}\right)$$

Relajación magnética



Decaimiento de la remanencia en
ausencia de campo

τ : tiempo de relajación

Consideremos un conjunto de partículas uniaxiales alineadas, magnetizadas en la dirección del eje fácil.

Una vez removido el campo, la fluctuación térmica puede hacer que la dirección de cada partícula experimente una especie de rotación browniana en contra de la barrera energética anisotrópica.

Para todo material magnetizado existe un tiempo en el cual la magnetización remanente se habrá reducido exponencialmente

Relajación magnética

El tiempo de relajación depende de la altura de la barrera energética, la cantidad de energía térmica, y del mecanismo por el cual la energía térmica se transforma en energía rotacional.

Néel (1949) demostró que el mecanismo es la deformación elástica de la partícula debido a la agitación térmica

$$\tau = \frac{1}{C} \exp \frac{[\text{anisotropy energy}]}{[\text{thermal energy}]} = \frac{1}{C} \exp \frac{[Kv]}{[kT]}$$

$$h_c = 2K / j_s$$

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

Ecuación de Néel

Ecuación de Néel

$$h_c = 2K / j_s$$

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

C: «factor de frecuencia», aprox. 10^{-10} por seg

v: volumen de la partícula

h_c : fuerza coercitiva

j_s : magnetización de saturación

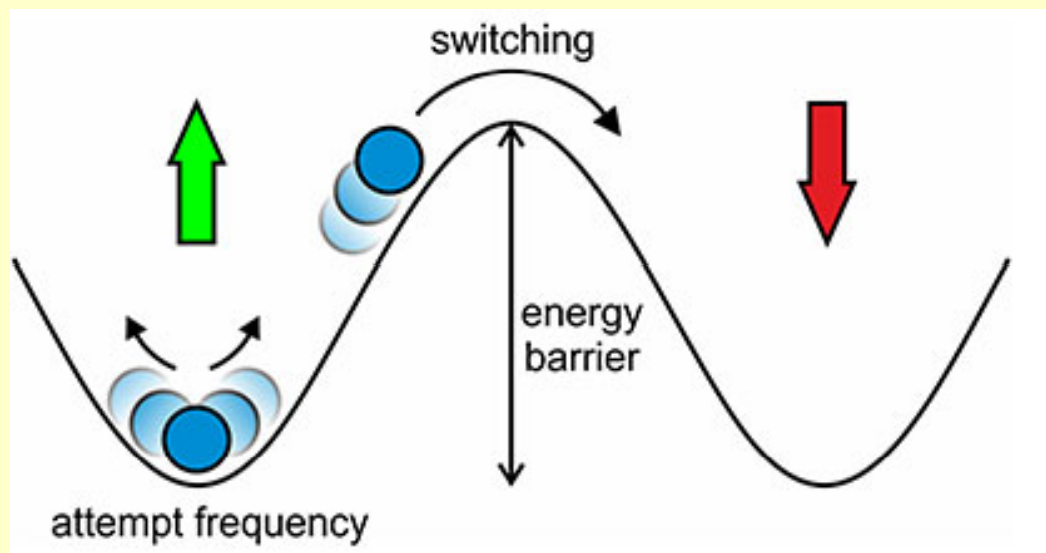
k: constante de Boltzmann

T: temperatura absoluta

Superparamagnetismo

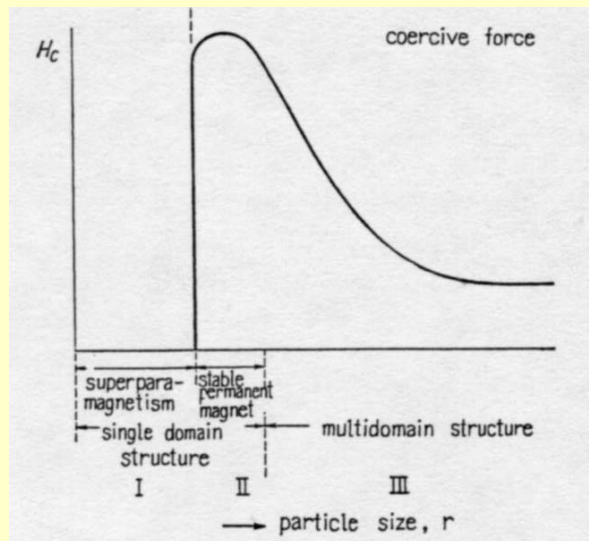
$$\tau = \frac{1}{C} \exp\left(\frac{v h_c j_s}{2kT}\right)$$

Si el volumen de la partícula está por debajo de cierto volumen crítico, el tiempo de relajación estará en la escala de los tiempos de laboratorio



Se llama “Superparamagnéticos” (SP) a los granos minerales SD cuyos tiempos de relajación son pequeños.

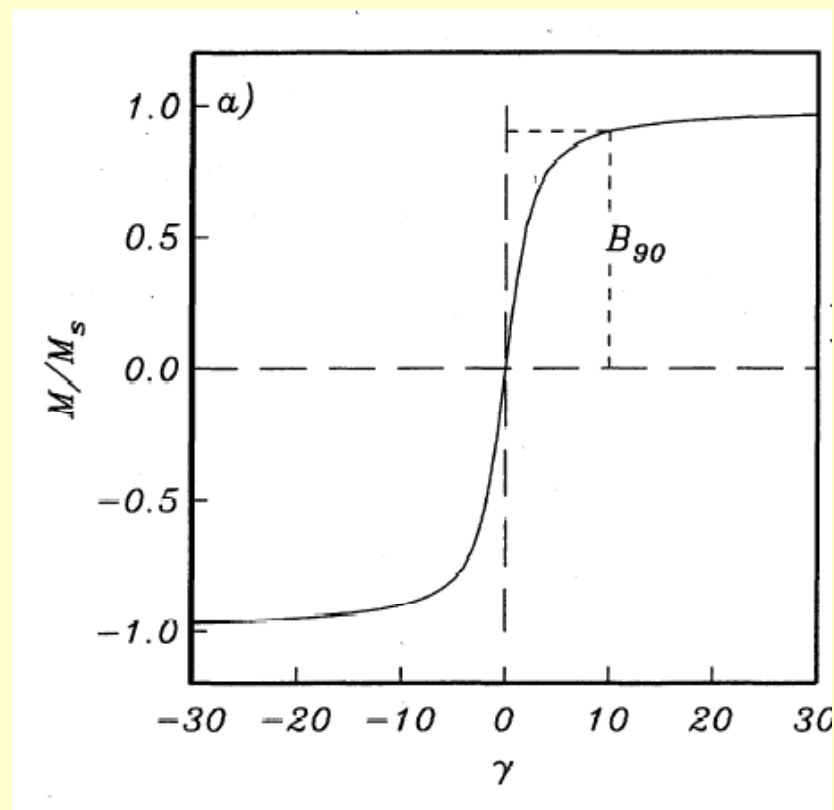
Los granos adquieren remanencias espontáneas pero las pierden casi inmediatamente.



Por encima del volumen crítico, el tiempo de relajación aumenta exponencialmente. *La remanencia de granos SD es estable por tiempos geológicos.*

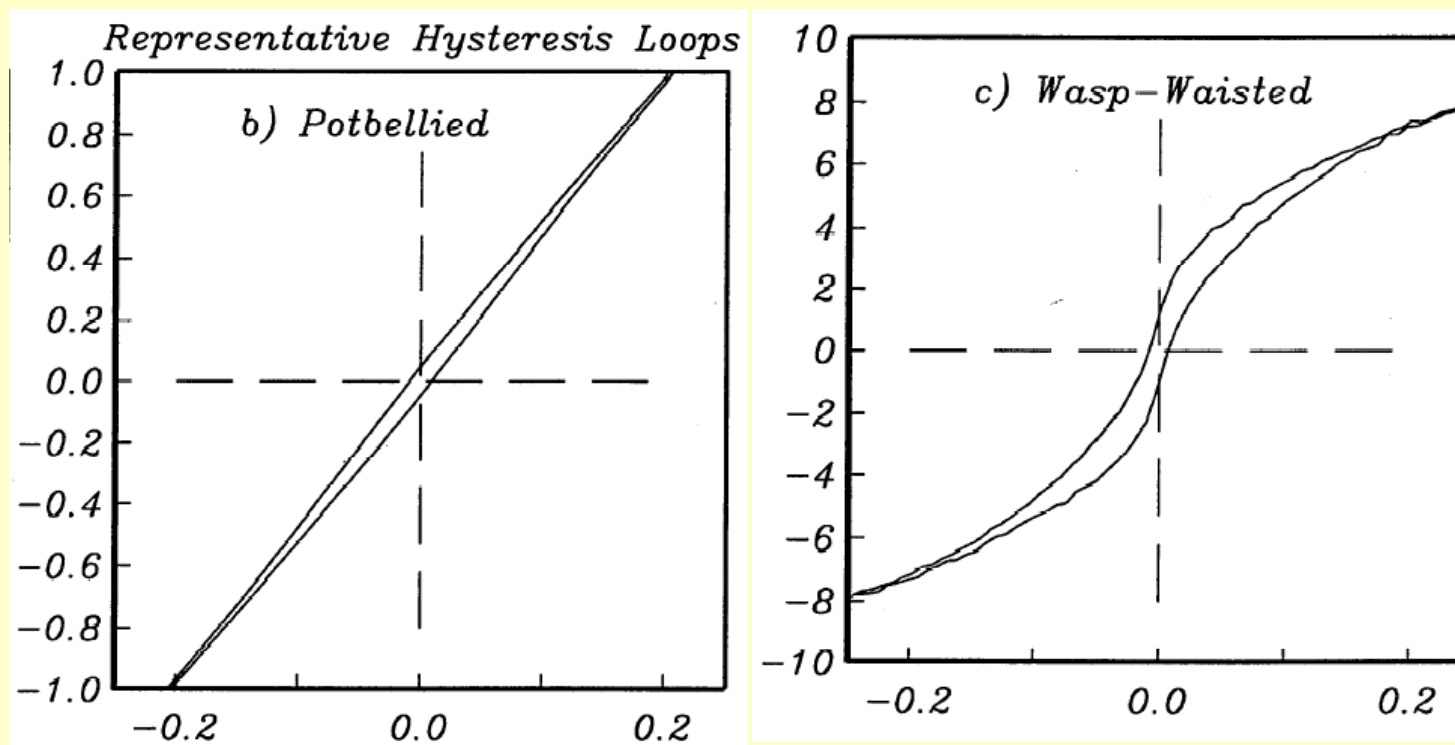
Nagata, 1961. Esquema de la variación en la fuerza coercitiva

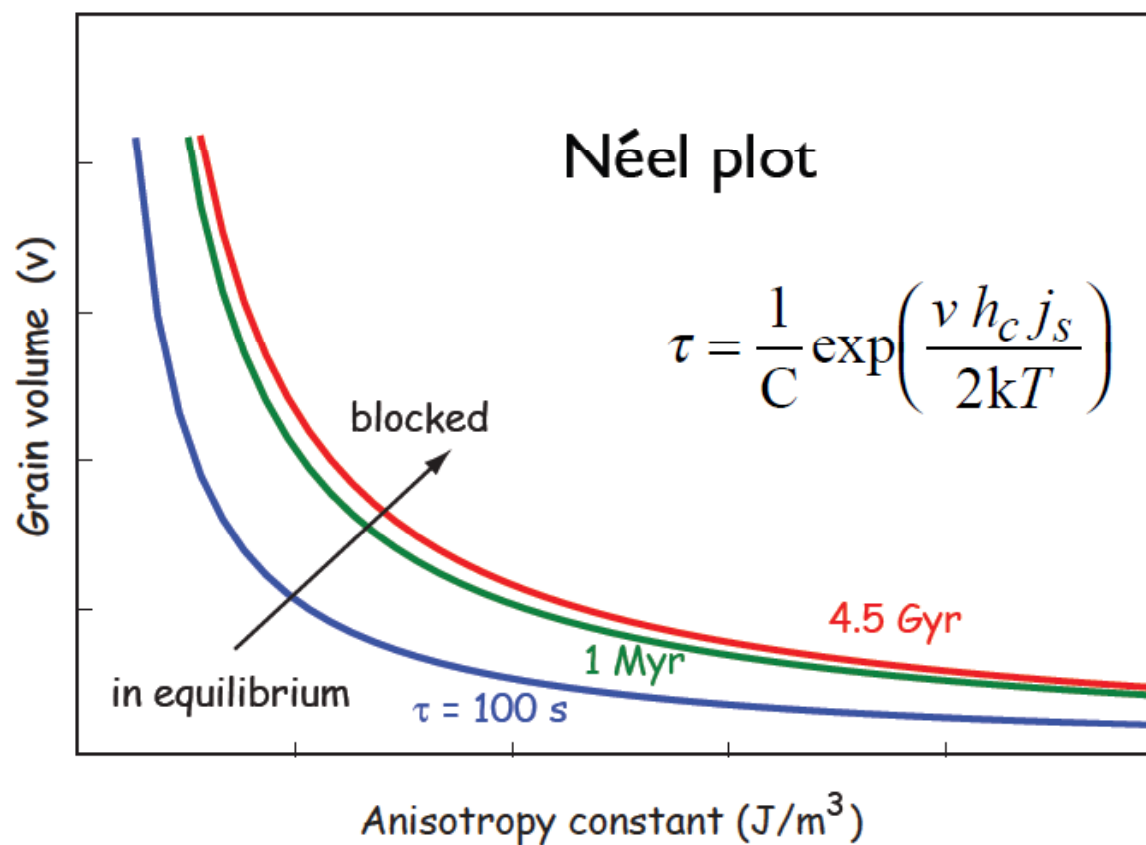
Superparamagnetismo



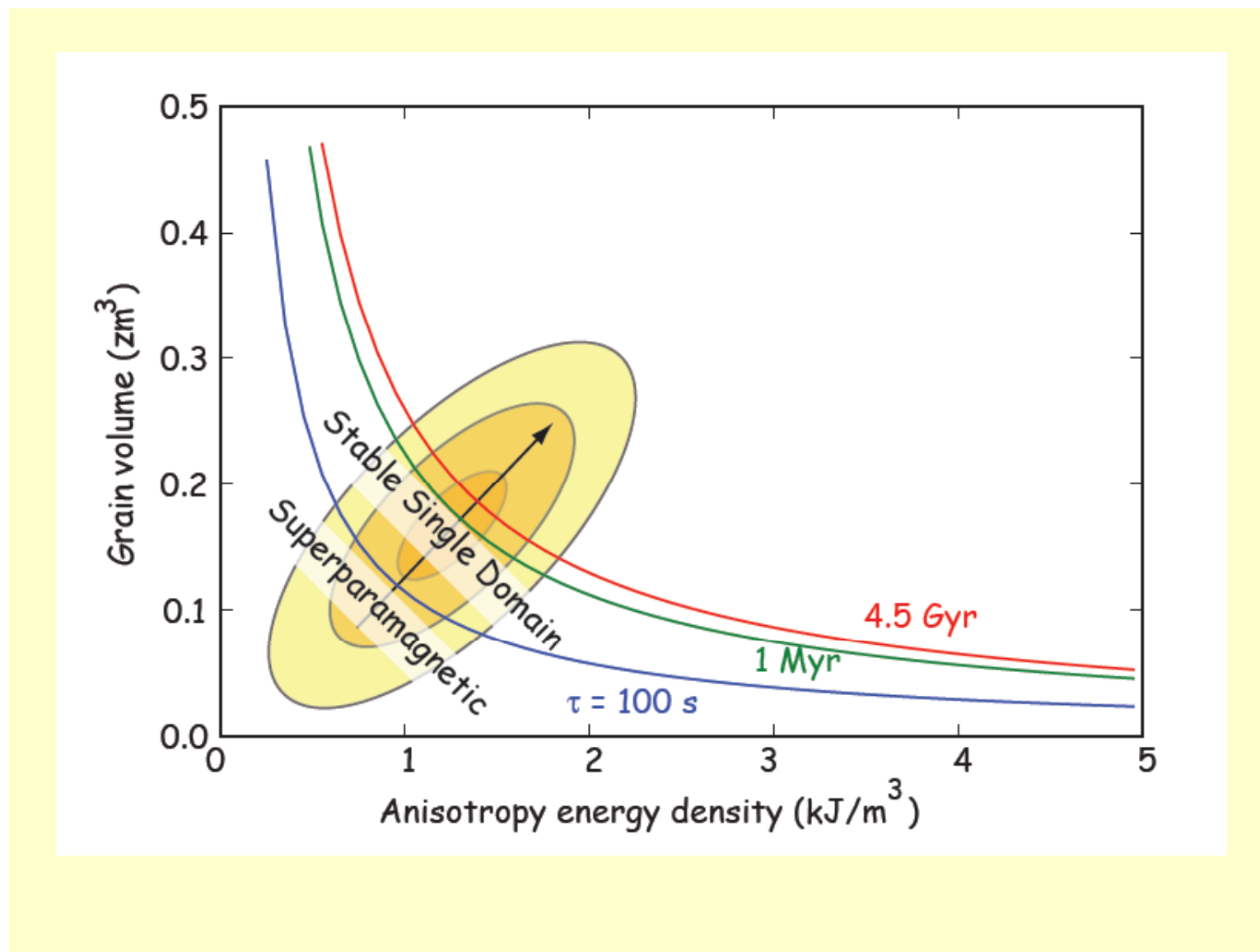
No hay histéresis

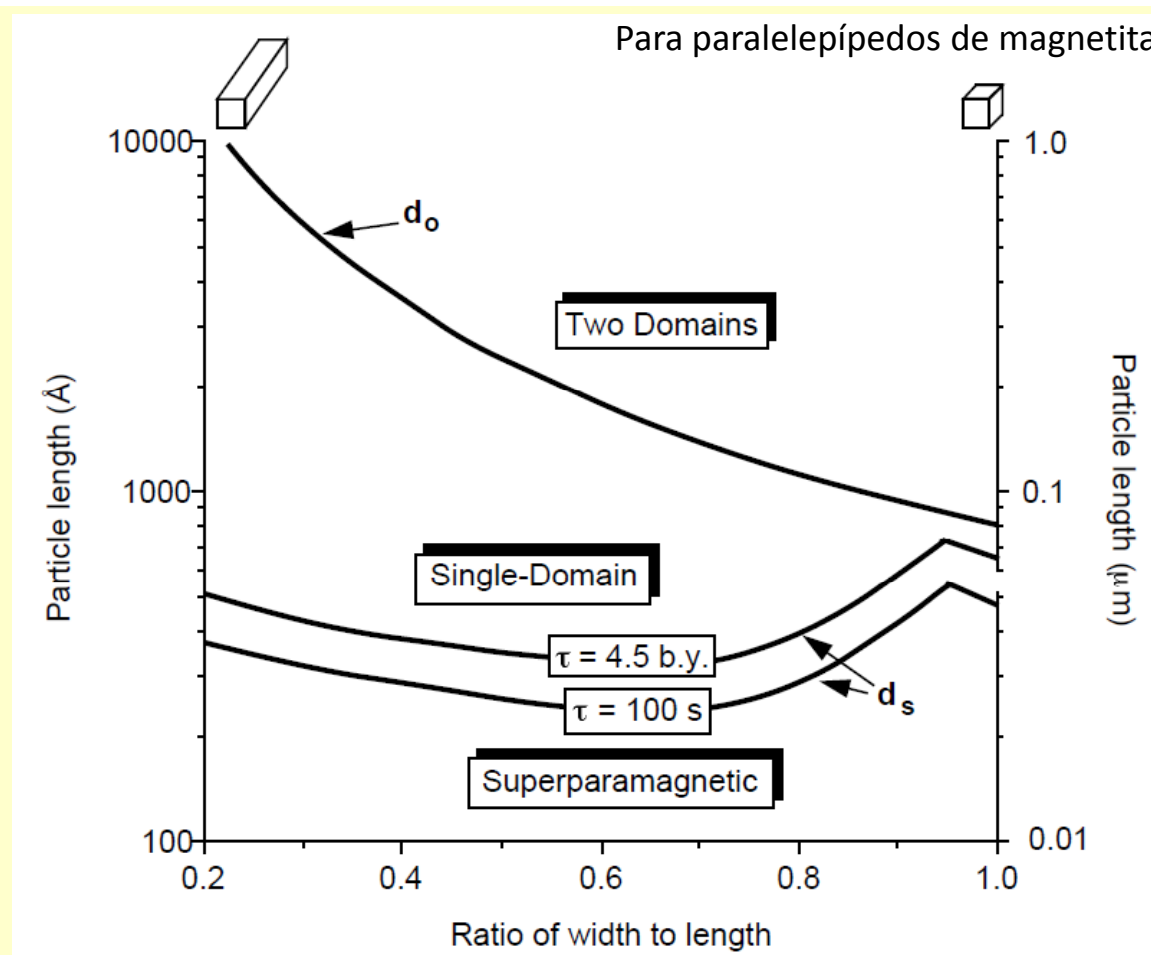
SP + SD loops





Hipérbolas de igual producto volumen * constante anisotrópica
 «en equilibrio» implica superparamagnético. «Tiempo de relajación crítica»
 es de 100 segundos en experimentos de laboratorio



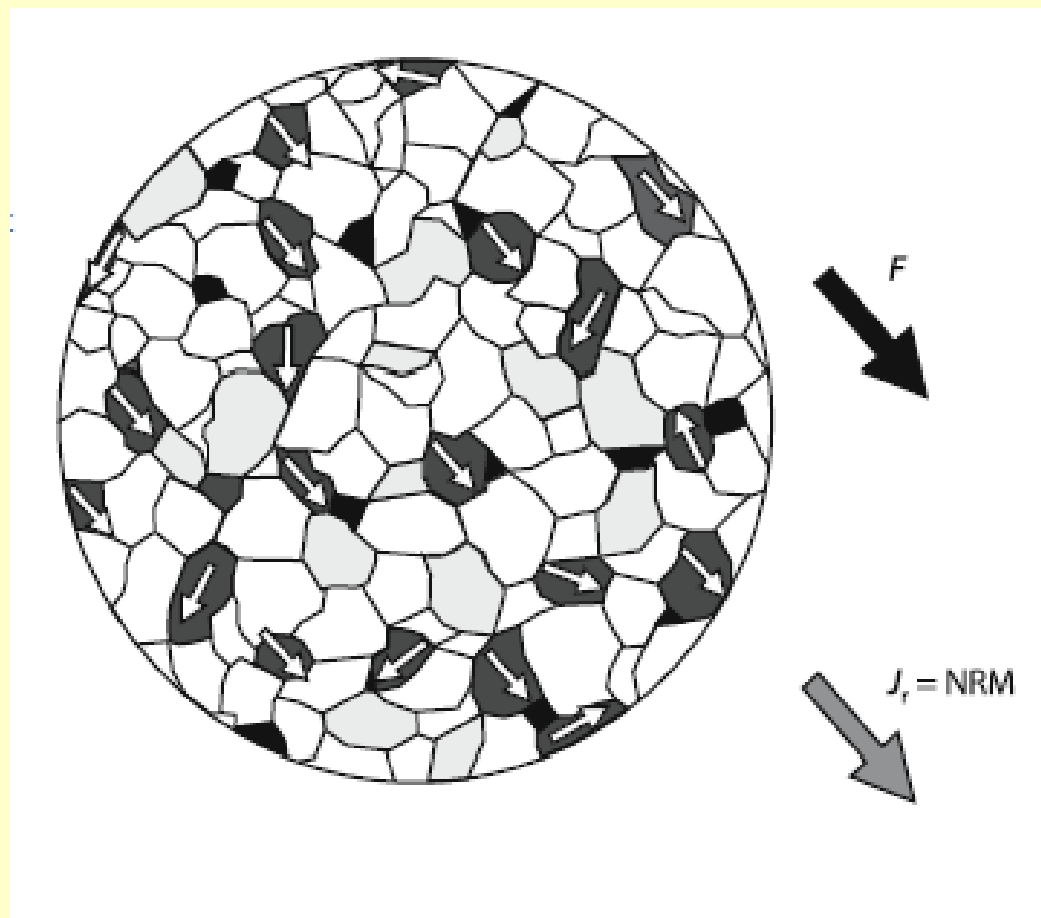


Por encima del volumen crítico, el tiempo de relajación aumenta exponencialmente. *La remanencia de granos SD es estable por tiempos geológicos.*

Para hematita, el rango de tamaño SD va desde 0,05 μm hasta 15 μm . Eso implica que un gran porcentaje de granos de hematita estará en el rango SD.

Para magnetita, el rango SD llega hasta 0,1 – 1 μm , dependiendo de la forma.

Los granos SD son portadores efectivos de remanencia magnética, porque tienen alta eficiencia J_r/J_s , alta fuerza coercitiva, largo tiempo de relajación.



Los granos ferromagnéticos de la roca adquieren su magnetización espontánea a lo largo de la dirección fácil más cercana a la dirección del CMT. La resultante es el MRN.

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

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 depositacional
 - VRM: magnetización remanente viscosa
 - IRM: magnetización remanente isotérmica

¿Cómo preservar la dirección del campo magnético antiguo?

Ya sabemos cómo pudieron preservar las rocas, una dirección antigua del campo magnético: por el largo tiempo de relajación de las partículas ferromagnéticas SD, debido a su anisotropía.

Pero, ¿cómo se magnetizaron? ¿Cómo pudo un campo débil como el terrestre, imprimirles alguna vez su dirección?

Respuesta: la magnetización fue adquirida cuando el sistema no tenía las mismas condiciones físicas que las actuales. Hace falta un escenario de tiempo de relajación suficientemente corto como para que la magnetización se adecúe al campo externo, y un aumento subsiguiente de τ que «bloquee» el sistema.

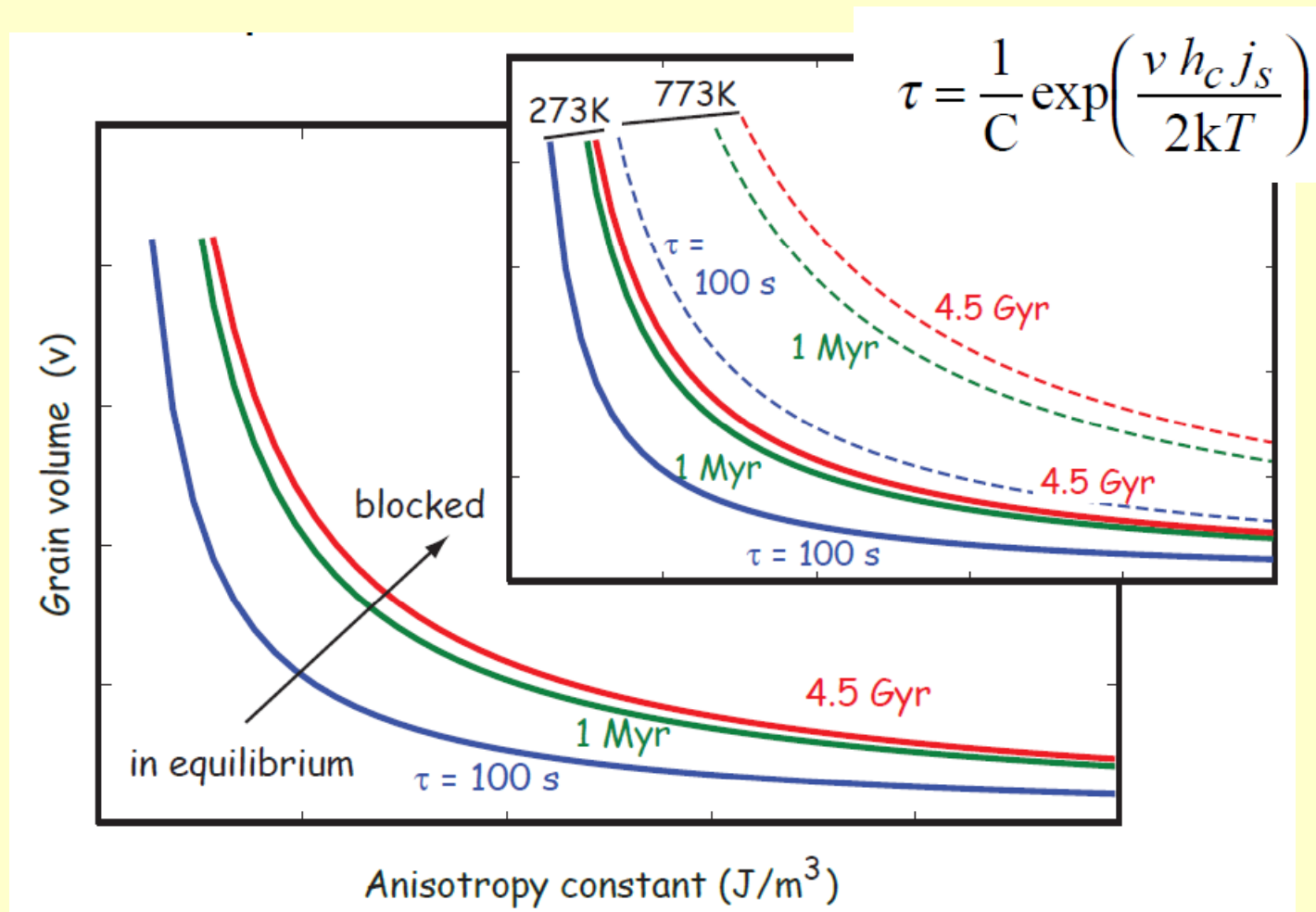
$$\tau = \frac{1}{C} \exp\left(\frac{v h_c j_s}{2kT}\right)$$

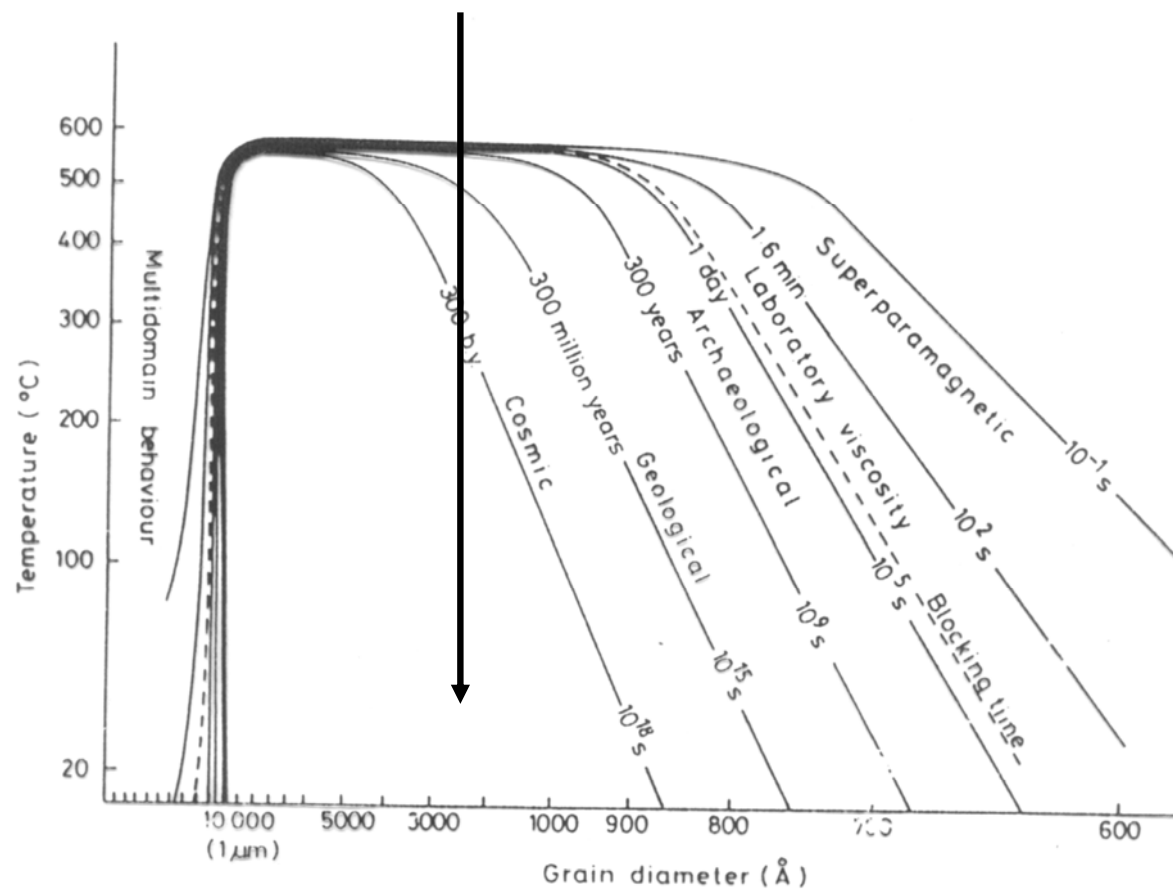
La adquisición de remanencia requiere bajar y luego subir el tiempo de relajación, para que los minerales magnéticos alcancen una magnetización de equilibrio, y luego bloquearla

El tiempo de relajación se modifica cambiando la temperatura o el volumen.

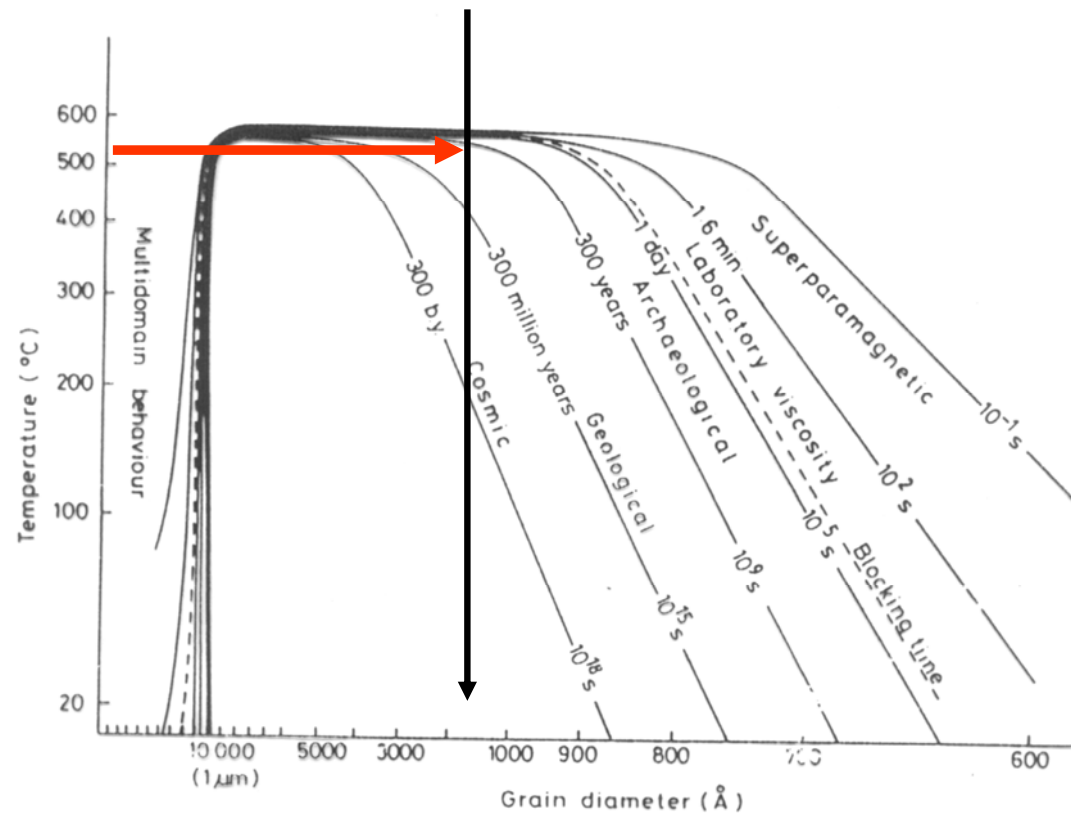
$$\tau = \frac{1}{C} \exp\left(\frac{v h_c j_s}{2kT}\right)$$

Efecto de la temperatura en las curvas de tiempo de relajación





Líneas de igual **T** en un gráfico T vs V según ecuación de Néel para magnetitas esféricas

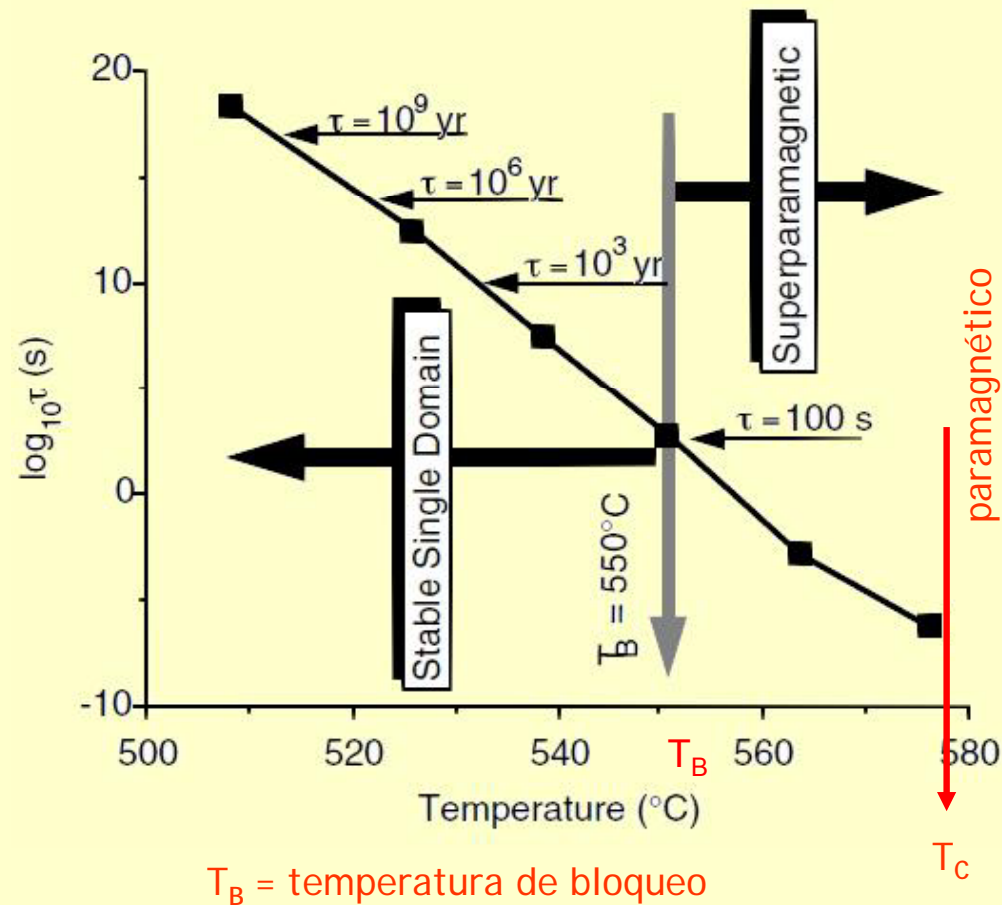


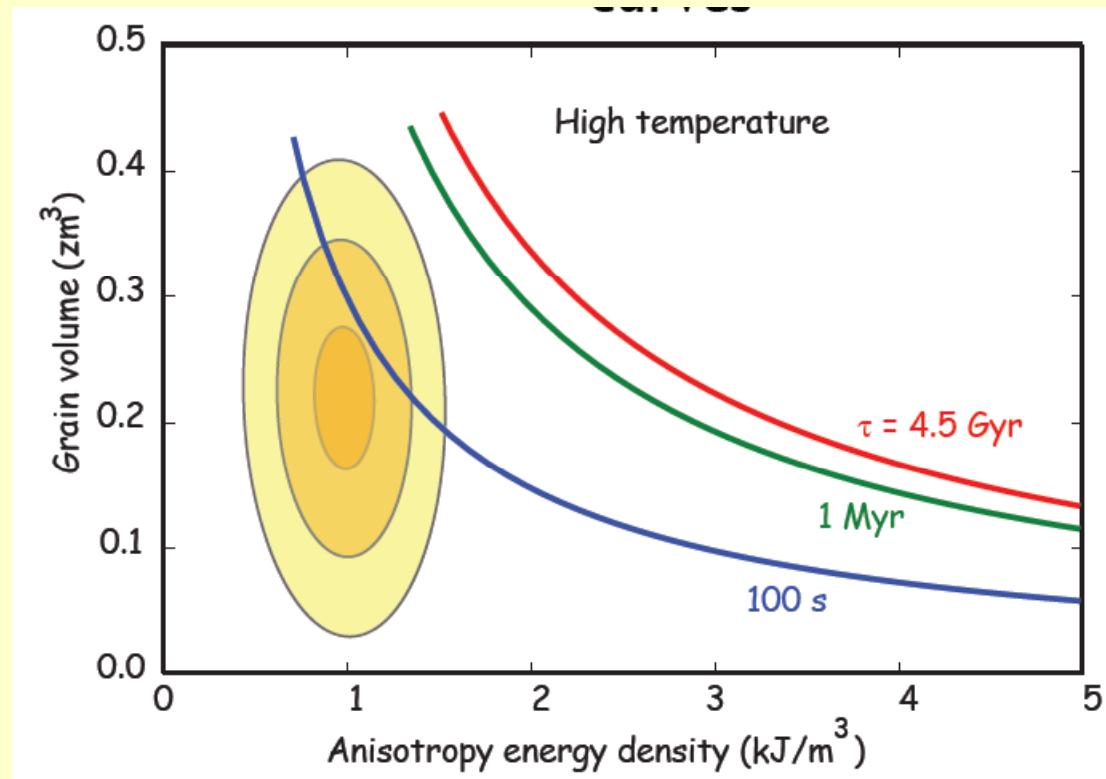
Temperatura de Bloqueo: Temperatura a la cual la magnetización espontánea alcanza tiempos de relajación suficientemente grandes. Magnetización Espontánea pasa a ser **Magnetización Remanente**

Temperatura de bloqueo

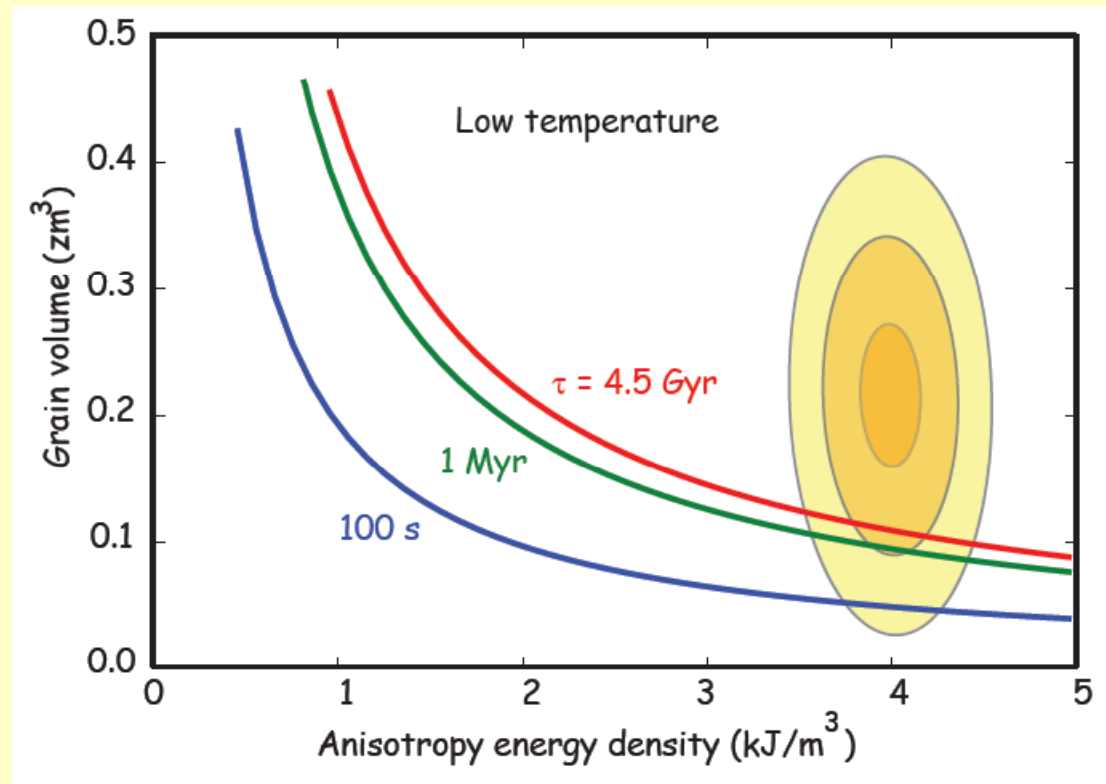
- $T > T_C$: paramagnético
 $2kT > v h_{ds}$
- $T_B \leq T \leq T_C$
 $2kT \sim v h_{ds}$
- $T \leq T_B$
 $2kT < v h_{ds}$

$v h_{ds}$ = energía magnética
 $2kT$ = energía térmica





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



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

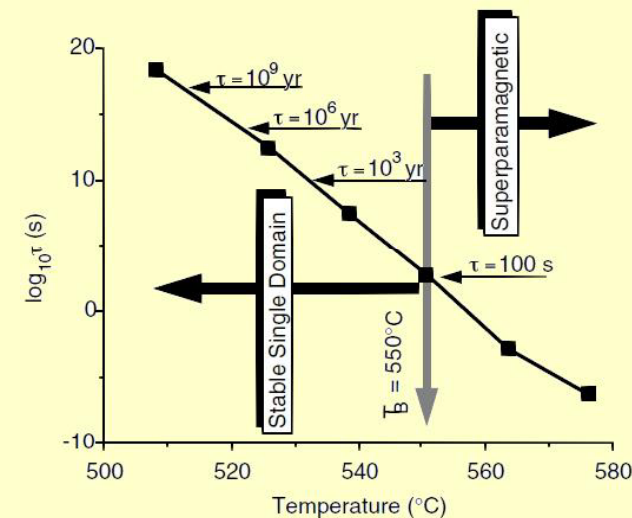
Magnetización termoremanente (TRM)

Se produce por enfriamiento del material desde temperaturas que están por encima de la temperatura de Curie, en presencia de un campo magnético.

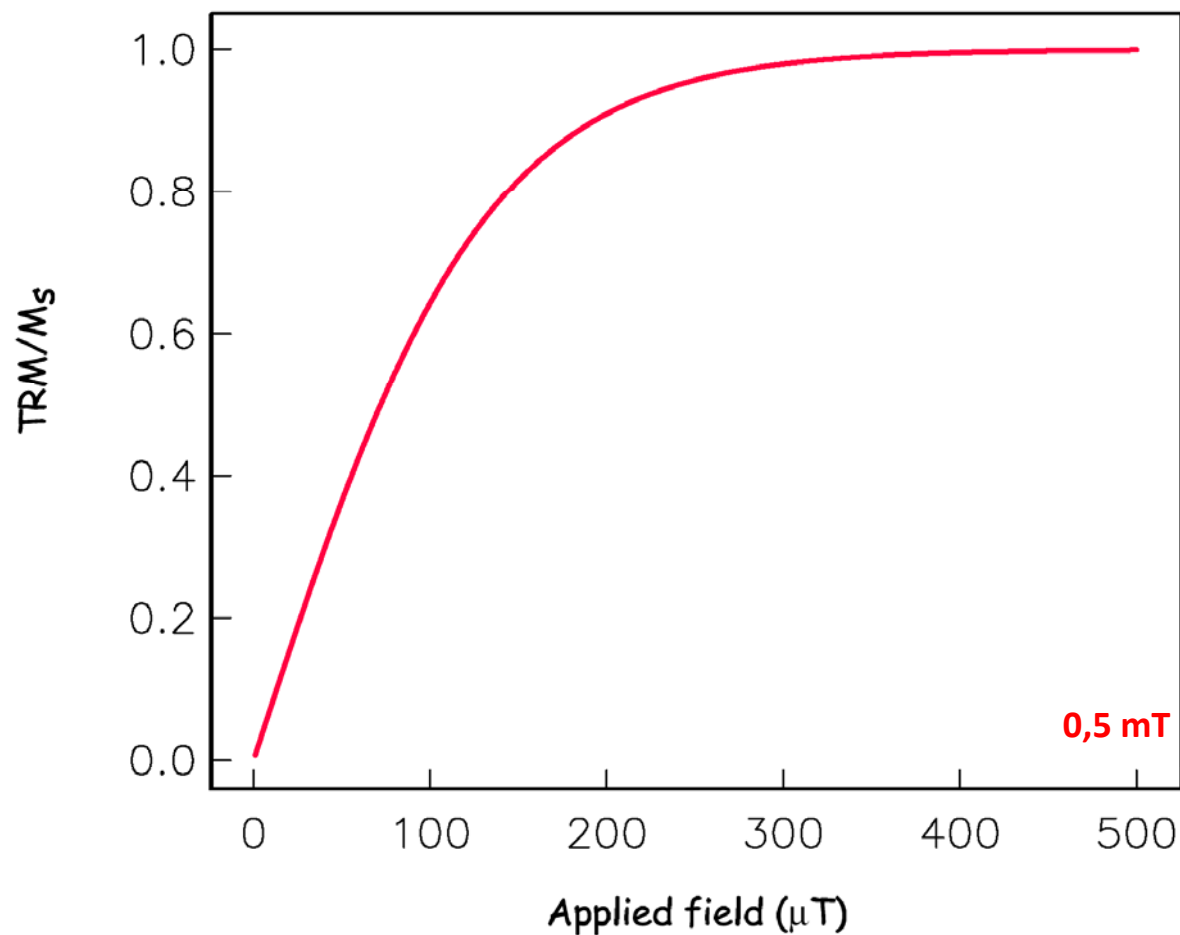
El incremento exponencial del tiempo de relajación con el descenso de temperatura, produce el bloqueo de la remanencia.

Aún un campo magnético débil como el terrestre, puede provocar una desviación en las direcciones de magnetización de las partículas, si la temperatura se eleva lo suficiente.

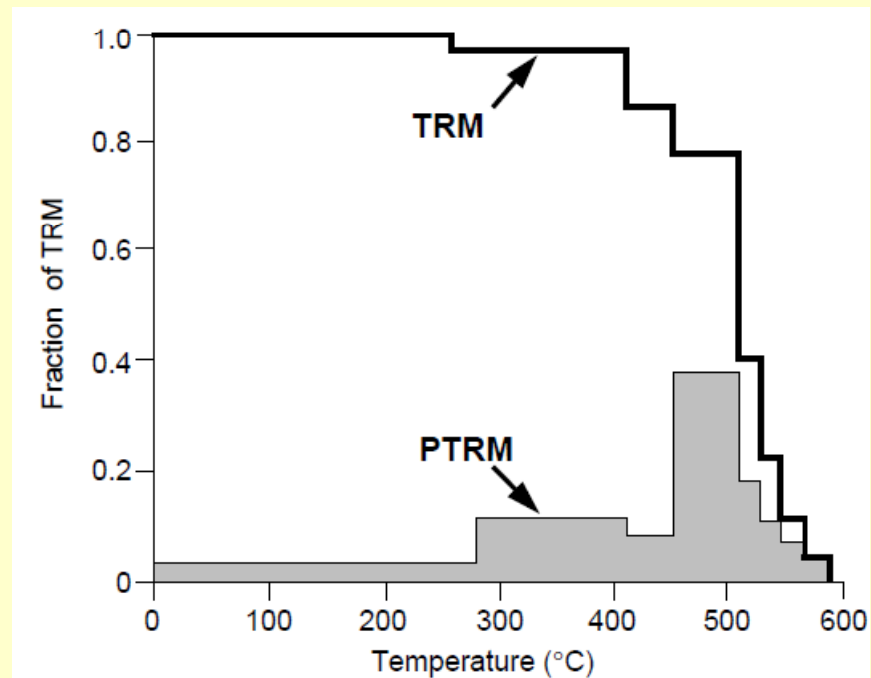
La magnetización neta producto de esta desviación, va a ser estable en tiempos geológicos mientras la temperatura no vuelva a elevarse.



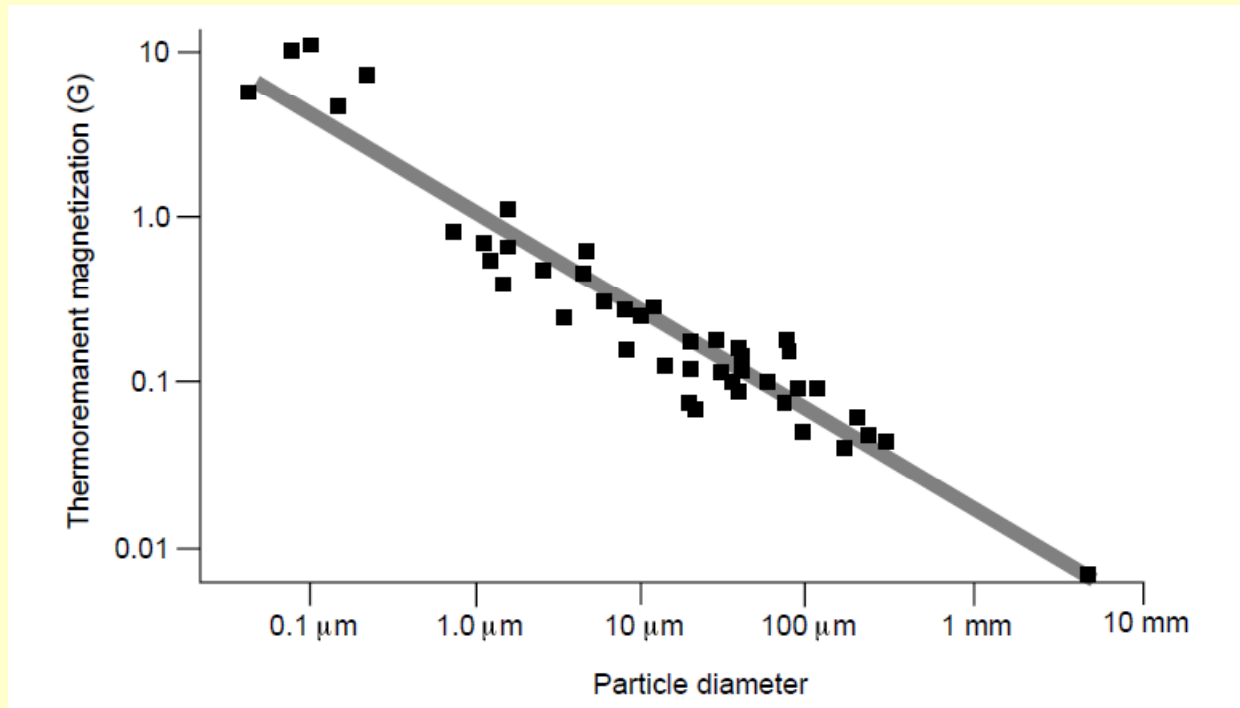
TRM / M_s : se adquiere una importante TRM aún en campos bajos



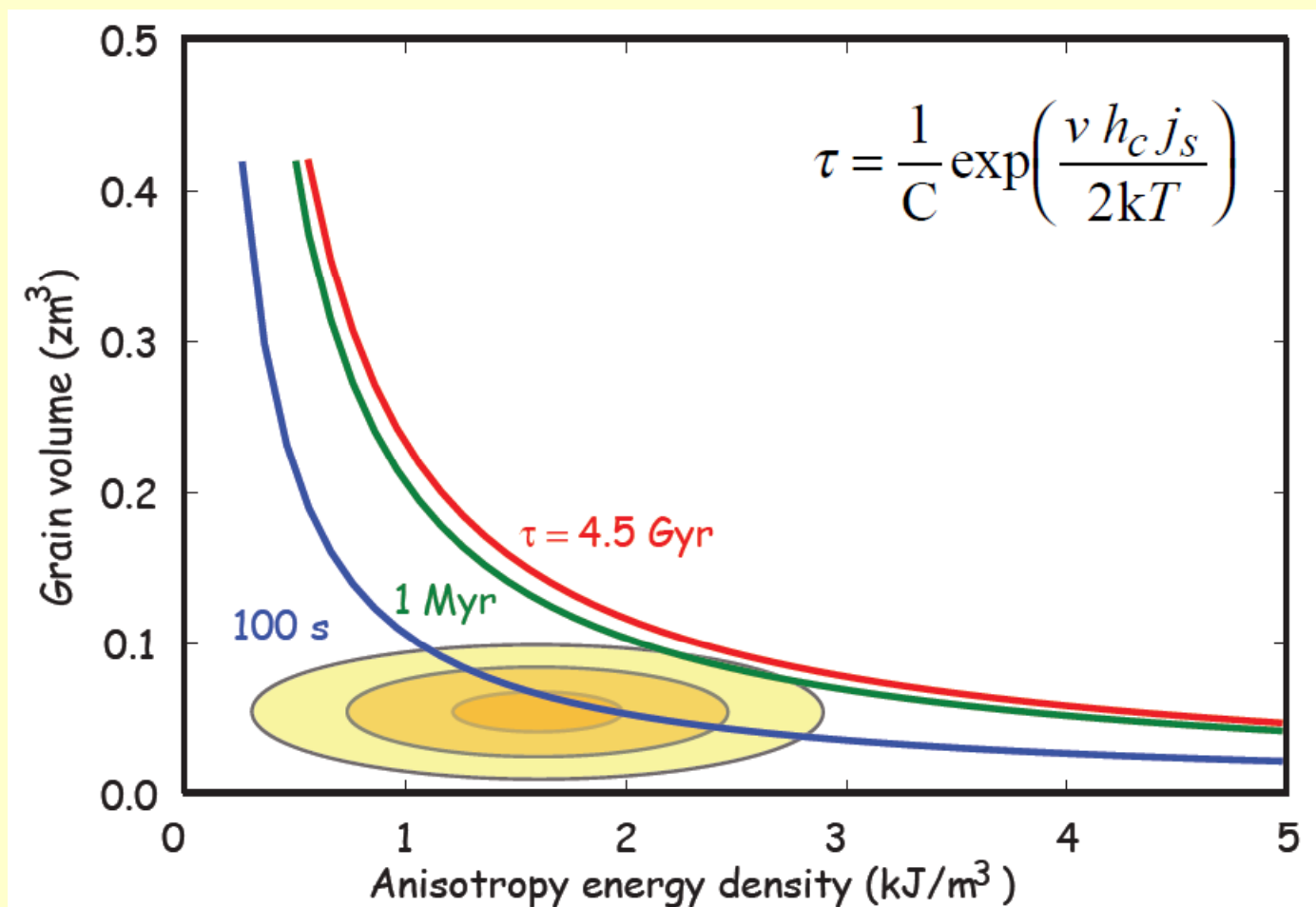
Magnetización termoremanente parcial (pTRM)



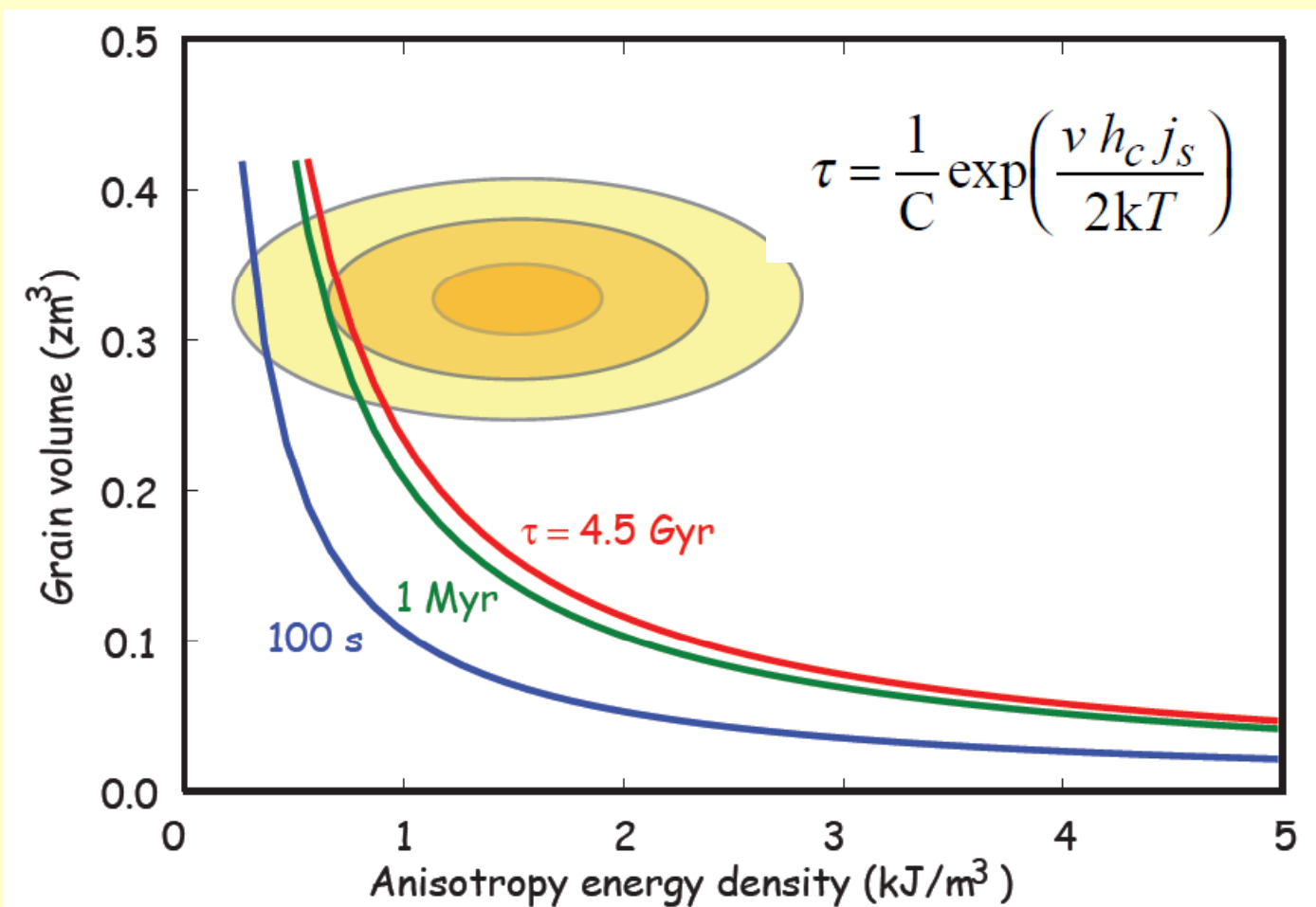
El TRM total puede dividirse en partes adquiridas en distintos intervalos de temperatura. La porción de TRM adquirida en cada ventana de T se denomina «TRM parcial». La suma de PTRMs da el TRM total. Ley de aditividad de los PTRMs.

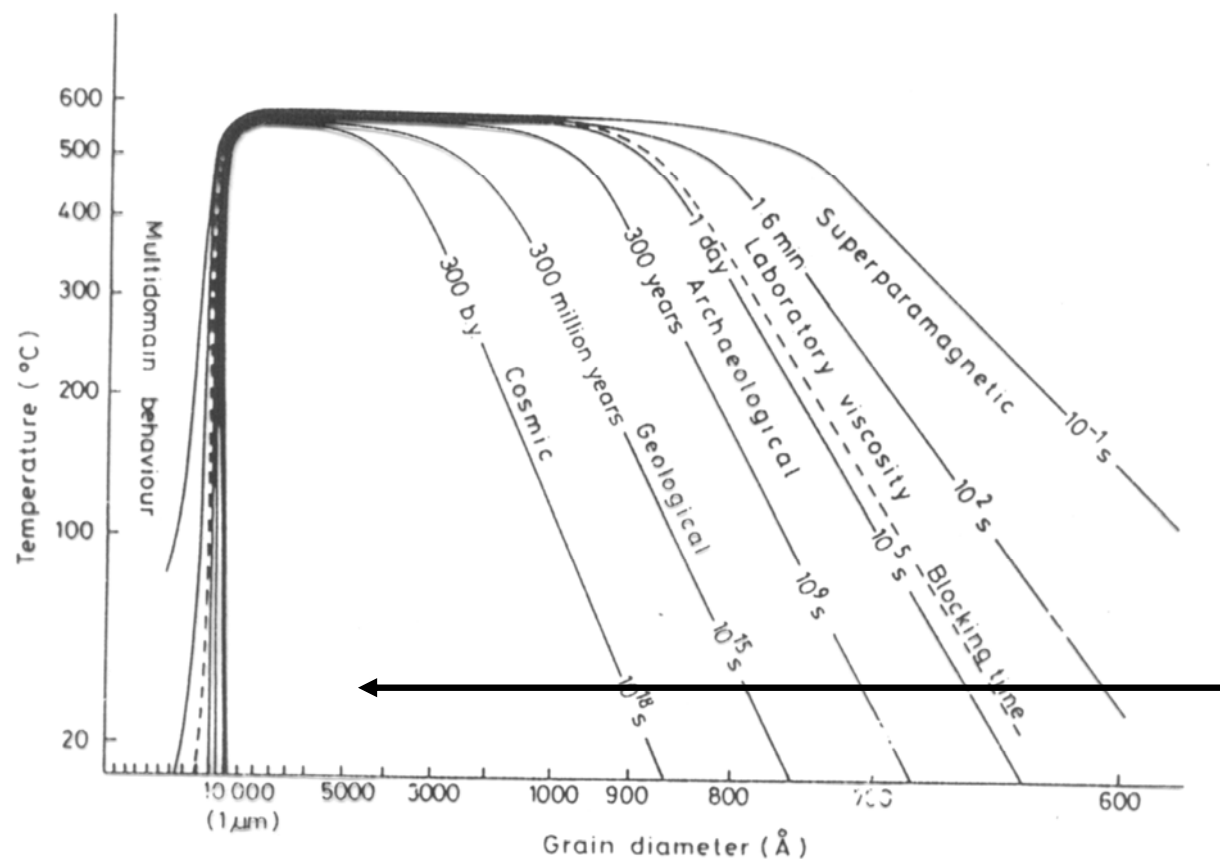


Para magnetita. Las partículas PSD son portadoras menos eficientes de TRM. Las partículas MD son menos eficientes aún, y además la remanencia que puedan adquirir generalmente tiene tiempos de relajación muy cortos.

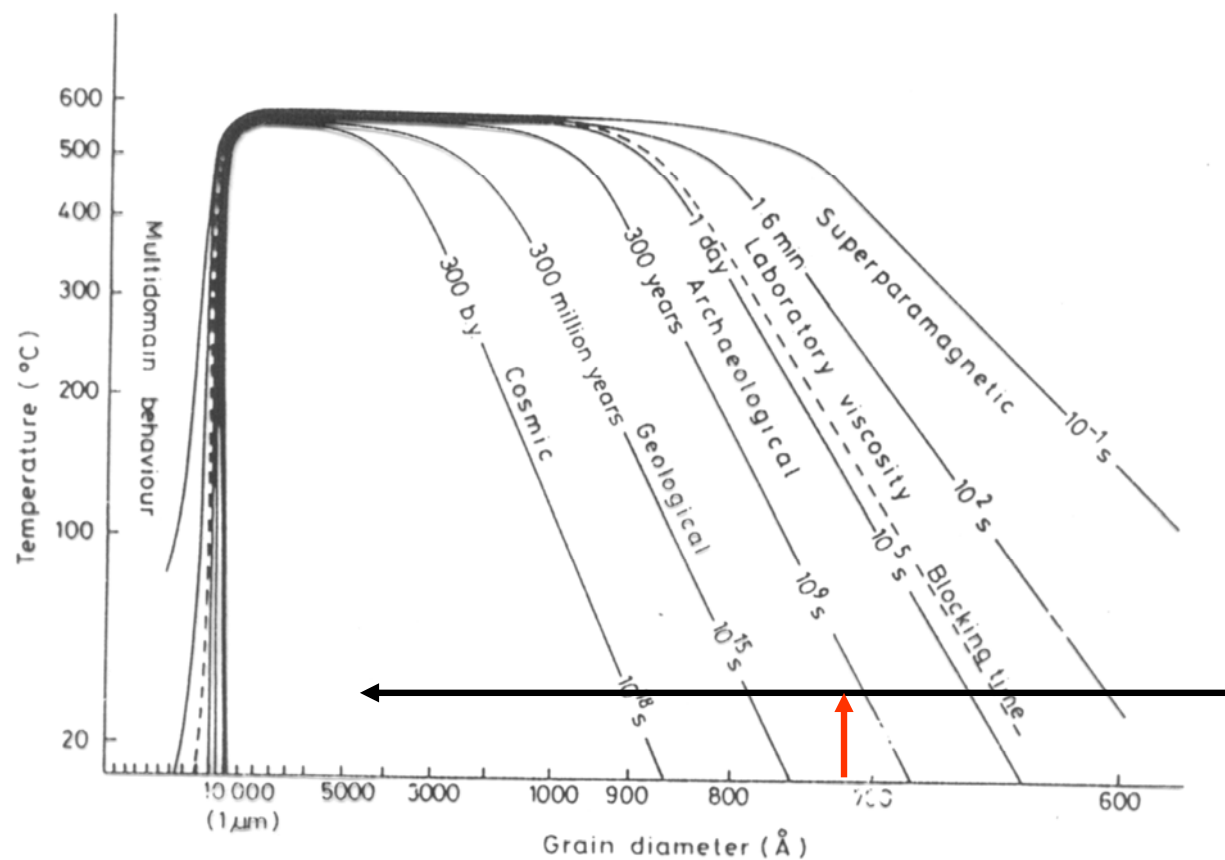


Crecimiento desde volumen inicial cero, a temperatura constante.





Líneas de igual **T** en un gráfico T vs V según ecuación de Neel para magnetitas esféricas



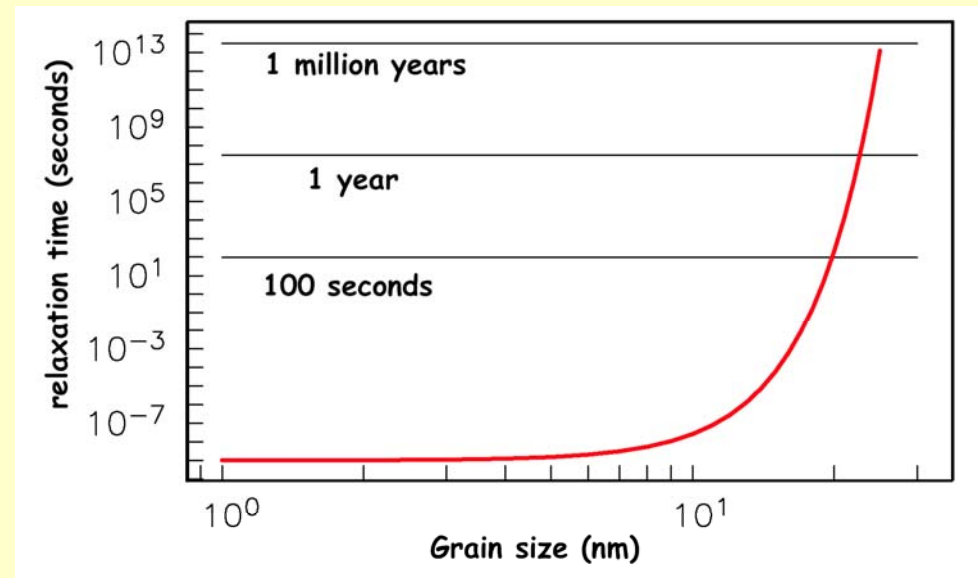
Volumen de Bloqueo: volumen al cual la Magnetización Espontánea pasa a ser **Remanente**

Magnetización remanente química (CRM)

Se produce por cambios químicos que forman minerales ferromagnéticos por debajo de sus temperaturas de bloqueo, en presencia de un campo magnético. Esto incluye a) alteración de minerales preexistentes y b) precipitación a partir de una solución.

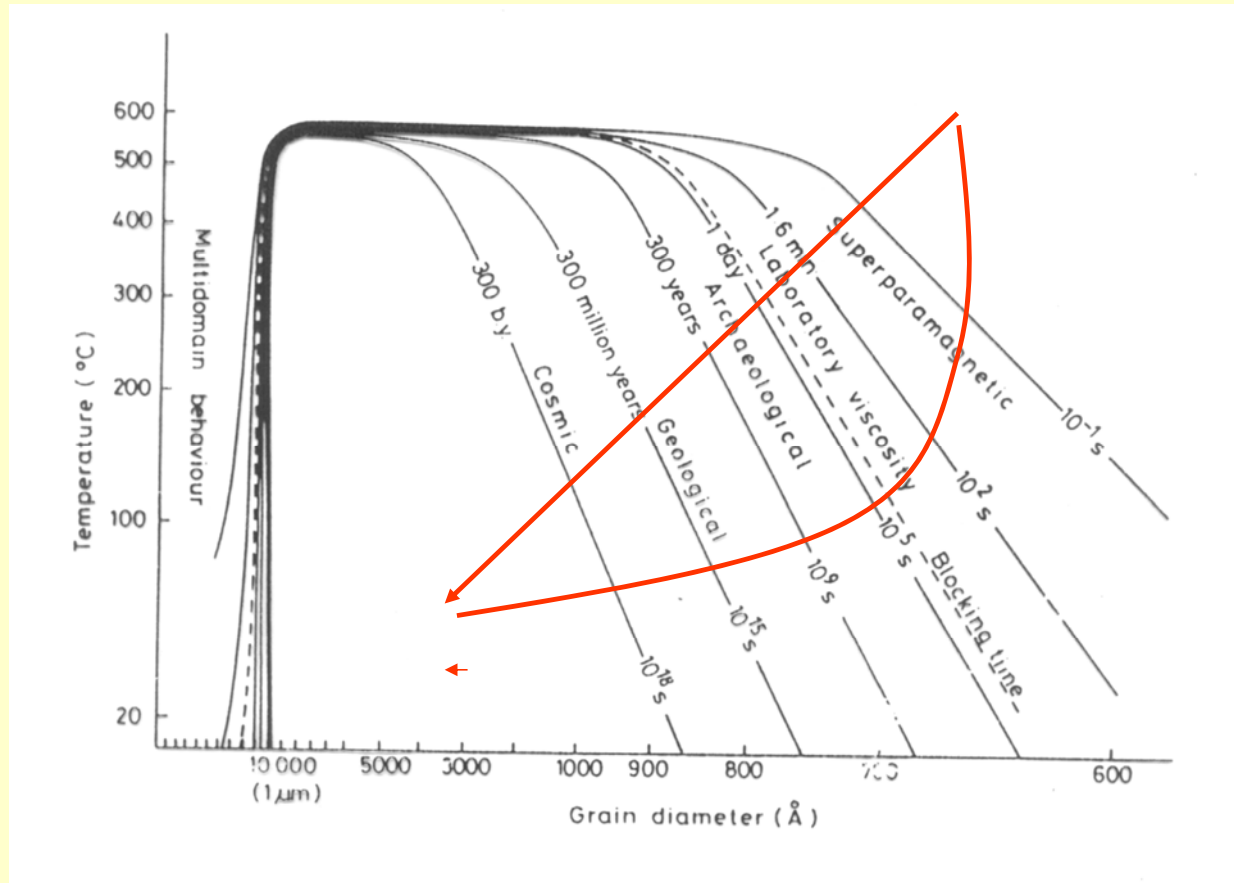
El incremento exponencial del tiempo de relajación con el aumento del volumen, produce el bloqueo de la remanencia.

Dependiendo del momento geológico en que se produce el cambio químico, la CRM será una magnetización primaria o secundaria.



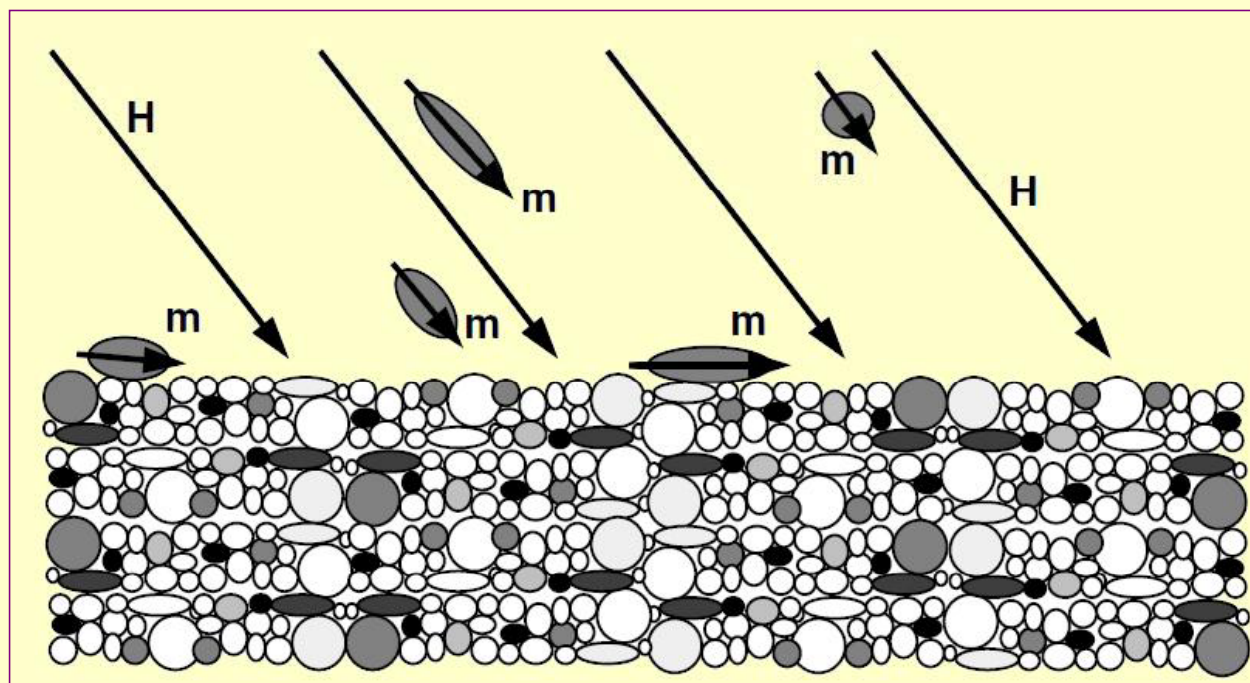
para 300 K

Magnetización remanente termoquímica (TCRM)

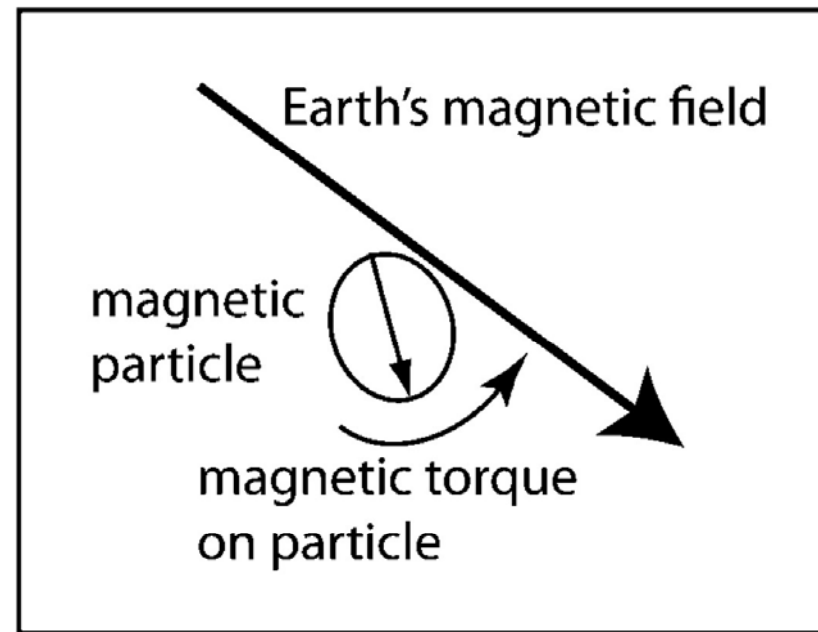


Adquisición durante el enfriamiento lento y simultáneo crecimiento de minerales magnéticos

Magnetización remanente depositacional (DRM)



También llamada detrítica (Butler la describe como «detrítica depositacional»). Las partículas en depositación, se orientan con respecto al campo magnético terrestre



Paleomagnetism of Sediments and Sedimentary Rocks: Process and Interpretation, First Edition. Kenneth P. Kodama.
© 2012 Kenneth P. Kodama. Published 2012 by Blackwell Publishing Ltd.

$$\Omega \left(\frac{d^2\theta}{dt^2} \right) + \beta \left(\frac{d\theta}{dt} \right) + mH \sin \theta = 0$$

$$\Omega = \left(\frac{\pi d^5 \rho}{60} \right)$$

momento de inercia

$$\beta = \pi d^3 \eta$$

tasa de rotación

1er término: resistencia inercial a la aceleración angular (despreciable para p. ferromagnéticas).
2do término: arrastre viscoso, depende de la viscosidad del fluido
3er término: torque de alineamiento de H

$$\theta(t) = \theta_0 \exp\left(\frac{-t}{t_0}\right)$$

$$t_0 = \left(\frac{\pi d^3 \eta}{mH} \right)$$

La ecuación describe cómo theta decrece desde un valor inicial. Es decir, la partícula tiende a alinearse con el campo.

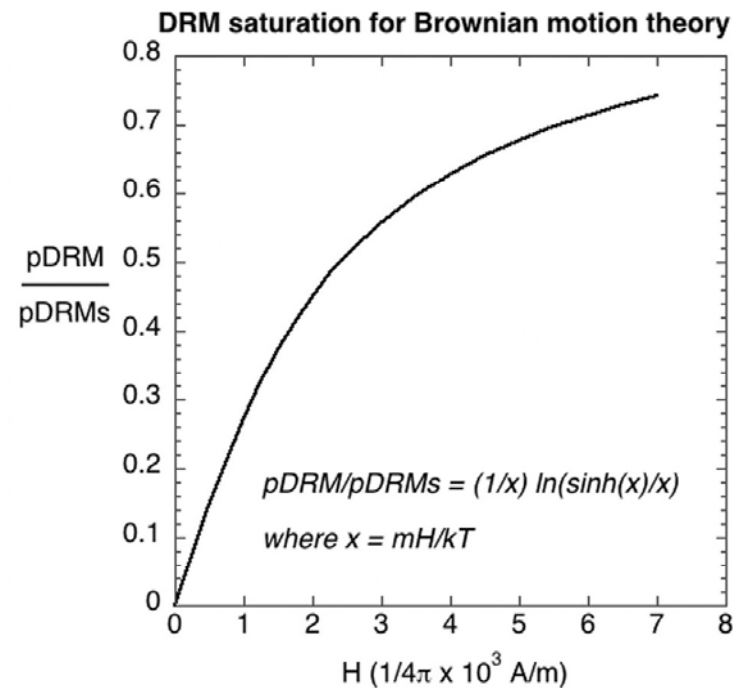
Reemplazando con valores razonables de viscosidad del agua, diámetros y momentos de partículas ferromagnéticas pequeñas (PSD), el tiempo de alineamiento es de aprox. 1-2 segundos.

Si el modelo de adquisición de magnetización remanente depositacional fuera correcto, el alineamiento de las partículas debería ser perfecto.

Sin embargo el DRM es tres órdenes de magnitud menor que la magnetización de saturación.

Para reproducir las observaciones experimentales, el modelo debe incorporar algún agente aleatorizador.

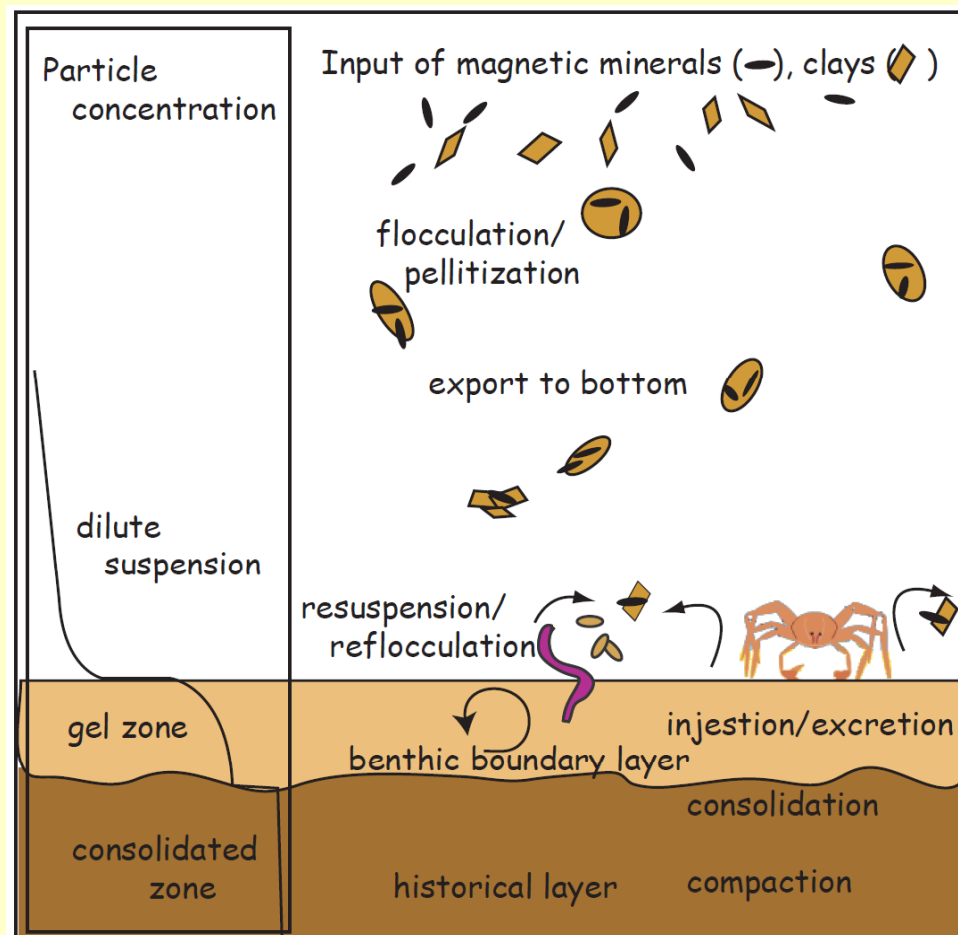
Posible causa de disrupción del alineamiento: movimiento browniano en la interfase agua-sedimento



Paleomagnetism of Sediments and Sedimentary Rocks: Process and Interpretation, First Edition. Kenneth P. Kodama.
© 2012 Kenneth P. Kodama. Published 2012 by Blackwell Publishing Ltd.

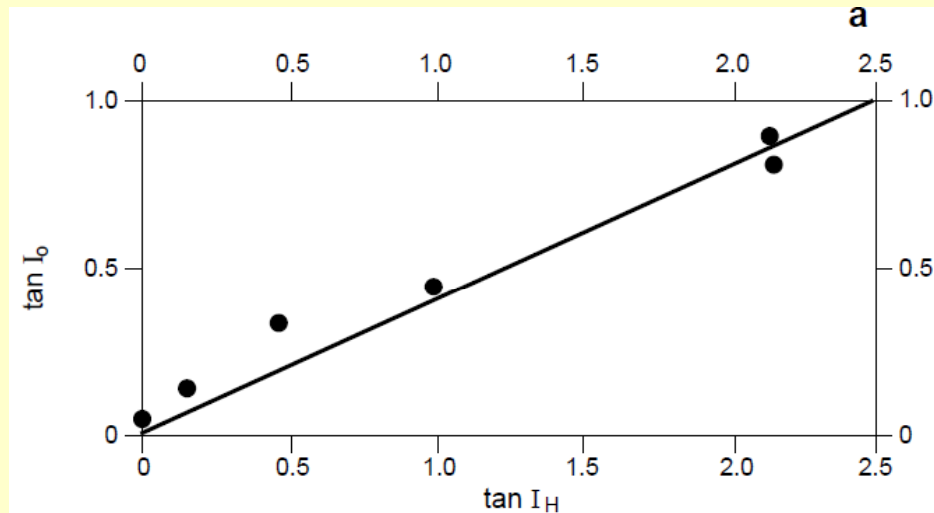
El grado de alineamiento se modela con la teoría de Langevin. El agente aleatorizante sería la energía térmica o movimiento browniano de las moléculas de agua

Modelo de floculación: el momento magnético efectivo de las partículas magnéticas es reducido por su incorporación en flóculos no magnéticos (con materia orgánica o arcillas)



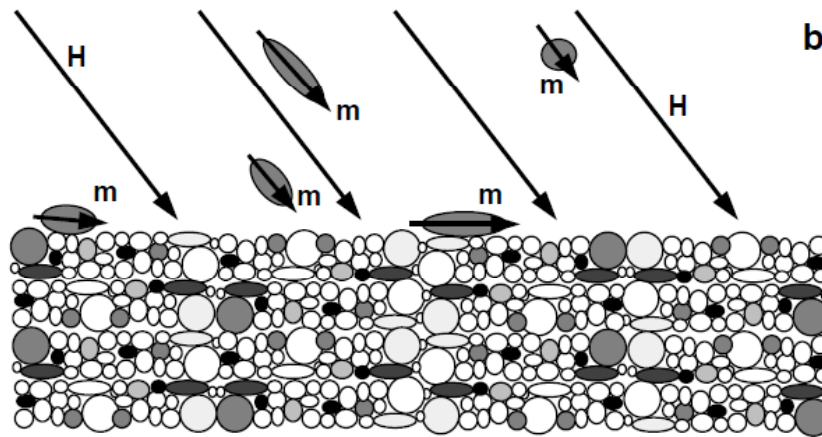
Tauxe, 2011

Error de inclinación en DRM sin-depositacional

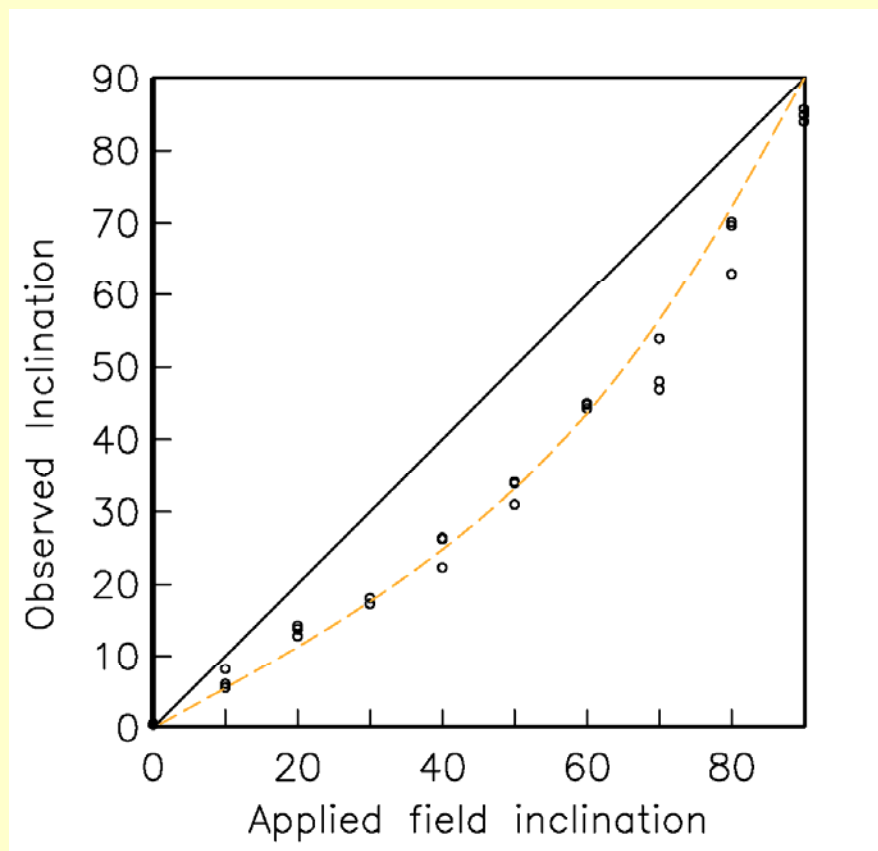


$$\tan I_0 = f \tan I_H$$

El valor de f varía de 0 a 1. Para varves se determinó experimentalmente en 0,4

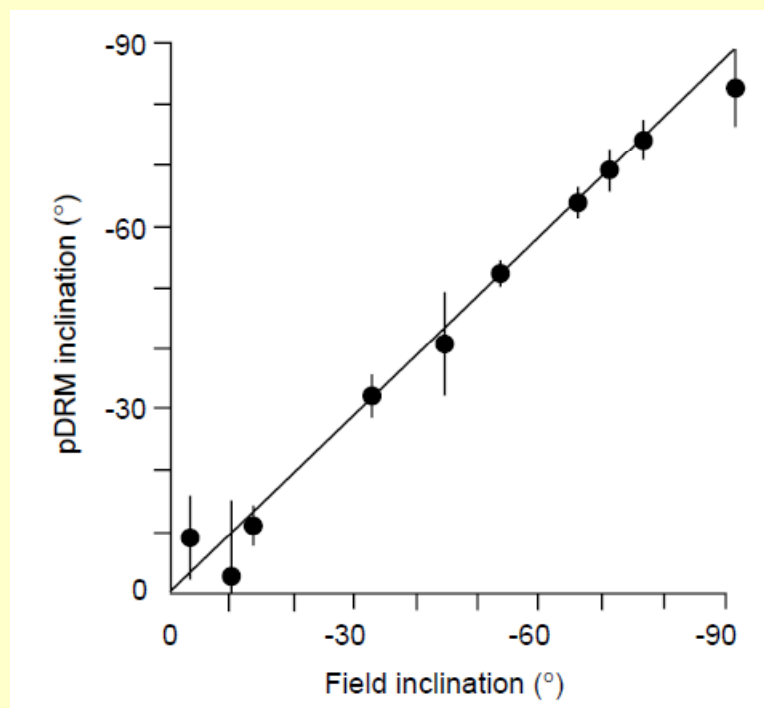


Error de inclinación en DRM

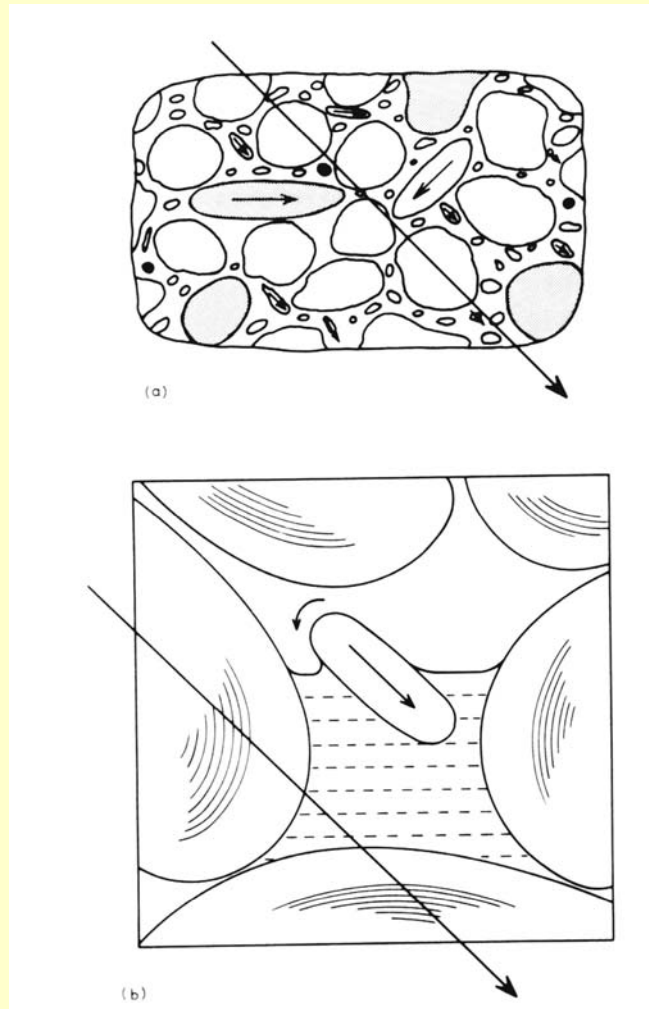


Experimentos de re-depositación muy lenta (varias semanas a meses) demuestran que este error disminuye con el tiempo, mitigado por la reorientación post-depositacional de las nanopartículas magnéticas

Magnetización remanente post-depositacional (pDRM)

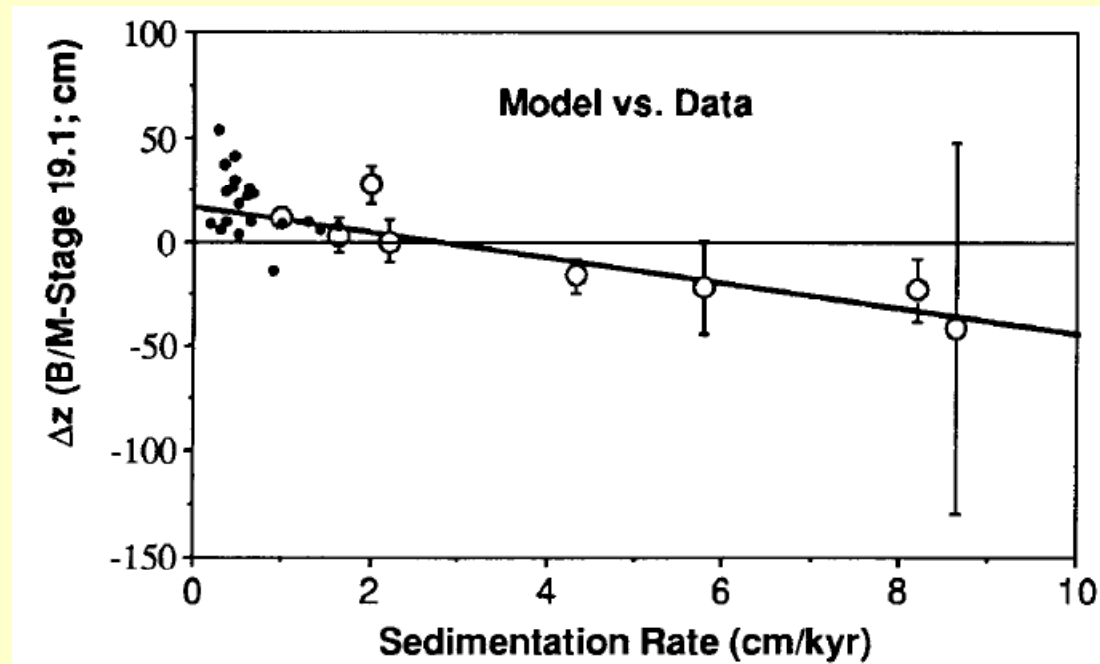


Mezcla de cuarzo y magnetita,
a la que se llenó de agua y se
dejó secar.
Las partículas se reorientaron
dentro de la mezcla acuosa.



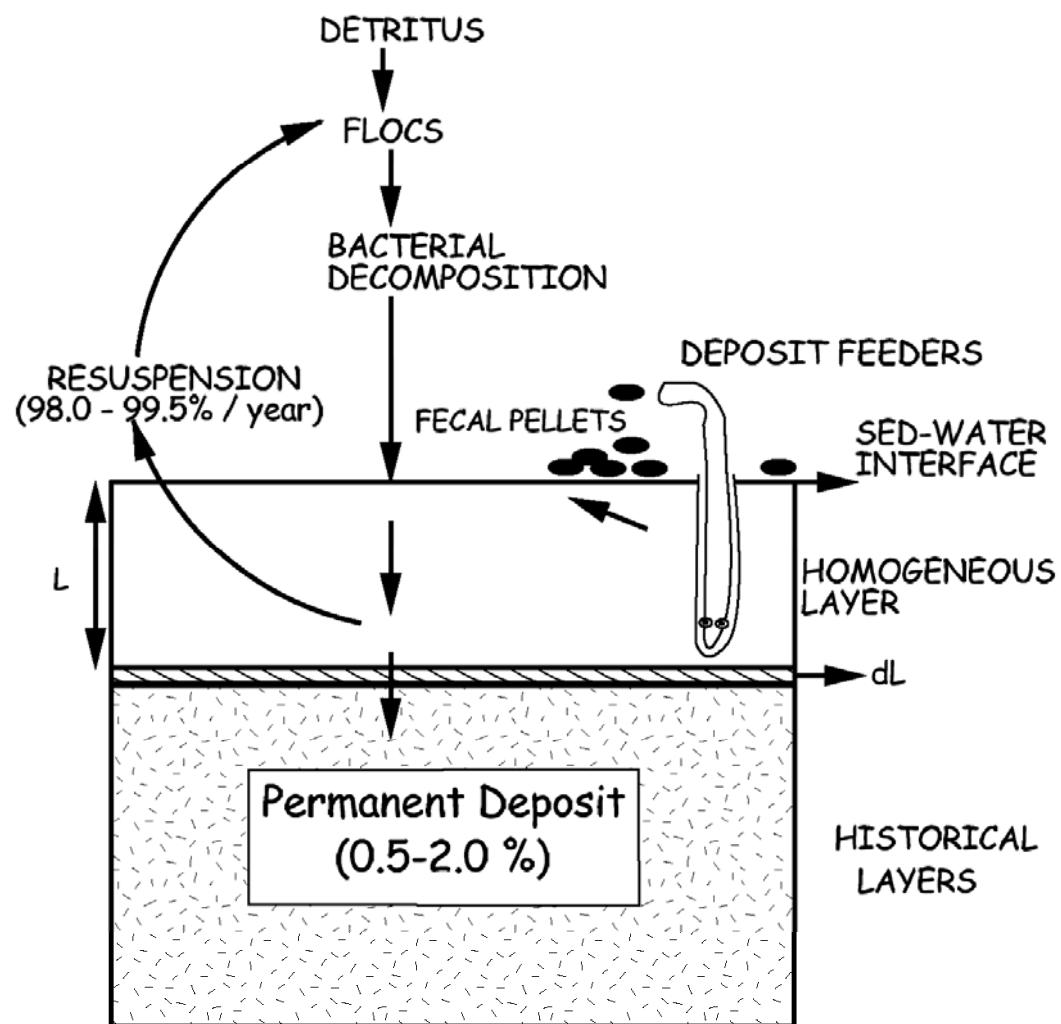
Magnetización remanente detrítica (post-depositacional)

- Partículas magnéticas pequeñas tienden a orientarse por acción de H con suficiente espacio poral



de Menocal et al. (1990), EPSL. Distancia estratigráfica entre la reversión Brunhes-Matuyama (horizontal) y un marcador cronoestratigráfico conocido (etapa 19.1 de isótopos de oxígeno), determinada en 8 testigos de fondo marino con tasas de sedimentación variables.

Se interpreta una profundidad de bloqueo de aproximadamente 16 cm por debajo de la zona bioturbada, que a su vez tiene 8 cm



*Modelo de
Katari-Tauxe*

Magnetización remanente detrítica post-depositacional

- la adquisición se produce a un nivel por debajo en la columna sedimentaria, que donde el sedimento fue depositado.
- el tiempo de adquisición aparentará preceder a la edad de depositación. El desfase será menos significativo para tasas de sedimentación mayores.
- la reorientación post-depositacional asegura un registro más fiel de la dirección del CMT.
- distintos tamaños de grano se bloquearán/inmovilizarán a distintas profundidades. El efecto es que el registro de las variaciones del CMT sufrirá un suavizado.

Magnetización remanente detrítica: efecto del tamaño de grano

Una pelita/arcilita tiene tamaño de grano máximo 4 μm . Partículas magnéticas en tamaño SD-PSD. Limolitas y areniscas tienen partículas de magnetita MD.

Partículas SD tienen magnetización intrínseca más intensa, se alinean mejor.

Partículas MD son más inestables magnéticamente.

Rocas de grano más grueso son más permeables y susceptibles a modificaciones posteriores.

En estudios paleomagnéticos se prefieren pelitas (hasta areniscas finas). Los sedimentos de tamaño de grano más grueso se evitan.

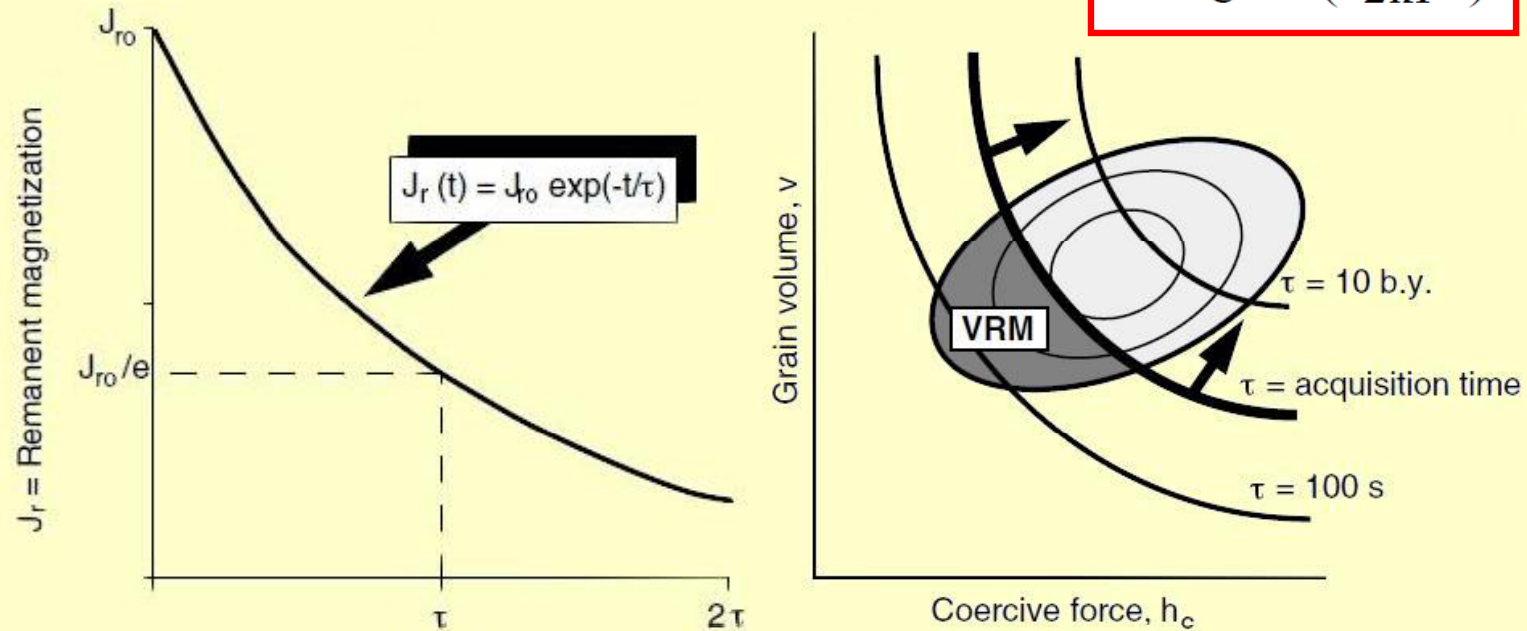
La historia geológica de una roca sedimentaria incluirá:

- ***compactación***
- ***diagénesis***

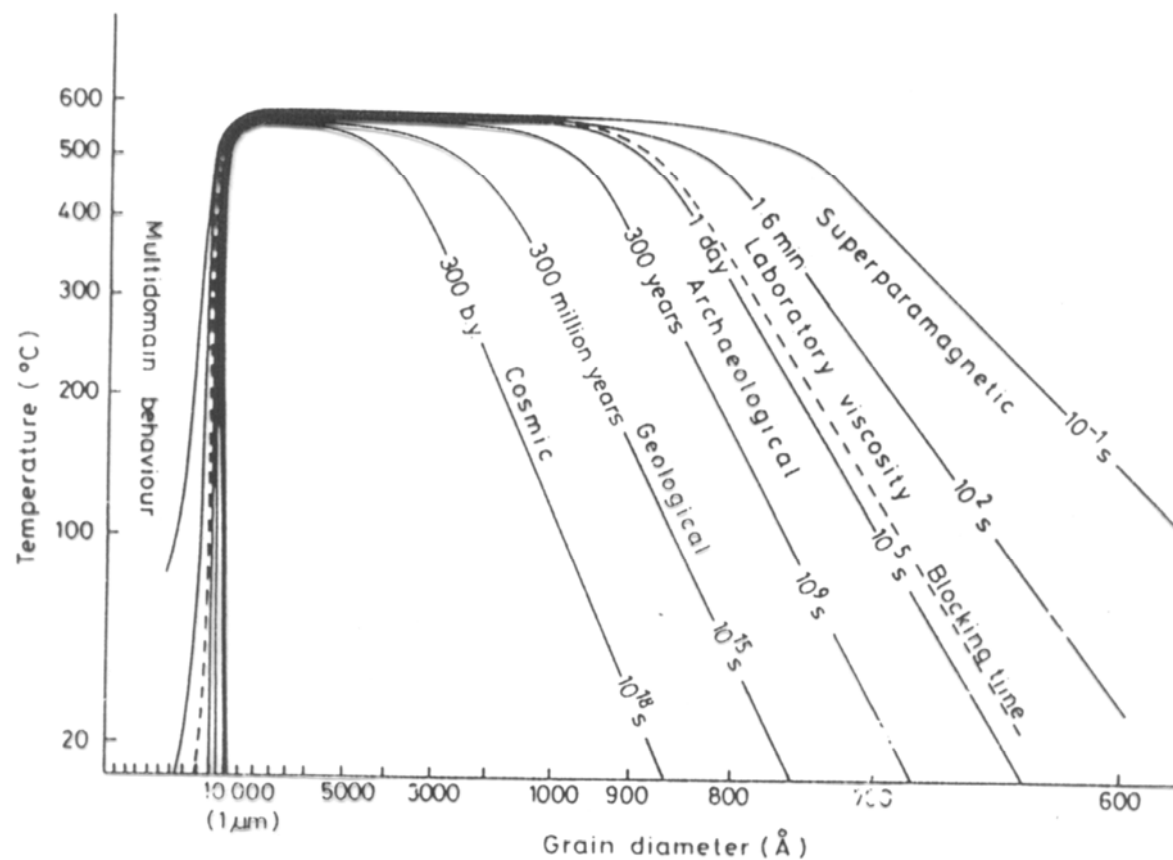
Ambos procesos tendrán efectos significativos en la magnetización remanente

Magnetización remanente viscosa

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

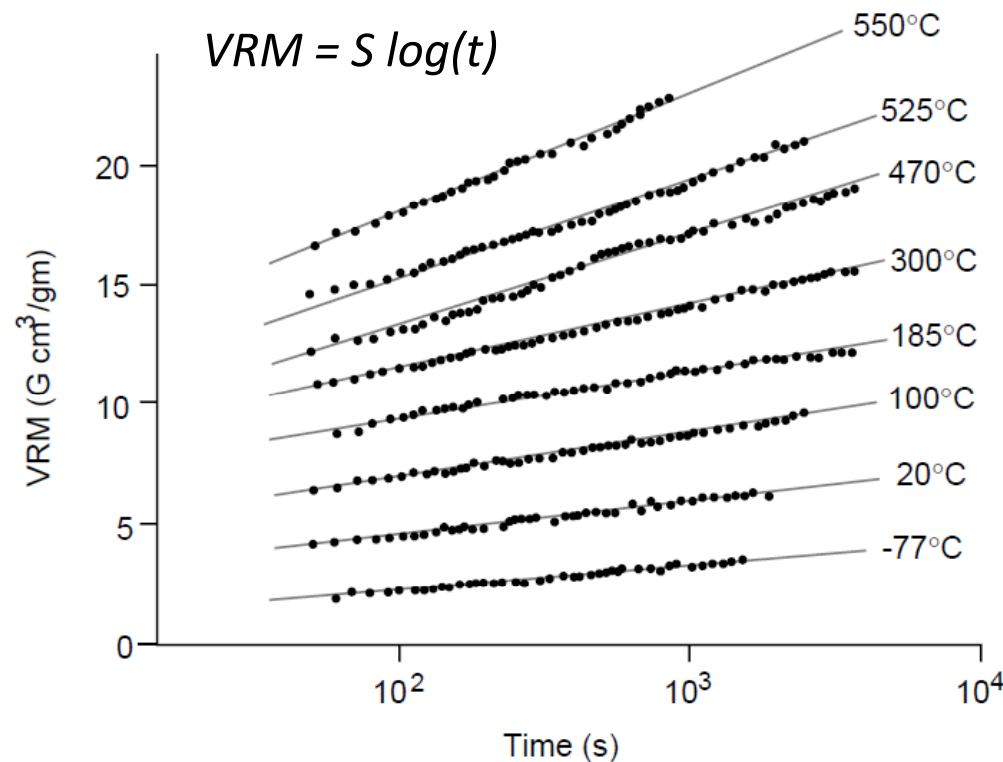


En partículas SD, la adquisición de MRV es el proceso inverso de la relajación magnética. Se produce realineamiento de las partículas con tiempo corto de relajación



Líneas de igual **T** en un gráfico T vs V según ecuación de Neel para magnetitas esféricas

Magnetización remanente viscosa



Relación
logarítmica entre M
y tiempo

La máxima
adquisición se
produce en los
tiempos más cortos

La adquisición de remanencia se produce por la acción prolongada en el tiempo de un campo magnético débil