

Criterios de confiabilidad de polos paleomagnéticos

Según Van der Voo, 1990

- 1) Edad de las rocas bien determinada (con error menor a un período geológico), y presunción de que la magnetización es de la misma edad;
- 2) Número suficiente de muestras ($N \geq 24$), $K \geq 10$ y $\alpha_{95} \leq 16^\circ$;
- 3) Desmagnetización adecuada, que incluya resta vectorial;
- 4) Pruebas de campo que restrinjan la edad de la magnetización;
- 5) Control estructural, y coherencia tectónica con el cratón o bloque involucrado;
- 6) Presencia de reversiones;
- 7) Que la posición polar no coincida con la de polos paleomagnéticos más jóvenes.

Tiempo involucrado en la adquisición de la remanencia

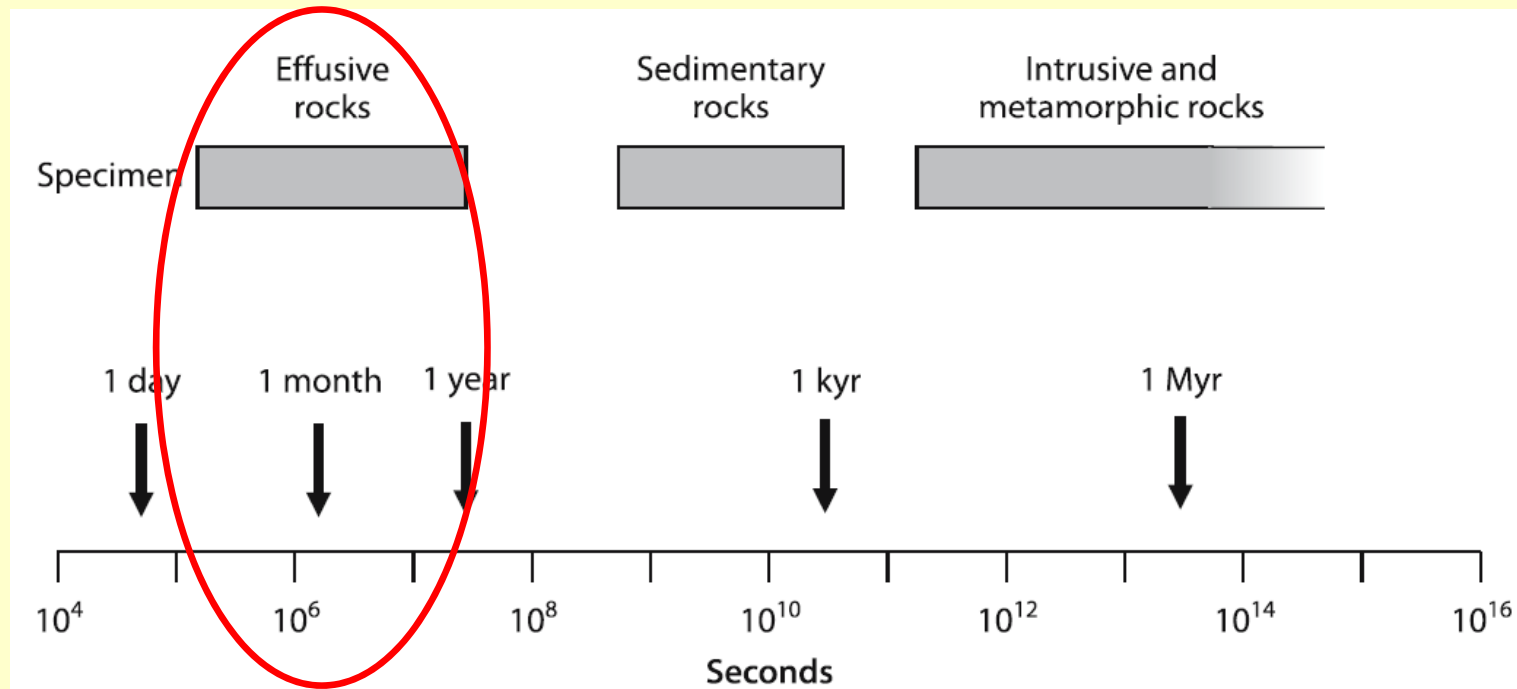


Fig. 4.9. Schematic outline of the remanence acquisition time in various types of rocks (time scale in seconds). *Gray boxes* refer to the time interval recorded in a specimen

Lanza y Meloni, 2006

Rocas efusivas

Ventajas:

- Por el enfriamiento rápido, tienen más probabilidad de tener minerales magnéticos de tamaño fino (SD)

Desventajas:

- Sus superficies pueden no haber sido horizontales al momento de la extrusión
- La adquisición muy rápida hace que se necesite promediar gran cantidad de flujos para eliminar el efecto de la VPS.

Tiempo involucrado en la adquisición de la remanencia

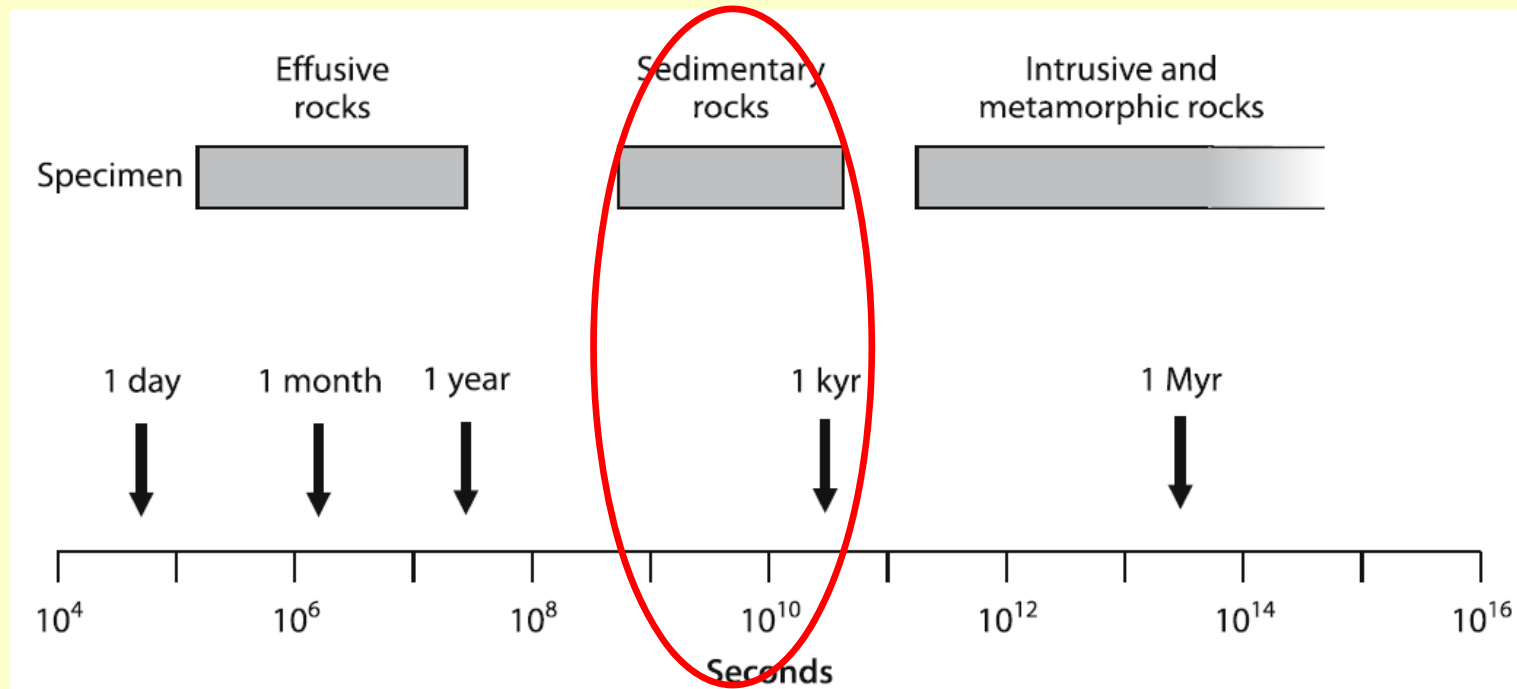


Fig. 4.9. Schematic outline of the remanence acquisition time in various types of rocks (time scale in seconds). *Gray boxes* refer to the time interval recorded in a specimen

Lanza y Meloni, 2006

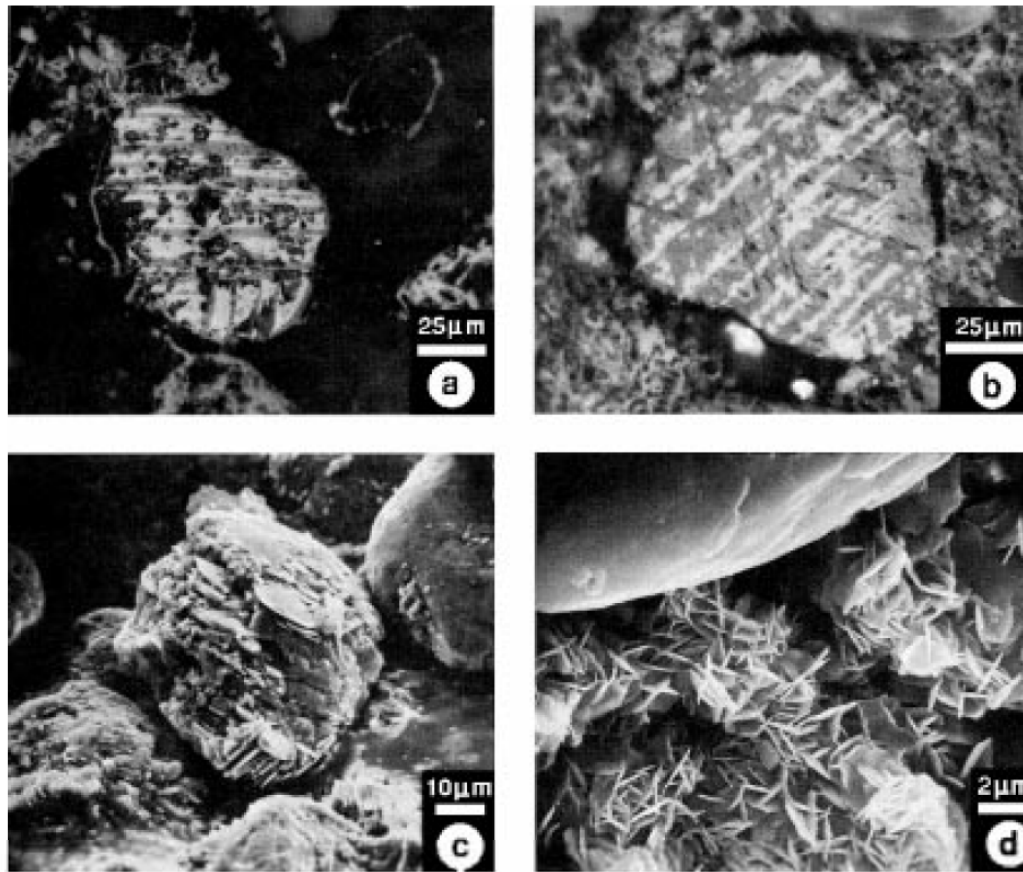
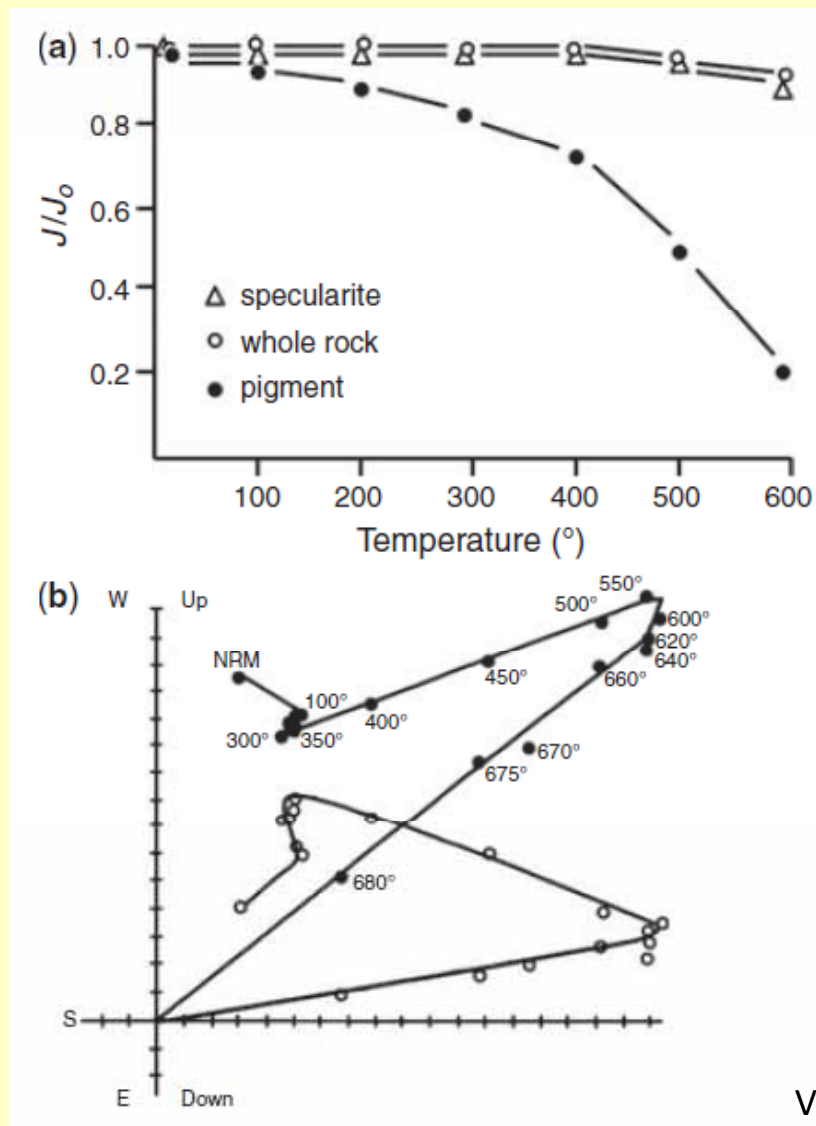


Figure 8.8 Optical and SEM photomicrographs of hematite and associated minerals in red sediments. (a) Detrital grain exhibiting “tiger-striped” ilmenite-hematite intergrowth; darker ilmenite layers alternate with lighter layers of hematite. (b) Polycrystalline martite grain showing crystalline units intersecting along octahedral planes inherited from replacement of parent magnetite; the entire grain is hematite; differing shades of gray result from different crystallographic directions for different portions of the grain; (c) SEM photomicrograph of martite grain with overgrowths of authigenic specular hematite. (d) SEM photomicrograph of interlocking hematite crystals within a sand-size void. All samples are from the Wupatki Member of the Moenkopi Formation. Photomicrographs kindly provided by T. Walker.

Mineral
portador en
bancos
rojos:

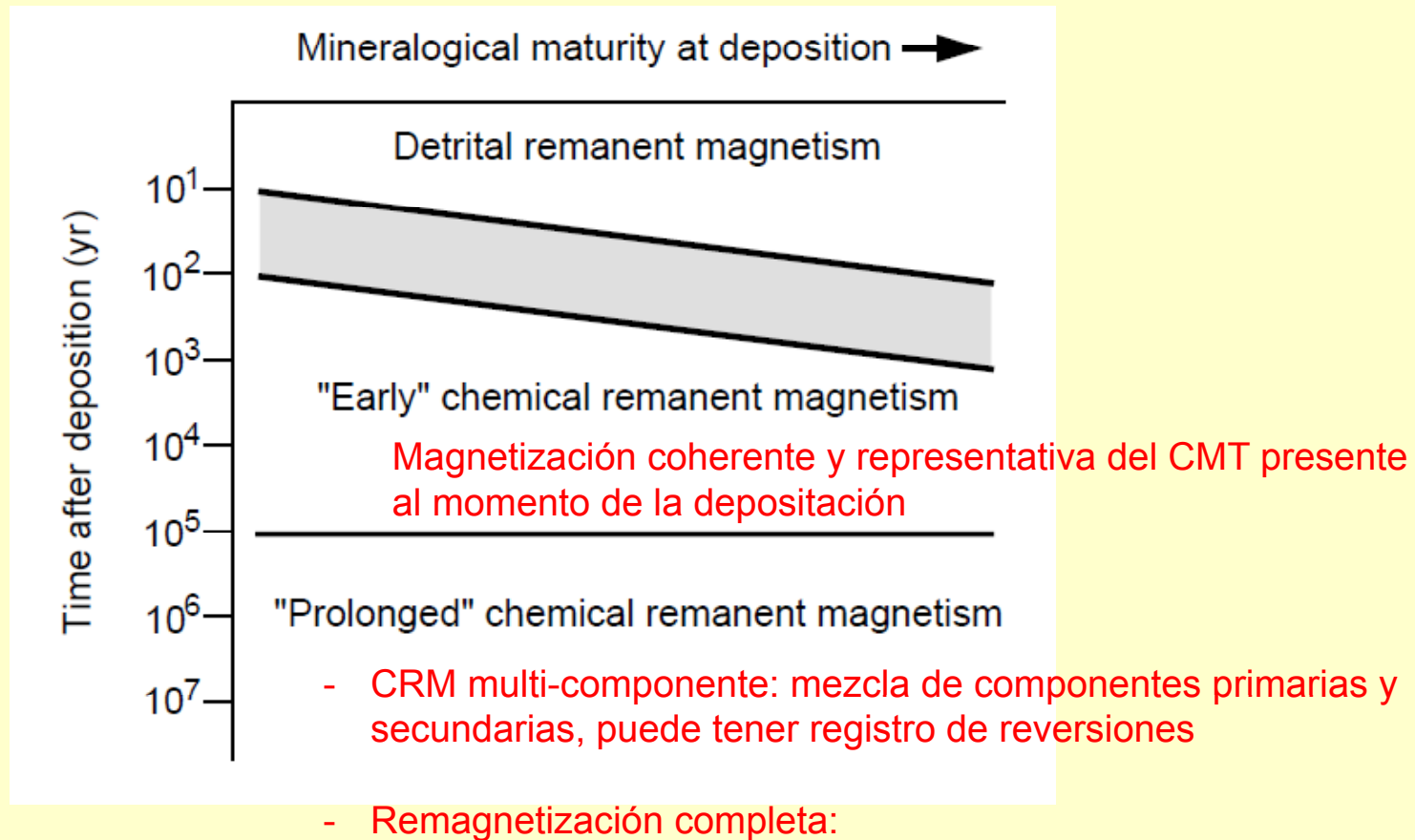
- Hematita
especular
- Pigmento
hematítico

Butler 1992



Van der Voo y Torsvik, 2012

Duración de la adquisición de la remanencia



Kodama (2012), adaptado de Turner (1980)

Elongación de la población de PGVs en ciertos bancos rojos de USA, demasiado acentuada

Table 1
Elongations, paleolatitudes and scatter statistics for Triassic and Jurassic sedimentary rocks from the Colorado Plateau area

#	Unit	N	E_p	E_d	λ	K
1	Anton Chico M, Moenkopi Fm	38	8.05	2.12	0.2°	41.5
2	Bluewater Creek Fm	8	11.96	4.15	1.5	49.8
3	Church Rock M, Chinle Fm	8	1.50	2.69	5.8	44.8
4	Garita Creek Fm	12	1.49	4.63	-0.9	97.7
5	Kayenta Fm	30	2.51	1.80	8.4	129.9
5n	Kayenta Fm, N polarity	17	7.12	2.09	9.3	113.5
5r	Kayenta Fm, R polarity	13	2.16	6.16	7.1	156.5
6	Moenave Fm	22	2.53	2.19	5.6	25.2
7	Moenkopi Fm	32	3.57	1.16	5.2	83.2
8	Owl Rock M, Chinle Fm	13	2.64	1.40	3.4	181.3
9	Redonda M, Chinle Fm	13	1.84	2.87	4.8	131.8
10	Red Peak M, Chugwater Fm	13	7.86	2.10	7.5	141.5
11	U Shale M, Chinle Fm	16	9.55	2.59	2.5	46.5

N , number of sites. E_p and E_d are elongations of sets of poles (VGPs) and directions, respectively. λ is paleolatitude. K is the Fisher (1953) precision parameter for VGPs. References: (1) Steiner

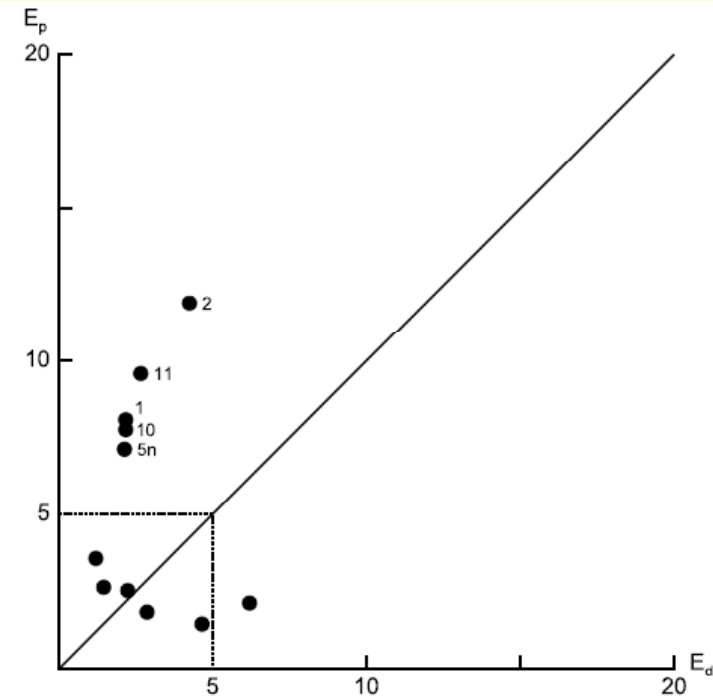
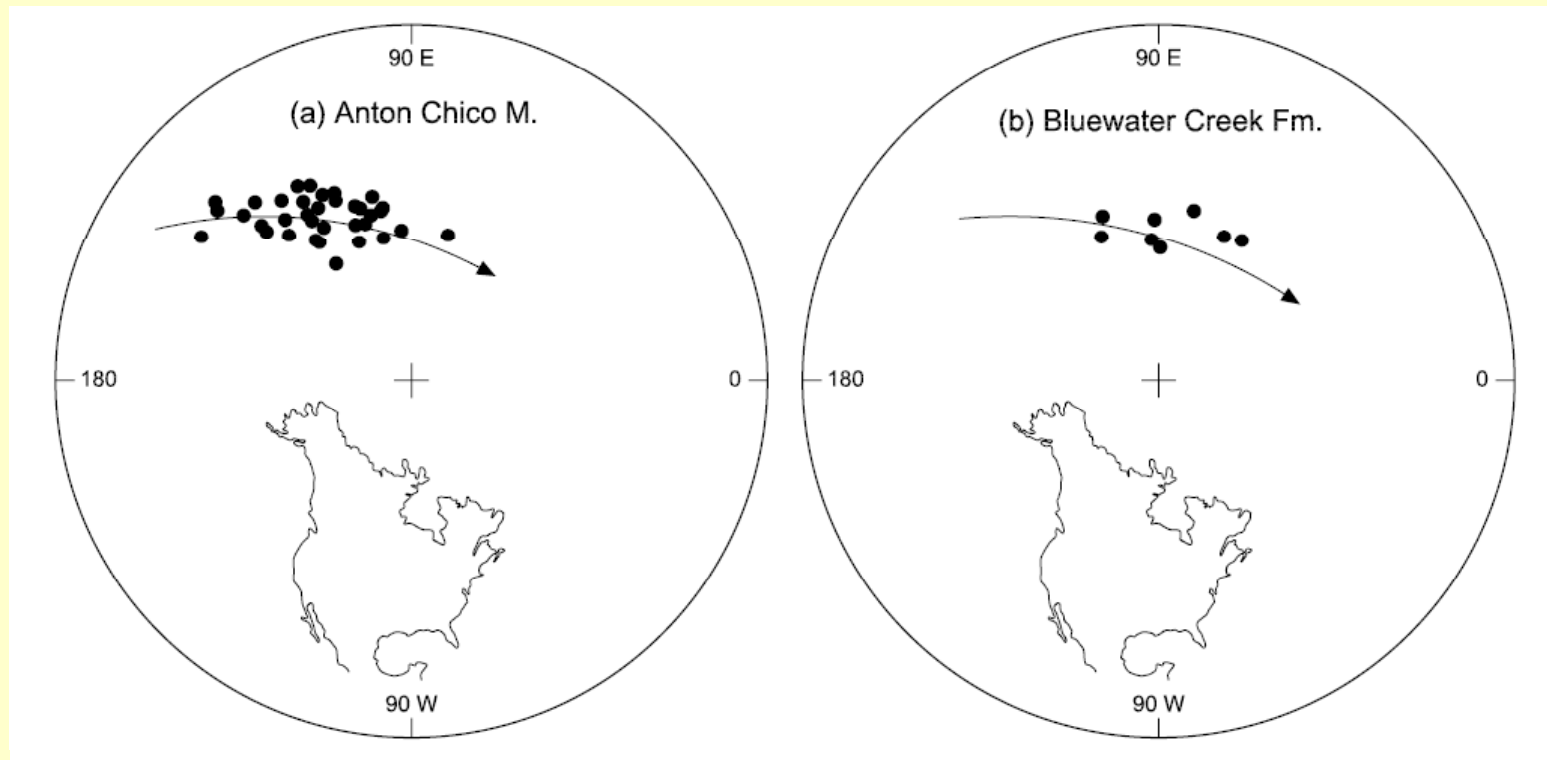


Fig. 1. Elongation (E_p) of sets of site-mean virtual geomagnetic poles (VGP) plotted against the elongation of sets of equivalent field directions (E_d). Data from Table 1.

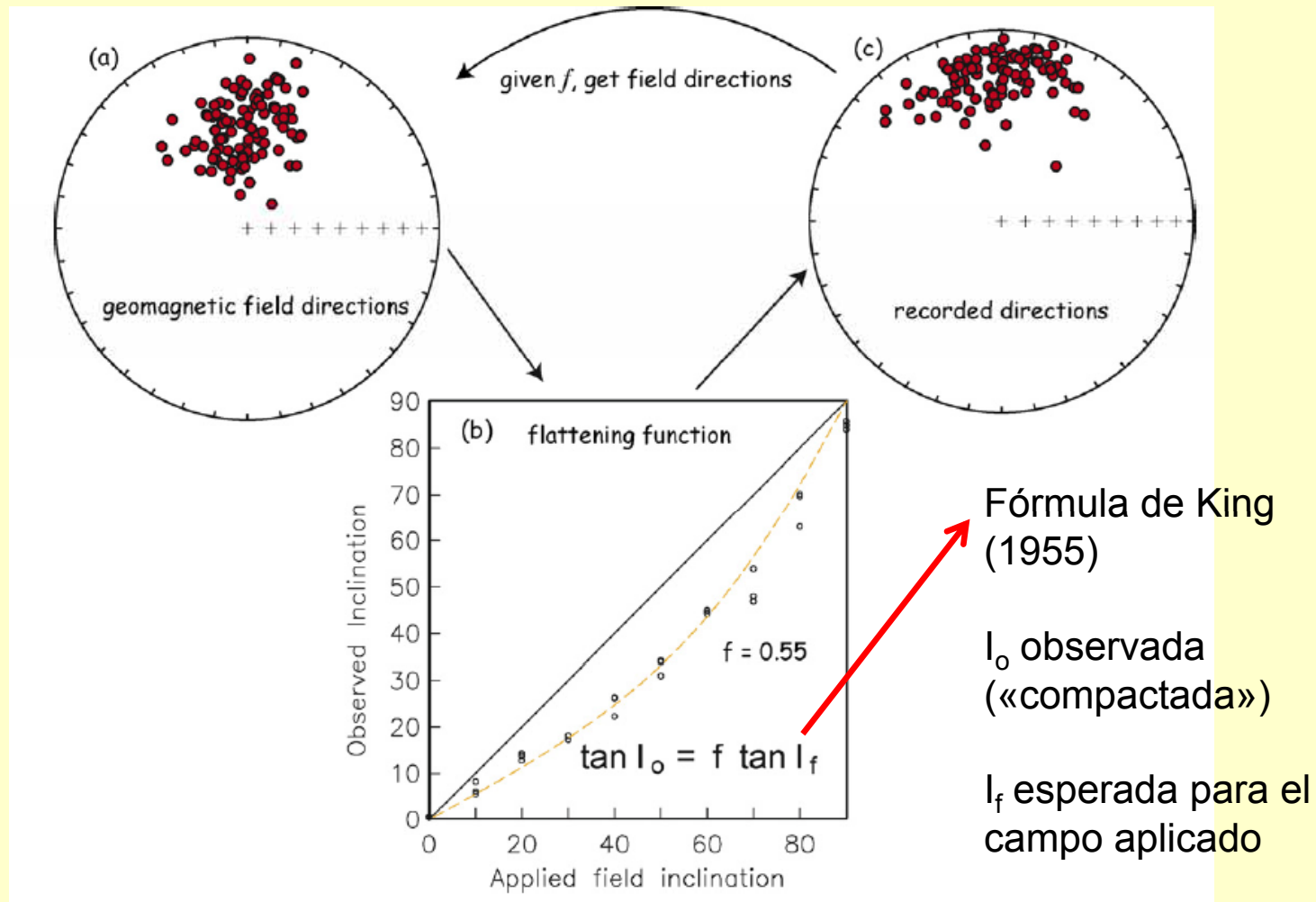
Beck et al. 2003

La elongación es interpretada como evidencia de que el tiempo de adquisición de la remanencia fue suficientemente prolongado como para registrar desplazamiento polar aparente



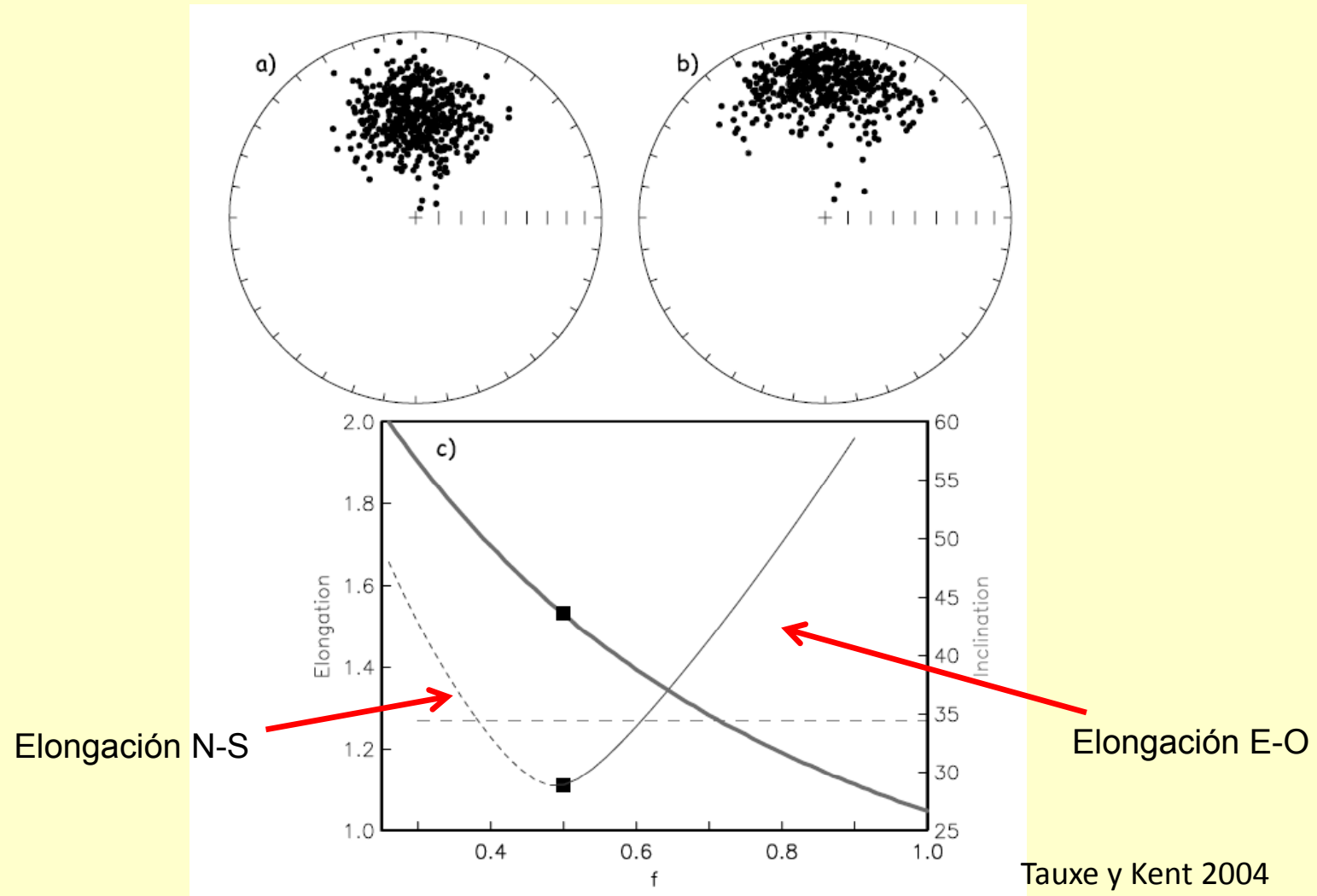
Beck et al. 2003

Error de inclinación por compactación

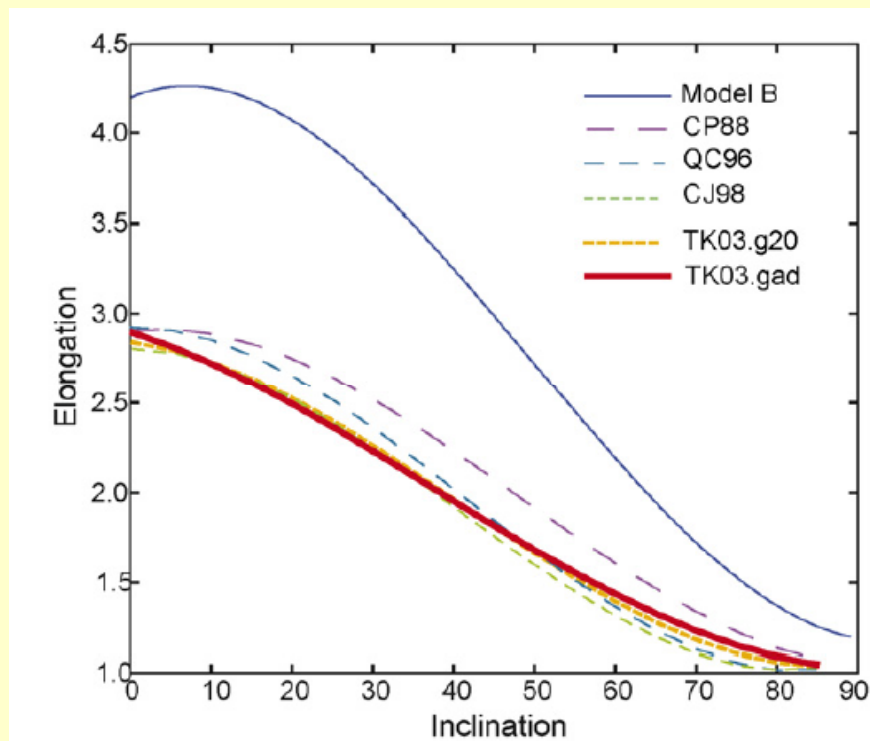


Tauxe et al. 2008

Error de inclinación por compactación

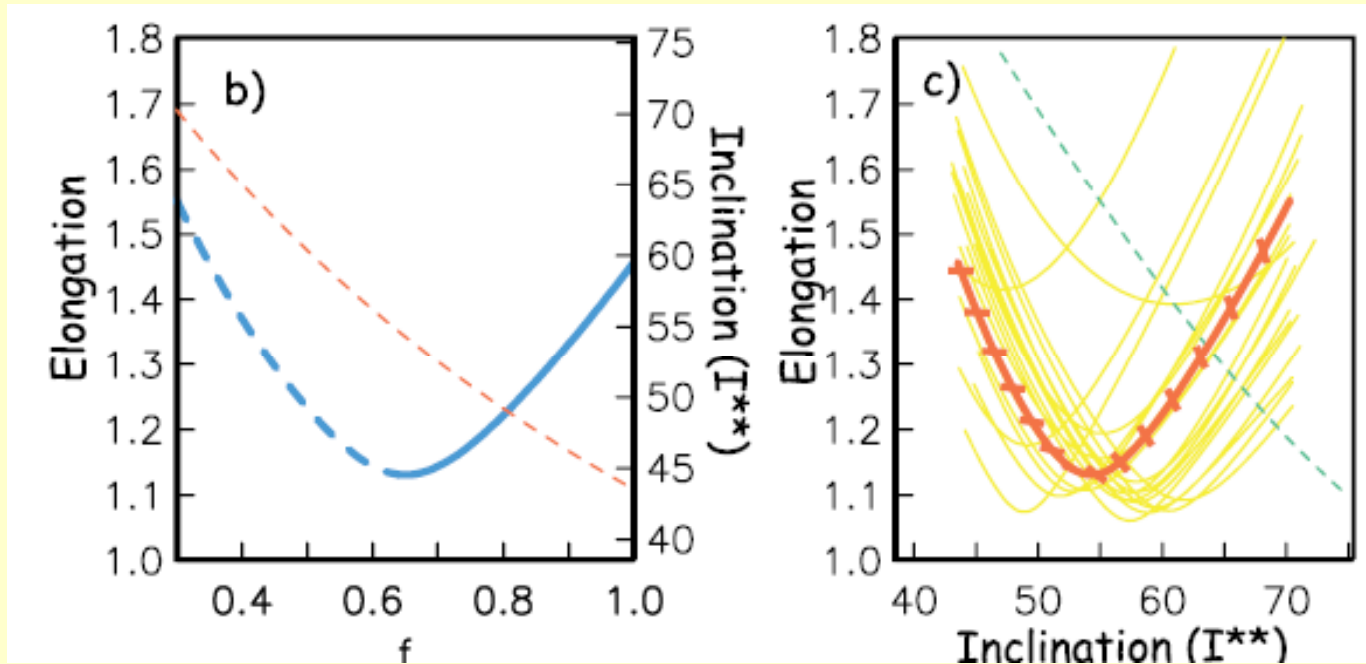


En realidad no se espera que la población de direcciones registradas en la sucesión sedimentaria sea circular.
Se espera que la población tenga una cierta elongación en sentido N-S impartida por la variación paleosecular.



Tauxe et al. 2008

Corrección por el método de Elongación-Inclinación (E-I)



$$\tan(I^{**}) = (1/f) \tan(I^*)$$

I^* «compactada»

I^{**} «descompactada»

El método de Tauxe y Kent (2004) aplica valores decrecientes de f a la población, calculando la elongación y la inclinación a cada paso. Se elige el valor de f que produce una elongación acorde con la inclinación, de acuerdo con el modelo de VPS elegido (línea verde punteada).

Rocas sedimentarias

Ventajas:

- Las superficies de estratificación dan un perfecto control de la paleohorizontal
- El proceso de adquisición de remanencia se prolonga y colabora para promediar la VPS

Desventajas:

- El proceso de adquisición de remanencia puede prolongarse hasta la diagénesis tardía, y es difícil establecer la edad de la magnetización
- Posibilidad de error en la inclinación, por compactación

Tiempo involucrado en la adquisición de la remanencia

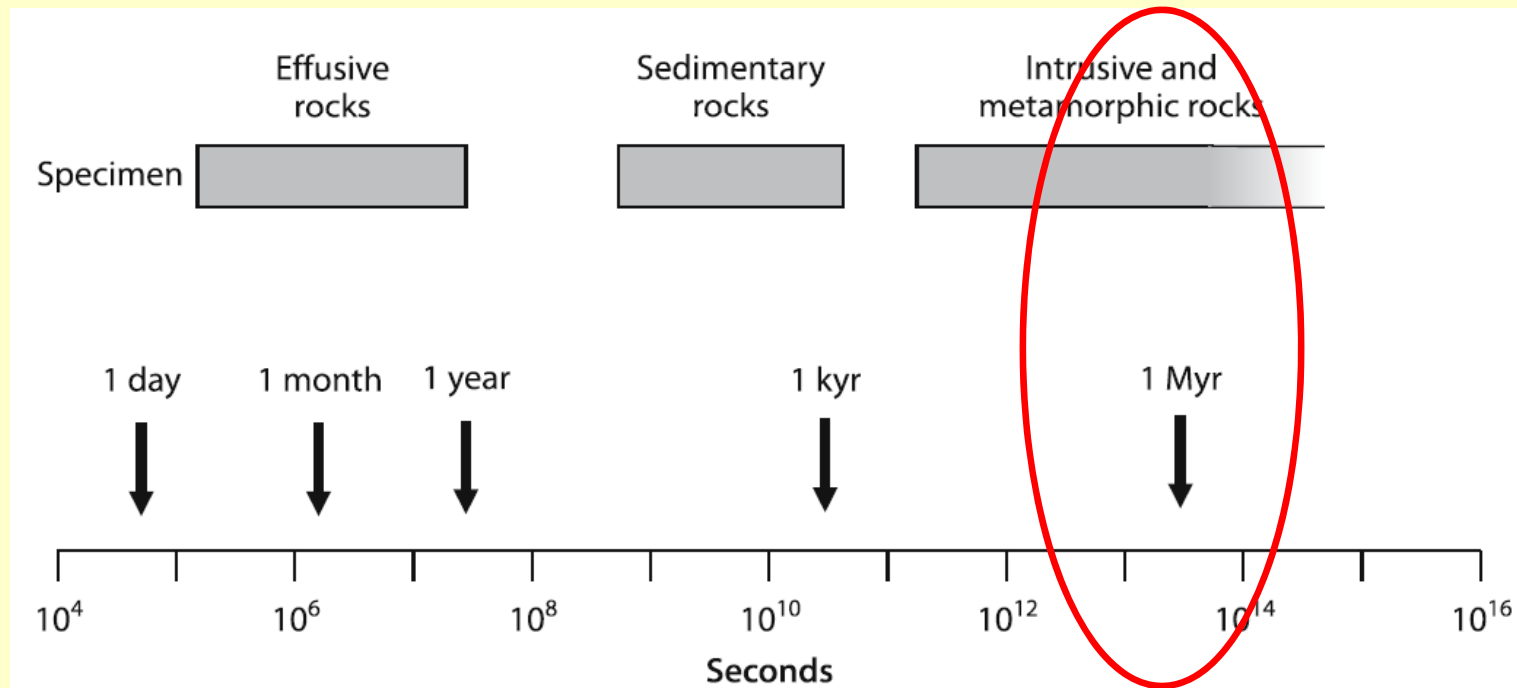
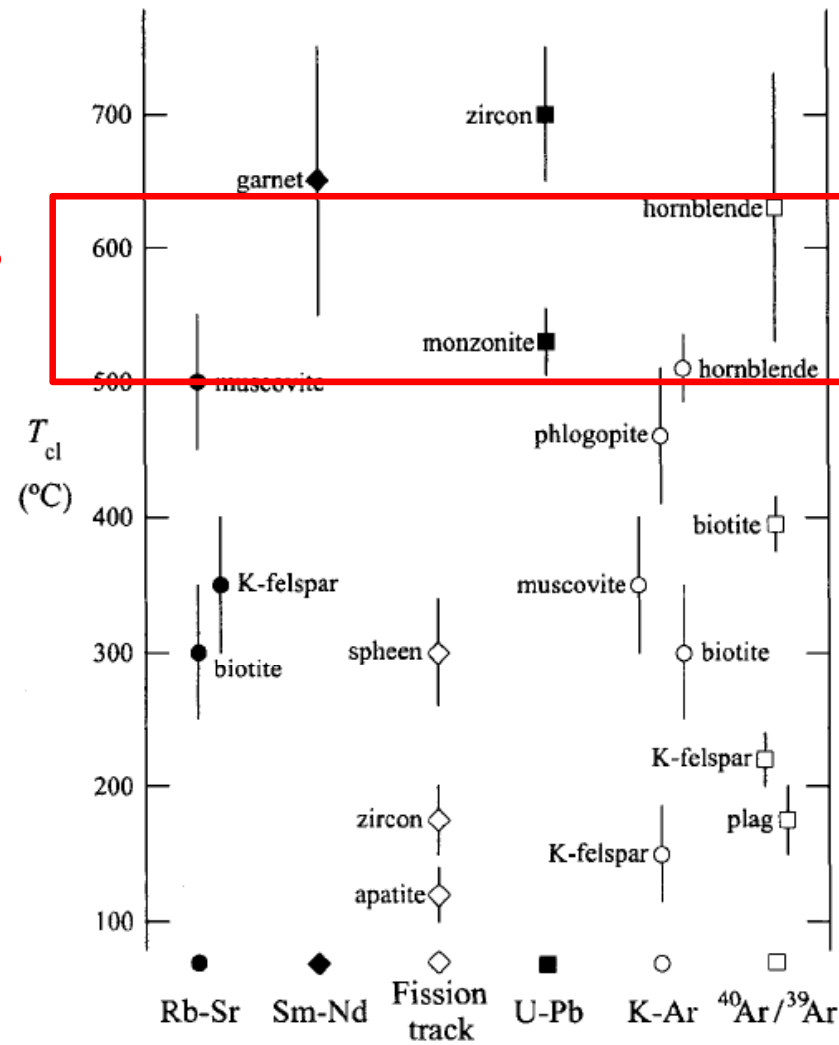


Fig. 4.9. Schematic outline of the remanence acquisition time in various types of rocks (time scale in seconds). *Gray boxes* refer to the time interval recorded in a specimen

Lanza y Meloni, 2006

Edad de la roca, ¿es edad de la remanencia?



McElhinny y
McFadden,
2000

Fig. 6.10. Estimates of closure temperature T_{cl} , using different isotopic dating methods, following Berger and York (1981) for $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating and Dodson and McClelland Brown (1985) for other methods.

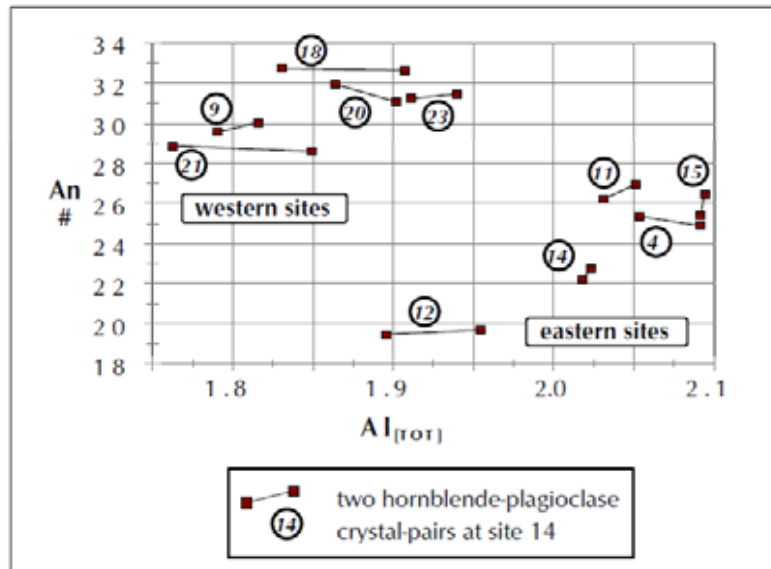
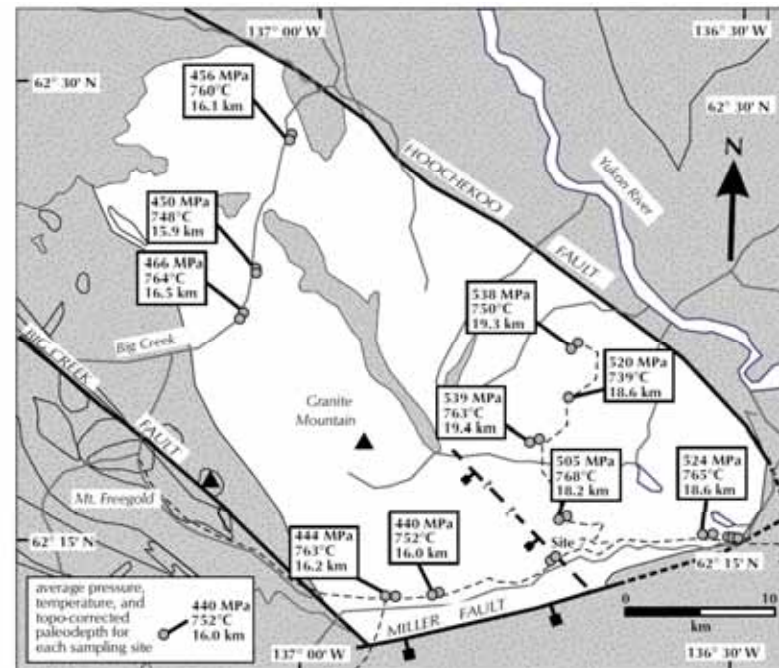


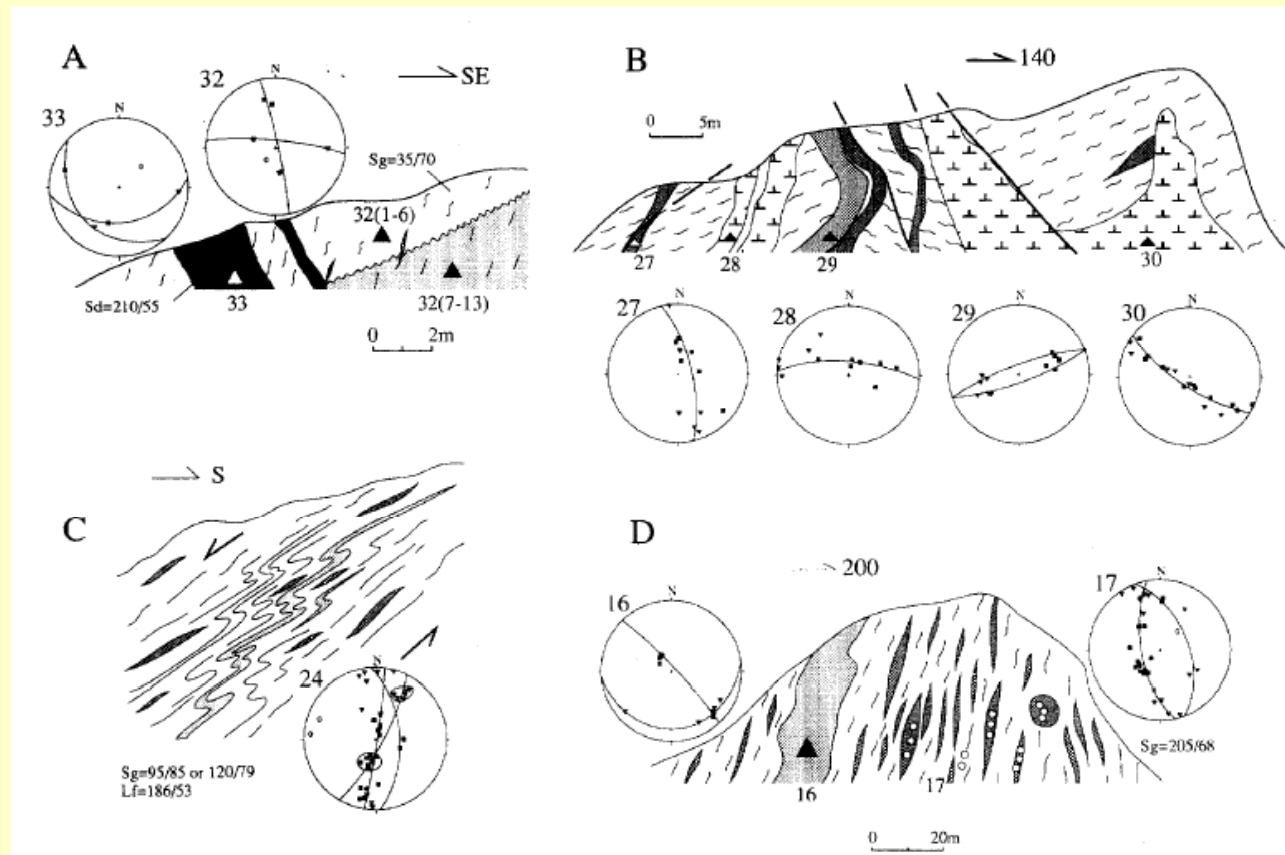
Figure 7. Plagioclase and hornblende crystal-pairs for each site plotted as calcium content in plagioclase (Anorthite # - An #) versus total number of aluminum cations (Al_{TOT}) in hornblende. Within-site consistency is indicated by the similarity of pairs from each site.

McCausland et al. 2001

Paleohorizontal
en intrusivos

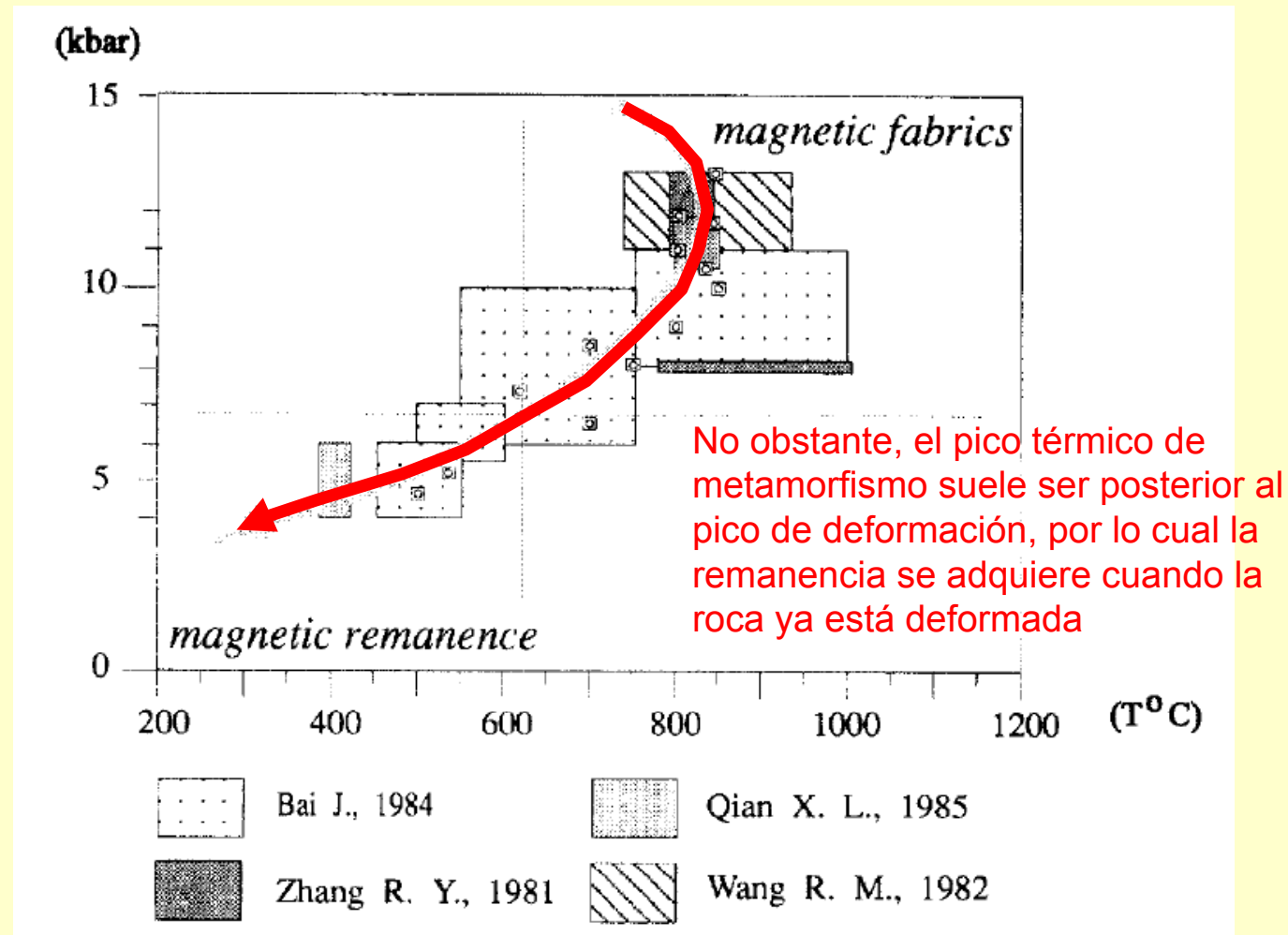


Paleohorizontal en rocas metamórficas



Las rocas metamórficas de grado medio-alto usualmente están poli-deformadas

Piper y Zhang 1998



Piper y Zhang 1998

Rocas intrusivas y metamórficas

Ventajas:

- El proceso de adquisición de remanencia se prolonga y colabora para promediar la VPS

Desventajas:

- Los minerales portadores de remanencia suelen estar en tamaño MD (salvo como inclusiones o exsoluciones)
- La paleohorizontal es difícil de establecer
- Establecer la edad de adquisición de la remanencia requiere métodos específicos de datación mineral, y determinar fehacientemente el origen de la MRN (TRM temprano, CRM tardío?)

Remagnetización

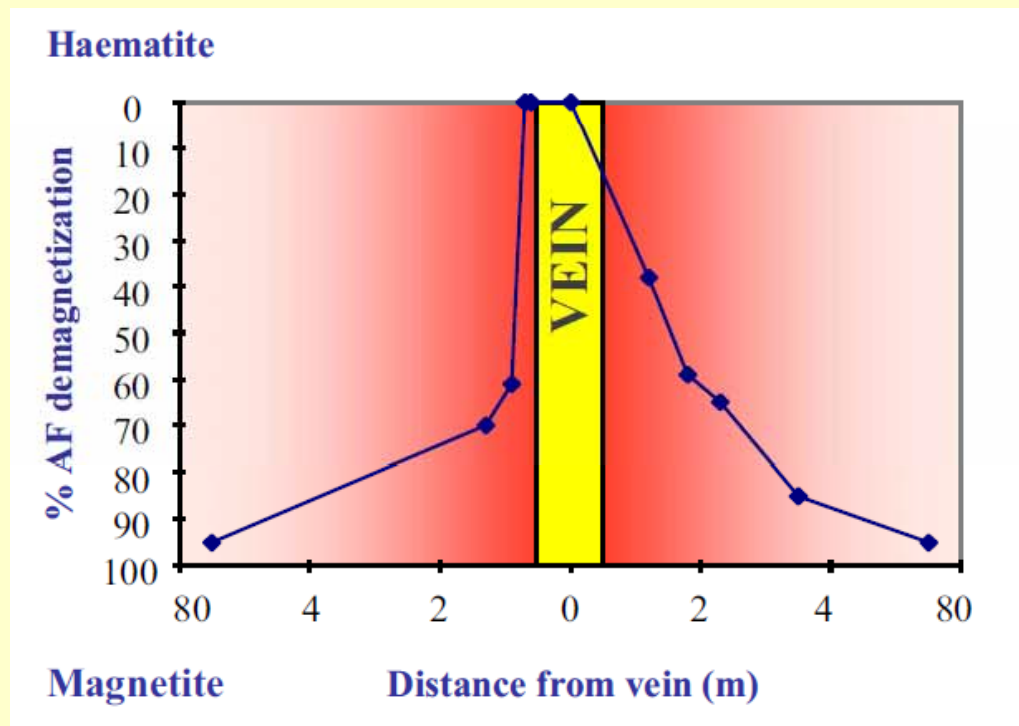
Adquisición de una magnetización secundaria, por modificaciones químicas u otros mecanismos (ej. termoviscosa).

La magnetización secundaria puede sumarse a la primaria o reemplazarla totalmente.

Las modificaciones químicas involucran participación de fluidos, que pueden ser:

- de origen externo («fluidos orogénicos», hidrotermalismo)
- relacionados con los procesos diagenéticos

Para interpretar correctamente las remagnetizaciones, es clave establecer el vínculo entre éstas y su causal supuesta.



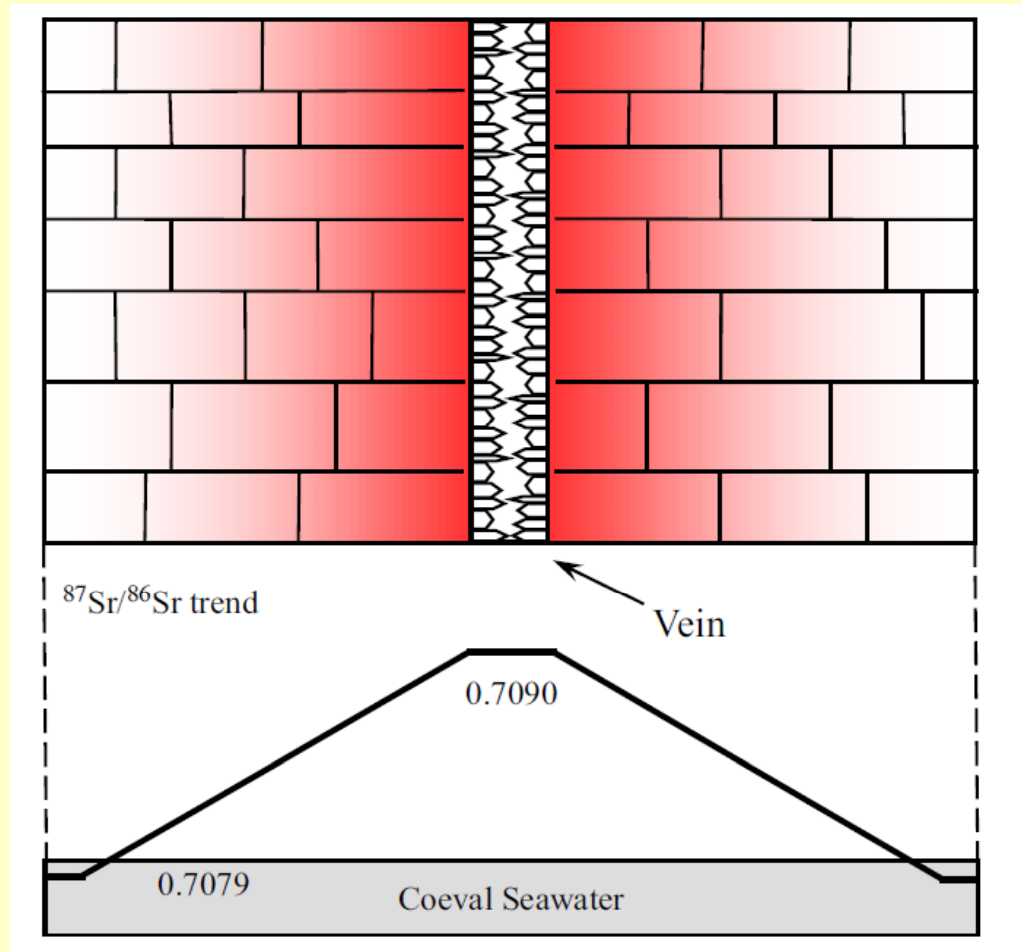
Caliza Viola
(Ordovícico, USA),
atravesada por una
veta pérmica.

CRM pérmica portada
por hematita en
cercanías de la veta.

CRM carbonífero
portado por magnetita,
más lejos.

En este caso, existe una remagnetización portada por hematita, cuyo origen relacionado con las vetas está claramente indicado por la distribución espacial de la remagnetización.

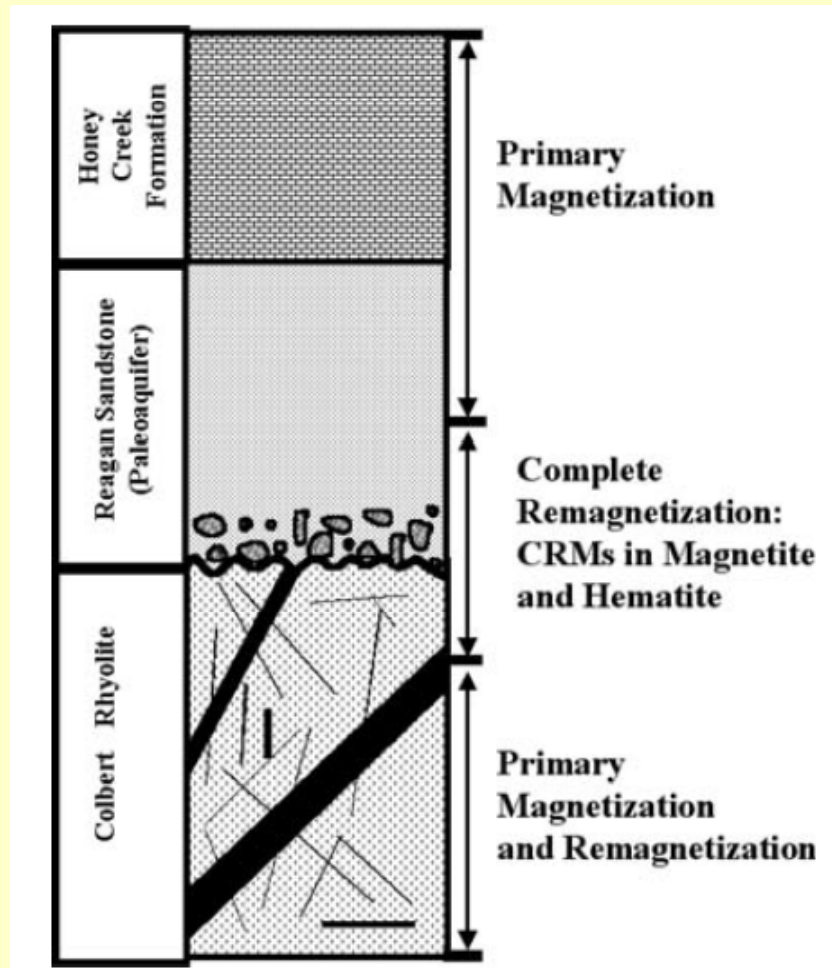
Elmore et al. 2012



La geoquímica confirma que la roca de caja es progresivamente menos afectada por alteración a medida que nos alejamos de la veta.

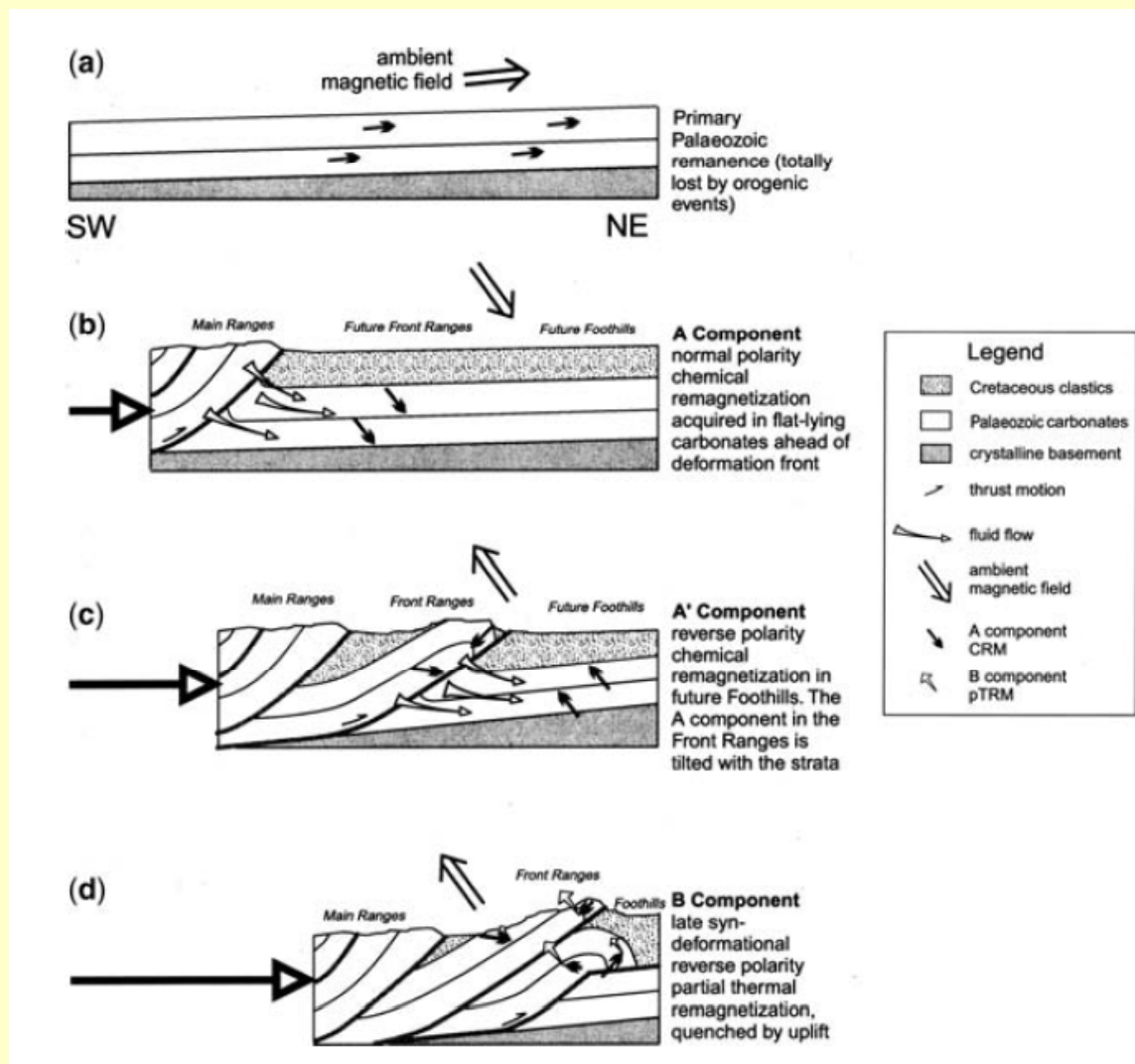
Por lo tanto, los fluidos relacionados con la veta son los causantes de la remagnetización.

Elmore et al. 2012



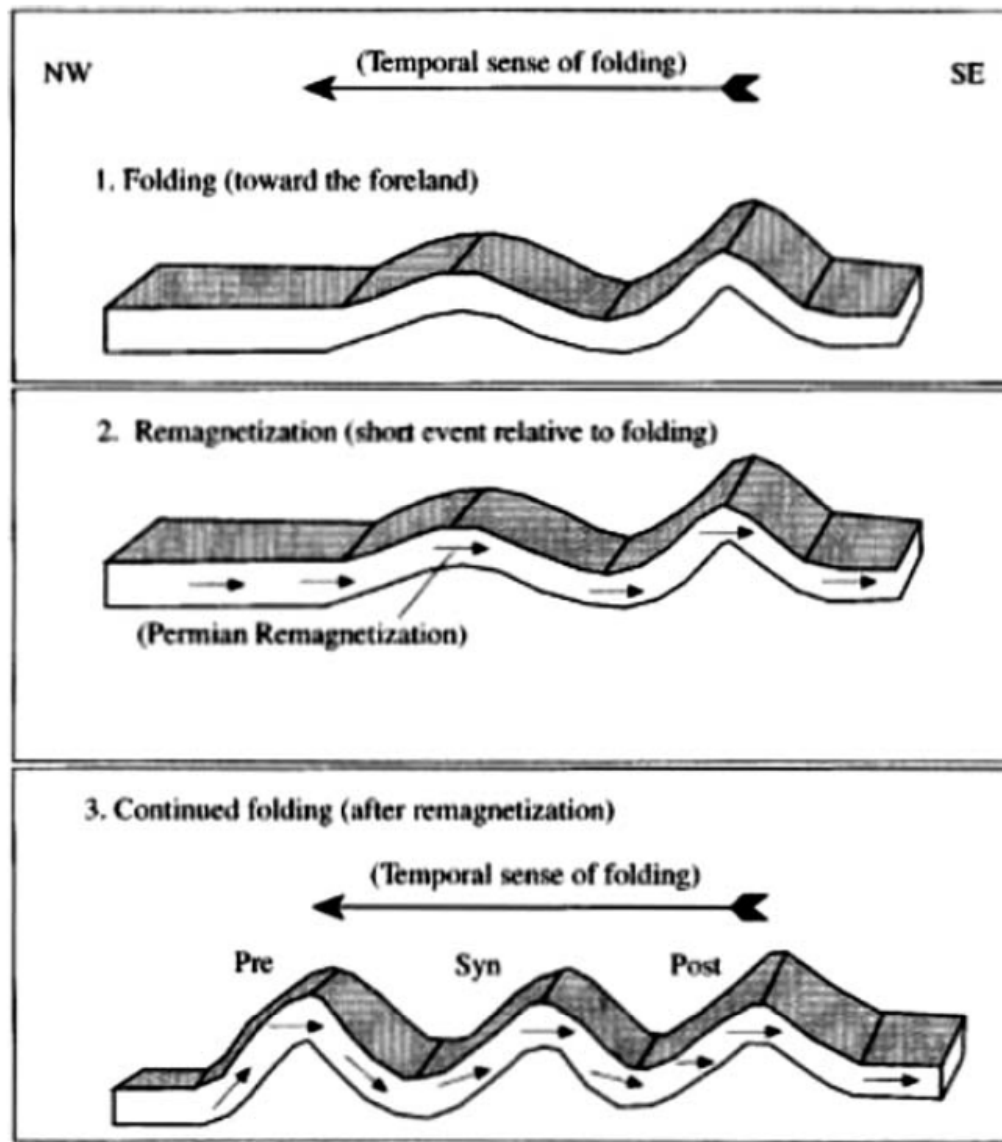
Remagnetización en y por debajo del paleoacuífero: ¿por migración de fluidos?

Elmore et al. 2012



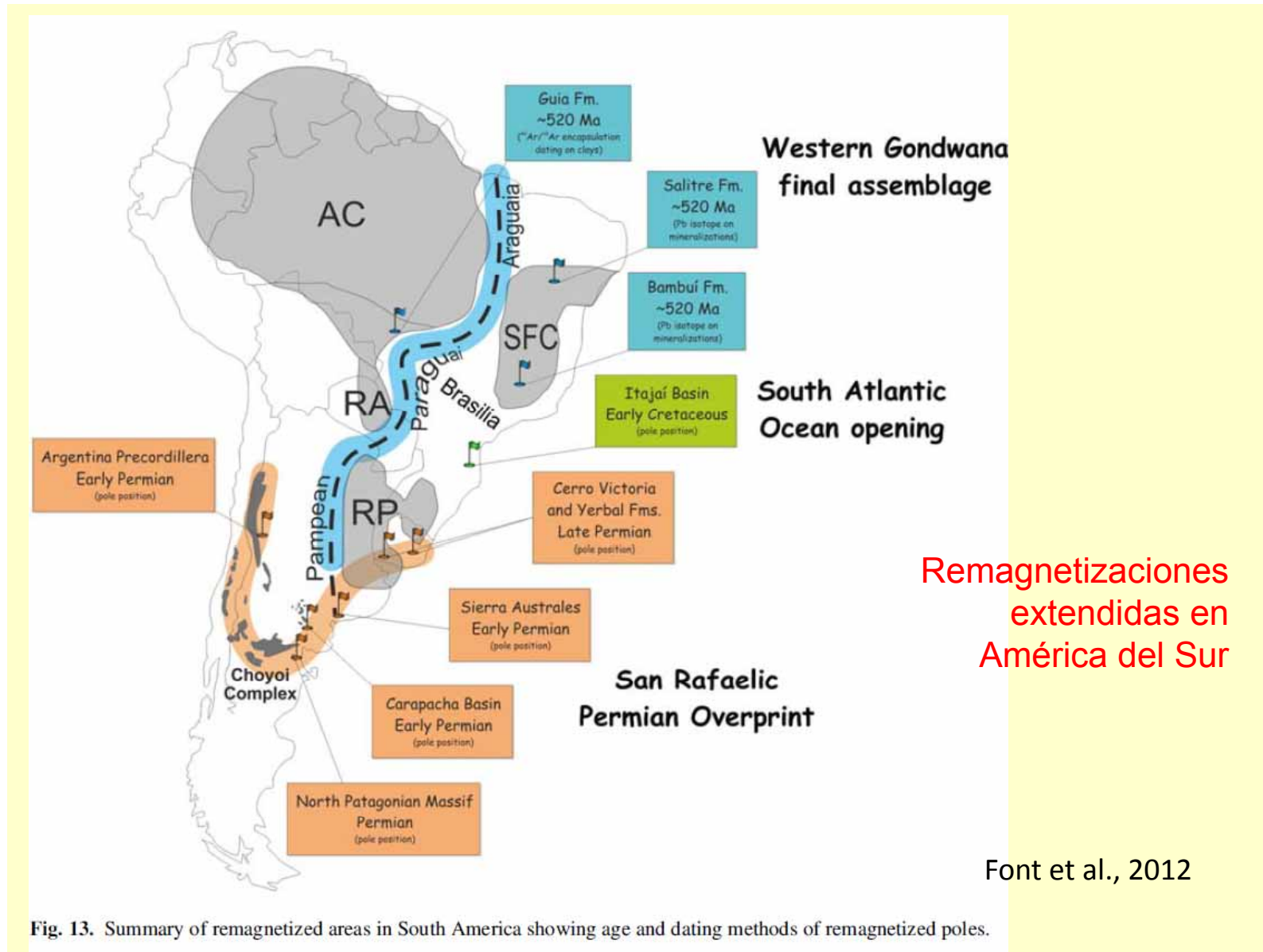
«Fluidos orogénicos» esto explicaría la frecuente relación temporal y espacial entre orogenias y eventos de remagnetización

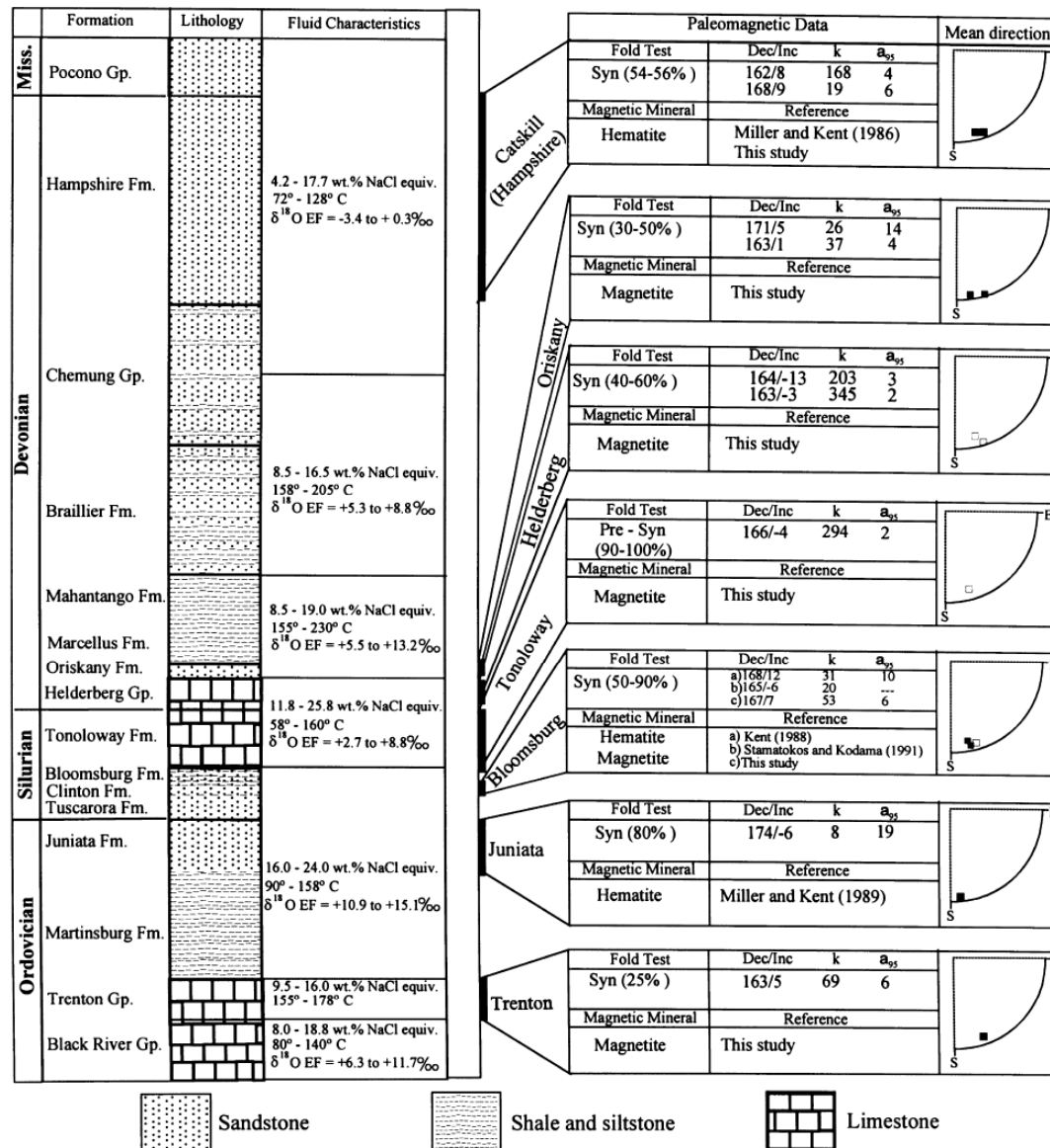
Modelo de Enkin et al. 2000 para magnetizaciones múltiples en la Cordillera Canadiense.



La relación temporal entre la deformación y la adquisición de remanencia, permite establecer el sentido de avance de la deformación

Stamatakis et al.
 1996, en Van der Voo
 y Torsvik 2012

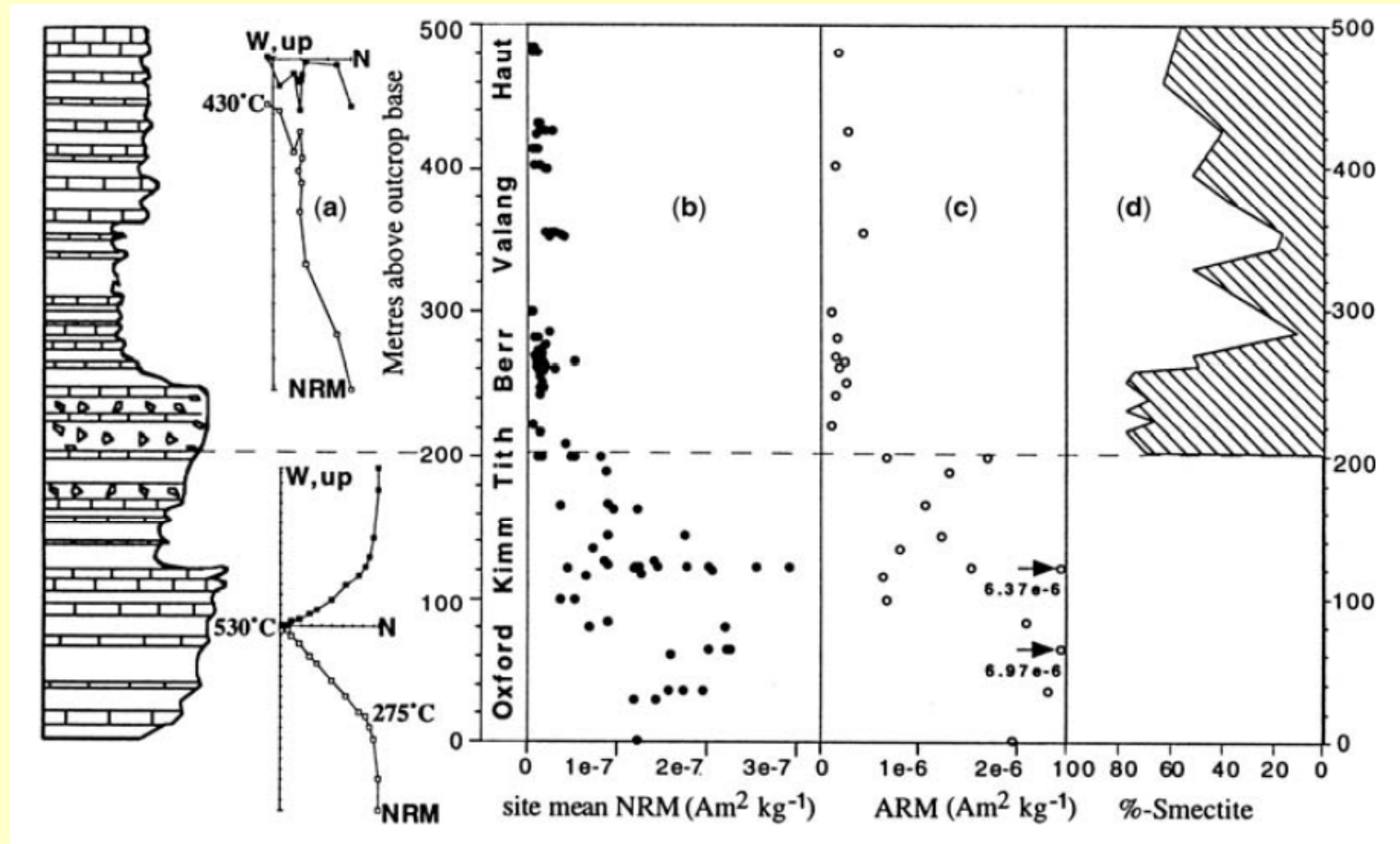




Descartan efecto de fluidos orogénicos, ya que la composición isotópica en inclusiones fluidas varía, y también el mineral magnético portador

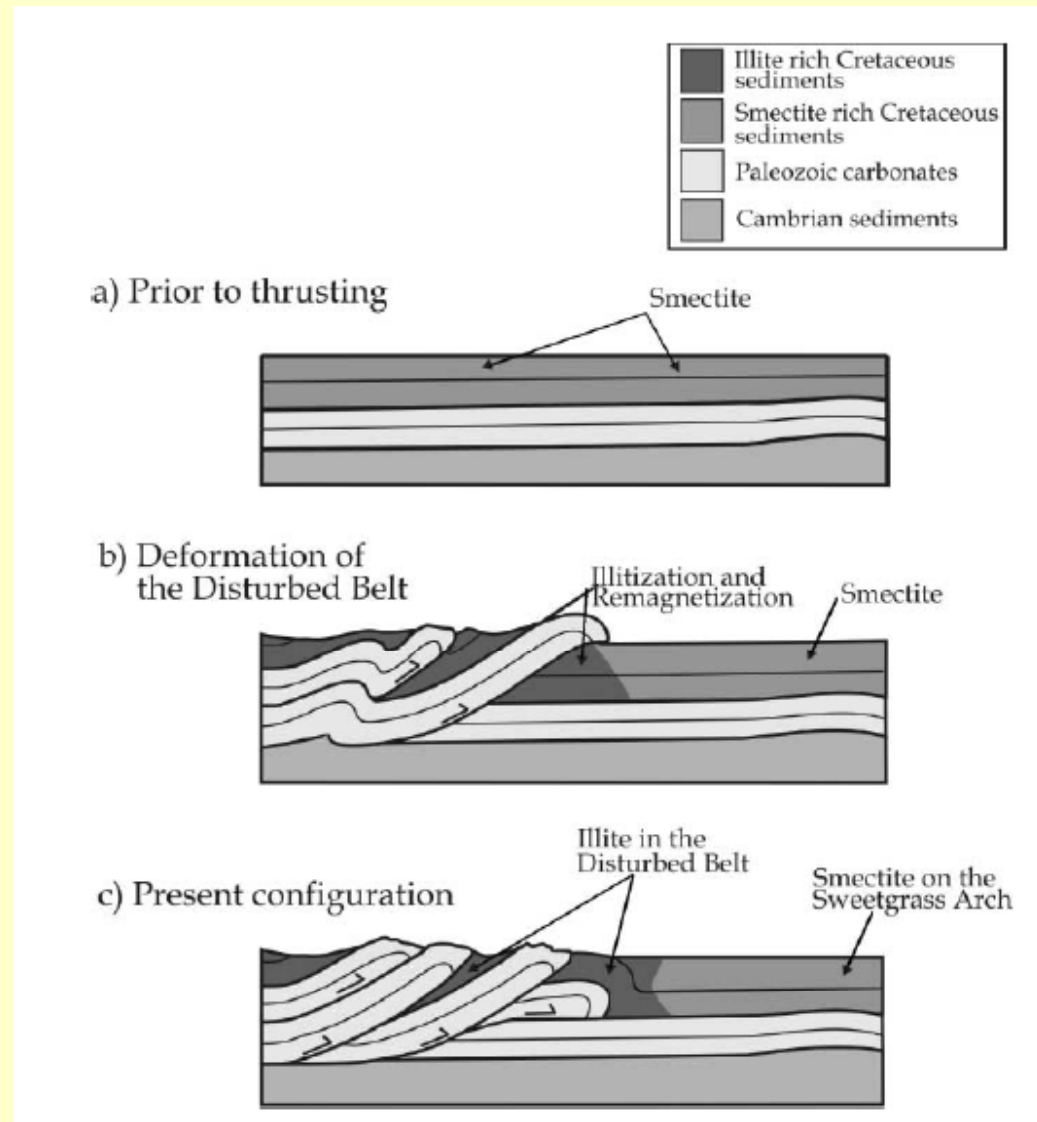
Apalaches, USA.
Evans et al. 2000

Transformaciones diagenéticas



Pasaje de esmectita a illita, generando como subproducto magnetita secundaria

Katz et al. 1998



Pasaje esmectita-illita, modelo alternativo al de los fluidos orogénicos

Gill et al. 2002

Maduración de materia orgánica

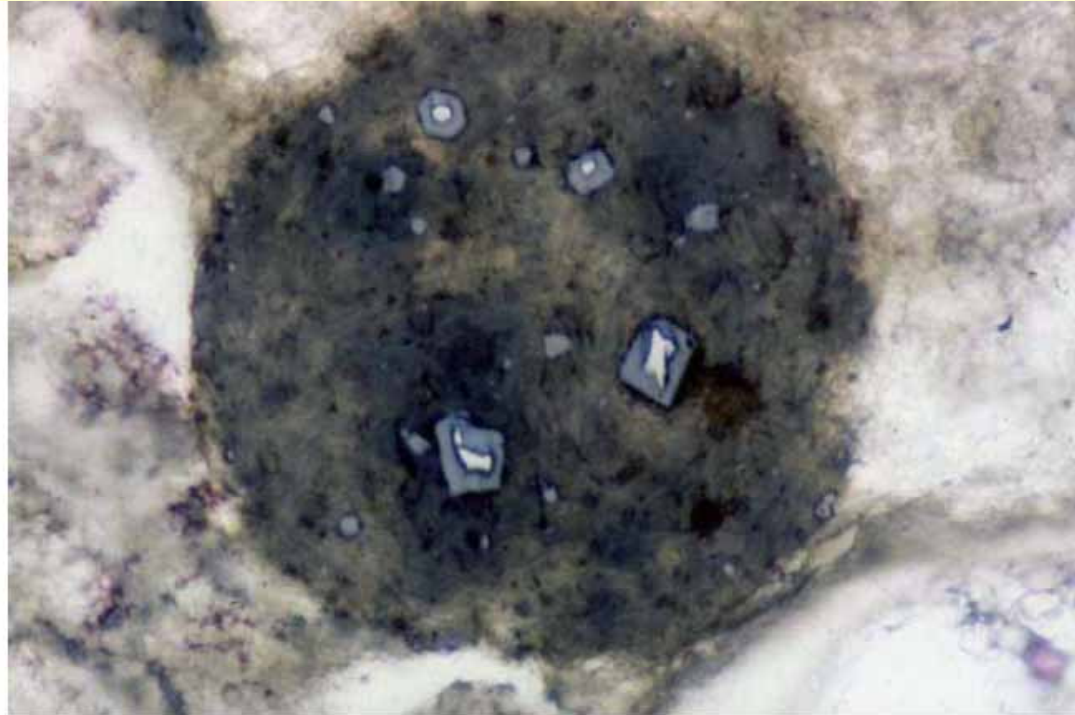


Fig. 7. Photomicrograph of a fecal pellet from the Belden Formation in reflected light. The pellets contain pyrite rimmed by magnetite. Pellet is 250 μm in diameter (after Fruit *et al.* 1995).

Se forma magnetita autigénica alrededor de pirita

Elmore et al. 2012

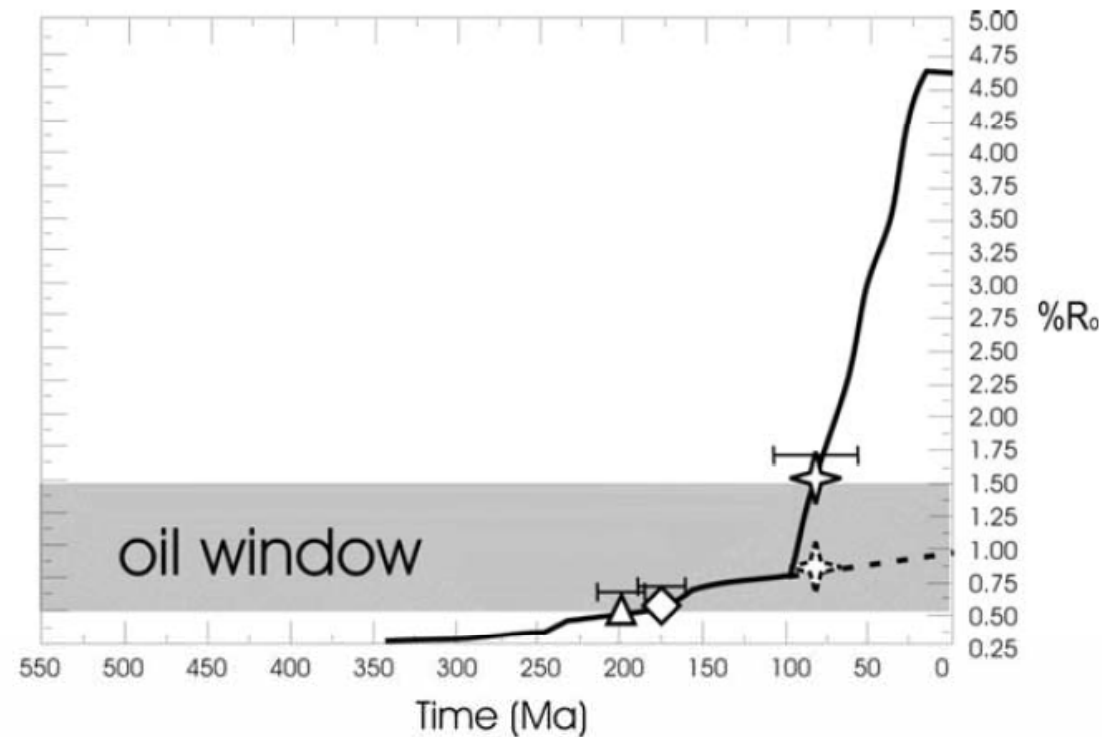
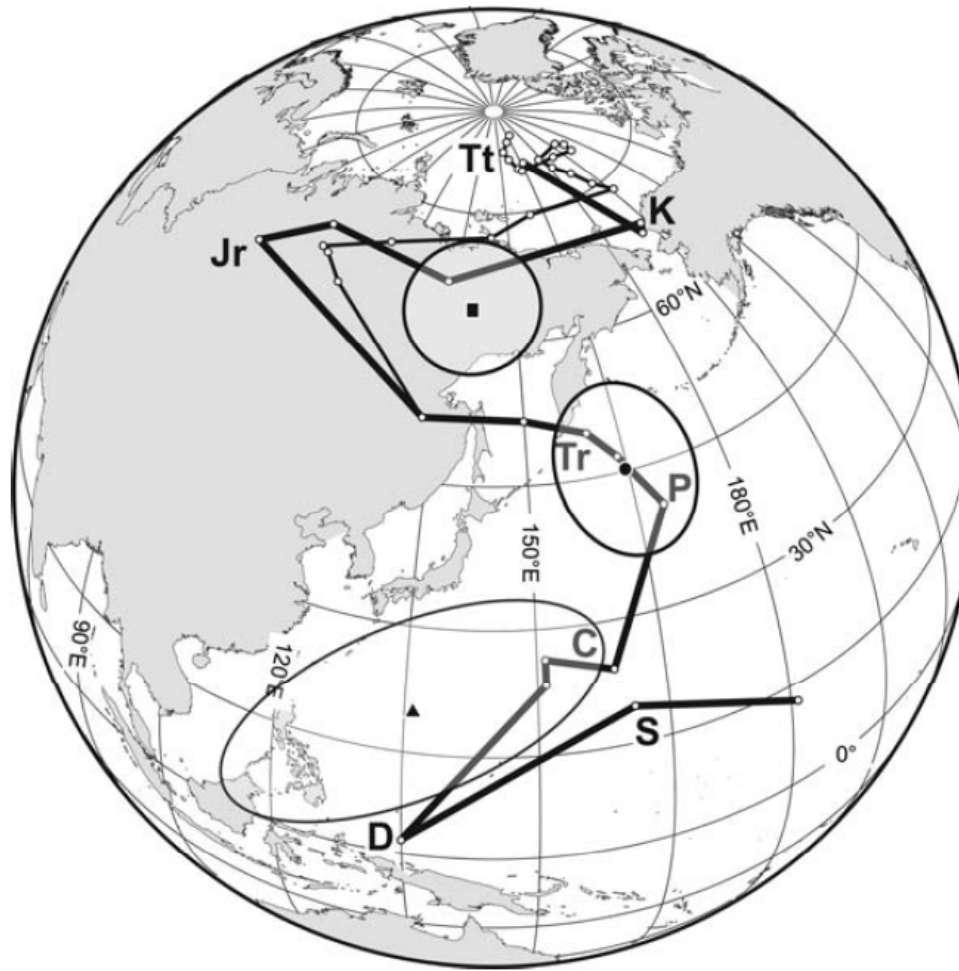


Fig. 8. Time versus vitrinite reflectance curve for the Mississippian Desert Limestone (with the oil window) and poles from the Desert Limestone/Chainman shale. The triangle (CR) and diamond (MHR) represent the Late Triassic–Early Jurassic component 1, and the star represents the Cretaceous–Early Tertiary component 2. Error bars for the poles were estimated from the APWP. The dashed line represents the estimated burial curve for the Chainman Shale in western Utah and the dashed star represents component 2 on the estimated curve, suggesting that component 2 could have been acquired within the centre of the oil window (modified after Blumstein *et al.* 2004).

La magnetización es simultánea con la maduración de hidrocarburos

Elmore et al. 2012

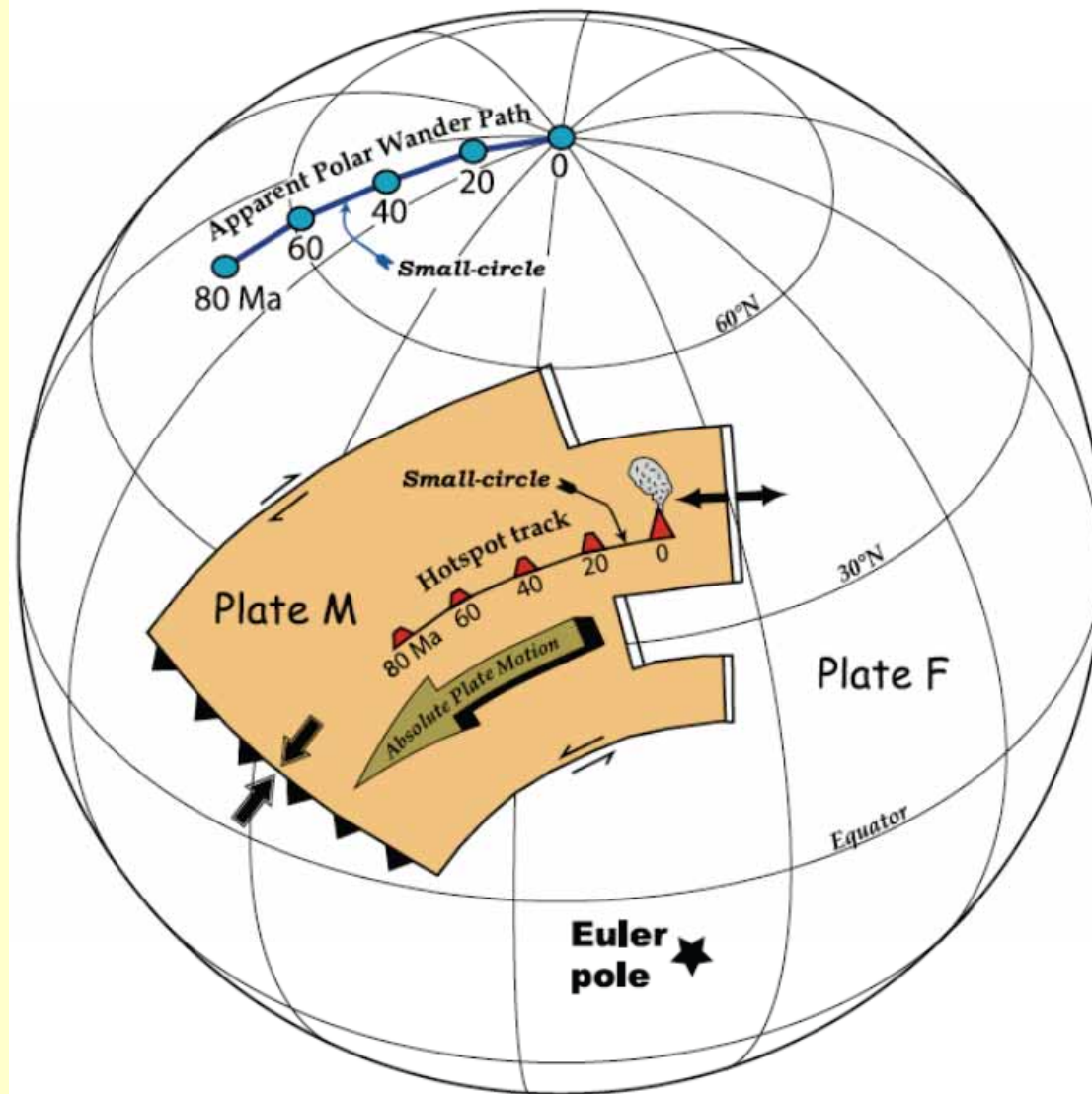
Datación de eventos de remagnetización por comparación con CDPA

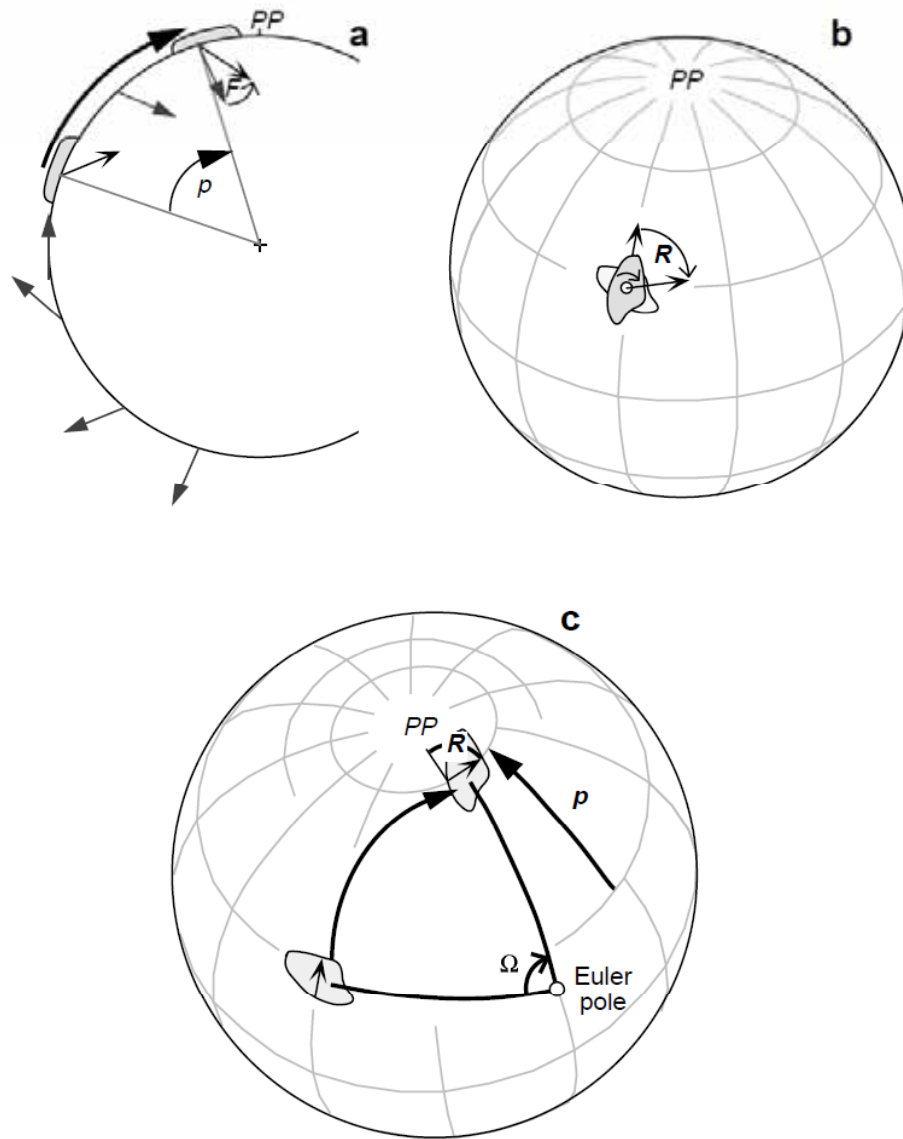


Dolomita cambro-ordovícica Durness con magnetización devónica.

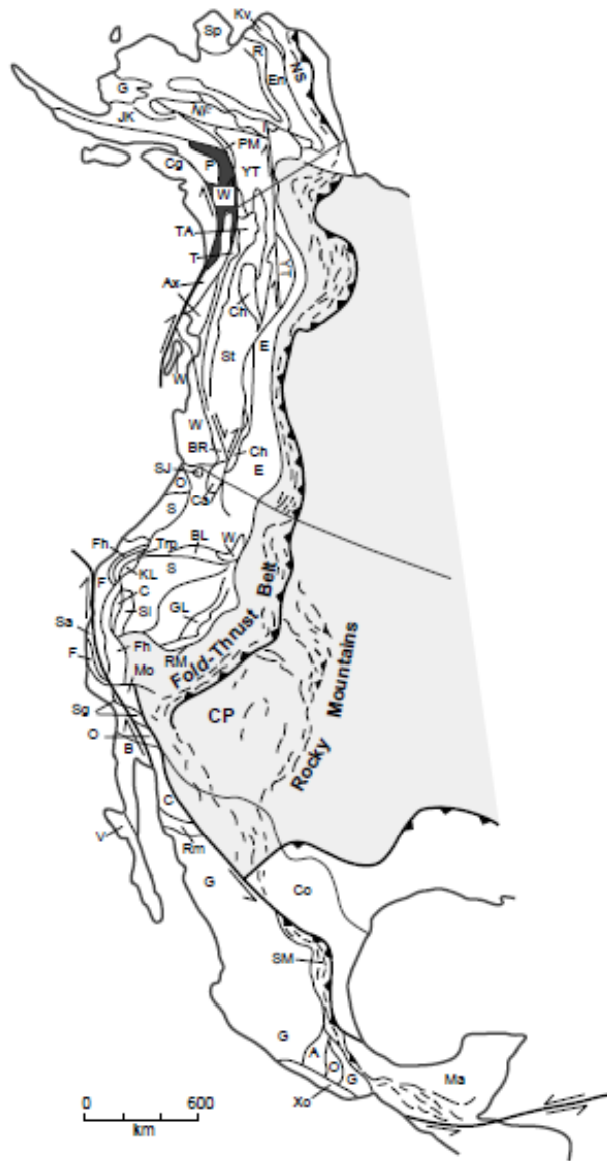
Brechas con hematita autigénica parecen ser triásicas y jurásicas

Elmore et al. 2012

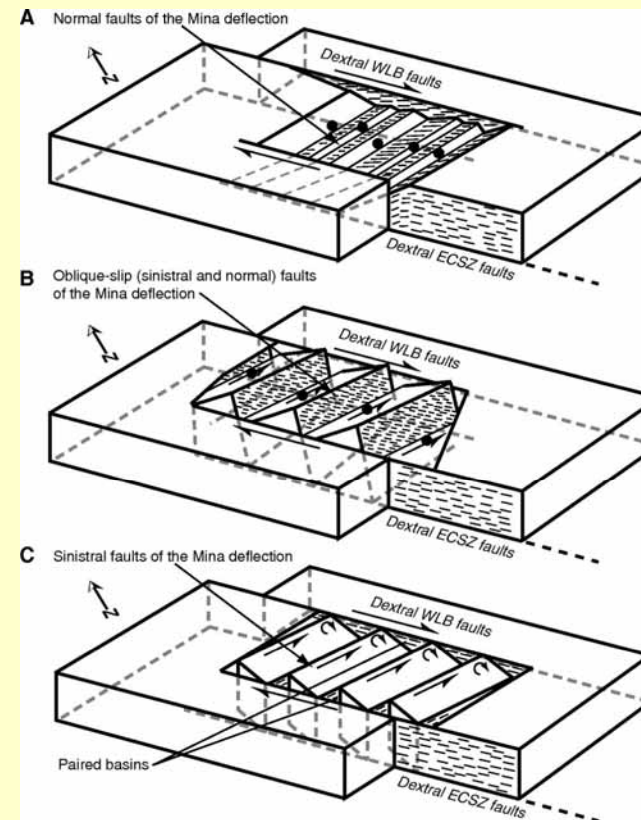


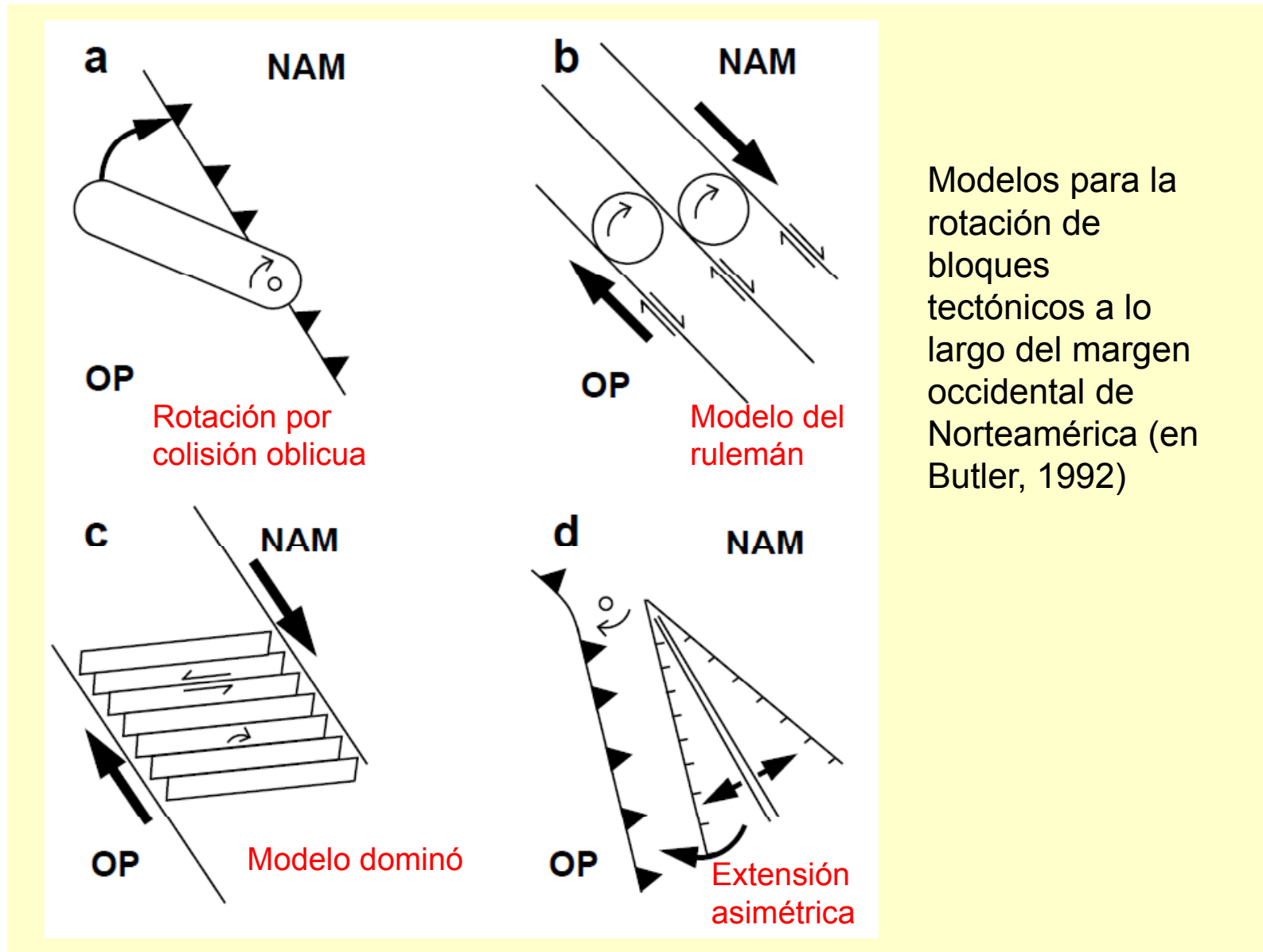


Butler 1992

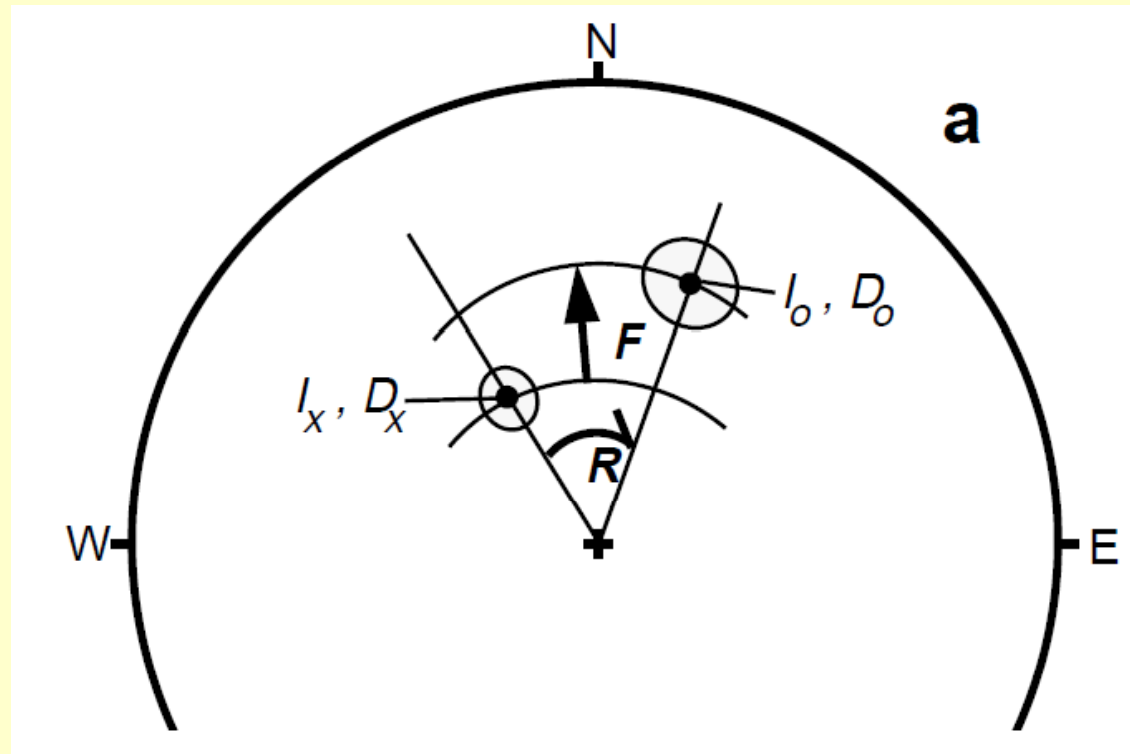


En zonas tectónicamente complejas (e.g. fajas plegadas y corridas), parte de la deformación puede acomodarse en forma de rotaciones según ejes verticales.



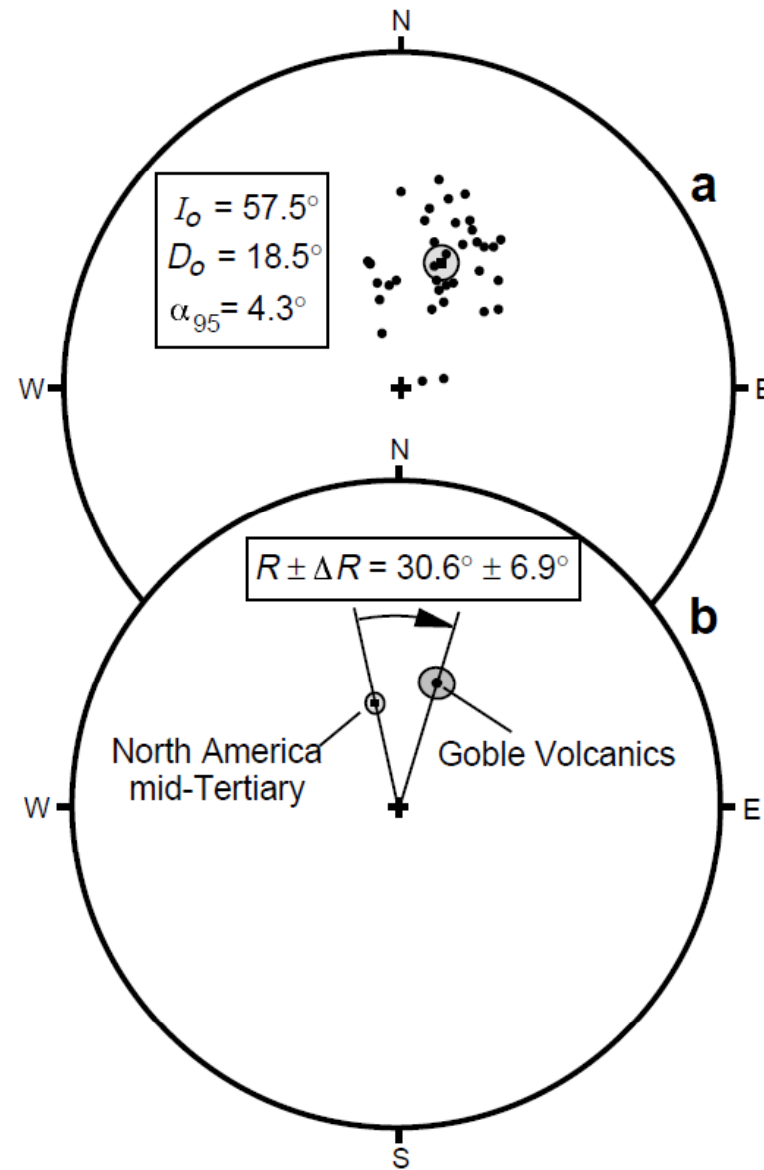


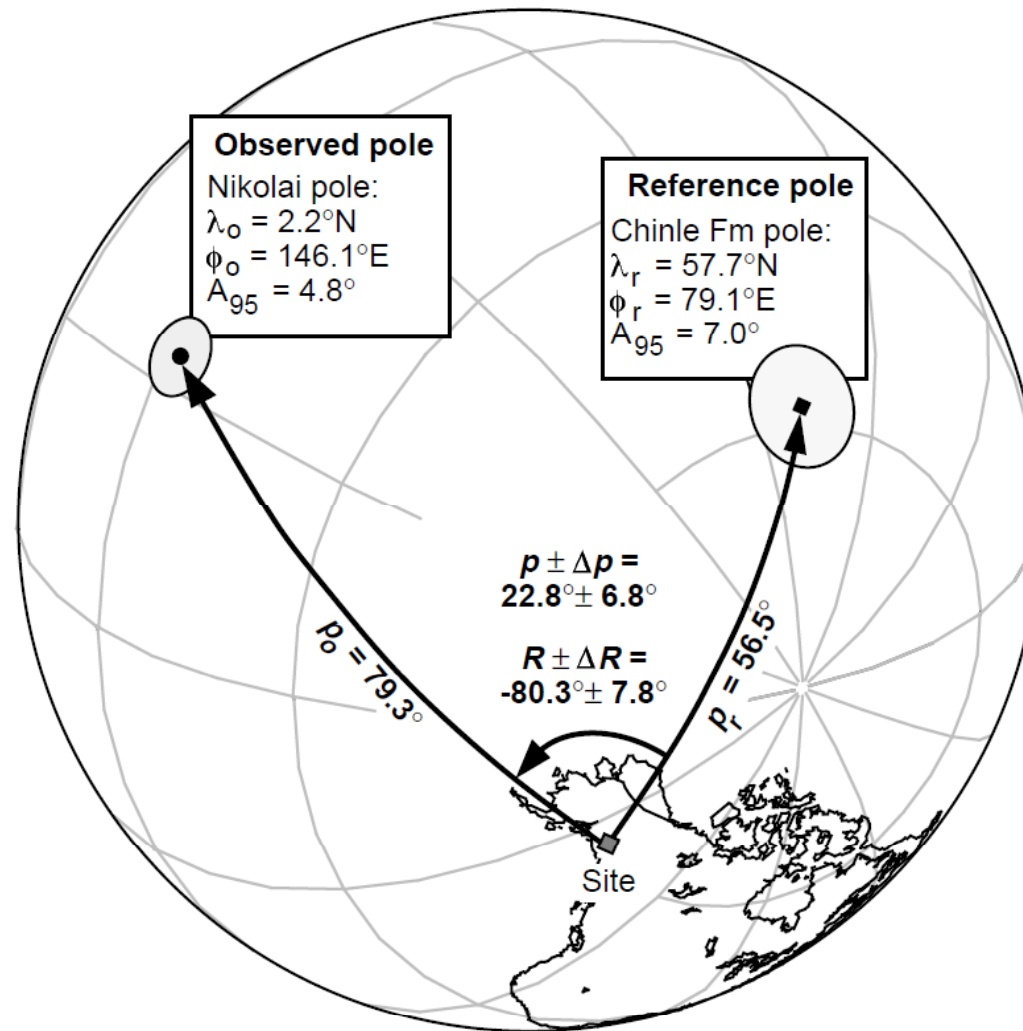
Cuantificación paleomagnética de rotaciones según ejes verticales



El paleomagnetismo es la única herramienta confiable para cuantificar esta clase de rotaciones.

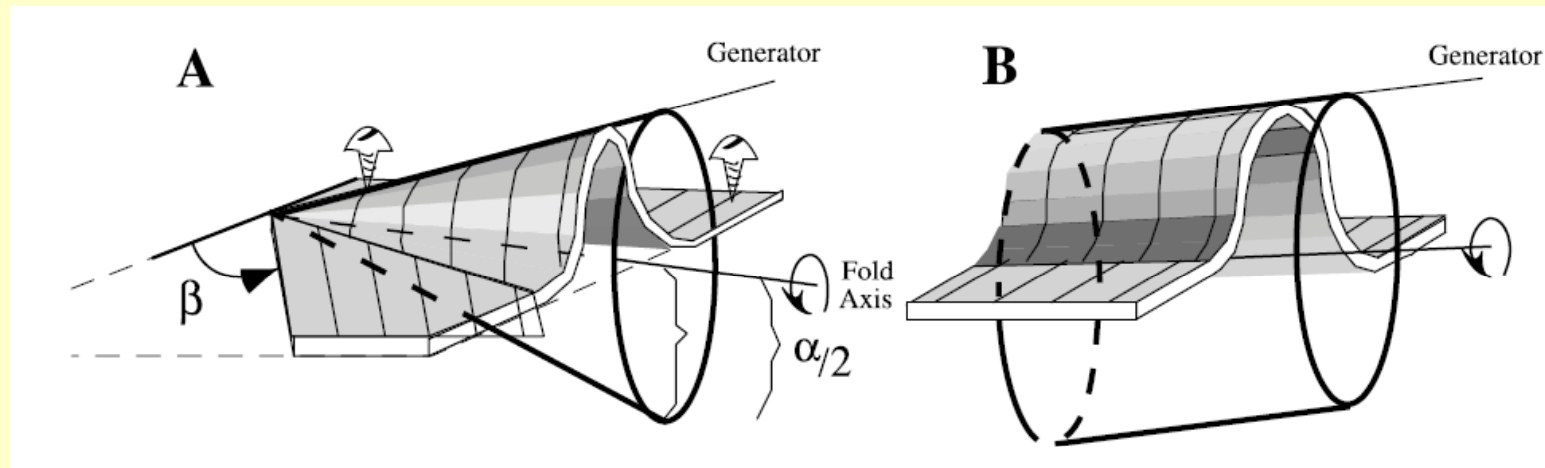
Opción 1: comparar la dirección de remanencia con una dirección de referencia





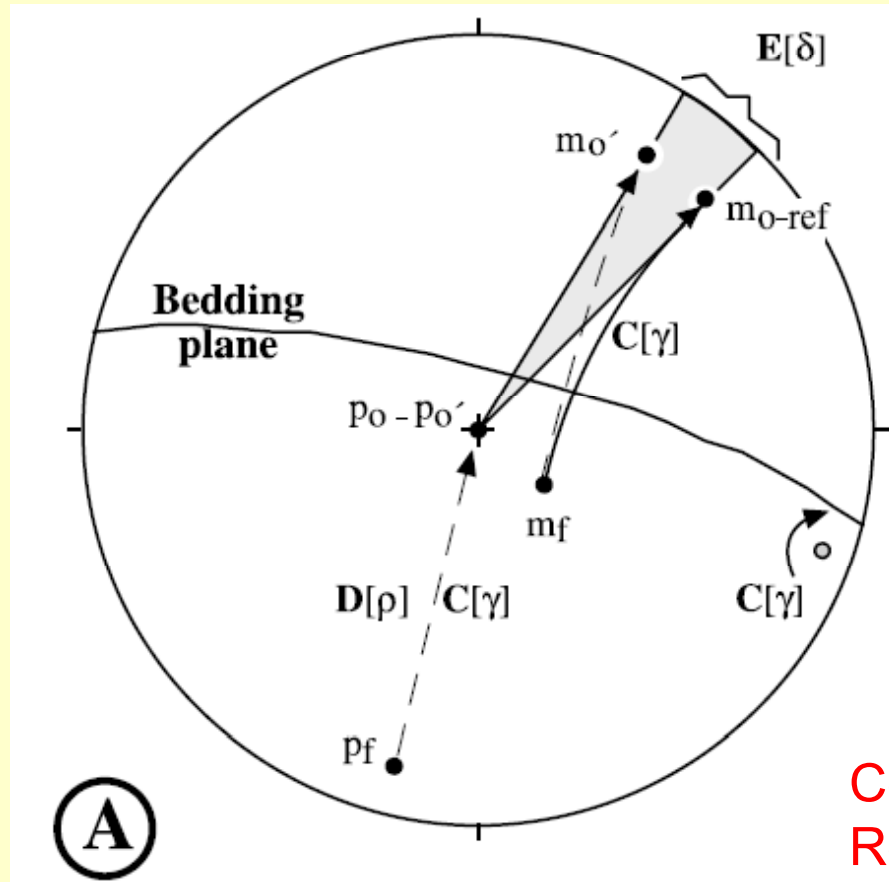
Opción 2: comparar el polo paleomagnético con un polo de referencia (de la misma placa, de la misma edad)

Tener en cuenta: un pliegue buzante debe ser desplegado en dos pasos: 1) llevar el eje del pliegue a la horizontal y 2) desplegar los flancos. Si se llevan los flancos a la horizontal en una única rotación, se genera una rotación aparente del vector magnetización. En el caso de un pliegue cónico, la situación es aún más compleja, y requiere modelado.



Es decir, antes de cuantificar rotaciones verdaderas según ejes verticales, se debe descartar que la rotación sea aparente y debida a una corrección inadecuada.

Pueyo et al. 2003



Después de la
deformación:
pf orientación del polo de
la estratificación
mf orientación del vector
remanencia

Concepto de McDonald, 1980
Rotaciones aparentes

Pueyo et al. 2003

Elementos requeridos para el cálculo de rotaciones en base a polos paleomagnéticos

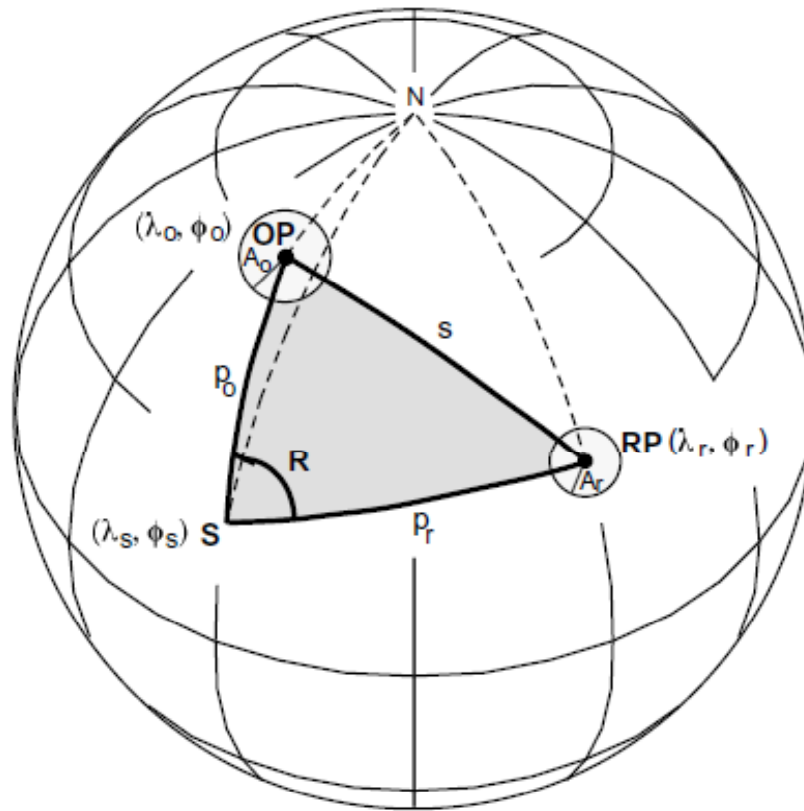


Figure A.7 Geometry required to determine vertical axis rotation and poleward displacement by comparing observed and reference paleomagnetic poles. *RP* is the reference paleomagnetic pole at (λ_r, ϕ_r) with $A_{95} = A_r$; *OP* is the observed paleomagnetic pole at (λ_o, ϕ_o) with $A_{95} = A_o$; the site location *S* is (λ_s, ϕ_s) ; *N* is the north geographic pole; the dashed longitudinal lines connect *S*, *OP*, and *RP* to *N*; the dark stippled region is a spherical triangle with apices *S*, *OP*, *RP* and sides p_o , p_r , and s ; the light stippled circles are confidence circles about observed and reference poles; the vertical axis rotation is angle *R*.

$$p_r = \cos^{-1}(\sin \lambda_r \sin \lambda_s + \cos \lambda_r \cos \lambda_s \cos[\phi_r - \phi_s]) \quad (\text{A.68})$$

$$p_o = \cos^{-1}(\sin \lambda_s \sin \lambda_o + \cos \lambda_s \cos \lambda_o \cos[\phi_s - \phi_o]) \quad (\text{A.69})$$

$$s = \cos^{-1}(\sin \lambda_r \sin \lambda_o + \cos \lambda_r \cos \lambda_o \cos[\phi_r - \phi_o]) \quad (\text{A.70})$$

Knowing these angular distances, we can determine the rotation, R , by realizing that R is the angle at apex S and applying the Law of Cosines to the spherical triangle $S-OP-RP$:

$$\cos s = \cos p_o \cos p_r + \sin p_o \sin p_r \cos R \quad (\text{A.71})$$

Solving for R gives

$$R = \cos^{-1}\left(\frac{\cos s - \cos p_o \cos p_r}{\sin p_o \sin p_r}\right) \quad (\text{A.72})$$

Note that Equation (A.72) will not tell you whether R is positive (clockwise rotation) or negative (counter-clockwise rotation). But inspection of Figure A.7 indicates that R is negative in this example.

The poleward transport, p , is simply

$$p = p_o - p_r \quad (\text{A.73})$$

The confidence limit on R can be determined from Equation (A.66):

$$\Delta R = 0.8 \sqrt{\Delta D_o^2 + \Delta D_x^2} \quad (\text{A.66})$$

where from Equation (A.60):

$$\Delta D_x = \sin^{-1}\left(\frac{\sin A_r}{\sin p_r}\right) \quad (\text{A.74})$$

and

$$\Delta D_o = \sin^{-1}\left(\frac{\sin A_o}{\sin p_o}\right) \quad (\text{A.75})$$

The confidence limit on p is Δp and is given by

$$\Delta p = 0.8 \sqrt{\Delta p_r^2 + \Delta p_o^2} \quad (\text{A.76})$$

From inspection of Figure A.7, we can see that

$$\Delta p_o = A_o \quad (\text{A.77})$$

and

$$\Delta p_r = A_r \quad (\text{A.78})$$

Butler 1992, pages. 236-237