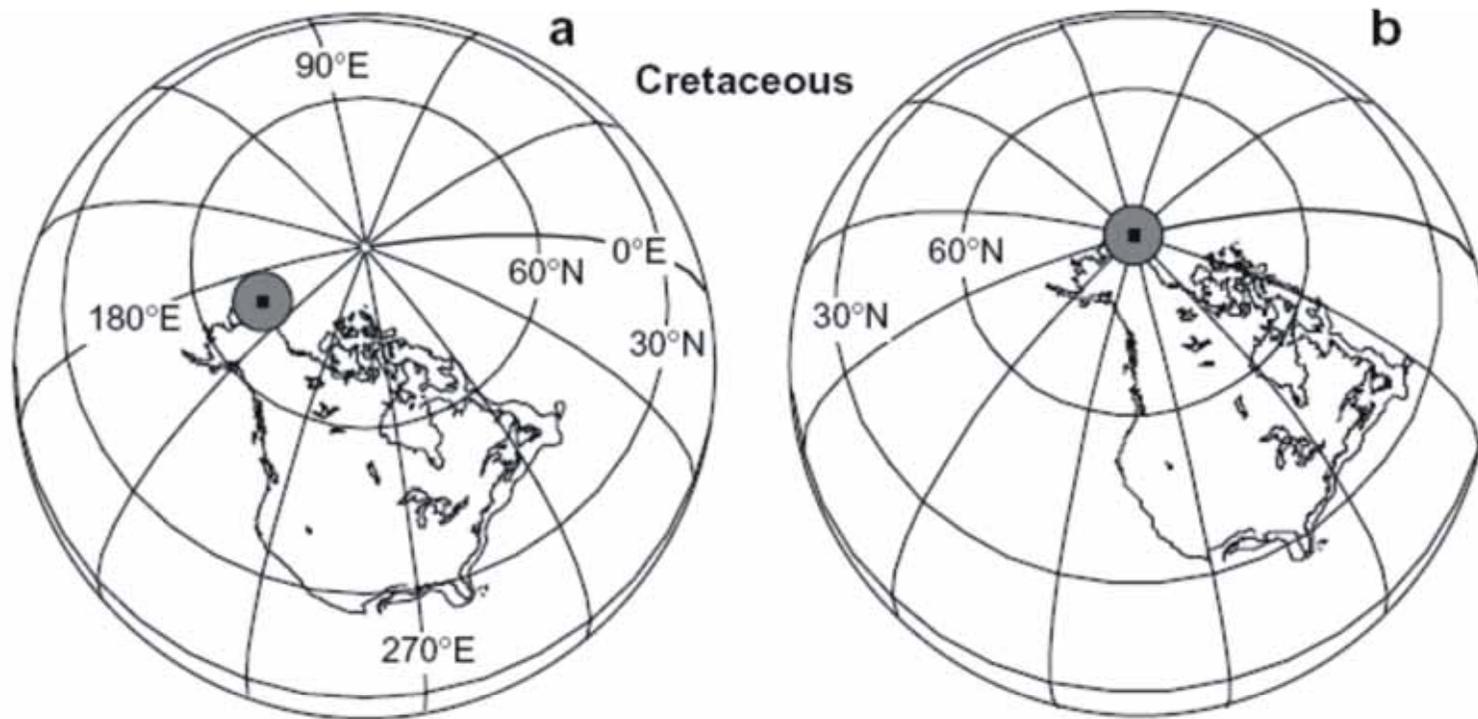
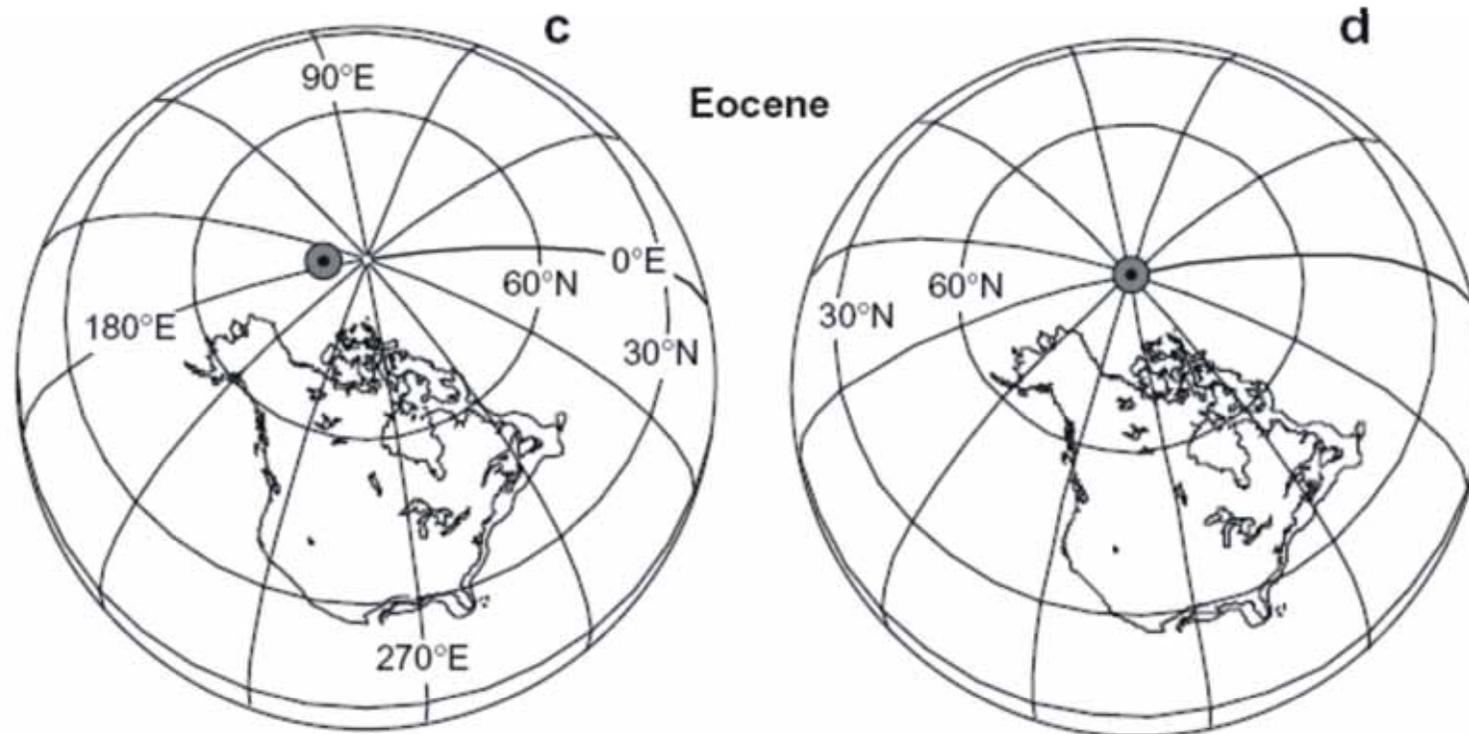
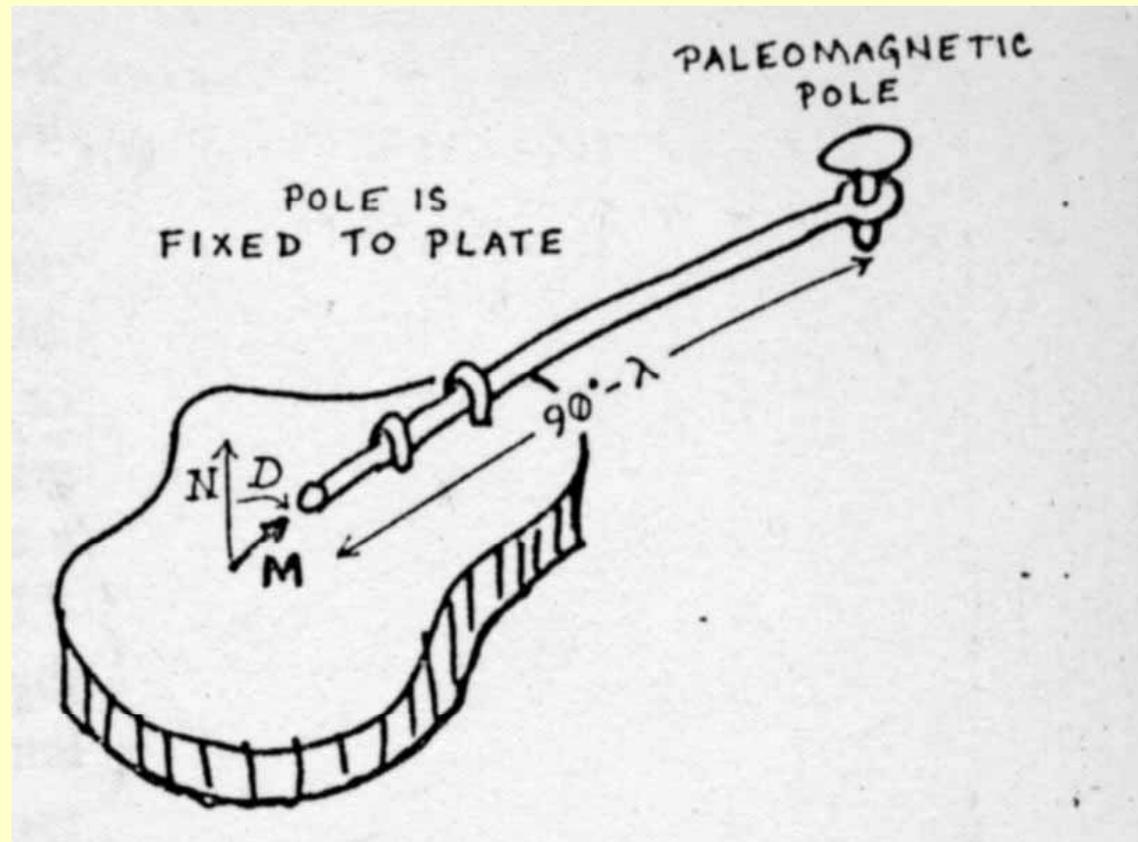


Reconstrucción paleogeográfica por Paleomagnetismo



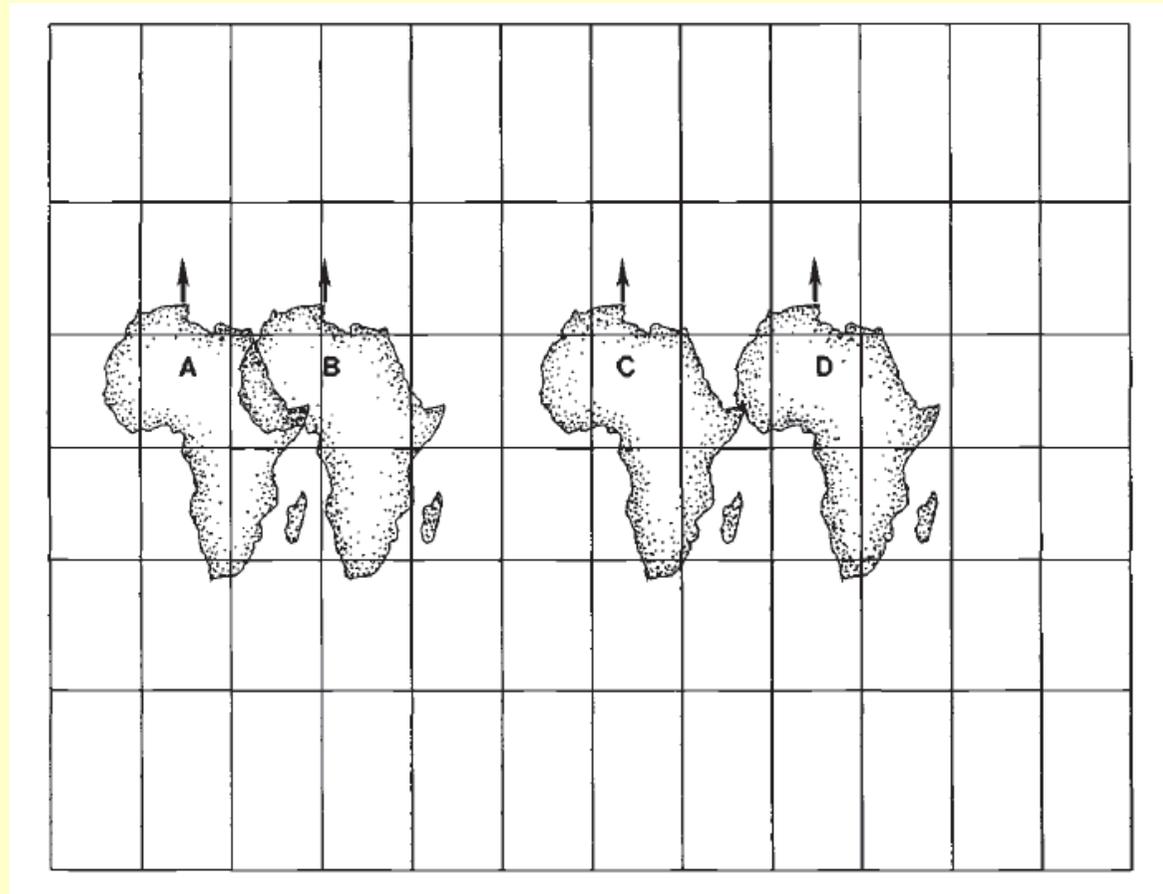
Reconstrucción paleogeográfica por Paleomagnetismo



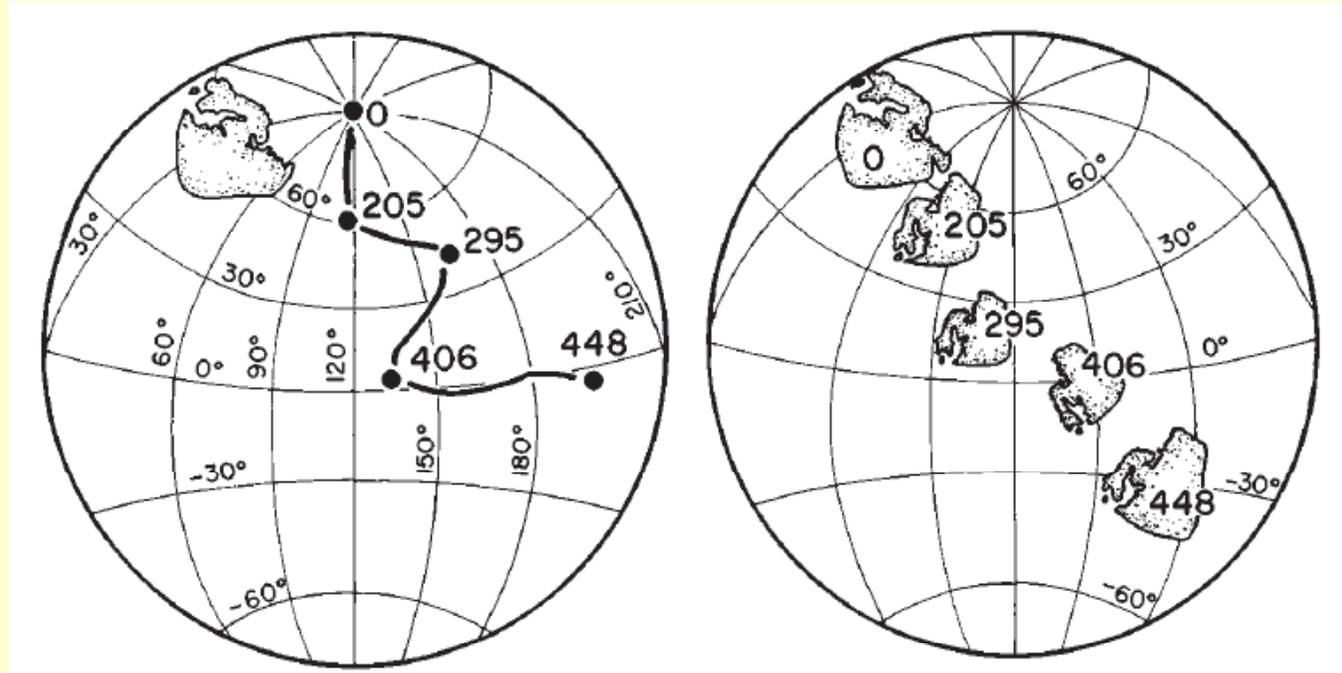


Cox y Hart, 1986

Importante: ¡indeterminación en longitud!



Curva de desplazamiento polar aparente (CDPA)



Continente fijo, los polos se mueven

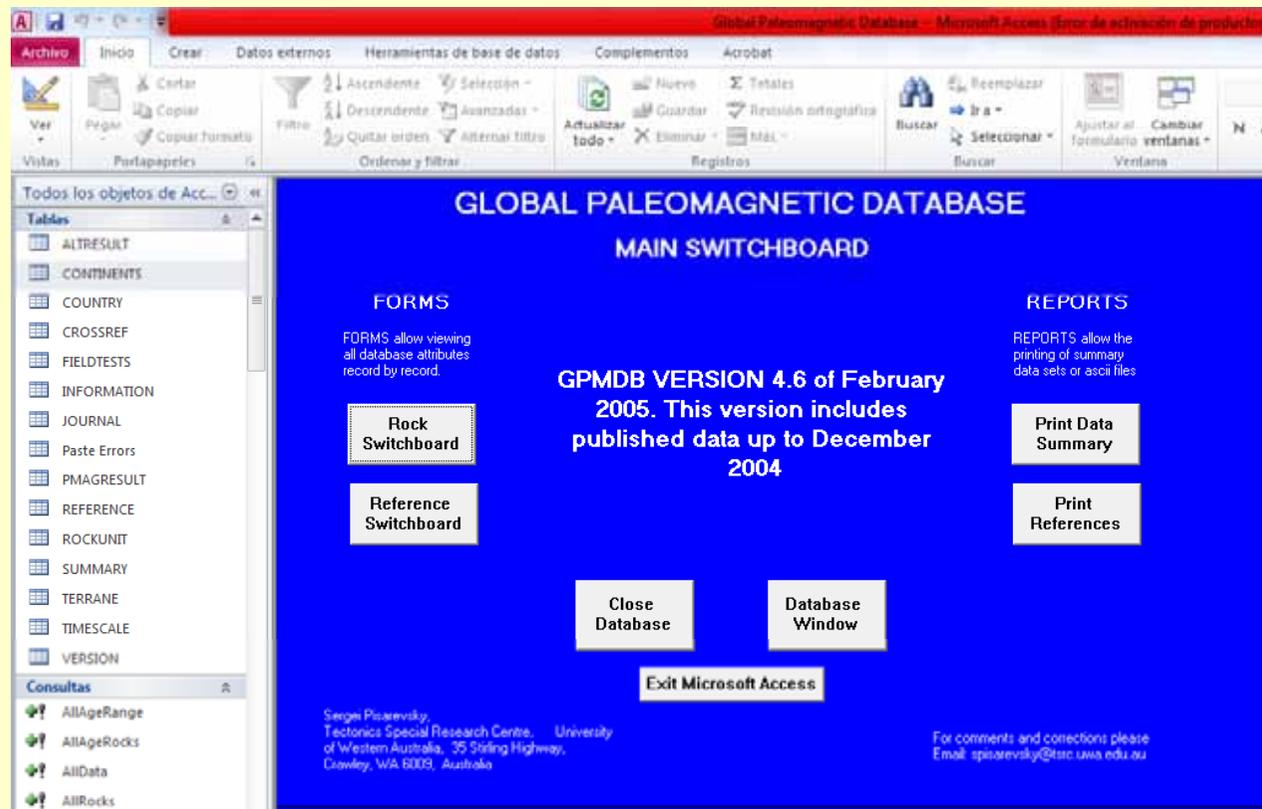
Polo fijo, los continentes se mueven

Curva de desplazamiento polar aparente (CDPA)

- 1) Recopilación de polos paleomagnéticos. Bases de datos, bibliografía
- 2) Selección de polos. Criterios de confiabilidad
- 3) Promedio de polos
- 4) Definición del trazo de la curva

Recopilación de polos paleomagnéticos

Global Paleomagnetic Database (GPMDB): Creada por Mike McElhinny y Jo Lock, y mantenida hasta 2005 por Sergei Pisarevsky. 7513 registros hasta el año 2004 (última versión, 4.6)



<https://earthref.org/MAGIC/search/#LP-DIR>

Base de datos paleomagnéticos del Magnetism Information Consortium (MAGIC) del Scripps Institution of Oceanography and the College of Earth, Ocean and Atmospheric Sciences, San Diego
Orientada a datos de paleointensidad

Foros y grupos de trabajo en Paleomagnetismo (ej. Latinmag)

Revisión bibliográfica clásica

Recopilación de polos paleomagnéticos

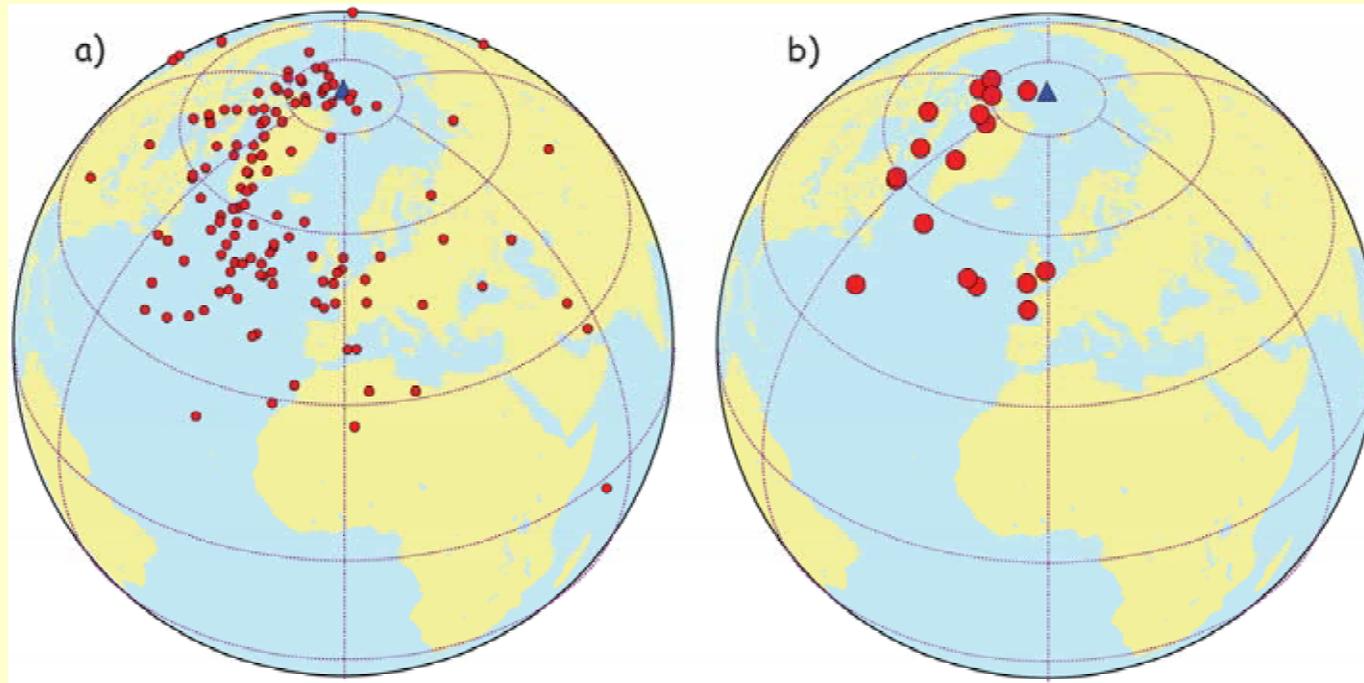
Cada PP del conjunto de PPs recopilados, conlleva cierto grado de *imprecisión* y de *inexactitud*.

La imprecisión está cuantificada a través de los parámetros estadísticos.

La inexactitud proviene de una serie de causales de error que deben ser evaluadas. Se requiere una **selección de polos**, aplicando **criterios de confiabilidad**.

Selección de polos paleomagnéticos

Polos paleomagnéticos de Australia de los últimos 200 Ma



Todos los PPs (según la GPDB)

Tauxe (2008)

Solo aquellos que pasan los
criterios de Besse y Courtillot
(2002)

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.

Factor de calidad «Q» con valor de 1 a 7

Table A7. *Phanerozoic pole positions for the western Mediterranean area – continued*

Rock unit, location	Age		Pole position				D, 42°N, 13°E	Lat. 13°E	Reliability							Reference
	Lo	Hi	Lat.	Long.	k	α_{95}			1	2	3	4	5	6	7	
Bassano Area Section, Vic. Alps	152	156	59,	255	—	3	330,	23	x	x	x	x	x	x	5	VandenBerg & Wonders (1976)
Volcanics, Sicily	150	190	38,	67	11	22	77,	48					x	x	2	Schult (1976)
Schio Biogenic Sediments, Vic. Alps	144	208	51,	175	24	19	11,	4					x	x	2	De Boer (1963)
Alpe Turati Section, Western Lombardy	180	198	63,	238	—	7	340,	21	x	x	x	x	x	x	5	Horner & Heller (1983)
Norian Dolostones, Vicentinian Alps	208	225	69,	151	—	—	15,	25	x				x		2	De Boer (1963)
Ladinian-Carnian Volcanics, Dolomites	227	233	48,	240	22	9	330,	9	x	x	x	x	x	x	5	Manzoni (1970)
Predazzo Dikes, Dolomites	220	235	61,	242	—	—	337,	21	x						1	Manzoni (1970)
Tr/m Vicentinian Alps Combined	230	245	57,	249	218	4	331,	20	x	x	x	x	x	x	5	De Boer (1963)
Valle di Scalve Porphyrite, Lombardy	232	238	52,	221	—	6	343,	7	x	x	x	x	x	x	4	Zijderveld & De Jong (1969)

Con los datos disponibles al presente, la elección de Q mayor o igual a 3 es el mejor compromiso entre una mínima exigencia de calidad, y una astringencia excesiva que reduzca la base de datos a niveles demasiado escasos

Criterios de confiabilidad de polos paleomagnéticos

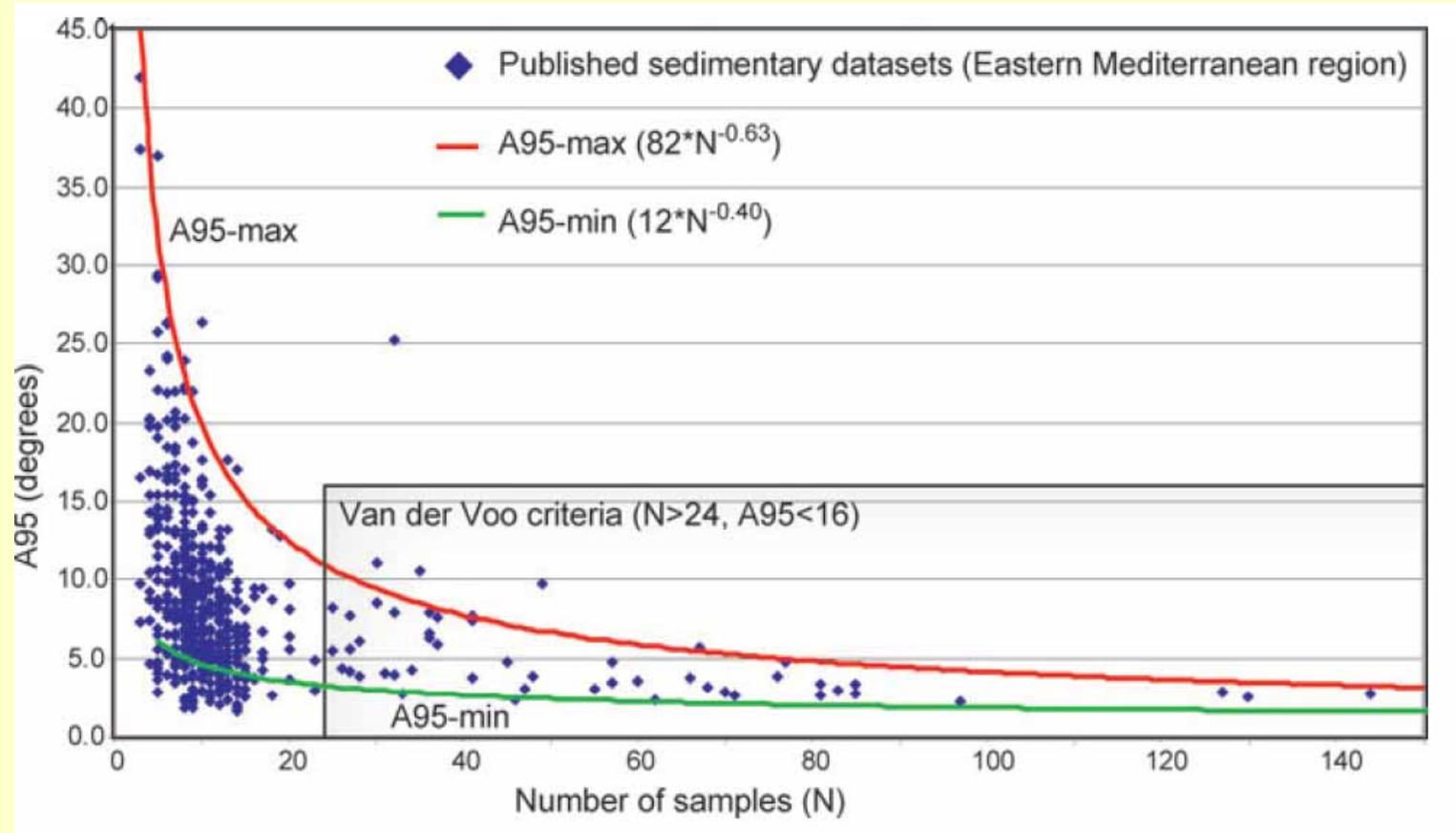
Según Besse y Courtillot, 2002

- 1) al menos 6 sitios y 36 muestras por estudio;
- 2) un intervalo de confianza al 95% menor que 10 en el Cenozoico, menor que 15 en el Mesozoico;
- 3) Evidencia de desmagnetización adecuada, por campos alternos o térmica (i.e., Código de Desmagnetización igual o mayor a 2 en la terminología de McElhinny y Lock [1995]);
- 4) Incertidumbre en la edad menor a 15 m.a.; y
- 5) ausencia de remagnetización asegurada por el hecho de que las diferencias entre la edad de la magnetización y la edad estratigráfica sea menor que 5 m.a. y rechazando polos con fold test o reversal test negativos.

“These simple criteria are of course to a large degree arbitrary and are based on our experience in trying to eliminate most problematic studies“.

Códigos de desmagnetización:

DC	Descripción
0	Sólo valores de NRM. Sin evidencias de desmagnetización.
1	Sólo valores de NRM. Desmagnetización en especímenes piloto sugiere estabilidad
2	Desmagnetización en una sola etapa para todos los especímenes.
3	No se muestran diagramas de desmagnetización. Se muestran diagramas de desmagnetización que justifican el procedimiento elegido.
4	Análisis de componentes principales (PCA) a partir del examen de diagramas de Zijderveld
5	Vectores magnéticos aislados usando dos o más métodos de desmagnetización con PCA (ej. AF y térmico)



Deenen et al. 2011

Múltiples esquemas de selección

Esquemas jerárquicos:

Criterio 1 debe cumplirse (ej. desmagnetización o número de muestras)

Pasa a siguiente nivel

Criterio 2 debe cumplirse (ej. tests de campo o edad de la unidad)

Pasa a siguiente nivel....

etc.

Ej: Vilas y Valencio (1978), Li et al. (1990)

Table 2. *The six quality classes (A, B, C, D, M and U) proposed in this study*

	Sites	Samples	α_{95}	Laboratory and analytical procedures*	Conclusive field test
A	≥ 8	≥ 8	≤ 15	≥ 3	Yes
B	≥ 6	≥ 6	≤ 15	≥ 2	Yes
C	≥ 4	≥ 4	≤ 20	≥ 2	No
D	< 4	< 4	> 20	< 2	No
M		Magnetostratigraphy (?); samples/sites > 30			
U		Undefined number of sites and/or samples			

Although the uncertainty of magnetization ages does not appear in this table, its role for the definition of the quality of the data is important, as discussed in the text.

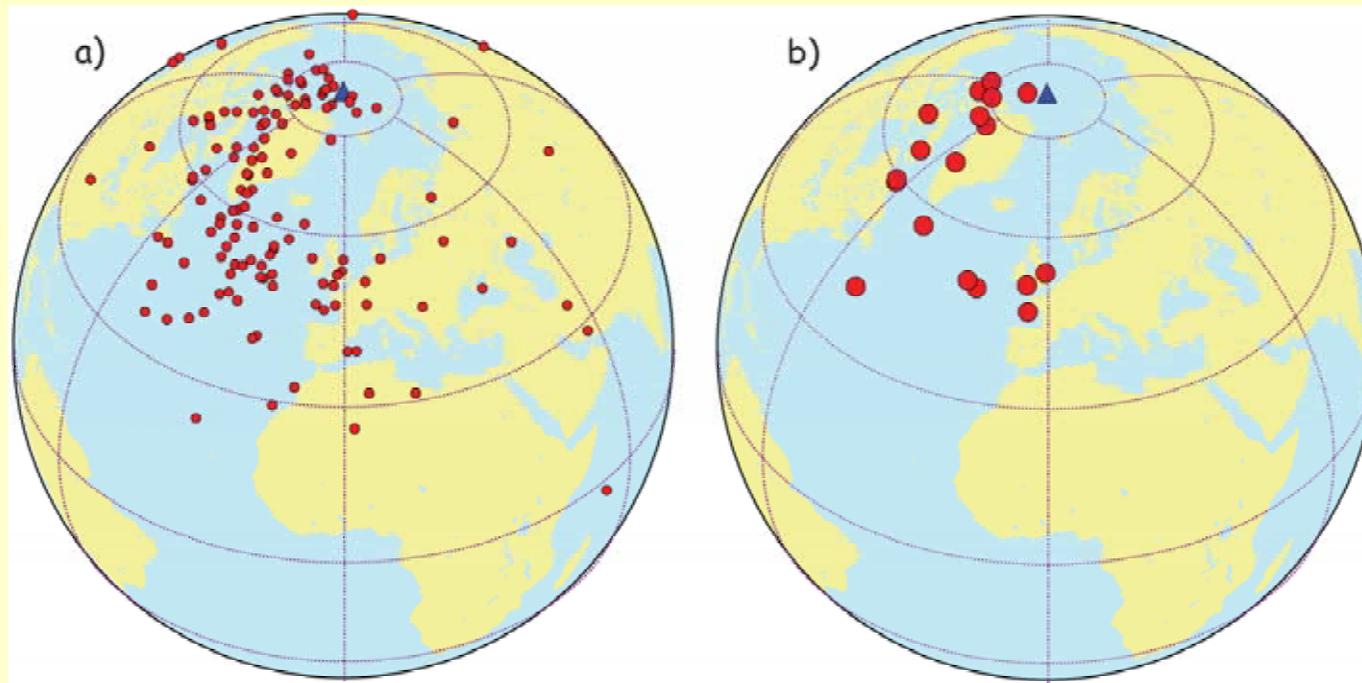
* Codes of the laboratory and analytical procedures (Lock & McElhinny 1991); 0, No demagnetization; 1, demagnetization only on some pilot samples; 2, all samples treated, with blanket treatment only; 3, all samples demagnetized step by step, stereonet with J/J_0 or vector plots provided (Zijderveld 1967); 4, principal component analysis (PCA) (Kirschvink 1980) and stereonet with J/J_0 or vector plots; 5, PCA and vector plots and multiple demagnetization treatments which are successfully isolating different vectors (e.g., AF and thermal, or thermal and chemical)

Curva de desplazamiento polar aparente (CDPA)

- 1) Recopilación de polos paleomagnéticos. Bases de datos, bibliografía
- 2) Selección de polos. Criterios de confiabilidad
- 3) Promedio de polos
- 4) Definición del trazo de la curva

Selección de polos paleomagnéticos

Polos paleomagnéticos de Australia de los últimos 200 Ma



Todos los PPs (según la GPDB)

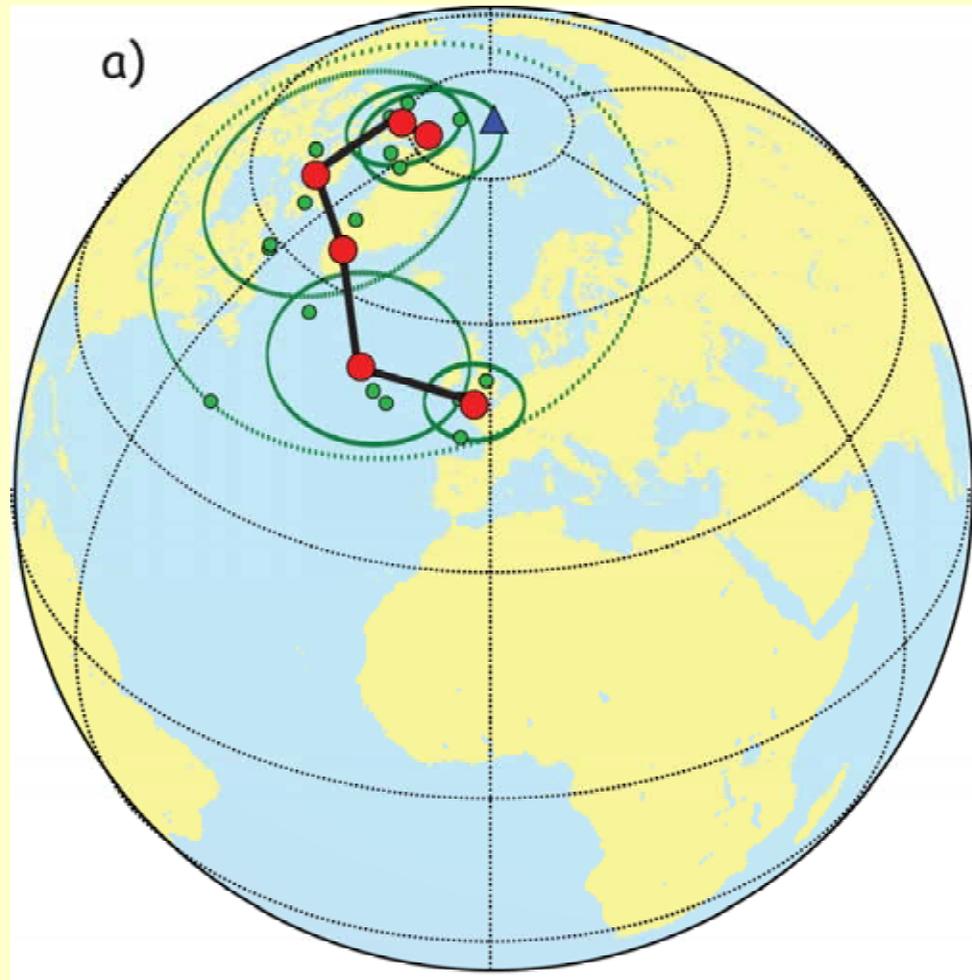
Tauxe (2008)

Solo aquellos que pasan los
criterios de Besse y Courtillot
(2002)

Promedio de polos

1. Promedios por grupos de edad. Definición aproximada. Cada intervalo puede no durar lo mismo
2. Intervalos regulares de edad. Se asignan edades numéricas absolutas a los polos. Generalmente se aplican ventanas móviles (ej. 20 m.a. cada 10 m.a., etc). Irving e Irving (1978)
3. Aplicación de suavizados o ajustes polinómicos, ej. “ajuste por spline”
4. Promedios por sitios de polos seleccionados (McFadden y McElhinny, 1995), permite usar más estudios, da peso diferente a cada uno

Promedios por grupos de edad



Promedios por grupos de edad

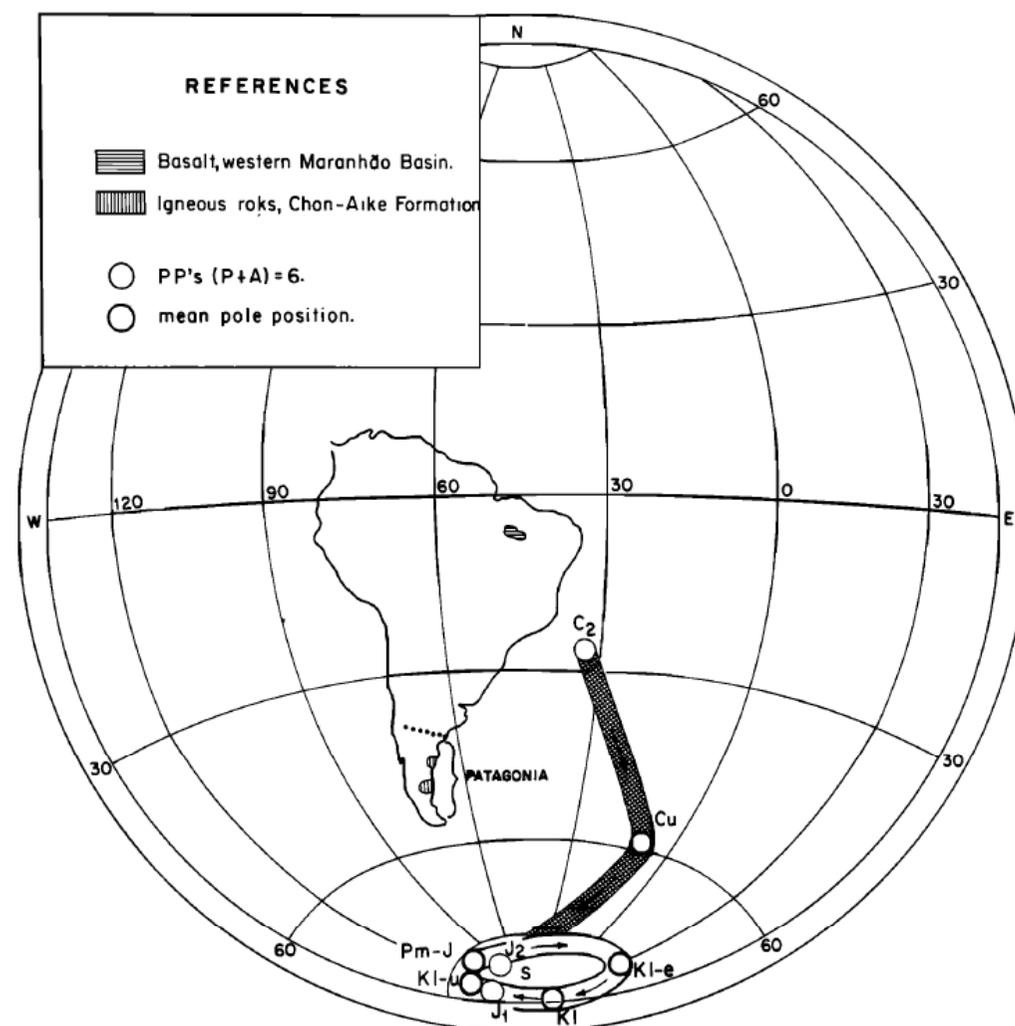
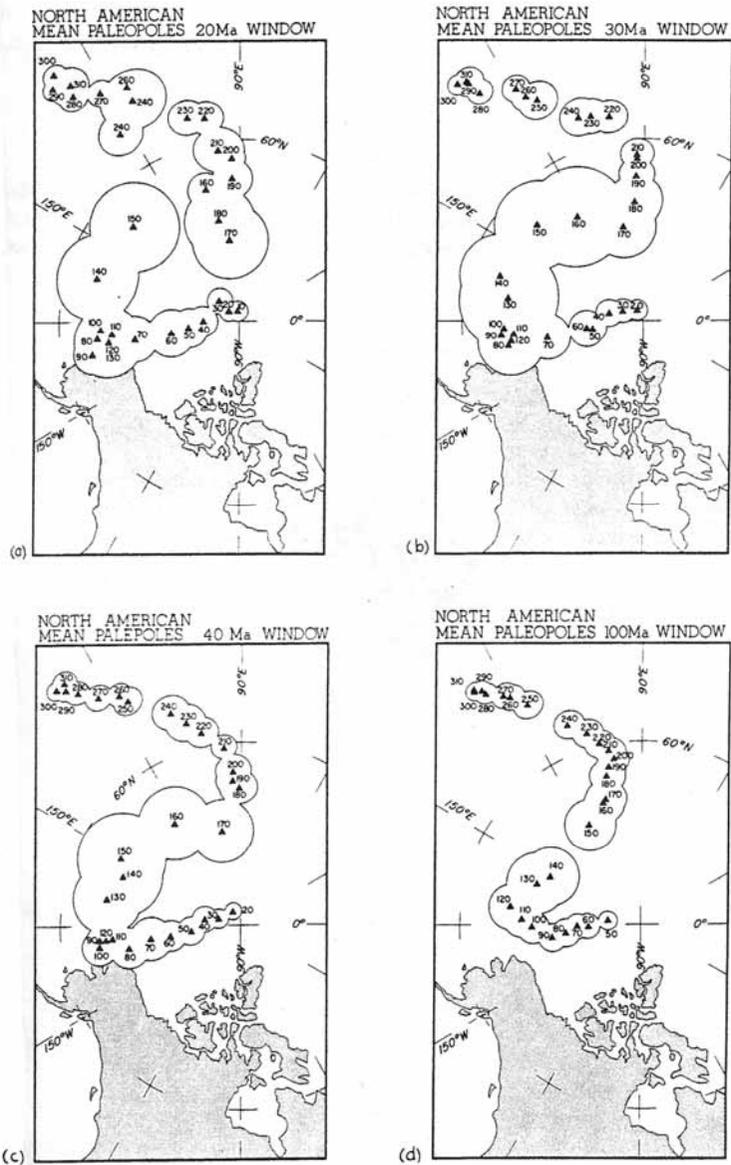


Fig. 2. Late Paleozoic-Mesozoic section of the APWP for South America. References in Valencio, 1970, and Tables 1 and 2. Lambert equal-area projection. Other references as in Figure 1.

Vilas, 1981



Promedios por ventanas (móviles)

Traza casi-continua

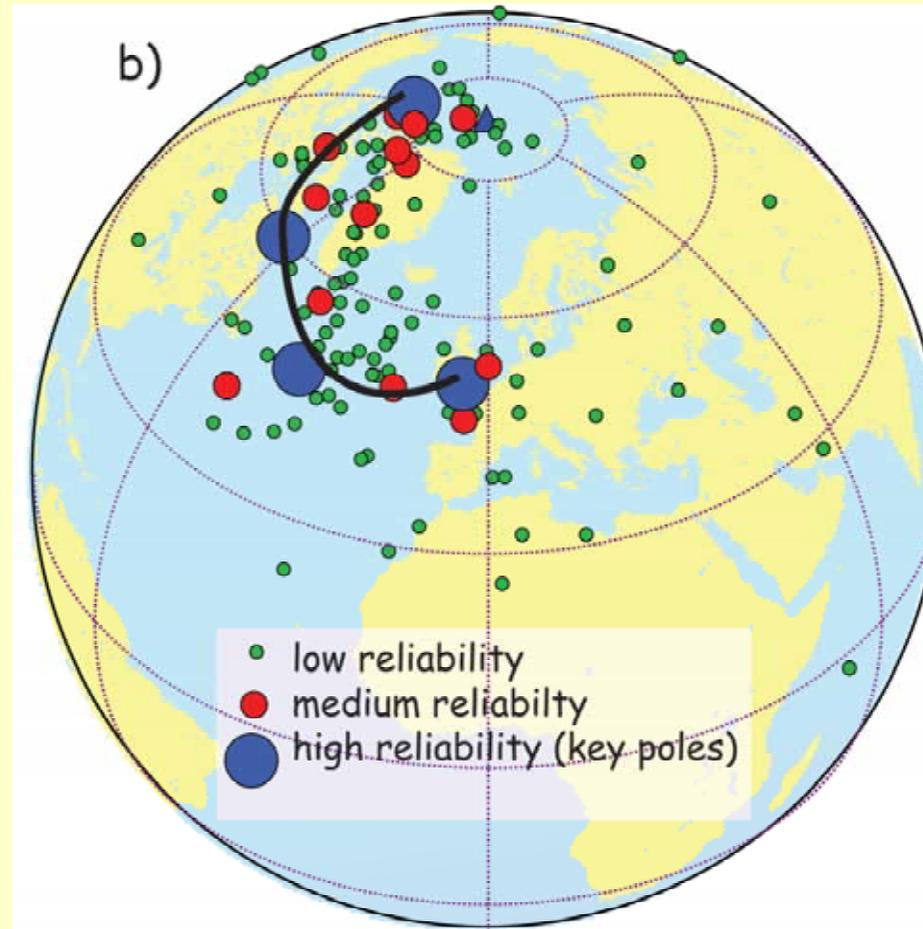
Suavizado de la traza.

Muy importante el rango de la ventana

Asignación de valores numéricos absolutos de edad

Irving e Irving, 1978

Ajuste por spline

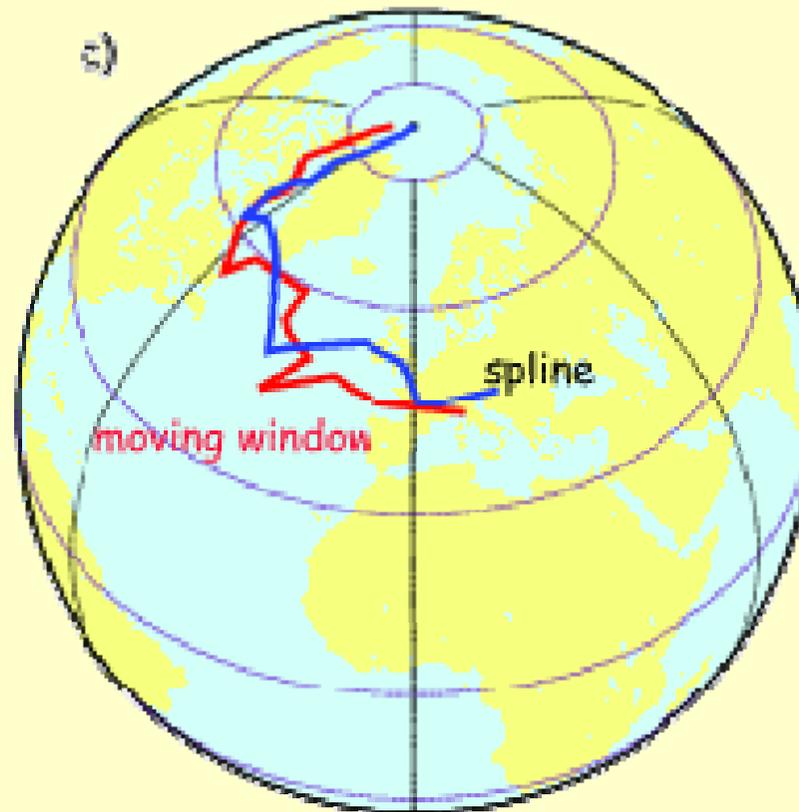


Tauxe, 2008

En este caso, el spline es ponderado

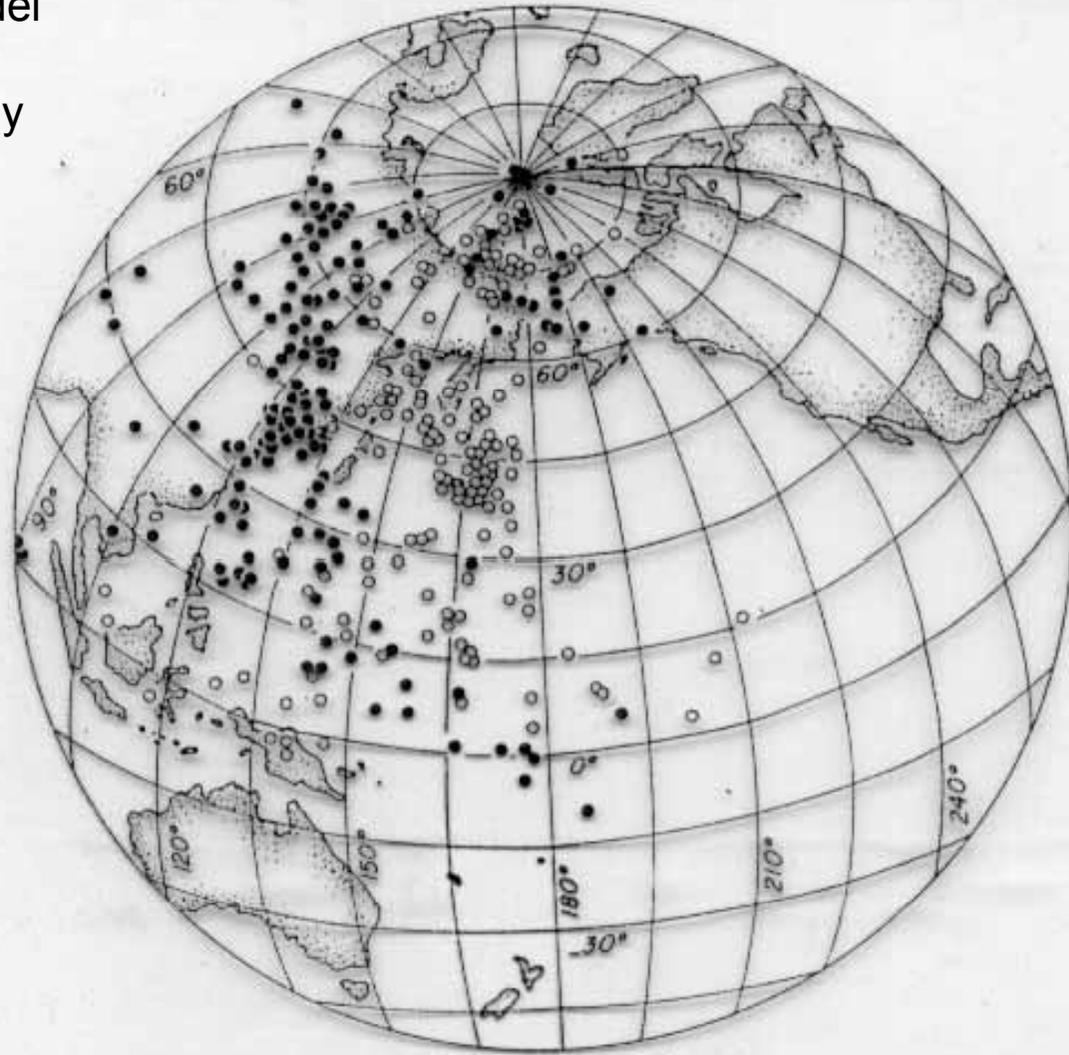
Promedio de polos

1. Promedios por grupos de edad. Definición aproximada. Cada intervalo puede no durar lo mismo
2. Intervalos regulares de edad. Se asignan edades numéricas absolutas a los polos. Generalmente se aplican ventanas móviles (ej. 20 m.a. cada 10 m.a., etc). Irving e Irving (1978)
3. Aplicación de suavizados o ajustes polinómicos, ej. “ajuste por spline”
4. Promedios por sitios de polos seleccionados (McFadden y McElhinny, 1995), permite usar más estudios, da peso diferente a cada uno



Diferentes modos de procesar los polos generan diferentes curvas:
ej: ventana móvil vs. spline

Polos
paleomagnéticos del
Fanerozoico de
América del Norte y
Europa



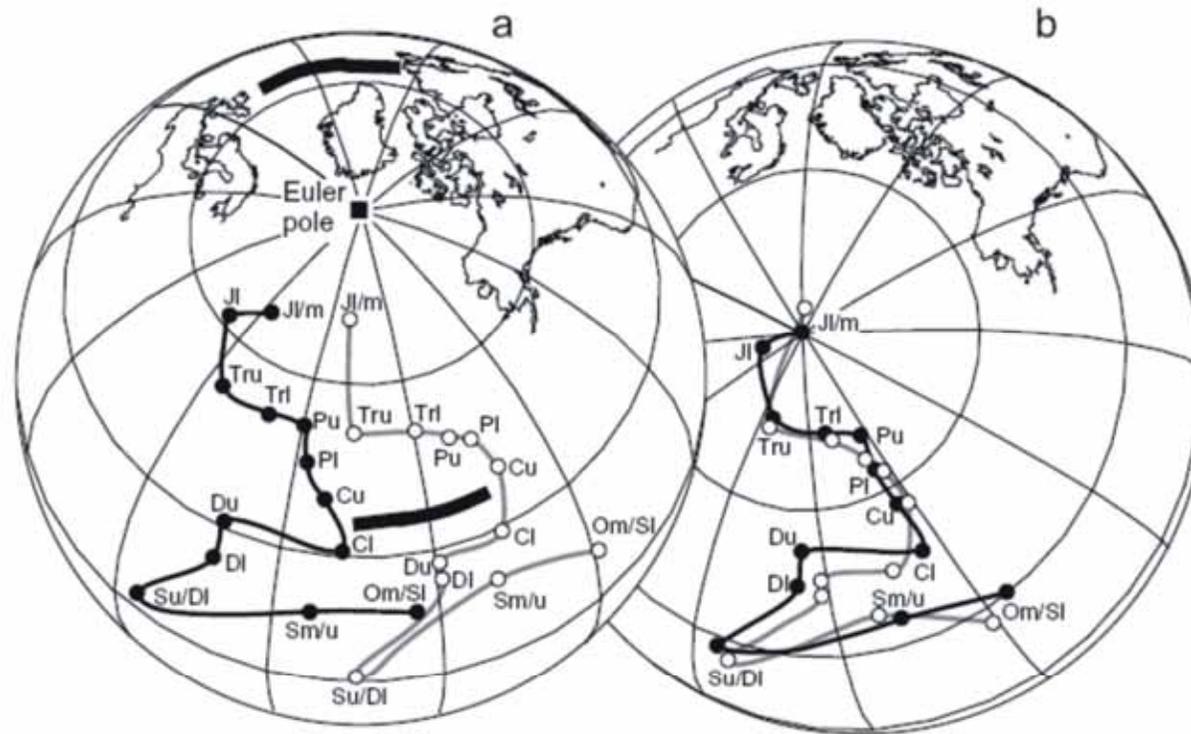


Figure 10.9 (a) Paleozoic and Mesozoic APW paths of North America and Europe. North American poles are shown by solid circles; European poles are shown by open circles; the Euler pole of Bullard et al. (1965) for reconstruction of the North Atlantic prior to Cretaceous and Cenozoic opening is shown by the solid square; the Euler pole location is 88.5°N , 27.7°E ; in (b), Europe is rotated 38° clockwise about the Euler pole toward a fixed North America (upper bold arrow); during this rotation, the European APW path also rotates clockwise about the Euler pole (lower bold arrow). (b) Middle Jurassic paleogeographic reconstruction of North America and Europe; O = Ordovician; S = Silurian; D = Devonian; C = Carboniferous; P = Permian; Tr = Triassic; J = Jurassic; l = lower; m = middle; u = upper. Modified from Van der Voo (1990) with permission from the American Geophysical Union.

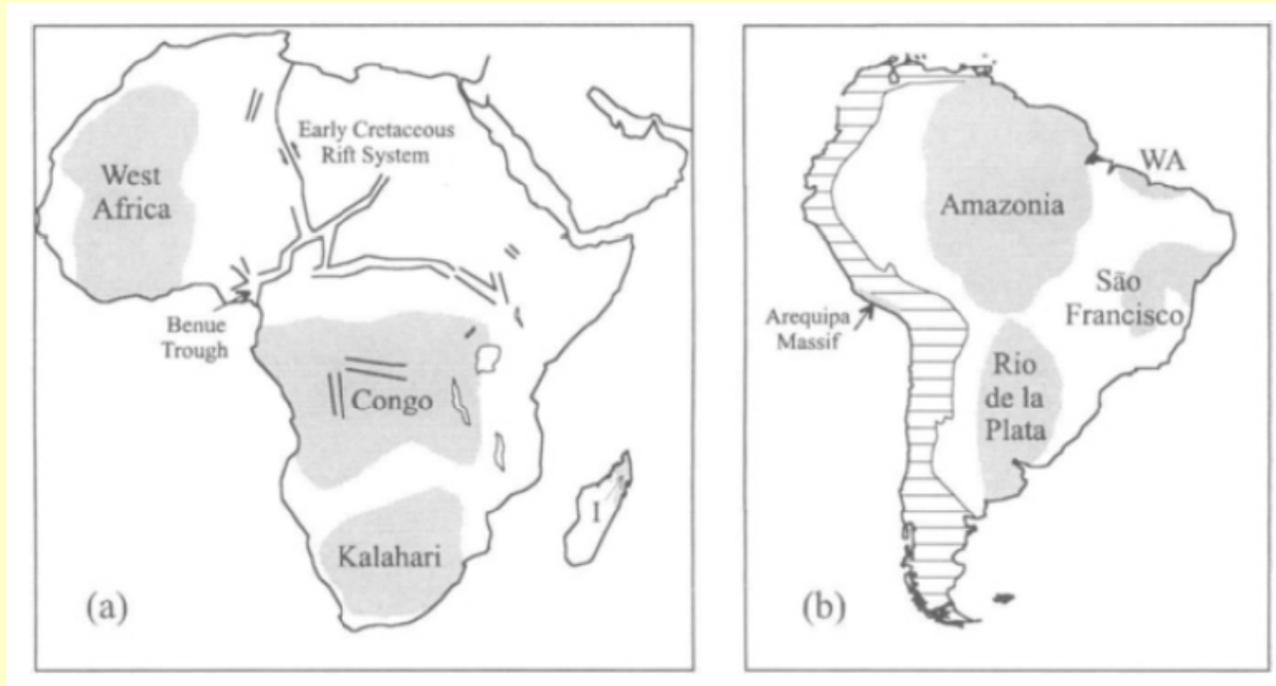
TABLE 6.13
Phanerozoic APWP for South America^a

Geological period/epoch	Age range (Ma)	Mean (Ma)	<i>m</i>	<i>N</i>	Mean pole position		<i>A</i> ₉₅ (°)
					Lat N	Long E	
Late Cretaceous	65-97	80	7	68	84.6	196.9	7.2
Early Cretaceous	97-146	120	13	652	84.7	253.6	2.5
Middle/Late Jurassic	146-185	165	4	80	85.4	41.6	3.6
Early Jurassic	185-208	200	2	10	70.7	74.0	9.4
Late Triassic	225-235	230	5	69	79.4	1.7	5.4
Early/Middle Triassic	235-245	240	4	27	83.7	126.1	2.8
Late Permian	245-256	250	4	36	72.6	71.8	9.5
Early Permian	256-290	275	10	58	77.7	137.8	5.8
Late Carboniferous	290-323	305	9	28	55.2	168.6	3.6
Early Carboniferous	323-363	340	2	17	31.5	136.7	4.0
Middle Devonian	377-391	385	1	1	30.0	133.0	-
Ordovician	443-495	470	1	3	-11.0	153.3	-
Cambrian	495-54	520	3	12	-47.7	191.1	22.6

^aFrom McFadden and McElhinny (1995). *m*, number of paleomagnetic poles; *N*, total number of sites; *A*₉₅, radius of circle of 95% confidence about the mean pole position. The mean age in each case is given to the nearest 5 Myr.

McElhinny y McFadden, 2000

No pueden descartarse movimientos intracontinentales, particularmente en tiempos más antiguos, cuando las configuraciones de placas eran diferentes

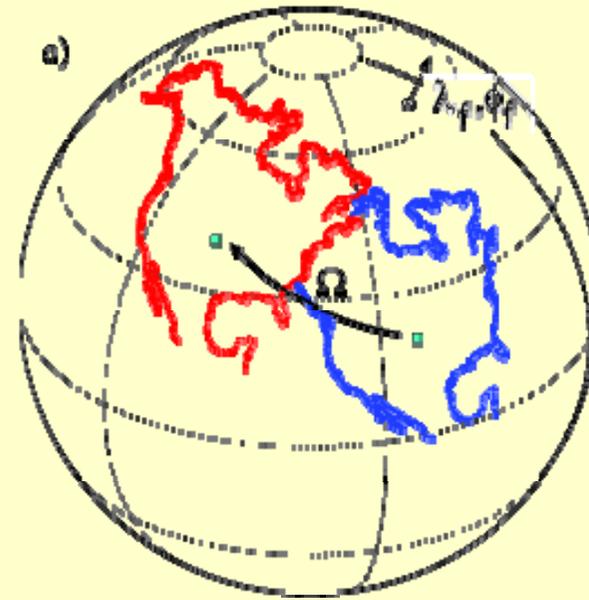
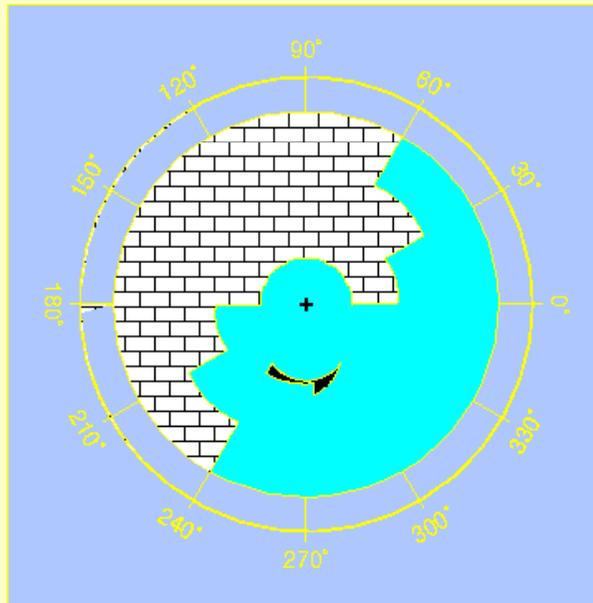


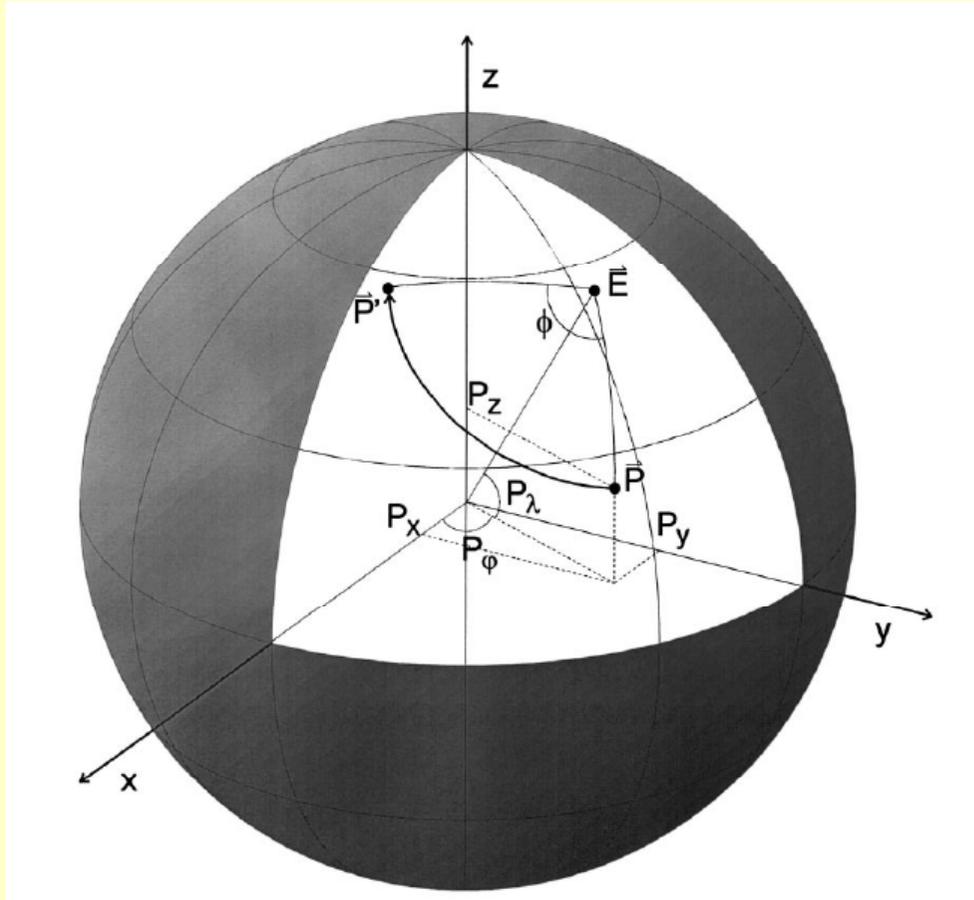
McElhinny y McFadden, 2000

Desplazamientos en la esfera: polos de Euler

El **teorema del punto fijo de Euler** dice que cualquier movimiento de un cuerpo rígido en la superficie de una esfera puede ser representado como una rotación alrededor de un polo elegido apropiadamente.

Este polo de rotación se denomina **polo de Euler**.





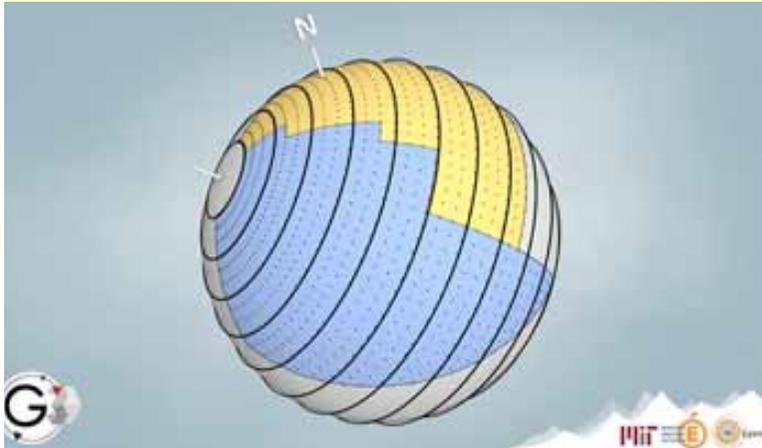
El desplazamiento del elemento P hasta P' se consigue mediante una rotación alrededor del polo E, un ángulo ϕ .

$$\text{ROT}[\vec{E}, \phi]$$

ANTIHORARIO ES POSITIVO

La rotación negativa que deshace este movimiento:

$$\text{ROT}[\vec{E}, -\phi] = -\text{ROT}[\vec{E}, \phi]$$



La antípoda de E:

$$E_{\lambda}' = -E_{\lambda} \text{ and } E_{\phi}' = E_{\phi} + 180^{\circ}$$

La rotación alrededor de E, es igual a la rotación negativa alrededor de E'

$$\begin{aligned} \text{ROT}[\vec{E}, \phi] &= \text{ROT}[\vec{E}', -\phi] = -\text{ROT}[\vec{E}', \phi] \\ &= -\text{ROT}[\vec{E}, -\phi]. \end{aligned}$$

Una suma de rotaciones (una a continuación de la otra) se puede describir como una sola rotación

$$\text{ROT}[\vec{E}_1, \phi_1] + \text{ROT}[\vec{E}_2, \phi_2] = \text{ROT}[\vec{E}_3, \phi_3]$$

¡Pero esta suma no es conmutativa!

Rotaciones de Euler finitas

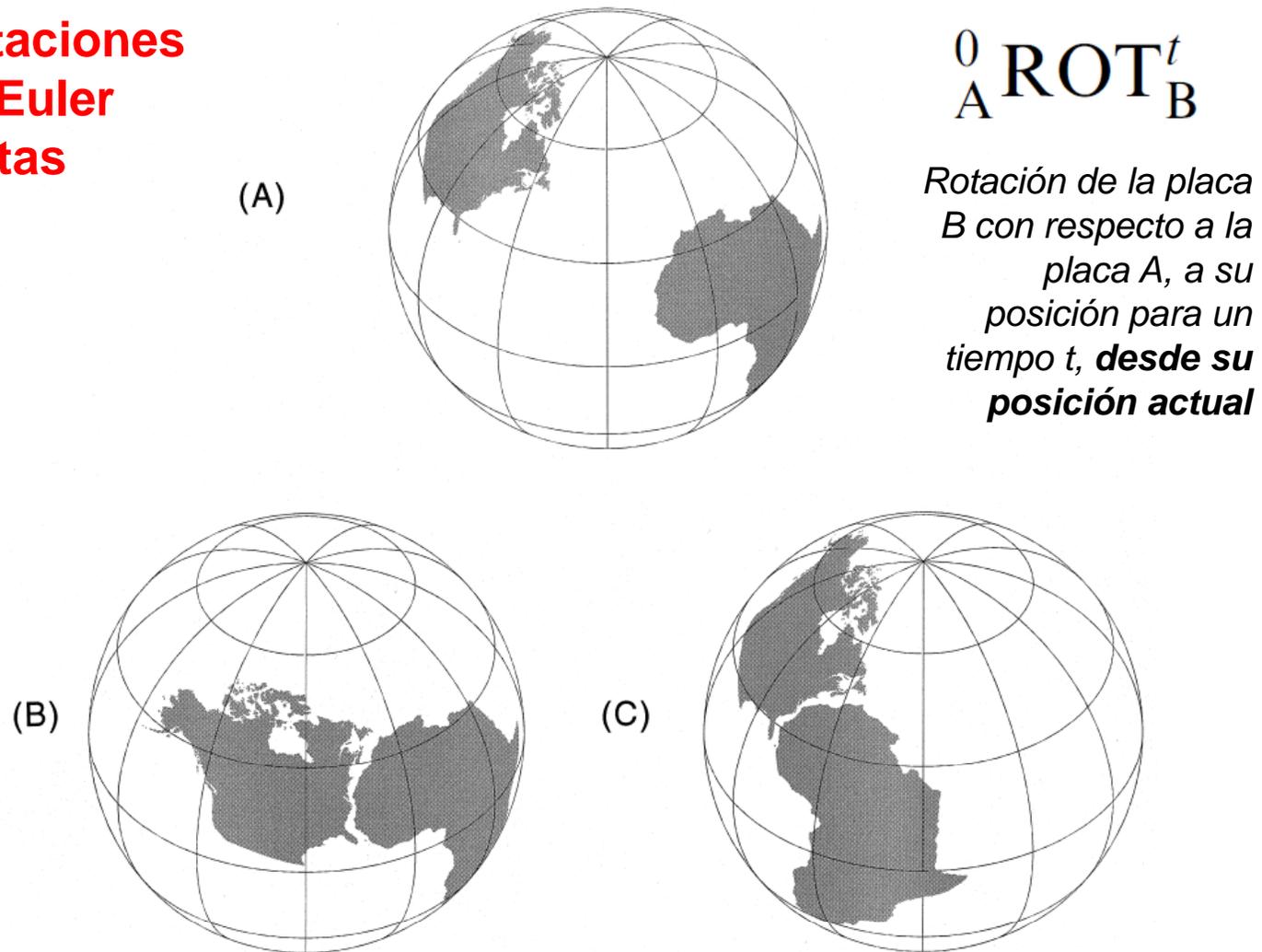
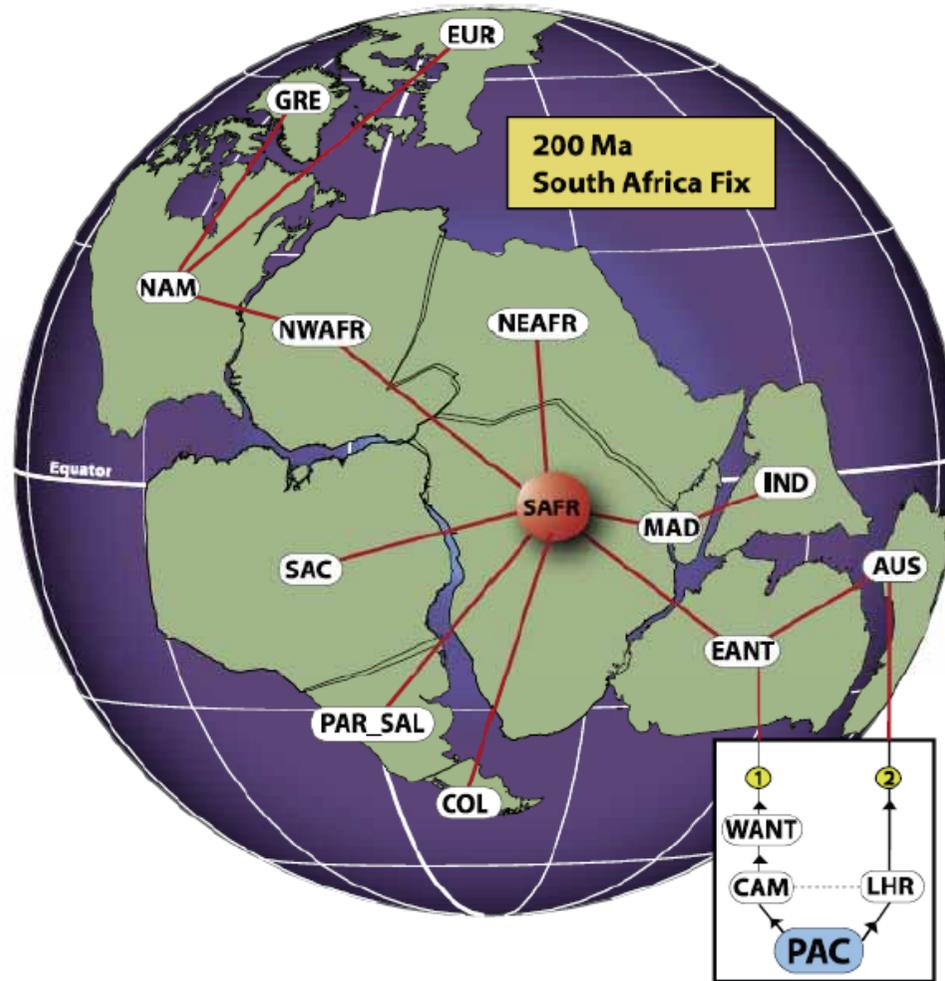


Fig. 2. Example of finite rotations of continents. (A) Unrotated (present-day position); (B) North America rotated relative to Africa: ${}_{\text{AFR}}\text{ROT}_{\text{NAM}}$, $E_\lambda = 66.95^\circ$, $E_\phi = -12.02^\circ$, $\phi = 75.55^\circ$. (C) Africa rotated relative to North America: ${}_{\text{NAM}}\text{ROT}_{\text{AFR}}$, $E_\lambda = 66.95^\circ$, $E_\phi = -12.02^\circ$, $\phi = -75.55^\circ$ (maximal closure from Klitgord and Schouten, 1986).

$${}^0_A \text{ROT}'_C = {}^0_B \text{ROT}'_C + {}^0_A \text{ROT}'_B$$

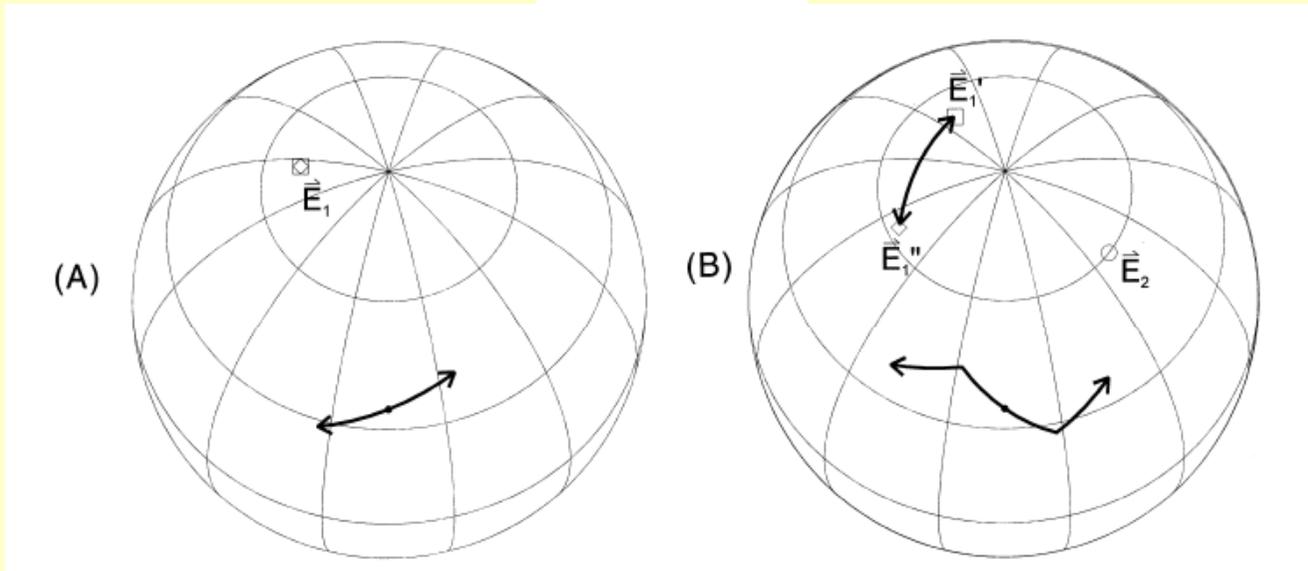


Se pueden calcular los movimientos relativos entre placas, aunque no estén en directa interrelación

Polos de etapa (*stage poles*)

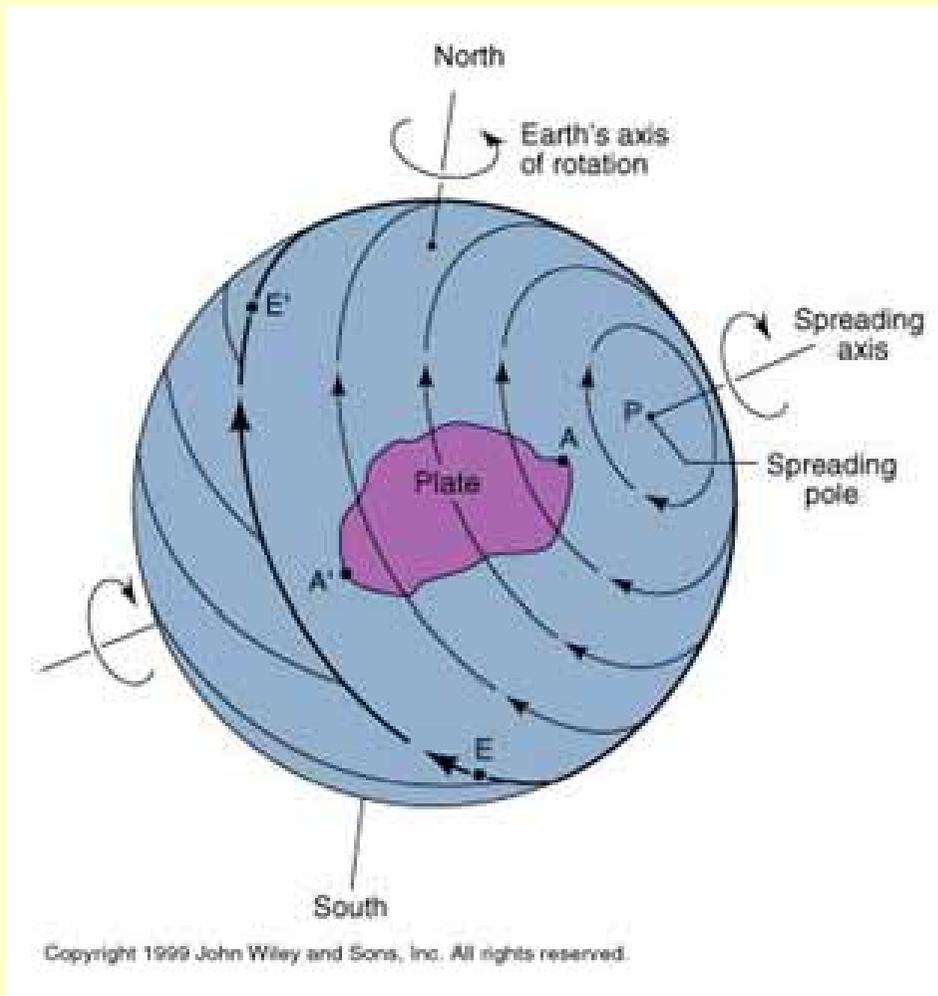
Definen el movimiento relativo entre dos placas durante un intervalo de tiempo determinado

$${}_{A}^{t_1} \text{ROT}_B^{t_2}$$



La suma de los polos de etapa desde el tiempo t_n hasta el presente, da el polo de rotación finita para t_n

$${}_{A}^0 \text{ROT}_B^{t_n} = {}_{A}^0 \text{ROT}_B^{t_1} + {}_{A}^{t_1} \text{ROT}_B^{t_2} + \dots + {}_{A}^{t_{n-1}} \text{ROT}_B^{t_n}$$



La rotación es máxima en el polo de Euler

La traslación es máxima en el círculo máximo perpendicular al polo de Euler

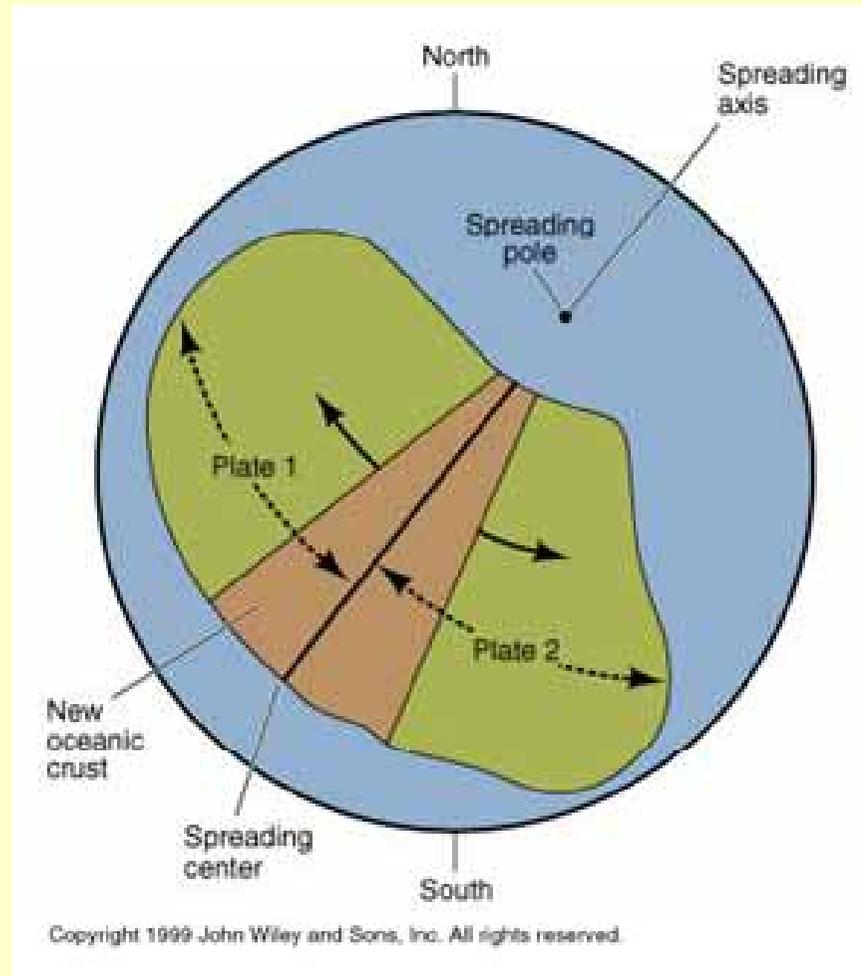
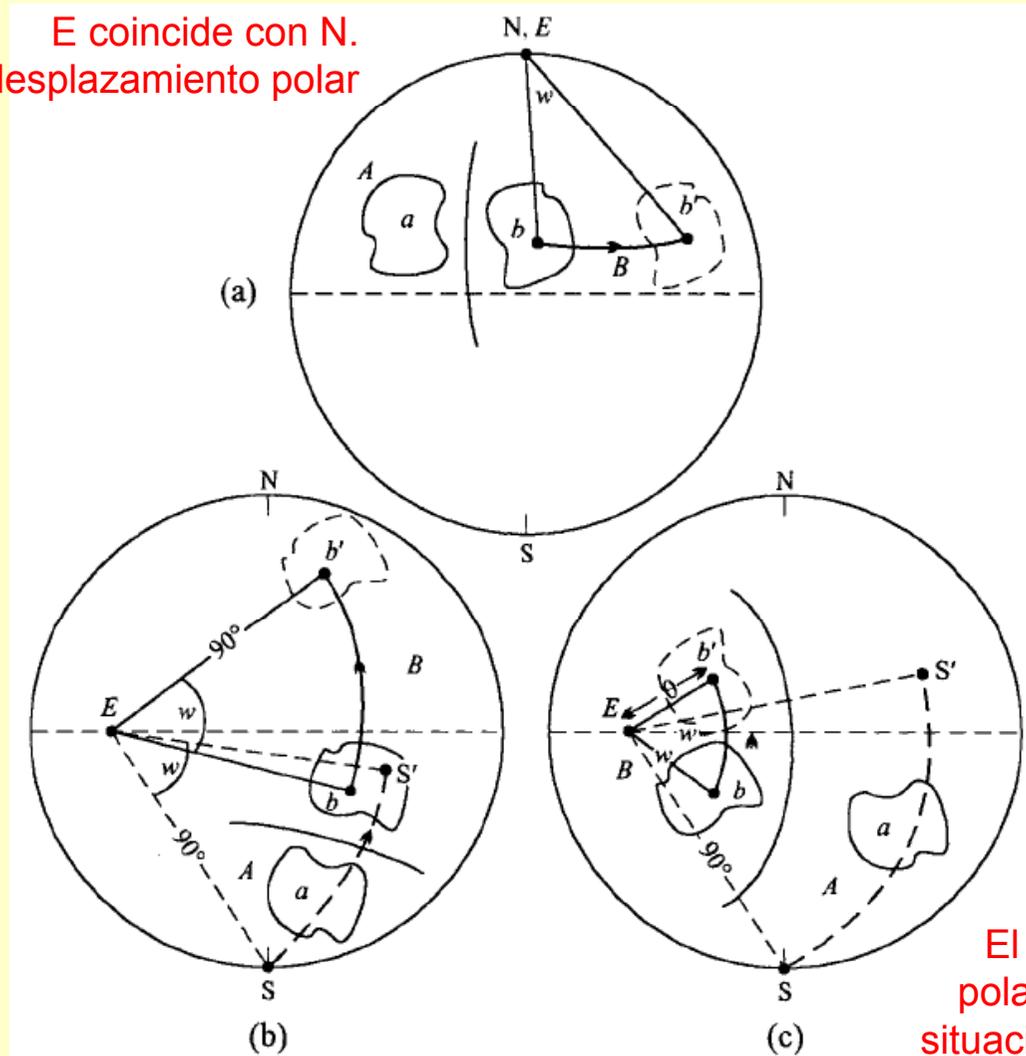


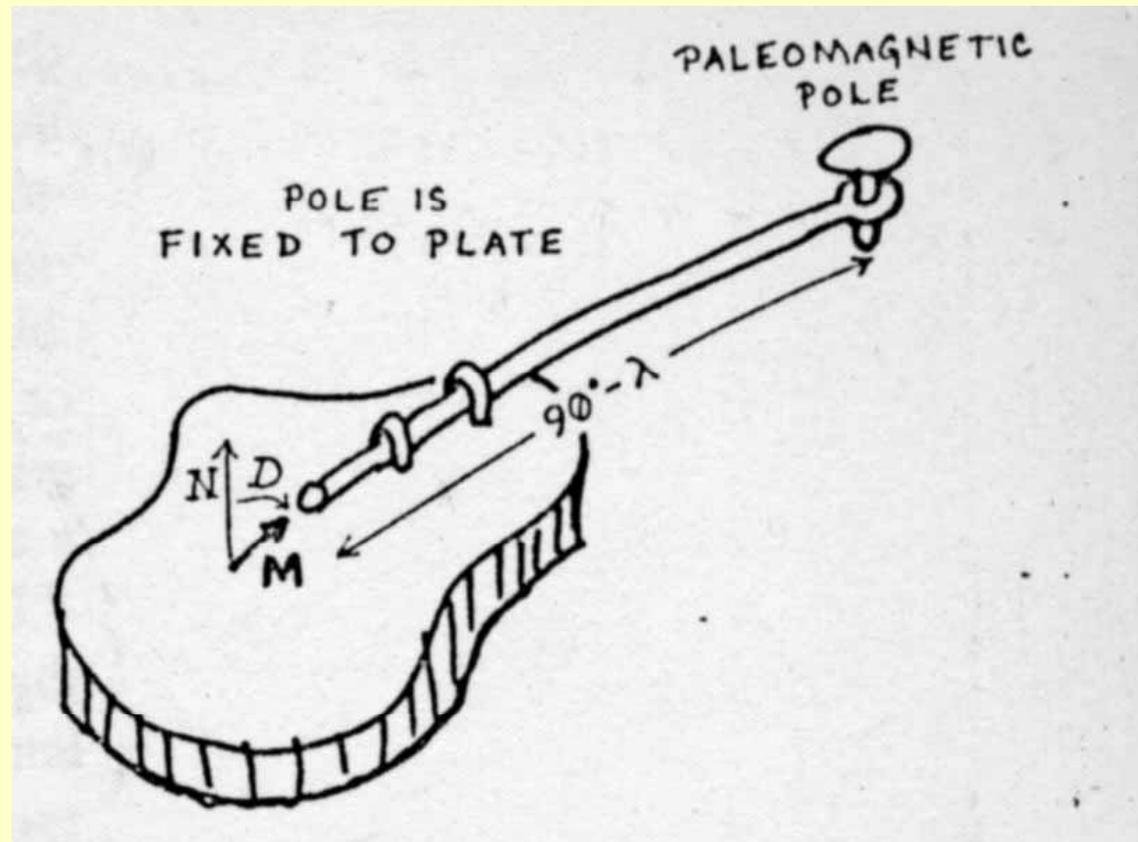
Table A2.1. Relative plate kinematic and reconstruction parameters and their sources. Instantaneous rotation rates for 0 Ma (present); finite total rotation angles for older ages

Source reconstruction parameters				
Age (Ma)	Longitude	Latitude	Angle/rate deg or deg/my	Source
North America–Eurasia				
0.0000	135.80	62.40	0.21	DeMets et al. (1990)
9.8100	133.58	65.38	2.44	Srivastava and Roest (1989)
19.5895	136.74	68.92	4.97	Srivastava and Roest (1989)
33.3015	136.95	65.64	7.51	Srivastava and Roest (1989)
47.0850	137.74	67.19	10.91	Srivastava and Roest (1989)
51.3950	140.81	62.60	12.75	Srivastava and Roest (1989)
56.1475	141.66	63.14	14.22	Srivastava and Roest (1989)
68.2360	143.96	64.84	16.95	Srivastava and Roest (1989)
79.0750	147.74	66.17	19.00	Srivastava and Roest (1989)
83.0000	148.91	66.54	19.70	Srivastava and Roest (1989)
92.0000	150.26	66.67	20.37	Srivastava and Roest (1989)
105.0000	152.34	66.85	21.49	Srivastava and Roest (1989)
118.7000	154.75	68.99	23.05	Srivastava and Roest (1989)
130.0000	154.75	68.99	23.05	Srivastava and Roest (1989)
North America–North Africa				
0.0000	38.30	78.80	0.24	DeMets et al. (1990)
9.8100	50.80	80.12	2.52	Müller et al. (1990)
19.5895	37.84	79.57	5.29	Klitgord and Schouten (1986)
33.3015	1.12	75.37	10.04	Müller et al. (1990)
47.0850	-3.88	75.30	15.25	Müller et al. (1990)
56.1475	-0.46	79.68	18.16	Müller et al. (1990)
66.5940	4.94	82.90	20.76	Müller et al. (1990)
71.2045	-9.15	81.35	22.87	Klitgord and Schouten (1986)
73.6190	-11.76	80.76	23.91	Klitgord and Schouten (1986)
79.0750	-18.35	78.30	27.06	Klitgord and Schouten (1986)
83.0000	-20.73	76.55	29.60	Klitgord and Schouten (1986)
91.0000	-19.48	73.82	34.28	Klitgord and Schouten (1986)
118.0000	-19.90	66.30	54.25	Klitgord and Schouten (1986)
126.0000	-19.00	66.13	56.39	Klitgord and Schouten (1986)
131.5000	-18.50	65.95	57.40	Klitgord and Schouten (1986)
North Africa–Central Africa				
90.0000	-172.77	-17.30	0.00	DeMets et al. (1990)
100.0000	-172.77	-17.30	0.53	Müller et al. (1991) (derived)
110.0000	-173.96	-15.69	0.86	Müller et al. (1991) (derived)
118.7000	-173.56	-18.08	1.15	Müller et al. (1991) (derived)

E coincide con N.
No hay desplazamiento polar



El desplazamiento
polar depende de la
situación relativa de E



Cox y Hart, 1986

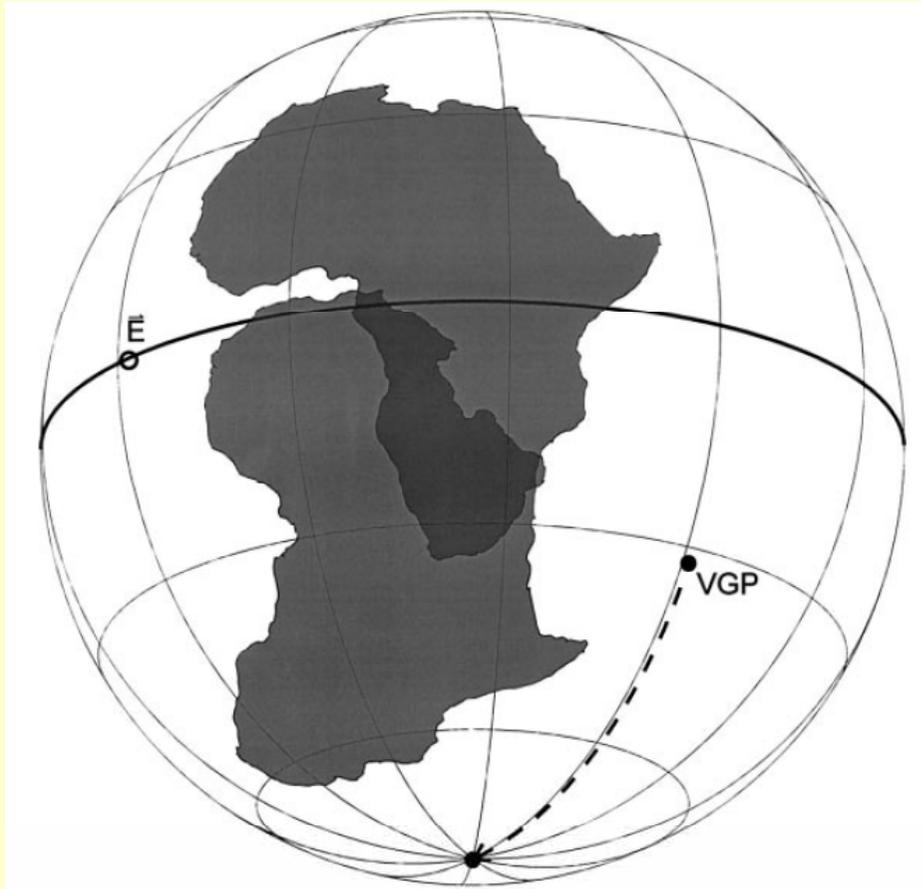
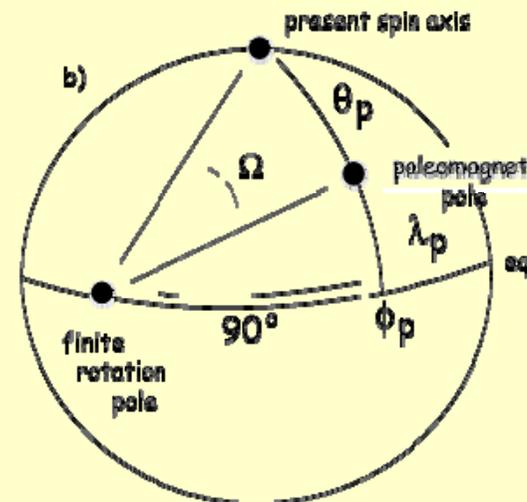
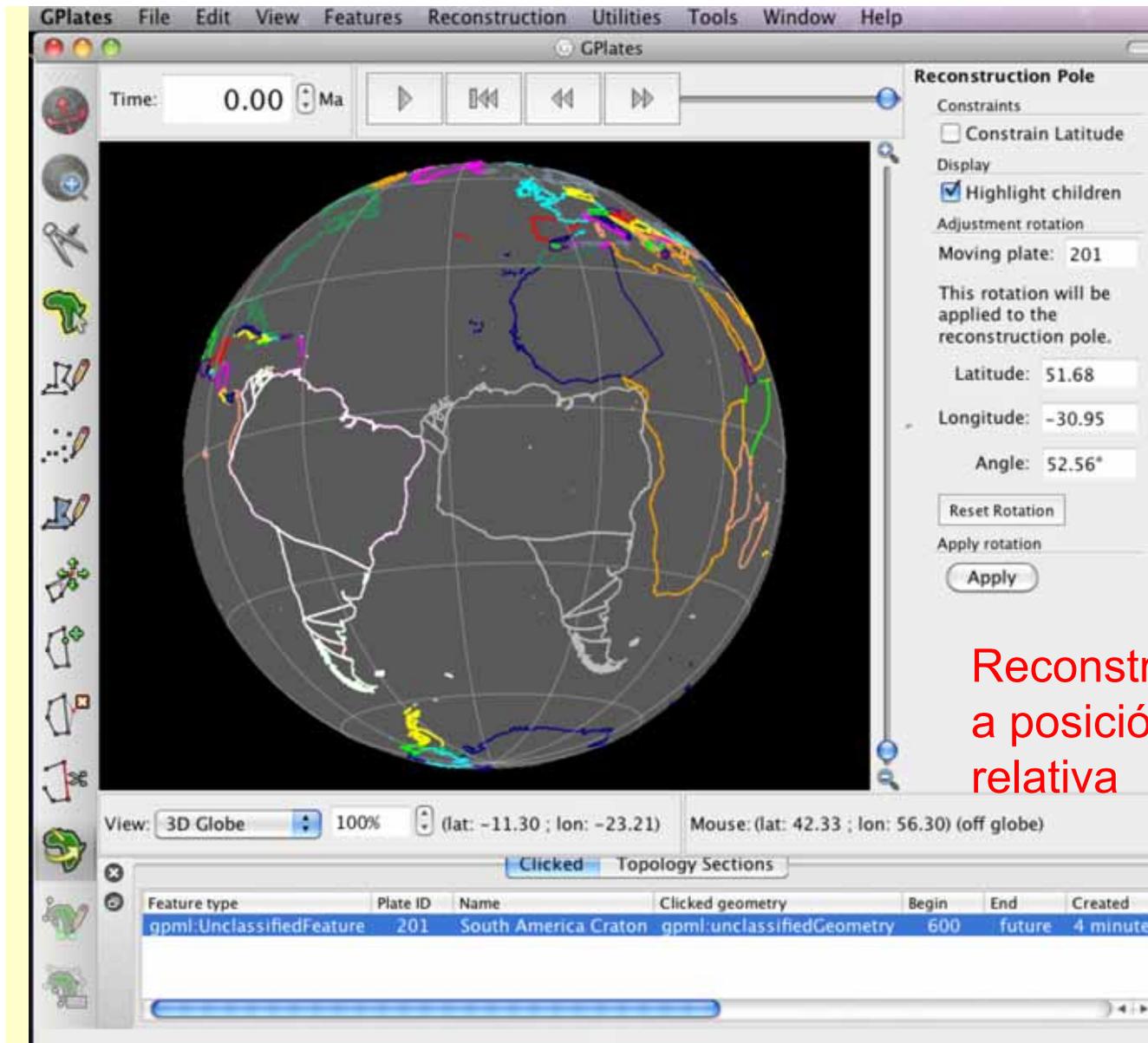


Fig. 4. In order to reconstruct absolute position of a continent, virtual geomagnetic pole (VGP) is rotated around the Euler pole E ($E_\lambda = 0$, $E_\phi = \text{VGP}_\phi + 90^\circ$, $\phi = \text{VGP}_\lambda - 90^\circ$) along a great circle into the geographic pole. The continent is rotated with the same rotation parameters as the VGP.

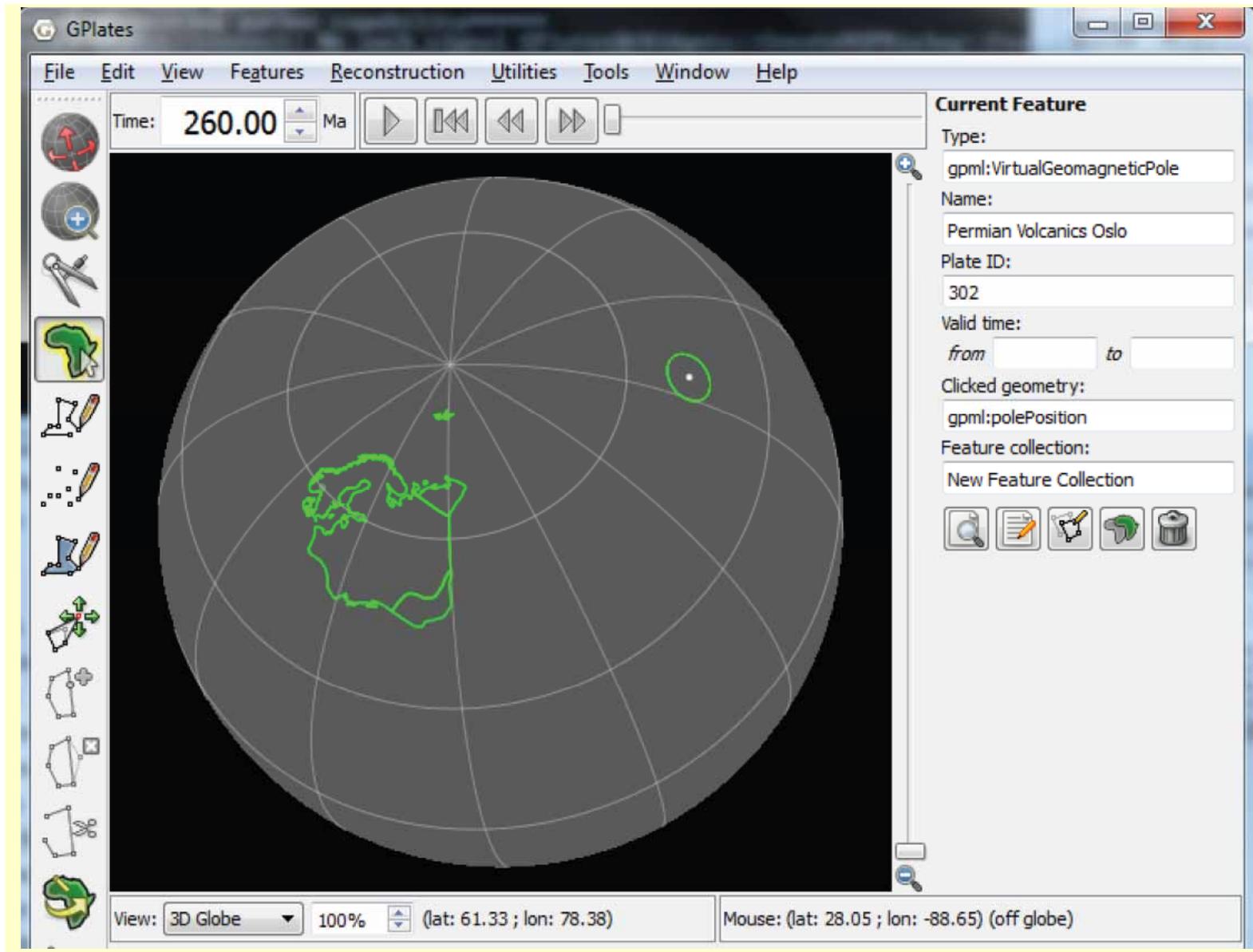
Reconstrucción a posición «absoluta»

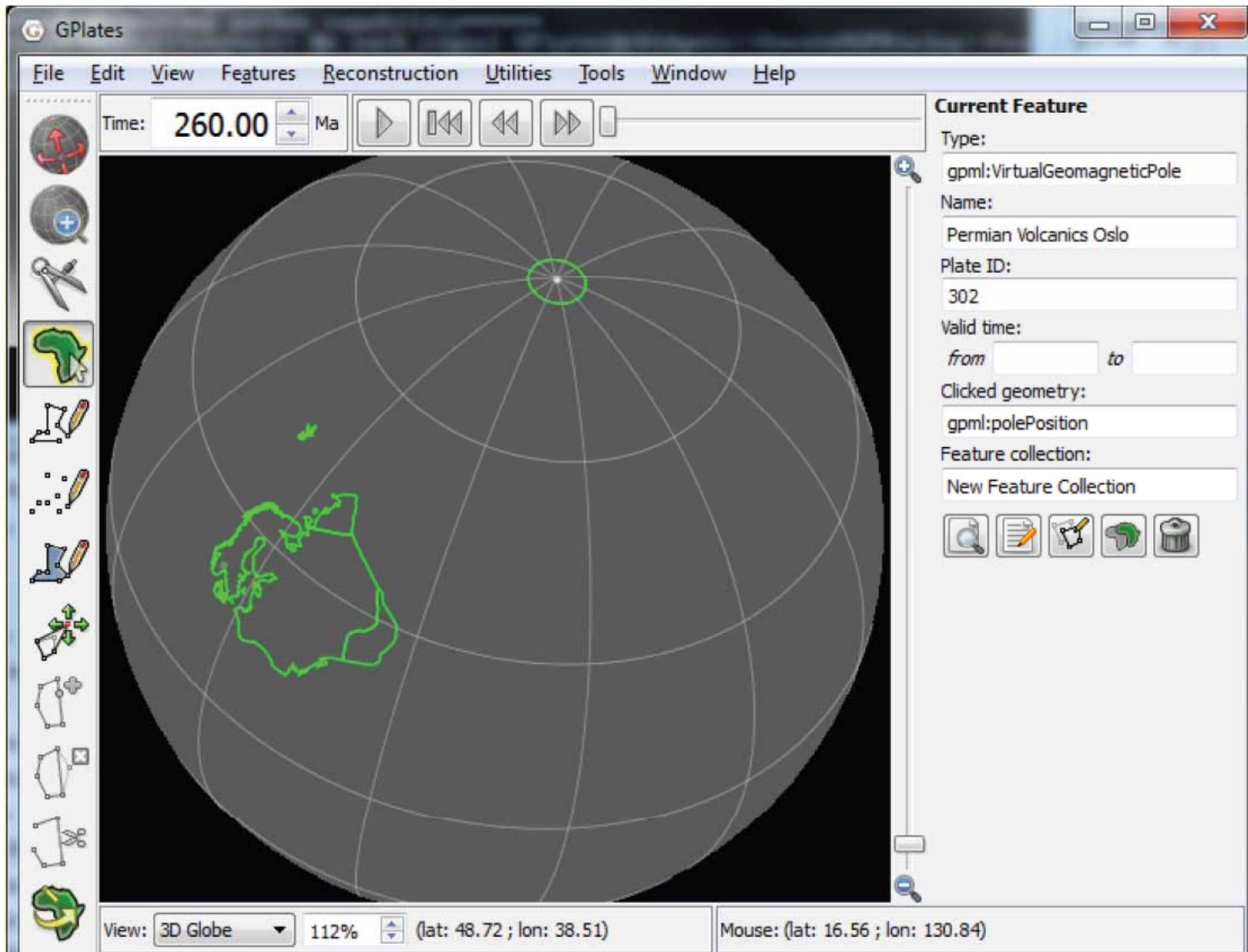
Requiere mover el VGP a lo largo del meridiano, a coincidir con el eje de rotación terrestre. Para eso hay que rotar alrededor de un polo de Euler en el Ecuador y a 90° del meridiano.

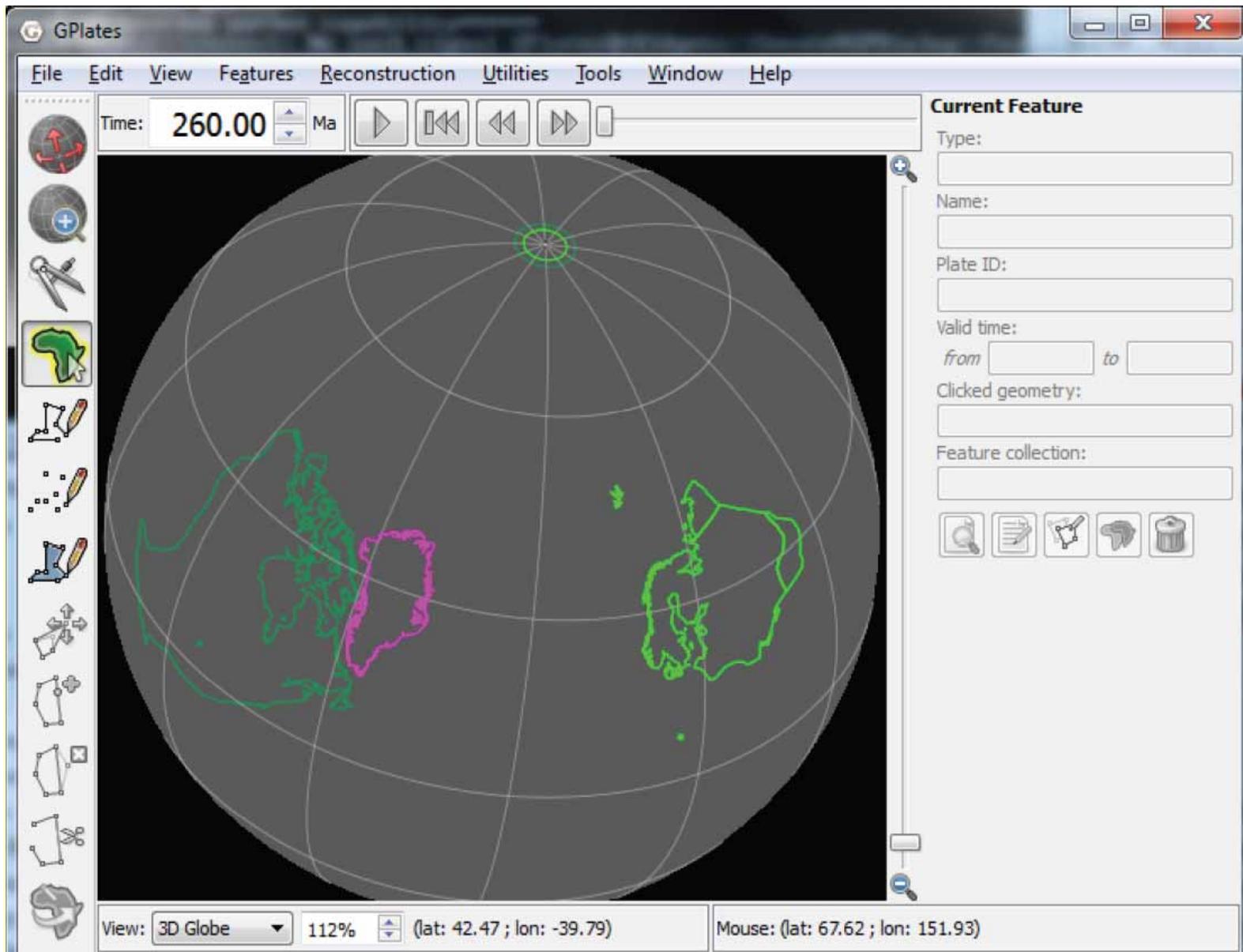


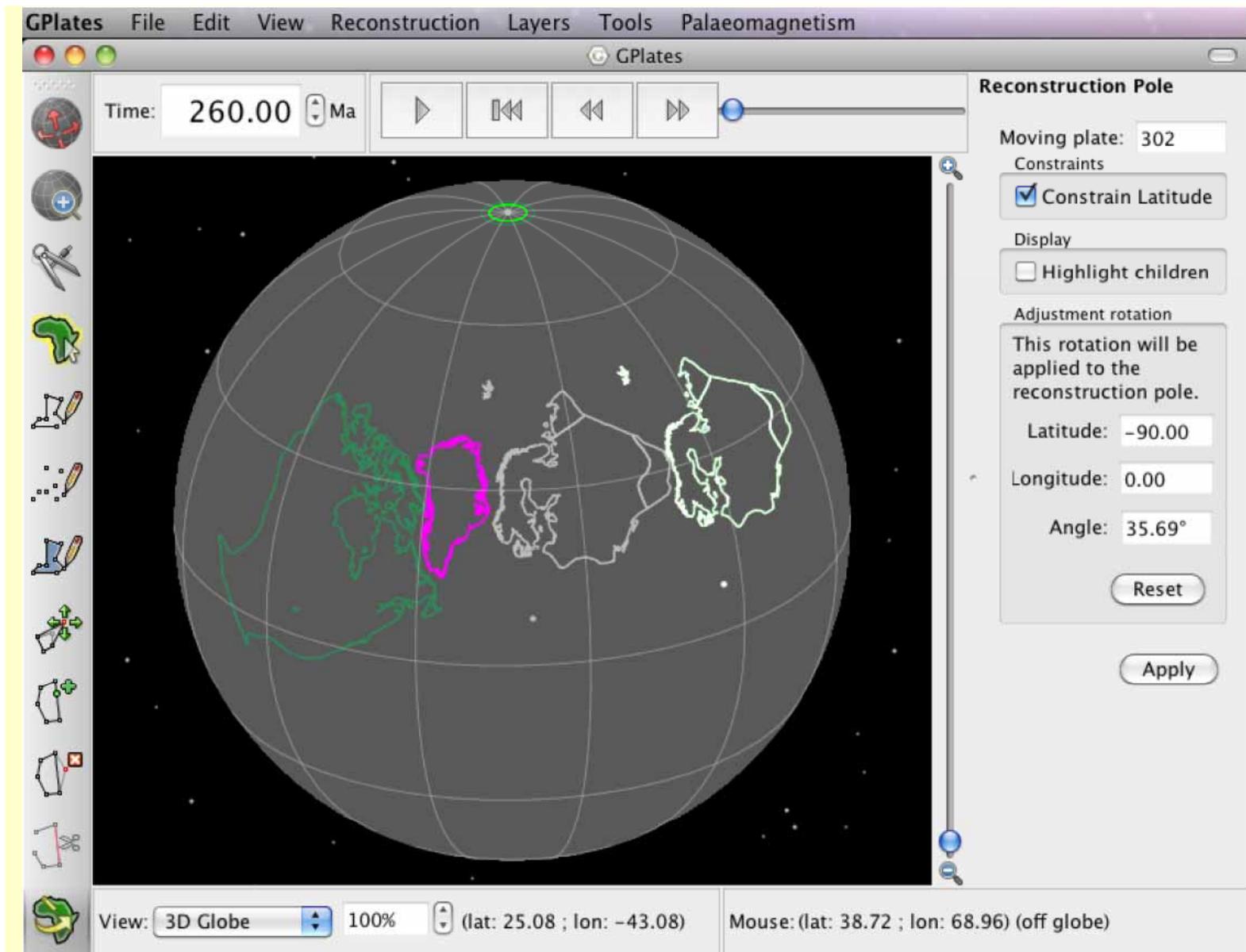


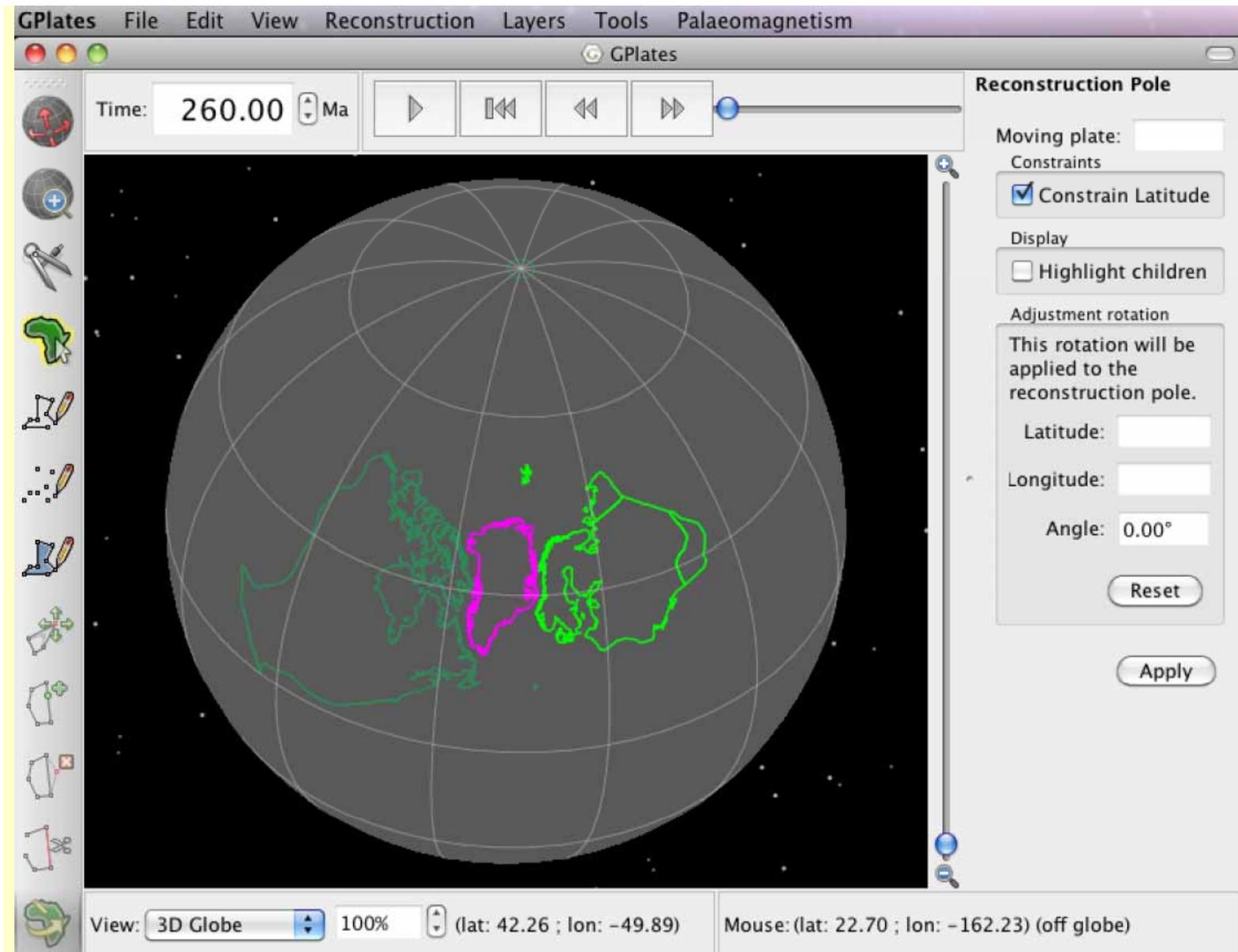
Reconstrucción
a posición
relativa

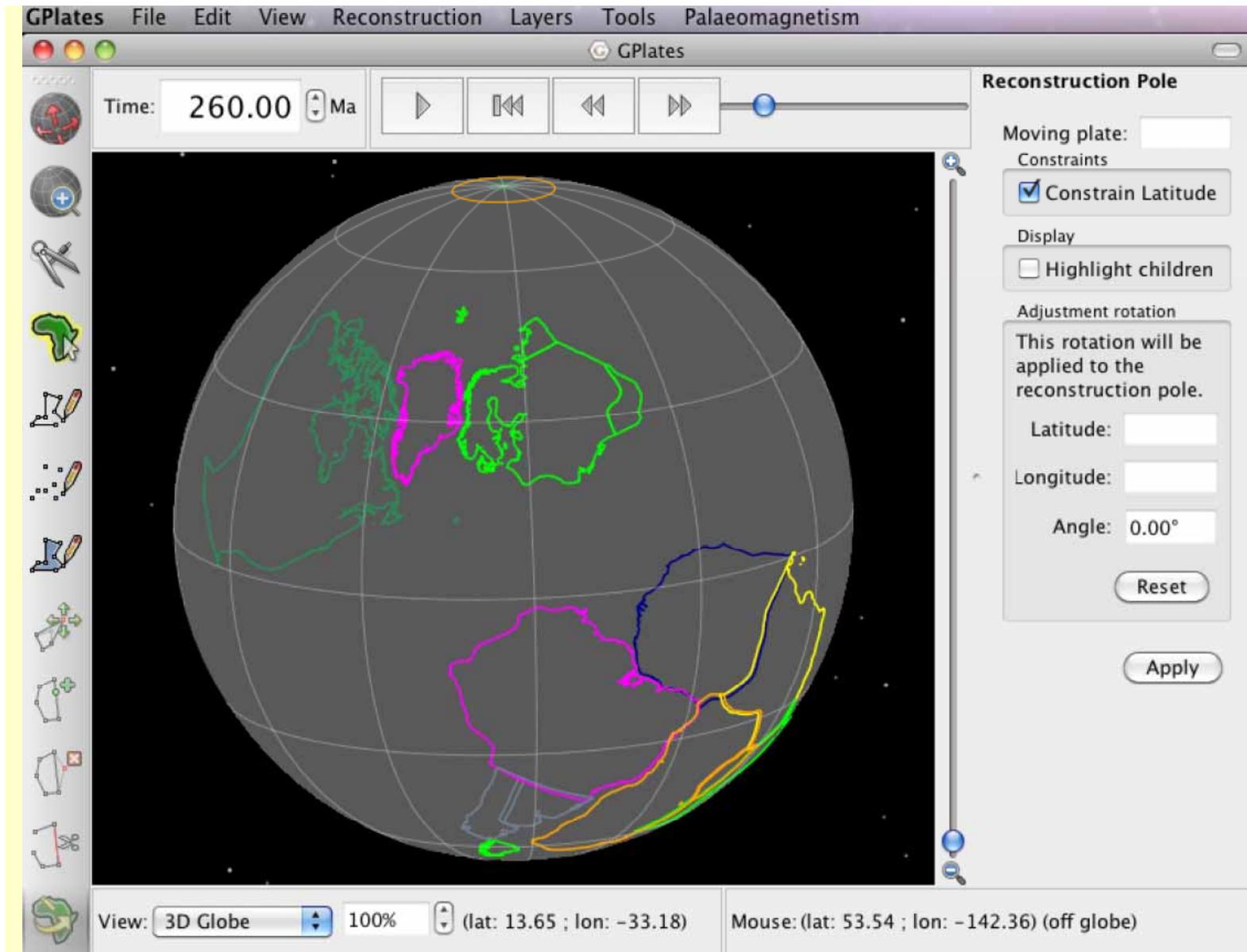


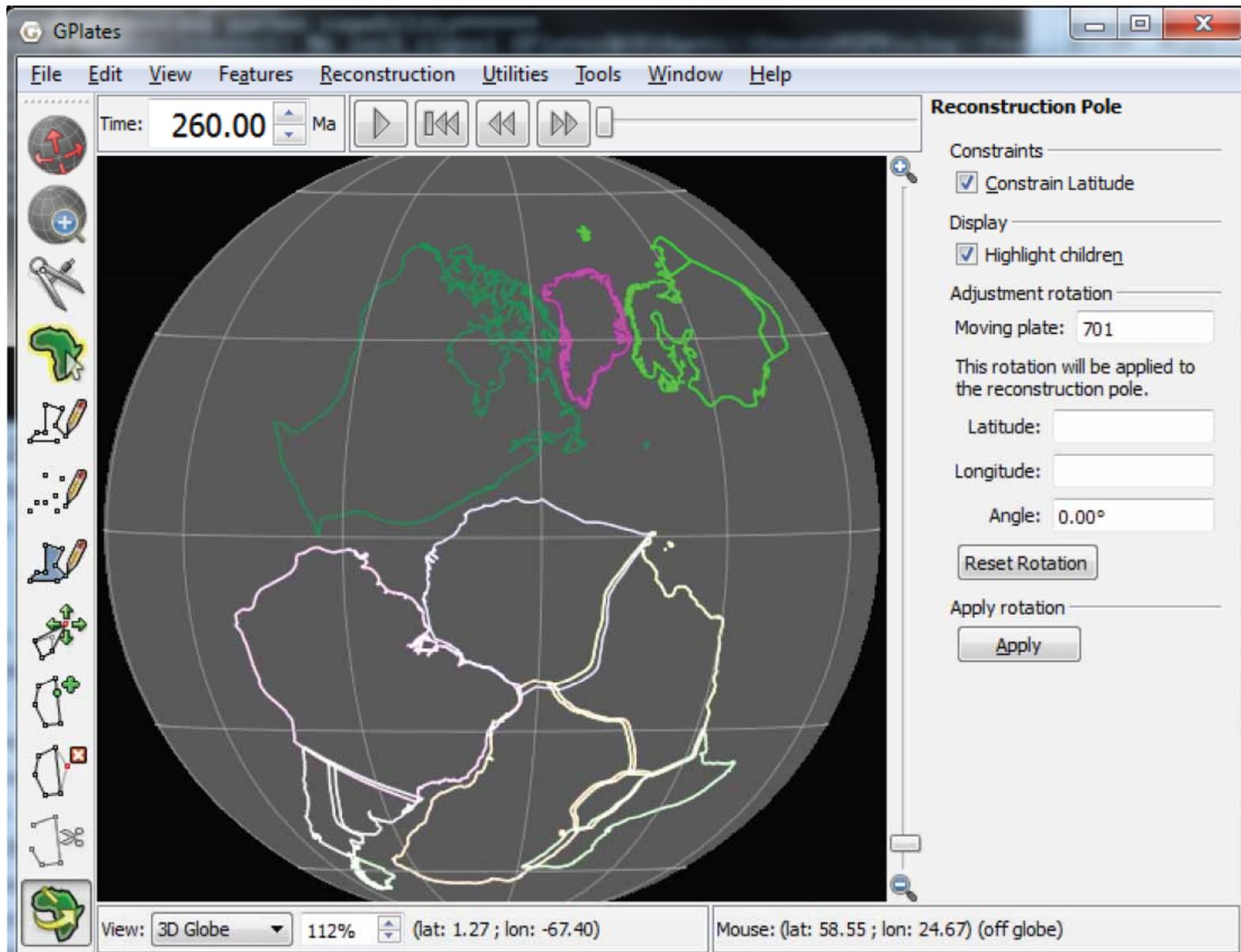




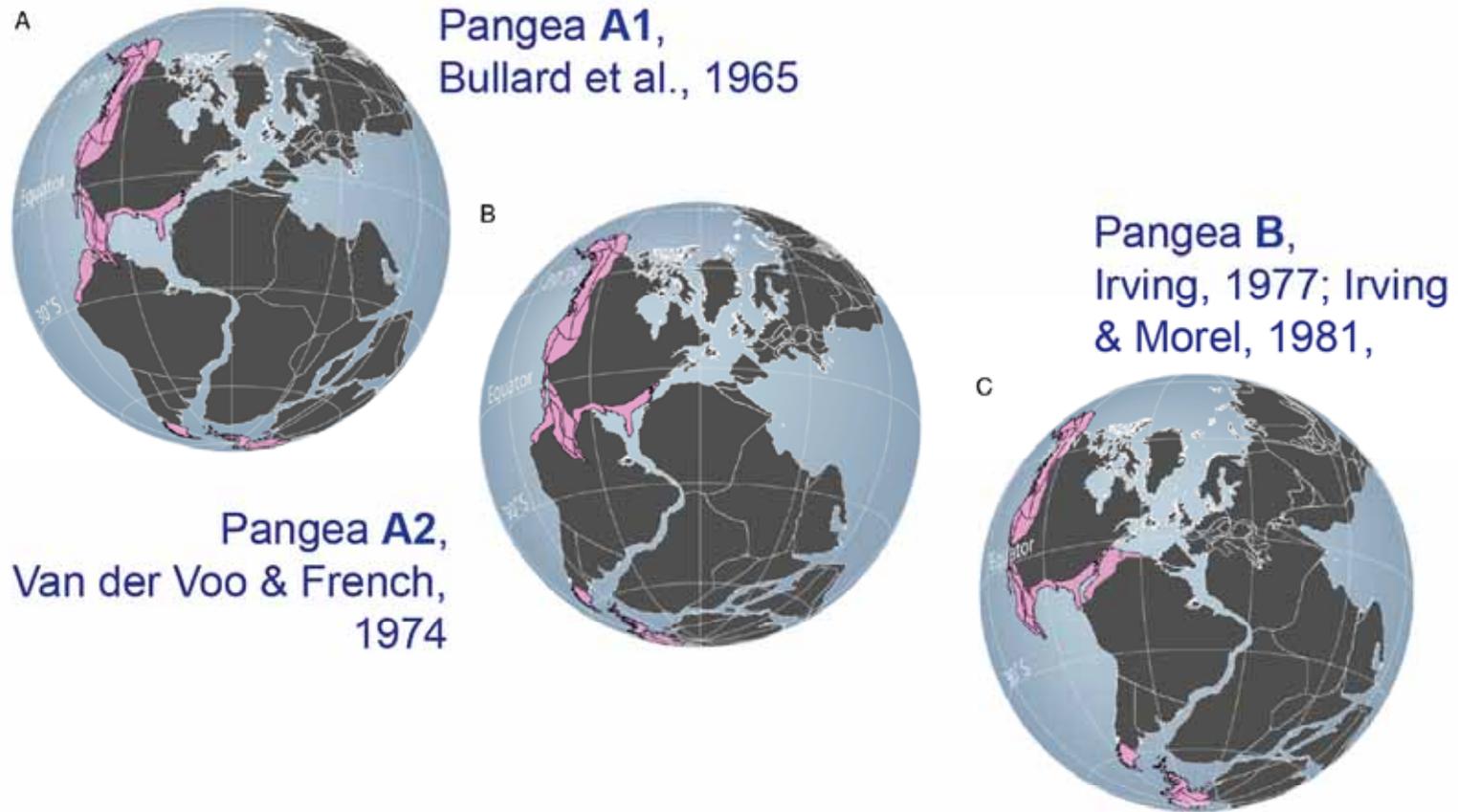








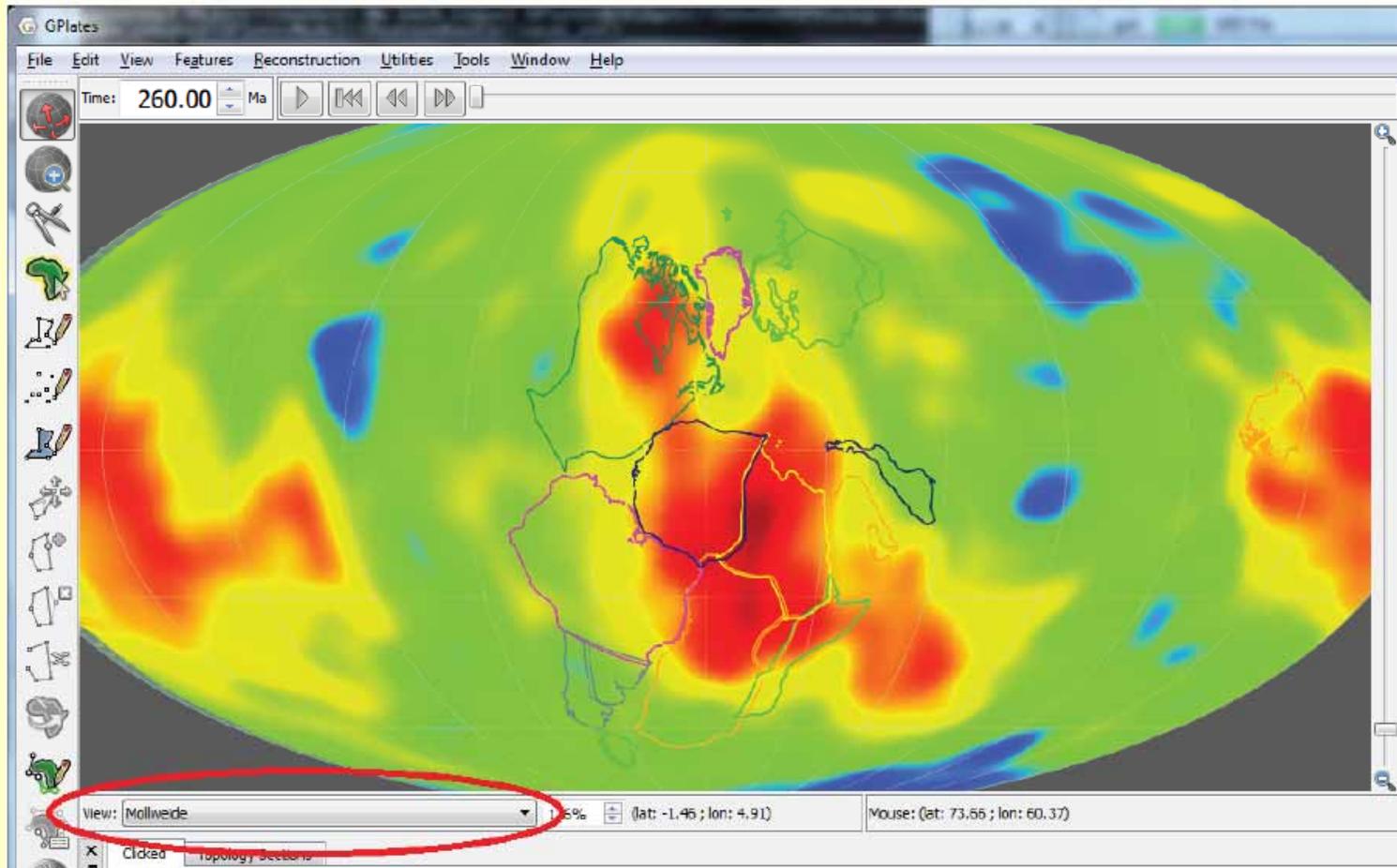
Problema: los polos del Pérmico temprano de Laurasia y Gondwana indican paleolatitudes que no son coherentes con el modelo de Pangea A



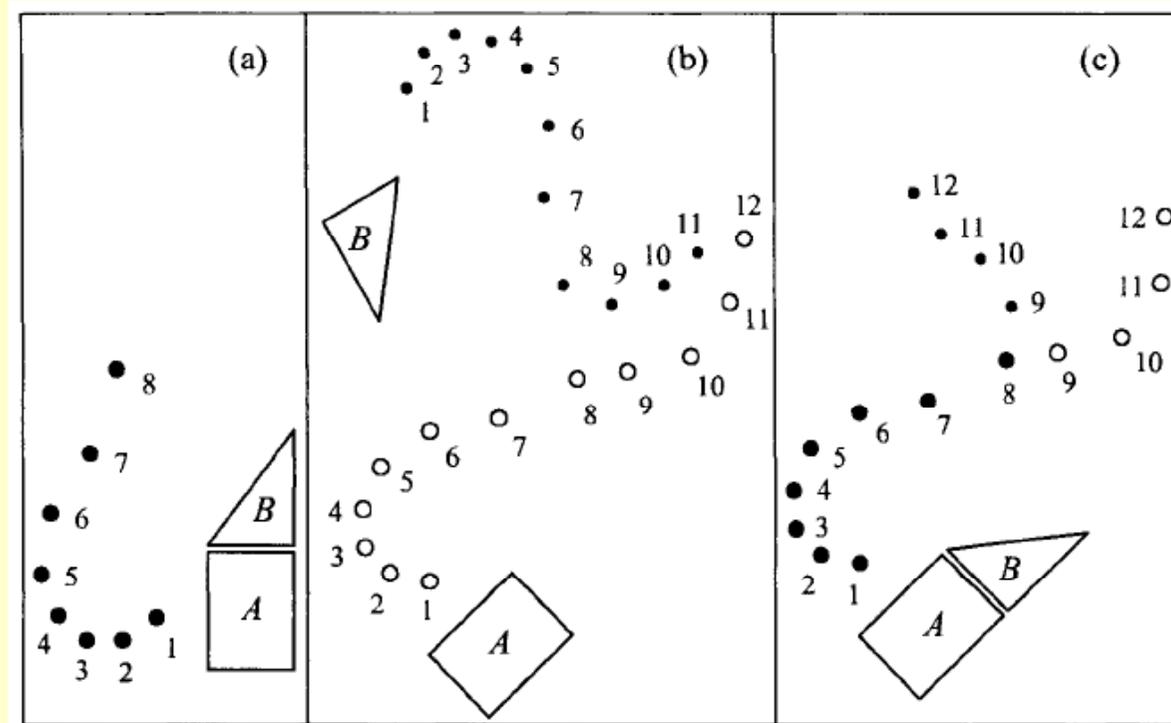
Domeier et al. 2012

Para el Triásico los datos paleomagnéticos vuelven a ser coherentes con una Pangea A. Pero hace falta evidencia geológica de que se produjo esa evolución en la paleogeografía



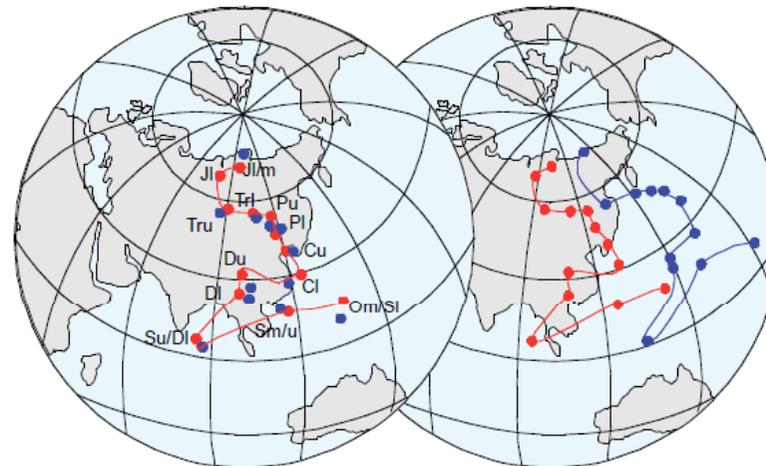


Como indicios de paleolongitud pueden utilizarse las zonas calientes del manto (ej. Torsvik et al. 2008)



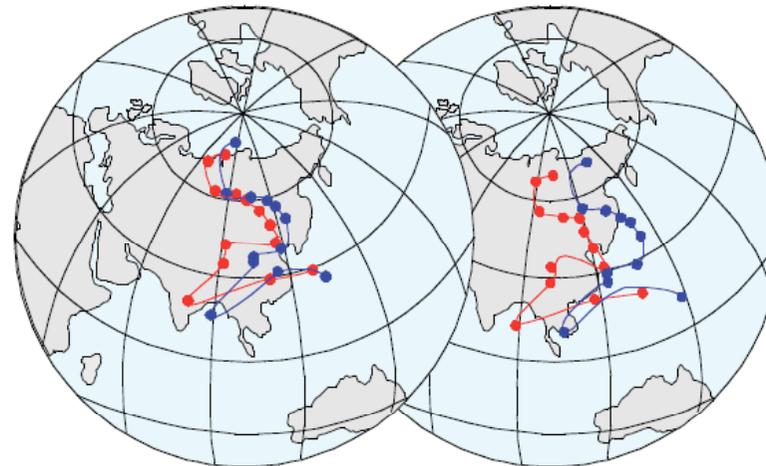
Si dos continentes fueron parte de la misma placa en cierto lapso, entonces sus CDPA para ese lapso deberían coincidir, siempre que ubiquemos a ambos continentes en sus ubicaciones relativas correctas

McElhinny y McFadden, 2000



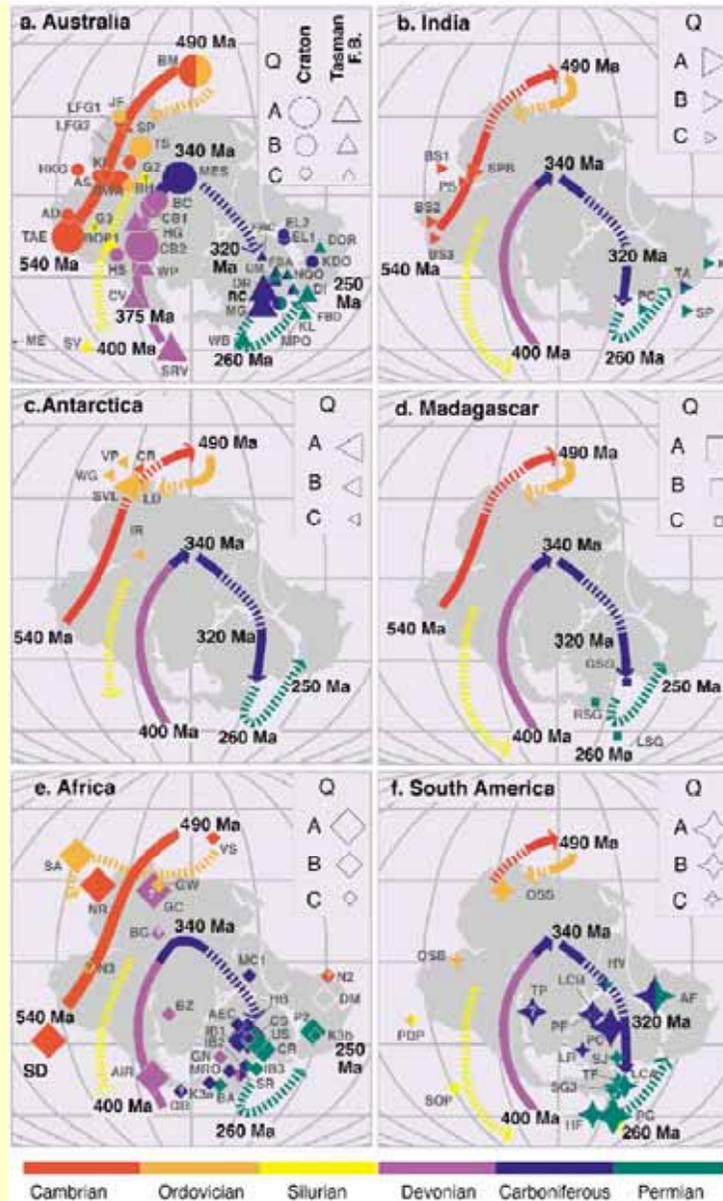
Rotated Bullard Fit
 (Phil. Trans. Roy. Soc., 258, 41-51)
 Misfit of Longitude: -0.3°
 Misfit of Latitude: $+1.7^\circ$

Unrotated APWP
 Europe ●
 North America ●



Savastin et al, 1986
 (Tectonophysics, 123, 1-35)
 Misfit of Longitude: -9.1°
 Misfit of Latitude: $+0.1^\circ$

Rowley & Lottes 1988
 (Tectonophysics, 155, 73-120)
 Misfit of Longitude: -20.3°
 Misfit of Latitude: -0.7°

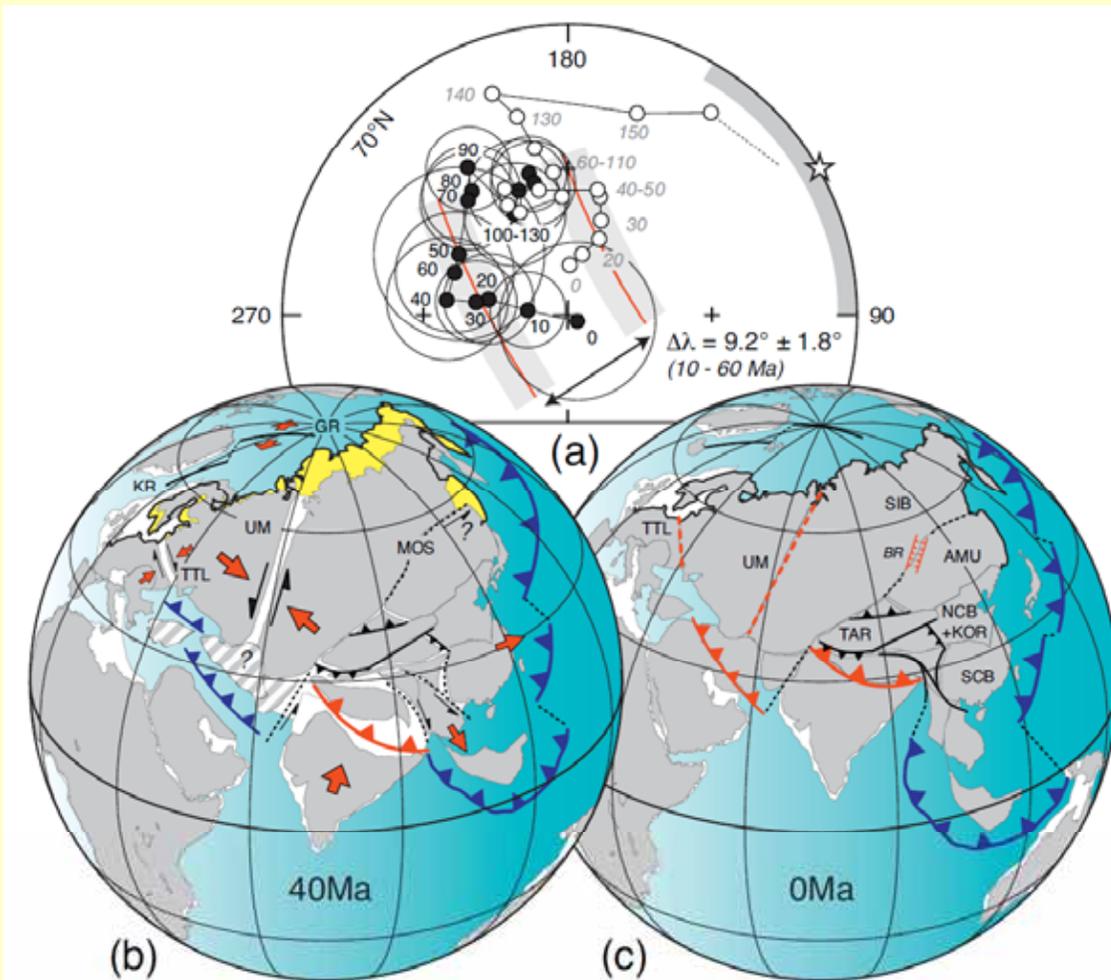


Mediante rotaciones para reconstruir continentes (y sus polos) a sus posiciones relativas en el pasado, se pueden construir «curvas maestras» basadas en polos de varias placas

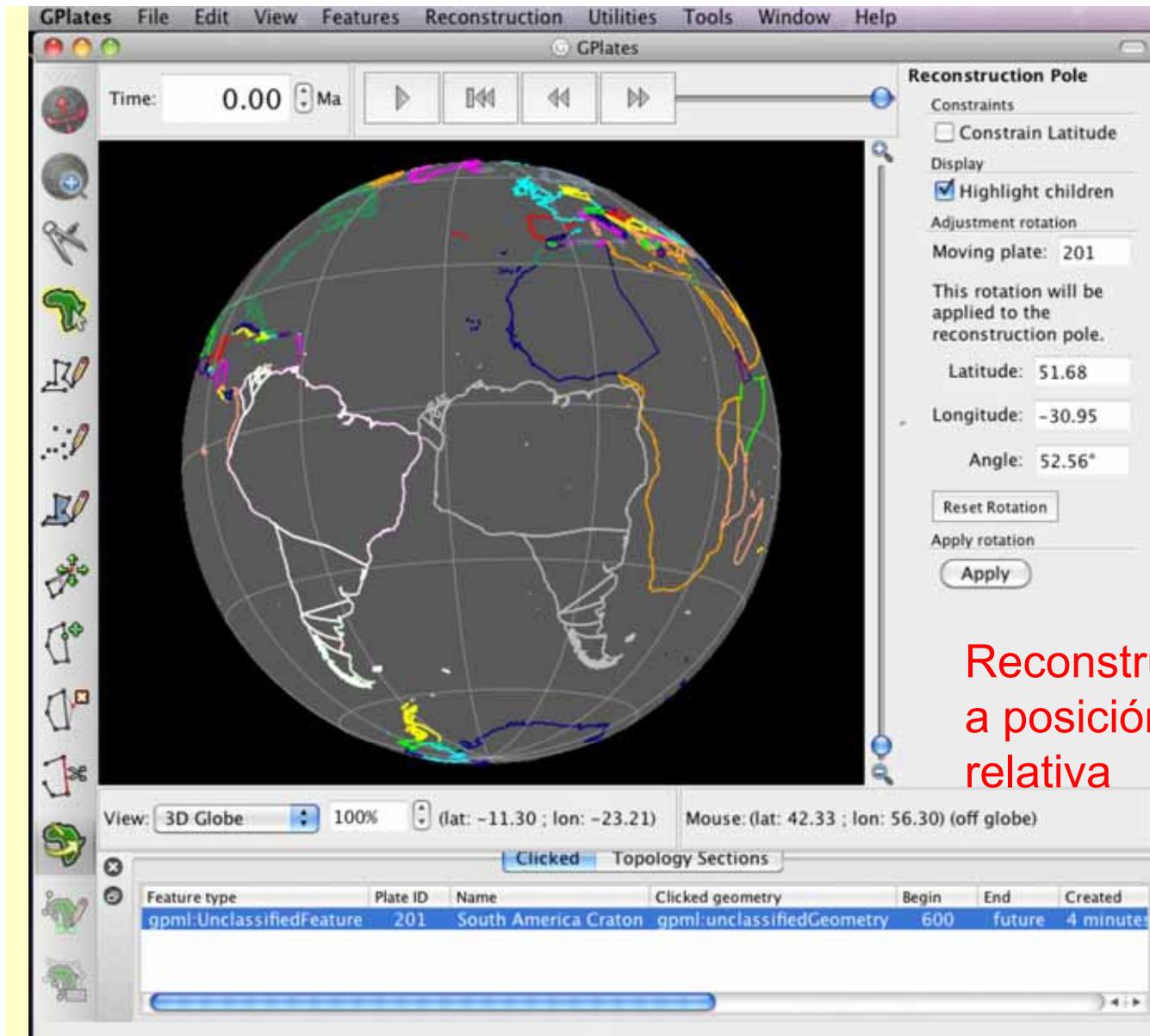
Esta es una solución para la escasez de datos en ciertos períodos, y en ciertos continentes

Li y Powell, 2001

Discrepancia entre la CDPA de Europa y la del Este Asiático.
 Causas posibles: error de inclinación en sedimentos, componente cuadrupolar del CMT, **deformación interna en las placas**

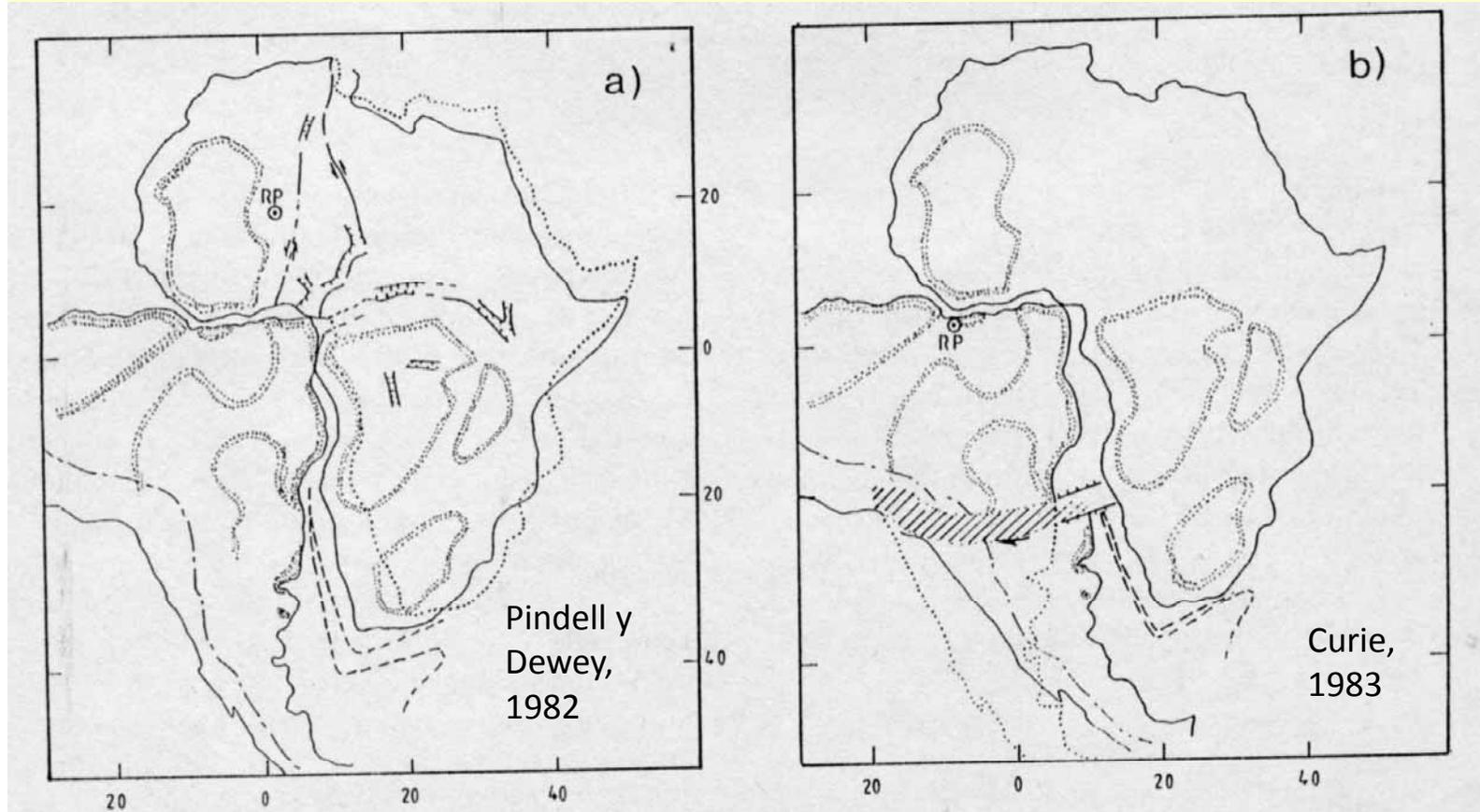


Cogné et al., 2013

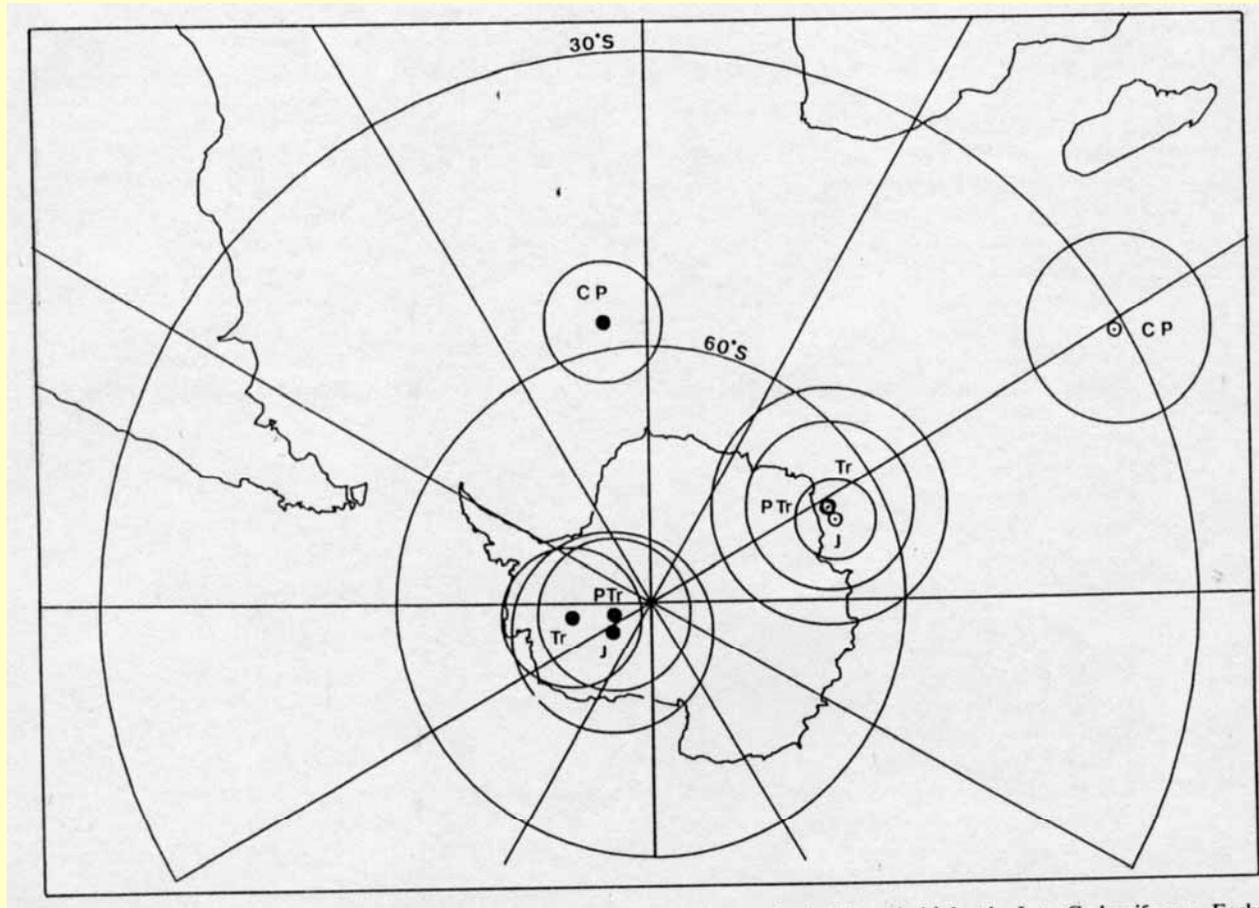


Reconstrucción
a posición
relativa

Evaluación paleomagnética de distintas configuraciones de paleoreconstrucción (ej. por ajuste de costas + deformación intracontinental de diversa índole)

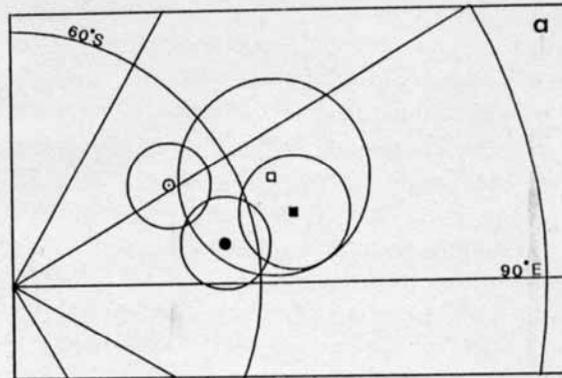


Rapalini et al., 1996

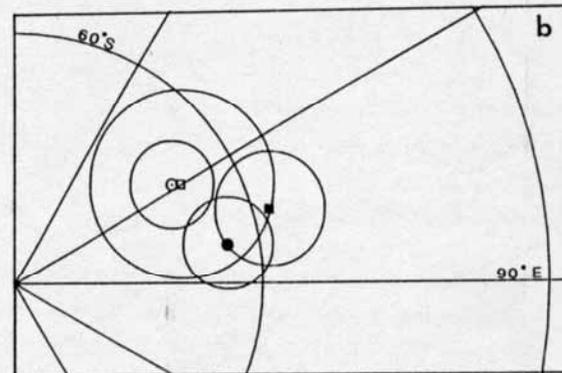


Polos de las distintas subplacas, con los continentes en coordenadas actuales

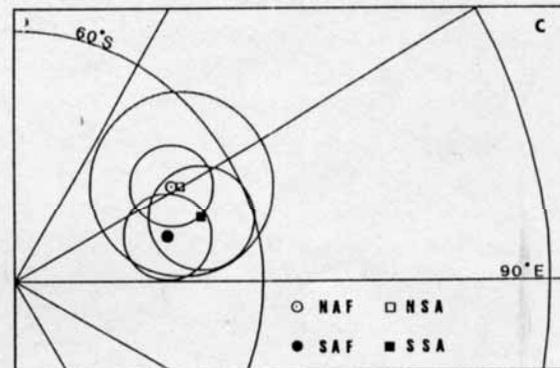
Rapalini et al., 1996



Rabinowitz y LaBrecque 1979
(ajuste de costas)



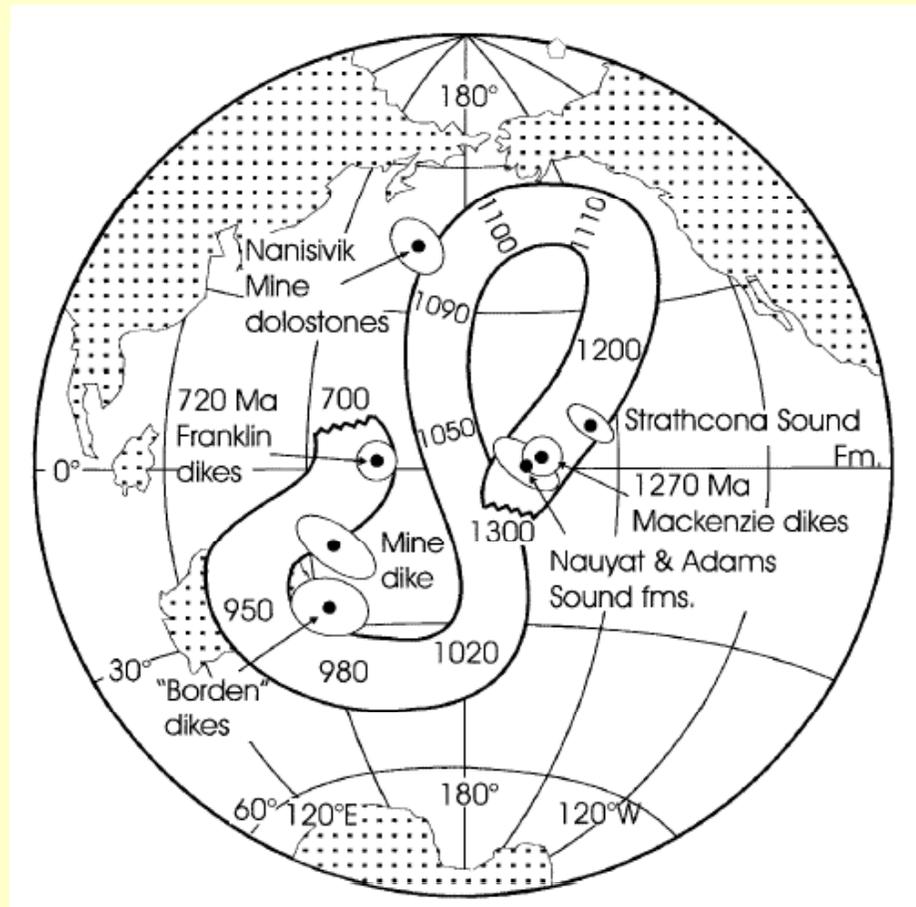
Curie 1983
(deformación en América del Sur)



Rowley y Pindell 1989
(deformación en África)

Rapalini et al., 1996

Datación paleomagnética



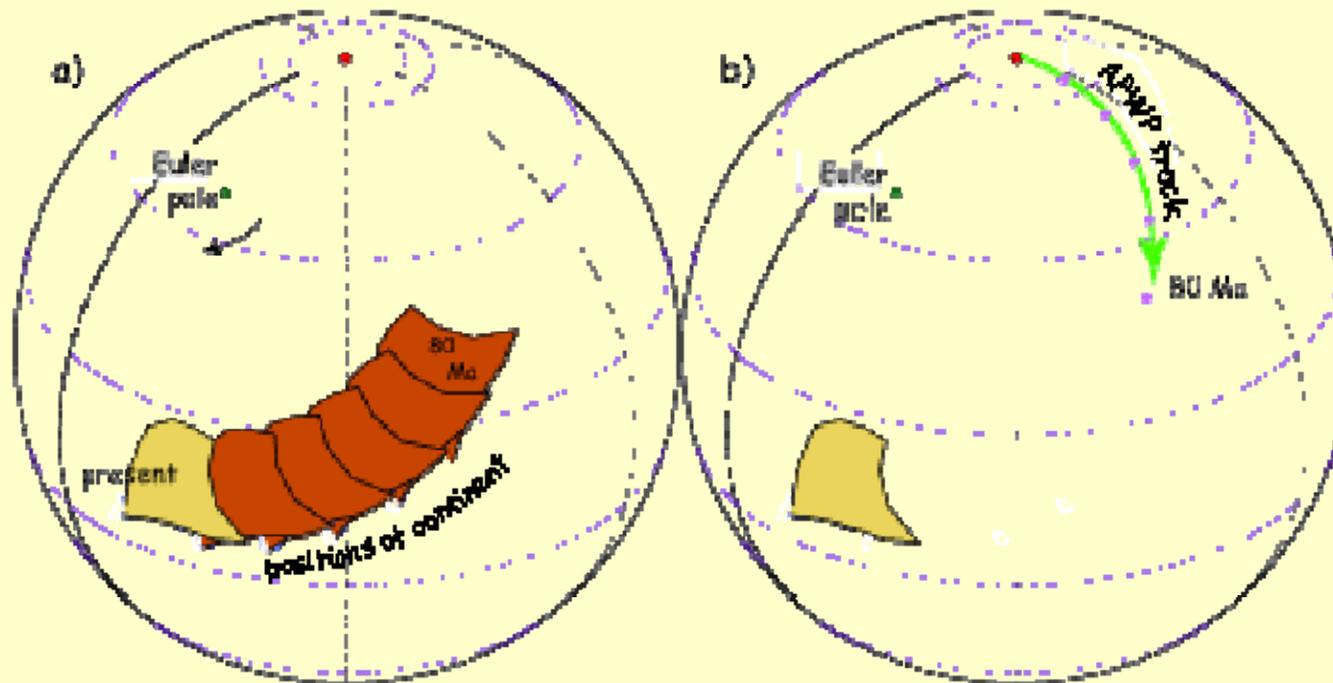
PP calculado en dolomitas con mineralización MVT.

Se estima la edad de la mineralización.

Symons et al. 2000

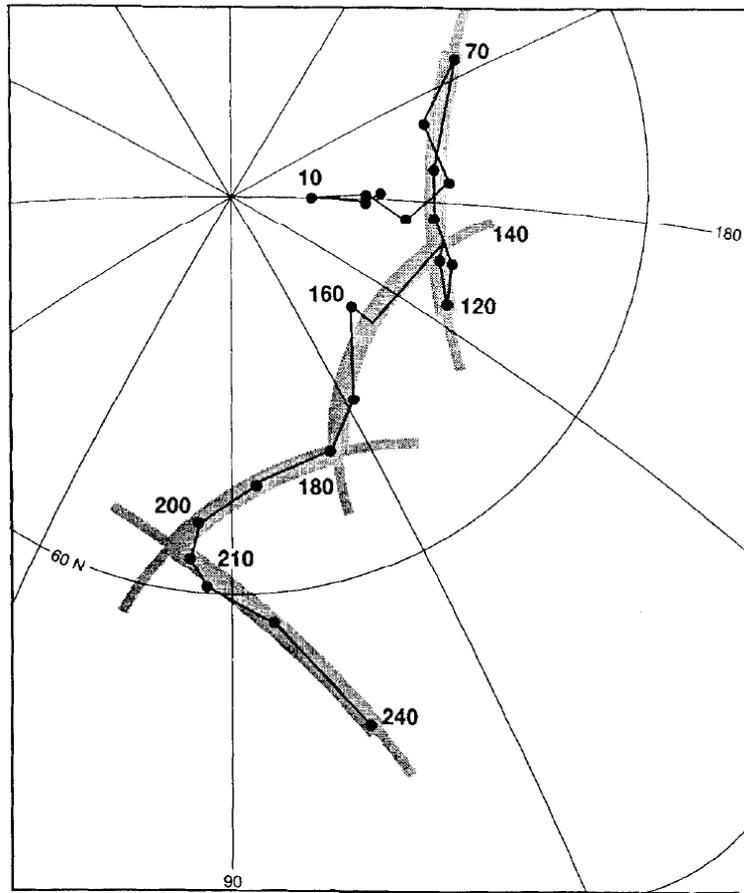
Análisis PEP (*Paleomagnetic Euler Pole*)

May y Butler, 1986

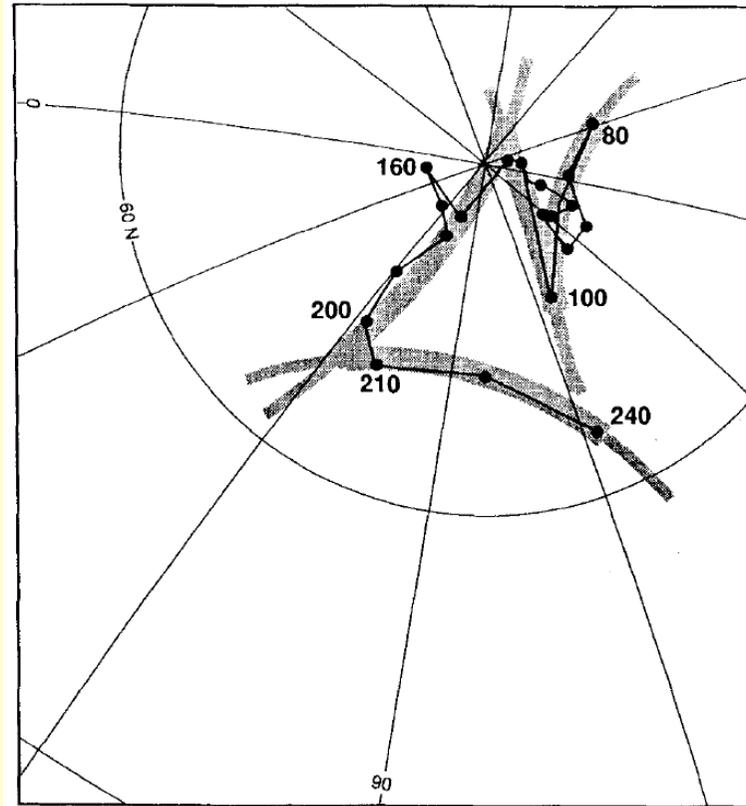


a) Método del Polo de Euler paleomagnético (PEP) para determinar CDPAs. Un continente rota alrededor de un polo de Euler fijo (triángulo verde). b) En coordenadas actuales los PPs caen en un círculo pequeño

Norteamérica



Sudamérica



Los polos caen sobre trazas de círculos pequeños, separados por codos (cusps).

Tarling y Abdeldayem, 1996