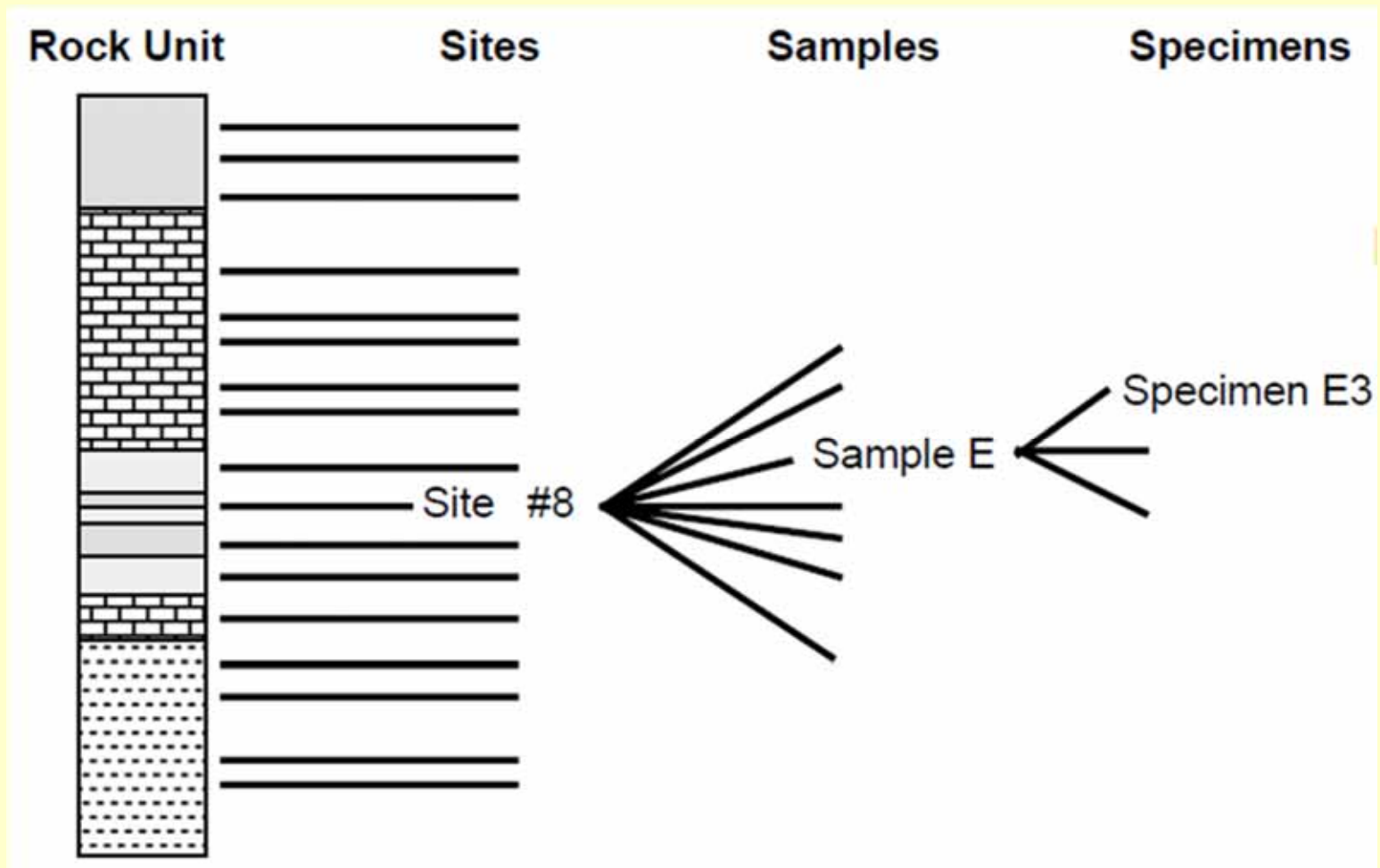


Estabilidad Magnética

- MRN: composición de remanencias
- Desmagnetización de la MRN
- Pruebas estadísticas de la estabilidad

Muestreo Paleomagnético



Análisis de direcciones paleomagnéticas

- Mineralogía portadora (origen y edad)
- Consistencia intra-sitio, promedio de dirección por sitio
- Pruebas de campo y de reversión (si la magnetización representa razonablemente la dirección del CMT del momento de formación de la roca)
- Promedio de las direcciones de los distintos sitios

Para promediar N direcciones de ChRM (D_i , I_i), *considerados vectores unitarios en una esfera*, se los debe sumar vectorialmente y dividir por N. Para eso se calculan los cosenos directores:

$$l_i = \cos D_i \cos I_i; \quad m_i = \sin D_i \cos I_i; \quad n_i = \sin I_i$$

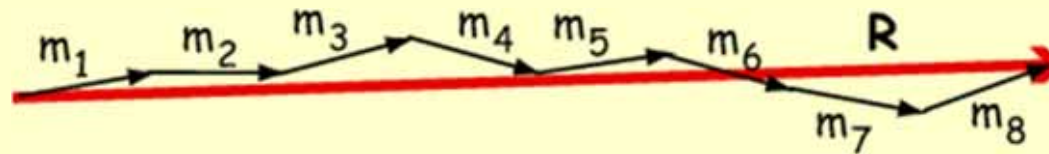
El módulo de la resultante es:

$$R^2 = (\sum_i l_i)^2 + (\sum_i m_i)^2 + (\sum_i n_i)^2$$

y la dirección de la resultante:

$$l = (\sum_i l_i) / R; \quad m = (\sum_i m_i) / R; \quad n = (\sum_i n_i) / R$$

$$D = \arctan(m / l); \quad I = \arcsin(n)$$



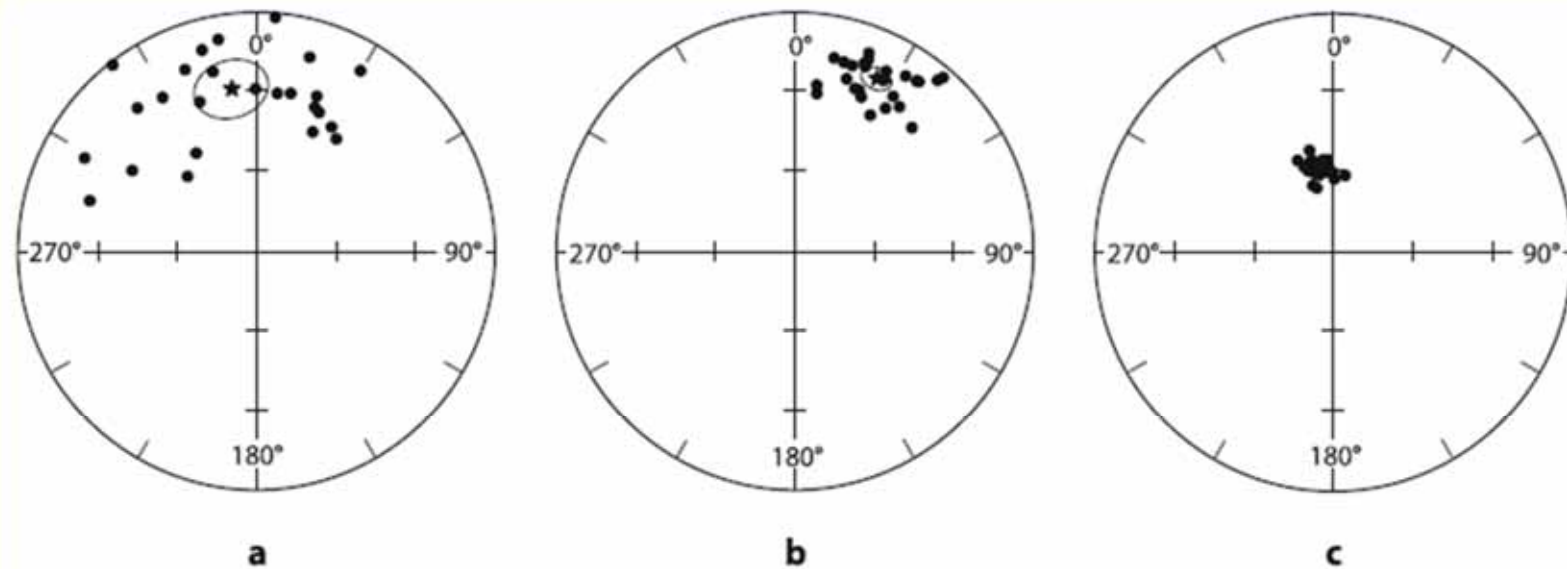


Fig. 4.21. Equal-area projection of paleomagnetic directions from single sites. Symbols: *dots* = ChRM direction; *star* = site mean direction with ellipse of confidence; a high dispersion ($\alpha_{95} = 11.5^\circ$, $k = 7$ – Miocene marls, Ligurian-Piedmontese Basin, NW Italy); b low dispersion ($\alpha_{95} = 4.5^\circ$, $k = 43$ – Jurassic limestones, *Rosso Ammonitico*, western Sicily); c very-low dispersion ($\alpha_{95} = 2.1^\circ$, $k = 423$ – fine-grained pyroclastics, Vesuvius, Italy)

La significancia de la dirección media se evalúa mediante la estadística de Fisher

Estadística de Fisher (1953)



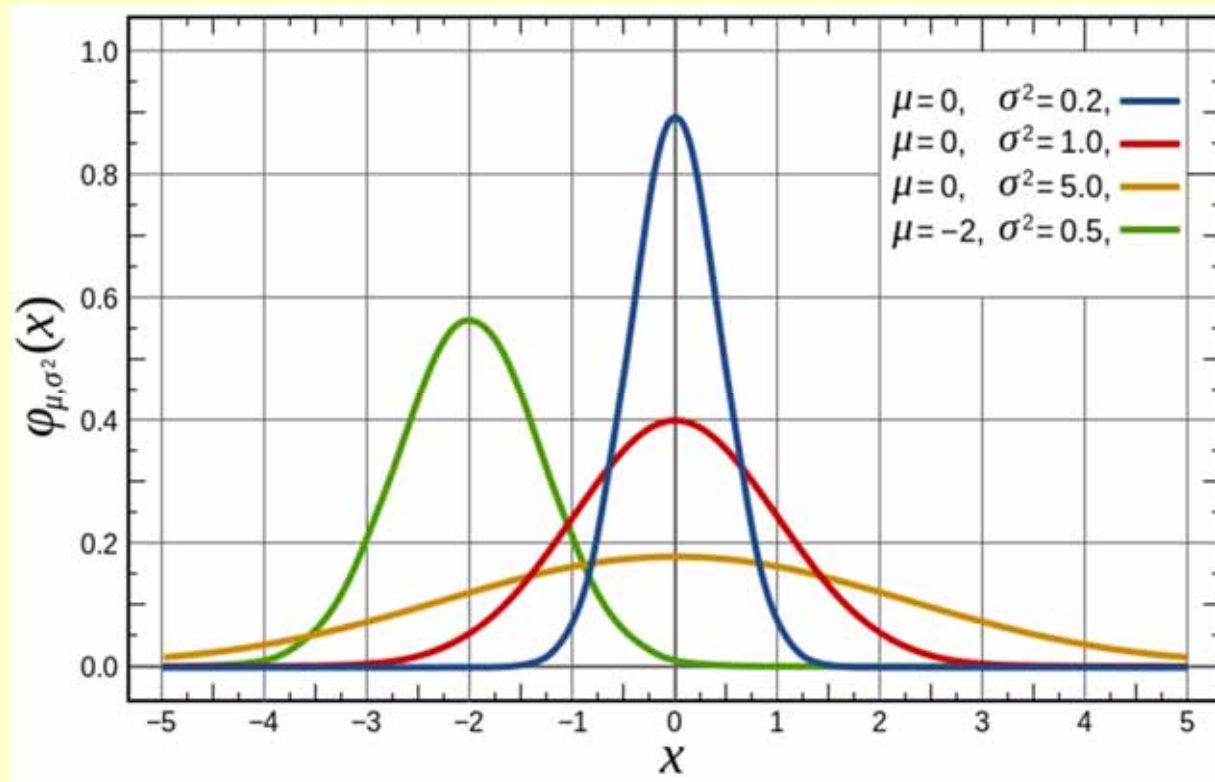
Ronald A. Fisher (1890-1962)

Matemático y genetista inglés. En Cambridge en los `50 desarrolló el tratamiento estadístico utilizado aún hoy día en forma estándar en Paleomagnetismo

*Fisher, 1953. Dispersion on a Sphere.
Proceedings of the Royal Society of London,
Series A, 217: 295-305*

La estadística diseñada por Fisher se basa en considerar
vectores unitarios con distribución normal

Distribución normal



Función de distribución

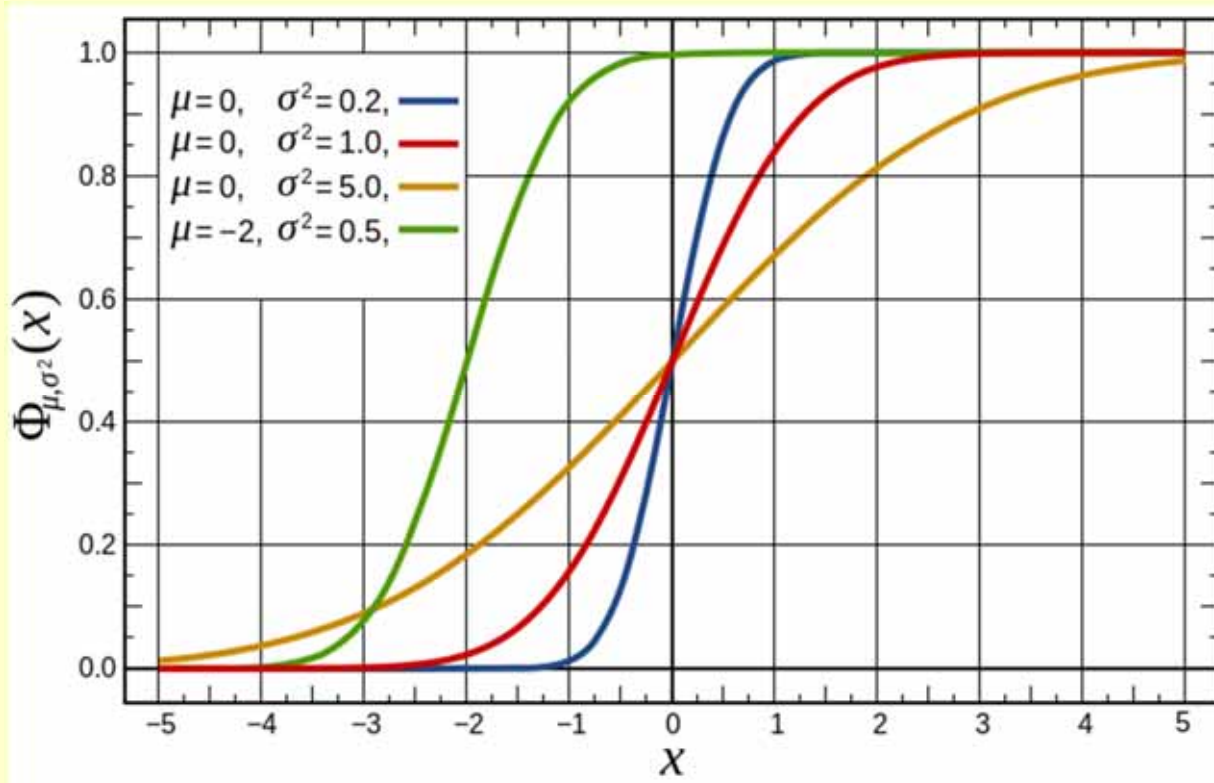
Valores de x (variable medida)
centrados alrededor de μ

μ valor medio

σ^2 varianza, σ desviación estándar

σ determina el ancho de la
distribución alrededor de μ

Distribución normal

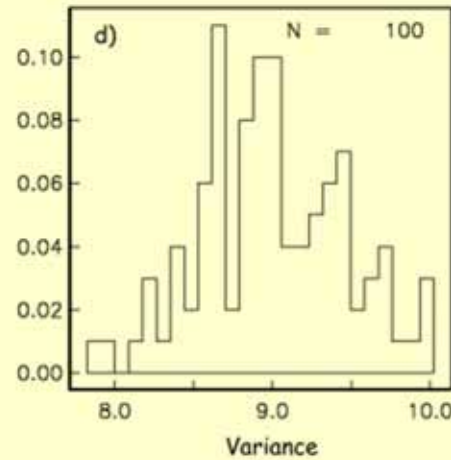
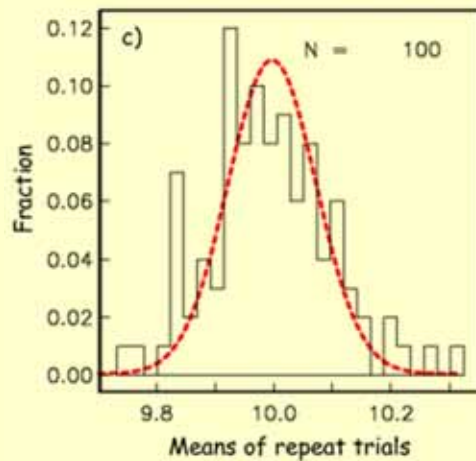
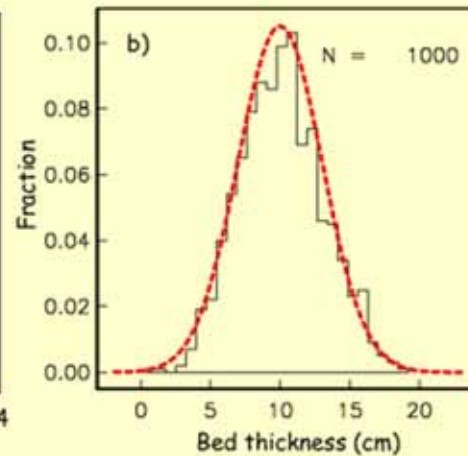
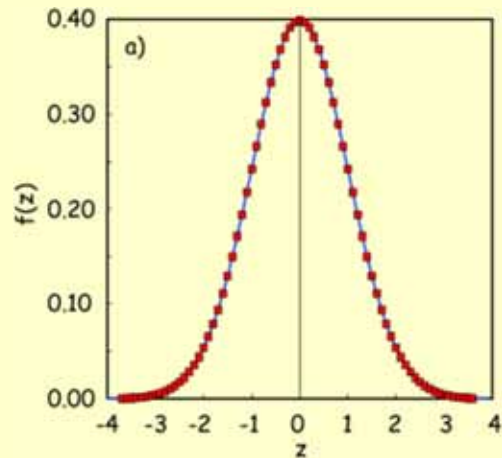


CDF: función de distribución acumulativa

Una distribución normal es aquella que sigue una función de densidad de probabilidad gaussiana:

$$f(z) = (1/\sigma \sqrt{2\pi}) \exp(-z^2/2) \quad z = (x - \mu) / \sigma$$

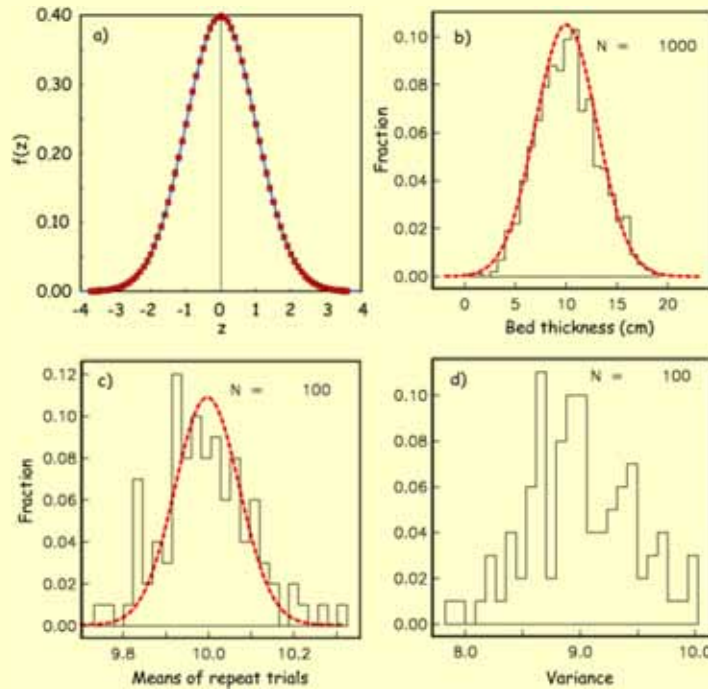
Tratamiento estadístico



Población: conjunto hipotético infinito de observaciones.

Se toma una **muestra**

Diversas muestras de la misma población tendrán valores medios diferentes. Y también diferentes varianzas.



$$m = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

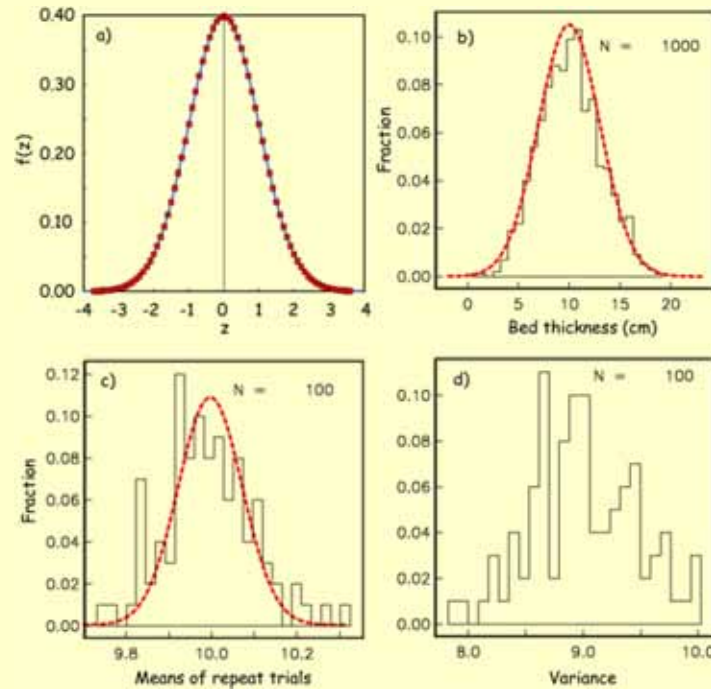
m (valor medio medido) es una estimación de μ (valor medio real de la población)

$$\text{var}(x) = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - m)^2}{(n - 1)} = s^2$$

s es una estimación de la varianza de la población

68% de los datos estarán comprendidos en $m \pm s$

95% de los datos entre $m \pm 1,96 s$ (dos desviaciones estándar)



$$\Delta m = \frac{s}{\sqrt{n}}$$

s (desviación estándar de la población) no depende de n

Δm (el error estándar de la media) sí depende de n

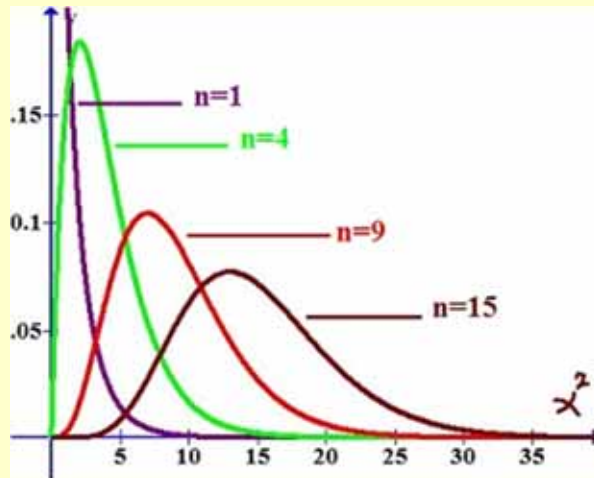
A más mediciones, tendré una estimación más precisa de la verdadera dirección media

La distribución chi cuadrado (χ^2) y la distribución F se derivan de los parámetros de la distribución normal.

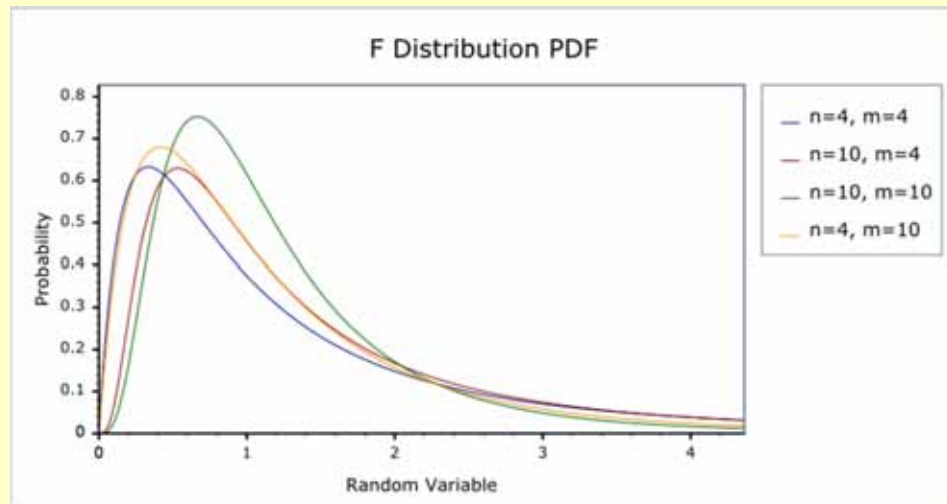
Para una distribución normal, el estadístico $(n-1)s^2$ tiene distribución χ^2 , con grados de libertad $v = n-1$ (se denota χ_v^2).

La relación de dos variables independientes con distribución χ^2 , cada una dividida por sus grados de libertad (v_1 y v_2) está distribuida según la función F.

Distribución chi cuadrado

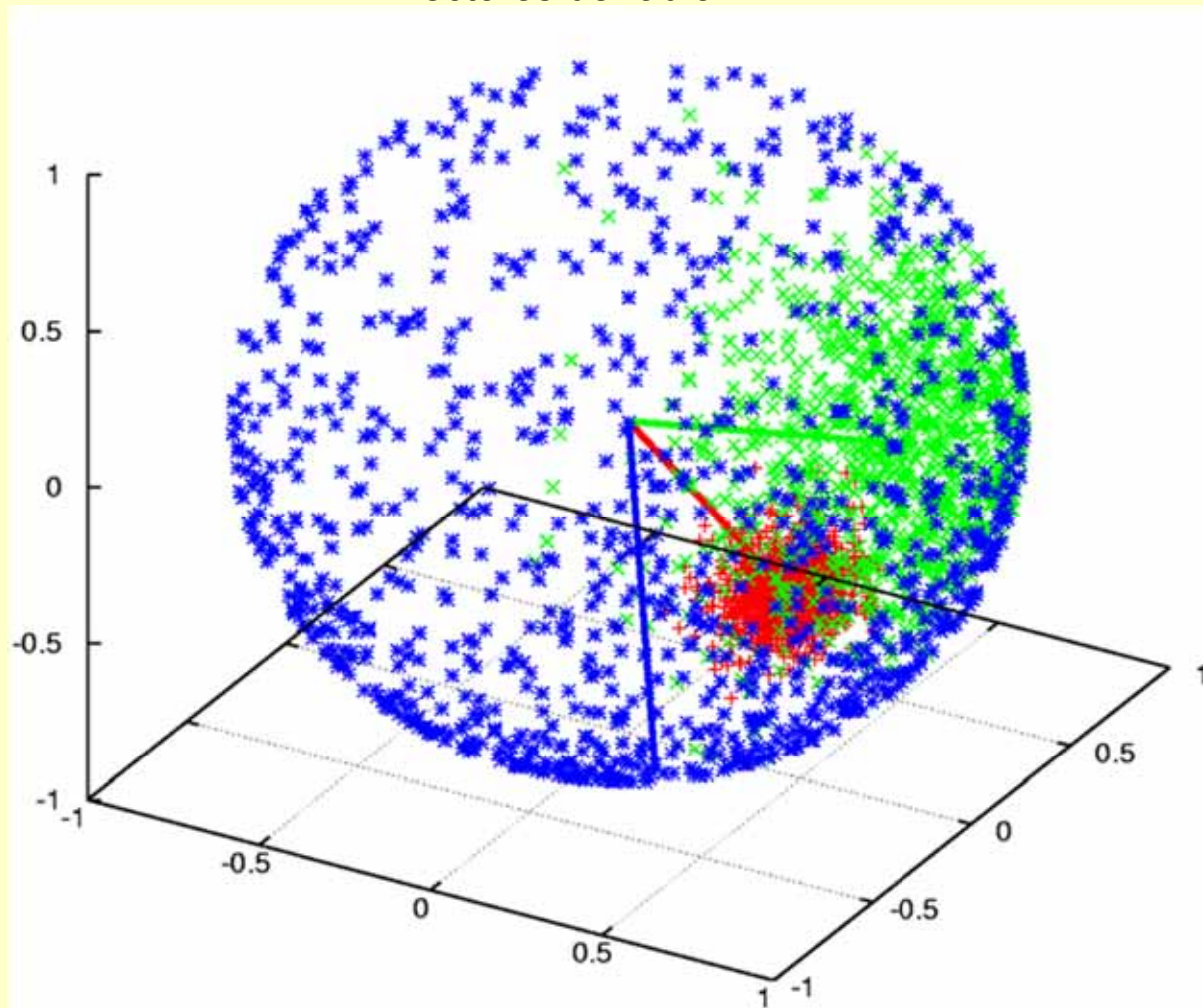


Distribución F



Distribución de Fisher

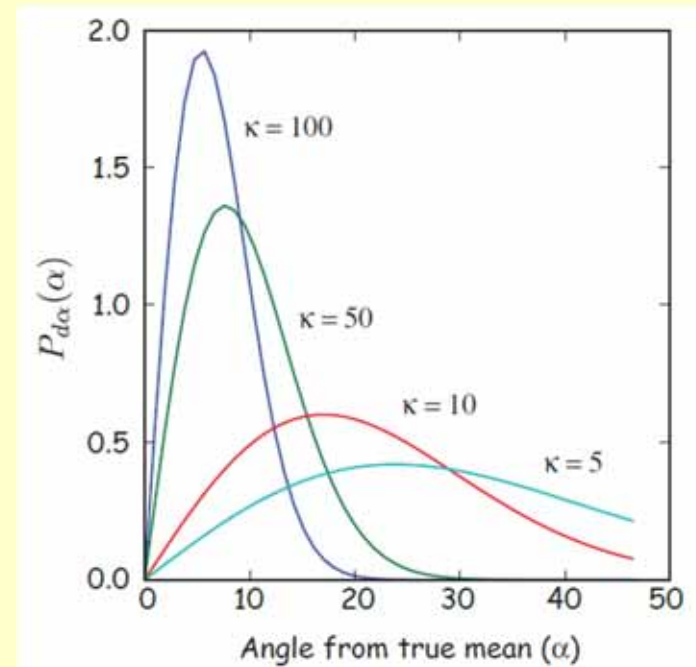
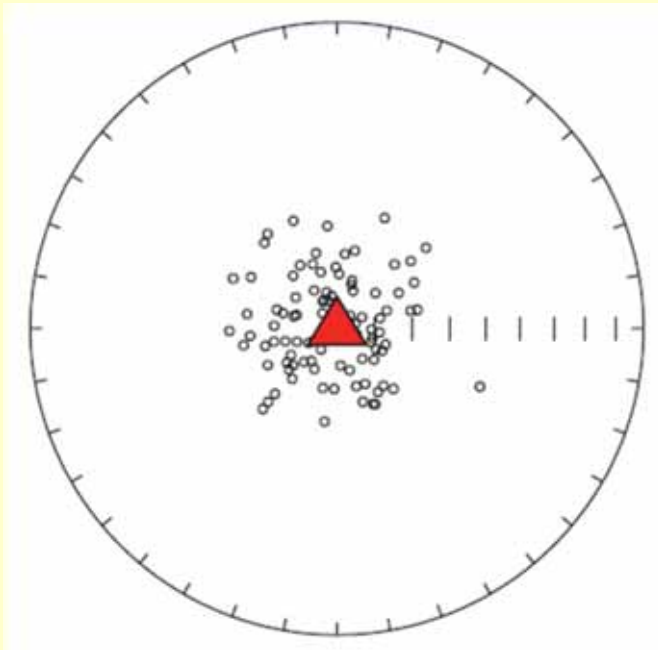
Vectores de radio = 1



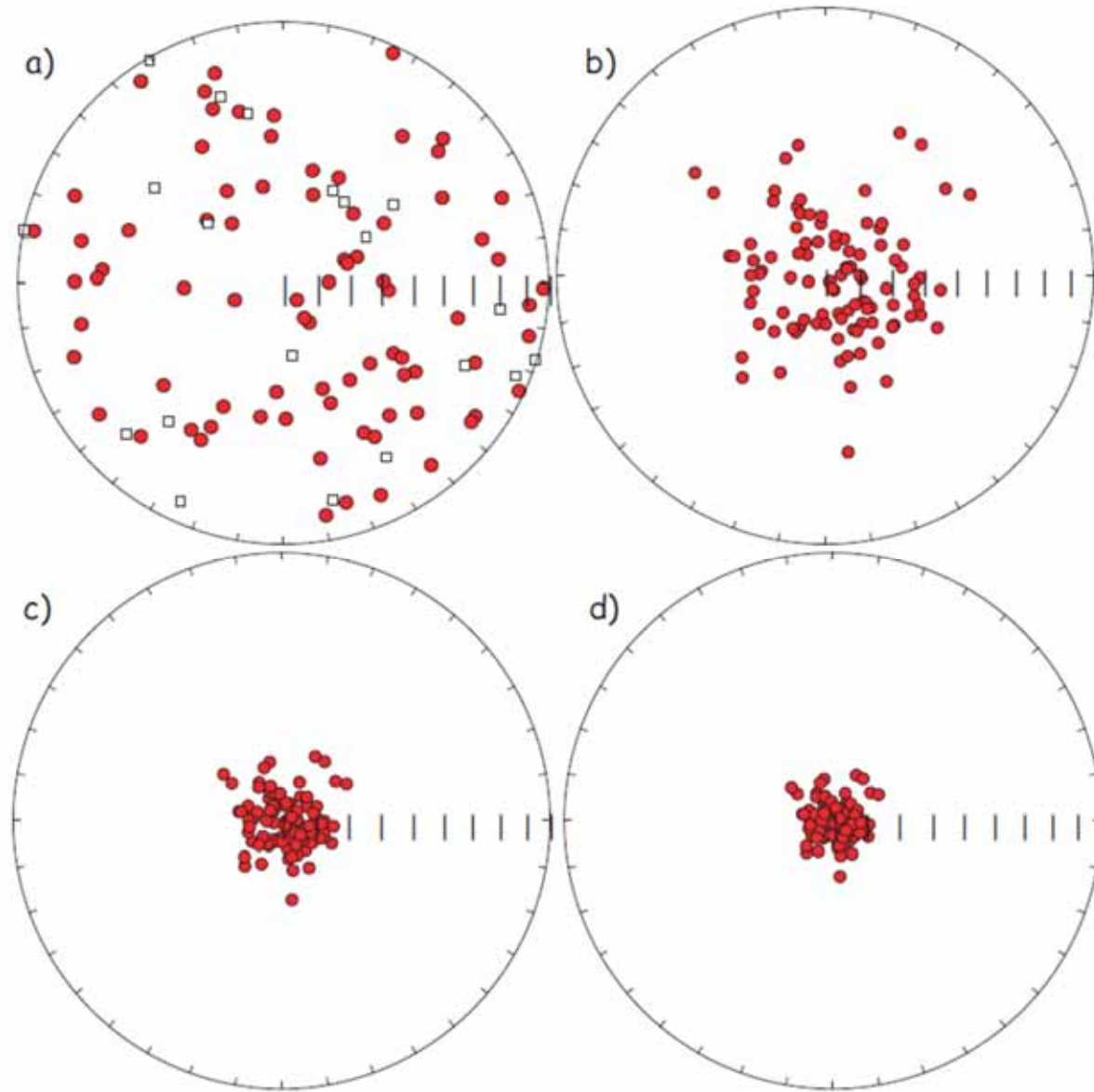
Distribución de Fisher

$$P_{dA}(\alpha) \sin \alpha = \frac{\kappa}{2\pi \sinh \kappa} \exp(\kappa \cos \alpha) \sin \alpha$$

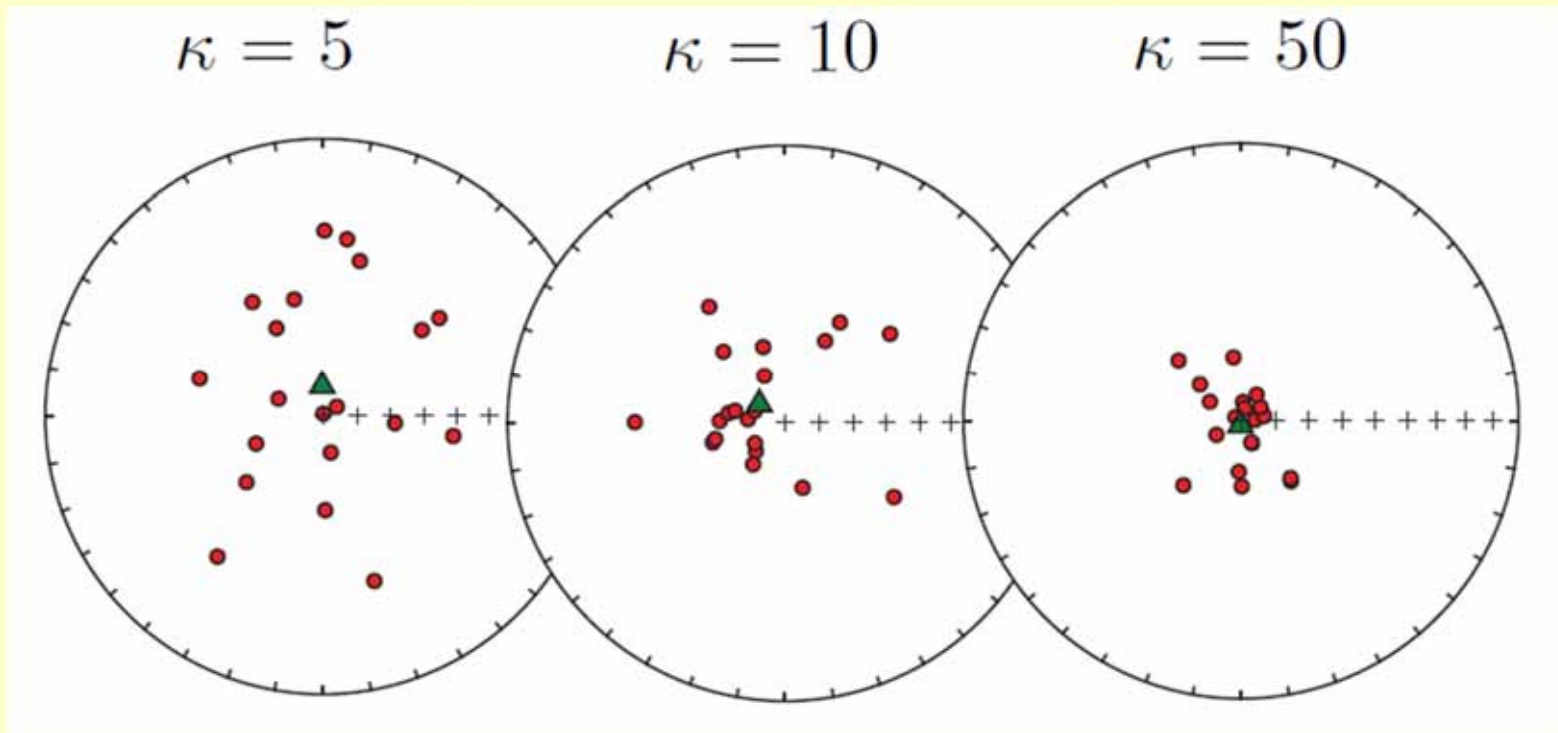
Dispersión alrededor de la media



Distribución exponencial a medida que nos alejamos de la media

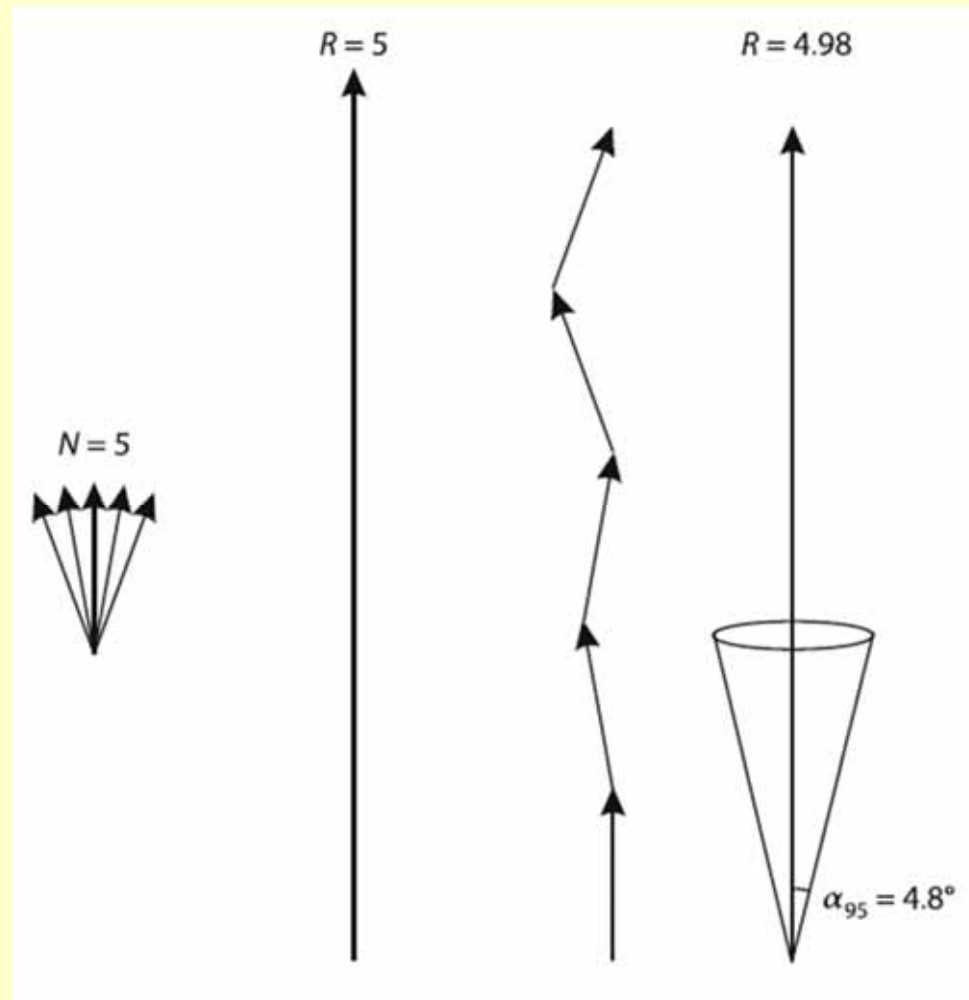


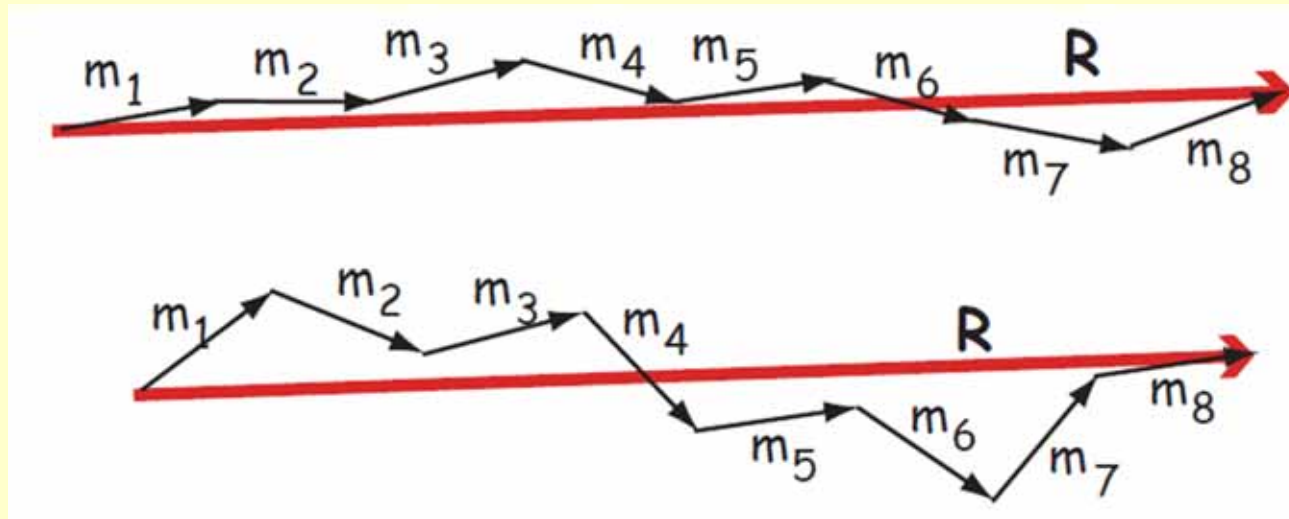
Parámetro de concentración, κ



A medida que disminuye la dispersión, aumenta el parámetro de concentración

R: longitud de la resultante



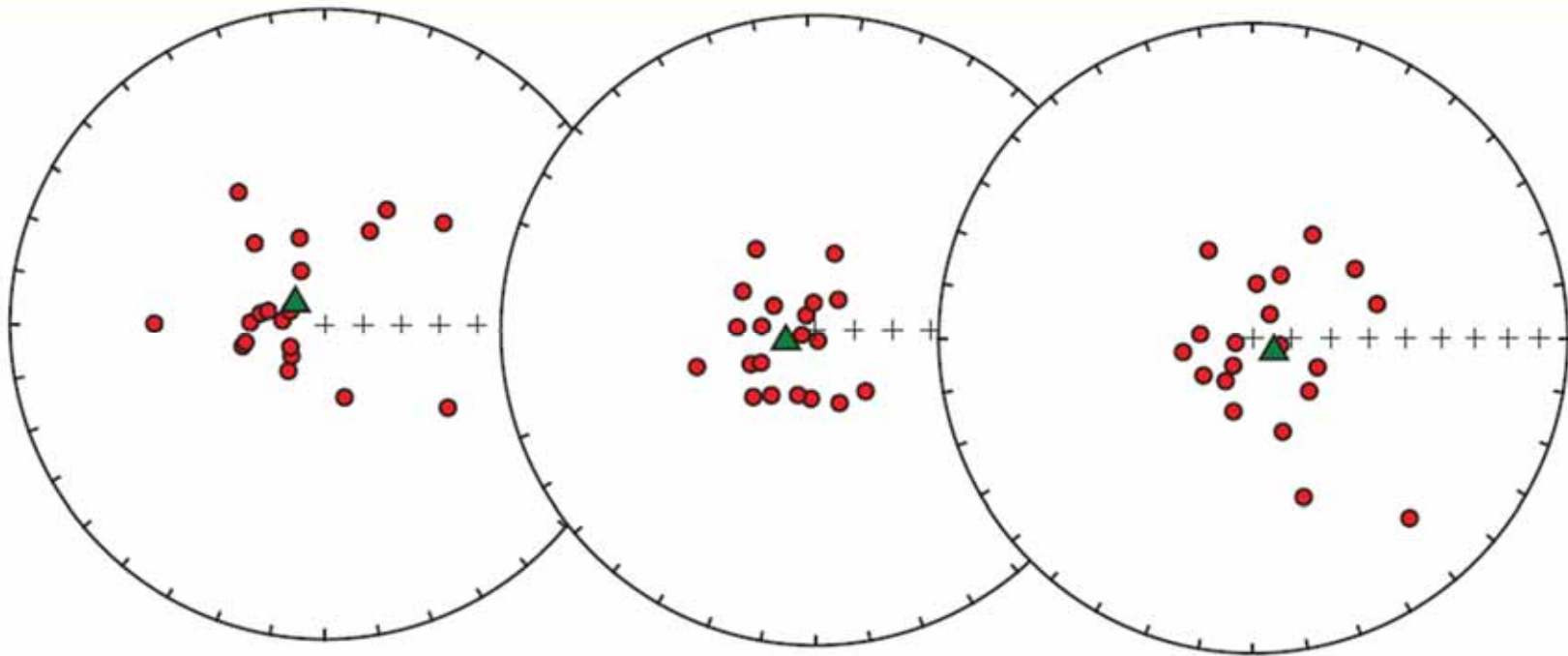


A mayor dispersión, más pequeño R.
 Esto implica una correlación inversa entre κ y R

$$\kappa \simeq k = \frac{N - 1}{N - R}$$

k es una estimación de κ

Estimación de la dirección media



Muestreo de una misma población real, cuya dirección media es vertical.
Las direcciones medias estimadas, son diferentes

Estimación de la dirección media

Grado de confianza de la dirección media al 95%

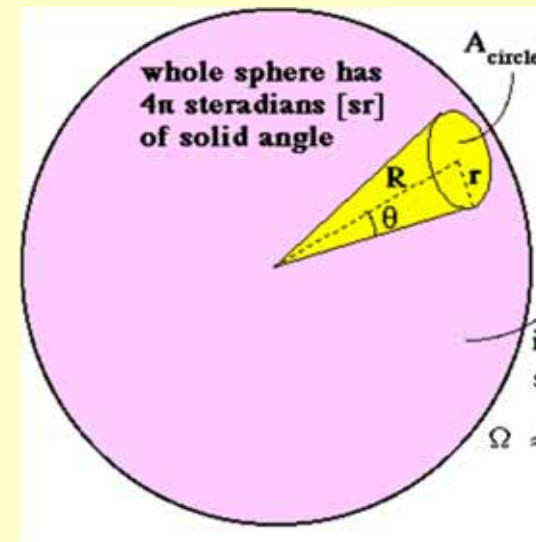
$$\alpha_{95} = \cos^{-1} \left[1 - \frac{N - R}{R} \left[\left(\frac{1}{p} \right)^{\frac{1}{(N-1)}} - 1 \right] \right]$$

Si $p = 0,05$ hay 95% de certeza de que la verdadera dirección media caiga en este cono

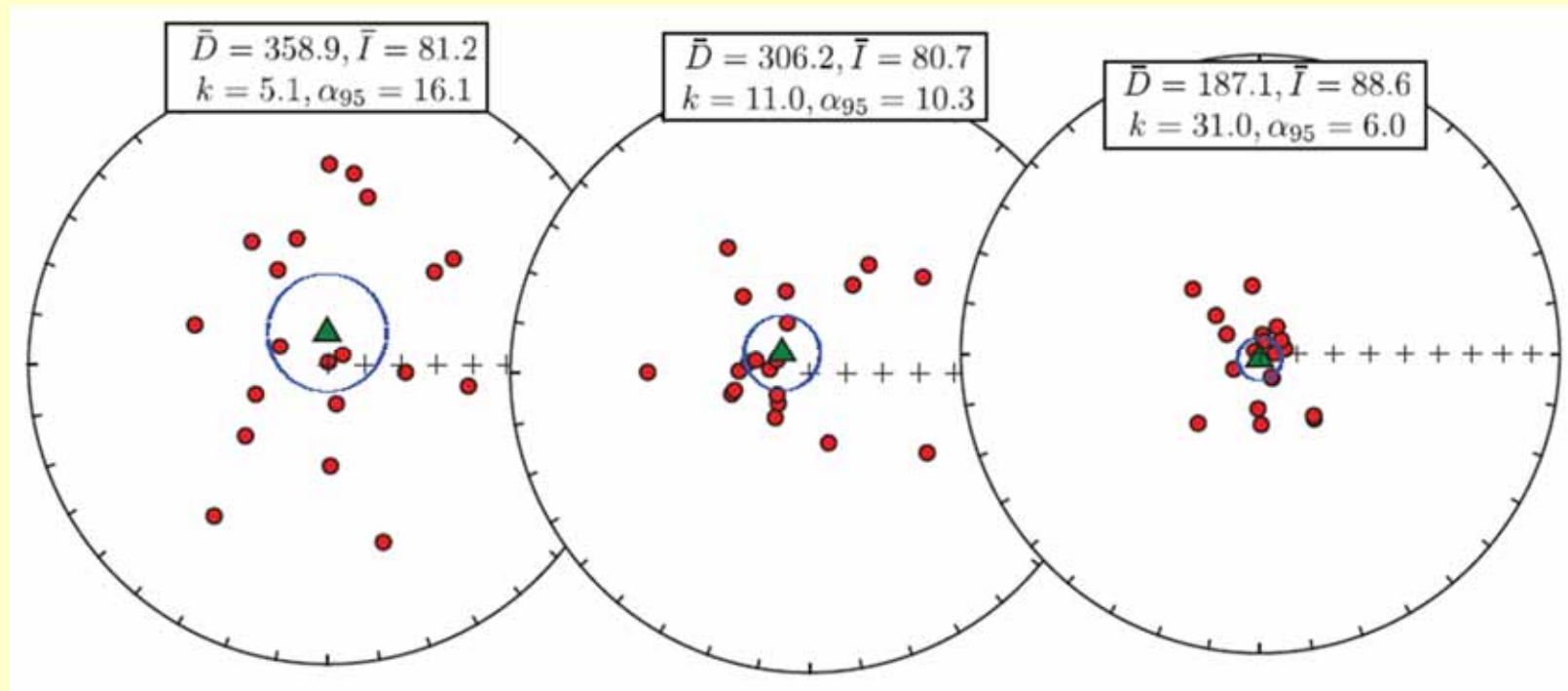
La aproximación:

$$\alpha'_{95} \simeq \frac{140}{\sqrt{kN}}$$

es válida sólo para $k > 25$



Estimación de la dirección media



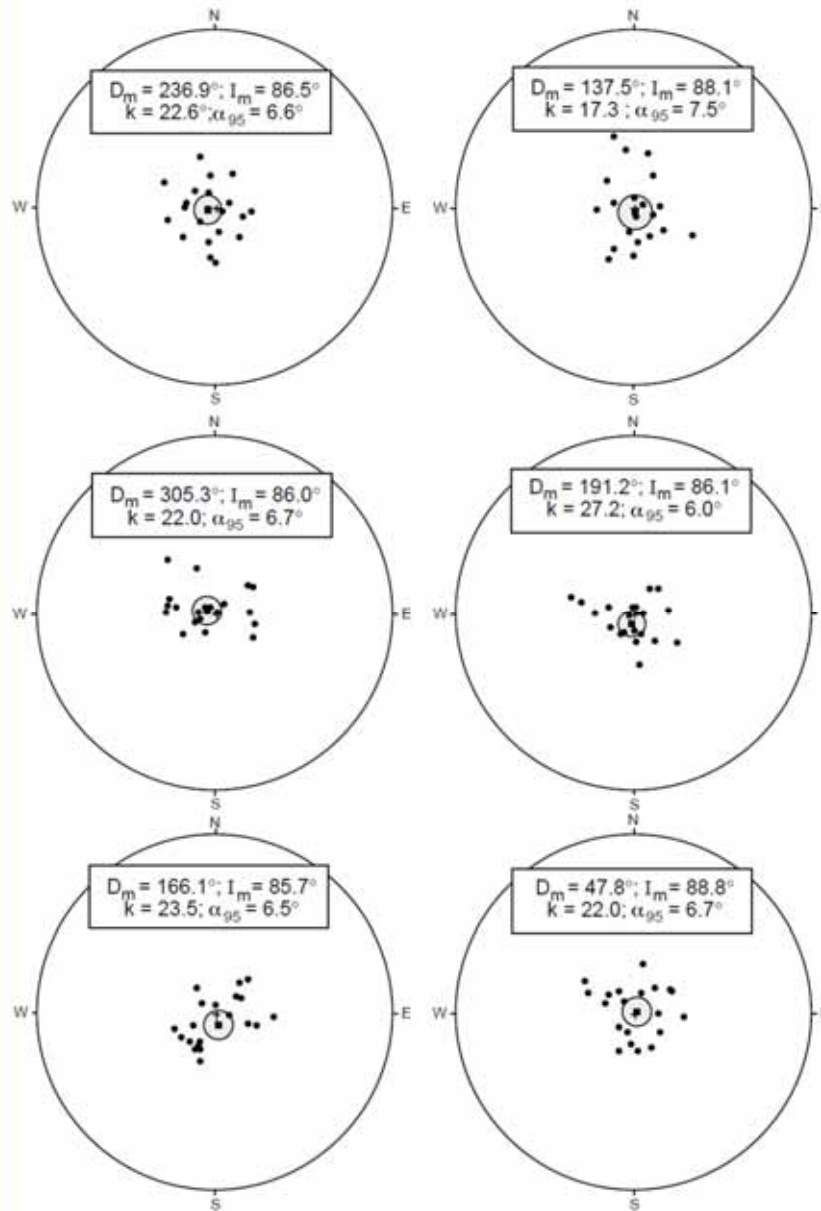
Varianza angular

$$S^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N \alpha_i^2$$

Desviación circular estándar (o dispersión angular)

$$\simeq \frac{81}{\sqrt{k}}$$

Es una estimación de la desviación estándar S ,
que incluye al 63 % de los datos

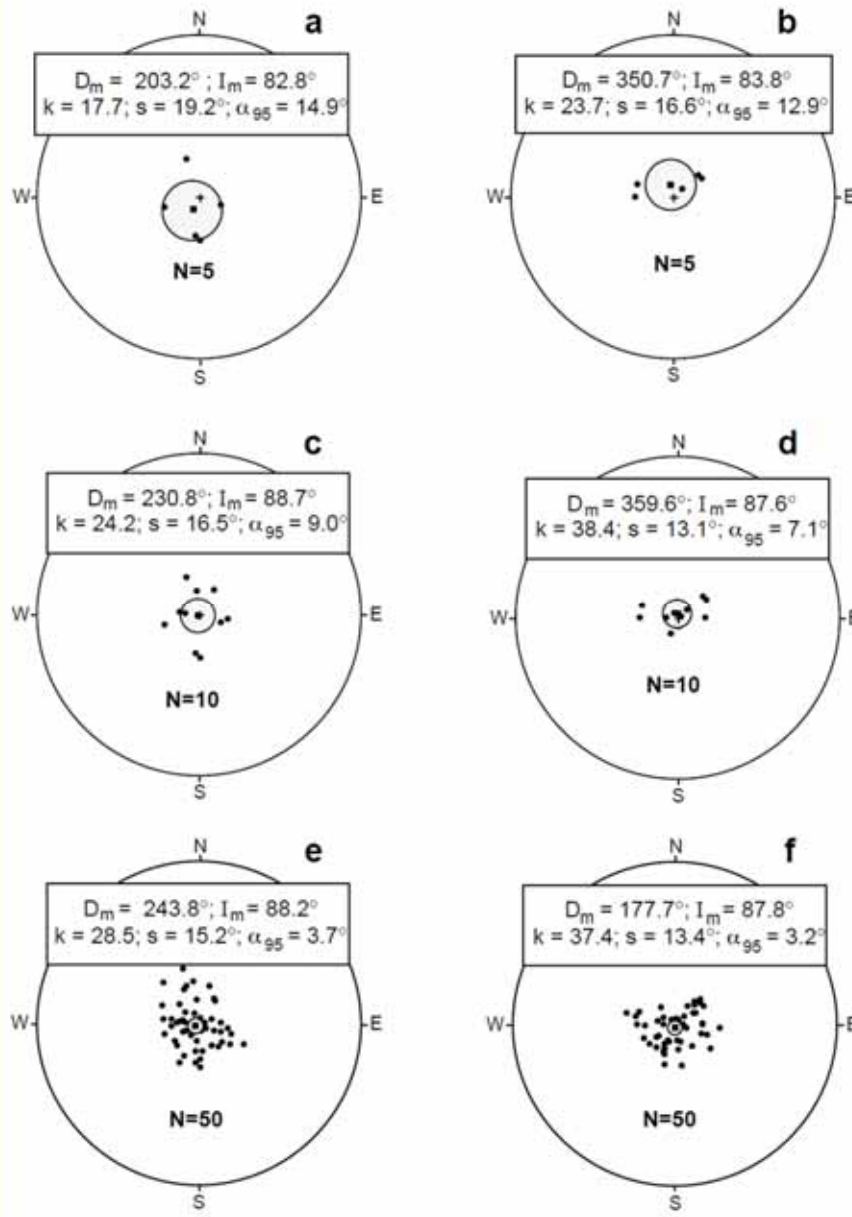


6 juegos de 20 datos
seleccionados aleatoriamente
de una población con
distribución de Fisher, con
dirección media vertical y $\kappa = 20$

La dirección media estimada
difiere de la verdadera en $1,2^\circ$ a
 $4,3^\circ$

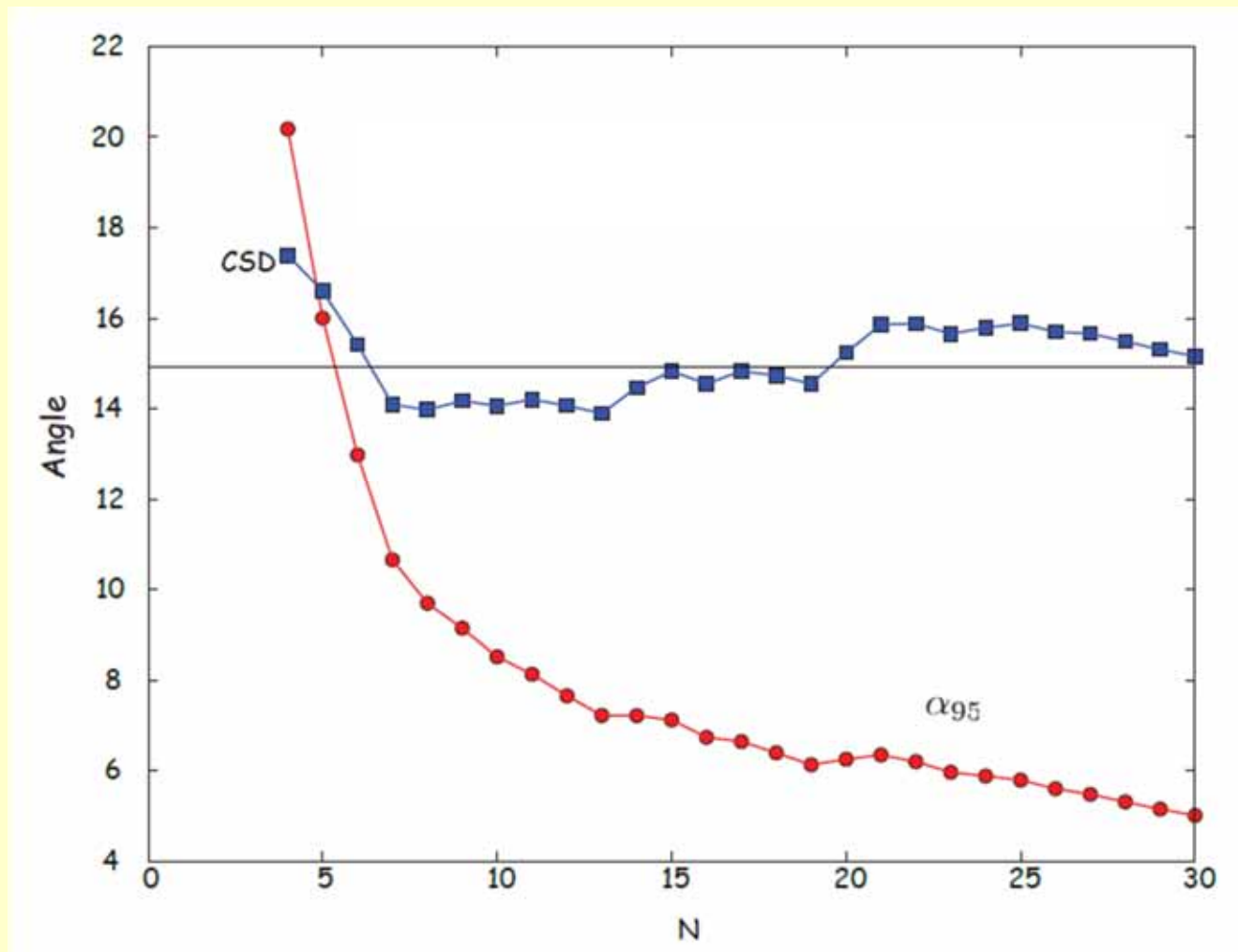
k difiere de κ

α_{95} incluye en todos los casos a la
dirección media verdadera, aunque
podría no ocurrir (en el 5 % de los
casos)



2 grupos de datos direccionales
 sintéticos de la misma población

Subsets de datos: $N=5$, 10 y 50



La desviación circular estándar se estabiliza alrededor de su valor real, sólo si N es mayor que ~ 7

Parámetros de la distribución de Fisher

Declinación, Inclinación de la dirección media

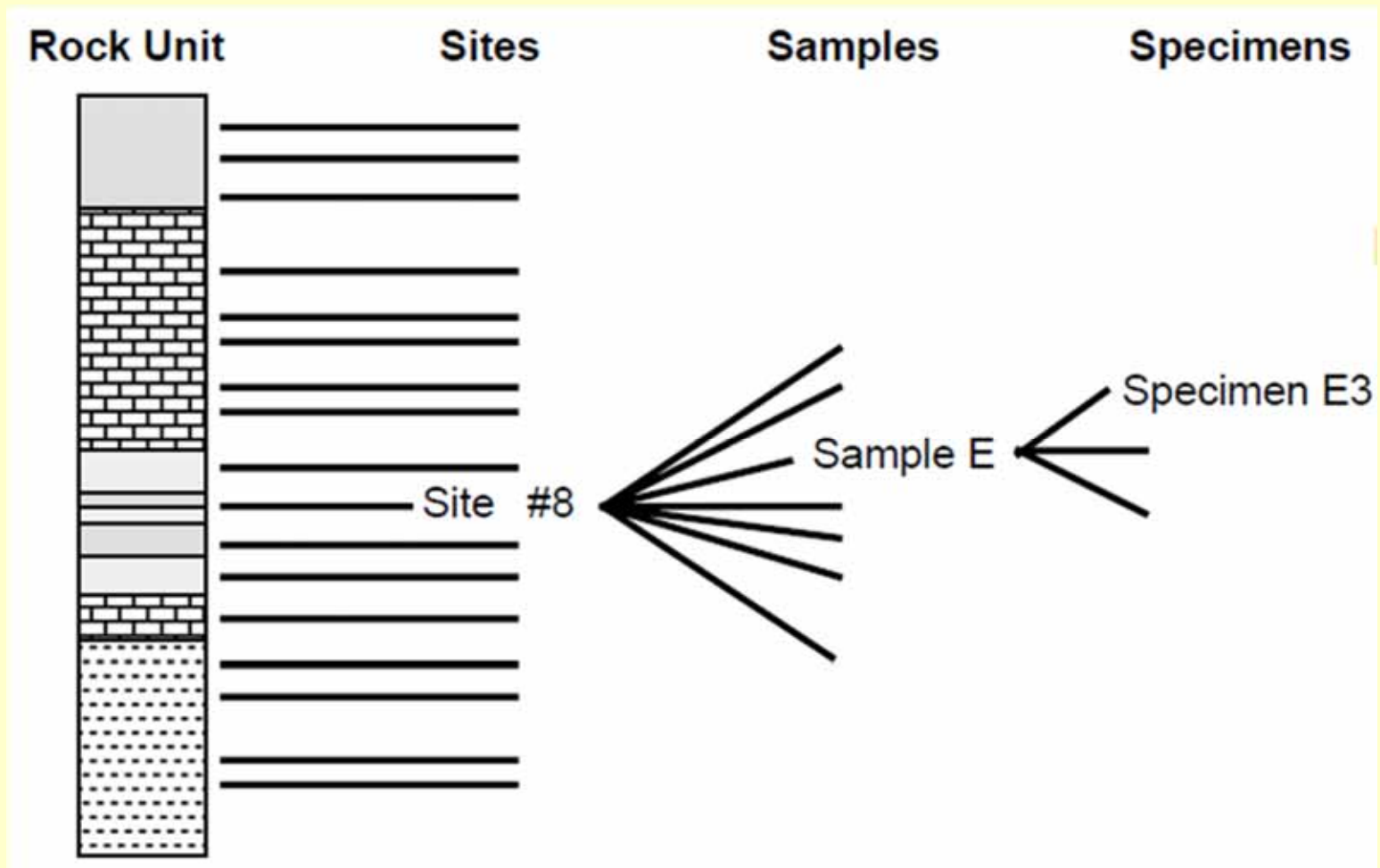
N

R

Se calculan:

- k (parámetro de concentración)
- α_{95} (grado de confianza de la dirección media al 95%)
- S^2 , varianza angular
- S , desviación circular estándar o dispersión angular

Muestreo Paleomagnético



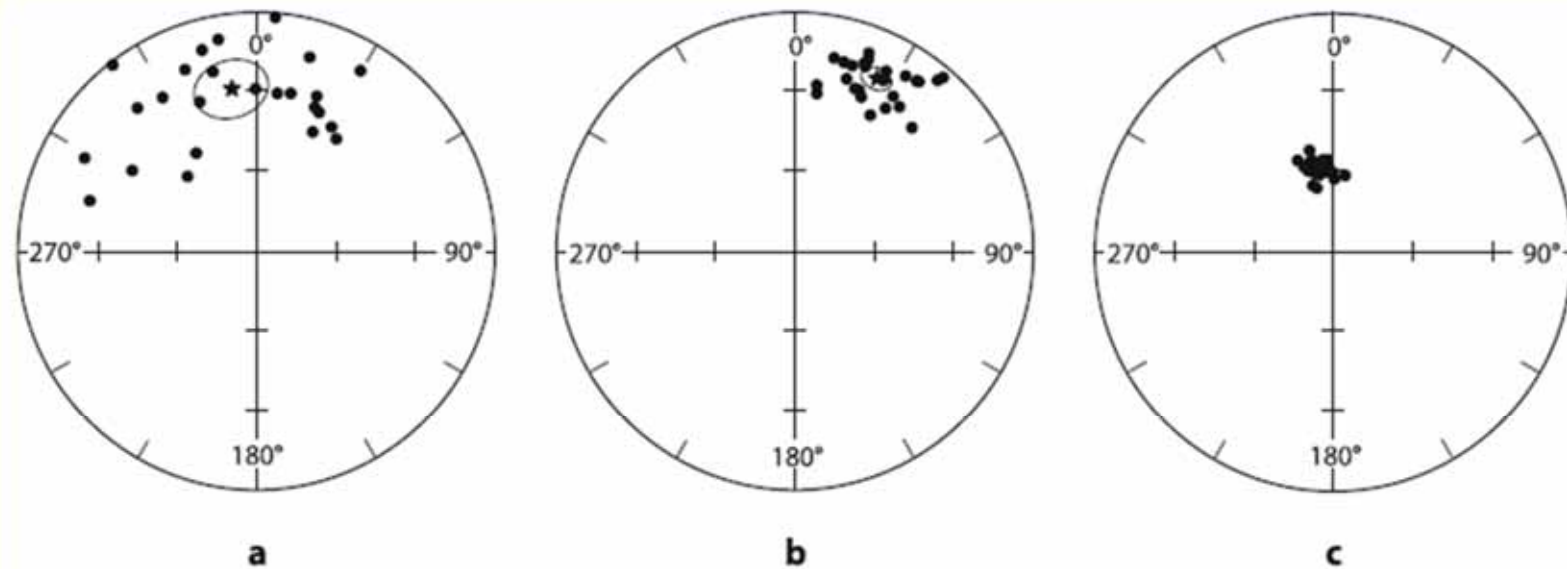


Fig. 4.21. Equal-area projection of paleomagnetic directions from single sites. Symbols: *dots* = ChRM direction; *star* = site mean direction with ellipse of confidence; a high dispersion ($\alpha_{95} = 11.5^\circ$, $k = 7$ – Miocene marls, Ligurian-Piedmontese Basin, NW Italy); b low dispersion ($\alpha_{95} = 4.5^\circ$, $k = 43$ – Jurassic limestones, *Rosso Ammonitico*, western Sicily); c very-low dispersion ($\alpha_{95} = 2.1^\circ$, $k = 423$ – fine-grained pyroclastics, Vesuvius, Italy)

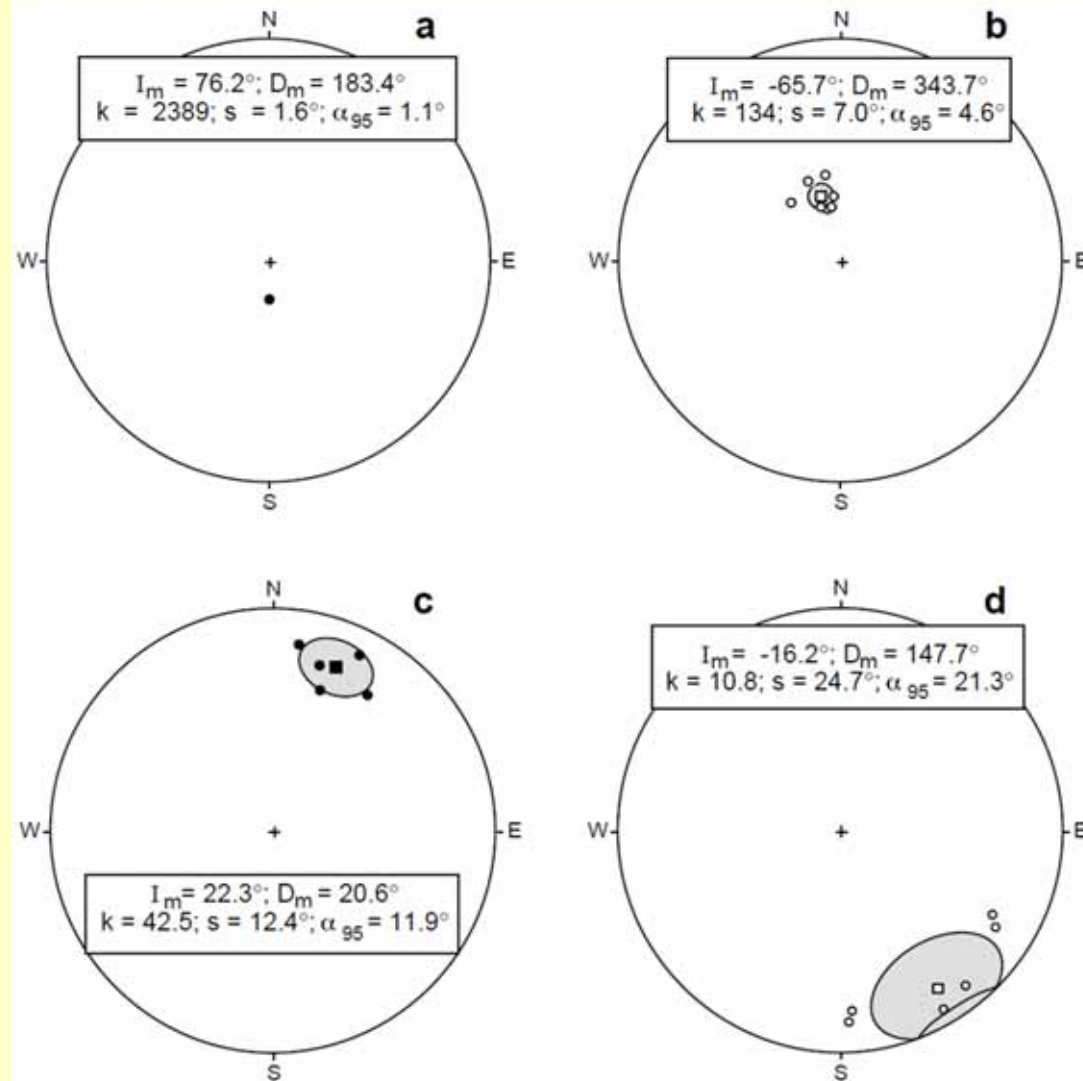
La significancia de la dirección media se evalúa mediante la estadística de Fisher

Site 19 Sample	In Situ		After Bedding Correction	
	D	I	D	I
AC19.1B	112.4	-7.1	130.1	21.5
AC19.2B	122.9	-0.9	134.2	10.1
AC19.3C	115.9	-7.1	129.4	18.1
AC19.4B	119.7	-6.4	129.4	14.3
AC19.5C	118.1	-6.4	129.6	15.8
AC19.6B	116.4	-3.4	133.1	17.0
AC19.7B	121.1	-9.7	125.8	13.5
AC19.8B	114.6	-8.1	128.6	19.6
AC19.9A	117.1	-9.6	126.6	17.4
AC19.9B	115.9	-8.5	127.9	18.4
MEAN	117.4	-6.7	129.5	16.6
N = 10, R = 9.98, k = 382.35, $\alpha_{95} = 2.5$				

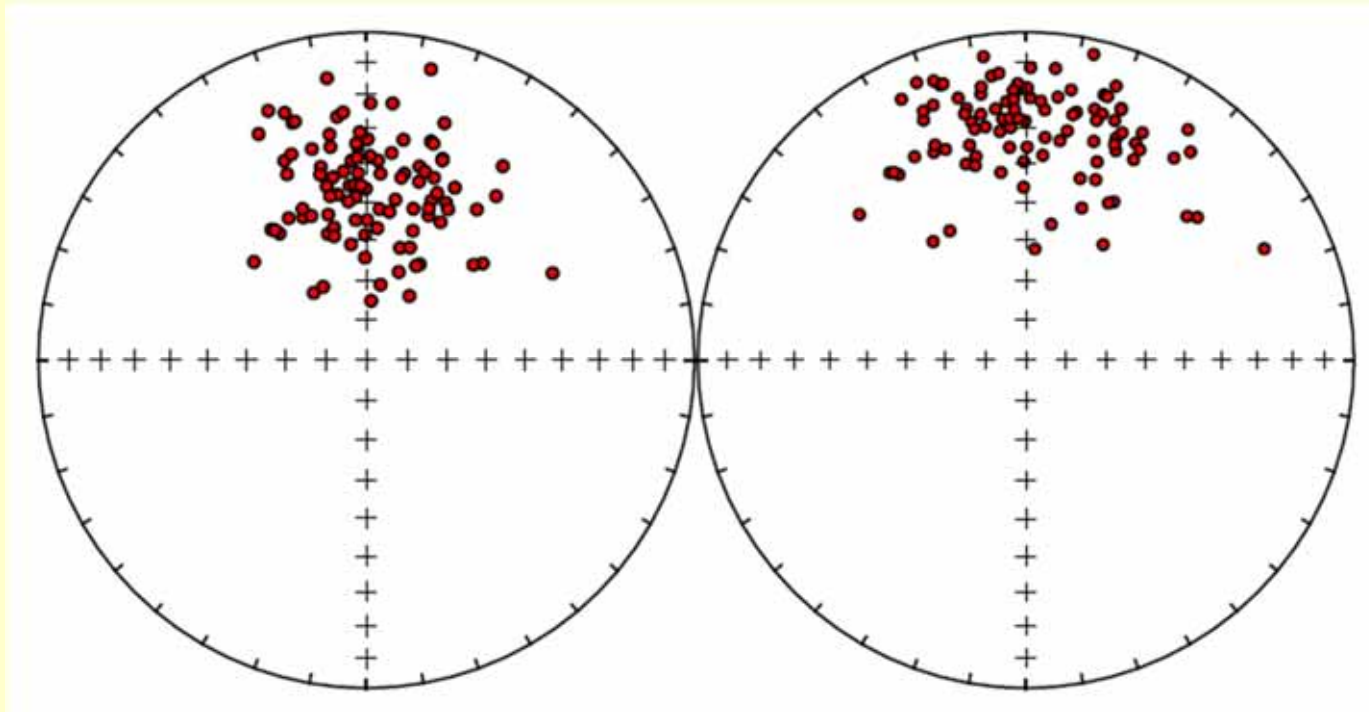
Site 20 Sample	In Situ		After Bedding Correction	
	D	I	D	I
AC20.1A	144.4	16.8	130.2	2.5
AC20.1B	155.2	18.5	131.3	12.8
AC20.2C	151.0	15.7	133.0	8.2
AC20.3B	158.6	18.9	131.7	16.0
AC20.4C	156.5	17.0	133.1	13.7
AC20.5B	164.2	19.2	132.5	21.3
AC20.6B	158.6	17.3	133.3	15.7
AC20.7A	145.0	18.3	129.0	3.5
AC20.8A	163.8	22.3	129.2	21.5
AC20.8B	163.2	21.5	129.9	20.9
AC20.9B	157.2	16.7	133.5	14.3
MEAN	156.1	18.5	131.5	13.7
N = 11, R = 10.93, k = 140.64, $\alpha_{95} = 3.9$				

	N	D	I	R	k	α_{95}
Before Bedding Correction	21	137.2	6.8	19.26	11.53	9.8
After Bedding Correction	21	130.6	15.1	20.90	191.82	2.3

Direcciones medias por sitio



Estilos de dispersión



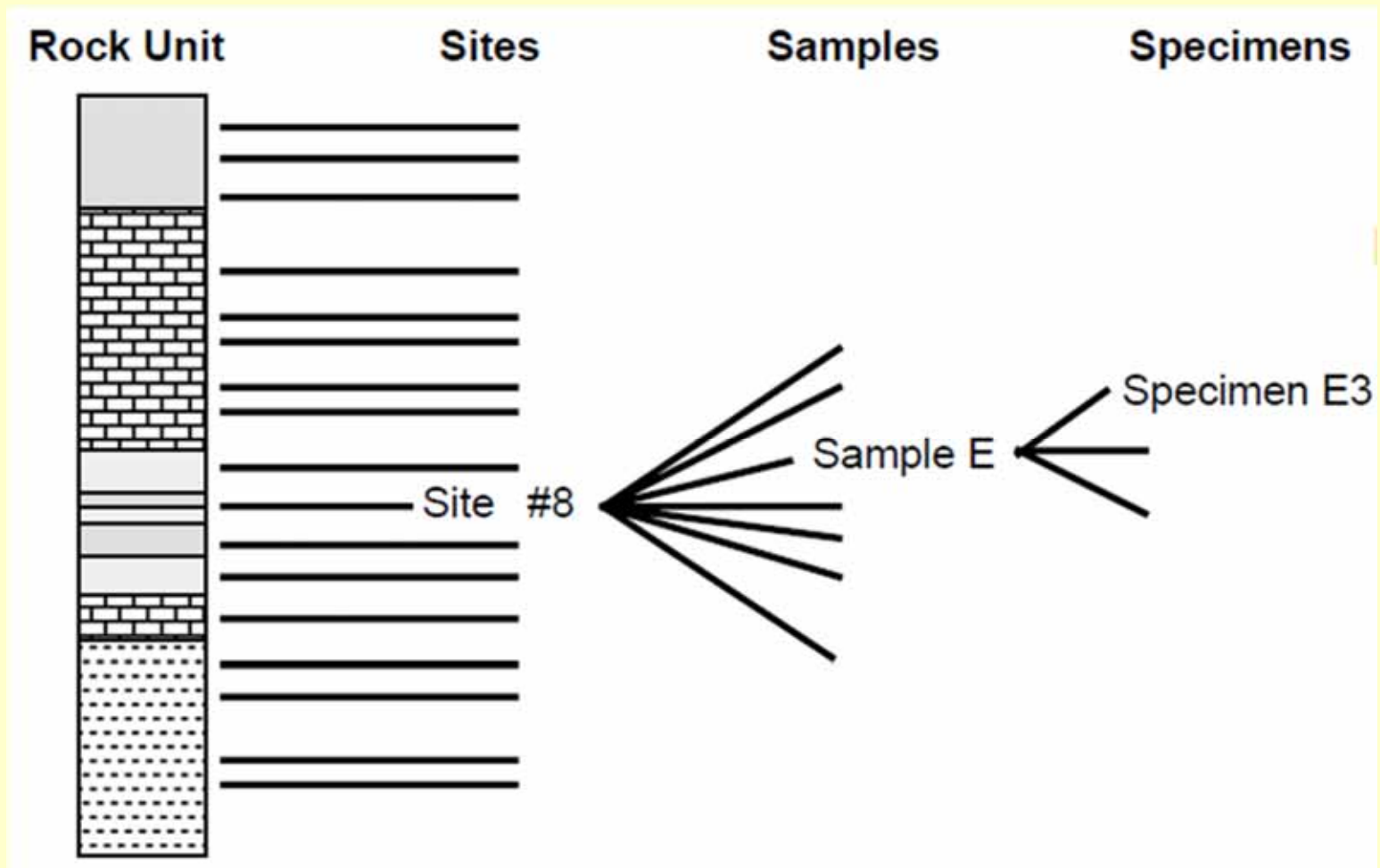
Con simetría circular

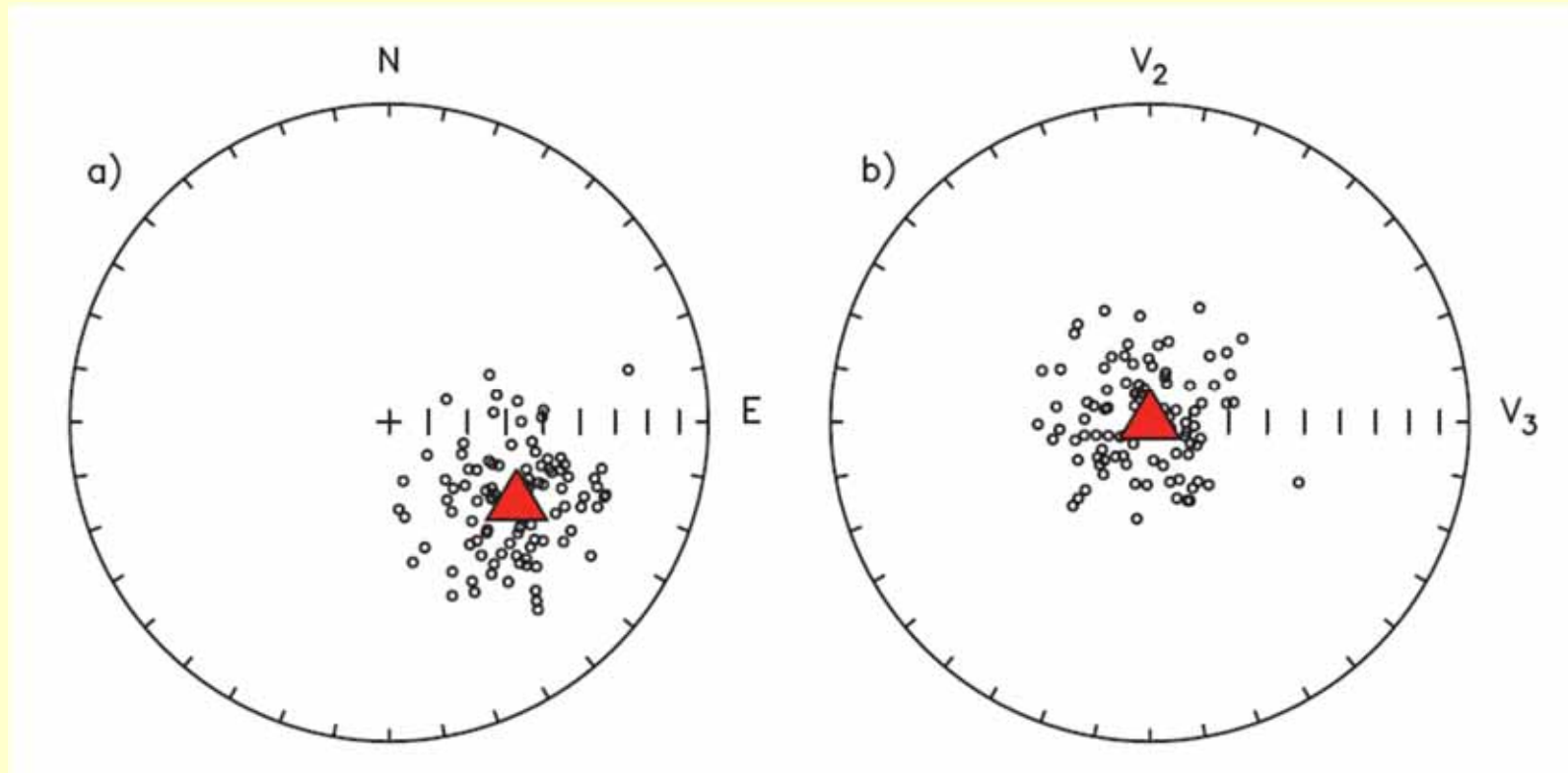
Alargada

Fuentes de dispersión

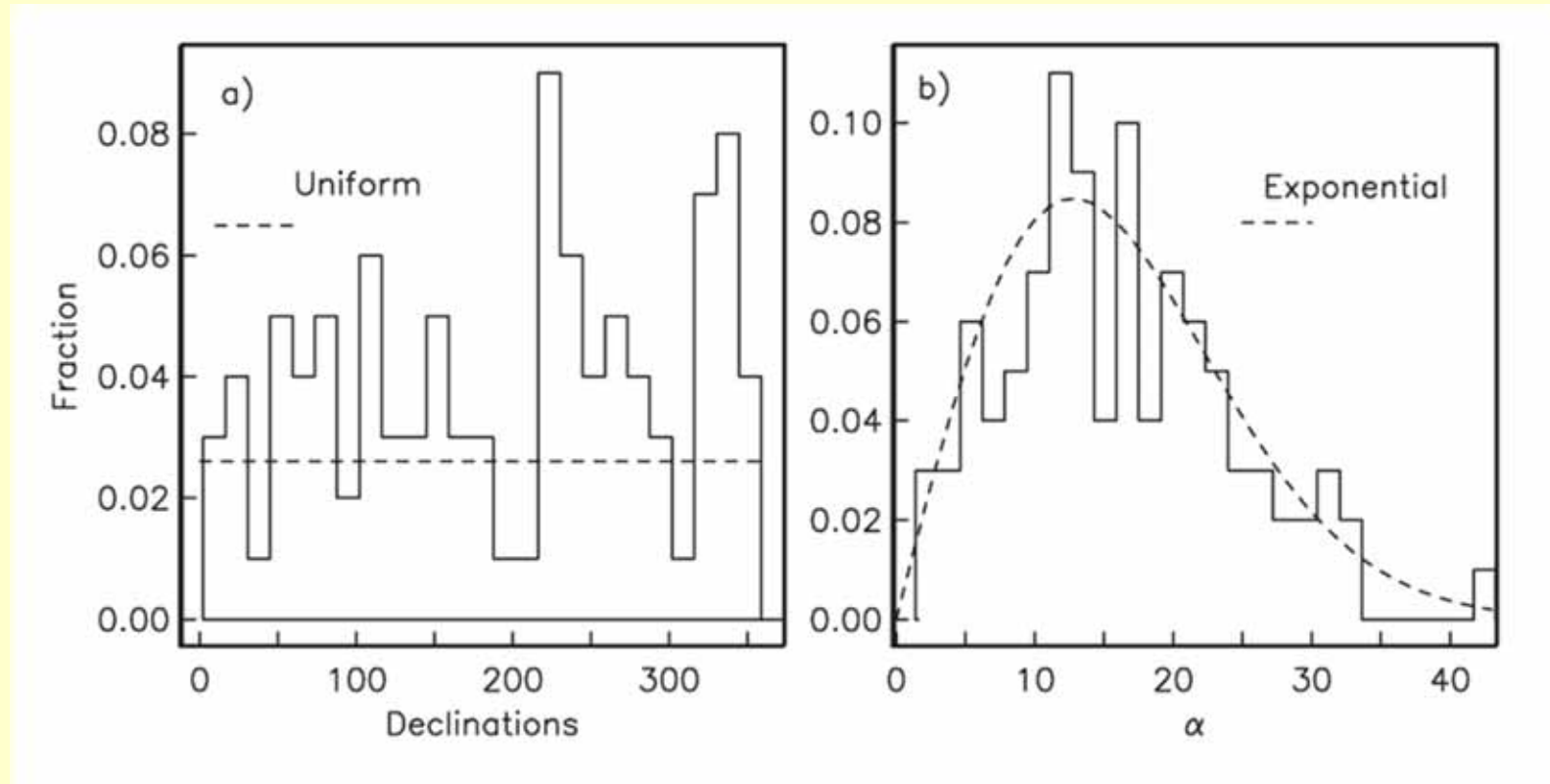
- Incertidumbre en la medición causada por el ruido instrumental (simétrica)
- Incertidumbre en la orientación de las muestras (¿simétrica?)
- Incertidumbre en la actitud estructural de las rocas muestreadas (¿alargada?)
- Variaciones en el grado de remoción de una componente secundaria (alargada)
- Incertidumbre causada por el proceso de adquisición de la remanencia (alargada o simétrica)
- Variación secular del campo magnético terrestre (alargada)

Muestreo Paleomagnético

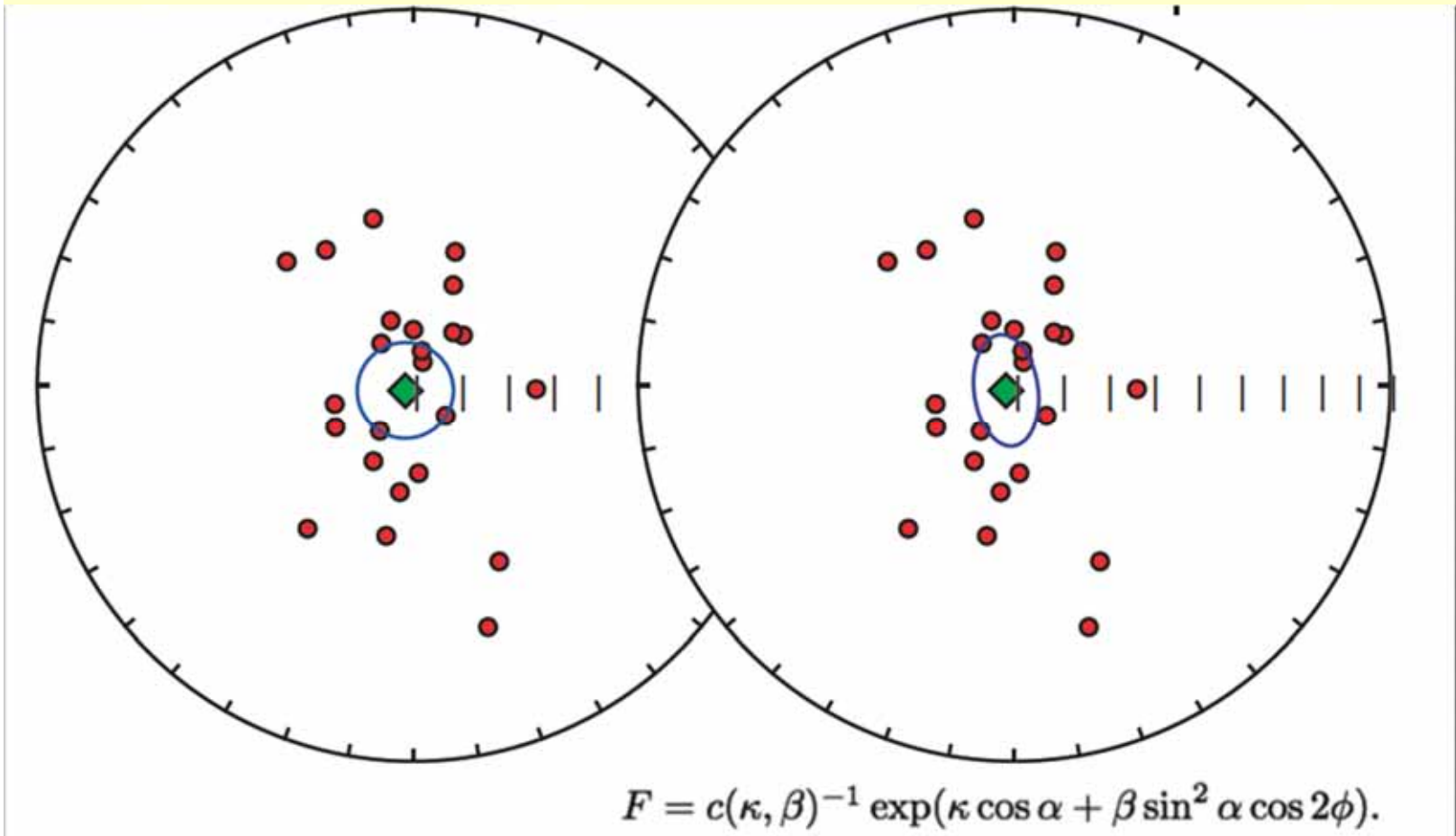




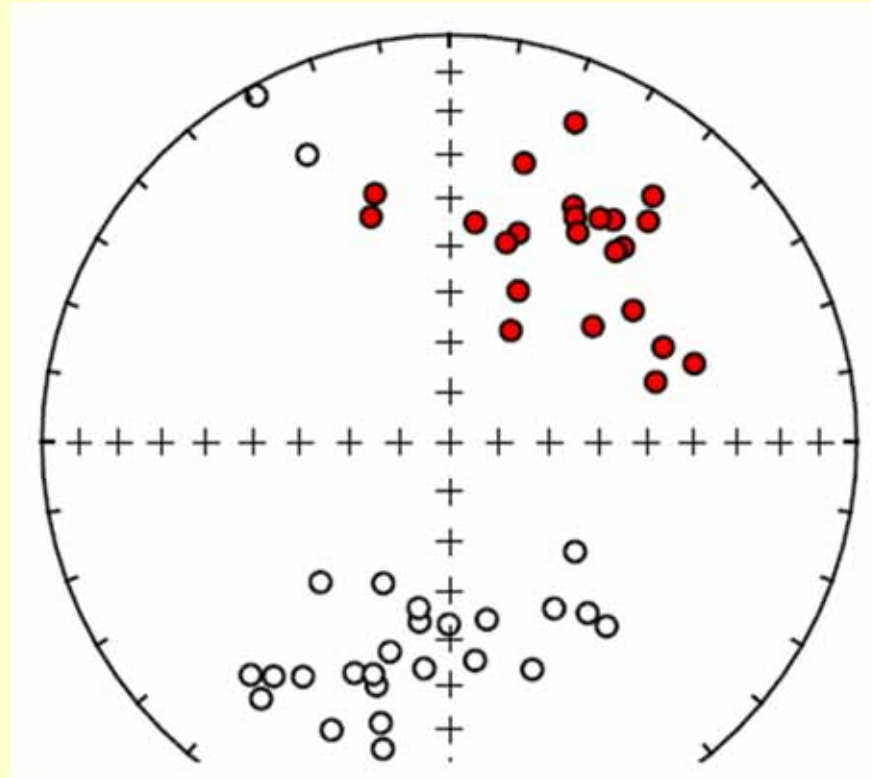
1) Transformación de los datos a la dirección media (la dirección media pasa a ser el origen de coordenadas)



Distribución de Kent



Similar a Fisher, pero con parámetro de ovalidad o elipticidad β
 Determina una elipse de confianza en lugar de un círculo.

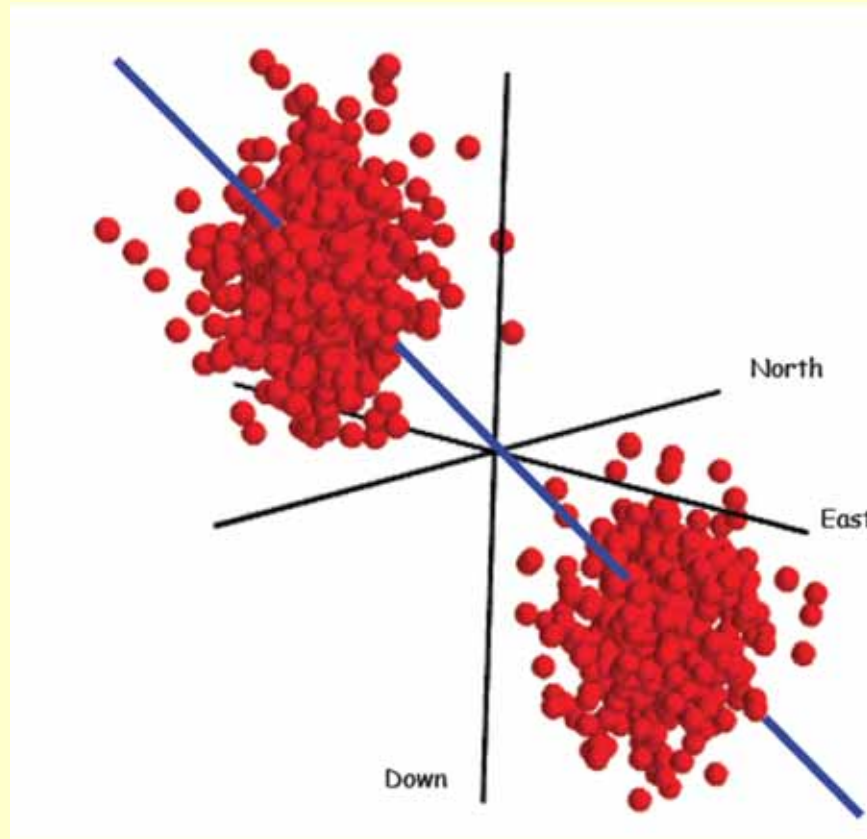


Cuando un set de datos está compuesto por datos de dos polaridades, es necesario invertir la polaridad de uno de los grupos para poder aplicar la estadística de Fisher (o Kent)

Distribución de Bingham

Se basa en los autovectores de la matriz de orientación.
Permite datos bi-polares

Desventajas: no permite testear si las dos polaridades son o no antípodas.
No se dispone de las pruebas estadísticas sencillas que ofrece Fisher.



Distribución de Bingham

Tensor orientación, T

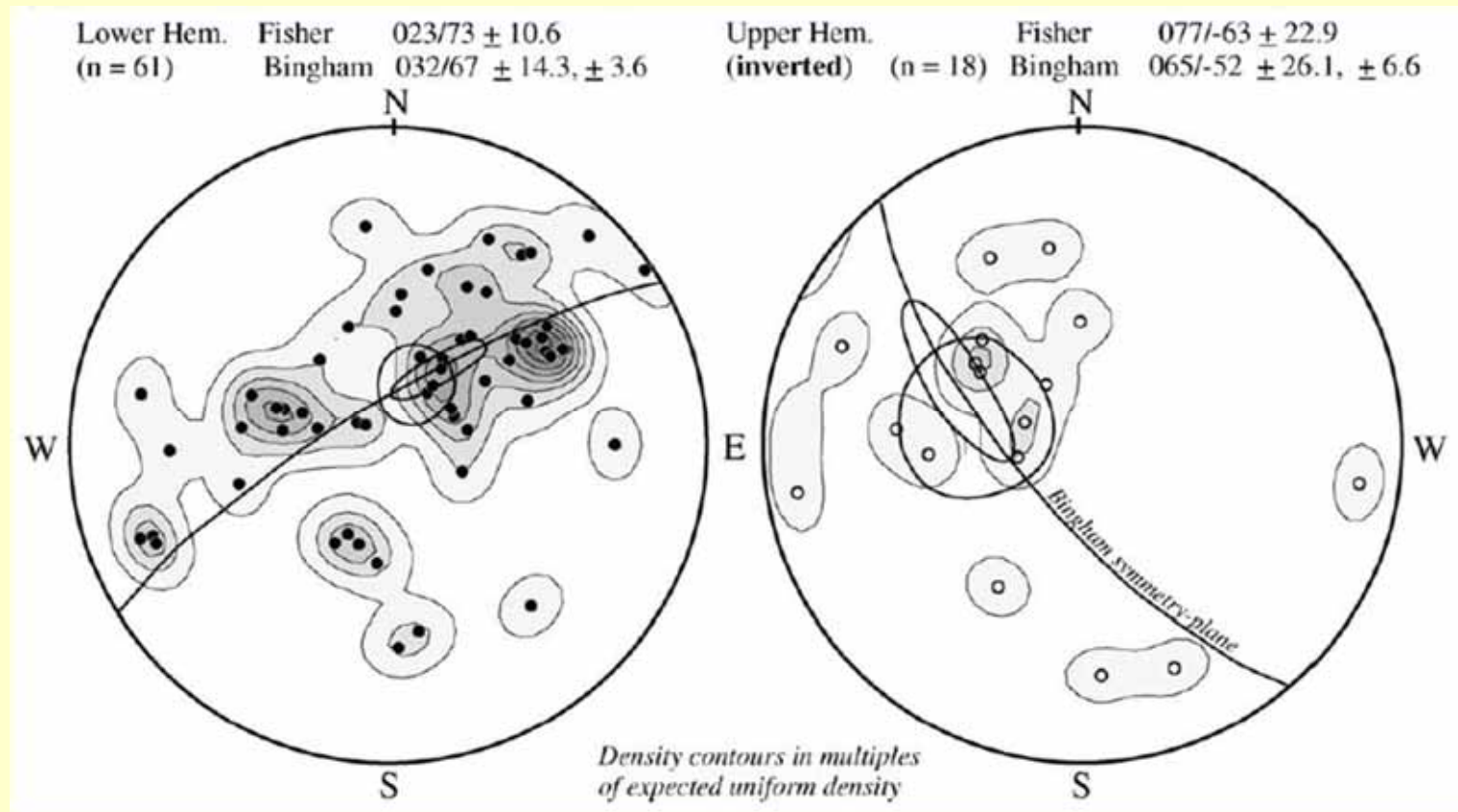
Matriz de sumas de cuadrados y productos

- Se calculan las componentes cartesianas de cada vector (teniendo en cuenta su módulo)
- Se calculan las coordenadas del centro de masa de los datos
- Se transforma el origen de los datos al centro de masa
- Se obtiene la matriz de orientación

$$\mathbf{T} = \begin{pmatrix} \sum x'_{1i}x'_{1i} & \sum x'_{1i}x'_{2i} & \sum x'_{1i}x'_{3i} \\ \sum x'_{1i}x'_{2i} & \sum x'_{2i}x'_{2i} & \sum x'_{2i}x'_{3i} \\ \sum x'_{1i}x'_{3i} & \sum x'_{2i}x'_{3i} & \sum x'_{3i}x'_{3i} \end{pmatrix} .$$

- El sistema de coordenadas que hace que los elementos fuera de eje de la matriz se hagan cero, constituye los «autovectores» (*eigenvectors*) de la matriz. Los tres elementos de T en el sistema de coordenadas de autovectores, se llaman autovalores (*eigenvalues*).
- Los autovectores se hallan con iteración y determinación.

Distribución de Bingham



Borradaile et al. 2003

Pruebas de significancia estadística

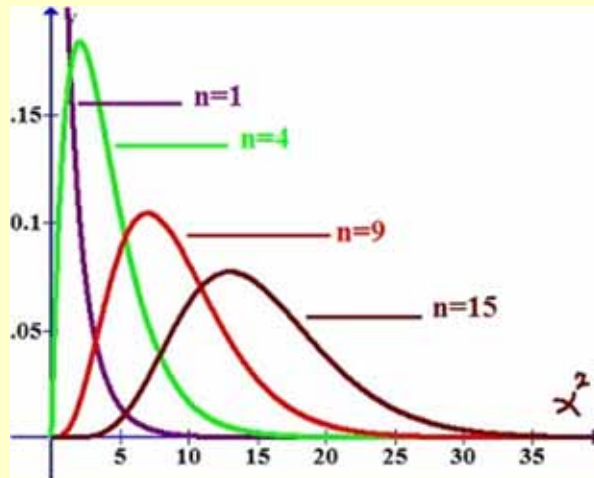
- Bondad de ajuste de la distribución a un modelo dado (ej. Fisher, uniforme/aleatoria)
- Observaciones discordantes
- Comparación de precisiones
- Comparación de direcciones

La distribución chi cuadrado (χ^2) y la distribución F se derivan de los parámetros de la distribución normal.

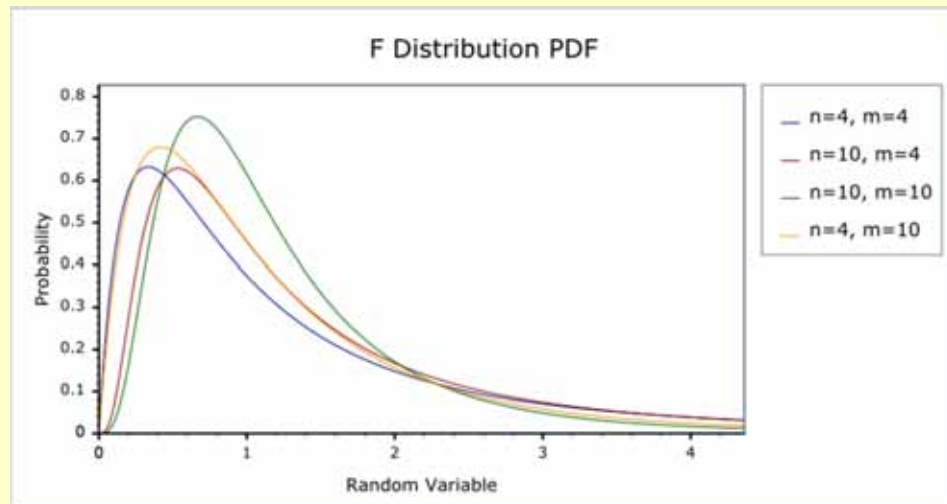
Para una distribución normal, el estadístico $(n-1)s^2$ tiene distribución χ^2 , con grados de libertad $v = n-1$ (se denota χ_v^2).

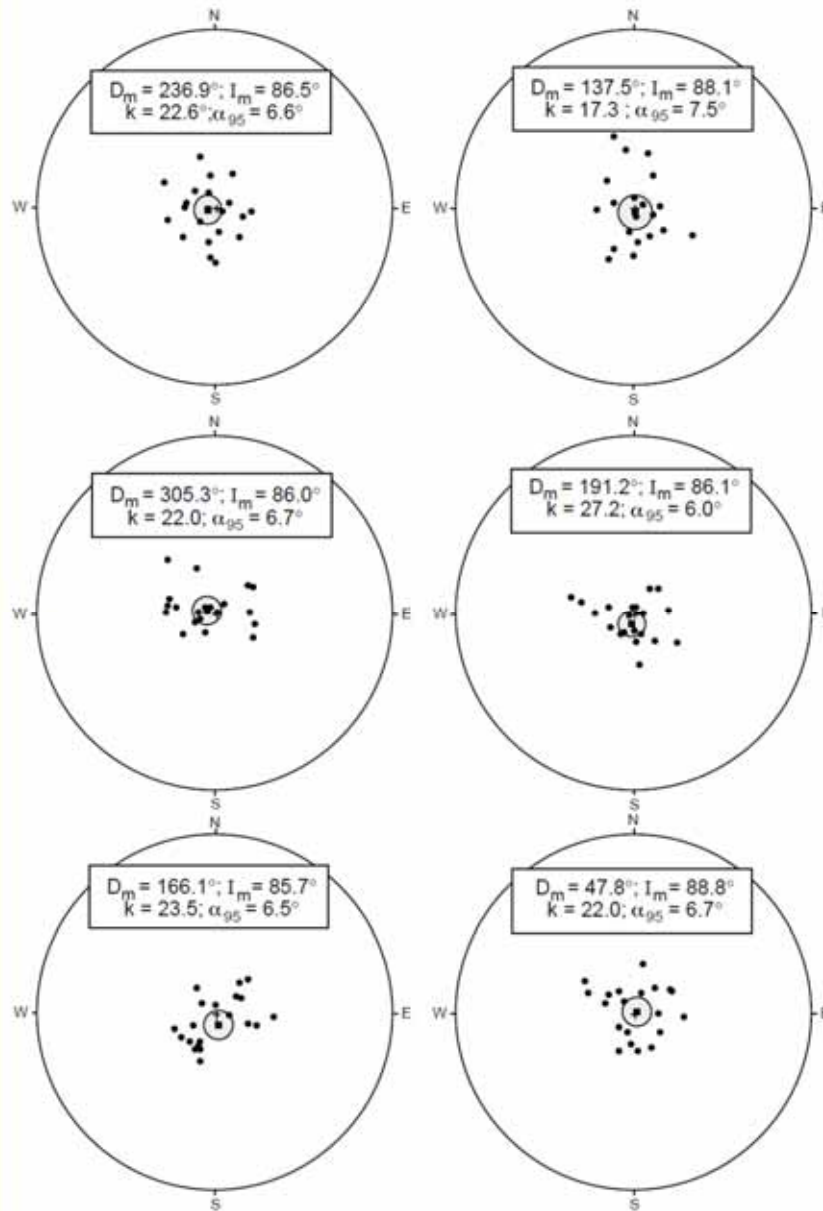
La relación de dos variables independientes con distribución χ^2 , cada una dividida por sus grados de libertad (v_1 y v_2) está distribuida según la función F.

Distribución chi cuadrado



Distribución F





6 juegos de 20 datos
seleccionados aleatoriamente
de una población con
distribución de Fisher, con
dirección media vertical y $\kappa = 20$

La dirección media estimada
difiere de la verdadera en 1,2° a
4,3°

k difiere de κ

α_{95} incluye en todos los casos a la
dirección media verdadera, aunque
podría no ocurrir (en el 5 % de los
casos)

Pruebas de significancia estadística

En todos los casos, se establece una **hipótesis nula (H_0)** y se diseña un parámetro estadístico que se pueda utilizar para evaluar si la H_0 se cumple o no, dentro de cierto **nivel de significancia**.

Si existen diferencias entre la H_0 y la muestra, éstas pueden deberse a:

- que H_0 es incorrecta
- errores de muestreo

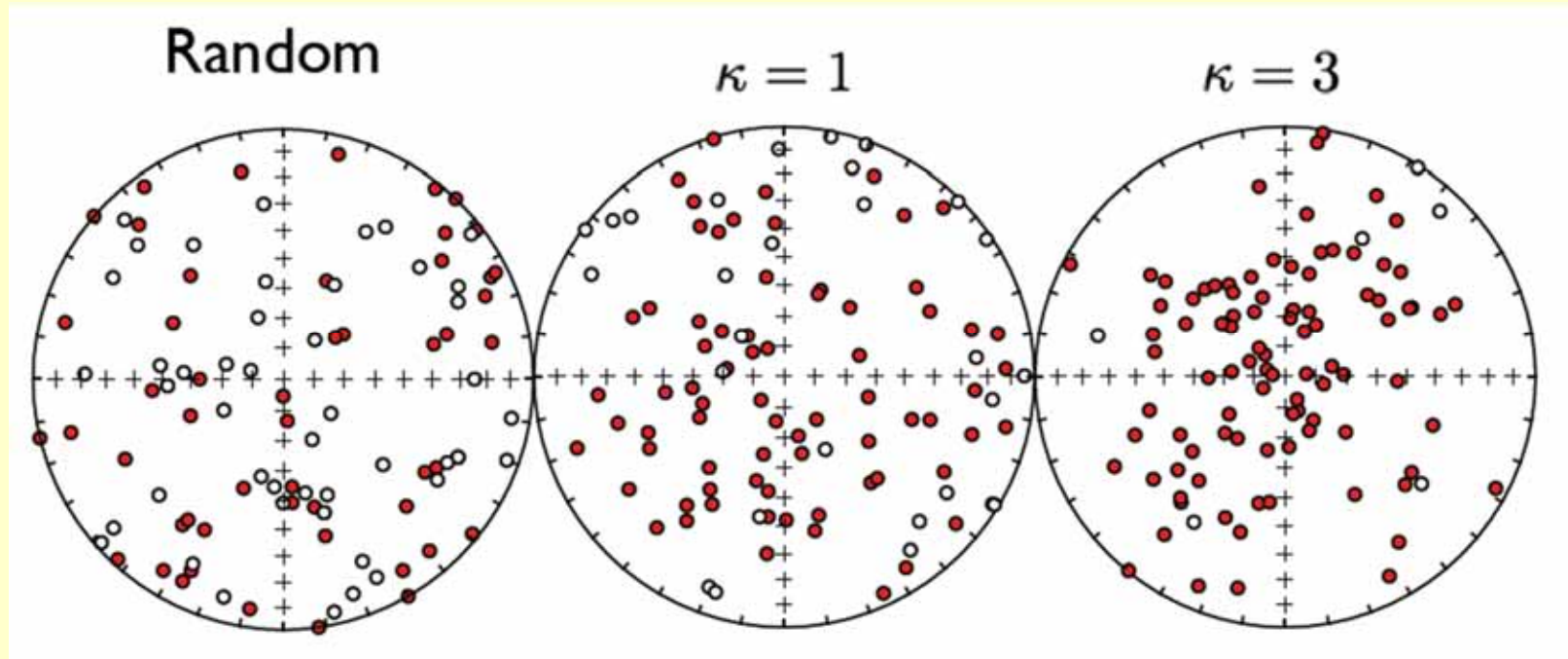
Se debe establecer un nivel de significancia, el nivel de probabilidad al cual pueden darse diferencias entre los datos y H_0 .

En paleomagnetismo el nivel de significancia suele ser de 5%.

Cuando falla un test de significancia a un nivel de 5 %, significa que hay menos de 5 % de probabilidad de que las diferencias entre muestra e hipótesis se deban al azar.

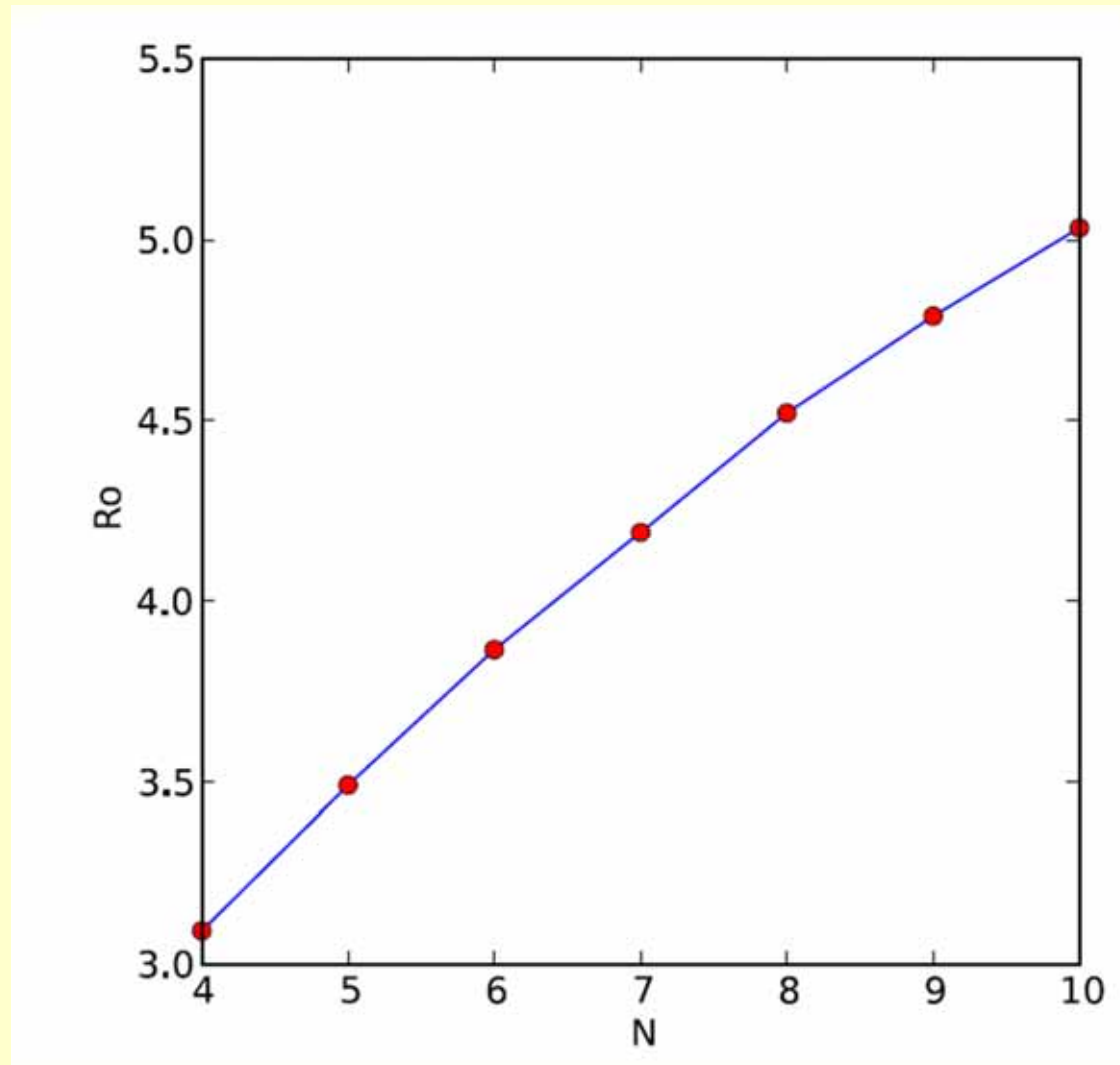
Pasar el test implica que las diferencias observadas podrían deberse al azar, «al 95 % de confianza».

Test de uniformidad



Es necesario decidir si cierto conjunto de datos es estadísticamente aleatorio (distribución uniforme) o si tiene una dirección media definida

La dispersión está relacionada con R



Test de uniformidad

La prueba estadística se basa en la distribución chi cuadrado (si $n \geq 10$)

El test de chi cuadrado tiene la forma general:

$$X^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(o_i - e_i)^2}{e_i}$$

n es el número de celdas o grupos de datos, o y e son las frecuencias observada y esperada para cada celda.

Si $X^2 = 0$ hay coincidencia perfecta con el modelo.

Si X^2 es *muy grande* el modelo se rechaza.

El valor crítico es el valor de la distribución chi cuadrado con los grados de libertad correspondientes

Si la hipótesis nula es correcta, el parámetro X^2 va a tener una distribución χ^2 con v grados de libertad.

v depende de la cantidad de celdas y el número de parámetros que tienen que ser estimados para calcular los valores esperados e .

El valor crítico de X^2 se establece como $\chi_v^2 (1-P)$, el valor que será excedido por una distribución χ^2 con una probabilidad P .

Si P es 5%, hay menos de 5 % de probabilidad de que un valor observado de X^2 exceda el valor crítico si los datos provienen de una distribución como la esperada.

Si X^2 es mayor que el valor crítico, es improbable que las observaciones sean consistentes con el modelo. La hipótesis nula es rechazada «al 95 % de confianza».

Test de uniformidad

H_0 : las direcciones están distribuidas al azar (por lo tanto, $R = 0$).

R nunca es cero. El test estadístico consiste en decidir si el valor de R es suficientemente distinto de cero como para rechazar la hipótesis nula.

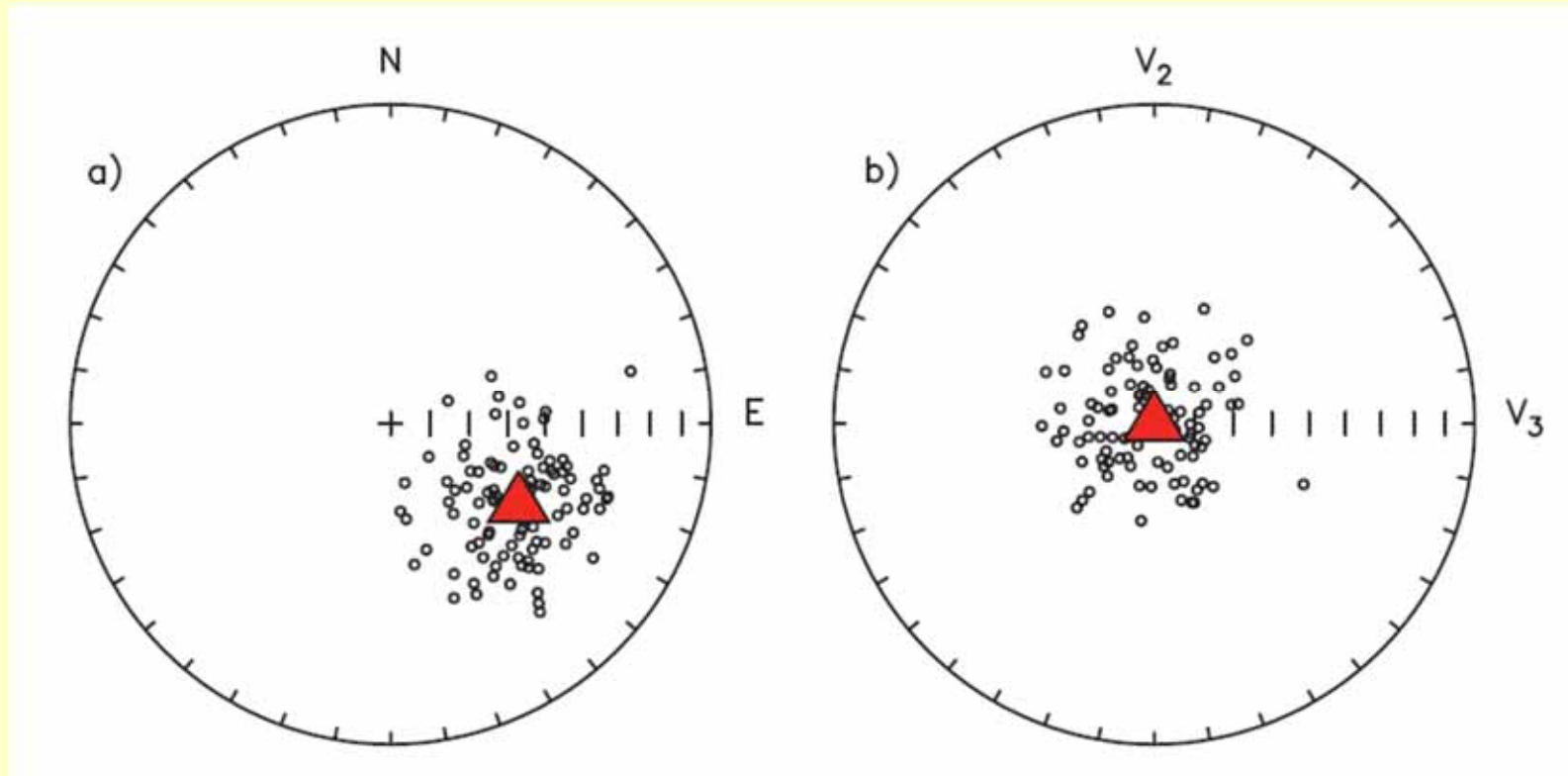
$$\chi^2 = \frac{3 R^2}{n}$$

El valor obtenido se compara con el de la función chi cuadrado con 3 grados de libertad.

$$\chi^2 = \frac{3 R^2}{n}$$

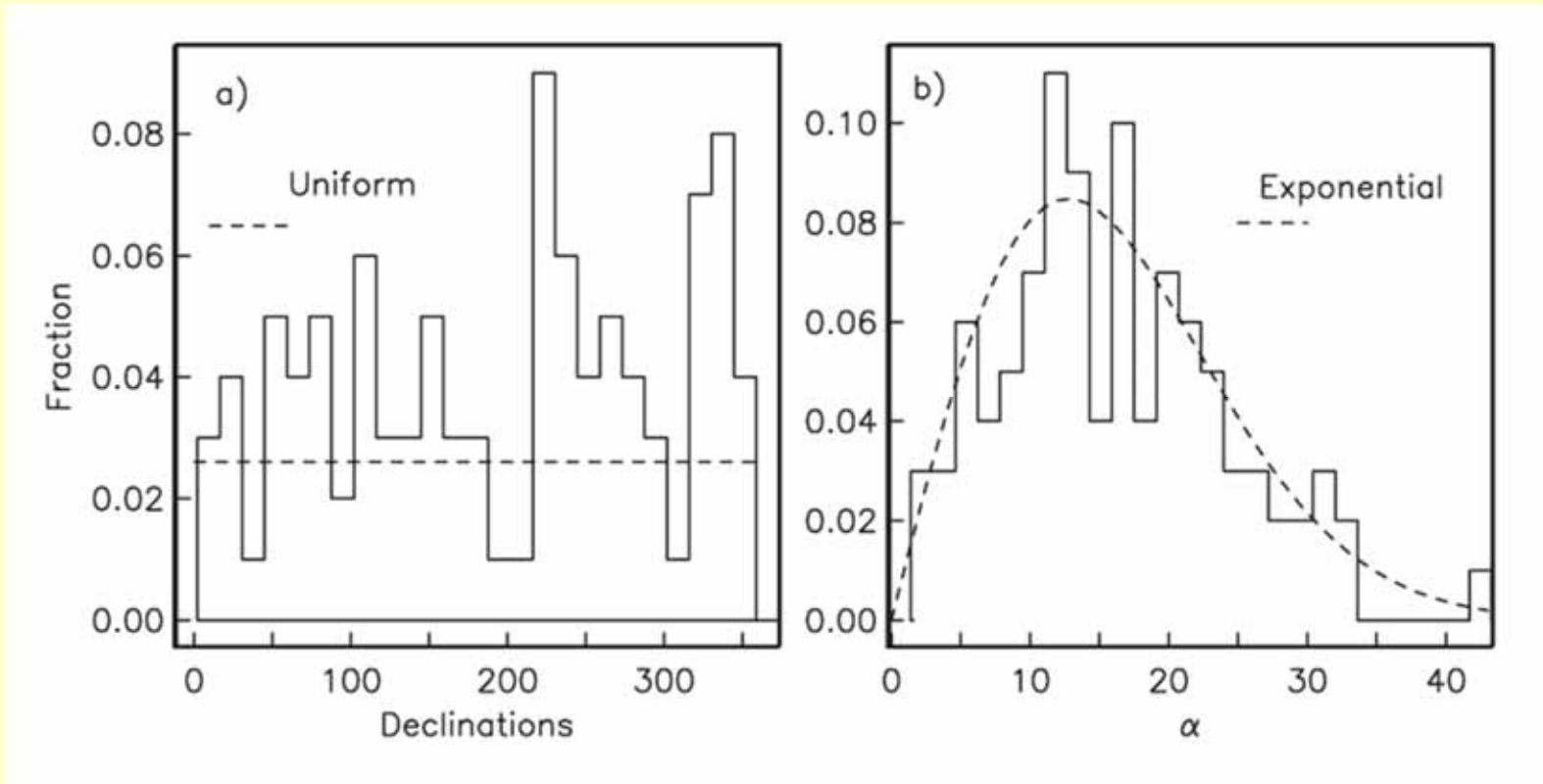
Degrees of Freedom	Probability										
	0.95	0.90	0.80	0.70	0.50	0.30	0.20	0.10	0.05	0.01	0.001
1	0.004	0.02	0.06	0.15	0.46	1.07	1.64	2.71	3.84	6.64	10.83
2	0.10	0.21	0.45	0.71	1.39	2.41	3.22	4.60	5.99	9.21	13.82
3	0.35	0.58	1.01	1.42	2.37	3.66	4.64	6.25	7.82	13.82	16.27
4	0.71	1.06	1.65	2.20	3.36	4.88	5.99	7.78	9.49	13.28	18.47
5	1.14	1.61	2.34	3.00	4.35	6.06	7.29	9.24	11.07	15.09	20.52
6	1.63	2.20	3.07	3.83	5.35	7.23	8.56	10.64	12.59	16.81	22.46
7	2.17	2.83	3.82	4.67	6.35	8.38	9.80	12.02	14.07	18.48	24.32
8	2.73	3.49	4.59	5.53	7.34	9.52	11.03	13.36	15.51	20.09	26.12
9	3.32	4.17	5.38	6.39	8.34	10.66	12.24	14.68	16.92	21.67	27.88
10	3.94	4.86	6.18	7.27	9.34	11.78	13.44	15.99	18.31	23.21	29.59
Nonsignificant									Significant		

Bondad de ajuste a la distribución de Fisher



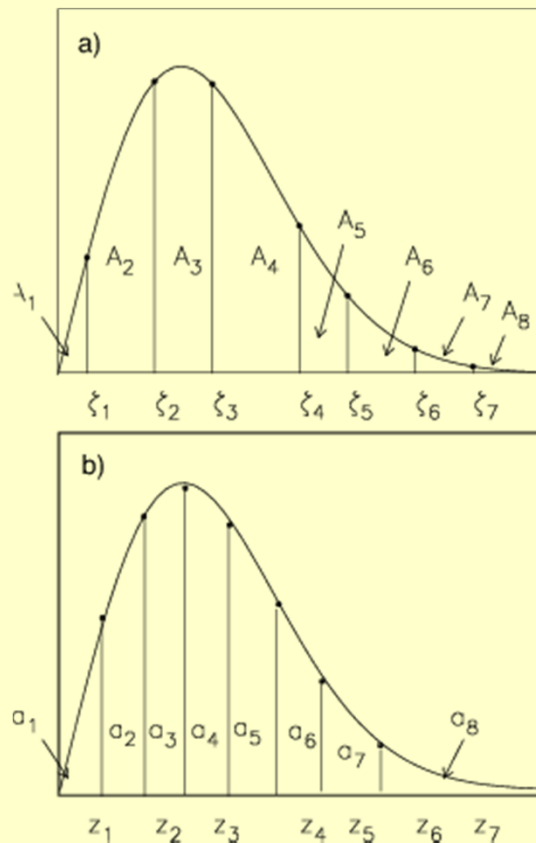
1) Transformación de los datos a la dirección media (la dirección media pasa a ser el origen de coordenadas)

Bondad de ajuste a la distribución de Fisher

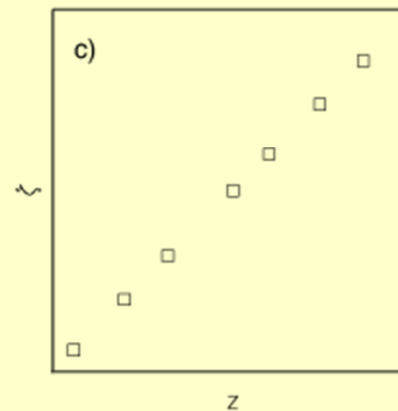


Gráficos Q-Q (cuantil-cuantil)

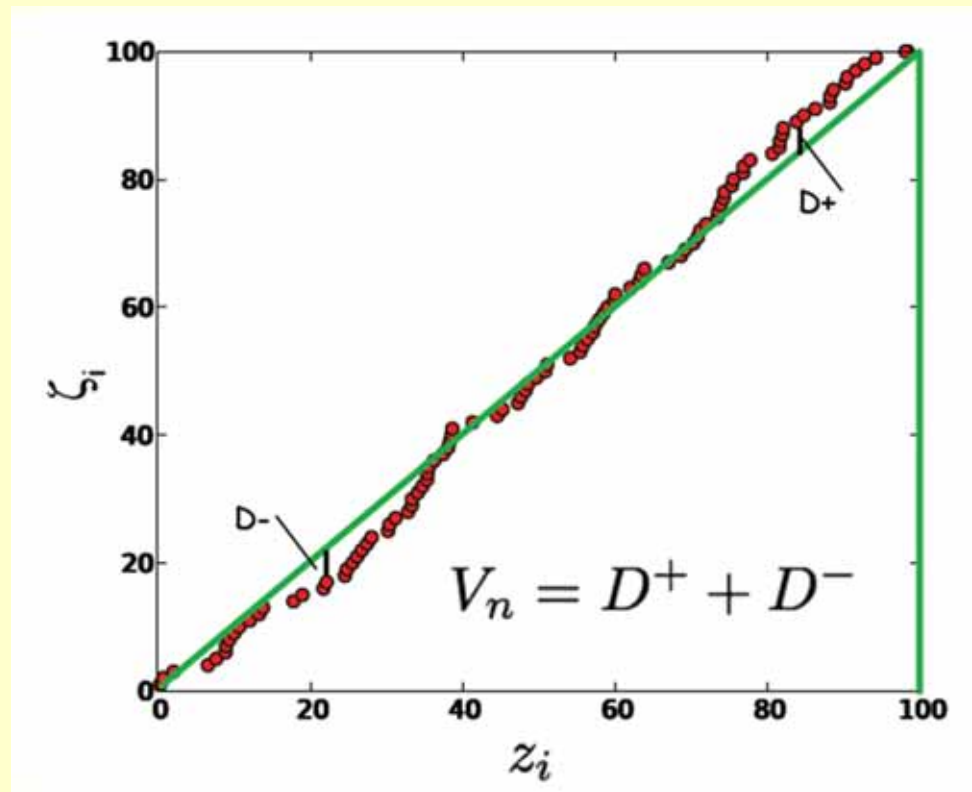
Sirven para diagnosticar diferencias entre la distribución de probabilidad de una población, y una distribución usada para la comparación.



Se grafica cada dato contra el valor esperado si se diera una dada distribución.



Si la distribución es efectivamente la esperada, el gráfico es una línea.

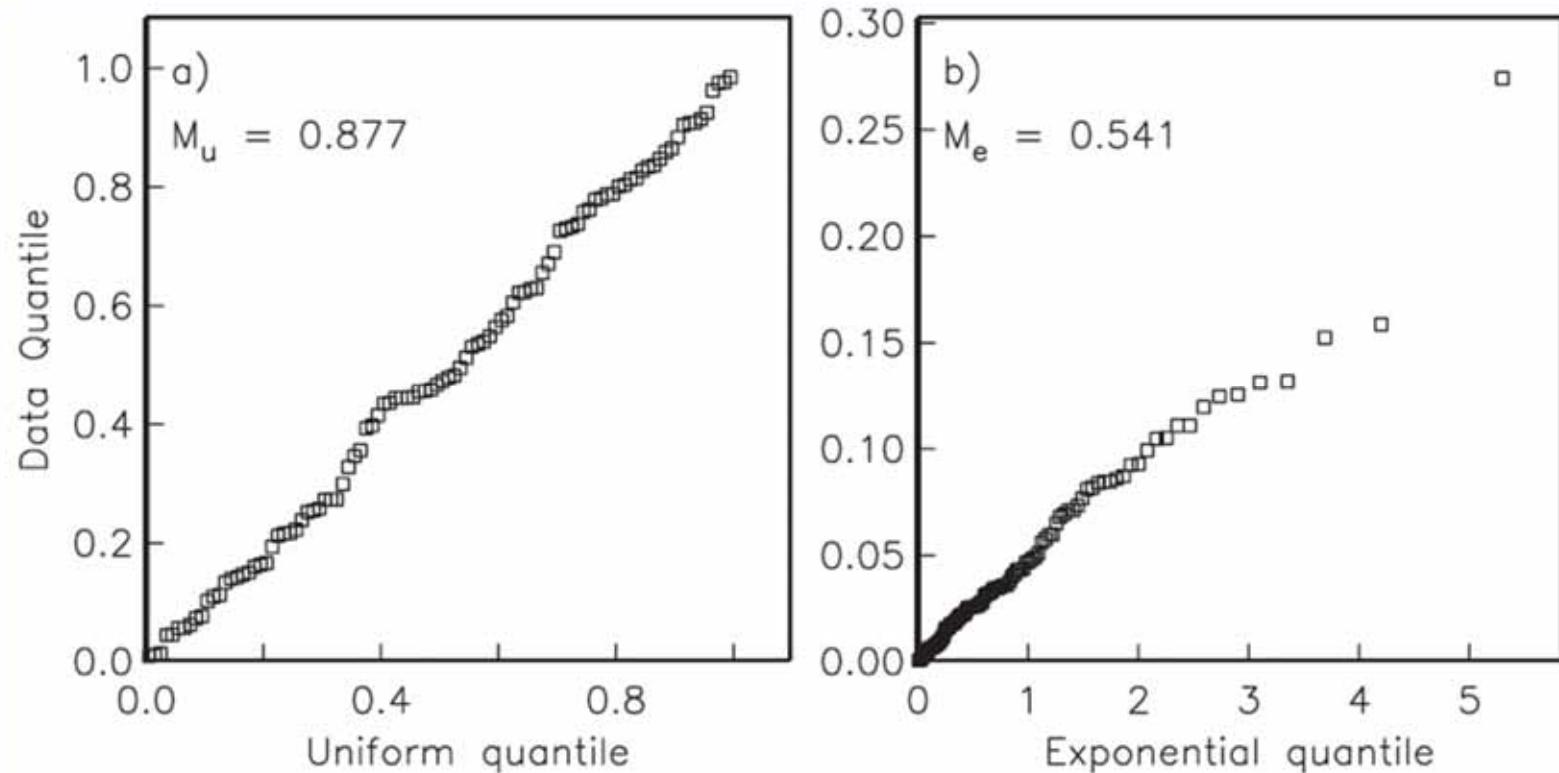


La cuantificación del grado de desajuste permite rechazar la hipótesis de la dicha distribución, al 95% de confianza

Adicionalmente, este método gráfico permite detectar rápidamente valores discordantes

$$M_u = V_n(\sqrt{N} - 0.567 + \frac{1.623}{\sqrt{N}}),$$

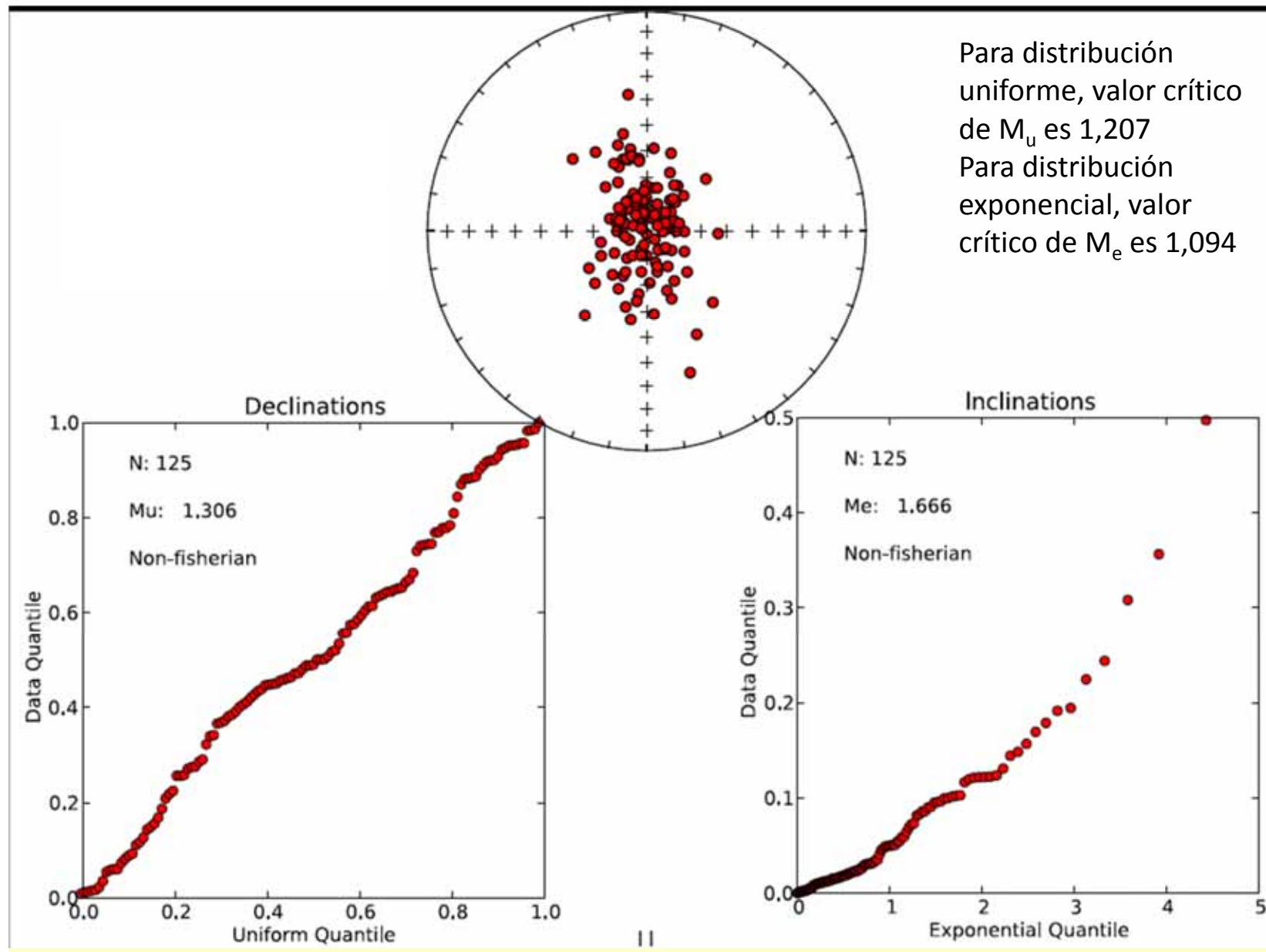
$$M_e = (D_n - \frac{0.2}{N})(\sqrt{N} + 0.26 + \frac{1}{2\sqrt{N}}).$$



A partir de V_n se calcula M_u (para distribución uniforme) y M_e (para distribución exponencial). Estos valores se comparan con los valores críticos para la distribución.

Para distribución uniforme, valor crítico de M_u es 1,207

Para distribución exponencial, valor crítico de M_e es 1,094



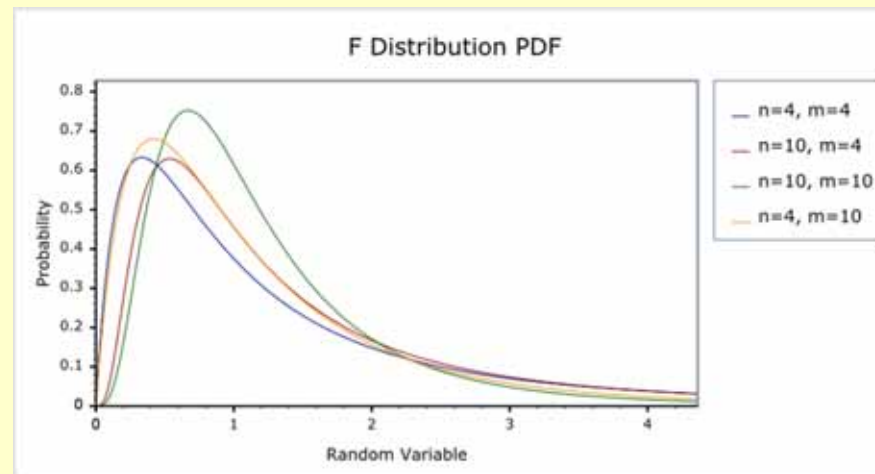
Pruebas de significancia estadística

- Bondad de ajuste de la distribución a un modelo dado (ej. Fisher, uniforme/aleatoria)
- Observaciones discordantes
- Comparación de precisiones
- Comparación de direcciones

Si dos estimaciones independientes de varianza corresponden a la misma población, entonces la relación

$$f = \frac{s_1^2}{s_2^2}$$

tendrá un valor cercano a 1, pero con una distribución F, con grados de libertad v_1 y v_2 .



Comparación de precisiones

$$\frac{k_1}{k_2} = \left(\frac{N_1 - 1}{N_1 - R_1} \right) \left(\frac{N_2 - R_2}{N_2 - 1} \right) = h \sim F[2(N_2 - 1), 2(N_1 - 1)]$$

Se realiza un **test F**, con grados de libertad $2(N_2 - 1)$ y $2(N_1 - 1)$

Si h excede el valor crítico al 5 % de $F[v_1, v_2]$, se rechaza la hipótesis nula al 95 % de confianza.

Las muestras corresponden a poblaciones cuyo k es «significativamente diferente» al 95 % de confianza.

Upper critical values of the F distribution
For numerator degrees of freedom and denominator degrees of freedom
5% significance level

v1\2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	161.448	199.500	215.707	224.583	230.162	233.988	236.768	238.662	240.543	241.882
2	18.513	19.000	19.164	19.247	19.296	19.330	19.353	19.371	19.385	19.396
3	10.128	9.552	9.277	9.117	9.013	8.941	8.887	8.845	8.812	8.786
4	7.709	6.944	6.591	6.388	6.256	6.163	6.094	6.041	5.999	5.964
5	6.608	5.786	5.409	5.192	5.050	4.950	4.876	4.818	4.772	4.735
6	5.987	5.143	4.757	4.534	4.387	4.284	4.207	4.147	4.099	4.060
7	5.591	4.737	4.347	4.120	3.972	3.866	3.787	3.726	3.677	3.637
8	5.318	4.459	4.066	3.838	3.687	3.581	3.500	3.438	3.388	3.347
9	5.117	4.256	3.863	3.633	3.482	3.374	3.293	3.230	3.179	3.137
10	4.965	4.103	3.708	3.478	3.326	3.217	3.135	3.072	3.020	2.978
11	4.844	3.982	3.587	3.357	3.204	3.095	3.012	2.948	2.896	2.854
12	4.747	3.885	3.490	3.259	3.106	2.996	2.913	2.849	2.796	2.753
13	4.667	3.806	3.411	3.179	3.025	2.915	2.832	2.767	2.714	2.671
14	4.600	3.739	3.344	3.112	2.958	2.848	2.764	2.699	2.646	2.602
15	4.543	3.682	3.287	3.056	2.901	2.790	2.707	2.641	2.588	2.544
16	4.494	3.634	3.239	3.007	2.852	2.741	2.657	2.591	2.538	2.494
17	4.451	3.592	3.197	2.965	2.810	2.699	2.614	2.548	2.494	2.450
18	4.414	3.555	3.160	2.928	2.773	2.661	2.577	2.510	2.456	2.412
19	4.381	3.522	3.127	2.895	2.740	2.628	2.544	2.477	2.423	2.378
20	4.351	3.493	3.098	2.866	2.711	2.599	2.514	2.447	2.393	2.348
21	4.325	3.467	3.072	2.840	2.685	2.573	2.488	2.420	2.366	2.321
22	4.301	3.443	3.049	2.817	2.661	2.549	2.464	2.397	2.342	2.297
23	4.279	3.422	3.028	2.796	2.640	2.528	2.442	2.375	2.320	2.275
24	4.260	3.403	3.009	2.776	2.621	2.508	2.423	2.355	2.300	2.255
25	4.242	3.385	2.991	2.759	2.603	2.490	2.405	2.337	2.282	2.236

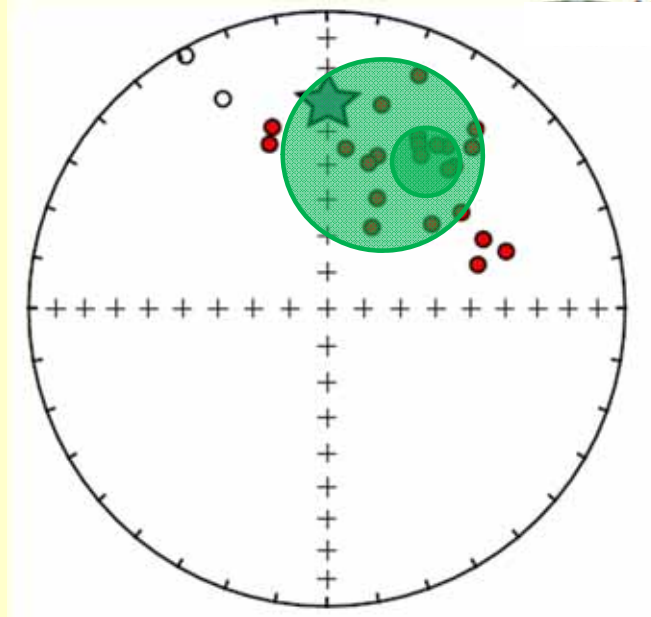
 v_1 v_2

Pruebas de significancia estadística

- Bondad de ajuste de la distribución a un modelo dado (ej. Fisher, uniforme/aleatoria)
- Observaciones discordantes
- Comparación de precisiones
- Comparación de direcciones

Cuando se trata de comparar una dirección con otra «conocida» y por lo tanto sin incertidumbre, la prueba se reduce a comprobar si esa dirección conocida está o no incluida dentro del cono de confianza de la otra.

Ejemplo: si una dirección es o no vertical, si coincide o no con la dirección esperada para el campo magnético en el lugar.

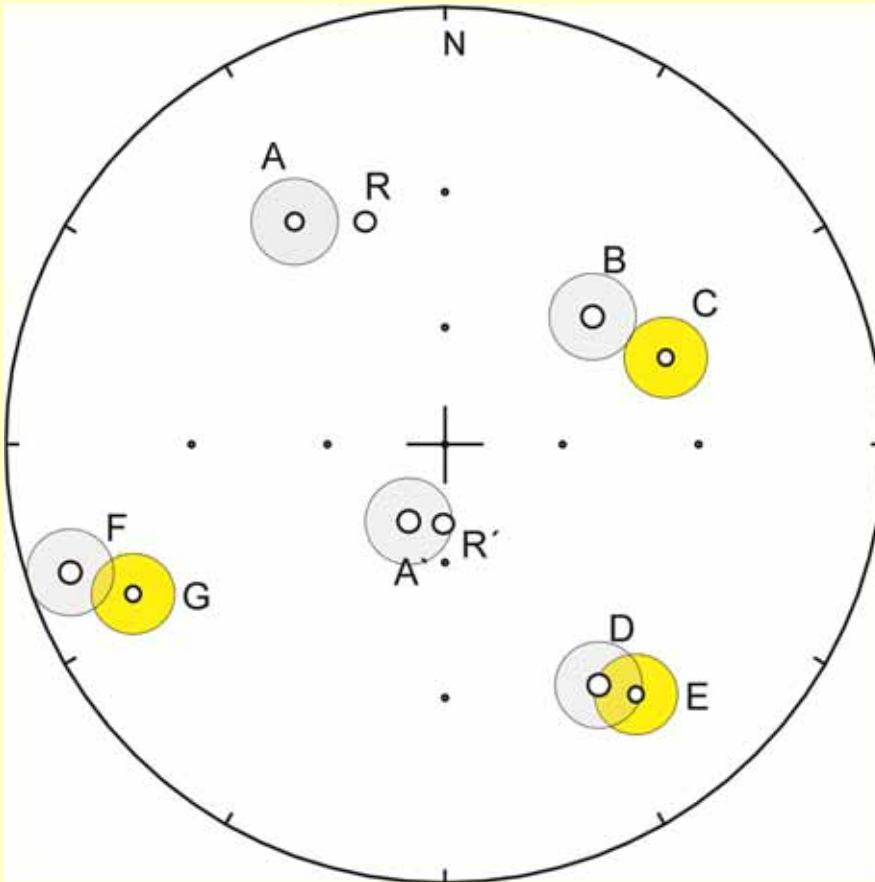


Cuando se trata de comparar dos direcciones que tienen un grado de incertidumbre, la prueba es más compleja

Tests de dirección común: posibles aplicaciones

Comparación entre dos direcciones paleomagnéticas:

- las direcciones normales y reversas del mismo estudio (test de polaridades antípodas o *reversal test*)
- datos de diferentes estudios o localidades
- direcciones predichas desde una localidad o polo paleomagnético reconstruidos



A y R son diferentes

B y C son diferentes

A' y R' no son necesariamente diferentes

D y E no son necesariamente diferentes

¿F y G ?

En estos casos se debe aplicar algún test estadístico que permita determinar si corresponden o no a la misma dirección

Se realiza un **test F** (propuesto por Watson, 1956)

$$F = (N - 2) \frac{(R_1 + R_2 - R)}{(N - R_1 - R_2)},$$

donde $N = N_1 + N_2$ y R es la resultante de todos los N datos individuales

Si ambas direcciones medias provienen de poblaciones bien agrupadas que no coinciden, entonces $R_1 + R_2 \gg R$ y $R_1 + R_2 \sim N$, entonces F alto

Hipótesis nula: las dos muestras comparten una misma dirección media

La hipótesis nula se rechaza si el estadístico f da un valor mayor que el valor crítico.

En ese caso, las direcciones medias son diferentes (al nivel de confianza elegido para el estadístico, por ejemplo al 95 %).

El valor crítico es el valor de la función F para 2 y $2(N-2)$ grados de libertad.

Estabilidad Magnética

- MRN: composición de remanencias
- Desmagnetización de la MRN
- Pruebas estadísticas de la estabilidad

Pruebas paleomagnéticas de campo

Incluyen una serie de **estrategias de muestreo** que, combinadas con las **herramientas estadísticas** adecuadas, permiten evaluar las edades relativas de las diversas componentes magnéticas.

Las pruebas permiten datar las componentes con respecto a ciertos eventos geológicos:

- Fold/tilt test (Test de plegamiento/basculamiento)
- Test del conglomerado
- Test del contacto ígneo
- Test de la discordancia
- Test de la consistencia regional
- Reversal test (Test de la reversión, o de polaridades antípodas)

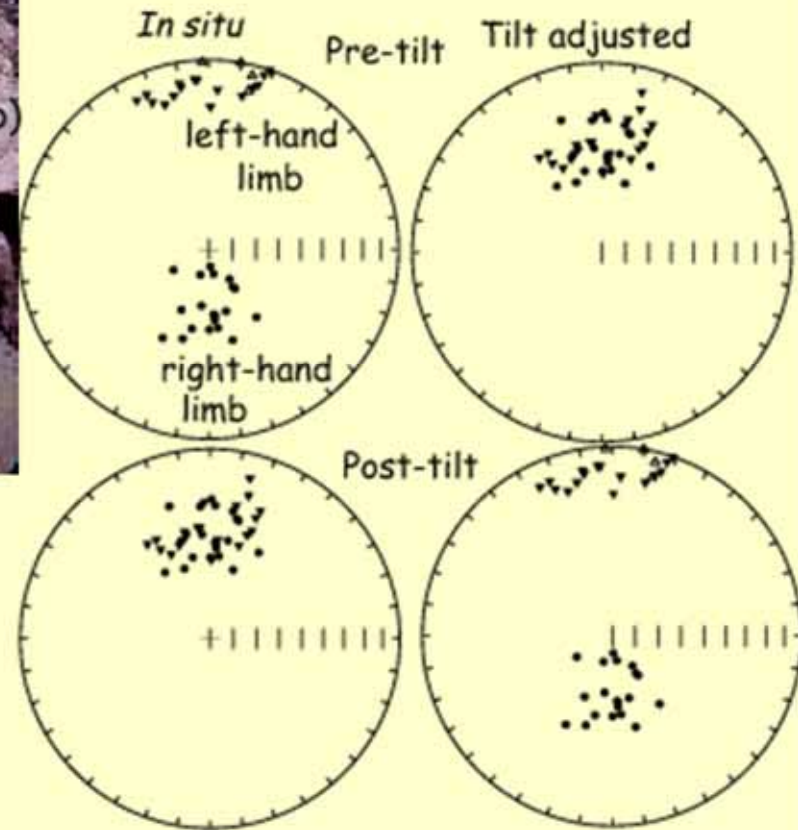
Fold test

Graham (1949). Test de campo más utilizado

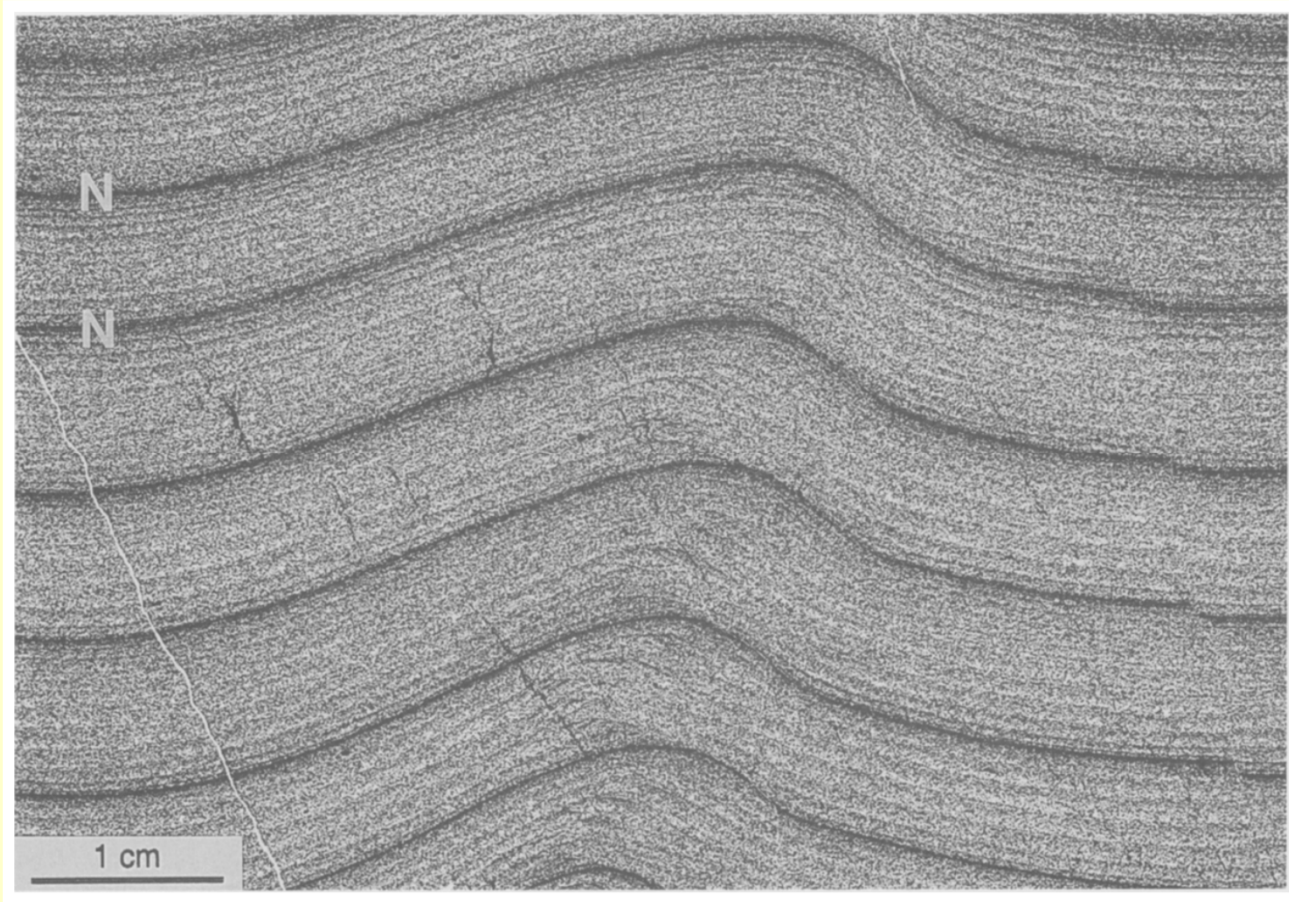


Se examina la edad de la remanencia respecto al plegamiento de la roca

Las direcciones se comparan antes (**coordenadas geográficas**) y después (**coordenadas estratigráficas**) de reconstruir a la paleohorizontal. Donde existe mejor agrupamiento indica si la remanencia es pre o postectónica



Fold test de plegamiento sinsedimentario



Elatina Formation (Schmidt y Williams, 1995)

Fold test: pruebas estadísticas

McElhinny (1964): primer fold-test estadístico, se basa en la comparación de la dispersión de la población de direcciones antes y después de la corrección estructural

$$\frac{k_{corr}}{k_{in situ}}$$

Si la magnetización es pre-tectónica, $k_{corr} > k_{insitu}$.

$H_0: k_{corr} = k_{insitu}$. Si H_0 se descarta, entonces el fold test es positivo

El valor límite a partir del cual es estadísticamente significativo está dado por el valor de la función F.

Comparación de precisiones

$$\frac{k_1}{k_2} = \left(\frac{N_1 - 1}{N_1 - R_1} \right) \left(\frac{N_2 - R_2}{N_2 - 1} \right) = h \sim F[2(N_2 - 1), 2(N_1 - 1)]$$

Se realiza un **test F**, con grados de libertad $2(N_2 - 1)$ y $2(N_1 - 1)$

Si h excede el valor crítico al 5 % de $F[v_1, v_2]$, se rechaza la hipótesis nula al 95 % de confianza.

Las muestras corresponden a poblaciones cuyo k es «significativamente diferente» al 95 % de confianza.

Site 19 Sample	In Situ		After Bedding Correction	
	D	I	D	I
AC19.1B	112.4	-7.1	130.1	21.5
AC19.2B	122.9	-0.9	134.2	10.1
AC19.3C	115.9	-7.1	129.4	18.1
AC19.4B	119.7	-6.4	129.4	14.3
AC19.5C	118.1	-6.4	129.6	15.8
AC19.6B	116.4	-3.4	133.1	17.0
AC19.7B	121.1	-9.7	125.8	13.5
AC19.8B	114.6	-8.1	128.6	19.6
AC19.9A	117.1	-9.6	126.6	17.4
AC19.9B	115.9	-8.5	127.9	18.4
MEAN	117.4	-6.7	129.5	16.6
N = 10, R = 9.98, k = 382.35, $\alpha_{95} = 2.5$				

Site 20 Sample	In Situ		After Bedding Correction	
	D	I	D	I
AC20.1A	144.4	16.8	130.2	2.5
AC20.1B	155.2	18.5	131.3	12.8
AC20.2C	151.0	15.7	133.0	8.2
AC20.3B	158.6	18.9	131.7	16.0
AC20.4C	156.5	17.0	133.1	13.7
AC20.5B	164.2	19.2	132.5	21.3
AC20.6B	158.6	17.3	133.3	15.7
AC20.7A	145.0	18.3	129.0	3.5
AC20.8A	163.8	22.3	129.2	21.5
AC20.8B	163.2	21.5	129.9	20.9
AC20.9B	157.2	16.7	133.5	14.3
MEAN	156.1	18.5	131.5	13.7
N = 11, R = 10.93, k = 140.64, $\alpha_{95} = 3.9$				

	N	D	I	R	k	α_{95}
Before Bedding Correction	21	137.2	6.8	19.26	11.53	9.8
After Bedding Correction	21	130.6	15.1	20.90	191.82	2.3

$$\frac{k_{corr}}{k_{in situ}} = 16,6$$

Upper critical values of the F distribution
For numerator degrees of freedom and denominator degrees of freedom
5% significance level

v1\2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	161.448	199.500	215.707	224.583	230.162	233.988	236.768	238.662	240.543	241.882
2	18.513	19.000	19.164	19.247	19.296	19.330	19.353	19.371	19.385	19.396
3	10.128	9.552	9.277	9.117	9.013	8.941	8.887	8.845	8.812	8.786
4	7.709	6.944	6.591	6.388	6.256	6.163	6.094	6.041	5.999	5.964
5	6.608	5.786	5.409	5.192	5.050	4.950	4.876	4.818	4.772	4.735
6	5.987	5.143	4.757	4.534	4.387	4.284	4.207	4.147	4.099	4.060
7	5.591	4.737	4.347	4.120	3.972	3.866	3.787	3.726	3.677	3.637
8	5.318	4.459	4.066	3.838	3.687	3.581	3.500	3.438	3.388	3.347
9	5.117	4.256	3.863	3.633	3.482	3.374	3.293	3.230	3.179	3.137
10	4.965	4.103	3.708	3.478	3.326	3.217	3.135	3.072	3.020	2.978
11	4.844	3.982	3.587	3.357	3.204	3.095	3.012	2.948	2.896	2.854
12	4.747	3.885	3.490	3.259	3.106	2.996	2.913	2.849	2.796	2.753
13	4.667	3.806	3.411	3.179	3.025	2.915	2.832	2.767	2.714	2.671
14	4.600	3.739	3.344	3.112	2.958	2.848	2.764	2.699	2.646	2.602
15	4.543	3.682	3.287	3.056	2.901	2.790	2.707	2.641	2.588	2.544
16	4.494	3.634	3.239	3.007	2.852	2.741	2.657	2.591	2.538	2.494
17	4.451	3.592	3.197	2.965	2.810	2.699	2.614	2.548	2.494	2.450
18	4.414	3.555	3.160	2.928	2.773	2.661	2.577	2.510	2.456	2.412
19	4.381	3.522	3.127	2.895	2.740	2.628	2.544	2.477	2.423	2.378
20	4.351	3.493	3.098	2.866	2.711	2.599	2.514	2.447	2.393	2.348
21	4.325	3.467	3.072	2.840	2.685	2.573	2.488	2.420	2.366	2.321
22	4.301	3.443	3.049	2.817	2.661	2.549	2.464	2.397	2.342	2.297
23	4.279	3.422	3.028	2.796	2.640	2.528	2.442	2.375	2.320	2.275
24	4.260	3.403	3.009	2.776	2.621	2.508	2.423	2.355	2.300	2.255
25	4.242	3.385	2.991	2.759	2.603	2.490	2.405	2.337	2.282	2.236

 v_1 v_2

$$\text{DISTR.F.INV}(0.05, 40, 40) = 1,692$$

Valor crítico de F 1,692

Relación observada de k 16,6

Por lo tanto, la diferencia entre los valores de k antes y después de corregir por la estructura es estadísticamente significativa

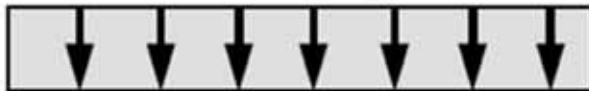
FOLD TEST POSITIVO

La magnetización también puede haberse producido durante el plegamiento.

Agrupamiento máximo en una posición intermedia

PREFOLDING MAGNETIZATION

Orientation during magnetization



Observed orientation

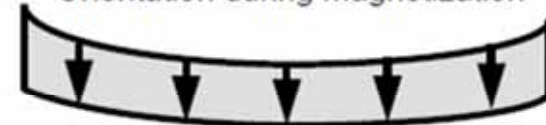


SYNFOLDING MAGNETIZATION

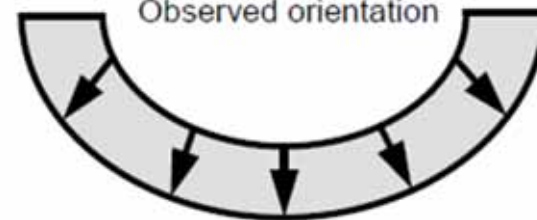
Restored to paleohorizontal



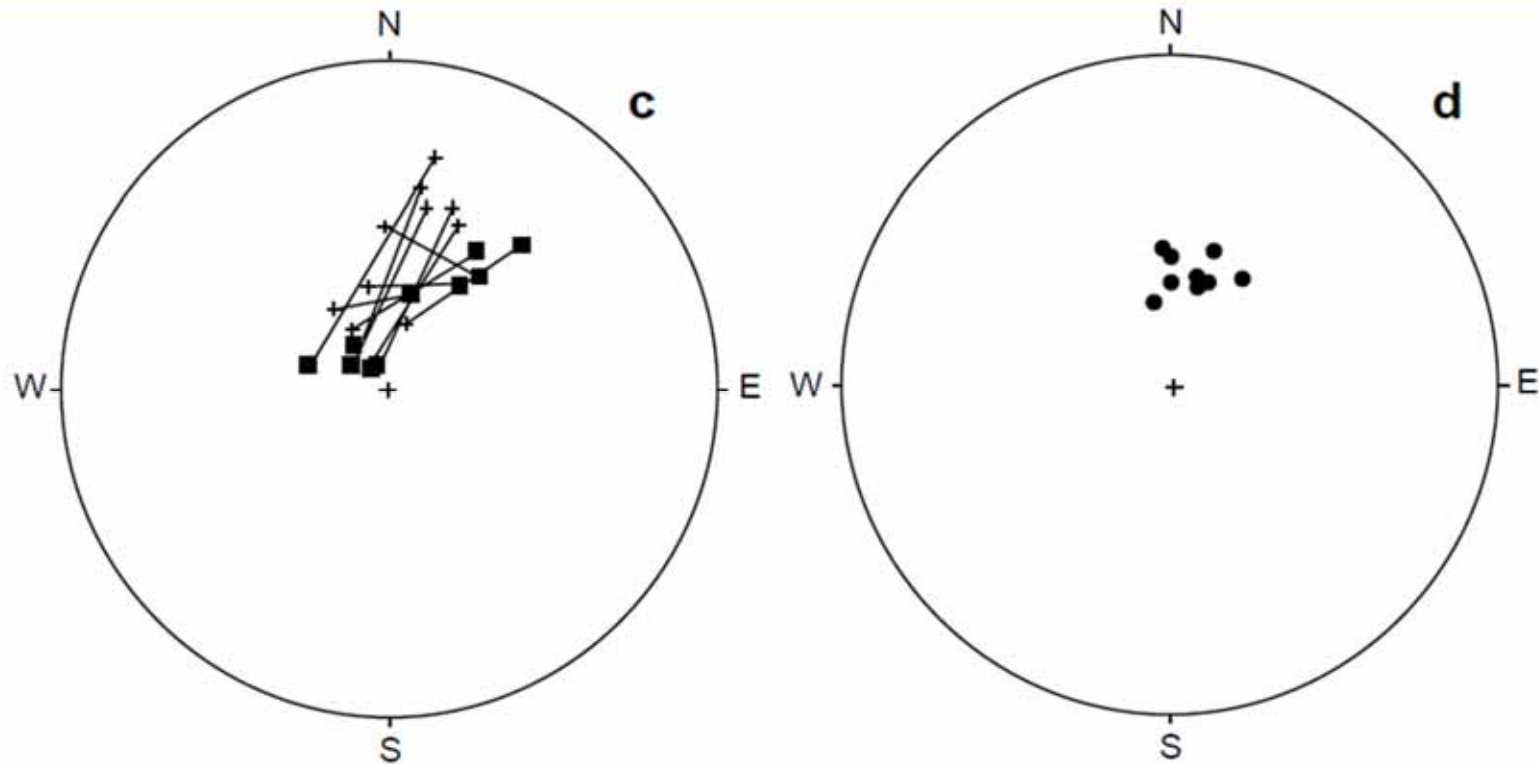
Orientation during magnetization



Observed orientation



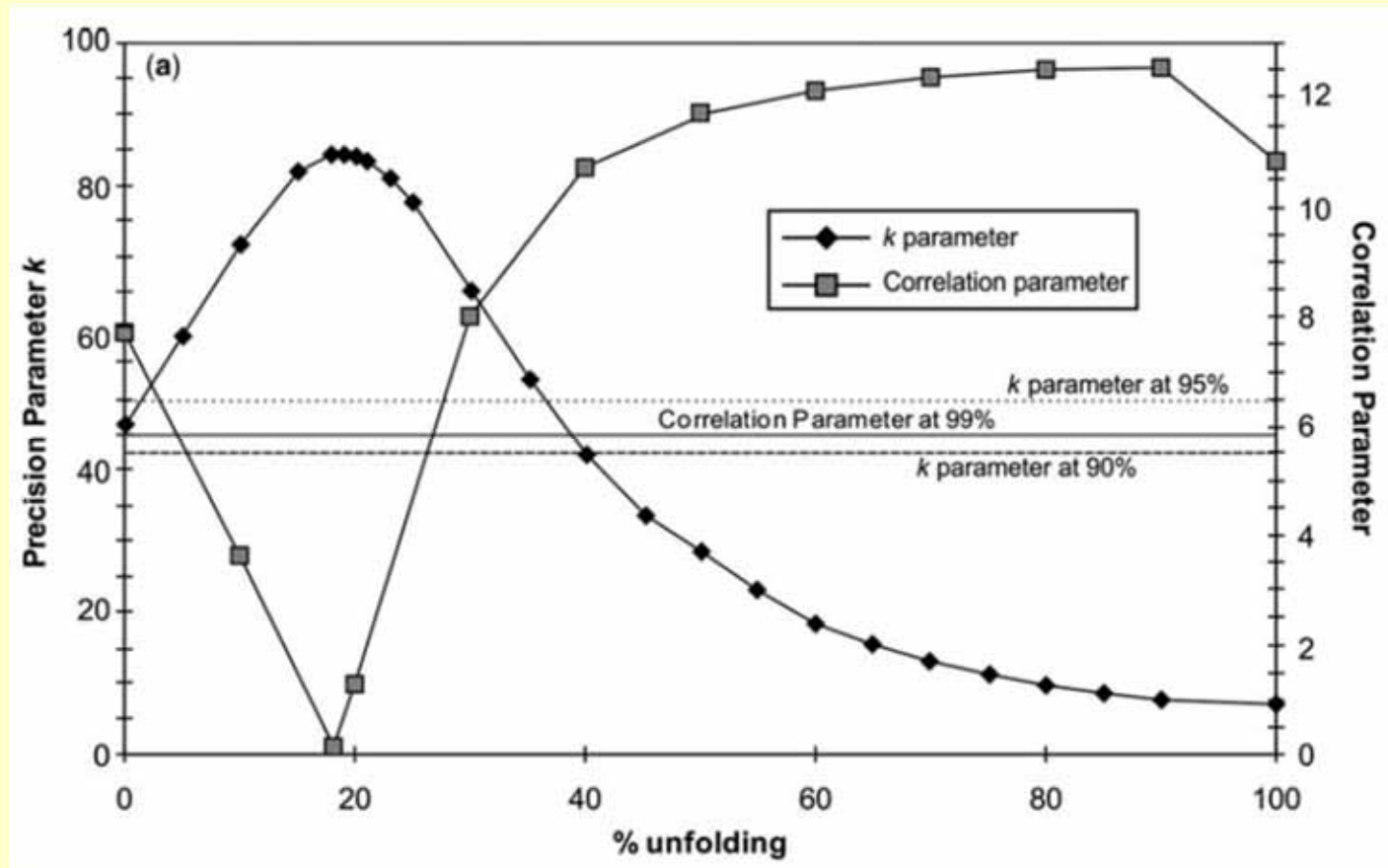
Magnetización sintectónica



Cruces: in situ
Cuadrados: Corregido por estructura

Con un despliegue de 50%

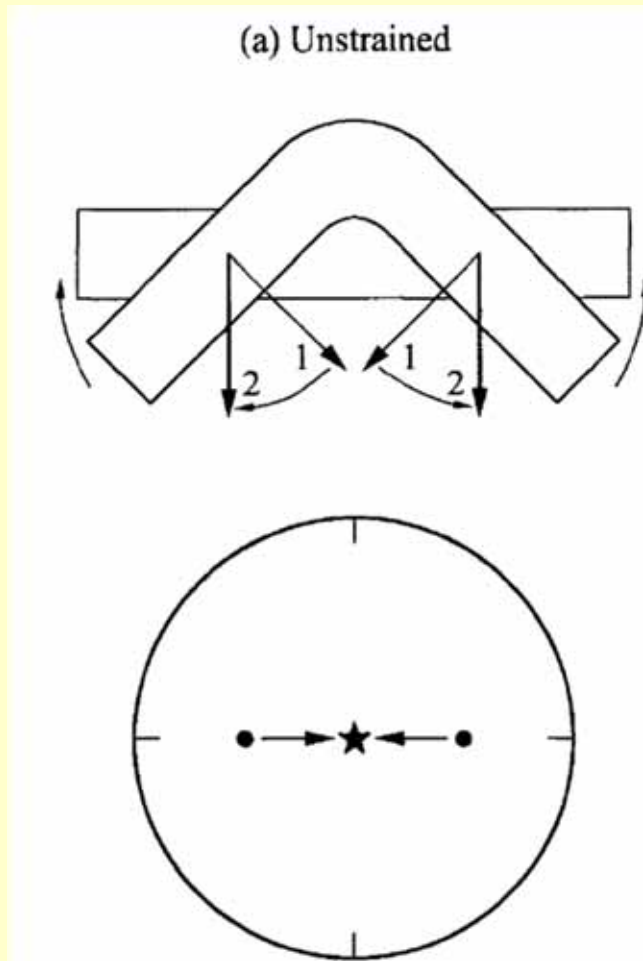
Fold-Test escalonado



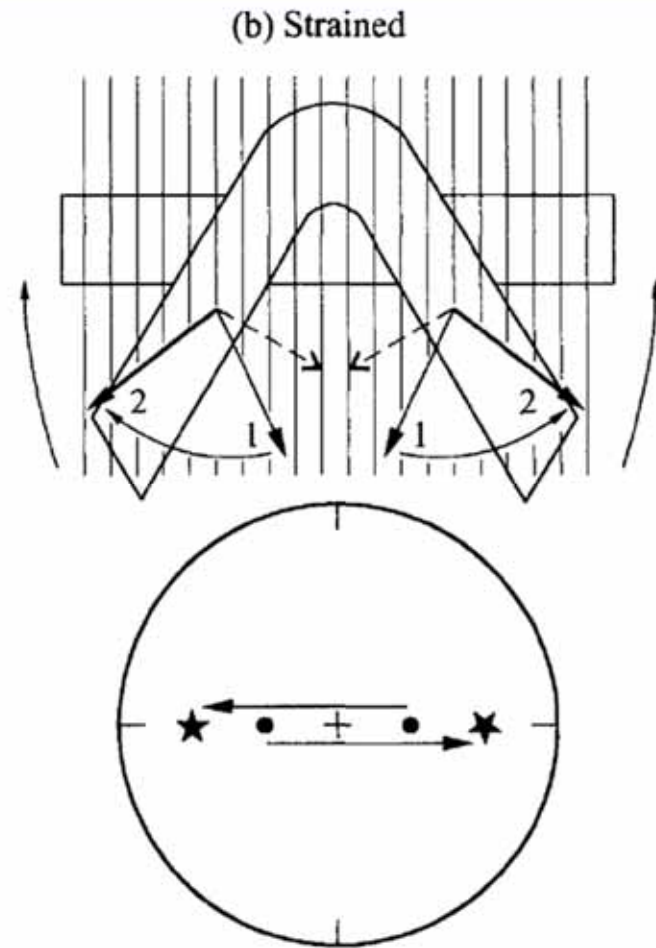
Magnetización sintectónica

Miembro San Carlos de la F. Sierra Grande (Rapalini 1998, Font et al. 2012)

Rotación de cuerpo rígido



Deformación con rotación hacia el plano de clivaje

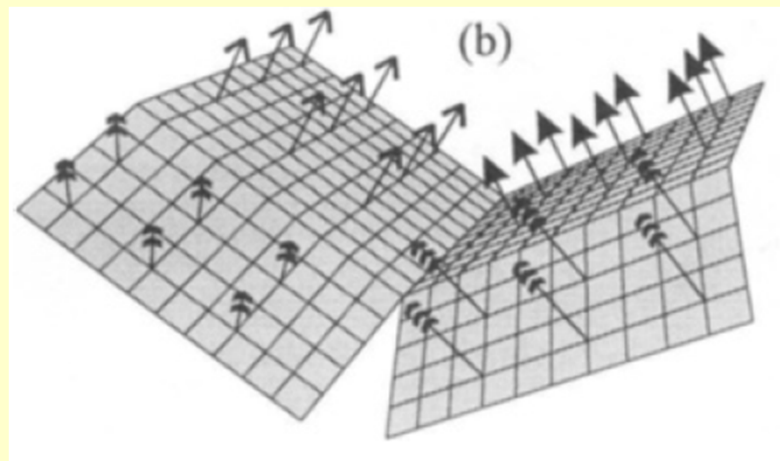


Al corregir se produce la falsa impresión de una magnetización sintectónica

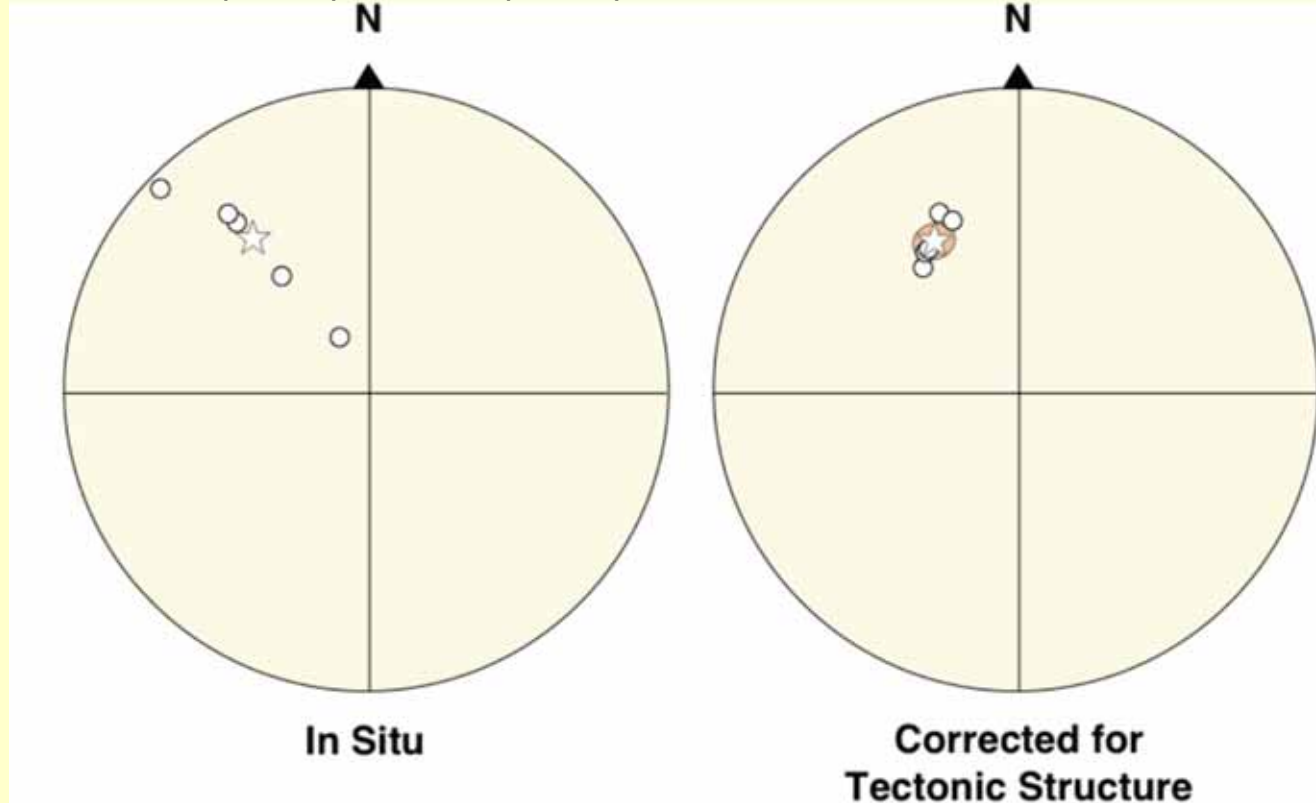
McElhinny y McFadden 2000

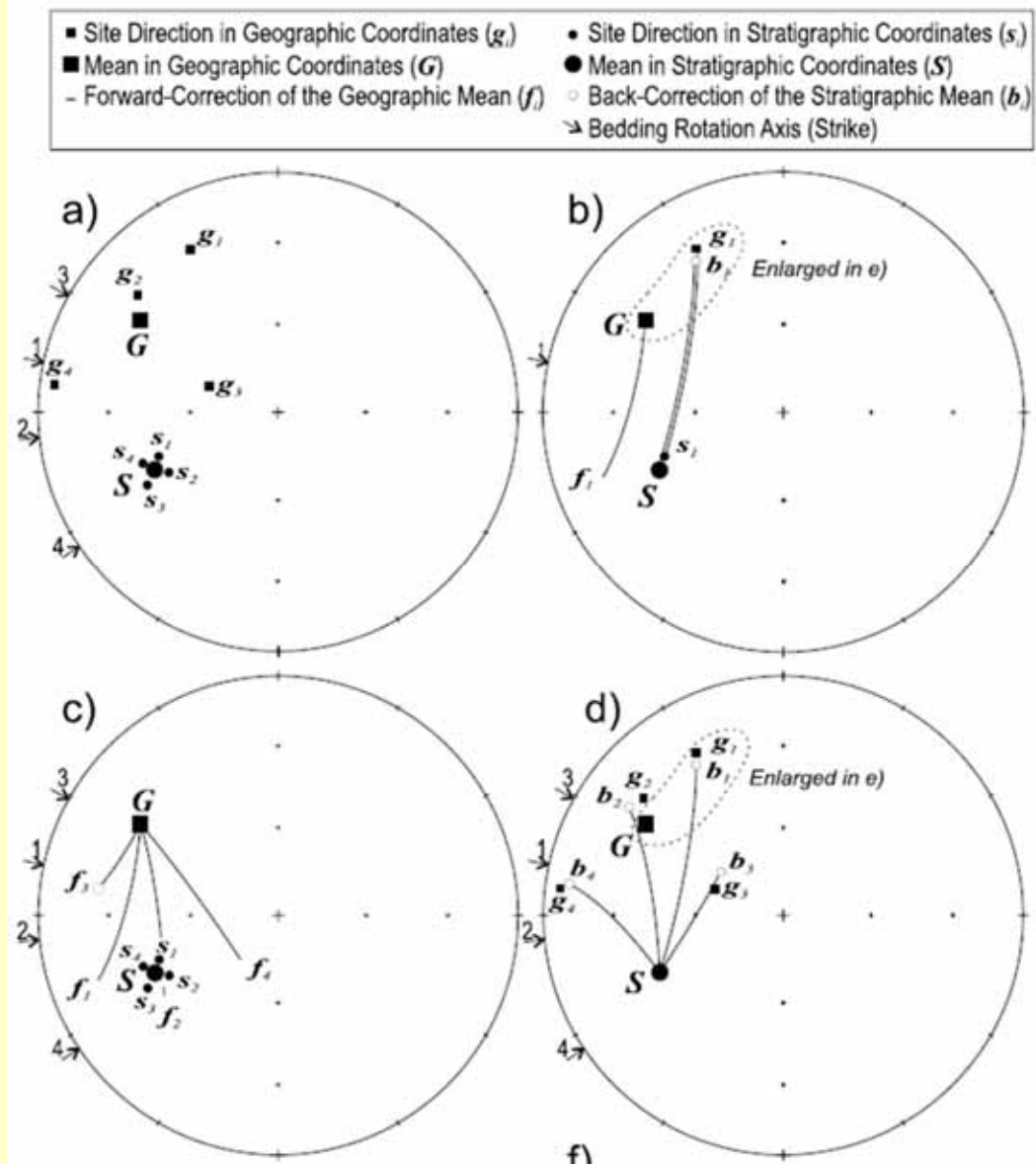
El test de significancia aplicado para la diferencia de k no es correcto, debido a que k_{corr} y k_{insitu} no son cantidades estadísticas independientes (están relacionadas entre sí geoméricamente a través de las actitudes estructurales).

Solución 1: conseguir juegos de direcciones, con actitud estructural homogénea, para poder construir muestras con k comparables. Testear estadísticamente si sus direcciones medias coinciden. *Test de McFadden y Jones (1981).*



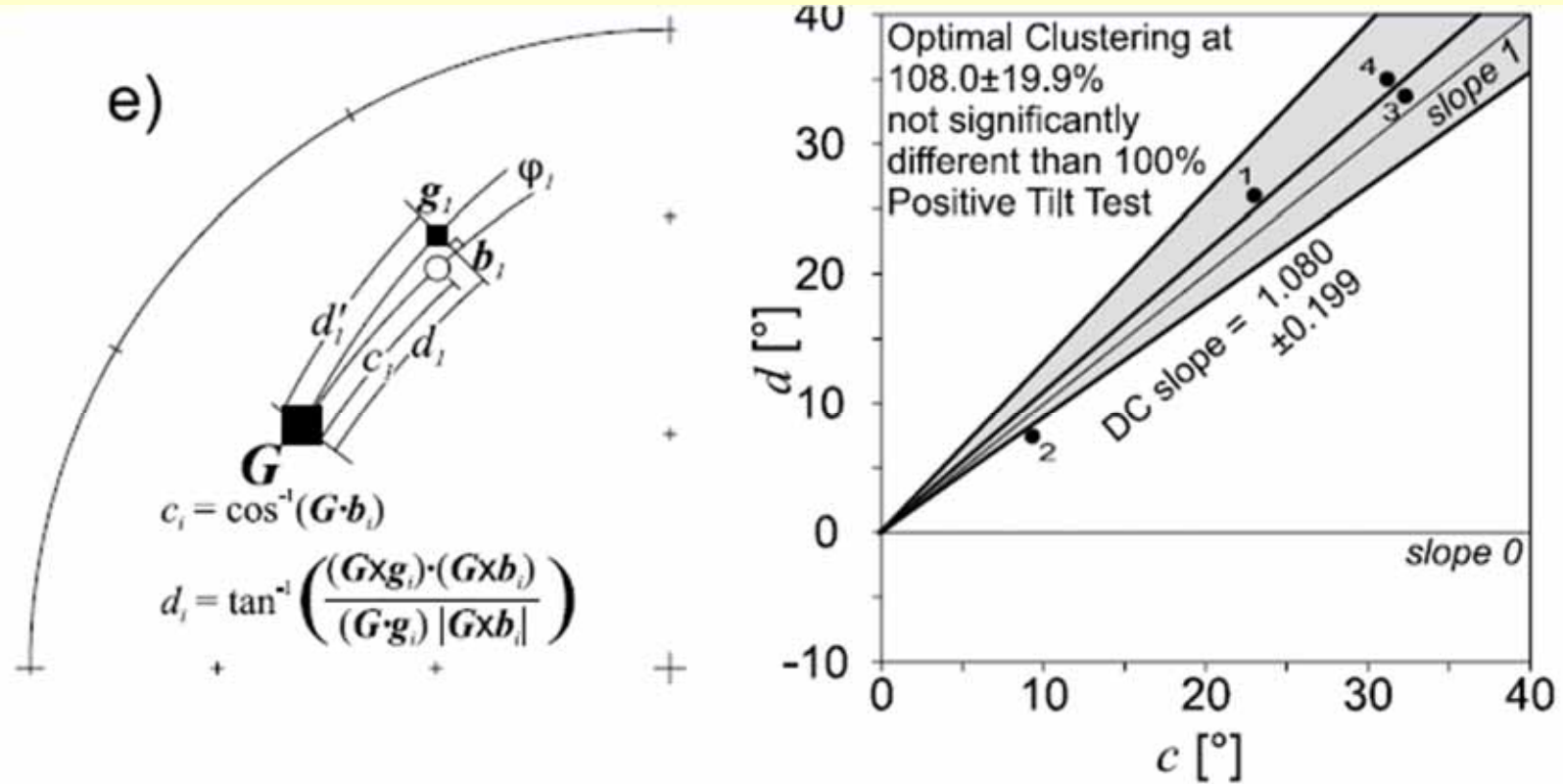
Solución 2: Analizar correlación entre direcciones y actitud estructural. Si la remanencia fue adquirida antes de la deformación, las direcciones en coordenadas estratigráficas son independientes de la actitud estructural, mientras que las direcciones en coordenadas geográficas contienen información acerca de la distribución original de direcciones y sobre las rotaciones tectónicas que llevaron a los estratos a su actitud actual. *Tests de McFadden (1990), Enkin (2003).*





Test DC
(dirección-
corrección)
Enkin 2003

Test DC (dirección-corrección)

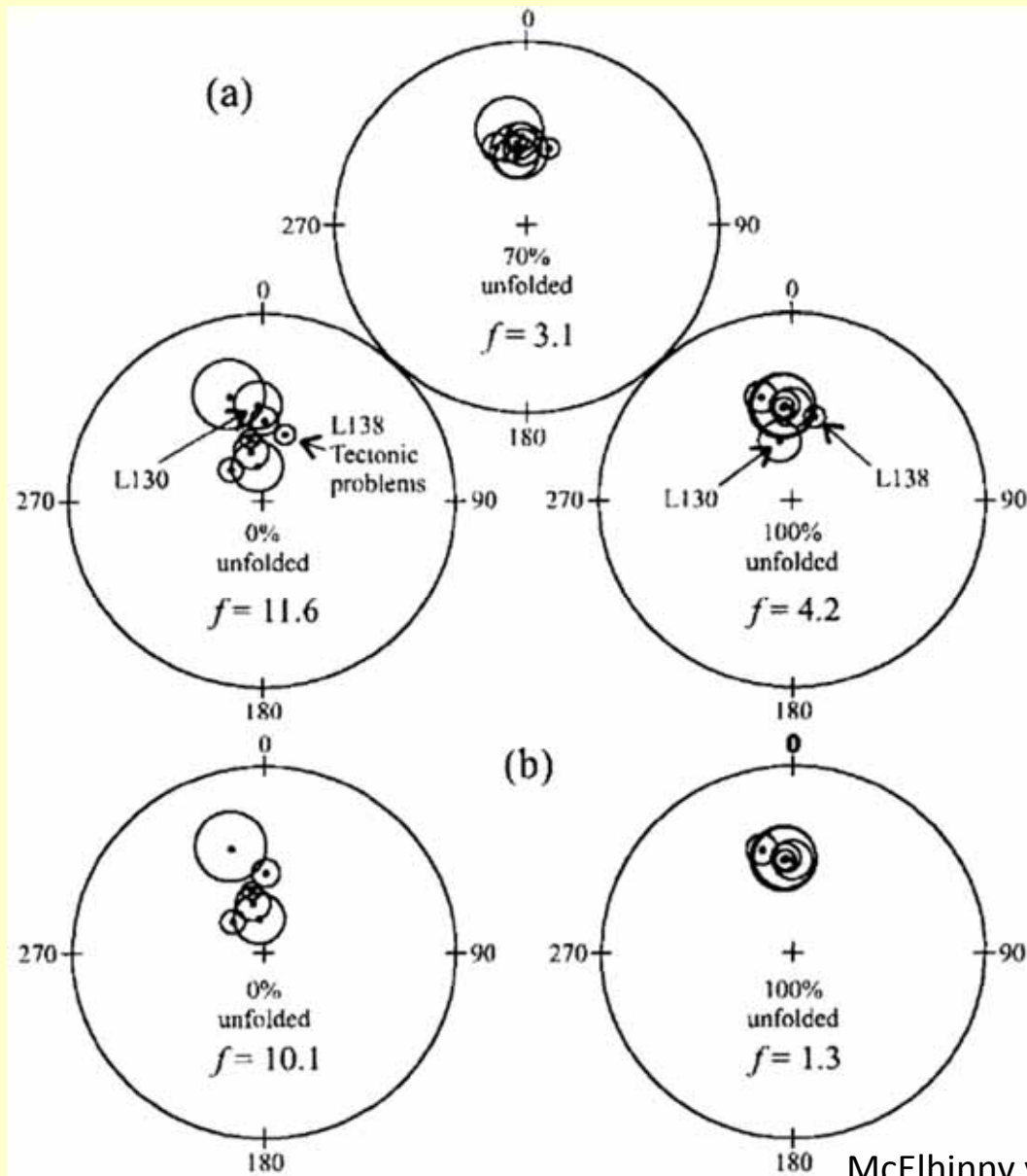


c es la distancia angular entre G y la dirección retrocorregida

d es la proyección del arco $G-g$ sobre $G-b$

Como las direcciones s están muy apretadas, c y d son casi iguales y la pendiente de la recta tiende a 1

Permite detectar outliers



Efecto de datos discordantes (*outliers*) sobre un test de McFadden (1990)

McElhinny y McFadden 2000

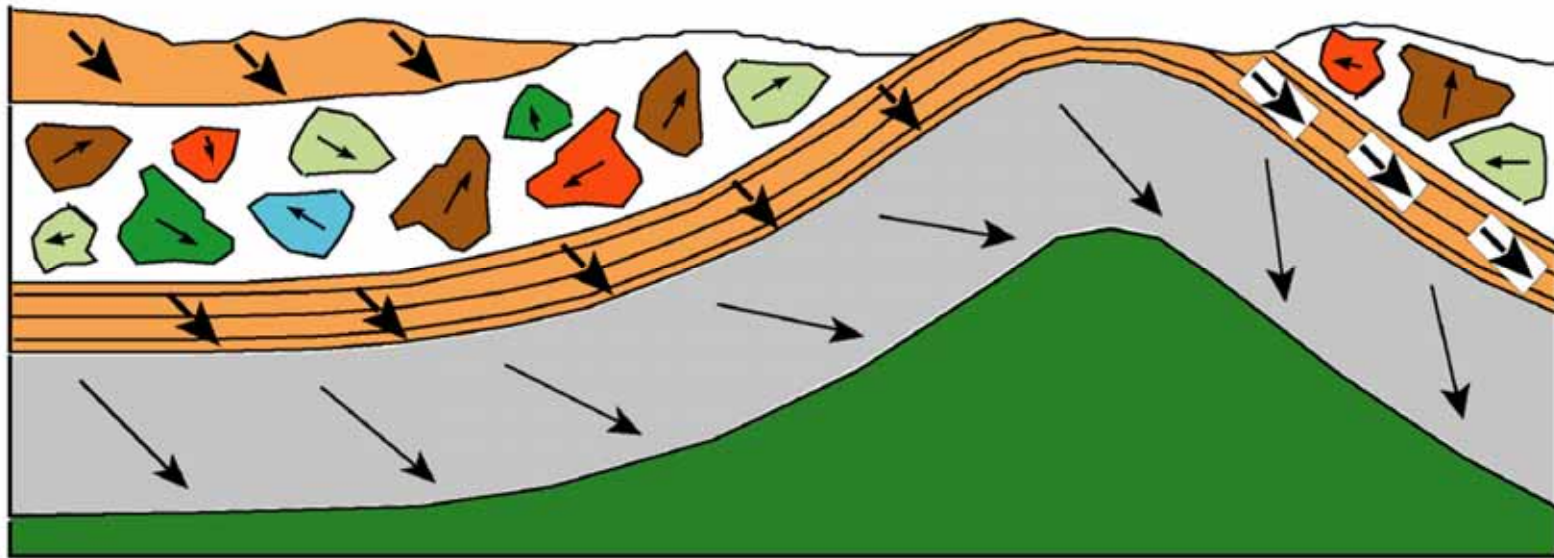
Pruebas paleomagnéticas de campo

Incluyen una serie de **estrategias de muestreo** que, combinadas con las **herramientas estadísticas** adecuadas, permiten evaluar las edades relativas de las diversas componentes magnéticas.

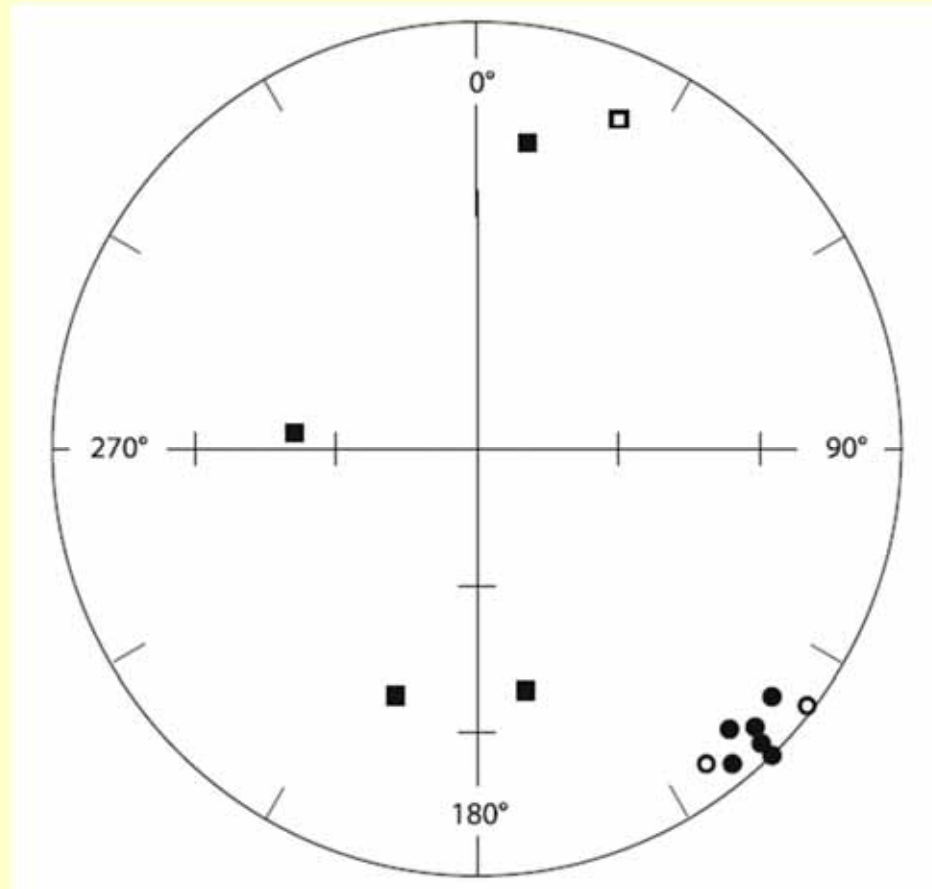
Las pruebas permiten datar las componentes con respecto a ciertos eventos geológicos:

- Fold/tilt test (Test de plegamiento/basculamiento)
- Test del conglomerado
- Test del contacto ígneo
- Test de la discordancia
- Test de la consistencia regional
- Reversal test (Test de la reversión, o de polaridades antípodas)

Test del conglomerado



Test del conglomerado



Lanza y Meloni
2006

Las direcciones de remanencia aisladas en los clastos se distribuyen aleatoriamente, mientras que en la roca que da origen a los clastos, presenta coherencia. Se prueba la estabilidad de la componente, anterior a la depositación del conglomerado.

Test de uniformidad

H_0 : las direcciones están distribuidas al azar (por lo tanto, $R = 0$).

R nunca es cero. El test estadístico consiste en decidir si el valor de R es suficientemente distinto de cero como para rechazar la hipótesis nula.

$$\chi^2 = \frac{3 R^2}{n}$$

El valor obtenido se compara con el de la función chi cuadrado con 3 grados de libertad.

$$\chi^2 = \frac{3 R^2}{n}$$

Degrees of Freedom	Probability										
	0.95	0.90	0.80	0.70	0.50	0.30	0.20	0.10	0.05	0.01	0.001
1	0.004	0.02	0.06	0.15	0.46	1.07	1.64	2.71	3.84	6.64	10.83
2	0.10	0.21	0.45	0.71	1.39	2.41	3.22	4.60	5.99	9.21	13.82
3	0.35	0.58	1.01	1.42	2.37	3.66	4.64	6.25	7.82	13.82	16.27
4	0.71	1.06	1.65	2.20	3.36	4.88	5.99	7.78	9.49	13.28	18.47
5	1.14	1.61	2.34	3.00	4.35	6.06	7.29	9.24	11.07	15.09	20.52
6	1.63	2.20	3.07	3.83	5.35	7.23	8.56	10.64	12.59	16.81	22.46
7	2.17	2.83	3.82	4.67	6.35	8.38	9.80	12.02	14.07	18.48	24.32
8	2.73	3.49	4.59	5.53	7.34	9.52	11.03	13.36	15.51	20.09	26.12
9	3.32	4.17	5.38	6.39	8.34	10.66	12.24	14.68	16.92	21.67	27.88
10	3.94	4.86	6.18	7.27	9.34	11.78	13.44	15.99	18.31	23.21	29.59
Nonsignificant									Significant		

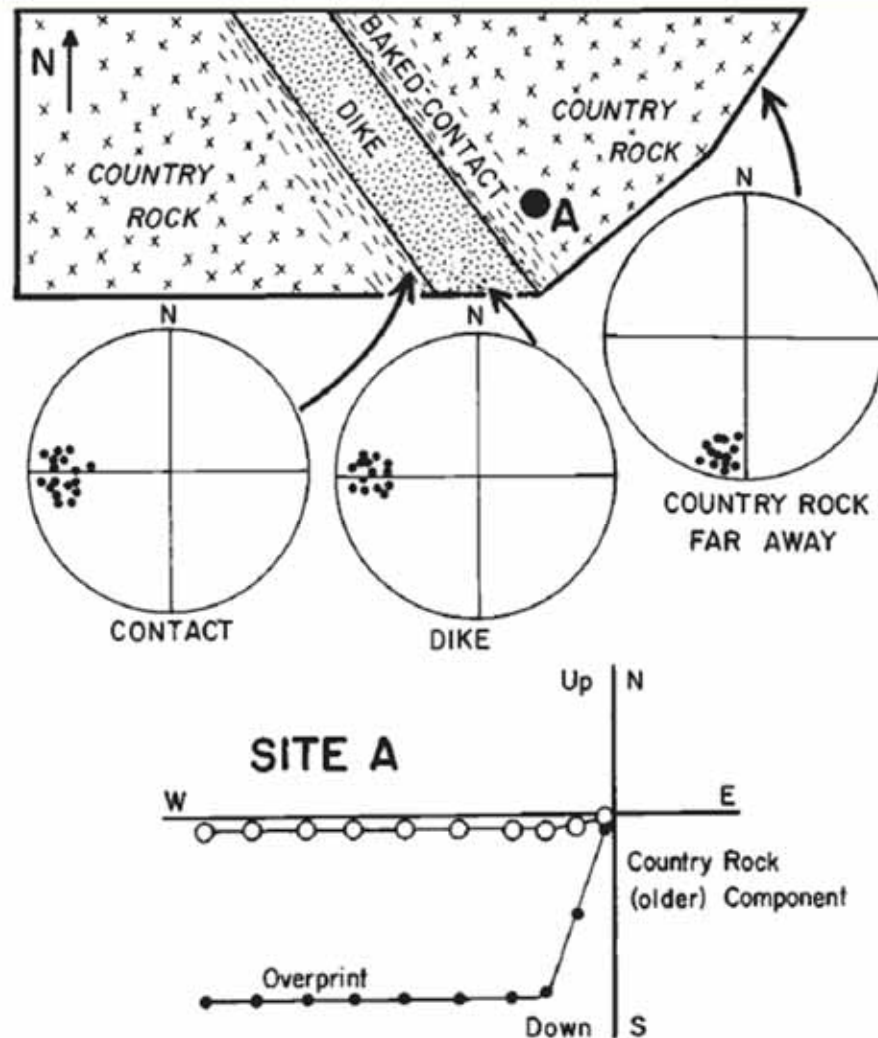
Pruebas paleomagnéticas de campo

Incluyen una serie de **estrategias de muestreo** que, combinadas con las **herramientas estadísticas** adecuadas, permiten evaluar las edades relativas de las diversas componentes magnéticas.

Las pruebas permiten datar las componentes con respecto a ciertos eventos geológicos:

- Fold/tilt test (Test de plegamiento/basculamiento)
- Test del conglomerado
- Test del contacto ígneo
- Test de la discordancia
- Test de la consistencia regional
- Reversal test (Test de la reversión, o de polaridades antípodas)

Test del contacto ígneo



Cuando un dique intruye la roca de caja, en el contacto debiera producirse una remagnetización térmica (parcial o total). Dicha remagnetización debe tener la misma dirección que la del dique, si éste porta una magnetización primaria.

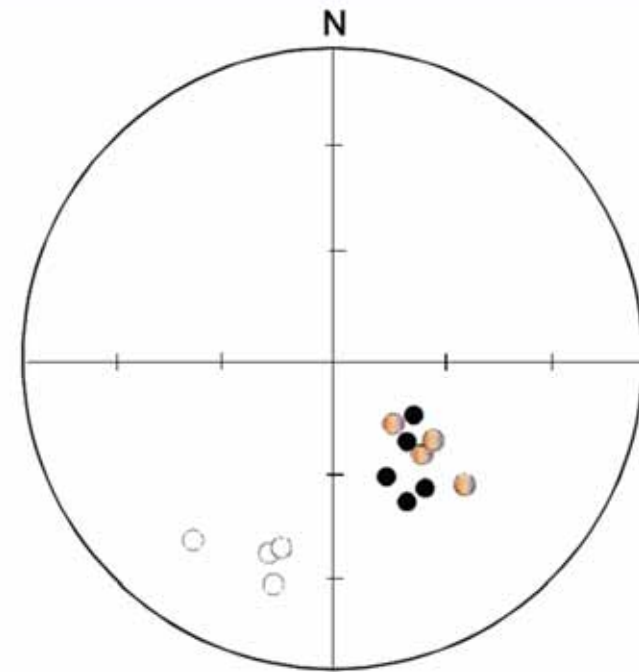
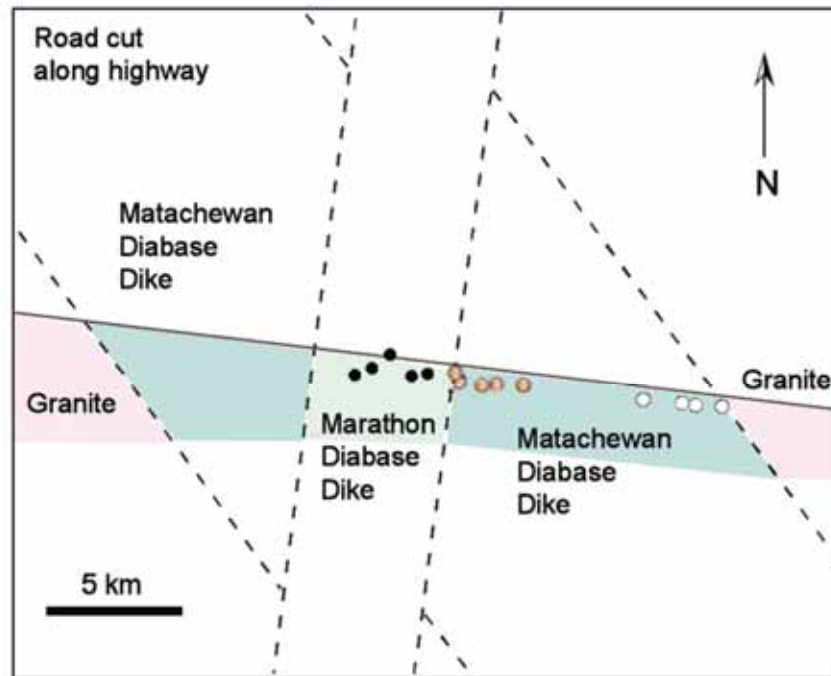
Alejado del dique la roca de caja no debiera estar afectada.

Con este patrón se obtiene un test de contacto positivo:

La remanencia del dique es primaria

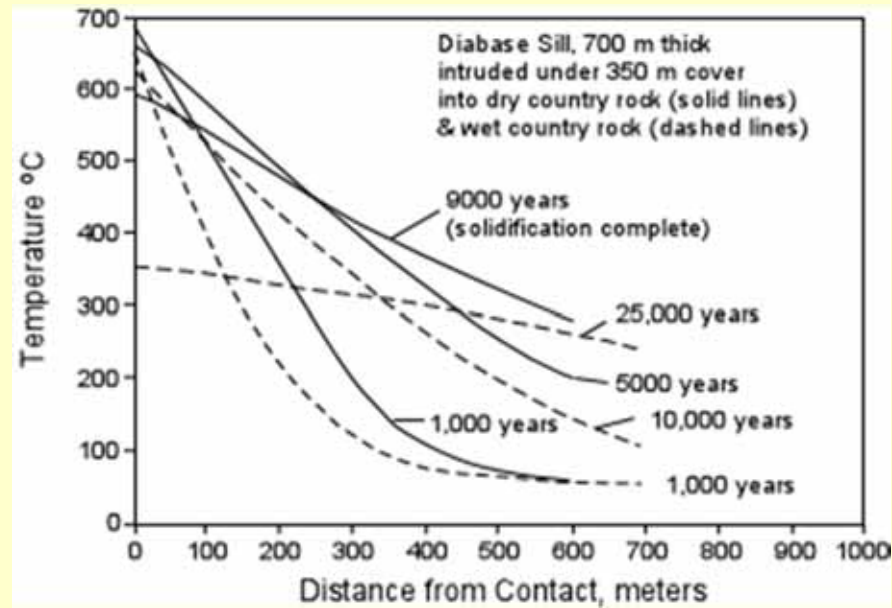
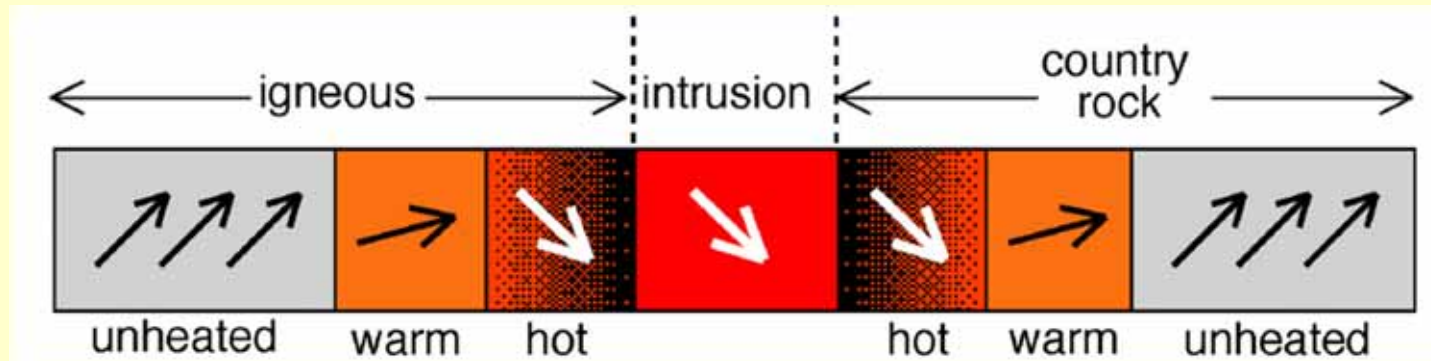
La de la roca de caja es anterior al dique

Test del contacto ígneo



Buchan et al., 1996, Can. J. Earth Sci., 30, 1286-1296

Test del contacto ígneo



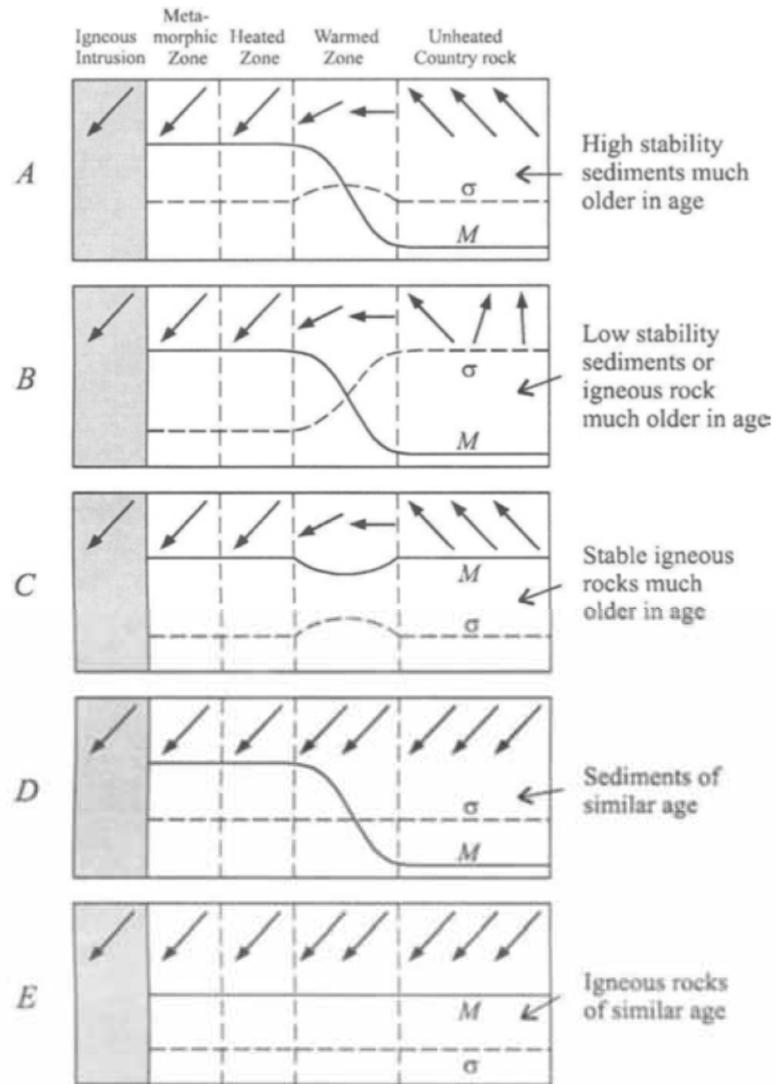


Fig. 3.8. The baked contact test. The variation in direction of magnetization (arrows), magnetization (M), and scatter (σ) with distance from an igneous intrusion in five possible situations is illustrated schematically. After Irving (1964), with permission from John Wiley & Sons.

McElhinny y
McFadden
2000

Test de la discordancia

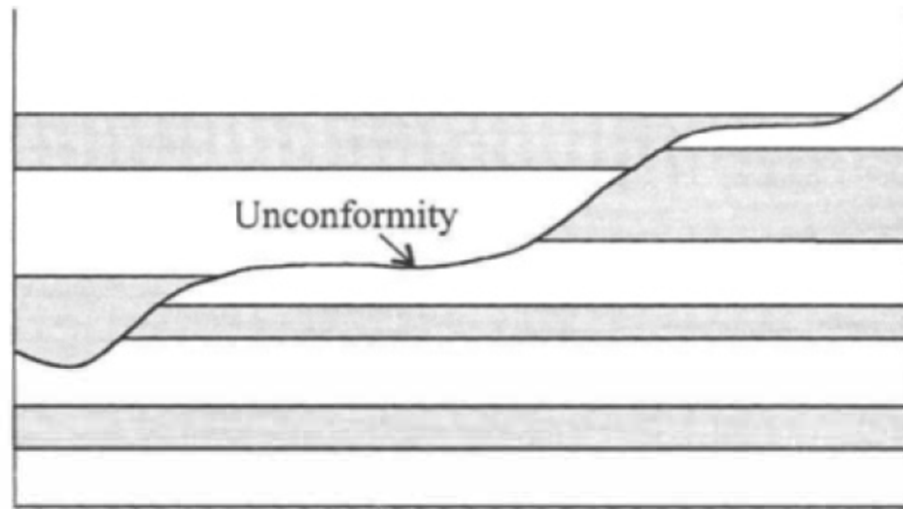


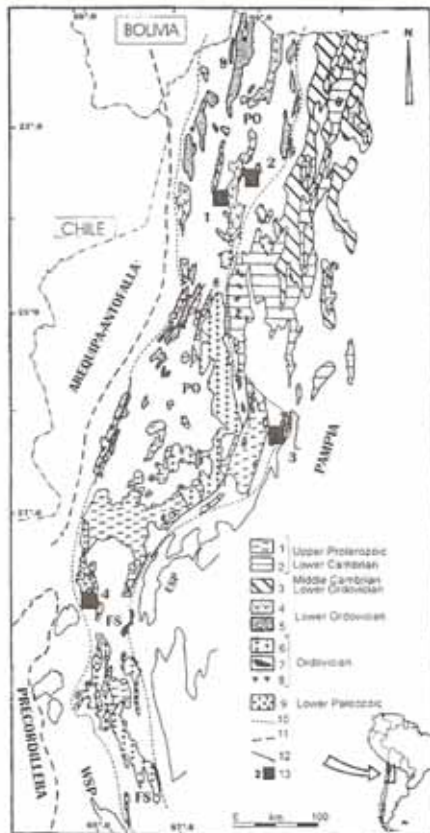
Fig. 3.9. The unconformity test. Zones of normal (shaded) and reverse (white) magnetizations in the lower sequence are truncated by an unconformity. If the polarity zonation in the upper sequence differs from that of the lower sequence, then the magnetization of the lower beds predates the unconformity. After Kirschvink (1978), with permission from Elsevier Science.

Si la discordancia está asociada a un cambio de polaridad en distintas localidades o perfiles: la magnetización por debajo de la discordancia es probablemente pre-discordancia

McElhinny y McFadden 2000

Test de la consistencia regional

La obtención de las mismas direcciones paleomagnéticas en rocas de igual edad pero de litologías diferentes en una región geográfica amplia sugiere (pero no prueba) una magnetización primaria).



Conti et al. (Geology, 1996)

Estudio paleomagnético en unidades del Ordovícico Inferior de la Puna y el Famatina

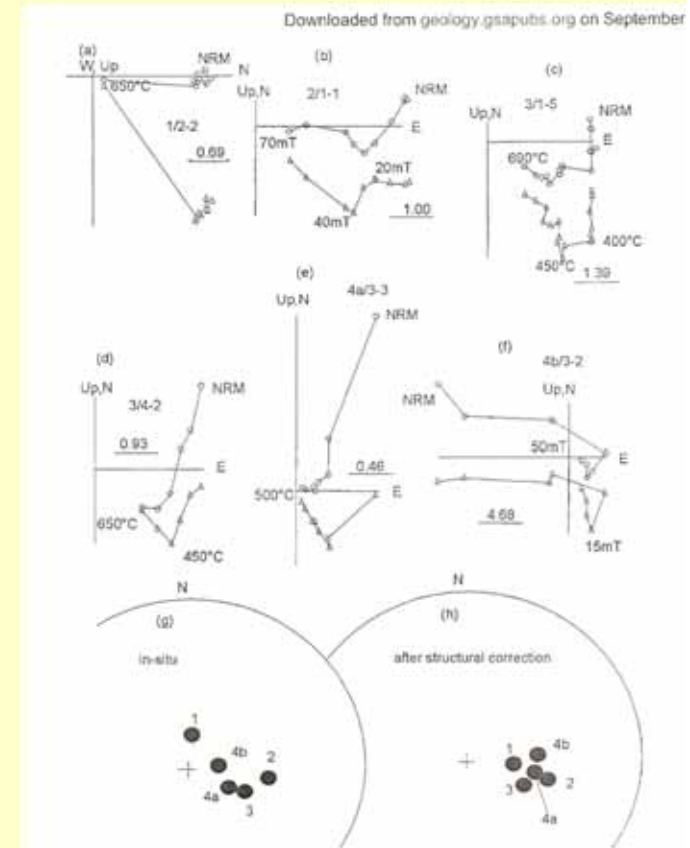
1,2: rocas sedimentarias

3: plutón

4: volcanitas

Todos presentan direcciones muy semejantes (después de la corrección estructural):

¿Magnetización primaria?



Reversal test (test de la reversión, o de polaridades antípodas)

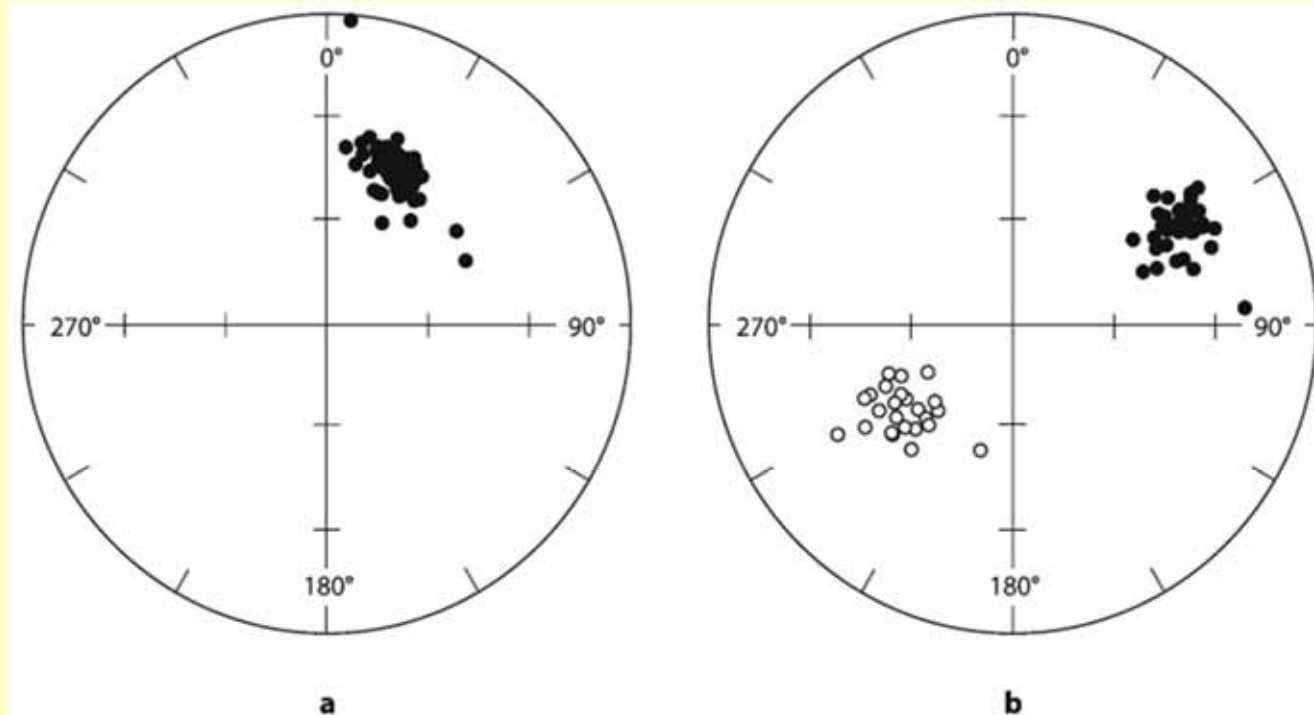
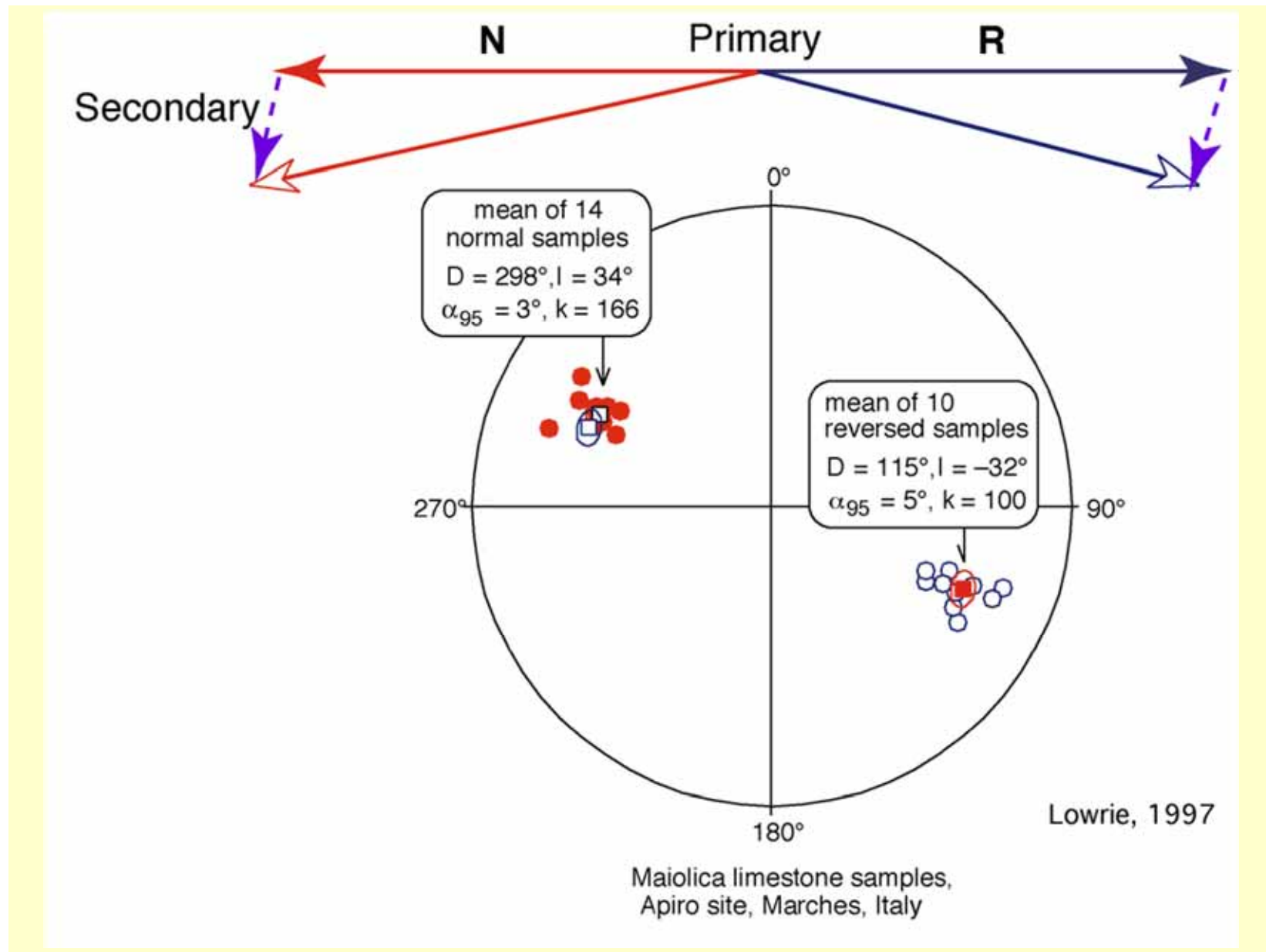
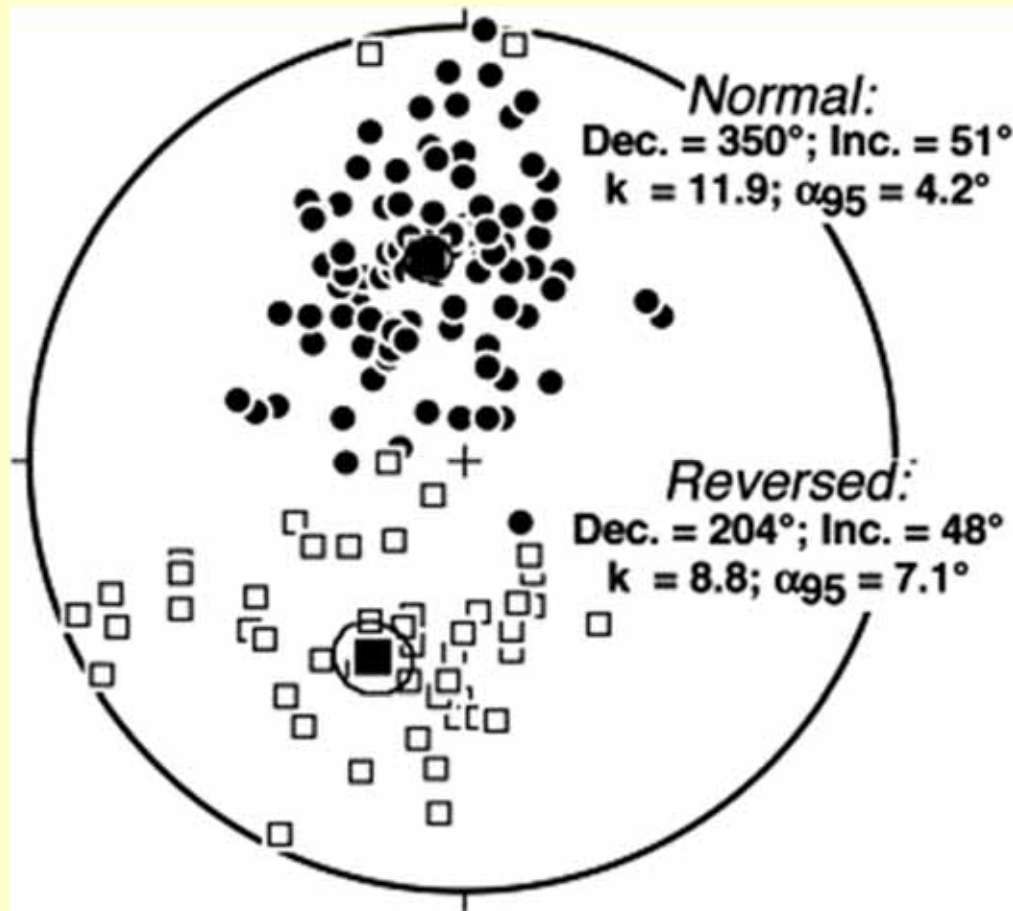


Fig. 4.23. Reversal test. Equal-area projection of NRM (a) and ChRM (b) directions (Bajocian limestones, Betic Cordillera, Spain). Symbols: *full/open dots* = positive/negative inclination. All NRM directions have normal polarity; ChRM directions after thermal demagnetization have both normal and reverse polarity. A Tertiary overprint hides the primary magnetization, which shows a succession of 5 normal and 6 reverse polarity intervals recorded in a 3-meter-thick section (courtesy C. De Giorgis)

Lanza y Meloni 2006





Reversal Test negativo

Direcciones medias de ambas polaridades no superponen sus α_{95} al llevarlas al mismo hemisferio.

Probable contaminación por una componente secundaria actual no removida

Lopez Blanco et al. (2000). Depósitos de antepais eocenos de la Cordillera de la Costa de Cataluña

El reversal test puede realizarse por simple comparación de las direcciones medias de dos poblaciones: normal y antípoda de la reversa. Si las direcciones son estadísticamente diferentes, el reversal test es negativo.

Sin embargo, cuanto mayor el círculo de confianza, más fácil es pasar el reversal test.

McFadden y McElhinny (1990) diseñaron un test estadístico basado en el ángulo crítico:

$$\cos \gamma_c = 1 - \frac{(N - R_1 - R_2)(R_1 + R_2)}{R_1 R_2} \left[\left(\frac{1}{P} \right)^{\frac{1}{N-2}} - 1 \right]$$

Si el ángulo entre las poblaciones normal y reversa es menor que el crítico, el test es positivo, pero se clasifica:

A: γ_c (ángulo crítico) $< 5^\circ$

B: $5^\circ < \gamma_c < 10^\circ$

C: $10^\circ < \gamma_c < 20^\circ$

Indefinido: $\gamma_c \geq 20^\circ$

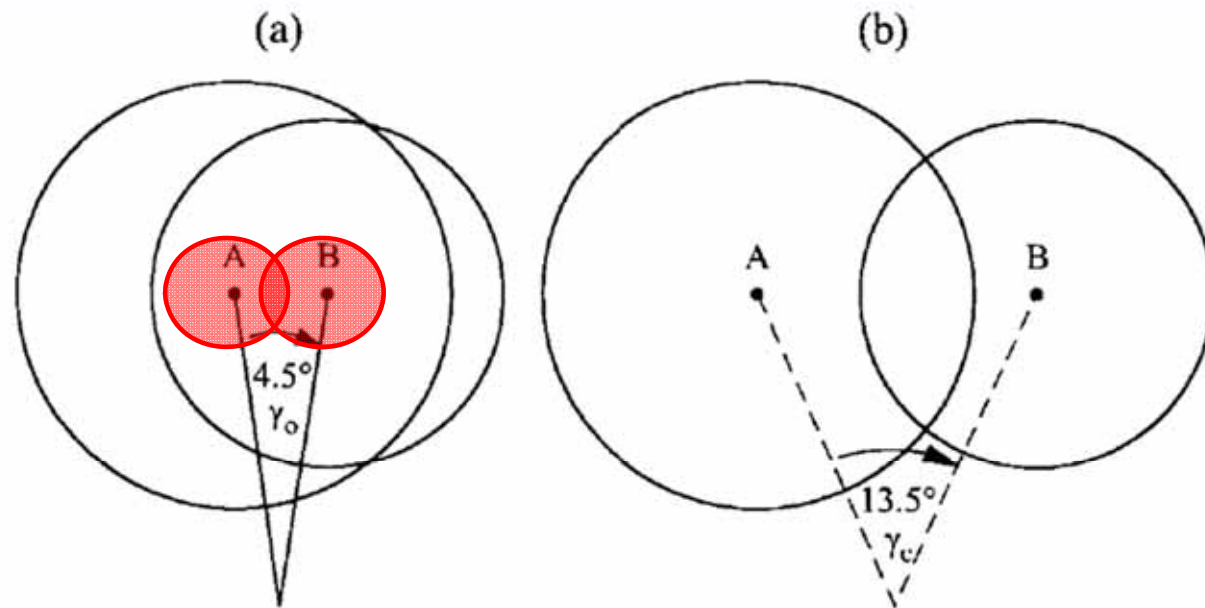


Fig. 3.11. Example of the classification of the reversals test (McFadden and McElhinny, 1990). One of the two opposing mean directions, together with its circle of 95% confidence, is rotated by 180° . (a) The two mean directions, A and B, are separated by $\gamma_o = 4.5^\circ$. (b) These must be separated by an angle $\gamma_c = 13.5^\circ$ to differ significantly at the 95% confidence limit. The reversals test is then classified as "C". Note that in (b) the circles of 95% confidence still overlap slightly following (3.2.18) in §3.2.3.

McElhinny y McFadden 2000

Reversal test

Difiere de los otros tests, en que su utilidad no es datar la remanencia.

En cambio, permite asegurar (dentro de los límites estadísticos) que no persisten componentes magnéticas secundarias.

La presencia de reversiones y su antipodalidad es un fuerte respaldo a todas las demás pruebas de estabilidad.

Estabilidad Magnética

- MRN: composición de remanencias
- Desmagnetización de la MRN
- Pruebas estadísticas de la estabilidad

Una vez establecida la estabilidad relativa de una componente magnética, se está en condiciones de compararla con las direcciones esperadas, y realizar interpretaciones paleogeográficas/tectónicas

