

Problemas de Geología Estructural

9. Análisis estructural mediante diagramas de contornos

Rosa Blanca Babín Vich¹. David Gómez Ortiz².

¹Departamento de Geodinámica. Facultad de Ciencias Geológicas.
Universidad Complutense de Madrid. José Antonio Novais, s/n. 28040-Madrid.

rosbabin@geo.ucm.es

²Área de Geología-ES CET. Universidad Rey Juan Carlos. Tulipán, s/n. 28933-Móstoles.

david.gomez@urjc.es

Resumen: La proyección de grandes conjuntos de datos puede suponer un problema debido a lo complicado que resulta sacar conclusiones a partir del análisis de diagramas con un elevado número de medidas representadas. Tal es el caso de estructuras plegadas definidas a partir de múltiples medidas de estratificación, o bien el problema de la superposición de estructuras de deformación. Se hace imprescindible entonces el uso de falsillas que conserven las áreas para realizar estudios estadísticos. Se muestran numerosos ejemplos del empleo de diagramas de contornos mediante el uso de la proyección estereográfica.

Palabras clave: Falsilla de contaje. Diagrama de contornos. Modelos de distribución.

DEFINICIONES

En los artículos anteriores, Babín y Gómez (2010 a, b, c, d, e, f, g y h), hemos usado uno de los tipos de proyección azimutal para resolver distintos problemas geométricos en Geología Estructural. Esta proyección estereográfica, como ya se ha reiterado a lo largo de las explicaciones, tiene dos propiedades importantes:

1. Conserva las relaciones angulares, de forma que el ángulo entre tangentes en el punto de intersección de dos círculos máximos que se cortan, es el mismo ángulo que el formado por los dos planos representados mediante sus círculos máximos (Fig. 1 A).
2. No conserva el área. Esto quiere decir que las proyecciones de dos círculos idénticos inscritos en diferentes partes de la esfera de proyección, aparecen en el estereograma como círculos de tamaños diferentes (Fig. 1 B y C). La proyección estereográfica de un círculo, puede variar en área dependiendo del lugar donde se proyecta. Un círculo de área conocida, aparece más grande si se proyecta cerca de la primitiva que si lo hace en el centro de la falsilla.

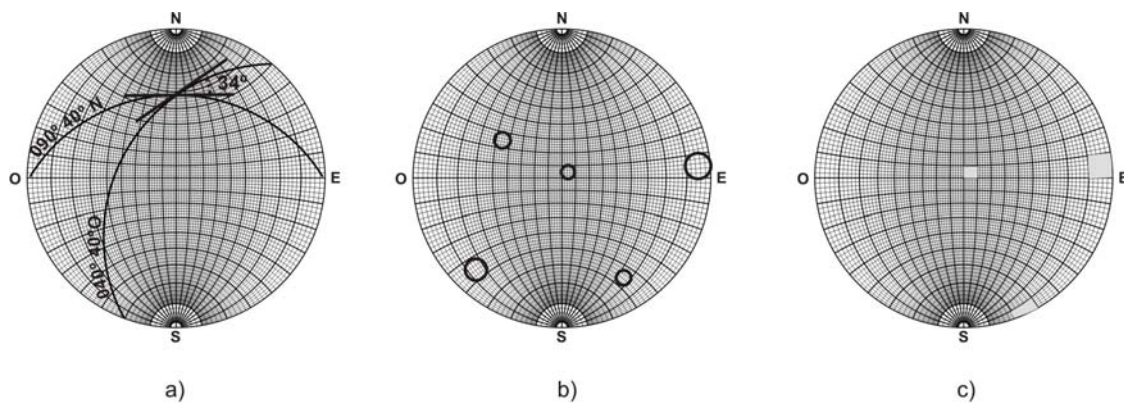


Figura 1. Propiedades de la proyección estereográfica que conserva ángulos. a) el ángulo entre dos planos, es el mismo que el formado por las tangentes a los círculos máximos que los representan. b) círculos idénticos, se proyectan en la esfera de proyección como círculos de distinto tamaño. c) un área de $10^{\circ} \times 10^{\circ}$ cercana a la primitiva, es mayor que en el centro de la proyección.

Esta última propiedad indica que la proyección estereográfica no es válida para aplicaciones en las que sea necesario un tratamiento estadístico de datos estructurales. Por ejemplo, datos sobre orientaciones preferentes de diaclasas en un área, pueden aportar información de campos de paleoesfuerzos. La orientación de estas diaclasas se puede representar en un diagrama en rosa o en un histograma, pero estos gráficos solo aportan información en dos dimensiones.

Una proyección azimutal apropiada puede representar una orientación preferente en tres dimensiones como un conjunto de polos, si la concentración de polos por unidad de área de la proyección es proporcional a la concentración real de planos de una orientación determinada. En problemas en los que la distribución estadística de puntos es importante, existe una forma alternativa de proyección azimutal, llamada proyección Lambert o proyección que conserva áreas. La falsilla utilizada para este tipo de proyección es la de Schmidt, en la que el tamaño de un área de $10^{\circ} \times 10^{\circ}$ cerca de la primitiva es el mismo que en el centro de la falsilla (Fig. 2 A y B).

A menudo existe una cierta confusión con los nombres asignados a distintos tipos de proyecciones azimutales. Una **proyección estereográfica** es un tipo de proyección azimutal que utiliza la **falsilla de Wulff (estereoneta)** para obtener un estereograma, que es el conjunto de puntos o curvas (círculos mayores) proyectados en una proyección estereográfica. Una **proyección que conserva el área**, no es una proyección estereográfica propiamente dicha, y la **falsilla** utilizada es la **de Schmidt** (Fig. 3), que es distinta de la estereoneta. Formalmente, el término **estereoneta** se usa solo para la proyección estereográfica, que conserva ángulos. Sin embargo, en la práctica los geólogos usamos el término **estereoneta** tanto cuando nos referimos a la falsilla de Wulff como a la de Schmidt.

En algunos casos puede ocurrir que no sepamos cual de las dos falsillas utilizar para resolver un problema concreto. Se debe usar la **falsilla de Schmidt** en todos

aqueellos casos donde la concentración de puntos proyectados es significativa, por tanto, en todos aquellos análisis con un gran número de medidas. Usaremos la de [Wulff](#) para medir ángulos entre estructuras y en todos aquellos problemas donde líneas, planos y polos se vayan a utilizar para cálculos geométricos.

En este artículo vamos a introducir la proyección que conserva áreas y a estudiar algunas de sus aplicaciones en los análisis estructurales.

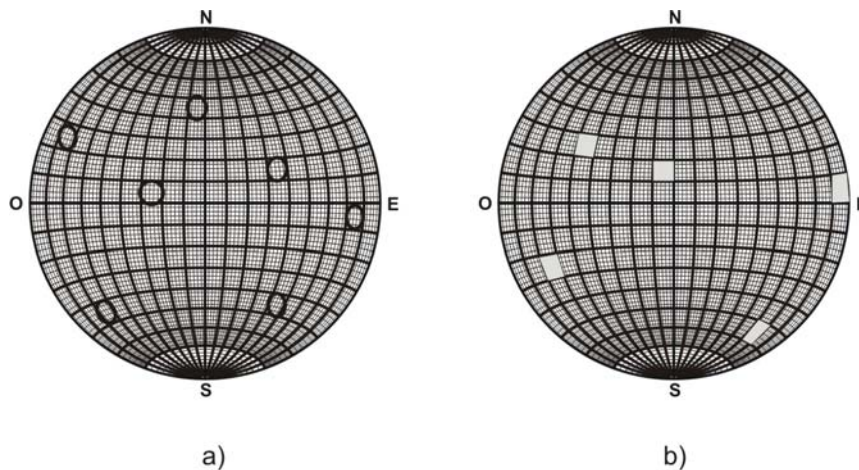


Figura 2. Propiedades de la proyección estereográfica que conserva áreas. a) círculos idénticos en la esfera de proyección se proyectan como elipses, con distintos ejes pero con igual área. b) área de $10^{\circ}\times 10^{\circ}$ en el extremo de la proyección, es del mismo tamaño que en el centro.

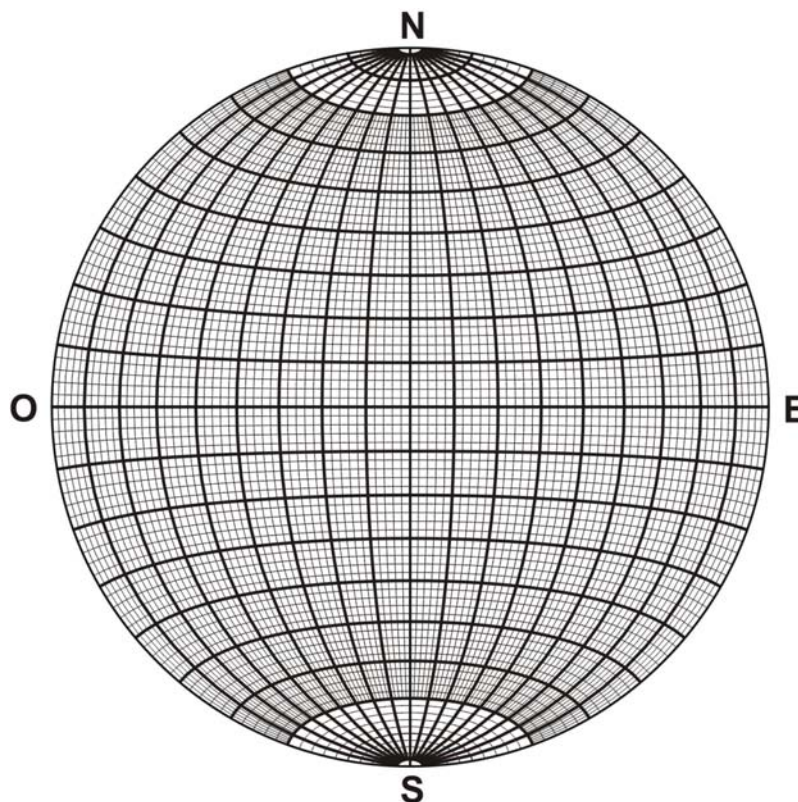


Figura 3. Falsilla de Schmidt, que conserva áreas.

DIAGRAMAS DE CONTORNOS

Cuando se ha recogido un gran número de datos en el campo, su proyección muestra un conjunto de puntos, bien polos de planos o bien líneas. Una proyección que muestra solo puntos, recibe el nombre de [diagrama de puntos](#). En muchas ocasiones es posible estimar la orientación dominante de un determinado elemento estructural en el área de estudio, pero si queremos obtener una representación más precisa de las variaciones en orientación, debemos cuantificar el número de puntos por unidad de área de la proyección. Esta cuantificación debe efectuarse en una falsilla que conserve el área, y así podemos reconocer variaciones en la orientación preferente del elemento estructural, medido en diferentes localidades. La mejor manera de representar estas variaciones en la concentración de puntos, es dibujando líneas de contornos que delimitan áreas determinadas.

Una línea de contorno en una proyección que conserva el área, separa zonas dentro de la proyección en las que las densidades de puntos se mantienen dentro del mismo área. Estas densidades se miden como porcentajes del número total de puntos por 1% del área del estereograma y se dibujan las líneas de contornos separando zonas en las que el porcentaje de puntos totales por 1% de área tenga un valor específico (2%, 3%, etc.). Así obtenemos lo que se denomina [diagrama de contornos](#).

Es necesario tener en cuenta ciertas reglas, a la hora de confeccionar diagramas de contornos:

- Se debe escoger el valor de los contornos, de forma que no haya más de seis contornos en el diagrama final (a ser posible), para una mayor claridad a la hora de la interpretación.
- El contorno de menor valor del diagrama, generalmente corresponde a 1 punto por 1% de área. El de mayor valor se escoge en función del número de puntos proyectado.
- Un contorno que cruza la primitiva, debe reaparecer en el punto diametralmente opuesto del estereograma.
- Es más fácil comenzar dibujando los contornos en el área de mayor concentración.
- Es necesario determinar el verdadero máximo del diagrama (área de mayor concentración de puntos).
- Después de un contaje preliminar, a veces es necesario añadir contornos, o bien eliminar algunos si las líneas de porcentaje están demasiado cerca unas de otras.

- Los valores de los contornos se indican en una leyenda con la trama (o el color) utilizada para cada valor de porcentaje. Por ejemplo, 1-3-5 y 9 por 1% de área, con un máximo del 10%. El área de mayor concentración suele ser la de color o trama más oscura. Hacia áreas de menor porcentaje, va decreciendo el tono de color o de trama, siendo muy claro o blanco en áreas de baja concentración.
- Generalmente se presentan los diagramas de contornos al lado del diagrama de puntos correspondiente, de forma que la suma de datos más la interpretación, sea lo más objetiva posible.

Una vez obtenido el diagrama de contornos, las orientaciones dominantes de las estructuras principales se determinan a partir de la posición en el diagrama de aquellas concentraciones donde aparezcan mayor número de puntos. Es una práctica común abstraer estos datos proyectando por separado las orientaciones de los elementos estructurales principales de una región. Un diagrama en el que se representa la orientación dominante de los elementos estructurales mediante un único círculo mayor o punto, recibe el nombre de **diagrama sinóptico**.

Actualmente los diagramas de contornos se construyen directamente en el ordenador, pero es importante comprender los principios del contaje para usar correctamente estos métodos gráficos. Se pueden utilizar distintos métodos para construir diagramas de contornos, algunos muy versátiles y de uso fácil incluso en el campo. Para la mayor parte de ellos, es conveniente usar una falsilla de 15 cm de diámetro, Anexo I.

MÉTODOS DE CONTAJE DE ELEMENTOS ESTRUCTURALES

Como ya se ha dicho, la evaluación de los datos proyectados requiere un tipo especial de falsilla. Si utilizamos la falsilla de Wulff para su proyección, como hemos hecho hasta ahora, la distribución resultante no es estadísticamente correcta. Hay una tendencia a la concentración de gran parte de los datos en el centro de la falsilla, lo que indicaría, en el caso de líneas, una disposición preferente en posición vertical. Este hecho es debido, como ya se ha indicado, a que un área determinada en el centro de la falsilla es menor que la misma en el margen. Debido a esto, se usa la falsilla de Schmidt, en la que la técnica de proyección y manipulación de datos es idéntica a la de Wulff. La única diferencia entre las dos, es que los círculos menores en la primera no se proyectan como arcos circulares.

Una vez preparado el diagrama de puntos, pasamos a efectuar el contaje para obtener el diagrama de contornos o de densidades. Para ello, hay gran variedad de métodos de contaje, de los que vamos a explicar los más utilizados.

Falsilla de Kalsbeek

Es uno de los métodos más simples que existen para el contaje de puntos, y se aplica en cualquier tipo de situaciones. Se trata de una falsilla que está subdividida en pequeños triángulos (Fig. 4 A). Cada conjunto de seis triángulos forman un área hexagonal igual al 1% del área total de la falsilla. Los triángulos están dispuestos de forma que en la falsilla aparecen seis líneas radiales. Además, tiene la ventaja de la existencia de una relación fija entre el número total de puntos y la densidad contada.

Cada punto se cuenta tres veces y se procede de la siguiente manera:

- Superponer el transparente con el diagrama de puntos sobre la falsilla de contaje, con la marca del norte del transparente sobre el extremo de uno de los seis radios.
- Colocar un segundo transparente, dibujar en él la primitiva y la marca del norte, situada sobre la anterior.
- Se cuentan los puntos correspondientes a cada hexágono, y el número total se anota en el centro del hexágono (A en Fig. 4 B).
- Al final del contaje, cada centro de hexágono debe tener un número. En aquellas zonas del diagrama donde no haya puntos, los hexágonos se dejan en blanco o bien se pone un cero en su centro.
- En la periferia de la primitiva, los puntos de cada medio hexágono en un lado de la primitiva se suman con los del otro medio hexágono del lado opuesto. El número total se escribe en ambos lados de la primitiva (B en Fig. 4B).

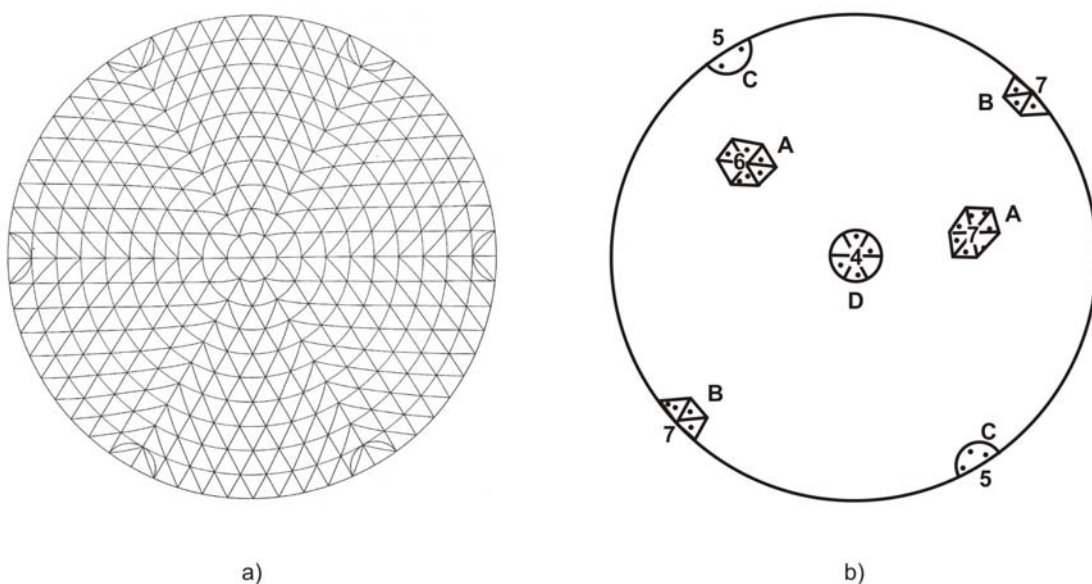


Figura 4. a) Falsilla de contaje de Kalsbeek. b) Método de contaje con la falsilla. Ver texto para su explicación.

- En aquellas partes de la periferia, donde aparecen medios círculos (sobre los seis radios), se cuentan los puntos de los semicírculos opuestos y se suman, poniendo el número de puntos en ambos lados (C en Fig. 4B).
- En el centro de la falsilla, aparece un círculo formado por seis “triángulos”, en lugar de un hexágono. Se cuentan todos los puntos incluidos en este círculo y se pone el número correspondiente en su centro (D en Fig. 4B).
- Una vez terminado el contaje, se transforman los números en porcentajes del número total de puntos, y en base a ellos, dibujamos los contornos de igual densidad, que delimitan las áreas con los porcentajes elegidos.

Ejemplo 1. Para facilitar la comparación de diagramas con distinto número total de puntos, se dibujan los contornos como porcentajes de puntos totales por 1% de área de la falsilla. El número de puntos proyectado, por tanto, debe ser convertido en porcentaje. En el caso especial de que los puntos proyectados sean exactamente 100, un punto representará el 1% y así sucesivamente. Si son 50 puntos los proyectados, cada punto representa un 2% del total, etc. (Fig. 5 A).

Dentro ya del diagrama, dibujamos los contornos de igual densidad (Fig. 5 B). Es más sencillo localizar primero el área de mayor concentración y trabajar hacia la parte externa del diagrama.

Cuando un contorno intersecta la primitiva, reaparece exactamente en el lado opuesto, a 180° (puntos A y A en Fig. 5 B). Al ser los contornos líneas que separan áreas de porcentaje, son siempre curvas cerradas.

En el caso de un contorno que está muy próximo a intersectar la primitiva, pero inmediatamente se aleja de ella, es válido continuar el propio contorno sin intersectar la primitiva (puntos B y B en Fig. 5 B).

Cuando ya se ha efectuado un contaje preliminar (Fig. 5 A), por lo general es necesario hacer una serie de modificaciones para mejorar el diagrama:

- Todos los contornos dibujados pueden no ser necesarios. Si el espaciado entre contornos es muy pequeño, alguna de las líneas dibujadas se puede eliminar.
- Los valores de los contornos en el diagrama final se indican en la leyenda; por ejemplo como 2-4-8-12% por 1% de área, máximo 14%.
- El área donde aparece la máxima concentración se pinta de negro o bien, se distingue con una trama muy oscura. Es bastante efectivo utilizar tramas gradualmente más claras según las áreas van siendo de menor concentración.

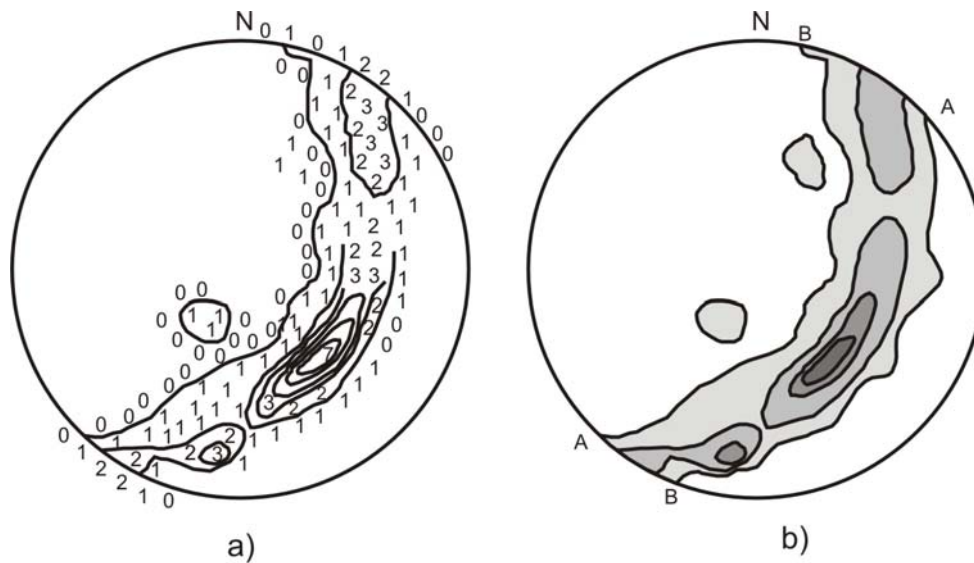


Figura 5. a) diagrama de puntos y primer contaje. b) diagrama de contornos final, con contornos de 2, 4, 8 y 12% y un máximo de 14%, sobre un total de 50 puntos proyectados.

Método de contaje de Schmidt

Es, junto con el anterior, el método de contaje más usado, ya que trabaja muy bien con amplios conjuntos de datos y con altas concentraciones de puntos. Requiere el empleo de una regleta especial o contador, por ello a veces se le nombra como “[método de la regleta](#)” y de una malla de contaje o malla de Schmidt (Fig. 6 A), como la que aparece al final del libro. Para trabajar con este método es necesario, en primer lugar, obtener la regleta de contaje, que se puede fabricar fácilmente con un cartón o con un plástico que permita recortar la forma de la regleta.

Una [regleta de contaje](#) o [contador de Schmidt](#), contiene dos agujeros circulares en ambos extremos (Fig. 6 B). El área de cada uno de ellos es igual al 1% del área total de nuestra falsilla de proyección. Es fácil comprender que se necesitan dos círculos diametralmente opuestos para contar puntos sobre la circunferencia primitiva y en sus cercanías, mientras que para el contaje en la parte interna, solo se necesita un círculo.

Las falsillas de proyección que utilizamos, tienen un diámetro de 15 cm, así como la malla de Schmidt, por tanto en la regleta, la distancia entre los centros de los círculos opuestos debe ser de 15 cm. Su longitud total puede ser de 18 ó 19 cm y su anchura de 3,5 ó 4 cm.

En el Anexo II se incluye un contador de estas características.

Una vez obtenido el contador, el procedimiento para el contaje es el siguiente:

- **Contaje interno**

- ✓ Colocar sobre la malla el diagrama de puntos, obtenido con una falsilla que conserva áreas, de forma que coincidan las dos primitivas y los nortes de las dos falsillas.
- ✓ Colocar sobre el diagrama de puntos, un segundo transparente donde está dibujada la primitiva, como un círculo de 15 cm de diámetro, y una marca representando el norte. Esta debe coincidir con el norte del diagrama de puntos.
- ✓ Colocar uno de los dos círculos del contador de forma que el centro del círculo coincida con un punto de la malla, usando como guía la línea horizontal que pasa por el centro del círculo (Fig. 7 A). El número de puntos visibles dentro del círculo representa el número de puntos por 1% de área. Este número lo ponemos en el centro del círculo.
- ✓ Movemos el contador hasta que su centro se sitúe sobre el punto siguiente de la malla y repetimos el procedimiento. Esto se lleva a cabo para todos los puntos de la malla, y en aquellos en los que no haya puntos (líneas o polos de planos), se dejan en blanco o se pone un cero.

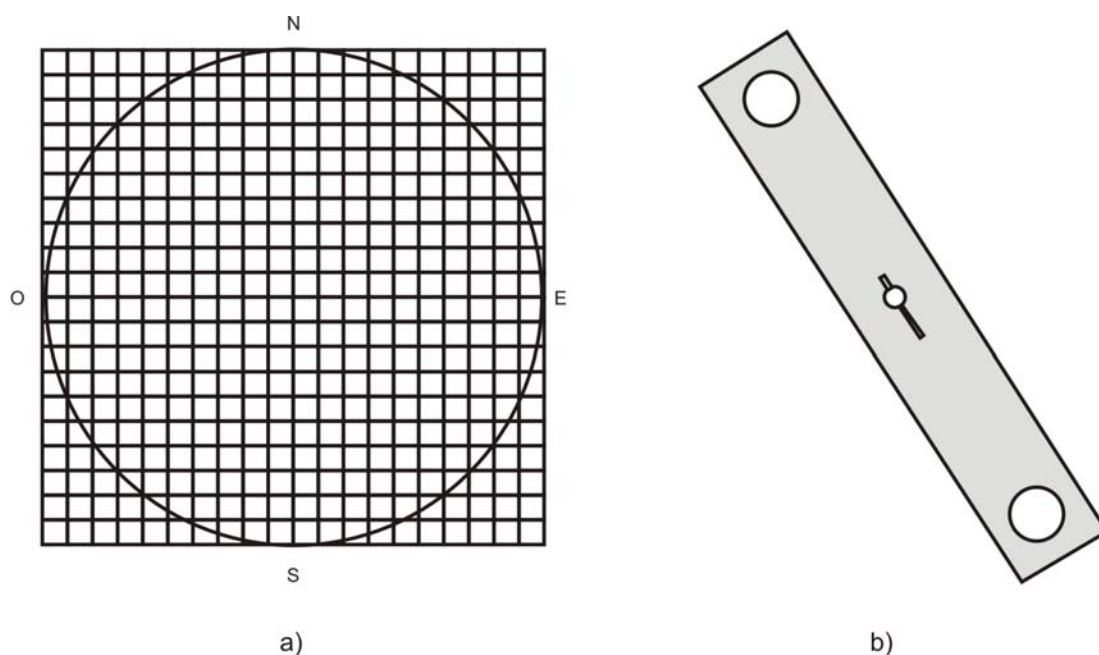


Figura 6. a) malla de contaje de Schmidt. b) contador o regleta de contaje de Schmidt.

- **Contaje externo o periférico**

- ✓ En la zona periférica, cerca de la primitiva, necesitamos utilizar ambos círculos del contador.

- ✓ Colocamos una chincheta en el centro de la falsilla, y la muesca de la parte central del contador, se mueve con la chincheta en medio hacia ambas partes de la periferia.
- ✓ Los puntos dentro de ambos círculos y diametralmente opuestos en la proyección, se cuentan juntos (Fig. 7 B), teniendo siempre como centro de ambos círculos los puntos de la malla. El valor correspondiente a la suma de puntos se coloca en ambos centros.
- ✓ El conteo sobre la primitiva propiamente dicha, se hace con el centro de la regleta colocado en el centro de la falsilla, de forma que la suma de los puntos correspondientes a la mitad de cada uno de los círculos opuestos, se coloca sobre la primitiva, en ambos lados. De esta forma sabemos los puntos diametralmente opuestos de entrada y salida de una curva concreta, para cada uno de los contornos.

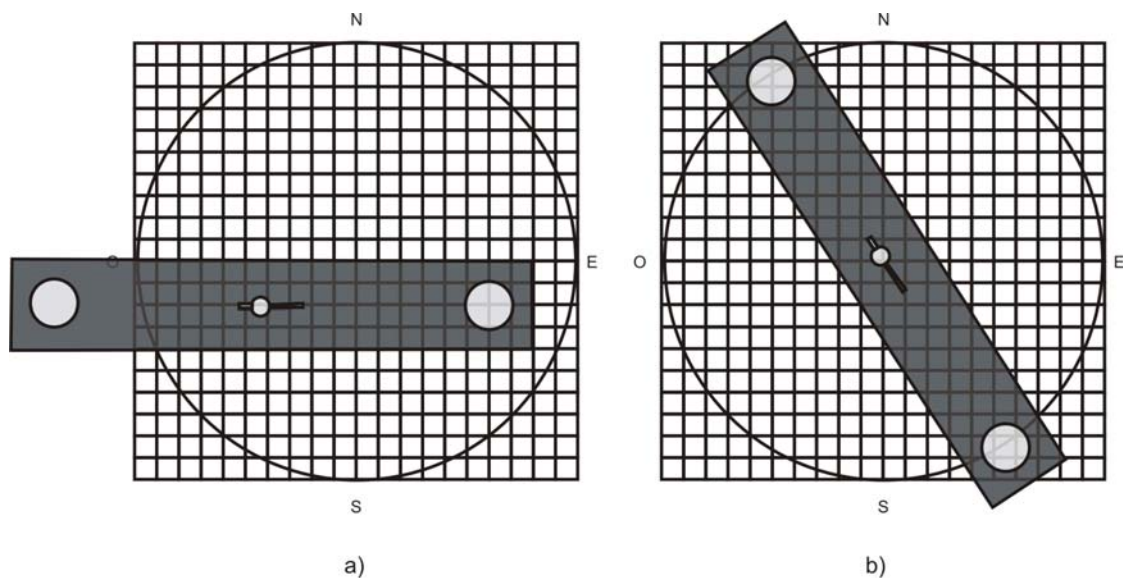


Figura 7. Uso del contador de Schmidt. a) para puntos situados en el interior de la falsilla. b) para puntos situados cerca de la primitiva.

En este momento, todas las intersecciones de la malla de conteo, tienen un número escrito sobre el transparente superior (Fig. 8 A). Convertimos este número de puntos (n) en porcentaje mediante la ecuación:

$$n \times (100)/N = \%$$

donde N es el número total de puntos proyectados. Dibujamos los contornos con los intervalos correspondientes, según las densidades de puntos obtenidas (Fig. 8 B).

Método de conteo de Mellis

Este método únicamente se puede utilizar cuando el diagrama de puntos tiene un número inferior a 100, o preferentemente, a 60. Por tanto, solo es válido para pequeñas concentraciones locales, y es muy conveniente para separar contornos de poca densidad.

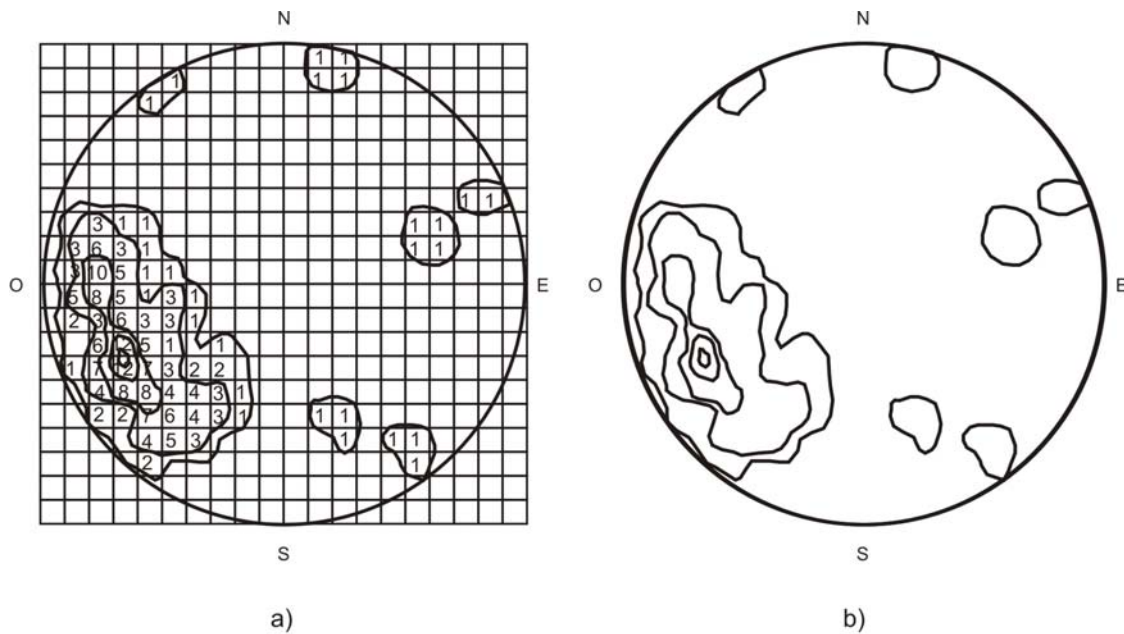


Figura 8. Resultado del conteo con el método de Schmidt. a) conteo de 72 medidas de foliación. b) diagrama de contornos con valores de 1, 3, 7 y 11%. Máximo de 15%.

Para efectuar el conteo es necesario construir una plantilla con un círculo cuyo diámetro sea 1,5 cm, equivalente al 1% del área total de la proyección, de la misma forma que lo hemos hecho en el caso anterior.

- Colocar un transparente sobre el diagrama de puntos, haciendo coincidir los nortes de ambos.
- Colocar la plantilla sobre los transparentes y moverla de forma que esté alineada con la flecha que marca el norte.
- Dibujar un círculo de diámetro 1,5 alrededor de cada punto de la población. Las áreas de solape de dos círculos tienen una concentración que equivale al doble de la de un círculo individual. Cuando solapan tres círculos, la zona de solape equivale al triple de la concentración de un único círculo. Por tanto, obtenemos áreas que representan el doble y el triple del porcentaje, respectivamente.
- Repasar y separar las áreas de distintas concentraciones de puntos y distinguirlas mediante una trama o color (Fig. 9).

Este método de contaje es el menos subjetivo. Los resultados son siempre los mismos para la misma población, aunque el diagrama lo confeccionen distintas personas. Sin embargo, está limitado a pequeñas poblaciones y bajas concentraciones y es obvia la dificultad de su uso para poblaciones mayores, en el caso de solape entre cuatro o más círculos.

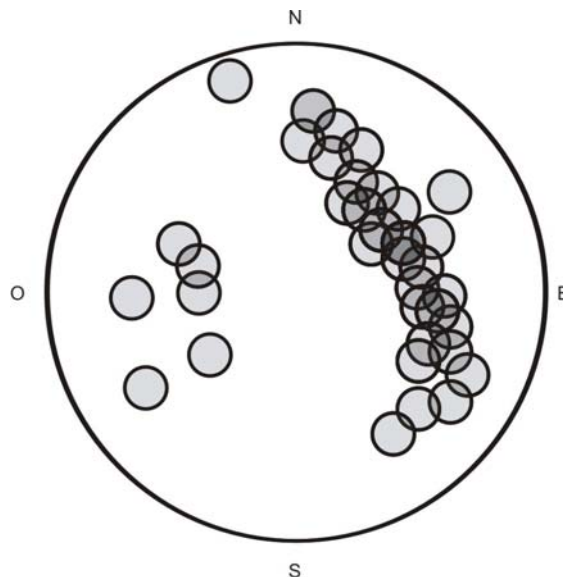


Figura 9. Método de contaje de Mellis. Diagrama con contornos de 3 y 6% sobre medidas de 36 polos de estratificación.

MODELOS DE DISTRIBUCIÓN EN LOS DIAGRAMAS DE PUNTOS

La distribución de puntos expresa gráficamente el grado de orientación preferente de un elemento estructural determinado (lineación, diaclasado, etc.). La llave para interpretar la proyección radica en reconocer el modelo de distribución de puntos, tanto referente a estructuras lineares como a polos de planos. Este reconocimiento siempre es más fácil de llevar a cabo a partir de un diagrama de contornos. Existen cuatro modelos principales que podemos reconocer, y son los siguientes (Fig. 10):

- **Distribución uniforme.** Se expresa de forma que el conjunto de puntos proyectados no presenta concentraciones locales. Cuando esto sucede, se dice que la proyección está uniformemente distribuida (Fig. 10 A).
- **Punto máximo.** La orientación preferente de elementos estructurales está representada por una alta concentración de puntos, simétricamente distribuidos alrededor de una única orientación principal. El centro de esta concentración recibe el nombre de punto máximo o simplemente, máximo. Un conjunto de datos individuales puede mostrar más de un punto máximo (Fig. 10 B).

- **Guirnalda de círculo máximo.** Una concentración de puntos que se dispone a lo largo de un arco que se aproxima o bien que coincide con un círculo mayor, recibe el nombre de guirnalda de círculo máximo (Fig. 10 C). Dentro de una guirnalda, a su vez, pueden coexistir uno o varios puntos máximos. En algunos casos, puede haber intersección de dos guirnaldas, dando lugar a un modelo de guirnaldas cruzadas.

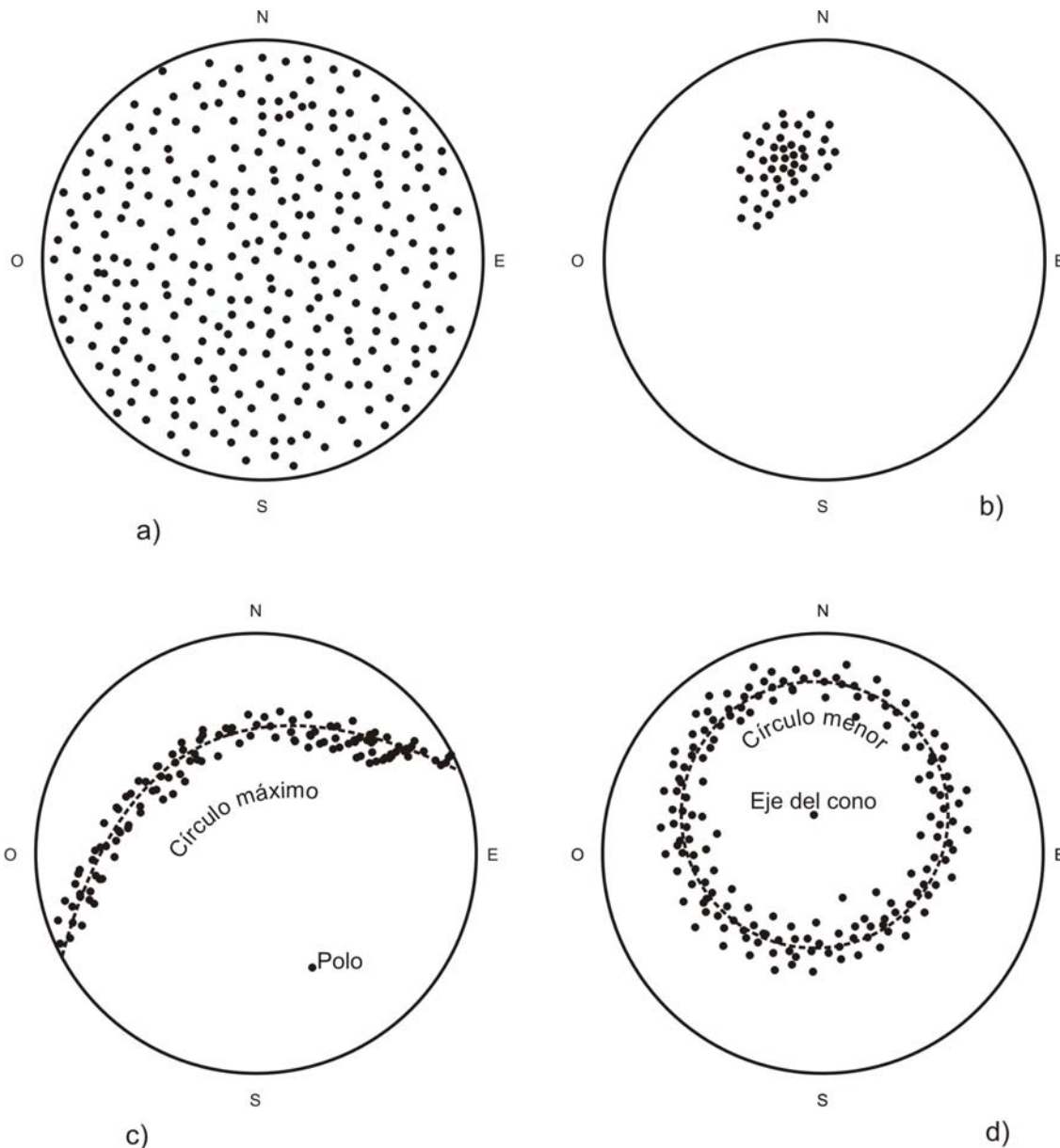


Figura 10. Modelos de distribución de puntos en los diagramas: a) distribución uniforme. b) punto máximo. c) guirnalda de círculo máximo. d) guirnalda de círculo menor.

En el caso de elementos lineales proyectados, la existencia de este tipo de guirnalda indica que todas las lineaciones están contenidas en un plano, pero no son

paralelas entre sí. En todos los casos, la guirnalda se aproxima a la orientación del plano que contiene a las lineaciones, y su eje es el polo del plano.

Un modelo en guirnalda para polos de elementos planares, indica que la intersección de los planos es según una única línea, o bien que todos los planos se cortan según una línea. Por ejemplo, caso de proyección de polos de estratificación correspondientes a un pliegue cilíndrico. El polo del plano que engloba todos los polos de estratificación, indica la orientación del eje del pliegue.

Guirnalda de círculo menor. Se define como una concentración de puntos a lo largo de un arco que se aproxima a un círculo menor de la falsilla y puede contener uno o varios máximos. Tanto para elementos lineares como planares, este tipo de guirnalda indica una orientación preferente en un cono, alrededor de un único eje que es el eje de la guirnalda (Fig. 10 D).

También podemos describir la disposición de puntos dentro de una proyección que conserva áreas, en términos del tipo de simetría observada, por analogía con la descripción de grupos de puntos en cristalografía. Por ejemplo, un pliegue puede ser descrito como de simetría ortorrómbica o monoclinica, dependiendo de la disposición de los polos de estratificación.

INTERPRETACIÓN DE DIAGRAMAS. ANÁLISIS DEL PLEGAMIENTO

La llave para interpretar un diagrama de puntos es el análisis de su diagrama de contornos. La equivalencia de las distribuciones de elementos lineares y planares es la siguiente:

- **Punto máximo.** Representa una distribución simétrica de puntos dispuestos alrededor de una única orientación principal.
- **Guirnalda.** Representa una agrupación de puntos dispuesta según una banda que coincide con un círculo mayor de la falsilla de proyección.

Desde el punto de vista geométrico y de forma sencilla, podemos definir un pliegue, simplemente, como una superficie curvada, y en función de sus características lo podemos clasificar en dos tipos básicos:

- **Pliegues cilíndricos.** Generados por una línea recta imaginaria, que se mueve en el espacio paralelamente a sí misma. Esta línea es el eje del pliegue.
- **Pliegues no cilíndricos.** Generados por una línea que se mueve de forma no planar en el espacio. Si uno de los extremos de la línea está fijo, el pliegue resultante recibe el nombre de **pliegue cónico**. Si el movimiento de la generatriz

es poco sistemático, el resultado es un **pliegue complejo**. Para trabajar con este tipo de pliegues, se subdividen en partes que son aproximadamente cilíndricas.

A continuación vamos a analizar la geometría de las superficies cilíndricas y cónicas tanto con diagramas β como con diagramas π , en una proyección que conserva el área.

Diagramas β en pliegues cilíndricos

Cada segmento de la superficie plegada de un pliegue cilíndrico, contiene una línea que es paralela al eje del pliegue. Cada dos planos de la superficie plegada se cortarían a lo largo de una línea que es paralela al eje del pliegue.

En una proyección que conserva el área, los círculos mayores representan las distintas orientaciones de la superficie plegada en diferentes puntos del pliegue, que teóricamente, en un pliegue perfectamente cilíndrico, deben tener un punto común de intersección que representa la orientación del eje del pliegue. Este punto generalmente se llama eje β .

En la práctica, sin embargo, los pliegues reales no son perfectamente cilíndricos, y las medidas de dirección y buzamiento tomadas en distintos puntos del pliegue producen círculos máximos que no se cortan en un punto común, sino en puntos más o menos próximos (Fig. 11). Para un conjunto de n planos, el número de posibles intersecciones (N) viene dada por la siguiente progresión aritmética:

$$N = 0+1+2+\dots+(n-1) = n(n-1)/2$$

Por tanto, en el caso de 25 planos proyectados, el número de intersecciones posibles es de 300. El diagrama de contornos de los puntos de intersección dará la posición de la máxima concentración de intersecciones.

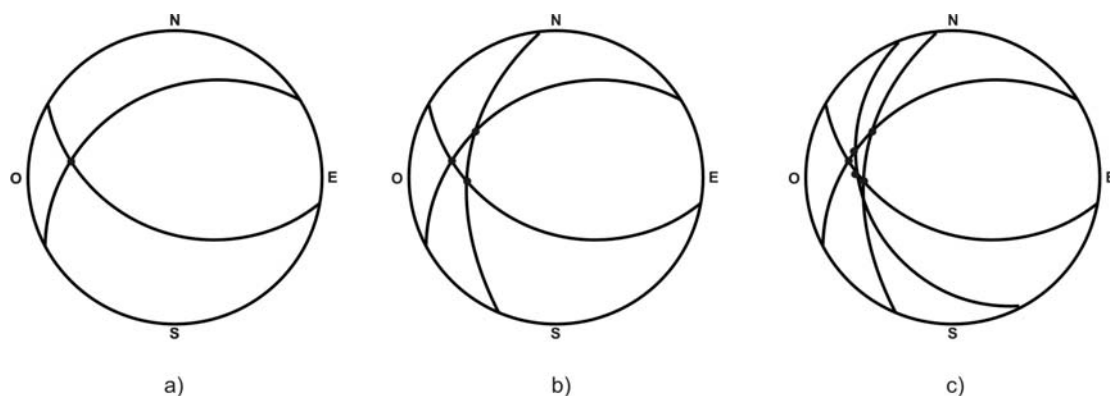


Figura 11. Diagramas β de un pliegue cilíndrico. El número de intersecciones de círculos máximos, se incrementa cuanto mayor es el número de planos proyectados.

Es evidente que una proyección de este tipo, con gran cantidad de elementos, no es el mejor camino para representar las medidas de superficies de estratificación de un pliegue. En primer lugar, el número de puntos que representa la posible posición del eje β , es mayor que el número de medidas proyectadas. En segundo lugar, si hay algún problema (generalmente de medida) con los datos originales, pueden aparecer concentraciones de ejes β además de la concentración principal, dando lugar a interpretaciones erróneas. Por tanto, en estos casos, la construcción de un diagrama β no es aconsejable.

Diagramas π en pliegues cilíndricos

Debido a las pocas ventajas que ofrecen los diagramas β , el método preferido para representar medidas de superficies plegadas, es el de los diagramas π . En ellos se representan los polos de los planos que son tangentes a la superficie plegada. Esto significa que si hemos obtenido en el campo medidas de orientaciones en una superficie plegada, proyectamos en la falsilla que conserva áreas los polos de estos planos y no sus círculos máximos.

En un pliegue cilíndrico, cada uno de los polos es perpendicular al eje del pliegue, por tanto, los polos son paralelos a un plano perpendicular al eje del pliegue. Estos polos forman una guirnalda de círculo máximo, llamado círculo π o círculo de polos (Fig. 12). El polo de este círculo π representa el eje del pliegue, que a su vez suele coincidir con el eje β en la proyección.

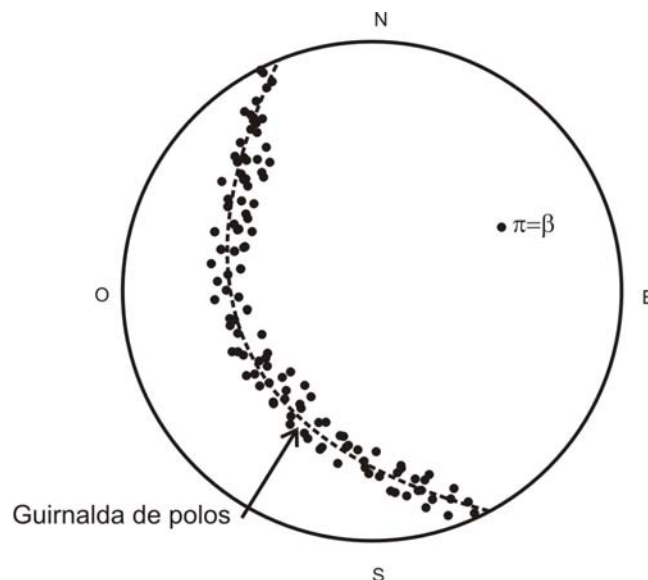


Figura 12. Diagrama π de un pliegue cilíndrico ideal.

En el caso de pliegues con un **ángulo interlimbo** (ángulo medido entre los dos flancos del pliegue) muy amplio, el diagrama π muestra un máximo de forma elíptica. Según va decreciendo el valor del ángulo interlimbo, la distribución de polos varía desde un máximo hasta una guirnalda de círculo máximo (Fig. 13 A, B y C).

Un diagrama π no solo nos da información acerca de la orientación del eje del pliegue, también nos permite conocer la forma del pliegue. Por ejemplo, en un pliegue con charnela redondeada, la densidad de puntos será uniforme a lo largo de la guirnalda de círculo máximo y los dos puntos extremos de esta guirnalda definirán el valor del ángulo interlimbo (Fig. 14 A). Un pliegue con una zona de charnela muy amplia y flancos planares, vendrá representado por un círculo máximo que contiene dos máximos correspondientes a las medidas de orientaciones de los dos flancos, y estos máximos se pueden utilizar para conocer el valor del ángulo interlimbo (Fig. 14 B). Un pliegue angular (Fig. 14 C) no tendrá una guirnalda bien definida, y el círculo π en la proyección se define a partir de dos puntos máximos correspondientes a los dos flancos. Muchos pliegues naturales muestran disposiciones de los polos intermedias entre las anteriormente citadas. En pliegues asimétricos, la disposición sería la correspondiente a la figura 14 D.

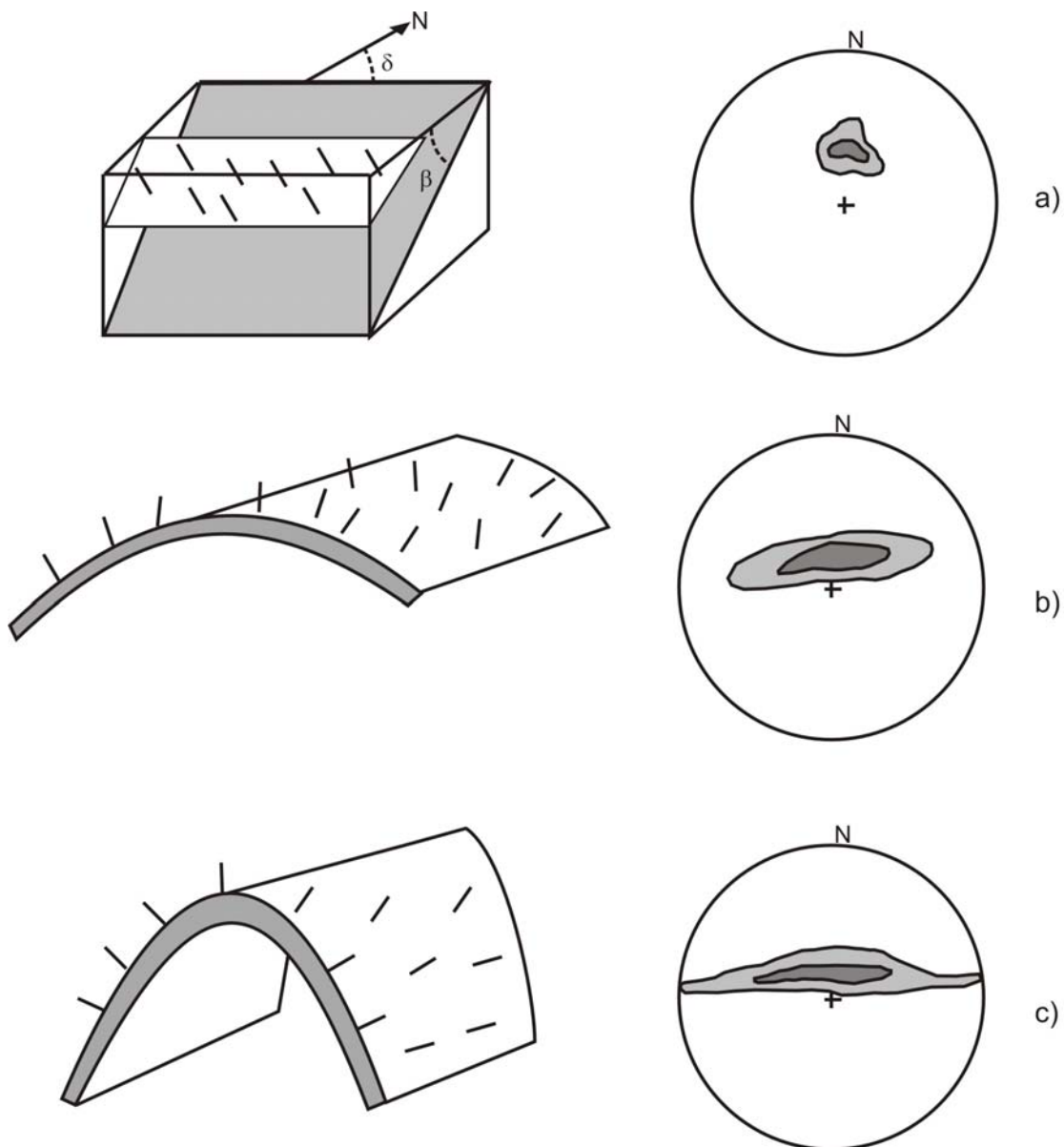


Figura 13. Variaciones en el diagrama π según va decreciendo el valor del ángulo interlimbo del pliegue. a) capas inclinadas. b) ángulo interlimbo mayor de 90° . c) ángulo interlimbo menor de 90° .

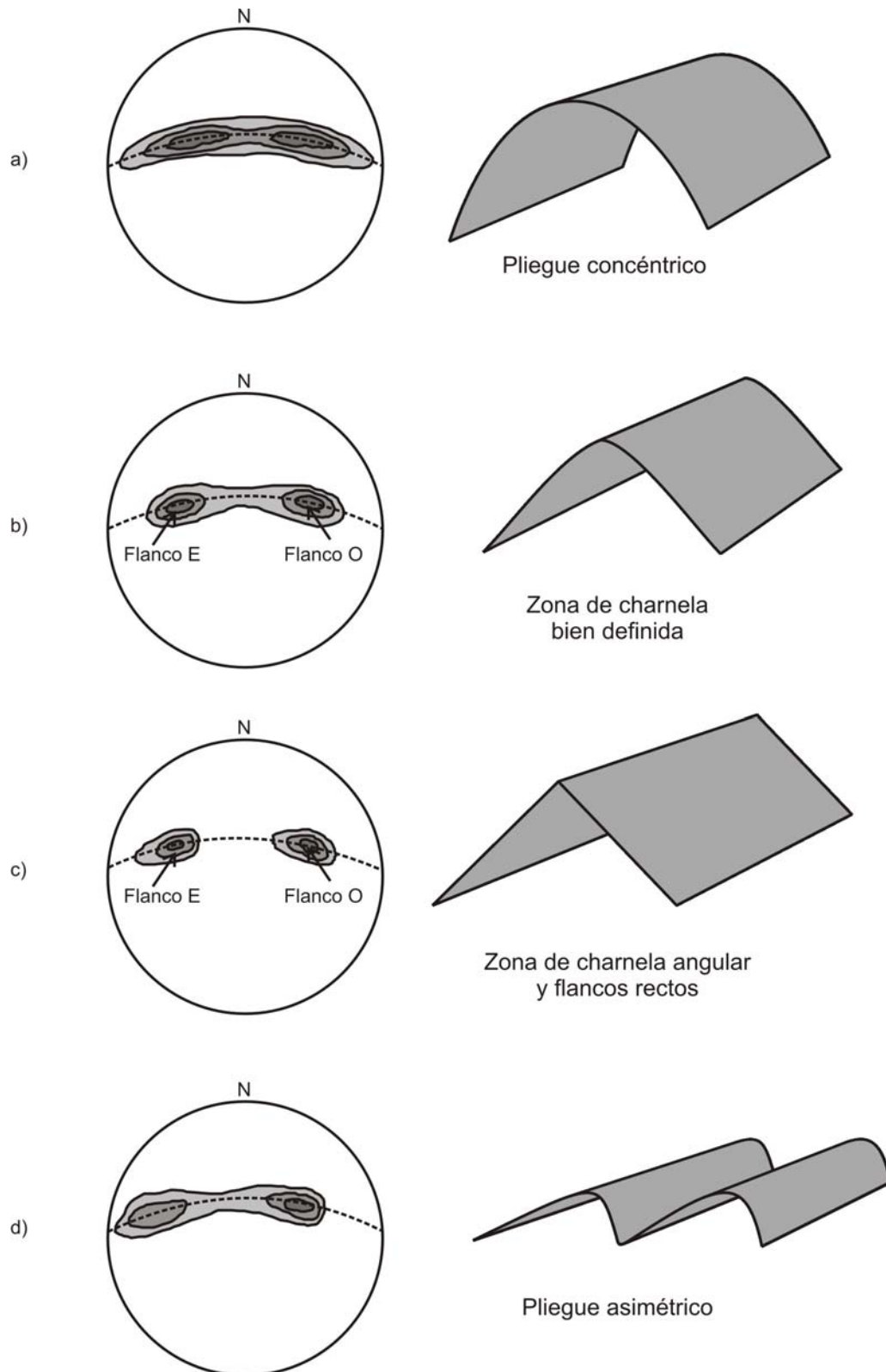


Figura 14. Modelos de diagramas π para distintas formas de pliegues.

Con respecto a la simetría de los pliegues, no es posible decir algo concluyente en base a los diagramas π , ya que el modelo de simetría depende en gran medida del

buzamiento de los flancos del pliegue. En ocasiones, una concentración de puntos a lo largo de una guirnalda, puede estar influenciada por la recogida de datos. Sin embargo, si la distribución espacial de las medidas es uniforme, la asimetría de los polos en el diagrama puede ser debida a la existencia de flancos cortos en pliegues asimétricos. Generalmente, para determinar el grado de simetría de los pliegues necesitamos información adicional, como puede ser la variación en espesor de un flanco a otro, la orientación de la superficie envolvente y/o la orientación del plano axial del pliegue.

La orientación del plano axial se puede conocer si conocemos las orientaciones del eje del pliegue y de la traza axial. En el caso de pliegues angulares, el plano axial se puede asimilar al plano bisector del ángulo interlimbo (ver Babín y Gómez, 2010 g). Este bisector viene representado por el punto cuya "distancia" angular a los dos máximos (medida a lo largo de la guirnalda de círculo máximo) es la misma. El círculo mayor que contiene este punto y el eje π , representa al plano axial del pliegue.

Las orientaciones del eje del pliegue y del plano axial, por tanto, se pueden conocer a partir de la guirnalda de círculo máximo en una proyección que conserva áreas. Por ejemplo, si el eje del pliegue es horizontal, estará situado sobre la circunferencia primitiva y la guirnalda ocupa la parte central del diagrama (Fig. 15 A). En pliegues cuyo eje tiene inmersión, este estará situado dentro de la primitiva (no sobre ella) y la guirnalda dibuja una curva que no pasa por el centro de la falsilla (Fig. 15 B). Si el plano axial del pliegue es vertical, vendrá representado por un diámetro de la falsilla, y si es horizontal, se representa por la primitiva propiamente dicha. En el caso de que sea inclinado, su representación corresponderá a alguno de los círculos mayores de la falsilla. En la figura 16, se representan algunos ejemplos de diagramas π para distintos tipos de pliegues.

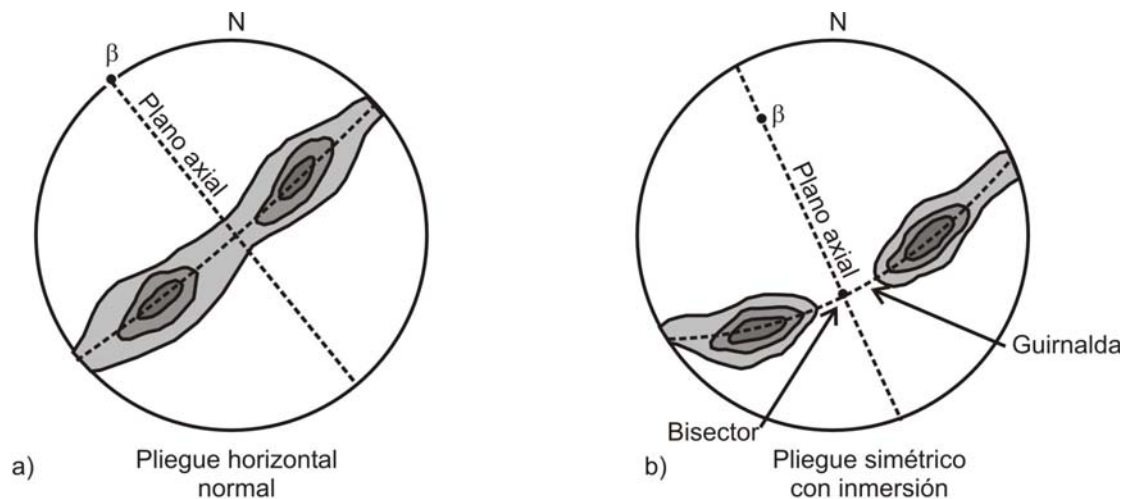


Figura 15. Cálculo de la orientación del plano axial del pliegue, a partir de un diagrama π .

A partir de lo expuesto, el alumno puede ejercitarse en la interpretación de estos diagramas, con un ejemplo muy sencillo. Suponer el desarrollo progresivo de un pliegue cilíndrico, a partir de una única capa en principio horizontal y que se va plegando sucesivamente, con todos los pasos intermedios que queramos elegir (Fig. 17). Antes del plegamiento, todos los polos de la capa horizontal se proyectarán como un máximo en el

centro de la falsilla, ya que todos corresponden a líneas verticales con la misma orientación. Si se construye el diagrama paralelamente al plano vertical, habrá un punto máximo en cada extremo de un diámetro de la falsilla.

Si plegamos la capa alrededor de un eje horizontal, los polos originalmente verticales se distribuyen en un abanico, y el modelo que observamos, proyectado tanto horizontal como verticalmente, es un máximo alargado, que va tomando una forma elíptica. Cuanto mayor sea el radio de curvatura de la superficie plegada, más amplitud presentará este abanico de puntos, dando lugar a una guirnalda más o menos completa. En el caso de que los dos flancos lleguen a ser paralelos, se obtendrá una guirnalda completa, perfecta. Este ejercicio se puede repetir partiendo de distintas orientaciones para la capa original.

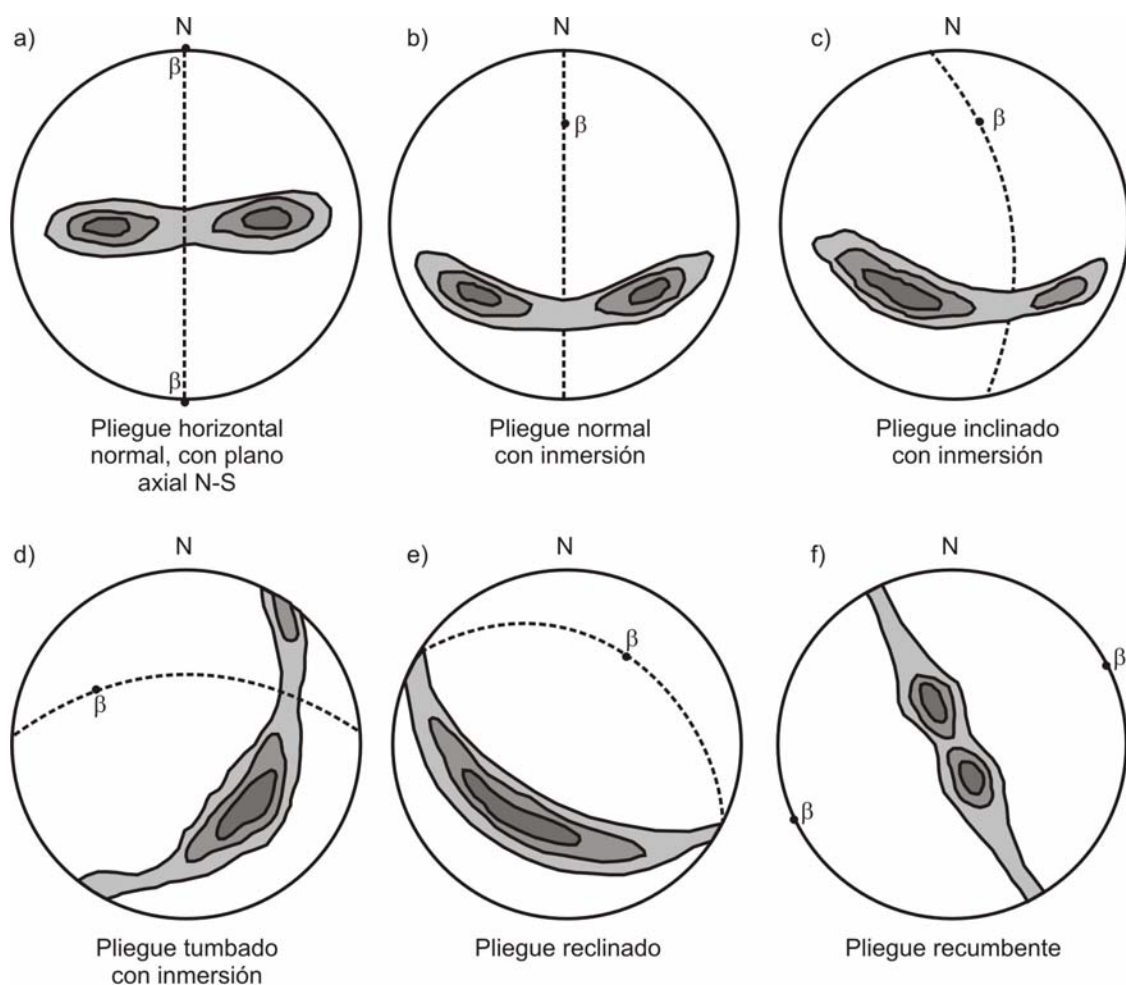


Figura 16. Ejemplos de diagramas π para distintos tipos de pliegues. La línea a trazos corresponde al plano axial del pliegue, y el punto a la línea de charnela del pliegue.

Diagramas π en pliegues no cilíndricos

En el caso de que la superficie plegada sea cónica, supongamos que el ángulo apical del cono tiene un valor de μ . Cada polo forma un ángulo de $(90^\circ - \mu/2)$ con el eje del cono.

En otras palabras, los polos de estratificación generan un cono coaxial, con un ángulo apical de $180^\circ - \mu$. Por tanto, los polos definen un círculo menor cuyo centro representa la posición del eje del cono (Fig. 10 D).

Si se puede reconocer que los polos están distribuidos según un círculo menor, volvemos a proyectar los polos en una falsilla de Wulff, ya que en ella los círculos menores se proyectan como círculos en la proyección estereográfica. Dibujamos este círculo menor con los polos proyectados y localizamos el centro del círculo, que representa el eje del cono. Este eje se rota hasta la primitiva, y los círculos menores de la falsilla se pueden usar para analizar las relaciones angulares entre los distintos elementos del pliegue.

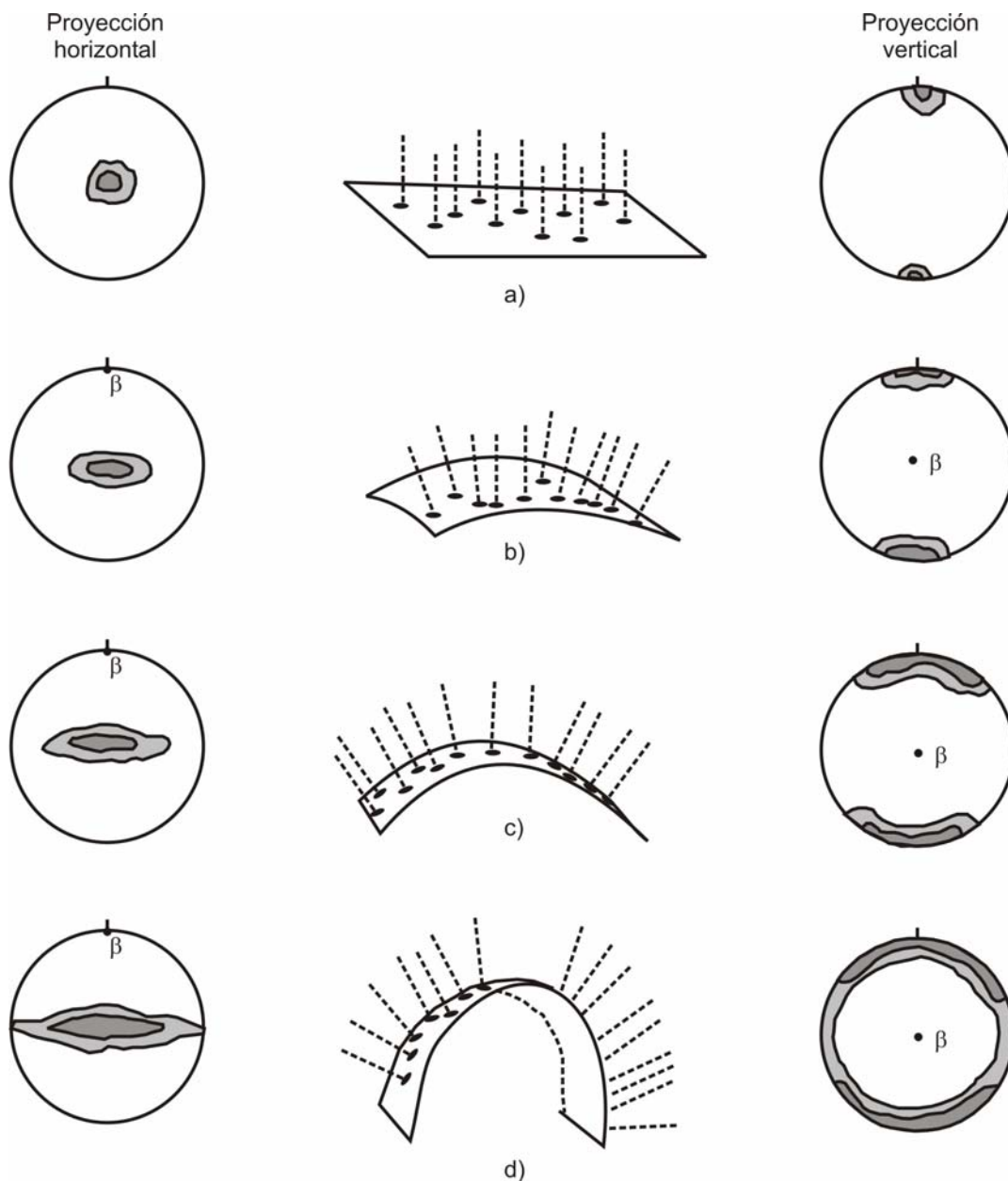


Figura 17. Desarrollo progresivo de un pliegue cilíndrico, a partir de una única capa horizontal.

En pliegues no cilíndricos y no cónicos, tanto la orientación del plano axial como la del eje del pliegue van cambiando y la construcción de un diagrama π generalmente, muestra varias posibles orientaciones para el eje del pliegue. Esta geometría es típica de áreas en las que existe plegamiento superpuesto.

Para analizar estos pliegues, lo más cómodo y efectivo es subdividir el área deformada en dominios de pliegues cilíndricos planos, de forma que cada uno de estos dominios tiene un eje de plegamiento cuya orientación permanece constante.

En pliegues no cilíndricos planos, el plano axial tiene una orientación constante, sin embargo la orientación del eje del pliegue es variable. La orientación principal del plano axial se define como el círculo mayor que contiene los ejes de los diferentes dominios cilíndricos.

ANÁLISIS DE LA FÁBRICA DE LAS ROCAS CON LA FALSILLA QUE CONSERVA ÁREAS

El término **fábrica** define la geometría interna y configuración espacial de los componentes de una roca. En general, comprende la suma total de tamaño, forma y configuración de los granos en una muestra de roca determinada. Cuando esta fábrica es visible en la roca a escala mesoscópica o de afloramiento, decimos que es penetrativa, y las rocas que la presentan como resultado de la deformación reciben el nombre de **tectonitas**. Las tectonitas son la expresión de los cambios en mineralogía y fábrica requeridos para acomodar la deformación de la roca.

Las tectonitas se caracterizan por la existencia de foliación y/o lineación, ambas estructuras debidas a distorsión de la roca. El alineamiento de la foliación y/o lineación en una tectonita es una expresión de su estado de deformación, ya que son rocas que han podido fluir en estado sólido. Este flujo se puede reconocer al microscopio como una combinación de deslizamiento y/o cristalización y/o disolución a lo largo de las discontinuidades de la roca.

Muchas tectonitas, y muchas foliaciones y lineaciones, se han formado en medios de elevada temperatura y presión confinante, como son los medios metamórficos e ígneos. También pueden formarse en medios sedimentarios, durante la distorsión antes de la litificación.

El tipo más común de foliación se produce por la orientación paralela del plano [001] en micas, acompañado de laminación mineral. Si se dispone paralelamente al plano axial del pliegue, su orientación es la misma y los planos de foliación cortan a las superficies de estratificación.

Otro tipo de foliación se produce cuando existen granos definidos por un alargamiento dimensional debido a la deformación plástica (cuarzo y calcita) o a la

crystalización bajo esfuerzos. Alargamiento paralelo de granos aplastados, oolitos o fragmentos líticos puede tener un significado semejante.

La lineación en tectonitas es siempre un producto de la deformación, y generalmente la más visible es la producida por la intersección de dos o más superficies, como son la estratificación y alguna de las foliaciones. Las lineaciones curvadas que aparecen dentro de algunos pliegues cilíndricos pueden ser debidas bien a la existencia de una estructura anterior plegada pasivamente o bien a que la lineación se desarrolle cuando una foliación activa corta a una superficie anterior, pasiva.

Tipos de tectonitas

Existen tres tipos principales, en función de que la roca contenga foliación, lineación o ambos (Fig. 18). Son los siguientes:

- **Tectonitas S.** Caracterizadas por presentar **foliación**, pero no lineación. El uso de la letra S se basa en el convenio de emplear el término “**superficie S**” en relación con los elementos penetrativos, planares y paralelos que constituyen la **foliación**. Esta se define como el alineamiento paralelo de minerales, de agregados minerales lenticulares o de granos aplastados. En un esquisto, las superficies S están formadas por alineaciones de micas y dominios de clivaje; en un gneis por bandas composicionales planares y paralelas y en un conglomerado, por los cantos aplastados alineados.
- **Tectonitas L.** Presentan lineación, pero no foliación. La **lineación** se define por un alineamiento de minerales prismáticos o granos alargados según una dirección, paralelos unos a otros.
- **Tectonitas L-S.** Su característica es la existencia de lineación y foliación, la lineación siempre contenida en el plano de foliación. Está definida por el alineamiento de minerales alargados o de granos elipsoidales. También puede ser el resultado de la crenulación de una foliación o de la intersección de dos foliaciones.

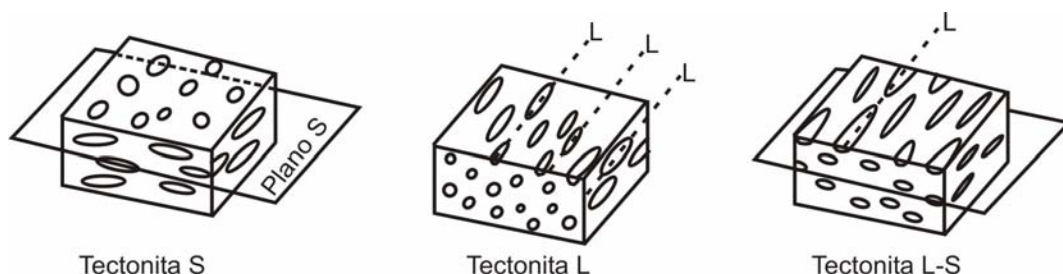


Figura 18. Distintos tipos de tectonitas, definidas por la disposición de marcadores elipsoidales en la roca.

Cuando se observa una tectonita en el afloramiento, según cuál sea el plano de observación se puede medir fácilmente la lineación, la foliación, o ambos elementos estructurales. En planos perpendiculares o que forman un ángulo alto con ambas, la foliación puede ser confundida con la lineación. Los cortes mejores en una tectonita L-S, estarán en planos paralelos a la lineación y perpendiculares a la foliación. Las trazas de lineación aparecerán mejor desarrolladas en todos aquellos planos paralelos a ella o formando con ella un ángulo agudo. No se observará la lineación o estará pobremente desarrollada en planos perpendiculares a ella o que formen un ángulo alto con ella. En una tectonita L-S, un plano paralelo a la foliación, muestra la orientación verdadera de la lineación.

Para poder aplicar los métodos del análisis estructural, es necesario que la fábrica de la roca sea **homogénea**. Esto significa que el mismo volumen de roca en distintos lugares de afloramiento, es idéntico desde el punto de vista estructural. En la naturaleza esto no ocurre, pero si es posible suponer que una roca es estadísticamente homogénea tomando distintas porciones de roca donde esto se cumple. Cuando el grado de desarrollo o la orientación de la fábrica difiere en distintos lugares, se dice que la fábrica es **no homogénea**.

Una roca con fábrica no homogénea, siempre se puede subdividir en partes homogéneas. Cada una de estas partes es una porción tridimensional de una muestra de roca que es estadísticamente homogénea, y recibe el nombre de **dominio de fábrica** o simplemente, **dominio**.

Si la fábrica dentro de un dominio tiene las mismas propiedades en todas las direcciones, recibe el nombre de **isótropa**. En muchas rocas deformadas, los elementos estructurales dentro de un dominio exhiben una orientación preferente, y la fábrica es **anisótropa**. Las falsillas que conservan áreas ayudan al análisis de la fábrica bajo dos puntos de vista:

1. Se pueden usar para calcular la orientación verdadera de las fábricas, dando medidas parciales tomadas en diferentes planos.
2. Se pueden usar para describir variaciones en la geometría de las fábricas, entre diferentes dominios.

Finalmente, en rocas con fábricas múltiples, este tipo de proyección puede ser el único camino para poder distinguir varios elementos de fábrica entre sí.

ANÁLISIS DE LA GEOMETRÍA DE LA FÁBRICA

Modelos de variación en las orientaciones de fábricas relacionadas con el plegamiento, pueden ayudar a conocer la cronología del desarrollo de la fábrica con respecto al pliegue. En principio son posibles varios modelos, dependiendo de la

naturaleza de la fábrica, el tiempo de desarrollo de la fábrica con respecto al plegamiento, y el mecanismo de plegamiento. A continuación vamos a hacer una breve exposición de cada uno de los modelos más frecuentes, individualmente, fijándonos sobre todo en las características de foliación y lineación de la roca, sin llegar a una discusión completa de los distintos tipos de fábricas, que no es el objetivo de este manual.

Foliación y lineación son las dos estructuras mesoscópicas más frecuentes en las tectonitas. Sus características principales en rocas metamórficas, son las siguientes:

- La foliación se desarrolla perpendicularmente a la orientación del eje de esfuerzo principal σ_1 . La lineación es paralela al eje de esfuerzo intermedio o mínimo.
- La foliación es paralela al plano AB del elipsoide de deformación y a los planos de mínima cohesión determinados por deslizamiento en planos de esfuerzo de cizalla importante o de baja resistencia a la cizalla.
- La lineación es paralela a la dirección de deslizamiento, flujo o transporte tectónico de la tectonita que está fluyendo.
- La lineación sin-genética con el plegamiento cilíndrico, generalmente es paralela a los ejes de los pliegues.
- La simetría del conjunto foliación-lineación, geoméricamente relacionadas, refleja la simetría de la deformación.

Alguna foliación corresponde a un fenómeno de deslizamiento, otras veces se debe a compresión o aplastamiento.

Foliación formada después de un primer plegamiento

Si un pliegue cilíndrico que pliega a S_1 y se forma al mismo tiempo que S_2 , queda cortado por una foliación planar posterior S_3 , las lineaciones de intersección entre S_3 y S_1 variarán en orientación alrededor del pliegue (Fig. 19 A). Sin embargo, todas las orientaciones de la lineación están contenidas en el plano S_3 y se disponen según una guirnalda de círculo mayor (Fig. 19 B). El ángulo entre la lineación y los ejes de pliegue de la segunda fase, varía en función de la orientación de S_1 .

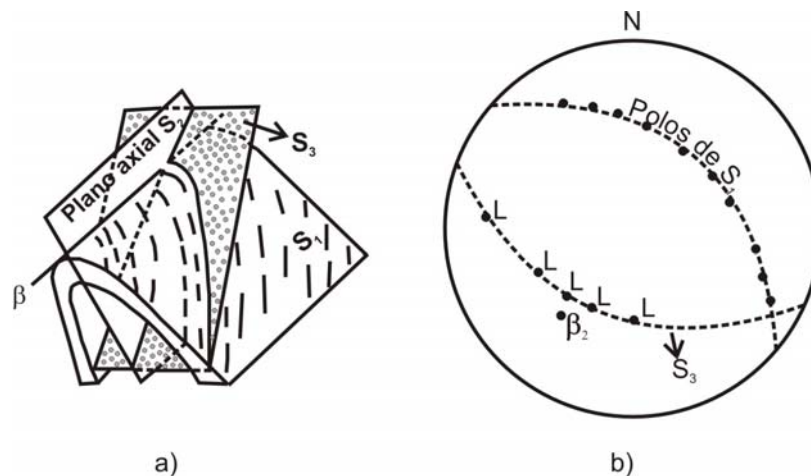


Figura 19. a) Lineaciones de intersección producidas por una foliación planar (S_3) que corta a una primera foliación plegada (S_1). b) Representación estereográfica.

Plegamiento flexural de una lineación preexistente

Los pliegues formados por plegamiento flexural están acompañados por un deslizamiento paralelo a los estratos, con muy poca distorsión de estos. Por tanto, se puede considerar el movimiento como una rotación, y el ángulo entre el eje del pliegue y la lineación pre-existente permanece constante a lo largo de toda la superficie plegada (Fig. 20 A). En una proyección que conserva el área, los puntos que representan las distintas orientaciones de la lineación se disponen en un círculo menor cuyo centro es el eje del pliegue (β), excepto cuando la lineación original es perpendicular al eje del pliegue, en cuyo caso la lineación plegada está dispuesta según un círculo mayor (Fig. 20 B).

En la realidad, como cada uno de los estratos individuales se pliega mediante un plegamiento flexural, cada estrato plegado tiene una superficie neutra con una geometría ideal, concéntrica. El arco externo del pliegue se alarga y el interno, se acorta. En el arco externo, el ángulo entre la lineación y el eje del pliegue se incrementa ligeramente, y los puntos correspondientes a la lineación se colocan según un arco muy próximo a un círculo menor, centrado en el eje del pliegue. De la misma manera, el ángulo entre el eje del pliegue y la lineación decrece en el arco interno y los puntos correspondientes a la lineación quedan en un arco que es más corto que el arco de un círculo menor (Fig. 20 C).

En la figura 21 se muestra la proyección de los datos estructurales para un dominio restringido. Los polos de la foliación S_1 se disponen según una guirnalda de círculo mayor, cuyo eje coincide con el centro de la concentración de lineaciones (cruces), y coincide con el eje del último pliegue cilíndrico B. Una primera lineación L (puntos) aparece dispuesta según un círculo menor alrededor de B, lo que está de acuerdo con un modelo de plegamiento por flexión-deslizamiento.

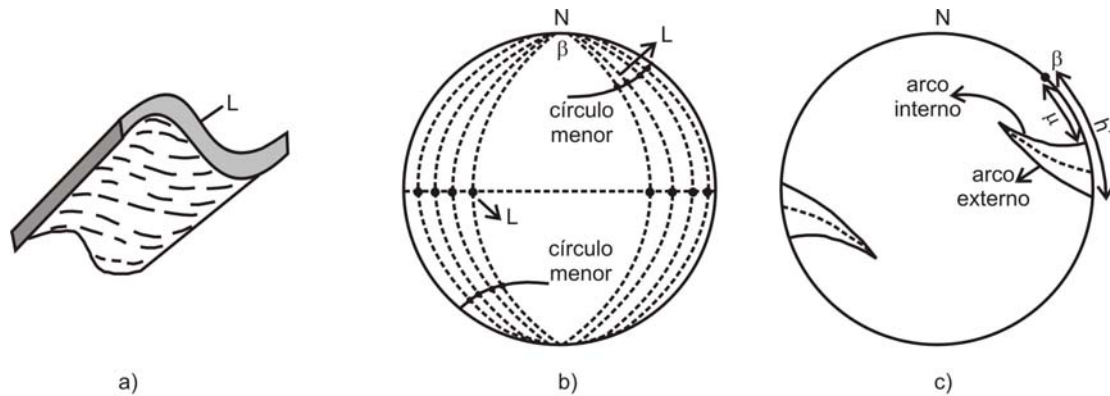


Figura 20. a) Disposición de una lineación plegada por flexión-deslizamiento. b) Lineación perpendicular al eje del pliegue (círculos abiertos). c) Lineación oblicua dispuesta según círculos menores. Ver texto para su explicación.

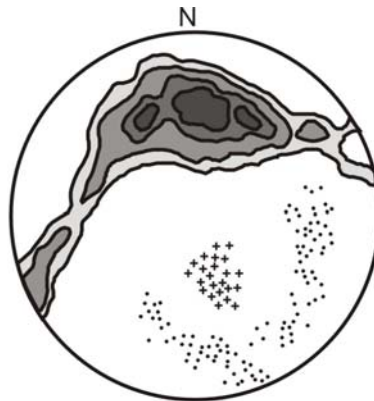


Figura 21. Modelo real de plegamiento por flexión-deslizamiento. Guirnalda de polos de foliación S_1 , lineaciones (cruces) y una lineación anterior (puntos) dispuesta según un círculo menor.

Plegamiento pasivo de la lineación

El desarrollo de un pliegue pasivo es análogo desde el punto de vista geométrico, a la reorientación pasiva de una capa guía mediante cizalla de un conjunto de planos poco espaciados, que son oblicuos a la foliación. El plano axial del pliegue es paralelo a los planos de cizalla y el eje del pliegue, a la lineación de intersección. Los puntos situados sobre un elemento lineal original, se transportan a distancias variables a lo largo de líneas paralelas a la dirección de deslizamiento y se colocan en la superficie del estrato plegado de tal forma que la lineación plegada está contenida en el plano definido por la lineación original y la dirección de deslizamiento (Fig. 22 A). Por tanto los puntos que representan la lineación plegada en la proyección están en un círculo mayor que es oblicuo al eje del pliegue (Fig. 22 B).

Esta geometría es la misma que la de una lineación de intersección debida a una foliación superpuesta en un pliegue pre-existente, excepto que en este caso no se desarrolla una foliación paralela al plano que contiene la foliación.

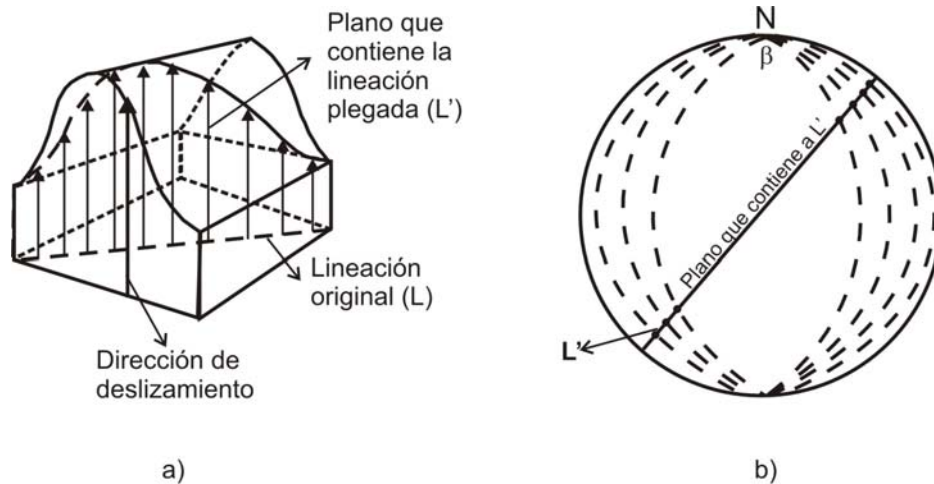


Figura 22. a) Plegamiento pasivo de una lineación L. b) La lineación plegada L' se sitúa en un círculo mayor, oblicuo al eje del pliegue.

Plegamiento complejo de lineaciones

Es frecuente encontrar en pliegues naturales modelos complejos de lineaciones replegadas. Generalmente se disponen en arcos intermedios entre círculos mayores y menores, con modificaciones que pueden ser debidas a acortamiento paralelo a la estratificación antes del plegamiento, aplastamiento homogéneo después del plegamiento o alguna deformación paralela a la estratificación que acompaña al plegamiento. Los detalles de todas y cada una de estas posibilidades, se pueden encontrar en textos de Geología Estructural especializados.

Plegamiento flexural de superficies inclinadas, oblicuas entre sí

Cuando se pliega una roca que contiene dos familias de foliaciones oblicuas entre sí (S_1 y S_2), el resultado es el plegamiento de ambas foliaciones. Lo mismo sucede cuando existe un plano de estratificación y otro de clivaje o bien una estratificación cruzada y el estrato que la contiene. Los modelos geométricos que resultan del plegamiento de dos planos que son oblicuos entre sí, se analizan mediante la proyección que conserva áreas.

Durante el plegamiento flexural, si la lineación de intersección de los dos planos es paralela al eje del pliegue, ambas superficies se pliegan mediante pliegues cilíndricos que son coaxiales (Fig. 23 A). Si la lineación de intersección es perpendicular al eje del pliegue y una superficie se pliega dando un pliegue cilíndrico, la otra superficie mantiene su ángulo diedro con respecto a la anterior y se pliega dando un pliegue cónico, con su eje paralelo al eje del pliegue cilíndrico (Fig. 23 B). Podemos obtener modelos más complejos, con la lineación de intersección dispuesta según un círculo menor cuyo centro es el eje del pliegue cilíndrico, y el ángulo diedro entre los dos planos varía continuamente alrededor del pliegue (Fig. 23 C).

Plegamiento pasivo de superficies inclinadas, oblicuas entre sí

En la figura 24 A, se aprecia el aspecto general de las superficies S_1 y S_2 plegadas por S_3 mediante un modelo de plegamiento pasivo. La lineación de intersección se pliega, pero queda en un plano definido por su orientación original y la dirección de deslizamiento de los hipotéticos planos de cizalla, por tanto después del plegamiento, las lineaciones de intersección dibujan un círculo mayor (Fig. 24 B). Ambos planos se pliegan como pliegues cilíndricos con un plano axial común (S_3), paralelo a los planos de cizalla. Las dos superficies plegadas tienen diferentes ejes de pliegue (β_1 y β_2), determinados por sus líneas de intersección con los planos de cizalla. El ángulo diedro entre los dos planos, generalmente varía a lo largo del pliegue.

Los diagramas de las figuras 24 B y C muestran la disposición de S_1 plegada y S_2 plegada, respectivamente. Superponiendo los dos diagramas, o bien dibujándolos en un mismo transparente, se obtienen las líneas de intersección entre S_1 y S_2 que definen la lineación plegada L. Todas estas líneas están contenidas en un círculo mayor, dibujado en el diagrama de la figura 24 B.

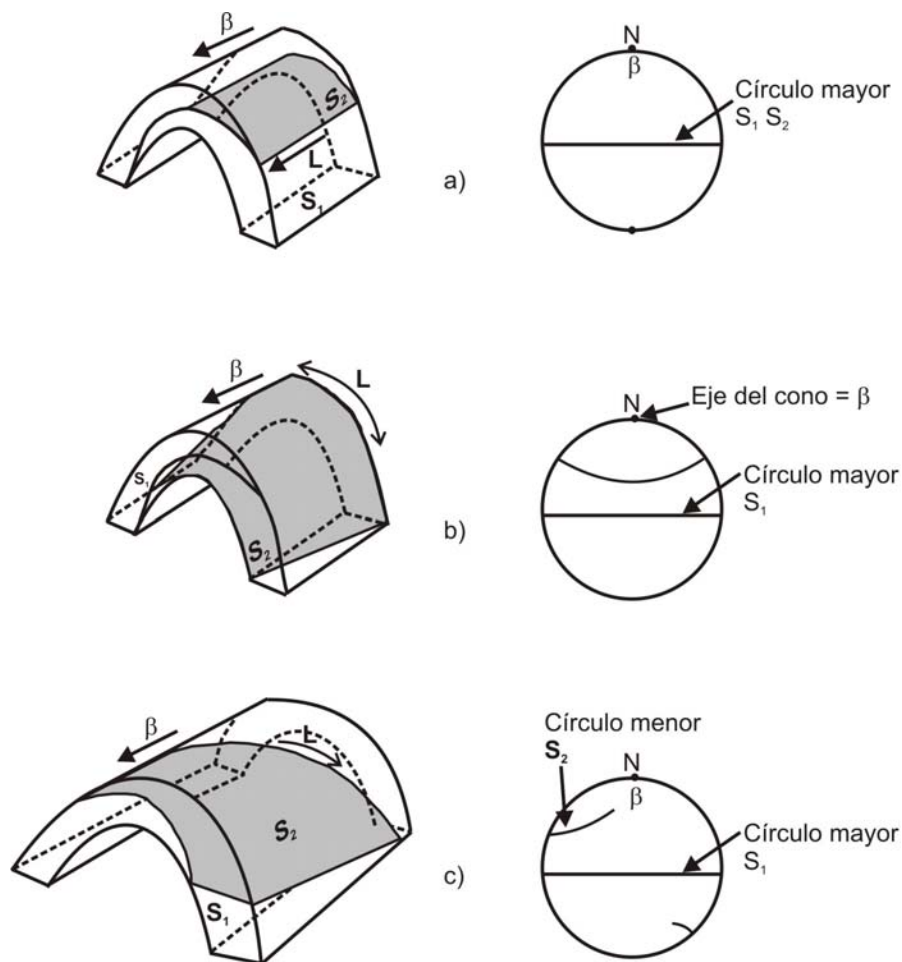


Figura 23. Plegamiento flexural de dos superficies inclinadas, oblicuas entre sí. Lineación de intersección: a) paralela al eje del pliegue. b) perpendicular al eje del pliegue. c) oblicua al eje del pliegue.

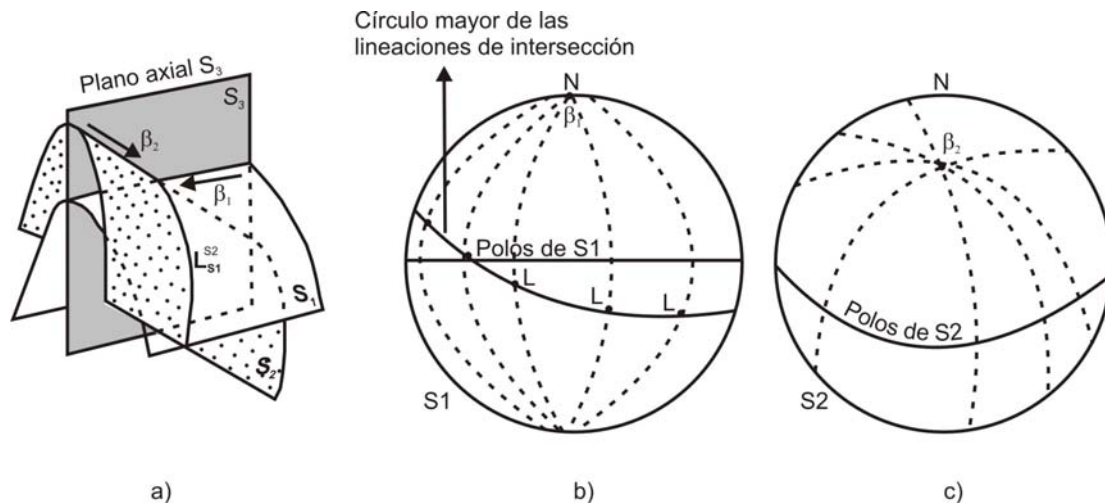


Figura 24. a) Plegamiento pasivo de superficies inclinadas, oblicuas entre sí. b) Plegamiento de S1. c) Plegamiento de S2.

INTERPRETACIÓN DE LOS SISTEMAS PLEGADOS

Los mecanismos de plegamiento y los detalles del movimiento en un sistema de pliegues, pueden ser muy complejos. Por lo general varían de uno a otro dominio (**buckling** en algunos estratos y deslizamiento en otros) y también a lo largo del tiempo (**buckling** en los primeros estadios de deformación seguido por deslizamiento o flujo). Muchos sistemas de pliegues son el resultado de episodios superpuestos de plegamiento. Teniendo en cuenta la variabilidad del mecanismo de plegamiento, podemos tener alguna idea acerca de la deformación local y de las discontinuidades formadas, estudiando las variaciones geométricas de las superficies S en su configuración presente, a partir de una orientación inicial en la que asumimos que estas superficies eran planares y en el caso de la estratificación, horizontales.

Sistemas de pliegues cilíndricos planos

En la figura 25 se pueden observar las propiedades generales de los sistemas de pliegues cilíndricos planos y homogéneos de dos conjuntos ideales: simétricos y asimétricos. Ambos consisten en dos dominios de planos de cizalla alternantes, limitados por planos paralelos S_2 . En pliegues simétricos (Fig. 25 A) los dominios alternantes son imágenes especulares una de otra, mientras que en los asimétricos (Fig. 25 B) difieren en sus propiedades respecto a la deformación.

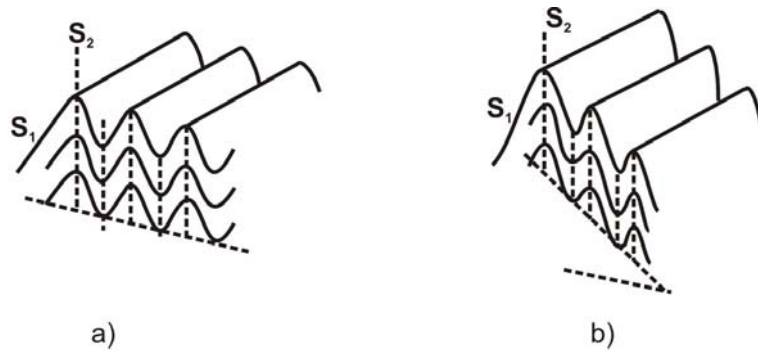


Figura 25. Pliegues cilíndricos planos idealizados. a) simétricos. b) asimétricos.

En un sistema de pliegues de deslizamiento flexural, esta simetría o asimetría refleja la simetría del movimiento ortorrómbico o monoclinico. Por ejemplo, la figura 26A, muestra un plegamiento asimétrico de un marcador pasivo S_1 (por deslizamiento en S_2 paralelo al eje a), con resultado de una simetría ortorrómbica. Por el contrario, en la figura 26 B, el sistema plegado es simétrico, pero el modelo obtenido (deslizamiento en S_2 paralelo al eje a), tiene simetría monoclinica.

Sistemas de pliegues cilíndricos no planos

Se pueden formar como resultado de una única deformación, o bien mediante superposición de plegamientos. En ambos casos, los polos de los planos axiales se disponen en una guirnalda de círculo mayor, cuya normal corresponde al eje del pliegue o del sistema de pliegues.

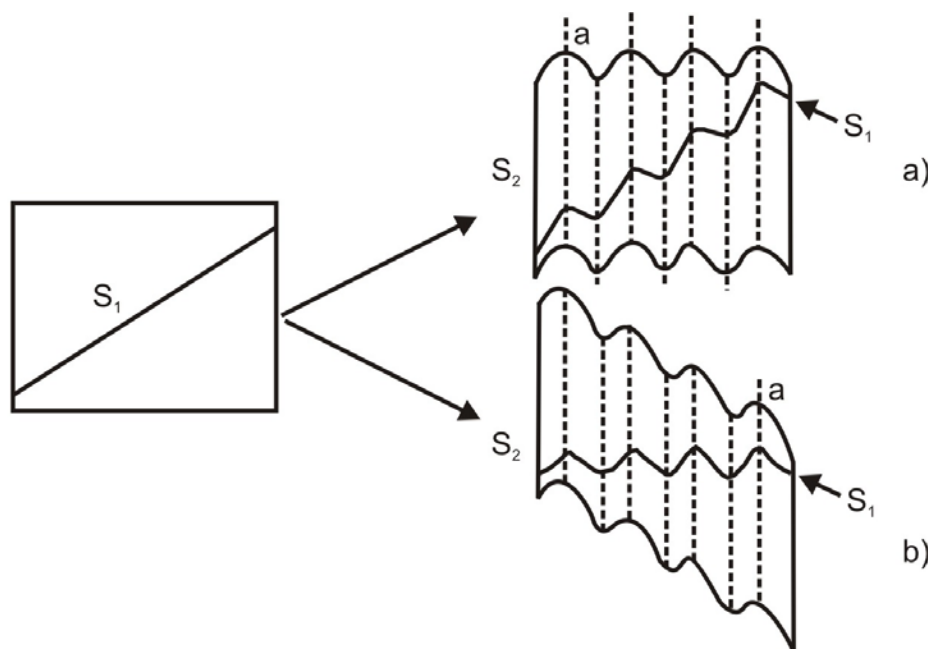


Figura 26. Ver texto para su explicación.

- **Plegamiento mediante una única deformación**

Algunos sistemas de pliegues presentan una simetría axial sugiriendo un movimiento alrededor de un eje de simetría. En otras ocasiones, el estado de flujo en la tectonita da lugar a una simetría monoclinica. Existe un plano de simetría normal al eje del pliegue, que en general es también un eje de alargamiento.

En otros sistemas de pliegues cilíndricos no planares, no existe evidencia de un sentido determinado de rotación. Se relacionan con una deformación en la que existe elongación paralela al eje del pliegue y acortamiento en todas las direcciones normales a él. La simetría resultante es axial, tendiendo a monoclinica, y el plano de simetría principal es normal al eje del pliegue.

Existe un tercer modelo en el que los pliegues mesoscópicos son conjugados, o sus planos axiales mantienen durante un amplio espacio un modelo en abanico. Los pliegues conjugados pueden presentar un modelo de alta simetría, de forma que los diagramas para la superficie S_1 plegada, los planos S_2 y los ejes de pliegues pueden ser idénticos a los sistemas de pliegues que resultan por plegamiento superpuesto coaxial.

- **Plegamiento superpuesto**

Cuando existe un replegamiento coaxial, las direcciones de los planos axiales de los pequeños pliegues y las del clivaje de plano axial, varían en un área relativamente pequeña. En una proyección de orientaciones de clivaje de plano axial, los polos se disponen en una guirnalda de círculo mayor, centrada en un eje común.

Muchos pliegues cilíndricos no planares, pueden ser tratados como resultado de plegamiento coaxial repetido; un sistema cilíndrico plano se superpone a otro sistema cilíndrico no planar, con ejes de pliegues comunes. Cuando el plegamiento en ambas fases es por deslizamiento flexural, la simetría del movimiento es monoclinica, con un plano de simetría normal al eje del pliegue. Si la segunda deformación es por deslizamiento, la simetría obtenida es independiente de la forma de la superficie plegada.

Sistemas de pliegues no cilíndricos

- **Plegamiento en una única deformación**

Muchos sistemas de pliegues no cilíndricos parece que tienen su origen en una única deformación compleja. Estos sistemas están formados por pliegues individuales de forma más o menos elíptica, con extensión axial limitada. Los pliegues de un sistema pueden aparecer en escalón y estar espacialmente relacionados con otras estructuras, como son pliegues de mayor amplitud o fallas

con movimiento según la dirección. Porciones de los pliegues individuales pueden ser de forma cónica o presentar formas curvas.

Algunos geólogos interpretan estos sistemas de pliegues complejos como productos de plegamiento simultáneo y plegamiento cruzado. Otros autores atribuyen el **buckling** simultáneo y el cruzado y los ejes de acortamiento relacionados, a una orientación crítica del plano estructural deformado con respecto a los ejes principales de deformación.

- **Plegamiento superpuesto**

La causa más común de sistemas no cilíndricos de pliegues mesoscópicos en tectonitas, puede ser la superposición oblicua de una segunda generación de pliegues sobre un sistema anterior.

La relación genética entre los dos sistemas de pliegues, muchas veces no está clara. Algunos ejemplos muestran los efectos combinados de dos o más deformaciones separadas en el tiempo, otros ejemplos muestran solo el último episodio de deformación que ha seguido inmediatamente al anterior.

Un sistema de pliegues no cilíndricos formado por plegamiento repetido, es homogéneo a gran escala y se pueden encontrar pequeños dominios homogéneos que contienen pliegues de ambas generaciones. En general la simetría de cada dominio es triclínica, y existen una serie de propiedades que caracterizan a este tipo de pliegues:

- ✓ Los pliegues de primera generación son no planos y no cilíndricos, con planos axiales plegados cilíndricamente.
- ✓ Los pliegues de segunda generación son planos y no cilíndricos o bien no planos y no cilíndricos.
- ✓ El modelo del segundo plegamiento depende del mecanismo de plegamiento. Si la segunda fase ha sido por **buckling** o **deslizamiento flexural**, cada segmento cilíndrico de un segundo pliegue corresponde a una deformación heterogénea, luego para un dominio de superposición homogénea, la simetría del movimiento total será triclínica.
- ✓ Si la segunda deformación es por deslizamiento, los ejes cinemáticos pueden no variar de orientación dentro de un dominio dado, luego es posible una alta simetría del movimiento.

CONCLUSIONES

En este capítulo, únicamente se han introducido los conceptos más relevantes en Geología Estructural necesarios para el estudio de las rocas deformadas, como son los de fábrica, tectonita y sus distintos tipos. El análisis estructural mediante diagramas de contornos da origen a modelos muy variados que dependen de las condiciones de la deformación, de la orientación de los planos deformados con respecto a los esfuerzos, etc. Es imposible en este manual, Babín y Gómez (2010 a, b, c, d, e, f, g y h), analizar todos y cada uno de los tipos posibles, y solo se han explicado los más comunes. Remitimos al alumno a las obras específicas para este tipo de estudios, donde puede ampliar la información que aquí se ofrece.

PROBLEMAS

Problema 1

La traza de una foliación S (línea de corte de la foliación con otro plano de orientación conocida), se observa en un afloramiento en tres planos no paralelos. Se miden las orientaciones de los planos y el ángulo de cabeceo de dicha traza medida en cada uno de los tres plano, con el siguiente resultado:

Orientación del plano	Cabeceo de la línea
114°- 80°SO	40° NO
N44°E - 60°NO	24°S
169° - 70°NE	28°NO

Hallar la orientación de la foliación.

La traza de la foliación (o de cualquier estructura planar) vista en una superficie, es la línea de corte de la foliación con esa superficie, por tanto es un buzamiento aparente de la foliación visto en esa superficie. Si es posible medir dos o más buzamientos aparentes, la orientación de esta foliación se puede conocer, ya que el plano buscado está definido por el círculo mayor que contiene los puntos que corresponden a estos buzamientos aparentes.

Generalmente, las lineaciones se pueden medir directamente en el campo. Sin embargo, en ocasiones la exposición es pobre, y se puede llegar a conocer su orientación midiendo la orientación aparente en dos o más planos con distinta orientación, y proyectando estos datos en una proyección que conserve el área.

- Proyectar cada uno de los planos mediante su círculo máximo (Fig. 27).

- Colocar en cada uno de los planos el cabeceo correspondiente a esa lineación, o el buzamiento aparente (F_1 , F_2 y F_3 en el estereograma).
- Dibujar el círculo mayor que contiene a los tres puntos que representan a las trazas (buzamientos aparentes).
- Este círculo mayor corresponde al plano de foliación y su orientación es: $N32^\circ E-40^\circ NO$.

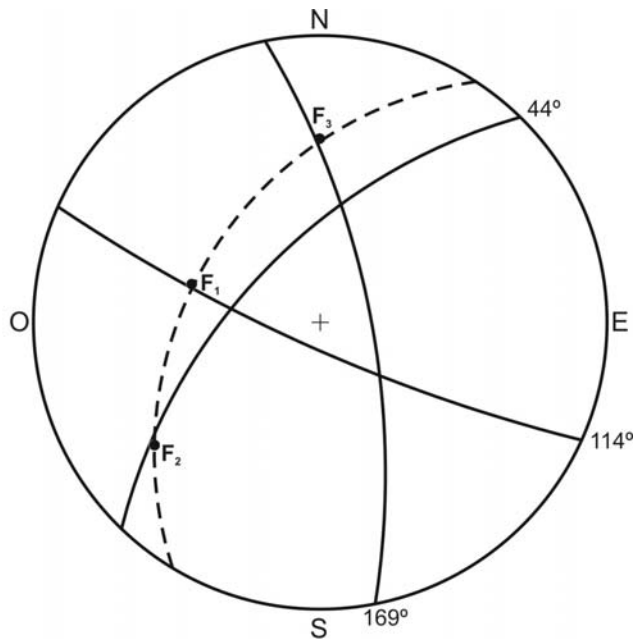


Figura 27. Resolución del problema 1. Ver texto para su explicación.

Problema 2

En tres caras no paralelas de un afloramiento, se han medido trazas de una lineación. La orientación de los tres planos y el cabeceo de la lineación aparente en cada uno de ellos, es la siguiente:

Orientación del plano	Cabeceo de la línea
$124^\circ-52^\circ NE$	$12^\circ NO$
$N82^\circ E-30^\circ S$	$84^\circ O$
$N10^\circ E-70^\circ O$	$22^\circ S$

Hallar la orientación de la lineación.

Este problema se puede resolver por dos caminos distintos muy similares entre sí. El primero que vamos a explicar es el que se denomina método de Lowe, y a continuación, el método de Cruden.

- **Método de Lowe** (Fig. 28)

- ✓ Proyectar cada plano mediante su círculo máximo, la traza de la lineación en el plano y el polo del plano.
- ✓ Para cada plano, dibujar el círculo mayor que contiene el polo y la traza de la lineación.
- ✓ Estos tres nuevos círculos mayores, idealmente se cortan en un punto (R), que define la orientación de la lineación, en este caso $179^{\circ}/26^{\circ}$.

Este método presenta una desventaja importante. Cuando los ángulos entre planos son menores de 40° , la localización del punto de intersección está influenciada por pequeñas variaciones en los ángulos medidos. Por ello, el mismo problema se puede resolver por un método alternativo, el método de Cruden, que se expone a continuación.

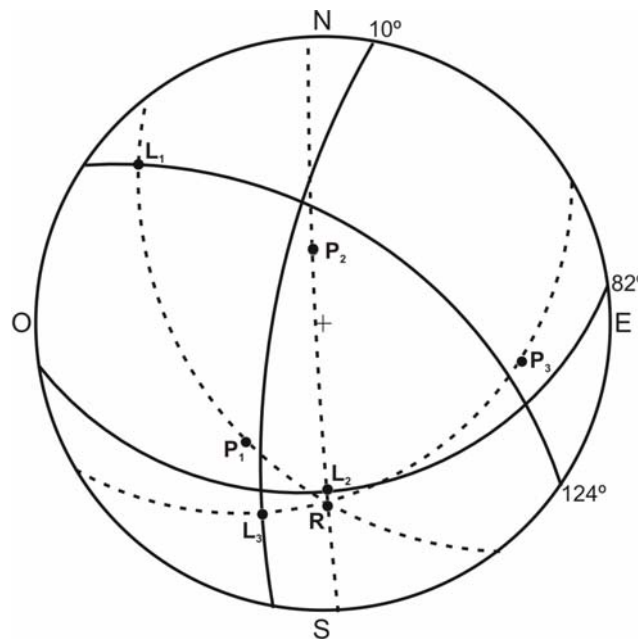


Figura 28. Resolución del problema 2. Método de Lowe.

- **Método de Cruden** (Fig. 29)

- ✓ Los dos primeros pasos, igual que en el caso anterior.
- ✓ Hallamos los polos de estos círculos mayores que contienen al polo del plano y a la traza de la lineación (1, 2 y 3).

- ✓ Estos nuevos polos están en un círculo mayor, que representa el plano perpendicular a la lineación, o bien, la lineación es el polo de este plano (punto y raya en el estereograma).
- ✓ El polo buscado está representado en el diagrama por el punto (R), y su orientación es la misma que la obtenida por el método anterior.

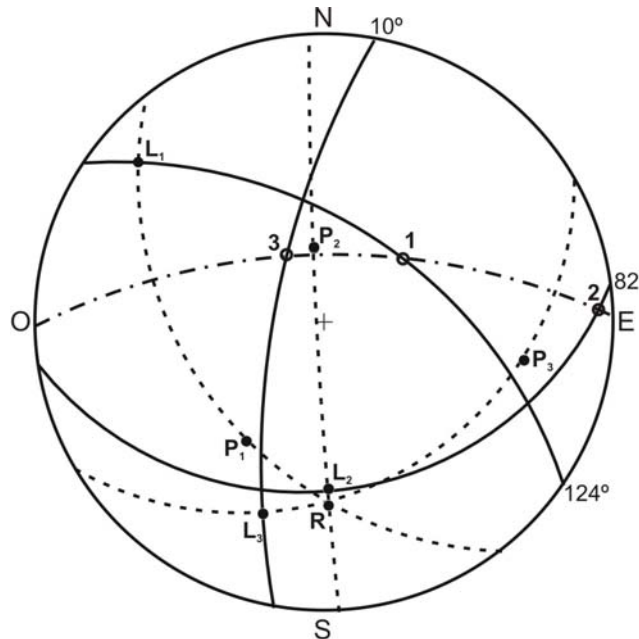


Figura 29. Resolución del problema 2. Método de Cruden.

Problema 3

Los siguientes datos corresponden a medidas de estratificación, tomadas en una serie aparentemente plegada. Determinar la orientación del eje del pliegue.

135°-80°NE	155°-60°NE	018°-42°E	027°-41°E	177°-55°E
N68°O-70°S	105°-60°S	068°-70°S	050°-44°S	097°-60°S
060°-70°S	098°-44°S	065°-44°S	040°-vertical	082°-50°S
007°-60°O	155°-48°O	000°-50°O	130°-40°SO	020°-70°O.

- Representar en la proyección los polos correspondientes a las medidas de estratificación (Fig. 30).
- Una vez representados, se observa en el diagrama que se ajustan a dos círculos mayores, cada uno de ellos representativo de una fase de plegamiento (a trazos en el estereograma).

- El hecho de que las medidas se ajusten a un círculo mayor, indica que el plegamiento es de tipo cilíndrico, por tanto existe un eje de pliegue para cada una de las fases.
- Los ejes de pliegue se corresponden con los polos de cada uno de los círculos mayores, representados en el diagrama por β_1 y β_2 .
- Las orientaciones respectivas son $220^\circ/40^\circ$ y $130^\circ/40^\circ$.

Los datos del problema no permiten conocer la orientación del plano axial de estos pliegues, ya que en ambos casos los polos están muy dispersos a lo largo del círculo mayor. En el caso de una mayor cantidad de datos y una menor dispersión, se podría conocer la orientación de cada plano axial, que correspondería al plano que contiene la línea de charnela (eje de pliegue) y el punto medio entre las concentraciones máximas de polos.

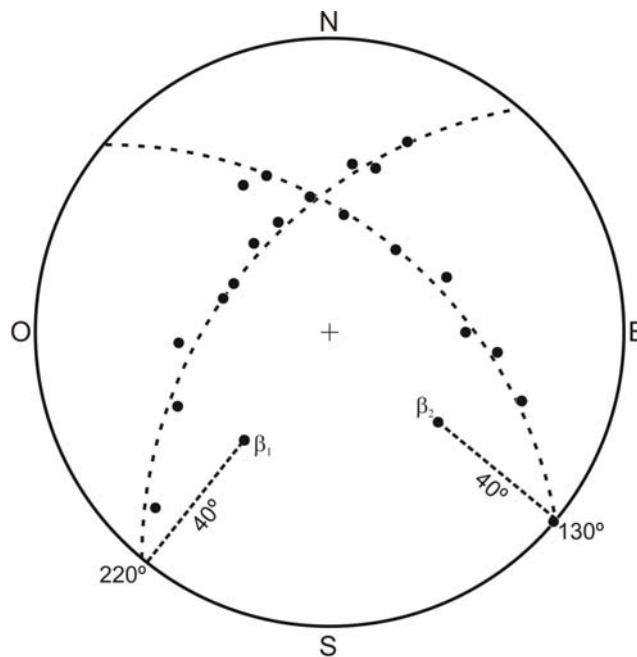


Figura 30. Resolución del problema 3. Ver texto para su explicación.

Problema 4

En un pliegue de tipo similar (Fig. 31 A), se han podido medir superficies de estratificación correspondientes a orientaciones de los flancos y de la zona de charnela. Hallar la orientación de la línea de charnela y del plano axial, tan aproximadamente como sea posible.

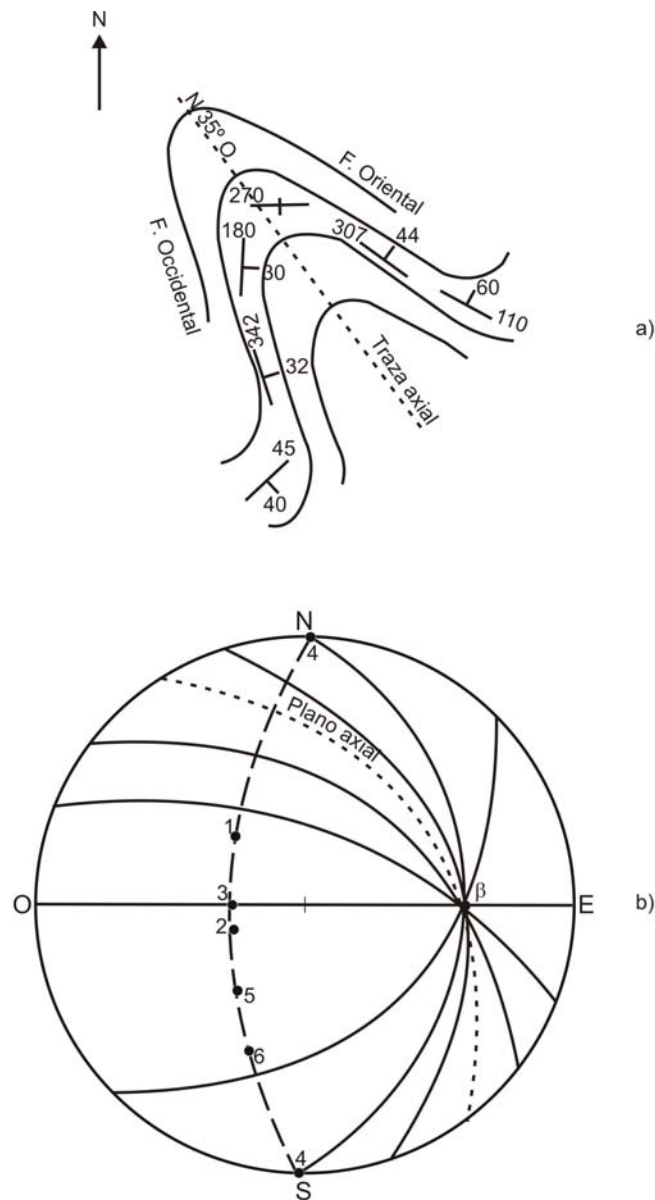


Figura 31. Problema 4. a) Disposición de las medidas en el afloramiento. b) Resolución del problema mediante ambas proyecciones, ciclográfica y polar.

- Proyectar las medidas de estratificación mediante sus polos. En la figura 31 B se han proyectado tanto en ciclográfica como en polar.
- Los polos de estratificación están contenidos en un círculo mayor, cuyo polo es la línea de charnela (β).
- Los planos de estratificación, en proyección ciclográfica, se cortan en un punto, que corresponde a la posición de la línea de charnela.
- En ambos casos, su orientación es $090^{\circ}/30^{\circ}$.

- Para aproximar la orientación del plano axial del pliegue, podemos medir en el dibujo la dirección de la traza axial, que es N35°O. El plano con esta dirección que contenga a la línea de charnela, será el plano axial del pliegue.
- Dibujamos este plano y su orientación es N35°O-36°NE.

Como ya sabemos, no se puede deducir de la proyección si el pliegue es antiformal o sinformal. En el caso de que corresponda a una antiformal o bien a un anticlinal, el flanco occidental correspondería a un flanco invertido, ya que todos los planos de estratificación buzcan al este.

Problema 5

Con los datos que figuran en el mapa adjunto (Fig. 32 A), construir un diagrama de polos y calcular tan aproximadamente como sea posible:

Orientación de la línea de charnela del pliegue.

Orientación del plano axial.

Estilo de los pliegues.

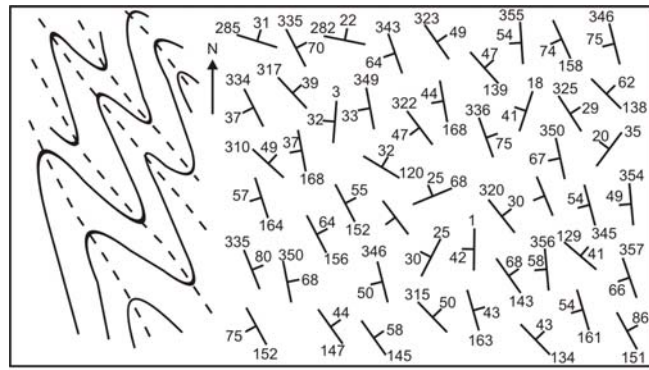
Ángulo interlimbo.

El diagrama de puntos, se puede observar en la figura 32 B, donde se han proyectados los polos de las 50 medidas de estratificación. El modelo que se observa pertenece a una corona de círculo máximo, por lo que se puede pensar que los pliegues son de tipo cilíndrico, con un eje de pliegue bien definido.

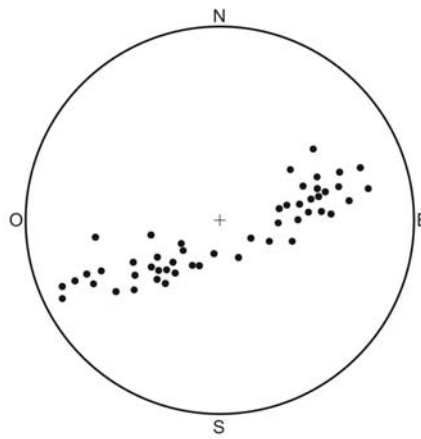
En la figura 32 C se observa el diagrama de contornos correspondiente. Los contornos corresponden al 2, 4, 8 y 12%. Dentro de la corona aparecen dos máximos principales, con una concentración de hasta el 16%. Cada uno de estos máximos corresponde al mayor número de medidas de orientación para ese flanco, luego cualquiera de los polos de este máximo representa la orientación mayoritaria de la estratificación para ese flanco.

El polo del círculo mayor que representa la corona, corresponderá a la posición de la línea de charnela del pliegue (β). Su orientación aproximada es 332°/14°.

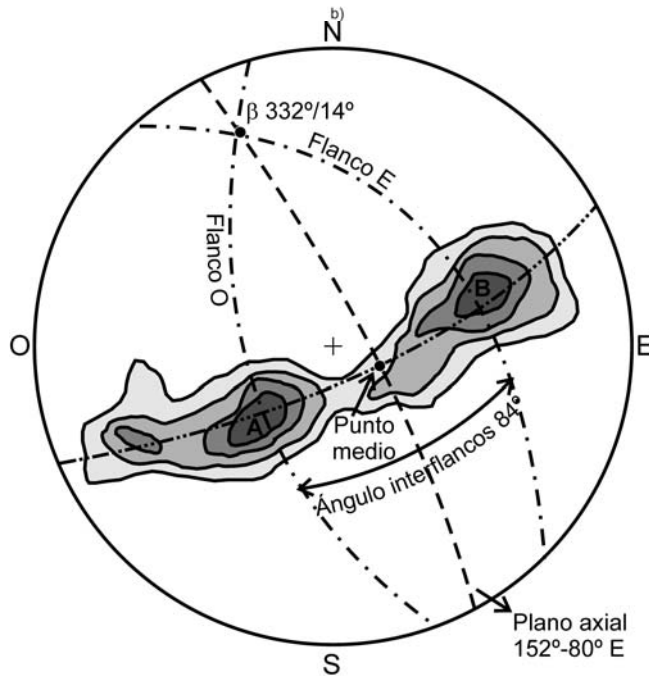
Los flancos del pliegue pasarán por el punto que define la línea de charnela y su orientación está representada por cualquiera de los polos contenidos en los máximos. Tomamos para cada máximo un punto que esté situado sobre el círculo mayor que representa la corona, y consideramos que es el polo del flanco. A partir de este polo dibujamos los dos flancos en proyección ciclográfica y leemos su orientación, medimos el ángulo interflancos, calculamos su punto medio y dibujamos el plano axial del pliegue, que será aquel que contiene a este punto medio y a la línea de charnela. La orientación aproximada de este plano axial es 152°-80°E y el valor del ángulo interflancos es de 84°.



A)



b)



c)

Figura 32. Resolución del problema 5. a) Mapa de medidas de S0. b) Diagrama de puntos. c) Diagrama de contornos con la posición media de los flancos del pliegue, línea de charnela y plano axial. Contornos de 2, 4, 8 y 12%. Máximos de 16%.

Hay que tener en cuenta que la elección de los puntos en los máximos que van a representar los flancos del pliegue, puede ser algo subjetiva, y en función de ella, la orientación de los flancos, valor del ángulo interflancos y orientación del plano axial, pueden variar ligeramente.

BIBLIOGRAFÍA

- Babín Vich, R. B. y Gómez Ortiz, D. 2010 a. Problemas de Geología Estructural. 1. Conceptos generales. *Reduca (Geología). Serie Geología Estructural*, 2 (1): 1-10.
- Babín Vich, R. B. y Gómez Ortiz, D. 2010 b. Problemas de Geología Estructural. 2. Orientación y proyección de planos en el espacio. *Reduca (Geología). Serie Geología Estructural*, 2 (1): 11-23.
- Babín Vich, R. B. y Gómez Ortiz, D. 2010 c. Problemas de Geología Estructural. 3. Orientación y proyección de líneas en el espacio. *Reduca (Geología). Serie Geología Estructural*, 2 (1): 2 (1): 24-40.
- Babín Vich, R. B. y Gómez Ortiz, D. 2010 d. Problemas de Geología Estructural. 4. Proyección polar de un plano. Proyección π *Reduca (Geología). Serie Geología Estructural*, 2 (1): 2 (1): 41-56.
- Babín Vich, R. B. y Gómez Ortiz, D. 2010 e. Problemas de Geología Estructural. 5. Rotaciones *Reduca (Geología). Serie Geología Estructural*, 2 (1): 57-73.
- Babín Vich, R. B. y Gómez Ortiz, D. 2010 f. Problemas de Geología Estructural. 6. Cálculo de la orientación de la estratificación a partir de testigos de sondeos. *Reduca (Geología). Serie Geología Estructural*, 2 (1): 74-94.
- Babín Vich, R. B. y Gómez Ortiz, D. 2010 g. Problemas de Geología Estructural. 7. Pliegues. *Reduca (Geología). Serie Geología Estructural*, 2 (1): 95-123.
- Babín Vich, R. B. y Gómez Ortiz, D. 2010 h. Problemas de Geología Estructural. 8. Fallas *Reduca (Geología). Serie Geología Estructural*, 2 (1): 124-147.

BIBLIOGRAFÍA DE CONSULTA

- Davis, G. H. 1984. Structural Geology of rocks and Regions. Wiley & Sons. 492 pp.
- Lheyson, P. R.; Lisle, R. J. 1996. Stereographic projection techniques in Structural Geology. Butterworth-Heinemann Ltd. Oxford. 104 pp.

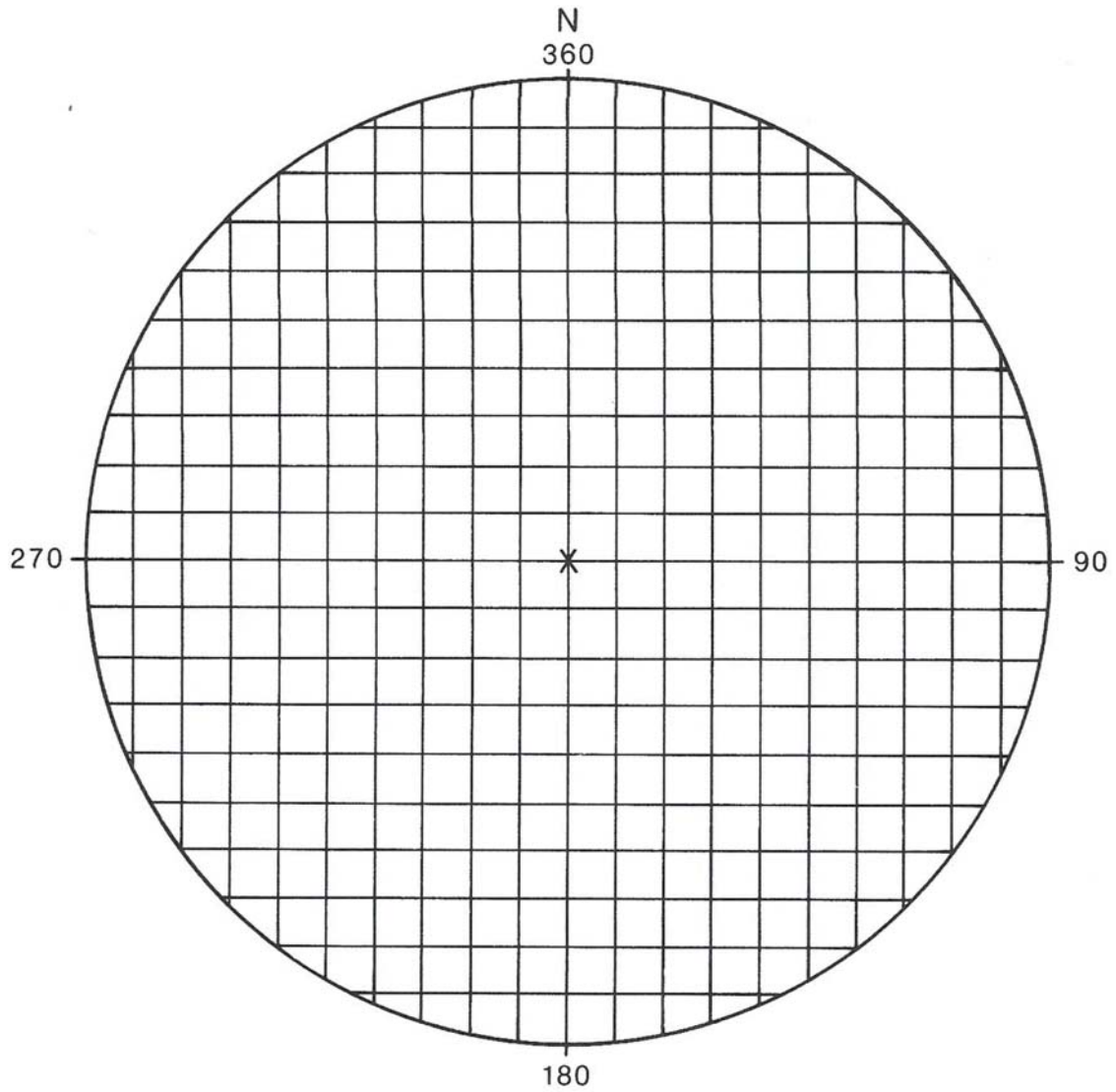
Marshak, S & Mitra, G. 1982. Basic methods of structural geology. Prentice & Hall. 446 pp.

Phillips, F. C. 1971. The use of stereographic projection in Structural Geology. Edward Arnol. London. 90 pp.

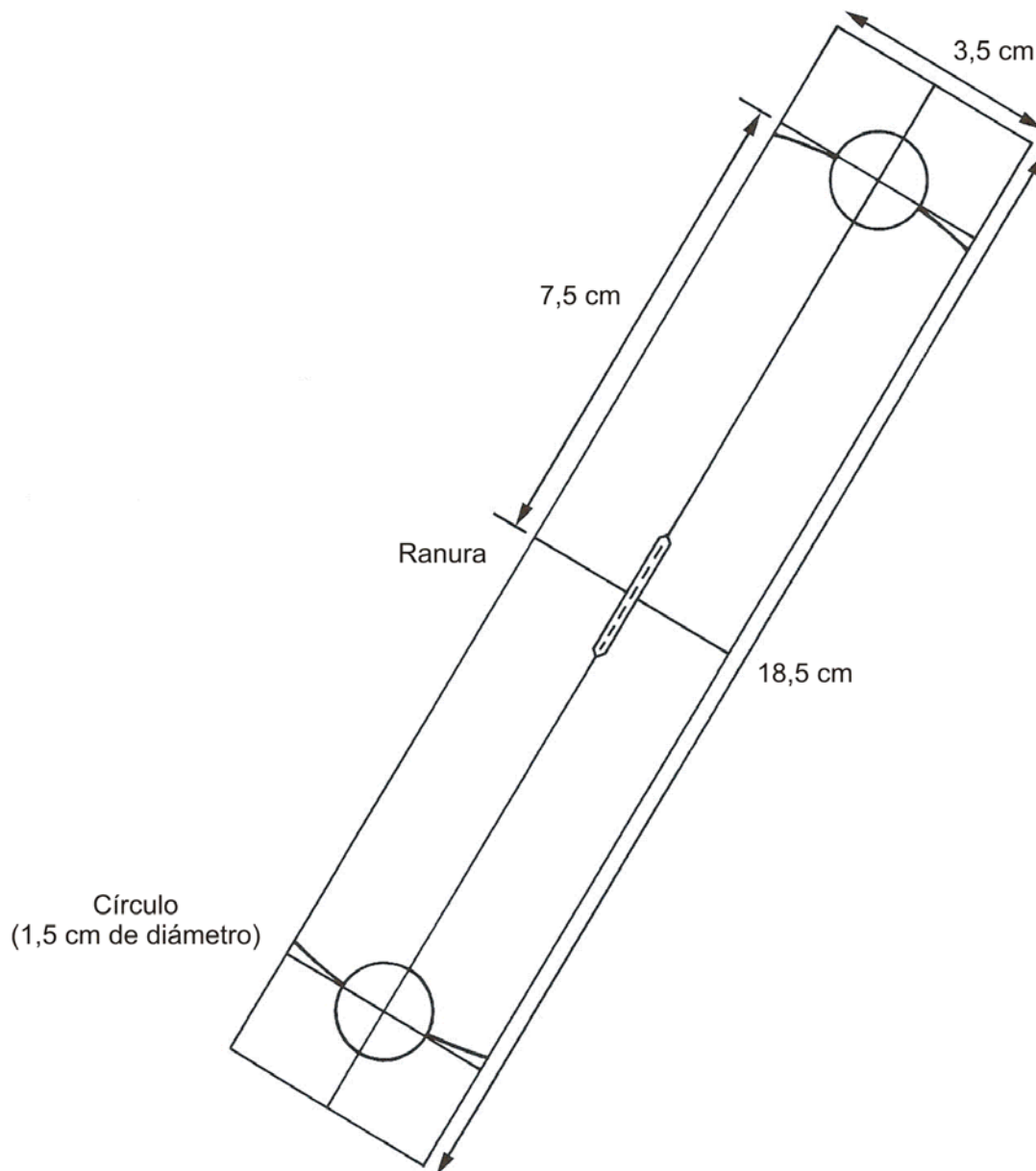
Ragan, D. M. 1987. Geología Estructural. Ed. Omega. Barcelona. 210 pp.

Turner, F. & Weiss, L.R. 1963. Structural analysis of metamorphic tectonites. McGraw Hill. New York. 545 pp.

ANEXO I
FALSILLADE CONTAJE DE SCHMIDT



**ANEXO II
CONTADOR**



Recibido: 18 noviembre 2009.
Aceptado: 22 diciembre 2009.