TÉCNICAS

DE PROYECCIÓN

ESTEREOGRÁFICA

PARA GEÓLOGOS E

INGENIEROS CIVILES

SEGUNDA EDICIÓN

RICHARD J. LISLE Cardif Universidad PETER R. LESIÓN Universidad de Glamorgan

Técnicas de Proyección Estereográfica para Geólogos e Ingenieros Civiles

Segunda Edición

Richard Lisie alcanzó el Ph.D. en el Imperial College, Universidad de Londres, en 1974 y seguidamente trabajó como profesor adjunto en la City of London Polytechnic, Universidad de Leiden, en la Universidad de Utrecht y en el University College, Swansea. En 1989 se asentó en la Universidad de Cardiff, donde en la actualidad es Profesor de Geología Estructural. El Profesor Lisle tiene más de 30 de experiencia enseñando geología años estructural, interpretación del mapa geológico, tectónica e ingeniería geológica. También es el autor de Geological Strain Analysis (1985), Geological Structures and Maps (1995), y Techniques in Modern Structural Geology: Applications of Continuum Mechanics in Structural Geology (2000).

Peter Leyshon alcanzó el Ph.D. de la Universidad de Londres en 1969 y empleó los 13 años siguientes trabajando para la Zimbabwe Geological Survey y Río Tinto Cinc como geólogo de campo. En 1973 el Dr. Leyshon llegó a ser profesor responsable de geología estructural y Director del Departamento de la Ulster Medioambiental de la Sección Polytechnic (Irlanda del Norte). En 1978 pasó a la Universidad de Glamorgan, Gales, donde fue Director del Departamento de Geología hasta retirarse en 2002.

(n.del t. Las equivalencias en los cargos académicos es orientativa)

Generaciones de estudiantes de Ciencias de la Tierra se han esforzado en visualizar la geometría tridimensional de los horizontes geológicos, fabrics, fracturas y pliegues. La proyección estereográfica es una herramienta esencial en los campos de la geología estructural y la geotécnia, qué permite representar los datos de orientación tridimensionales y manipularlos. Algunos textos existentes incluyen secciones breves sobre el método estereográfico, pero no los estudiantes proporciona a explicación de los principios subvacentes. Esto puede llevar a emplear mal las técnicas y da como resultado el que sean drásticamente incorrectos.

Técnicas de Proyección Estereográfica para Geólogos e Ingenieros Civiles se ha diseñado para hacer la temática tan accesible como sea posible. Da una introducción clara y simple al asunto y, por medio de ejemplos, ilustraciones y ejercicios, anima a que el estudiante visualice los problemas en tres dimensiones. El contenido se presenta en capítulos de fácil manejo que consisten en pares de páginas, con una página de ilustraciones frente a una página de texto explicativo. Los estudiantes de todos los niveles podrán ser capaces de ir trabajando a lo largo del libro y salir con una comprensión clara de cómo aplicar estas técnicas vitales.

Esta nueva edición contiene material adicional sobre las aplicaciones geotécnicas, ilustraciones mejoradas y correlaciones con los útiles recursos de la web y del software. Les proporcionará una guía indispensable a los estudiantes de geología, mecánica de rocas, geotécnia e ingeniería civil para el análisis y interpretación de datos de orientación de campo.

Contenidos

Prólogo página	vii
Agradecimientos	viii
1 Estructuras geológicas de tipo planar	2
2 Para medir y registrar la orientación de	
las estructuras planares	4
3 Estructuras geológicas de tipo lineal	7
4 Para medir y registrar la orientación	
de líneas	8
5 ¿Por qué necesitamos las proyecciones?	10
6 Idea de la proyección estereográfica	12
7 Método aproximado de representar líneas	
y planos	14
8 Ejercicios 1	16
9 La plantilla –falsilla- estereográfica	18
10 Método preciso para representar planos.	
Círculos máximos y polos	20
11 Método preciso para representar líneas 1.	
Conocida la inmersión de la línea	22
12 Métodos precisos para representar líneas 2.	
Conocida la línea a partir de su cabeceo	24
13 La intersección de dos planos	26
14 Plano conteniendo dos líneas	28
15 Buzamiento aparente	30
16 El ángulo entre dos líneas	32
17 El ángulo entre dos planos	34
18 Plano bisector del ángulo entre dos planos	36
19 Proyectar una línea en un plano	38
20 Proyecciones estereográfica y equiareal	40
21 La falsilla -plantilla- polar	42
22 Analizando pliegues 1. Cualidad cilíndrica	
(Cylindricity) e inmersión del eje	44
23 Analizando pliegues 2. Ángulo inter-	
flancos y la superficie axial	46
24 Analizando pliegues 3. Estilo del	
plegado	48
25 Analizando pliegues 4. La orientación de	
pliegues	50
26 Pliegues y clivaje	52
27 Analizando pliegues con clivaje	54
28 Fallas 1. Para calcular el salto neto	56
29 Fallas 2. Para estimar direcciones de	
deformación	58

30 Conos/ círculos menores	60	45 Para evaluar el plano de rotura.	
31 Representando un cono	62	Resurgiendo Daylighting [†]	90
32 Rotaciones sobre un eje horizontal	64	46 Para evaluar una rotura en cuña	92
33 Ejemplo de rotación sobre un eje horizontal		47 Ejercicios 2	94
Restauración de inclinaciones de capas	66	48 Soluciones a los ejercicios	97
34 Ejemplo de rotación. Para restaurar			
	68	Apéndice 1 Falsilla estereográfica	
paleocorrientes.	70	ecuatorial (Wulff)	99
35 Rotación sobre un eje inclinado		Apéndice 2 Falsilla ecuatorial	
36 Ejemplo de rotación sobre un eje inclinado.	72	equiareal (Lambert/Schmidt)	100
Datos de Sondeo	12	Apéndice 3 Falsilla polar equiareal	101
37 Trazado de curvas de densidad en	74	Apéndice 4 Falsilla de conteo Kalsbek	102
estereogramas	76	Apéndice 5 Mapa de clasificación para	
38 Plegamiento superpuesto 1	70	orientaciones de pliegue	103
39 Plegamiento superpuesto 2. Concepto de	70	Apéndice 6 Algunas formulas útiles	104
sub-área	78	Apéndice 7 Método alternativo para	-
40 Ejemplo de análisis de pliegues. Área de	00	representar planos y lineas	106
Bristol	80	Disponibilidad de programas de ordenac	
41 Análisis geométrico de pliegues. Ejemplos			108
del SW de Inglaterra	82	para representar estereogramas	109
42 Ejemplo de análisis del diaclasado.		Lecturas complementarias	110
Costa de Glamorgan	84	İndice	110
43 Aplicaciones geotécnicas. Estabilidad de			
taludes rocosos	86		
44 Para evaluar el plano de rotura. Resistencia	1		
a la fricción	88		

†Daylighting: volver a salir a la luz = resurgir n. del t.

PRÓLOGO

proyección estereográfica una herramienta esencial para los geólogos y los ingenieros civiles que permite que los datos de orientación tri-dimensionales sean a la vez representados y manipulados. Proporciona una manera gráfica de desplegar los datos qué es esencial para el recopilados reconocimiento e interpretación de modelos de orientación preferente. También permite procesar los datos, girarlos y analizarlos por construcciones diversas de medio geométricas normales. Esto último puede ser rápidamente llevado a cabo usando el software de un ordenador pero el método estereográfico tiene la ventaja de que las construcciones pueden apreciarse visualmente y pueden mostrarse gráficamente. El método estereográfico se explica de forma breve en muchos libros de texto existentes. Sin embargo, nuestra experiencia en la enseñanza de este asunto ha de mostrado que los estudiantes, aunque capaces de realizar en la mayoría de los casos las construcciones requeridas, no ven el principio subyacente del método que de ha empleado. Ellos aprenden el método como un juego de procedimientos de un libro de cocina que a veces funcionan pero que a menudo funcionan drásticamente mal. Este libro surge para proporcionar una introducción simple al asunto y por medio de las ilustraciones y los ejercicios animan a que el problemas los visualice estudiante involucrados en las tres dimensiones. Una vez se consigue una apreciación de la naturaleza del problema, la solución formal empleando la proyección se vuelve lógica y sencilla. El libro se escribe para los estudiantes de geológicas que siguen cursos de geología estructural. También será útil a los estudiantes de ingeniería civil que cursen geotécnia.

Agradecimientos

Agradecemos al Profesor Ernie Rutter (Universidad de Manchester) por su aliento para producir esta segunda edición. Tony Evans (Universidad de Glamorgan) ayudó produciendo algunas de las figuras. También apreciamos el apoyo de la Dra. Susan Francis en Cambridge University Press. Finalmente, deseamos agradecer a nuestras esposas Ana y Susan que nos hayan proporcionado su constante apoyo y estímulo durante la fase de redacción de este libro.

TECNICAS DE PROYECCIÓN ESTEREOGRÁFICA PARA GEOLOGOS E INGENIEROS CIVILES

1 Estructuras geológicas de tipo planar

Las rocas en la inmensa mayoría de los afloramientos posen algún tipo de estructura planar. En la mayoría de las rocas sedimentarias es visible una estructura planar conocida como la estratificación (Fig. la). Éste es un rasgo primario formado en el momento de la deposición y es una disposición en capas que se caracteriza por la composición, las variaciones texturales o el tamaño de grano. Algunas rocas igneas posen una estructura equivalente llamada estratificación ígnea primaria producida por la acumulación de cristales que se establecen a partir de un magma. La orientación de estas estructuras planares primarias refleja los mecanismos de los procesos de deposición, y las medidas de su orientación pueden ofrecer información sobre la paleo-horizontalidad, la dirección de flujo de corrientes, etc.,

La foliación es un término general para todas las estructuras planares, que se desarrollan penetrativamente, encontradas en las rocas.

La estratificación sedimentaria se clasifica bajo este encabezamiento como la estructura planar resultante de procesos de deformación y metamórficos. De estos últimos son las foliaciones secundarias e incluyen el clivaje Algunas esquistosidad. la У foliaciones son definidas por las variaciones en la composición; otras, como la fractura pizarrosa (slaty cleavaje), por una alineación paralela de granos o de minerales agregados. Las direcciones de planos de clivaje son frecuentemente medidas con el propósito de estimar las direcciones de las tensiones geológicas en las rocas. La figura 1b muestra rocas que contienen dos foliaciones juntas: una foliación primaria (estratificación) y una

foliación secundaria (clivaje).
El bandeado neísico (Fig. lc) es un rasgo común de las rocas metamórficas de grano grueso como los neises. Esta foliación secundaria es una disposición en capas por la composición definida por la concentración de minerales particulares.

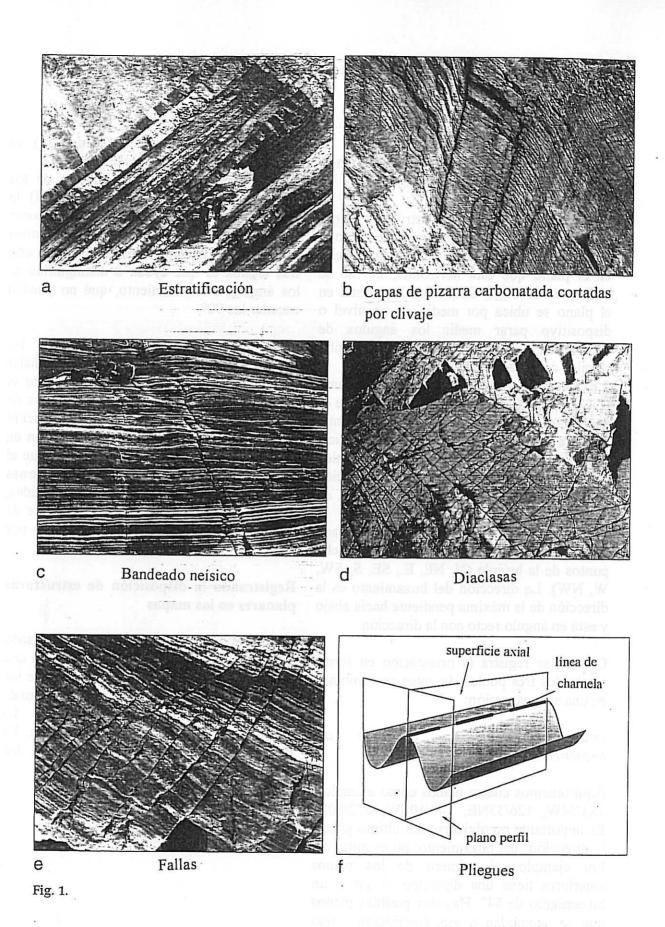
Otras estructuras en rocas tienen geometría planar pero son rasgos discretos y por consiguiente no son ejemplos de foliación.

Las diaclasas (Fig. ld) son fracturas en rocas a lo largo de las cuales apenas o ningún movimiento ha tenido lugar. Aunque son producidas a causa tan sólo de una tensión tectónica menor, representan discontinuidades en la masa de la roca y como tales son importantes en su comportamiento mecánico. La valoración de las orientaciones de las diaclasas presentes podría formar una parte esencial de cualquier análisis de estabilidad de la superficie de pendientes o en las excavaciones del subsuelo (vea pág. 86).

Las fallas (Fig. le) son planos a lo largo de los cuales la roca de un lado es desplazada en relación con la del otro lado. Recogiendo, en una región, los datos de dirección de varios planos de falla a veces es posible estimar las direcciones de los principales ejes de tensión en el momento del fallamiento (pág. 58).

Las superficies de contacto entre las unidades geológicas pueden ser consideradas a menudo planares, al menos a escala local. Estos contactos son a menudo paralelos a la estratificación en las rocas en cualquier lado del contacto, pero podrían formar los márgenes de rocas ígneas intrusivas o podrían ser por erosión. e.g. las superficies de disconformidad.

Se pueden definir geométricamente otros ejemplos de planos con respecto a otros rasgos. Por ejemplo, la superficie axial (o plano axial) de un pliegue (Fig. lf) puede determinarse como el plano bisector del ángulo entre dos limbos de un pliegue. El plano del perfil de un pliegue es el que es perpendicular al eje del pliegue. Planos de este tipo pueden ser superficies planares no mensurables en el afloramiento.



Estructuras geológicas de tipo planar

2 Para medir y registrar la orientación de las estructuras planares

Una manera frecuentemente usada de describir la disposición de una estructura planar es medirla y registrarla:

1 La dirección (strike) de la estructura planar (Fig. 2a). La dirección es la orientación en la brújula (o rumbo –bearing-) de la línea especial en el plano que está horizontal, i.e. no se inclina en absoluto. Esta línea horizontal en el plano se ubica por medio de un nivel o dispositivo parar medir los ángulos de inclinación, llamado clinómetro y su rumbo se mide con una brújula (Fig. 2c).

2 El buzamiento (dip) de la estructura planar (Fig. 2a). El buzamiento es el ángulo de la pendiente del plano. Un plano horizontal tiene un buzamiento de 0°; un plano vertical buza 90°. El buzamiento también se mide con el clinómetro pero con una orientación en el plano en ángulo recto con la línea de dirección (Fig. 2d).

3 la dirección de buzamiento aproximada ha sido expresada como uno de los ocho puntos de la brújula (N, NE, E., SE, S, SW, W, NW). La dirección del buzamiento es la dirección de la máxima pendiente hacia abajo y está en ángulo recto con la dirección.

Cuando se registra la orientación en forma escrita los tres puntos de antes se combinan en una sola expresión:

dirección/ buzamiento dirección del buzamiento

Aquí tenemos cuatro planos como ejemplos: 183/54W, 126/33NE, 140/10SW, 072/80N. Es importante no olvidarse del último punto, la dirección del buzamiento; no es optativo. Por ejemplo, el primero de los planos anteriores tiene una dirección al sur y un buzamiento de 54°. Hay dos posibles planos que se acomodan a esa descripción: uno buza al este con 54°, y el otro al oeste con 54°. El especificar la dirección aproximada

del buzamiento (al W en este caso) es necesario para aclarar esta ambigüedad.

Observe también que en el último de los planos de muestra de antes (072/80N) la orientación de la dirección se escribe como 072 en lugar de simplemente 72. La ventaja de escribir las orientaciones de la brújula con tres dígitos es que ayuda a distinguirlas de los ángulos de buzamiento, qué no pueden exceder los 90°.

Otro sistema popular para registrar las orientaciones de planos involucra el señalar la dirección del buzamiento seguido por el ángulo de buzamiento. Los cuatro planos de antes según esta alternativa 'convención dirección del buzamiento' se transforman en 273/54, 036/33, 230/10 y 342/80. Aunque el estudiante adoptará una sola de estas convenciones para su o sus propias medidas, es importante no obstante ser consciente de lo que signifiquen las medidas efectuadas por los demás.

Registrando la disposición de estructuras planares en los mapas

En los mapas modernos el símbolo usado para la orientación de planos consiste en una línea en la orientación de la dirección de los planos con un tic en el lado que corresponde a la dirección del buzamiento. El ángulo del buzamiento se escribe junto a la marca. La figura 2e muestra los símbolos para los diferentes tipos de estructura planar.

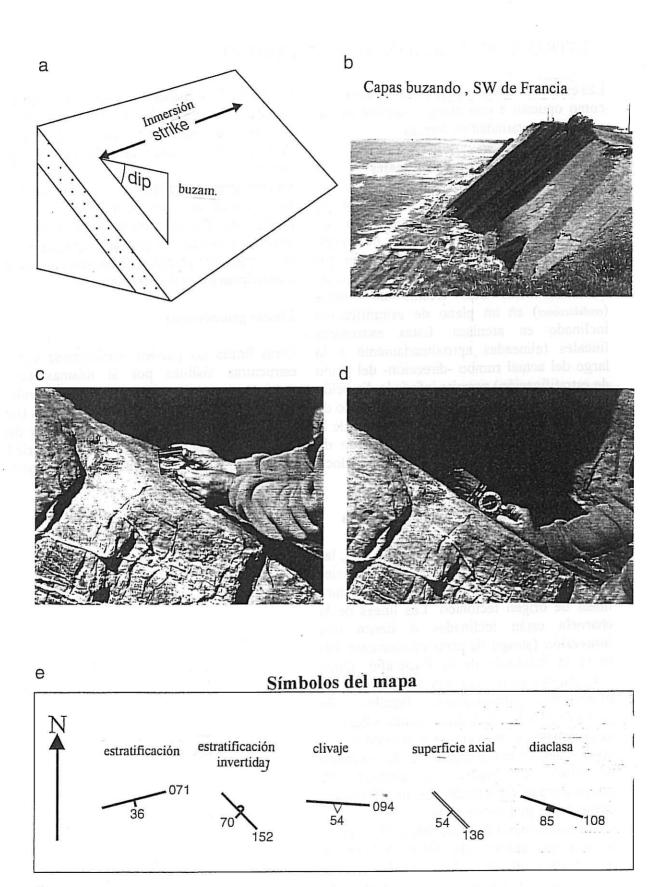


Fig. 2.

3 ESTRUCTURAS GEOLÓGICAS DE TIPO LINEAL

Las estructuras de carácter lineal en las rocas, como opuesto a uno planar, también se dan en una gran variedad de formas.

Estructuras sedimentarias lineales

Estas estructuras son primarias y se desarrollan durante la sedimentación. La figura 3a muestra un ejemplo de rasgos lineales en un plano de estratificación que buza fuertemente en la base de una capa de arenisca. Éstas son crestas de ripples (ondulaciones) en un plano de estratificación inclinado en arenisca. Estas estructuras lineales (alineadas aproximadamente a lo largo del actual rumbo -dirección- del plano de estratificación) permite inferir la dirección original de la corriente. Una vez corregido de la inclinación que la capa ha sufrido desde la deposición, la medida de la dirección de estas estructuras puede usarse para deducir las antiguas corrientes.

Estructuras lineales de origen tectónico

Líneas de charnela de pliegue (Fig. 3b), las líneas de la curvatura máxima de superficies plegadas, son ejemplos de una estructura lineal de origen tectónico. Las líneas de la charnela están inclinadas o tienen una inmersión (plunge) de aproximadamente 10° hacia la izquierda de la fotografia. Otras alineaciones tectónicas son las lineaciones minerales (alineaciones lineales minerales en las tectonitas metamórficas) y lineaciones de estiramiento definidas por objetos deformados alargados en forma como de puro. La figura 3c muestra un conglomerado deformado con una lineación definida por guijarros estirados.

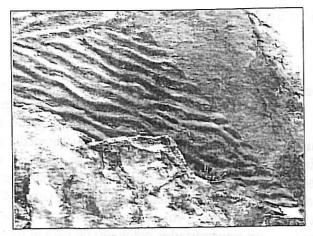
Lineaciones del espejo de falla (Fig. 3d) se forman en planos de falla durante el movimiento de las dos paredes. Estas lineaciones se miden en el campo para proporcionar información sobre la dirección del movimiento de la falla.

La figura 3e muestra una fabric lineal en un granito metamorfizado. La deformación de esta roca ha dado lugar a que los agregados de feldespato se hayan estirado en forma de puros.

Los dos planos, que no son paralelos entre sí, se cortarán mutuamente a lo largo de una línea dada. De esta manera una lineación puede ser producida por la intersección de dos estructuras planares. Éstas son conocidas como lineaciones de intersección

Líneas geométricas

Otras líneas no pueden manifestarse como estructuras visibles por si mismas pero pueden ser construidas geométricamente. Una línea alrededor de la cual giran otras (un eje de rotación, Fig., 3f); la normal a un plano dado (Fig. 3f), un eje de deformación principal, y un eje del pliegue son algunos ejemplos.

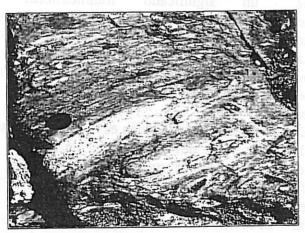


1

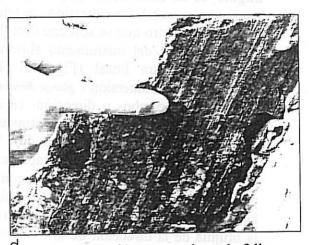
Crestas de ripples



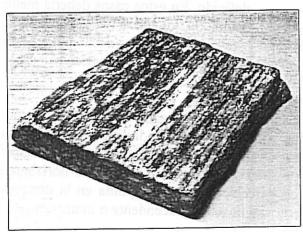
b Líneas de charnelas de pliegues en una veta de cuarzo



C Conglomerado de cantos alargados:

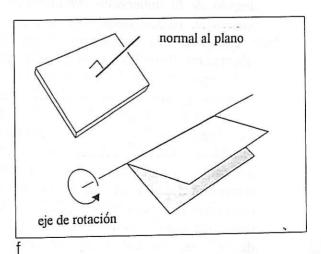


Lineación en un plano de falla



e Fabric linear en metagranito





4 Para medir y registrar la orientación de líneas

Hay dos maneras de describir la orientación de una línea geológica:

La inmersión (plunge) y la dirección -en su plano- de inmersión (plunge direction). En este sistema la orientación de la línea se describe con referencia a un plano vertical imaginario que atraviesa la línea (Fig. 4a). El ángulo de inclinación de la línea medido en este plano vertical se llama ángulo de la inclinación (angle of plunge) (buzamiento aparente). La inmersión se mide con un clinómetro que se sostiene derecho y con el borde del instrumento alineado con la estructura lineal (Fig. 4c). La dirección de la inmersión (plunge direction) es paralela al rumbo- o dirección- (strike) del plano vertical imaginario que atraviesa la línea de la inmersión (Fig. 4a). Es medido poniendo el borde de la tapa de la brújula a lo largo de la lineación y, con el plato la brújula sostenido horizontalmente, midiendo la dirección en la brújula de la dirección de la inmersión hacia abajo (Fig. 4d).

Estas medidas se escriben como ángulo de la inmersión- dirección de la inmersión. (angle of plunge-plunge direction)

Por ejemplo, una estructura lineal con orientación 30-068 se inclina hacia abajo o ' tiene un ángulo de inmersión- o buzamiento aparente' de 30° hacia el rumbo (dirección de la brújula) de 068° (Fig. 4a). igualmente podría La línea 0-124 porque una línea escribirse 0-304 horizontal, puede decirse que tiene una inmersión (plunge) en cualquiera de dos Una separadas 180°. direcciones estructura lineal con una inmersión (plunge) de 90° es vertical y su dirección de inmersión no se define.

Cabeceo (pitch) Muchas estructuras lineales se desarrollan en estructuras planares; por ejemplo, la lineación del espejo de falla se encontrará en planos de falla. En tales de una manera dispone casos alternativa de medir la orientación de la estructura lineal. Esto involucra medir el cabeceo (pitch); el ángulo se mide en el plano de buzamiento entre la estructura lineal y la dirección o rumbo (strike) del plano (Fig. 4b). Este ángulo se mide con un transportador colocado de cara al plano que contiene la estructura lineal (Fig. 4e). Por supuesto, para que este ángulo tenga tridimensional significado disposición del plano también tiene que ser registrada. Refiriéndose a la Fig. 4e, un ejemplo de este formato es

plano 026/42SE con estructura lineal con cabeceo (pitching) de 50NE

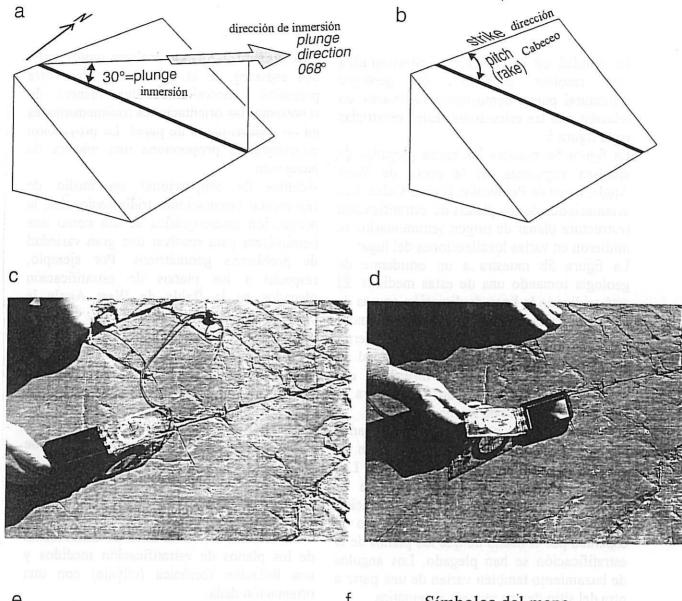
Observe que también es necesario registrar a partir de qué extremo de la línea de dirección o rumbo (strike) se midió el cabeceo (pitch) (esto viene dado por el 'NE ' en el ejemplo de arriba).

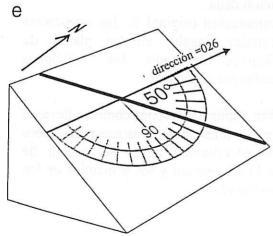
Si la línea se da en un plano de buzamiento somero la medida del cabeceo (pitch) se dificulta por el hecho de que el rumbo o dirección (strike) del plano está pobremente definido. En estos casos debería medirse a cambio la inmersión (plunge) de la línea.

Registrando la disposición de las estructuras lineales en mapas

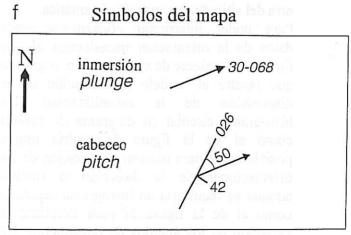
Es práctica normal mostrar las estructuras lineales medidas y la situación del lugar de la medida usando el símbolo de una flecha (Fig. 4f). Para líneas que no están horizontales la flecha en el mapa apunta en la dirección de inclinación descendente o inmersión (plunge).

& El término inclinación (rake) es sinónimo de cabeceo (pitch).









5 ¿Por qué necesitamos las proyecciones?

La utilidad de la proyección estereográfica para resolver problemas en geología estructural puede demostrarse fácilmente en relación con las estructuras reales mostradas en la figura 5.

La figura 5a muestra las capas plegadas de arenisca expuestas en la costa de West Angle, cerca de Pembroke, Dyfed, Gales. Las orientaciones de los planos de estratificación (estructura planar de origen sedimentario) se midieron en varias localizaciones del lugar.

La figura 5b muestra a un estudiante de geología tomando una de estas medidas. Él está midiendo la línea de dirección en una de las superficies de estratificación buzando. Estas medidas se registraron en un cuaderno de campo usando la forma convencional de dirección / buzamiento / dirección del buzamiento descrita en la pág. 4. La figura 5c muestra un extracto de su cuaderno.

Las medidas de la orientación de los planos de estratificación también se registraron en un mapa a gran escala (Fig. 5d). Los símbolos en el mapa muestran que la dirección de los planos de estratificación cambia de una manera ordenada, como se esperaba por el hecho de que los planos de la estratificación se han plegado. Los ángulos de buzamiento también varían de una parte a otra del sitio de una manera sistemática.

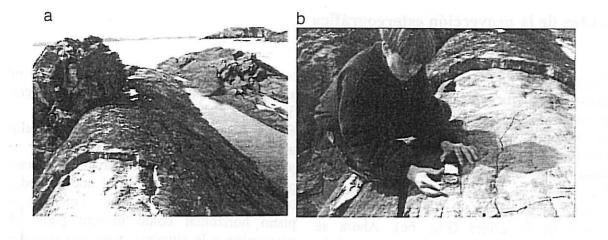
Para poder interpretar eficazmente éstos datos de la orientación necesitamos alguna forma conveniente de visualización o gráfico que resalte el modelo de variación de la disposición de la estratificación. histograma circular (o diagrama de roseta) como el de la figura 5e podría usarse posiblemente para mostrar la variación de las orientaciones de la dirección o rumbo, aunque se requeriría un histograma separado como el de la figura 5f para examinar la variación en los ángulos de buzamiento. De hecho resulta que esta aproximación para direcciones buzamientos analizar V separadamente no es muy satisfactorio. Podemos deducir mucho más acerca de la

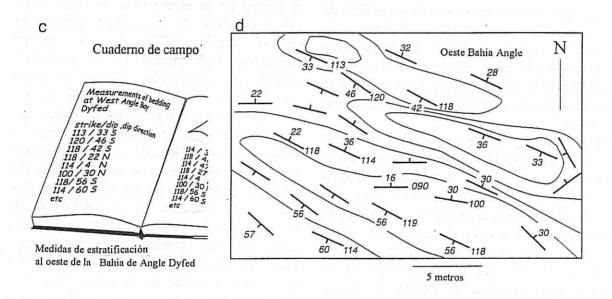
estructura si podemos analizar juntos estos dos aspectos de la orientación. Para este propósito necesitamos una manera de representar las orientaciones tridimensionales en un pedazo plano de papel. La proyección estereográfica proporciona una manera de hacer esto.

Además de proporcionar un medio de representar orientaciones tridimensionales, la proyección estereográfica se usa como una herramienta para resolver una gran variedad de problemas geométricos. Por ejemplo, respecto a los planos de estratificación plegados en la Bahía de West Angle la proyección estereográfica nos permite calcular:

- 1 La inmersión (plunge) y la dirección de la inmersión (plunge direction) de los ejes de plegamiento de los planos de estratificación.
- 2 El ángulo entre cualquier par de planos de estratificación y el ángulo del inter-limbo de los pliegues.
- 3 La orientación de la superficie axial del pliegue (el plano bisector del ángulo entre los limbos del pliegue).
- 4 La orientación de la línea de intersección de los planos de estratificación medidos y una foliación tectónica (clivaje) con una orientación dada.
- 5 La orientación original de las estructuras sedimentarias lineales en los planos de estratificación quitando las rotaciones provocadas por el plegado.

Este libro explicará después cómo se llevan a cabo estas diferentes construcciones pero primero necesitamos mirar la manera de realizar la proyección y los principios en los que está basada.





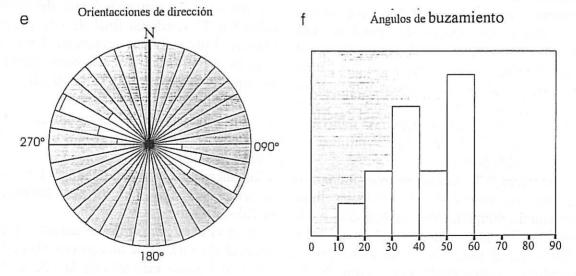


Fig. 5.

Etapa 1 - la línea estructural o plano se proyecta en una esfera Permítanos empezar proyectando una línea estructural. La figura 6a muestra semejante línea cuando se observa, por e.g. en el campo. Junto a ella imaginamos una esfera vacía.

La línea se traslada ahora desde el afloramiento y, sin girarla, se pone en el centro de la esfera (Fig. 6c). Ahora se aumenta la longitud de la línea hacia abajo hasta que la línea encuentra la superficie de la esfera. El punto en el que la línea y la esfera se unen se llama la **proyección esférica** de la línea. Este punto siempre se localiza en la mitad inferior de la esfera y su posición exacta depende de la orientación de la línea.

Un plano (Fig. 6b) se proyecta de la misma manera. Se traslada al centro de la esfera y se expande hacia abajo hasta que toque la superficie del hemisferio inferior (Fig. 6d). La línea de contacto es ahora un círculo; un círculo en la esfera con el mismo radio que la propia esfera. Los círculos de una esfera que son producidos por la intersección de un plano que atraviesa su centro se llaman círculos máximos.

Pensando en la Tierra como una esfera aproximada, las líneas de longitud son círculos máximos y por lo tanto lo es el ecuador (Fig. 6e). Sin embargo, hay otros círculos en el globo como los círculos polares y los trópicos que no se califican como círculos máximos porque tienen un radio más pequeño que la Tierra. Estos últimos se llaman círculos menores.

Si tuviéramos la esfera delante podríamos describir la orientación de cualquier línea estructural simplemente apuntando a la posición de un punto en el hemisferio inferior. La disposición de un plano podría describirse similarmente por medio de un círculo máximo en el hemisferio inferior. Sin embargo, obviamente no es conveniente tener que llevar esferas con nosotros para este propósito. Lo que se necesita es una forma de dibujar el hemisferio inferior (junto

con los puntos y sus círculos máximos) en una hoja de papel. La proyección estereográfica es una manera simple de hacer esto.

Etapa 2 - Los puntos y los círculos máximos desde el hemisferio inferior se provectan en un hoja de papel. Tomamos primeramente un plano en el que proyectar todo: el plano de proyección. Tomamos un plano horizontal como nuestro plano de proyección y lo situamos para que atraviese el centro de la esfera (Fig. 6f. 6g). En la esfera el plano de proyección produce un máximo llamado el círculo primitivo. Los puntos en el hemisferio inferior (la proyección esférica de líneas estructurales) se elevan al plano de proyección moviéndolos a lo largo de líneas que atraviesan el punto más alto de la esfera. o cenit (Fig. 6f). De esta manera cualquier punto en el hemisferio se proyecta para dar un punto en el plano de proyección (Fig. 6h). Un círculo máximo en el hemisferio (la proyección esférica de un plano) se proyecta como un arco circular, la forma del cual puede construirse proyectando varios puntos del círculo máximo en la esfera (Fig. 6g). Todos los puntos proyectados y los círculos máximos vienen a quedar dentro del círculo primitivo. El resultado final de esta proyección es el producir una representación en un hoja de papel de las orientaciones tridimensionales: el estereograma (Fig. 6h. 6i).

Imagine

- l la esfera vacía con líneas/planos, atravesando su centro, proyectados estereográficamente.
- 2 las líneas/planos expandiéndose hasta que corten el hemisferio inferior para dar puntos/ círculos máximos.
- 3 el ver el hemisferio inferior entero mirando hacia abajo a través de un agujero taladrado a través del punto más alto de la esfera. Esta vista de los puntos/círculos máximos en el hemisferio inferior es exactamente a lo que se parece el estereograma.

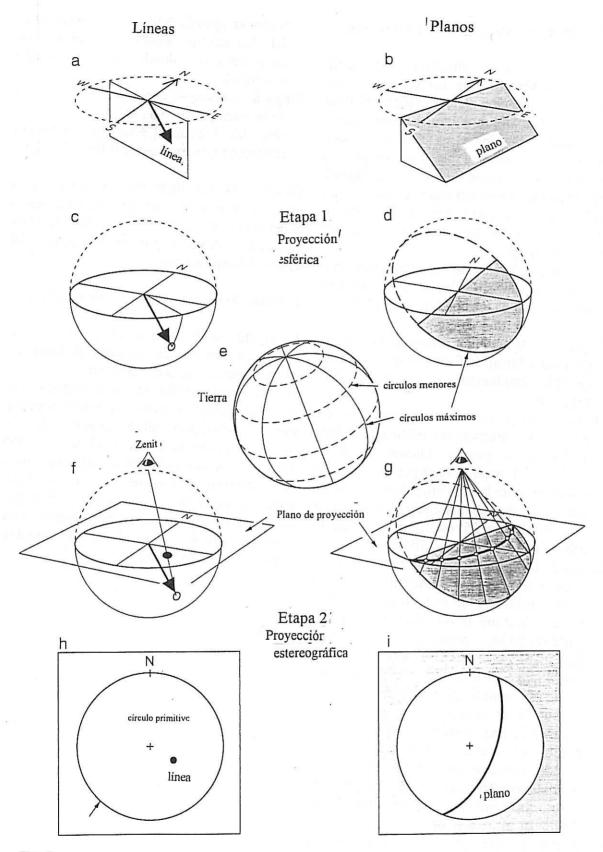


Fig. 6.

7 MÉTODO APROXIMADO DE REPRESENTAR LÍNEAS Y PLANOS

Esbozando un estereograma de una línea

Este capítulo se ha diseñado para darle práctica en visualizar la manera en la que trabaja la proyección estereográfica. Al final de él usted representará estereogramas aproximados propios. Una vez que usted entienda cómo esbozar estos estereogramas aproximados usted se encontrará representando estereogramas exactos muy fácilmente (se ocupará más tarde). No se salte esta sección aun cuando le parezca demasiado simple.

Permitanos esbozar un estereograma que muestra una estructura lineal que tiene una inclinación de 25° en una dirección 120°.

Etapa 1: Apunte la orientación de la estructura lineal de forma normal. En este ejemplo simplemente escribimos 25-120 (Fig. 7a).

Etapa 2: Haga un boceto de un mapa en miniatura marcando un norte que señala arriba de la página. Dibuje en él el símbolo del mapa normal para registrar la orientación de la estructura lineal. Éste es una flecha que apunta hacia el rumbo 120 con el número 25 escrito al lado de la cabeza de la flecha (Fig. 7b).

Etapa 3: Dibuje un círculo (uno a pulso, de unos 3 o 4 cm de diámetro) qué es el círculo primitivo de nuestro estereograma boceto. Marque la dirección norte en la parte de arriba y ponga una cruz pequeña para marcar el centro (Fig. 7d).

Etapa 4: Este es a donde se dirige nuestro poder de visualización. El círculo en la figura 7d es nuestra vista de la mitad inferior de una esfera vacía vista desde el punto cenit (cima), es lo que estamos viendo verticalmente hacia abajo en el hemisferio inferior (Fig. 7c). Imaginemos ahora que cambiamos la estructura lineal desde su situación en el mapa hasta el centro de esta esfera. Esta línea que se sumerge, si la hace lo suficientemente larga, cortará al hemisferio inferior en un punto que depende de su dirección y ángulo de inmersión. Necesitamos

"calcular aproximadamente" en qué lugar del hemisferio estará este punto de proyección. (i.e. donde dentro del círculo primitivo)

Etapa 5: Registre su conjetura de la posición de la línea proyectada en el estereograma (Fig. 7d). Éste es el estereograma boceto terminado que representa la línea 25-120.

Observe: Si una línea tiene una inmersión (plunge) suave se proyectará como un punto cerca del círculo primitivo; si la inmersión es empinada estará representado cerca del centro del estereograma.

Esbozando un estereograma de un plano

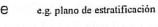
La figura 7e-7h explica las mismas cinco fases que han de ser seguidas al hacer un estereograma boceto de un plano.

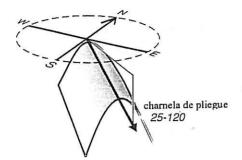
Observe: un círculo máximo trazado que representa un plano tiene una forma convexa hacia la dirección del buzamiento de ese plano. El grado de convexidad depende del ángulo de buzamiento: los círculos máximos de los buzamientos suaves son más convexos y quedan más cerca del círculo primitivo que los de planos con fuerte buzamiento. Los planos verticales dan lugar a círculos máximos que son líneas rectas.

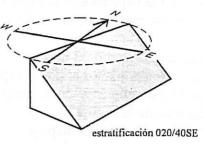
ESTRUCTURAS LINEALES

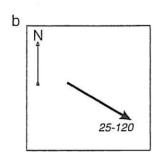
ESTRUCTURAS PLANARES

a e.g. linea de chamela de pliegue

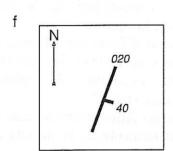


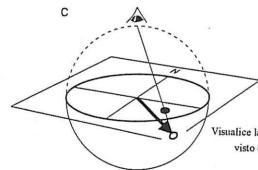




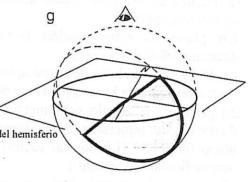


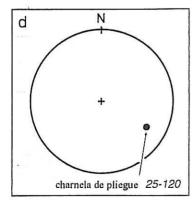
Mapa y Símbolo





Visualice la proyección del hemisferio visto desde arriba





Dibujo del boceto del estereograma

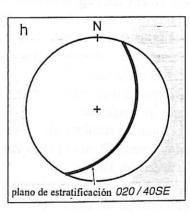
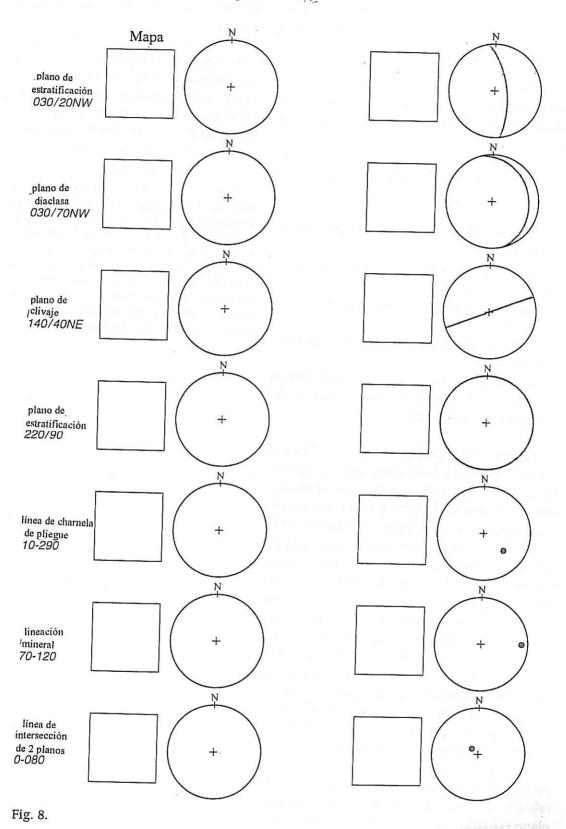


Fig. 7.

8 Ejercicios 1

- 1 Represente las medidas de líneas y planos dadas a la izquierda de la Figura 8:
 - (a) en los mapas con el símbolo apropiado v
 - (b) en estereogramas boceto.
- 2 convertir los planos y líneas representados en el estereograma en la columna de la derecha de la Figura 8:
 - (a) los símbolos del mapa y
 - (b) los valores numéricos aproximados.
- 3 Usando su experiencia de la cuestión 1. conteste a lo siguiente.
 - (a) ¿Cómo difieren los círculos máximos de planos que buzan fuertemente de los círculos máximos de planos con buzamientos bajos?
 - (b) ¿Cómo difiere traza de una línea que buza fuertemente de la de una que buza suavemente?
 - (c) ¿Cómo podría deducirse la dirección de un plano a partir de su círculo máximo en un estereograma?
- 4 Un plano de estratificación tiene una dirección 080° y buza 60S.
 - (a) Dibuje un símbolo de mapa apropiado y un estereograma boceto para este plano.
 - (b) ¿Cual es el ángulo de inmersión y la dirección de inmersión de la normal al plano 080/60S? (La normal es una línea perpendicular a un plano.)
- (c) Represente la normal al plano como un punto en el estereograma boceto.
- 5 Un plano tiene una orientación 124/40SW.
 - (a) Dibuje este plano buzando en un estereograma boceto de la manera ilustrada en la pág. 15.
 - (b) Represente en este estereograma boceto lo siguiente:
 - (i) la línea de rumbo (S),
 - (ii) una línea (T) en el plano con inmersión en dirección 180°.
 - (iii) una línea (U) en el plano con una inmersión en un ángulo de 40°.
- 6 (a) Haga el boceto de un estereograma con una línea 30-300.
 - (b) Represente la nueva orientación de esta línea tras girarla 90° en el sentido de las agujas del reloj sobre un eje vertical.



9 La falsilla estereográfica

Los estereogramas producidos hasta ahora han sido bocetos, suficientes para obligarnos a pensar sobre cómo se hace la proyección pero no es lo bastante exacto para las aplicaciones serias.

Para las construcciones geométricas en dos dimensiones son esenciales la regla y el transportador. Ejemplos de construcciones son:

- (a) dibujar la línea que pasa por dos puntos;
- (b) medir el ángulo entre dos líneas coplanares;
- (c) dibujar la línea bisectriz del ángulo entre dos líneas.

En tres dimensiones las construcciones equivalentes son:

- (a) encontrar el plano que contiene dos líneas;
- (b) medir el ángulo entre dos líneas o entre dos planos;
- (c) encontrar la línea bisectriz del ángulo entre dos líneas o el plano bisector del ángulo entre dos planos.

La falsilla estereográfica ("estereonet") es el dispositivo usado para estas construcciones. Puede ser considerado como un transportador esférico y una regla todo en uno. La falsilla estereográfico o de Wulfft† se muestra en la figura 9c. La falsilla es un estereograma de referencia que consiste en planos pretrazados. La falsilla de la figura 9c, una falsilla ecuatorial, muestra muchos círculos máximos dibujados que representan a una familia de planos, compartiendo dirección común pero difiriendo en su ángulo de buzamiento. Estos planos pueden verse como los obtenidos por la rotación de un transportador (Fig. 9a) a lo largo de su borde recto (Fig. 9b). Los tics a lo largo del borde redondo del transportador describen líneas espaciadas a intervalos constantes dentro del plano del transportador. Similarmente, en la falsilla, se marcan los ángulos dentro de cada plano (círculo máximo) por las intersecciones con cada juego de curvas, los círculos pequeños. Los ángulos dentro de cualquier

plano se encuentran contando las graduaciones a lo largo del apropiado círculo máximo.

Un estereograma exacto se traza usando una proyección estereográfica. El estereograma es dibujado en una cubierta transparente a la falsilla estereográfica. Un alfiler central en la falsilla sostiene la cubierta en el lugar aunque permitiendo que la falsilla gire en relación con el estereograma en la cubierta.

[†] Además de la falsilla de Wulff, se usa con frecuencia otra falsilla llamada la falsilla equi-areal para representar los datos estructurales. La falsilla de Wulff se distingue por el hecho de que los círculos máximos y los menores tienen forma de arcos realmente circulares. La falsilla de Wulff a veces también se llama falsilla equi-angular. Este nombre se refiere a la propiedad de que el ángulo entre las tangentes de dos círculos máximos en su intersección es igual al verdadero ángulo entre los dos planos.

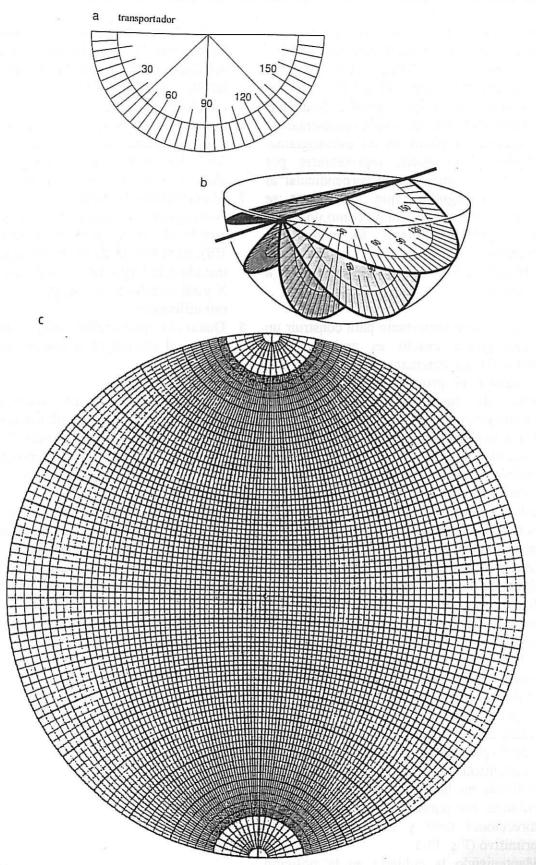


Fig. 9.

10 Método preciso para representar planos. Círculos máximos y polos

Considere un plano de estratificación con una dirección de 060° y un buzamiento de 30° hacia el SE (i.e. 060/30SE, vea la Fig. 10a). Se requiere representar el círculo máximo que representa este plano. Además de dibujar un círculo máximo, es posible representar de otra manera un plano en un estereograma. Cualquier plano puede representarse por medio de una línea que es perpendicular al plano. Esto significa que los planos se proyectan en el estereograma como un punto llamado polo del plano. El método de representar el polo del plano estratificación 060/30SE también se explica a continuación.

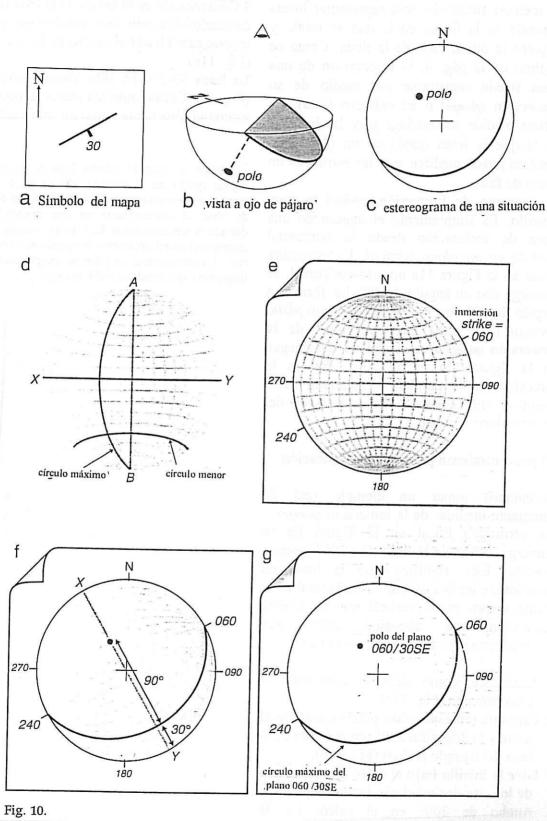
- 1 Un preliminar importante para construir un estereograma exacto es anticiparse al resultado de antemano. Acostúmbrese a visualizar el proceso de la proyección antes de que empiece a dibujar el estereograma final. Primero esboce un mapa miniatura con el símbolo apropiado (Fig. 10a), imagine cómo se verá ese plano cuando lo coloque en el semi hemisferio inferior (Fig. 10b) y esboce estereograma, i.e. a vista de pájaro del hemisferio inferior (Fig. 10c). Si adquiere la costumbre de fabricar estos bocetos eso le significará que evitará cometer errores drásticos de representación.
- 2 Inserte las letras A-B y X-Y en los extremos de los diámetros de la proyección, como en la Figura 10d.
- 3 Colóquelo cubriendo la falsilla estereográfica (o estereonet) y agujeree a ambos con una tachuela a través de sus respectivos centros.
- 4 Señale el norte en la cubierta, junto con el círculo primitivo.
- 5 Manteniendo la falsilla en la posición indicada en la figura 10d marque en la cubierta los puntos para representar las direcciones 060° y 240° en el círculo primitivo (Fig. 10e).
- 6 Manteniendo la cubierta en la posición fijada, ruede la falsilla subyacente hasta que su diámetro A-B una los dos puntos previamente marcados en la cubierta a

- 060° y 240°. Mida entonces el ángulo del buzamiento (30°) hacia dentro a lo largo del diámetro X-Y y hacia el centro de la falsilla estereográfica (o estereonet) y establezca el punto en la cubierta. Dibuje el círculo máximo que contiene este punto y los dos puntos en el perímetro a 060° y 240°. Este círculo máximo representa el plano de estratificación pedido (Fig. 10f).
- 7 Manteniendo la cubierta y la falsilla estereográfica (o estereonet) en la posición establecida en el paso 6 de antes (Fig. 10f), mida 90° desde el círculo máximo ya trazado a lo largo del diámetro X-Y hacia X y así establezca el polo para el plano de estratificación.
- 8 Quitar la proyección subyacente para revelar el estereograma completado (Fig. 10g).

Observe que el círculo máximo que representa el plano de estratificación se retira hacia la dirección del buzamiento. El círculo máximo y la dirección del buzamiento de un plano siempre tienen esta relación de arco-y-flecha. El polo queda en el cuadrante opuesto a la dirección del buzamiento.

Si fuéramos a representar un plano en el que la orientación fuera 060/30NW el círculo máximo estaría en el cuadrante NW y curvado hacia el noroeste, y por consiguiente el polo estaría en el cuadrante SE. Por consiguiente en el apartado 6 uno podría medir el ángulo de buzamiento de 30° a lo largo del diámetro X-Y desde X hacia el centro.

Representar el plano 060/30SE



11 Método preciso para representar líneas 1. Cuando se conoce la inmersión (plunge) de la línea

El método empleado para representar líneas depende de la forma en la que se midió y registró la orientación de la línea. Como se explicó en la pág. 8, la orientación de una línea puede registrarse por medio de su inmersión (plunge) o su cabeceo (pitch). La última medida se restringe para la situación en la que la línea queda en un plano que también puede medirse. e.g. las estrías en un plano de falla.

El concepto de inmersión (plunge) es muy sencillo. Es simplemente el ángulo de una línea de inclinación desde la horizontal medido en un plano vertical. La estructura lineal en la Figura 11a no está horizontal; se sumerge con un ángulo de 30°, i.e. forma un ángulo de 30° con la horizontal en un plano vertical (Fig. 11b). La dirección de la inmersión (plunge direction) del eje del pliegue en la figura 11a es de 200°, que es la dirección de la paralela - inclinada hacia abajo- al rumbo (trend) o dirección (strike) del mismo plano vertical.

El procedimiento para la representación

Permítanos tomar un ejemplo real de semejante medida de la inmersión (plunge). La estructura lineal en la Figura lla se sumerge 30° hacia la dirección 200° (escrito 30-200) Esto significa que la línea en cuestión se inclina 30° de la horizontal si se midió en un plano vertical que se orienta (dirección) en dirección 200°. Por consiguiente para representar esta línea:

1 Comience, como siempre, esbozando el estereograma (Fig. 11c).

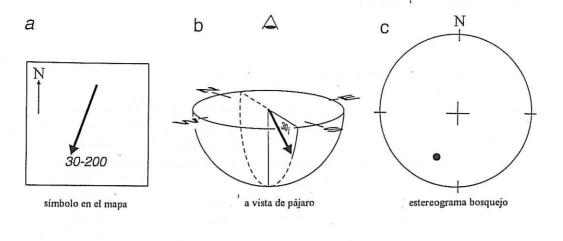
2 Para una representación precisa, marque el norte y la dirección 200° en el borde de la hoja del trazado (calco) (Fig. 11d).

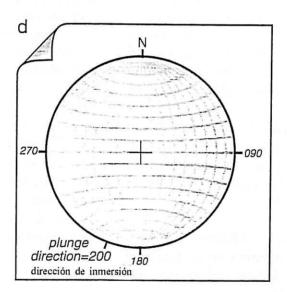
3 Gire la falsilla bajo el calco[†] para que uno de los círculos máximos rectos adquiera el rumbo de 200° en el calco. i.e. la dirección de la inmersión (plunge direction) (Fig. 11e).

4 Comenzando en el borde de la falsilla, vaya contando el ángulo de inmersión (plunge) (30° en este caso) hacia el centro de la proyección (Fig. 11e).

La línea 30-200 ha sido ahora representada (Fig. llf). Como todas las líneas se representa estereográficamente como un solo punto.

[†] Aunque al girar la falsilla bajo el estereograma dejado quieto en el trazado (calco) pueda parecer torpe, esta desventaja queda superada por el beneficio de tener el estereograma en una orientación fija durante la representación. La falsilla estereográfica (o estereonet) es relativamente insignificante comparada con el estereograma; el primero simplemente es un dispositivo que ayuda con el bosquejo.





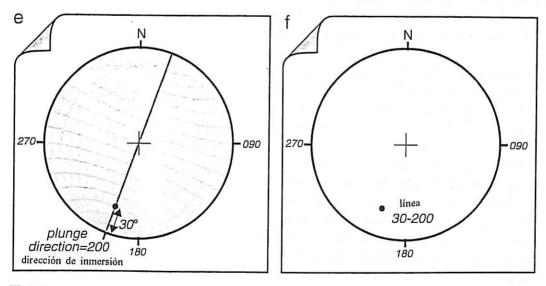


Fig. 11.

12 Método preciso por representar líneas 2. Cuando se conoce la línea a partir de su cabeceo (pitch)

Los dos el cabeceo (pitch) y la inmersión (o buzamiento aparente) (plunge) son ángulos entre una línea dada y la horizontal. La diferencia es que la inmersión (o buzamiento aparente) (plunge) se mide en un plano vertical imaginario mientras que el cabeceo (pitch) se mide en el plano que contiene la linea (Fig. 12a). Por consiguiente, en el estereograma (Fig. 12b) ambos ángulos son medidos desde la línea L trazada al círculo primitivo; la inmersión (o buzamiento aparente) (plunge) es el ángulo en un círculo máximo que es un diámetro (plano vertical) mientras que el cabeceo (pitch) se mide en el círculo máximo que representa el plano buzando que contiene la línea.

Una vez más el procedimiento se explica con la ayuda de un ejemplo real. Una lineación definida por cristales de anfibol alineados cabecea 35S en un plano de foliación que se buza 015/30SE (Fig. 12c).

1 Represente el plano de foliación 015/30SE como un círculo máximo en el papel del calco (Fig. 12d, mediante el método que vio en las pp. 20-1).

2 Gire la falsilla bajo la cubierta hasta que uno de sus círculos máximos coincide con el del plano trazado en el papel de calco (Fig. 12e).

3 Comenzando desde el círculo primitivo, cuente el ángulo del cabeceo (pitch) (aquí, 35°) hacia adentro a lo largo del círculo máximo. Esto da la posición representada de la línea (Fig. 12e).

Observe que el cabeceo (pitch) es 35S, indicando el 'S' que el cabeceo (pitch) se mide hacia abajo desde el extremo sur de la línea de dirección del plano. Esto es porque empezamos nuestro conteo desde el extremo sur del círculo máximo (Fig. 12e).

4 El estereograma final de la línea se muestra en la figura 12f.

Ejercicios

- 1 una línea cabecea (pitches) 30° en el plano 120/50S. ¿Cuáles son las posibles direcciones de inmersión (o buzamiento aparente) (plunge) de la línea?
- 2 un plano 080/20N tiene una estructura lineal en él con un cabeceo (pitch) de 80W. ¿Cuáles son la inmersión (o buzamiento aparente) (plunge) y la dirección de inmersión (plunge direction) de esa línea?
- 3 En relación con la Figura 12b, establezca las circunstancias en las que el ángulo de inmersión (o buzamiento aparente) (plunge) de una estructura lineal igualará al ángulo del cabeceo (pitch).
- 4 una lineación tiene un cabeceo (pitch) de 60° en un plano de foliación que buza 48°. ¿Cuál es su ángulo de inmersión (plunge)?
- 5 una línea tiene un cabeceo (pitch) de 40° y una inmersión (plunge) de 20°. ¿Cuál es el ángulo de buzamiento del plano en el que se midió el cabeceo (pitch)?

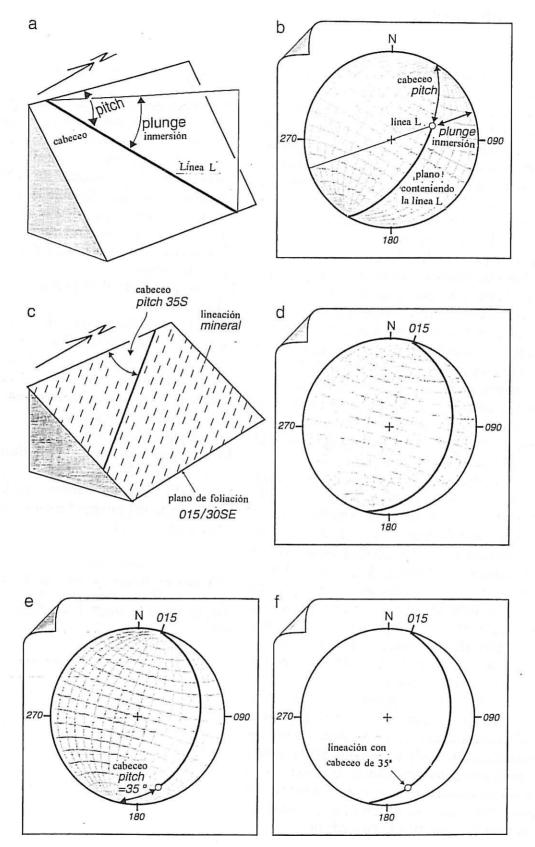


Fig. 12.

13 La intersección de dos planos

Dos planos cualquiera, excepto los que son paralelos entre sí, se cortarán mutuamente a lo largo de una línea recta. La Figura 13a muestra dos planos (plano 1 y plano 2) y su línea de intersección, L. Cuando estos planos se muestran cada uno al atravesar el centro de una esfera (Fig. 13b), su línea de intersección L se ve que corresponde a la línea que viene del centro de la esfera al punto de intersección de los círculos máximos para los dos planos.

La línea de intersección de cualquiera de los dos planos por consiguiente se encuentra estereográficamente al representar los dos planos como círculos máximos. El punto en el que los círculos máximos se cruzan entre sí es la proyección estereográfica de la línea de intersección. La inmersión (o buzamiento aparente) (plunge) y la dirección de inmersión (plunge direction) de la línea de intersección se obtienen entonces efectuando, a la inversa, el procedimiento seguido en la pág. 22.

Por ejemplo, si se miden dos limbos de un pliegue de tipo chevron (Fig. 13c), la orientación de la línea de charnela, h, se calcula rápidamente a partir de la intersección de los dos círculos máximos que representan los limbos (Fig. 13d).[†] En la Figura 13d al representar los círculos máximos para los limbos de un pliegue con orientaciones 101/50N y 065/60S da lugar a una línea de intersección (la línea de la charnela del pliegue) la cual se sumerge (plunge) 23° en dirección 080°.

Las aplicaciones potenciales de esta construcción son numerosas. La Figura 13e y 13f muestra cómo las medidas de planos de estratificación y clivaje en un afloramiento permiten la determinación de la inmersión (o buzamiento aparente) (plunge) y la dirección de inmersión (plunge direction) de L, la lineación de intersección estratificación - clivaje.

Ejercicios

1 Un plano de falla con una posición 240/50N desplaza capas que buzan 010/25E. Calcule la orientación de líneas en la falla que son trazas de los planos de estratificación.

2 Una roca ígnea se muestra en una cantera como una intrusión laminar que buza 130/75N. La intrusión está cortada por un juego de diaclasas principales con una orientación de dirección de 100° y un buzamiento vertical. Calcule la inmersión (o buzamiento aparente) (plunge) y la dirección de inmersión (plunge direction) de las líneas de intersección de las diaclasas con los bordes de la intrusión.

3 El clivaje (220(60NW) corta la estratificación (100(25S).

Calcule la lineación de intersección estratificación - clivaje (i.e. su inmersión (o buzamiento aparente) (plunge) y dirección de inmersión (plunge direction)). ¿Cual es el cabeceo (pitch) de esta lineación en

(a) el plano de estratificación y

(b) el plano de clivaje?

4 un pliegue tiene un limbo vertical con una orientación de dirección 126°. ¿Qué nos dice esto sobre la orientación de la línea de la charnela del pliegue? Exprese esto como una regla general.

 $^{^{\}dagger}$ Cuando se dispone de más de dos medidas de orientación de superficies plegadas, es preferible el método -π para encontrar el eje del pliegue (vea pág. 44).

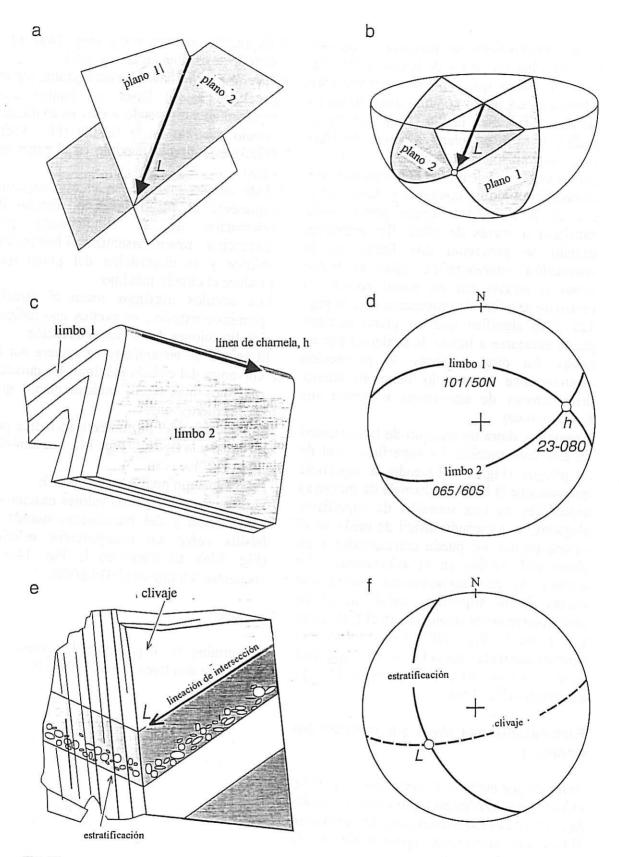


Fig. 13.

14 PLANO CONTENIENDO DOS LÍNEAS

Considere dos líneas de diferente orientación (e.g. ' los bordes ' q y r de la casa en la Fig. 14a). Con tal de que el par de las líneas pase a través de un punto común (como lo hacen las líneas q y r en la Fig. 14a) siempre es posible encajar un plano a través de ellas (aquí, el frontispicio de la casa).

Donde dos líneas de diferente orientación no comparten un punto común (e.g. las líneas p y s en la Fig. 14a) ningún plano puede encajarse a través de ellas. Sin embargo, cuando se proyectan dos líneas en la proyección estereográfica, ellas se tratan como si atravesaran un punto común: el centro de la esfera de proyección (vea la pág. 12). Esto significa que un plano siempre puede encajarse a través de cualquier par de líneas. En otras palabras, la proyección estereográfica toma sólo tiene en cuenta orientaciones de estructuras e ignora sus localizaciones.

Tomemos ahora un ejemplo de la necesidad de esta construcción. La superficie axial de un pliegue (Fig. 14b), siendo la superficie que contiene la línea de charnela de sucesivas superficies en una sucesión de superficies plegadas, es a menudo dificil de medir en el campo porque no puede corresponder a un plano real, visible en el afloramiento. En cambio, lo que normalmente vemos son **trazas de la superficie axial**: líneas de afloramiento de la superficie axial (las líneas x e y en la Fig. 14b). Estas líneas son geométricamente paralelas a la superficie axial y pueden usarse, por consiguiente, para construirlo (Fig. 14c).

Para encontrar el plano que contiene dos líneas x, y

Antes de que empiece la construcción exacta, esboce un estereograma que muestre las dos líneas y el círculo máximo que las atraviesa. Haga una suposición aproximada de la orientación de este plano.

- 1 Represente la línea x e y (Fig. 14d). El método se explica en las pp. 22-5.
- 2 Gire la falsilla bajo el estereograma (en el papel de calco) hasta los puntos que representan x e y yendo a caer en el mismo círculo máximo en la falsilla (Fig. 14e). Dibuje este círculo máximo en el papel de calco.
- 3 Este círculo máximo en el estereograma representa el plano buscado. Estime la orientación de él simplemente por inspección. Intente visualizar el hemisferio inferior y la disposición del plano que produce el círculo máximo.

Los círculos máximos tocan el círculo primitivo exterior, en puntos que indican las direcciones del rumbo o dirección.

- El ángulo de buzamiento se sugiere por la curvatura del círculo máximo; los círculos máximos más rectos indican planos que buzan fuertemente.
- La dirección del buzamiento se indica por el 'arco y la flecha ' (Fig. 14f, vea también la pág. 20).
- Tal estimación podría ser 040/45SE.
- 4 Finalmente, obtenga los valores exactos de la dirección y del buzamiento usando la falsilla como un transportador esférico (Fig. 14e). El plano en la Fig. 14e se encuentra así que es el 035/60SE.

Ejercicio

1 Determine la disposición del plano que contiene las dos líneas 26-120, 50-350.

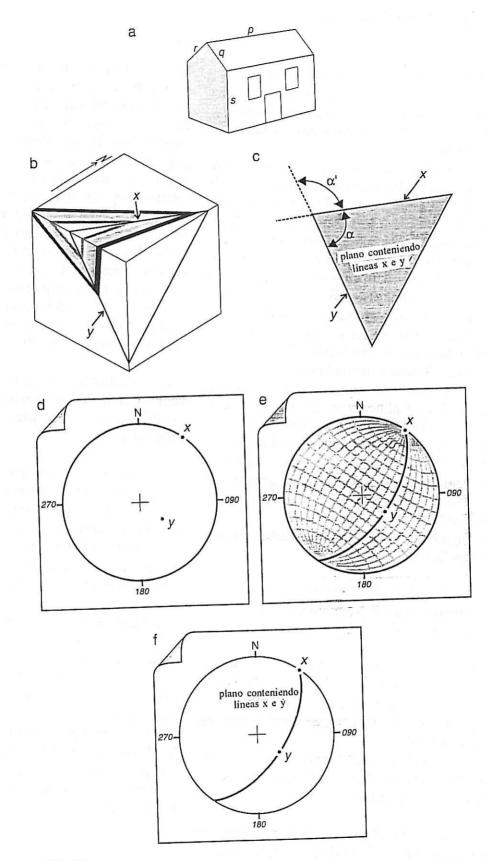


Fig. 14.

15 Buzamiento aparente

El **buzamiento real** de una estructura planar es su ángulo de pendiente medido en una sección vertical perpendicular a la dirección. En la figura 15b el buzamiento verdadera es denomina T.

En cualquier sección vertical con otra inclinación el plano parecerá buzando con un ángulo diferente, el ángulo de buzamiento aparente (denominado A en la Fig. 15b). Como ejemplo extremo, si los planos de una estratificación con un buzamiento real de 60° se ven en un corte geológico en un plano vertical paralelo a su dirección ellos mostrarán un buzamiento aparente de 0°.

La Figura 15a muestra capas buzando de caliza Jurásica en Bridgend, Gales del Sur. La pared de roca construida en un plano de la estratificación (a la izquierda de la fotografía) se alinea con un ángulo con la dirección del plano de estratificación y por consiguiente su base se inclina con un ángulo igual al buzamiento aparente según la dirección de la pared. El ángulo de buzamiento aparente es menor que el del buzamiento real.

El ángulo de buzamiento aparente depende de dos factores:

1 el ángulo de buzamiento real;2 el ángulo entre el plano de la sección y la orientación de la dirección.

Esto se ilustra en la Figura 15c donde un buzamiento real de 40° da lugar a un buzamiento aparente de 33°, 19° o 0° dependiendo de la tendencia del plano del corte geológico.

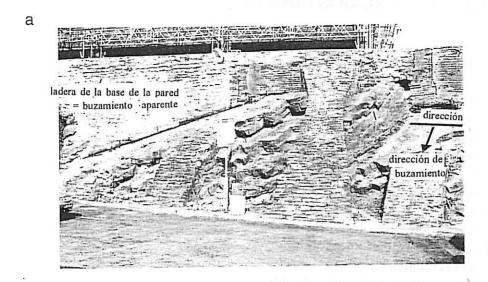
La proyección estereográfica se usa para resolver dos problemas relacionados con el buzamiento aparente.

Para calcular el buzamiento aparente de un plano en un plano de sección conocido

Esto se usa en la realización de cortes geológicos a través de capas buzando, fallas, etc., El método simplemente es la aplicación de la construcción relativa a la línea de intersección de dos planos explicada en la pág. 26. El buzamiento aparente es igual al ángulo de inmersión (plunge) de la línea de intersección de dos planos; la estructura planar que buza y el plano vertical de la sección. Usando el método de la pág. 26, estos dos planos son representados como círculos máximos y la línea de intersección encontrada. Por ejemplo, en la figura 15d, el ángulo A = 33° es el buzamiento aparente del plano 030/40SE cuando se vio en el corte geológico vertical 080/90.

Para calcular la dirección y el buzamiento real a partir de los buzamientos aparentes medidos en dos planos de sección verticales

Esta construcción se usa para deducir la orientación tridimensional de estructuras planares que son visibles en secciones bidimensionales tales como frentes verticales de canteras. El problema es el encontrar el plano que contiene dos líneas conocidas explicado en la pág. 28. La información del buzamiento aparente se expresa como inmersión (plunge) y dirección de la inmersión (plunge direction) de una línea y se representan como un punto en el estereograma. La orientación del plano viene dada por el círculo máximo que atraviesa los dos puntos. Por ejemplo, en la figura 15d el círculo máximo que representa el buzamiento real y la dirección se determina encontrando el atraviesa que máximo buzamientos aparentes, A = 19° y A = 33° (vea pág. 28).



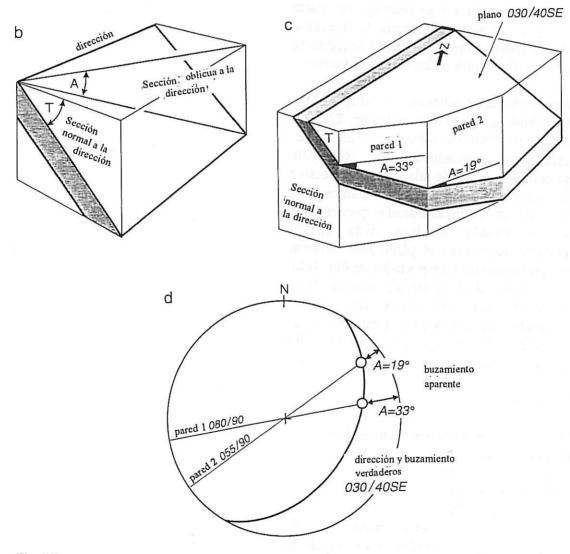


Fig. 15.

16 EL ÁNGULO ENTRE DOS LÍNEAS

El ángulo entre dos líneas en un plano (e.g. en una hoja de papel, Fig. 16a) puede encontrarse usando un transportador. Pueden citarse dos posibles ángulos (α o α ' en la Fig. 16a); que suman 180°. En tres dimensiones el ángulo entre dos líneas se define de una manera similar. Es el ángulo que se mediría con un transportador sostenido paralelo al plano que contiene las dos líneas en cuestión (Fig. 16b). En otras palabras, el ángulo entre dos líneas se mide en el plano que los contiene.

La Figura 16b muestra un ejemplo de dos línea x e y. La línea x se sumerge 18° hacia 061°, y se sumerge 50° hacia la dirección 124°. El ángulo entre ellas puede encontrarse estereográficamente en las etapas siguientes:

- 1 Represente las dos líneas, x e y (Fig. 16c). El método usado se trata en las pp. 22-5.
- 2 Encuentre el círculo máximo que atraviese estas líneas representadas (Fig. 16d). Esto se cumple girando la falsilla con respecto a la cubierta hasta que los puntos que representan las líneas trazadas queden en el mismo círculo máximo. Este círculo máximo representa el plano que contiene las dos líneas (el transportador en Fig. 16b).
- 3 A lo largo de este círculo máximo (Fig. 16e) se mide del ángulo ((α ο α ', quienquiera que se requiera) entre las líneas trazadas. En el ejemplo presente, los ángulos son respectivamente de 60° y 120°.

Ejercicios

- 1 Calcule los ángulos entre los siguientes pares de líneas:
- (a) 23-080 y 56-135;
- (b) 56-340 y 80-210;
- (c) 70-270 y 0-175.
- 2 Represente en un estereograma todas las líneas que estén inclinadas en un ángulo de 60° desde la línea 20-060.

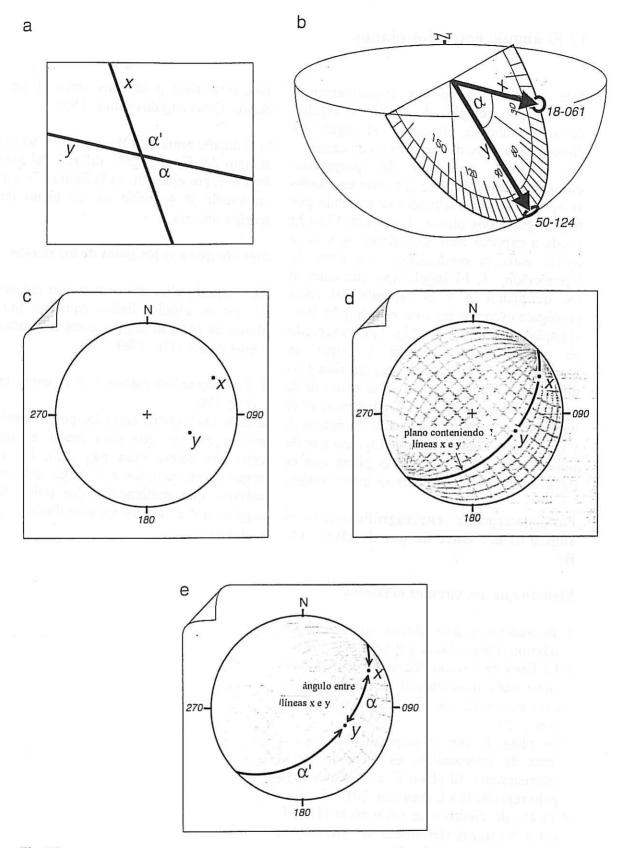


Fig. 16.

17 El ángulo entre dos planos

Esta construcción se usa frecuentemente. Permite, por ejemplo, el cálculo de ángulos del inter-limbo de pliegues y el ángulo de discordancia entre dos secuencias de capas. proyección la solución que usa estereográfica es fácil de entender en cuanto se aprecie lo que realmente se entiende por ángulo entre dos planos. La figura 17a-17d ayuda a explicar esto. Los planos A y B se cortan entre si produciendo una línea de intersección, L. El ángulo aparente entre el par de planos A y B depende del corte geológico escogido para ver este ángulo. Por ejemplo, el ángulo α (en Fig. 17a) observado en plano de la sección C (qué es perpendicular a la línea de intersección) es diferente al ángulo β visto en el plano de la sección oblicua (Fig. 17c). De hecho, α es el verdadero o ángulo diedro entre los planos A y B ya que el ángulo diedro entre un par de planos siempre se mide en el plano que es perpendicular a la línea de su intersección.

Para determinar estereográficamente el ángulo diedro entre un par de planos (A, B)

Método que usa círculos máximos

- 1 Represente ambos planos como círculos máximos (llamados A y B en la Fig. 17b).
- 2 La línea de intersección L de estos planos viene dada directamente por el punto de intersección de los círculos máximos (vea la pág. 26).
- 3 El plano C que es perpendicular a L, la línea de intersección, es dibujado en el estereograma. El plano C es el plano cuyo polo representa a L (vea pág. 20).
- 4 El ángulo diedro α se mide en el plano C entre las trazas (las líneas de intersección en C) de los planos A y B.

Observe: Hay dos ángulos que podrían medirse en el apartado 4. Éstos son denominados como α y α ' en la figura 17a y 17b y son respectivamente los ángulos

diedros agudos y obtusos entre el par de planos. Estos ángulos suman 180°.

Si el ángulo entre A y B se mide en un plano distinto del C, el ángulo diferirá del ángulo diedro α ; por ejemplo, en la figura 17c y 17d, un ángulo β se mide en un plano de la sección oblicua.

Método que usa los polos de los planos

Este método alternativo hace uso del hecho de que el ángulo diedro entre un par de planos es igual al ángulo entre las normales a esos planos (Fig. 17e).

- 1 Represente los planos A y B como polos (Fig. 17t).
- 2 mida los ángulos entre los polos usando el mismo método que para medir el ángulo entre dos líneas (vea pág. 32), i.e. estos ángulos son medidos a lo largo del círculo máximo que contiene los dos polos. Estos ángulos α y α ' son los ángulos diedros agudo y obtuso.

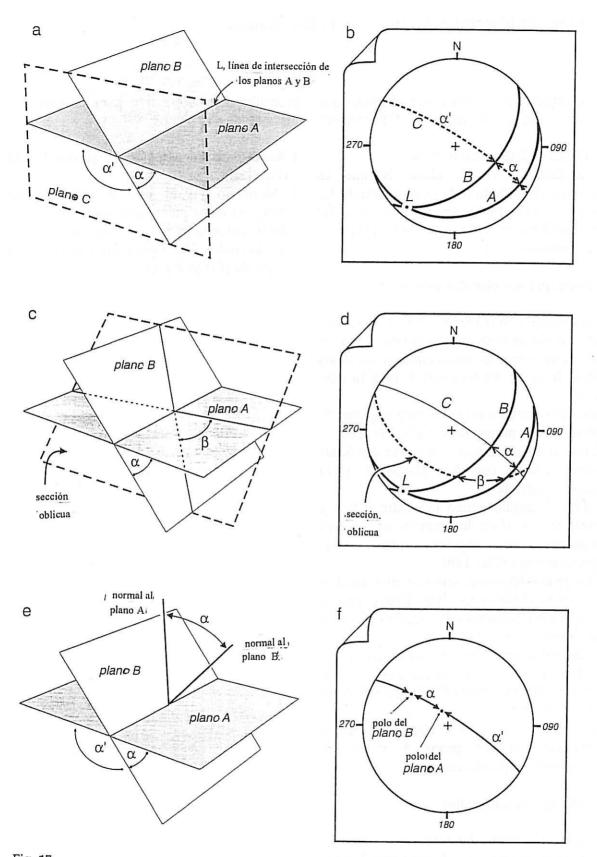


Fig. 17.

18 El plano bisector del ángulo entre dos planos.

De la figura 18a vemos que el plano que disecciona un par de planos (P y Q) contiene:

1 su línea de intersección, L, y 2 la línea c en el plano N que es perpendicular a la línea de intersección, L. La línea c disecciona el ángulo (α) entre las trazas de los planos P y Q (denominadas a y b respectivamente).

Método que usa círculos máximos

- 1 represente ambos planos (P y Q en la Fig. 18a) como círculos máximos (Fig. 18b). El punto del cruce de estos círculos máximos da la línea de intersección, L (vea la pág. 26).
- 2 Dibuje el círculo máximo para el plano N, plano que es perpendicular a L (Fig. 18b).
- 3 En el círculo máximo N localice a y b, las intersecciones con los planos P y Q respectivamente.
- 4 Mida el ángulo agudo (α) entre a y b y localice c y d en los puntos medios (en términos de ángulo) entre estas intersecciones (Fig. 18b).
- 5 Dibuje el círculo máximo que atraviesa L y c. Éste es el plano que disecciona el ángulo agudo entre los planos P y Q, Este plano se denomina el bisector agudo.
- 6 Dibuje el círculo máximo que atraviesa L y D. Este es el plano que disecciona el ángulo obtuso entre los planos P y Q, Este plano es el bisector obtuso.

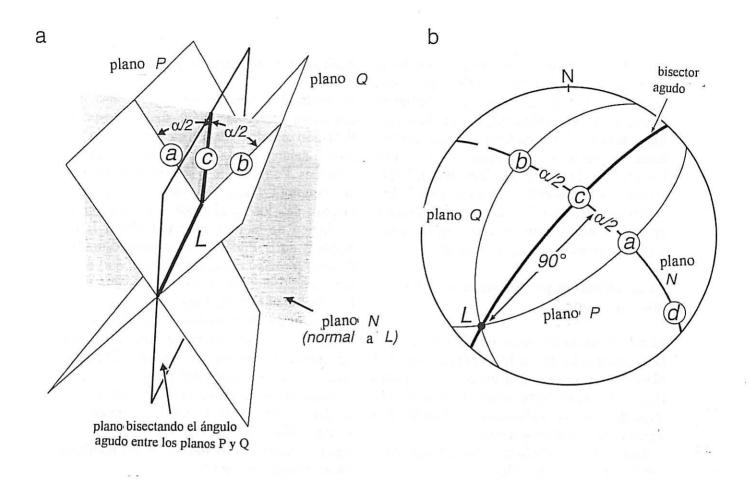
Los planos bisectores agudo y obtuso construidos en los pasos 5 y 6 son mutuamente perpendiculares.

Método que usa los polos

La figura 18c ilustra las relaciones angulares de líneas en el plano N. Muestra que el plano bisector agudo tiene una normal que disecciona el ángulo entre las normales de los planos P y Q. Este hecho da lugar a un

procedimiento alternativo para encontrar la bisectriz de dos planos:

- 1 Represente los polos de los planos P y Q (Fig. 18d).
- 2 Midiendo en el círculo máximo que atraviesa estos polos, determine los puntos medios angulares x, y entre los polos. Éstos son los polos de los planos que diseccionan el par de planos P y Q



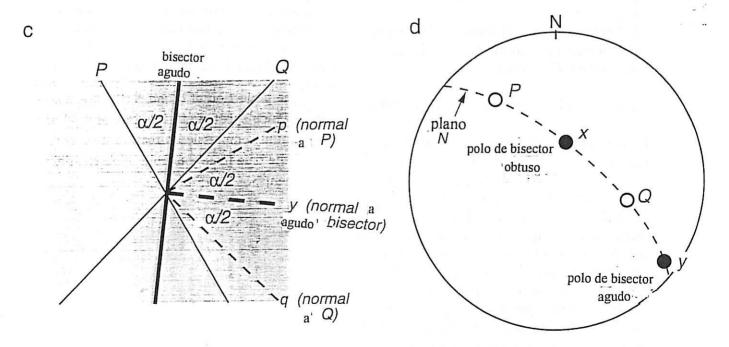


Fig. 18.

19 PROYECTAR UNA LINEA EN UN PLANO

Considere un plano P y una línea L que no es paralela a él (Fig. 19a). Imagine ahora una fuente de luz distante que está brillando directamente hacia el plano, i.e,. el plano está frente a la luz. La línea L lanzará una sombra hacia el plano A. Esta sombra define una línea L ' en el plano P. Decimos que L ' es la proyección ortogonal de L en el plano P. Las construcciones que involucran la proyección ortogonal encuentran diversas aplicaciones importantes en geología estructural.

Para calcular la proyección de una línea L sobre un plano P

El cálculo de la dirección de L' se basa en el hecho de que las líneas L', Ly N (la normal al plano P) todas se sitúan en el mismo plano (Fig. 19b). Este plano corta al plano P a lo largo de la dirección buscada L'. Los detalles de esta construcción son como sigue.

- 1 Represente el círculo máximo para el plano P y su polo, N (Fig. 19c).
- 2 Represente la línea L y después encaje un plano (círculo máximo) a través de N y L (Fig. 19c).
- 3 L'viene dada por el punto de intersección del círculo máximo dibujado en la fase 2 y del plano P (Fig. 19c).

Aplicación: la dirección del salto de fallas

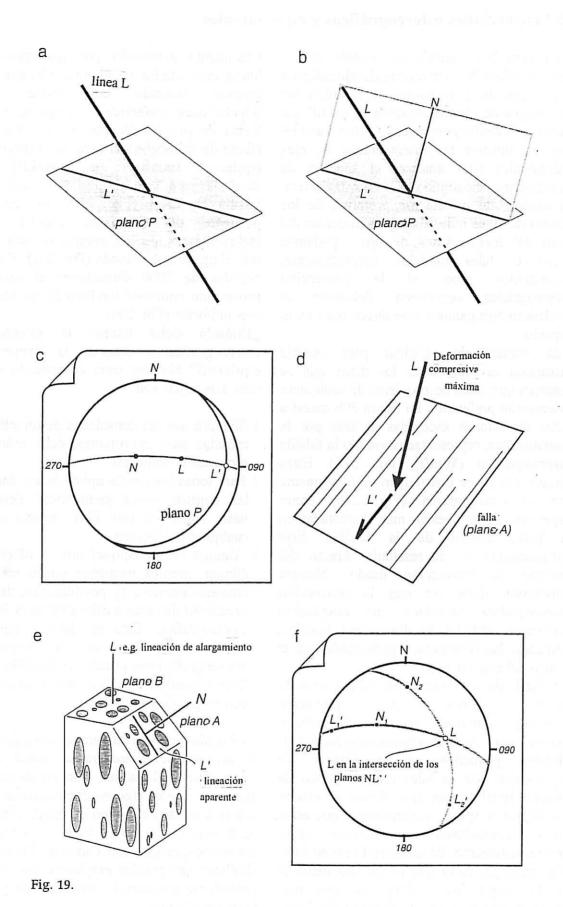
La idea de proyectar una línea en un plano es relevante con el problema de predecir la dirección del movimiento en un plano de falla potencial. Si existe un plano de debilidad (plano A en la Fig. 19d) en una masa rocosa que es sometida a una deformación compresiva axial (con un eje de compresión mayor y dos ejes iguales de compresión menor) de magnitud suficiente, el salto tendría lugar en una dirección que es paralela a la proyección (L ') del eje de la mayor deformación compresiva (L) en el plano de debilidad. A (Fig. 19d).

Aplicación: lineaciones aparentes

La figura 19e muestra en un diagrama una estructura tectónica lineal definida por la lineación paralela de objetos en forma de puros dentro de la roca, como guijarros estirados. Permita que L sea la orientación de la estructura lineal (en este caso las ejes largos de los guijarros). En un corte geológico de la roca perpendicular a L (el plano B en la Fig. 19e) los objetos estirados tienen formas circulares pero en otras secciones (como el plano A en la Fig. 19e) los objetos tienen secciones ovales y crean la impresión de un lineación en el plano de la sección. Esto se denomina una lineación aparente. La dirección de una lineación aparente (L') en cualquier plano de sección viene dada por la proyección ortogonal de la verdadero lineación L sobre el plano de sección (plano A en la Fig. 19e).

Para encontrar L a partir de las medidas en varios planos de L'

La Figura 19f muestra que L puede encontrarse a partir de la intersección de varios planos, cada uno construido a partir de L' (la proyección de L) y N (la normal del plano en el que L' se encuentra). Esto puede usarse para encontrar la dirección de compresión máxima a partir de las estrías de fallas, o la lineación verdadera a partir de las medidas de las lineaciones aparentes.



20 Proyecciones estereográficas y equi-areales

La Figura 20a muestra un ejemplo de los tipos de datos frecuentemente desglosados en estereogramas. Los puntos representan los eies largos de clastos medidos en un till. La razón para medir y representar estos datos no está en mostrar las orientaciones de eies individuales sino analizar el modelo de orientaciones mostrado por la muestra entera. El modelo de orientación preferida de los clastos de till es indicativo de la dirección del flujo del hielo. Antes de que podamos reconocer tales modelos confiadamente, necesitamos saber si la provección estereográfica fielmente representa verdadero agrupamiento de direcciones en el espacio.

Una manera de verificar para posible distorsión es representar los datos que se conocen que están desprovistos de cualquiera orientación preferente. La figura 20b muestra 2000 direcciones escogidas al azar por la computadora, representadas usando la falsilla estereográfica (Wulft) (Fig. 20d). Estas direcciones no se distribuyen uniformemente por el estereograma (Fig. 20b) como esperaríamos pero están más abarrotadas en la parte central de la falsilla. Este agrupamiento es el resultado directo del método de proyección usado. Nuestra conclusión debe ser que la proyección estereográfica introduce una orientación preferente artificial de direcciones lineales, apiñando las direcciones proyectadas en el centro del estereograma.

Es fácil de entender este efecto cuando proyectan vemos cómo se estereográficamente conos de tamaño idéntico pero de orientaciones diferentes. Los círculos pequeños en la Figura representan dos de tales conos. Siendo de tamaño igual (conos que tienen el mismo ángulo en el ápice) esperaríamos que estos contuviesen un conos número aproximadamente, de nuestras líneas al azar. Sin embargo, dado que un círculo pequeño en la proyección incluye un área más pequeña que la otra, la densidad de líneas trazadas será mayor en el primero.

Claramente expresado por densidades de líneas proyectadas (o planos), siempre que tratando modelos estemos con orientaciones preferentes. requerimos una forma de proyección que no muestre este efecto de distorsión del área. La provección equiareal Lambert (o Schmidt) diseñada para este propósito. Usando una falsilla equiareal (Fig. 20e), los círculos pequeños de dimensión angular igual incluyen áreas iguales, aunque su forma sea más alargada que redonda (Fig. 20g). Nuestra muestra de 2000 direcciones al azar en proyección equiareal también da un modelo más uniforme (Fig. 20c).

¿Cuándo debe usarse la proyección estereográfica y cuándo la proyección equiareal? No hay nada complicado sobre esto. Las reglas son:

- 1 Siempre que las densidades de direcciones trazadas sean importantes, debe usarse la proyección equiareal.
- 2 Para todas las demás aplicaciones, incluso las construcciones geométricas descritas hasta ahora en este libro, puede usarse cualquier proyección.
- 3 Algunas construcciones que involucran el dibujar círculos pequeños puede ser más convenientemente (y posiblemente de más precisión) llevarlas a cabo usando la falsilla estereográfico. Esto se debe a que los círculos pequeños en la proyección estereográfica son círculos reales (Fig. 20d, 20f) y pueden dibujarse por consiguiente con un par de compases.

¡Habiendo simplemente empezado a dominar la proyección estereográfica usted ahora estará disgustado al oír, con no demasiado agradado, que en algunas circunstancias debe usarse a cambio otro tipo de proyección! No se preocupe, las proyecciones equiareales y las estereográficas son conceptualmente tan similares que pueden emplearse los mismos procedimientos para la visualización y para la representación.

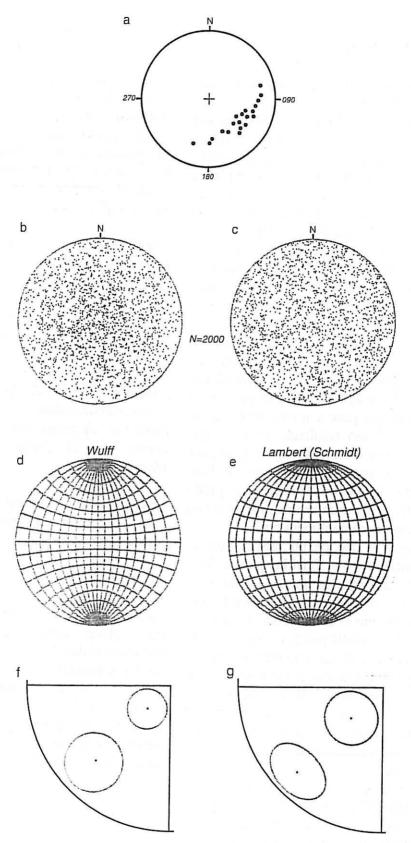


Fig. 20.

21 La falsilla polar

La falsilla estereográfica es una herramienta que simplifica la construcción de un estereograma. Las falsillas que hemos usado (pág. son falsillas ahora 18) ecuatoriales; que pueden considerarse como el estereograma de un juego entero de planos inclinados (o transportadores), en goznes sobre una línea en el plano de proyección (Fig. 9b). Este diseño de falsilla está preparado para representar idealmente círculos máximos de planos que buzan, o para representar el cabeceo (pitch) de líneas dentro de tales planos que buzan.

El representar líneas descritas por medio de sus ángulos de buzamiento también puede llevarse a cabo usando el mismo tipo de falsilla (pp. 22-3). El ángulo de buzamiento de cualquier línea se define con respecto a un plano vertical que pase a través de esa línea (vea pág. 8). Como resultado, sólo los dos círculos máximos (rectos) pueden usarse para el conteo de los ángulos de buzamiento. Esto significa que la falsilla necesita ser girada para permitir el representar una línea con una dirección específica de inmersión.

Por otro lado, el uso de un falsilla con un esquema diferente, la falsilla polar, hace innecesario el rodar la falsilla durante el procedimiento para representar la inmersión (plunging) de las líneas (incluyendo los planos normales). Este falsilla puede considerarse de nuevo como una colección de transportadores planares, pero ahora todos verticales y con diferentes direcciones (Fig. 21a). Los círculos máximos de la falsilla polar son líneas rectas y radian del centro; los círculos pequeños son concéntricos sobre el centro (Fig. 21c, 21d).

Las figuras 21c y 21d muestran falsillas polares equiareales, vea también la pág. 95. También existen las falsillas polares basadas en la verdadera proyección estereográfica.

Usando la falsilla polar para representar una línea (e.g. un eje de pliegue con orientación 10-070, Fig. 21c) 1 Marque la dirección de la inmersión (plunge direcctión) de la línea como un tic en el círculo primitivo (Fig. 21c).

2 El punto que representa la línea representada se encuentra contando el ángulo de la inmersión, moviéndose radialmente hacia el interior a lo largo del círculo máximo (Fig. 21c).

Usando la falsilla polar para representar el polo de un plano

Debe observarse que la normal a un plano (Fig. 21b) es una línea que tiene una inmersión (plunge) y una dirección de inmersión (plunge direction) dadas por

Inmersión (plunge) de la normal = 90° - buzamiento del plano dirección de inmersión (plunge direction) de la normal = la dirección del buzamiento del plano ± 180°

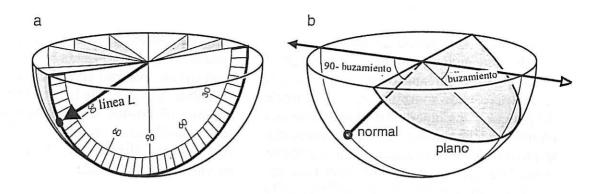
Una vez se han calculado éstos, el polo de un plano se representa como una línea (vea capítulo anterior).

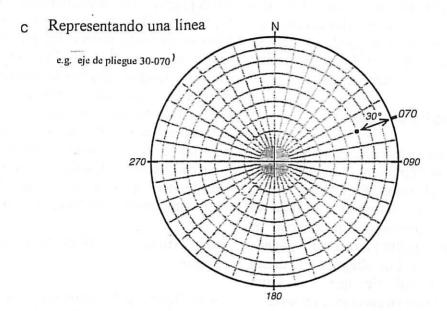
Ejemplo

Para representar el polo del plano 060/50SE. Este plano tiene una dirección de buzamiento de 150°.

La línea normal a este plano se sumerge a 90° - 50° = 40° en una dirección igual a 150° + 180° = 330° .

El polo del plano por consiguiente se representa como una línea con inmersión (plunge) de 40-330 (Fig. 21d).





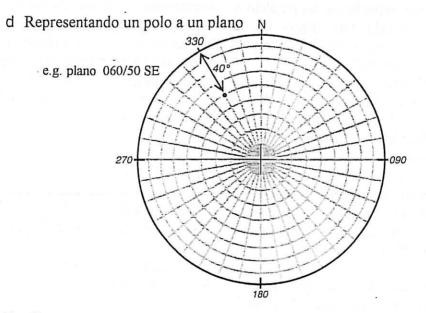


Fig. 21.

22 Analizando pliegues 1. Cualidad cilíndrica (cylindricity) e inmersión del eje

En los pliegues a escala de afloramiento es posible a menudo medir directamente en el orientaciones de rasgos las campo geométricos tales como la línea de charnela del pliegue y los limbos del pliegue con una brújula con clinómetro. En estos casos se usa la proyección estereográfica para manipular estos datos, incluyendo la rotación (vea pp. 64-9) o el cálculo del ángulo del interlimbo (pp. 46-7). Para pliegues que son más grandes que a escala de afloramiento, la proyección estereográfica puede emplearse también para la estimación de la orientación del eje del pliegue y el plano axial.

¿Son cilíndricos los pliegues?

El eje del pliegue se define con respecto a pliegues que son cilíndricos. Las superficies cilíndricamente plegadas (Fig. 22a. 22b) son superficies con una forma que podría ser barrida por un generador moviéndose en línea recta en el espacio pero permaneciendo paralelo a sí mismo. Los pliegues cilíndricos tienen la propiedad de que su forma permanece constante en secciones en serie.

El eje del pliegue es la orientación de la línea generadora de tales superficies. Es paralelo a las líneas de charnela (las líneas de la curvatura más angulosa) de los pliegues individuales en la superficie.

Un pliegue cilíndrico puede reconocerse fácilmente a partir de las medidas de las orientaciones de las superficies plegadas (e.g. estratificación) tomadas en una variedad de lugares a lo largo del pliegue (Fig. 22d). Las normales a los planos de estratificación en un pliegue cilíndrico son todas las paralelas a un solo plano, el plano perfil. Por consiguiente, para verificar si un pliegue es cilíndrico o no:

1 Represente en un solo estereograma como polos todas las lecturas de estratificación (u otras superficies que se hayan plegado) (Fig. 22e. 22f).

2 Gire la falsilla con respecto al estereograma (el papel de calco) hasta que todos los

polos queden en, o cerca de un solo círculo máximo (Fig. 22g).

3 Si el círculo máximo en el paso 2 se puede encontrar sin ambigüedad entonces, para nuestros propósitos, el plegamiento puede ser considerado cilíndrico. En caso contrario los pliegues se clasifican como no-cilíndricos (Fig. 22c).

En la práctica, un encaje perfecto de polos en un solo círculo máximo nunca se encuentra. Esto es en parte porque los pliegues reales nunca se encuadran en formas cilíndricas ideales y también porque las medidas de las conllevan plegadas superficies errores. No obstante muchos pliegues son lo cilíndricos como suficientemente permitir el que se puedan aplicar diversas abaio. construcciones descritas más permitiendo así que se puedan determinar otras características del plegamiento.

Para estimar la orientación del eje del pliegue

En la Figura 22d vimos que una propiedad del plegamiento cilíndrico es producir una disposición co-planar de las normales a las superficies plegadas. El plano que contiene las normales a la estratificación se llama el plano perfil del pliegue y es perpendicular al eje del pliegue. Por consiguiente la dirección e inmersión (plunge) del eje del pliegue se encuentran por:

1 Determinando el círculo máximo del plano perfil de la manera descrita en los pasos 1-3 de antes (Fig. 22f. 22g); y después

2 Representado el polo del plano perfil (Fig. 22g). Esta dirección es el eje del pliegue.

Esta construcción para el eje del pliegue se llama **método -π.**

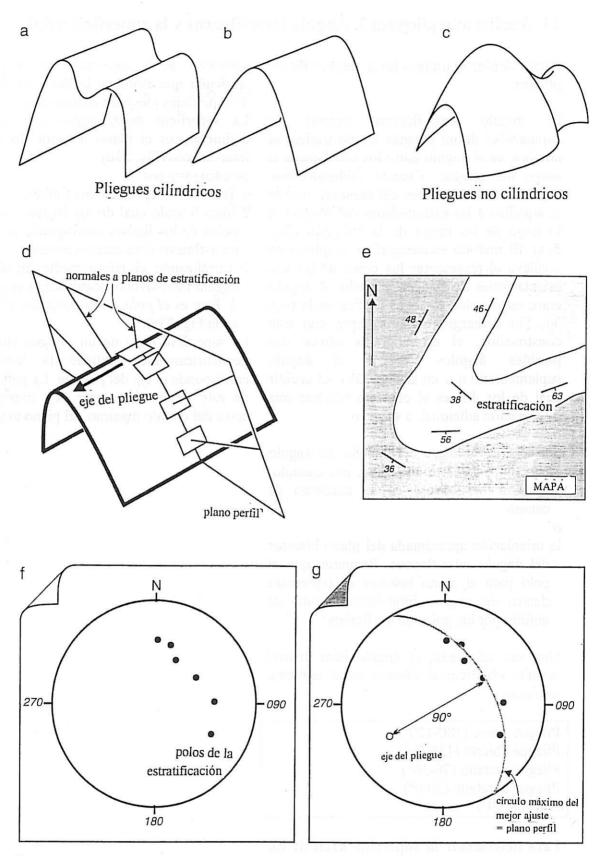


Fig. 22.

23 Analizando pliegues 2. Ángulo inter-flancos y la superficie axial

Para calcular el ángulo inter-flancos de un pliegue

inter-flancos El ángulo expresa compacidad de un pliegue. Como sugiere el nombre, es el ángulo entre los dos flancos (o limbos) del pliegue. Cuando midiendo este ángulo las orientaciones del miembro usaron es aquéllos a las extremidades del pliegue. a lo largo de las líneas de la inflexión (Fig. 23a). El método estereográfico simplemente conlleva el representar los polos de las dos orientaciones de flancos y medir el ángulo entre estos polos como se explica en la pág. 34. Sin embargo, como siempre con esta construcción, el estereograma ofrece dos posibles ángulos $(\alpha$ 0 el suplementario a α en la Fig. 23b). El decidir cual de los dos es el correcto requiere una información adicional, a saber, o

una idea aproximada del tamaño del ángulo inter-flanco que se considera, por ejemplo, a partir del boceto de su cuaderno de campo

0

la orientación aproximada del plano bisector del ángulo inter-flancos. Recuerde que el polo para el plano bisector se representa dentro del ángulo inter-flancos como se definió por los polos de los limbos.

Una vez calculado, el ángulo inter-flancos permite clasificar el pliegue en el esquema siguiente:

Pliegue suave (180-120°)

Pliegue abierto (120-70°)

Pliegue cerrado (70-30°)

Pliegue apretado (30-0°)

Isoclinal (0°)

Para determinar la superficie axial de un pliegue

El término superficie axial se define de dos maneras ligeramente diferentes. Según una

definición es la superficie en un pliegue particular que contiene la línea de charnela de superficies plegadas sucesivas (Fig. 23c). La superficie axial, según una segunda definición, es el plano bisector del ángulo inter-flancos (Fig. 23d).

Se encuentra por:

- 1 Trazando los polos de los limbos.
- 2 Identificando cual de los ángulos entre los polos de los limbos corresponde al ángulo inter-flancos (vea anteriormente).
- 3 Localizando el punto medio angular del ángulo inter-flancos identificado en el paso 2. Éste es *el polo de la superficie axial* (π_a en la Fig. 23e).

La superficie axial de un pliegue cilíndrico geométricamente contiene la línea que corresponde al eje del pliegue. La proyección de este último debe caer por consiguiente cerca del círculo máximo del plano axial.

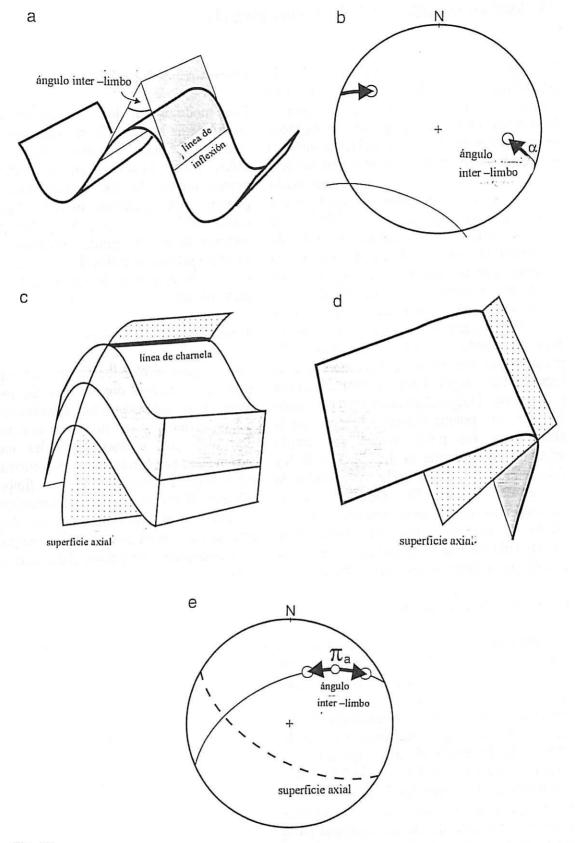


Fig. 23.

24 Analizando pliegues 3. Estilo del plegado

La medida de la disposición de la estratificación plegada u otra foliación, si se analizó estereográficamente, permite determinar ciertas propiedades geométricas de los pliegues. Estas deducciones incluso pueden hacerse en áreas donde son escasos los afloramientos rocosos, y como resultado casi nunca se ven pliegues. Un ejemplo del tipo de técnica empleado se describió en la pág. 44 donde, si se representan los polos de la estratificación a lo largo de un círculo máximo, esto se interpreta que significa que los pliegues involucrados son cilíndricos.

Además, la manera en la que se distribuyen los polos dentro del cinturón del círculo máximo puede sugerir otros rasgos del plegado que más tarde se discutirán. e.g. la compacidad (ángulo inter-flancos), curvatura y asimetría. Desgraciadamente existen otros factores que potencialmente influyen en la difusión de los polos dentro del círculo máximo, en particular la distribución de los sitios en los que se han hecho las medidas de estratificación. El modelo estereograma puede estar influido por este efecto de muestreo. Por esta razón debe tenerse cuidado con la deducción de la forma del pliegue a partir de los estereogramas.

Compacidad de un pliegue

El rango de orientaciones de la superficie plegada está restringido en un pliegue abierto (e.g. Fig. 24c) pero es mayor en un pliegue apretado (o compacto) (Fig. 24i). Los estereogramas que son el resultado de las estructuras abiertas muestran un grado inferior de dispersión de polos que para los pliegues apretados. En las Figuras 24b, 24c y 24f donde se muestran las formas del perfil de pliegues junto con los estereogramas representativos, puede identificarse una parte sin polo del círculo máximo. El tamaño de este sector sin polo es una medida del ángulo inter-flancos. En otras palabras, la integridad del cinturón del círculo máximo refleja la compacidad del pliegue.

Curvatura de los pliegues

Los modelos en los estereogramas a la izquierda de la figura 24 no sólo varían en el tamaño del 'hueco ' en el círculo máximo de polos sino también en el grado de agrupamiento de los polos. Formas de pliegue con planares limbos claramente identificables, (Fig. 24ª, 24d, 24g) originan racimos duales de polos, mientras que las formas más redondeadas (Fig. 24c, 24f y para una menor magnitud 24i) producen modelos más difusos.

Asimetría de los pliegues

Los pliegues mostrados en la Figura 24 son simétricos; tienen dos limbos de longitud igual. Los estereogramas idealizados que corresponden a estas formas tienen racimos de polos que provienen de las medidas tomadas en las porciones menos curvadas de las superficies plegadas, i.e. los limbos del pliegue. Si los pliegues son asimétricos. i.e. los dos limbos tienen una longitud desigual, entonces se espera que un racimo de polos en el estereograma se pronunciara más que el otro.

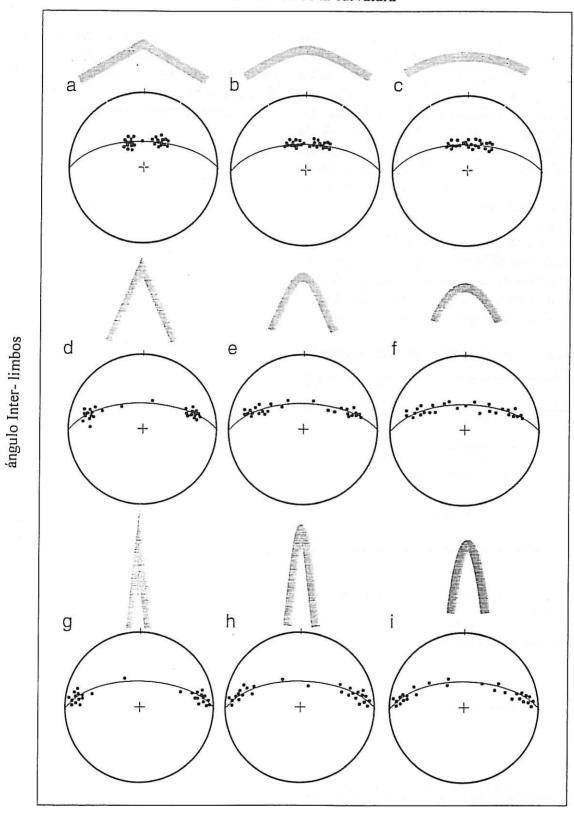


Fig. 24.

25. Analizando pliegues 4. La orientación de pliegues

Los atributos de la orientación de los pliegues se usan con el propósito de describir y comparar pliegues y para agruparlos en juegos que se desarrollaron bajo condiciones similares de deformación. Los pliegues son clasificados en base al buzamiento de la superficie axial y la inmersión (plunge) del eje del pliegue (Fig. 25a, 25b). Estos atributos son independientes de la curvatura y del ángulo inter-flancos, como ya se mencionó en la pág. 48.

Los estereogramas en la Fig. 25c representan ejemplos de diferentes clases de pliegue. La orientación de la superficie axial es dibujada por un círculo máximo a lo largo del cual las charnelas del pliegue representan líneas.

Clasificación basada en la inmersión

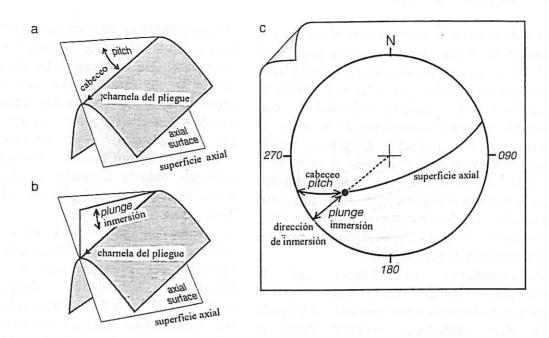
(punge)		
Inmersión (plunge)	Clase	Estereogramas en Fig.25d
0-10° 10°	no buzante	1,2,3 y 4
30°	buzando suavemente	5, 6 . y 7
	buzando moderadame	nte
60°	11. Et	8 y 9
80°	buzando fuertemente	
80-90°	pliegue vertical	10

Clasificación basada en el buzamiento de la superficie axial

Buzamiento Clase		Estereogramas en Fig. 25d	
0-10°	tumbado	4	
10°			
	suavemente inclinado		
30°		3 y 7	
	ligeramente inclinado		
60°		2,6 y 9	
	fuertemente inclinado		
80°			
80-90°	pliegue recto (vertica	1) 1, 5, 8 y 10	

Pliegues tumbados (Fig. 25d. estereogramas 7 y 9) son pliegues con una charnela que sumerge (plunge) el buzamiento del plano axial. i.e. tiene un eje del pliegue que cabecea

(Fig. 25a) a 90°. Ellos, como los pliegues rectos (o verticales), tienen limbos que van juntos o cercanos en dirección ni hacia arriba ni hacia abajo" y por consiguiente se les conoce como pliegues neutros.



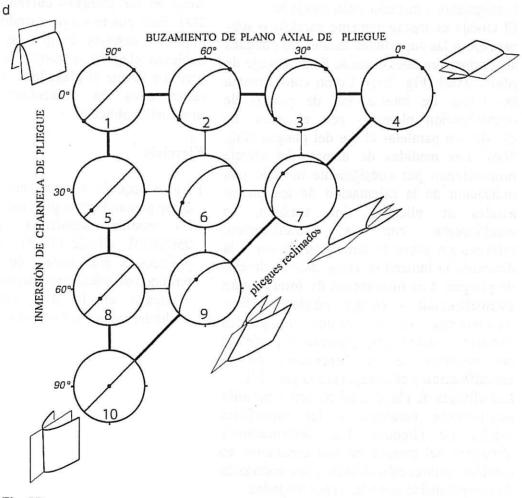


Fig. 25.

26 Pliegues y clivaje

Los diversos tipos de estructura planar que se dan en las rocas se listaron en la pág. 2. El clivaje es un ejemplo de una estructura planar penetrativa inducida por tensiones tectónicas forma) acoplados (cambios de modificaciones metamórficas de la fabric de una roca. Una lineación de granos visible microscópicamente se expresa a menudo a escala de muestra de mano por la habilidad de la roca de romperse a lo largo de planos paralelos. La dirección perpendicular a éstos planos de clivaje es la dirección de la mayor deformación de acortamiento.

Frecuentemente se observa que la deformación de acortamiento que da lugar al clivaje también da como resultado el plegado de otras estructuras planares como la estratificación. El plegado y el clivaje por consiguiente a menudo están asociados.

El clivaje es frecuentemente paralelo o subparalelo a las superficies axiales de pliegues asociados y en tales casos se llama clivaje de plano axial (Fig. 26a). Como consecuencia las líneas de intersección de planos de estratificación plegados con el plano de clivaie son paralelas al eje del pliegue (Fig. 26b). Las medidas de campo del clivaje proporcionan por consiguiente no sólo una indicación de la orientación de los planos sino también, axiales de pliegues estratificación, la combinación con información sobre la inmersión (plunge) y la dirección la inmersión (plunge direction) de ejes de pliegue. Las lineaciones de intersección estratificación - clivaje pueden medirse directamente en el campo o pueden construirse estereográficamente a partir de las medidas de la disposición de la estratificación y el clivaje (vea la pág. 26). Los clivajes de plano axial no son a menudo

Los clivajes de plano axial no son a menudo exactamente paralelos a las superficies axiales de pliegues. Las deformaciones alrededor del pliegue no son constantes en cantidad y dirección debido a los contrastes de competencias entre las capas plegadas.

Los clivajes en abanico se producen por estas deformaciones heterogéneas. Los planos de clivaje pueden converger en dirección al núcleo (arcos internos) del

pliegue (clivaje en abanico convergente, Fig., 26c) o lejos del centro (clivaje en abanico divergente). En estos casos las medidas del clivaje en un estereograma mostrarán una expansión mayor, con polos siguiendo un círculo máximo (un plano perpendicular al eje del pliegue). Las lineaciones de intersección estratificación - clivaje están, sin embargo, todavía alineadas paralelas a las líneas de charnela del pliegue (Fig. 26c, 26d).

A veces los planos del clivaje tienen orientaciones que son oblicuas a la línea de charnela del pliegue, con lo que las lineaciones estratificación - clivaje no son paralelas a la línea de charnela del pliegue y por consiguiente también están orientadas diferentemente en los dos limbos del pliegue. como en los **pliegues cortados** (Figs. 26e. 26f). Esto puede surgir cuando el clivaje es impuesto después de que las capas ya se hubiesen plegado o cuando la deformación rocosa a la que el plegado y el clivaje están relacionados ha aumentado por sobre-imposición oblicua.

Ejercicio

1 En un pequeño afloramiento de una región de un plegamiento a gran escala se hicieron las medidas siguientes: estratificación 050/80SW; clivaje 110/70S. Clasifique los pliegues a gran escala de la región en términos de orientación (usando el esquema explicado en la pág. 50). Establezca cualquier supuesto realizado.

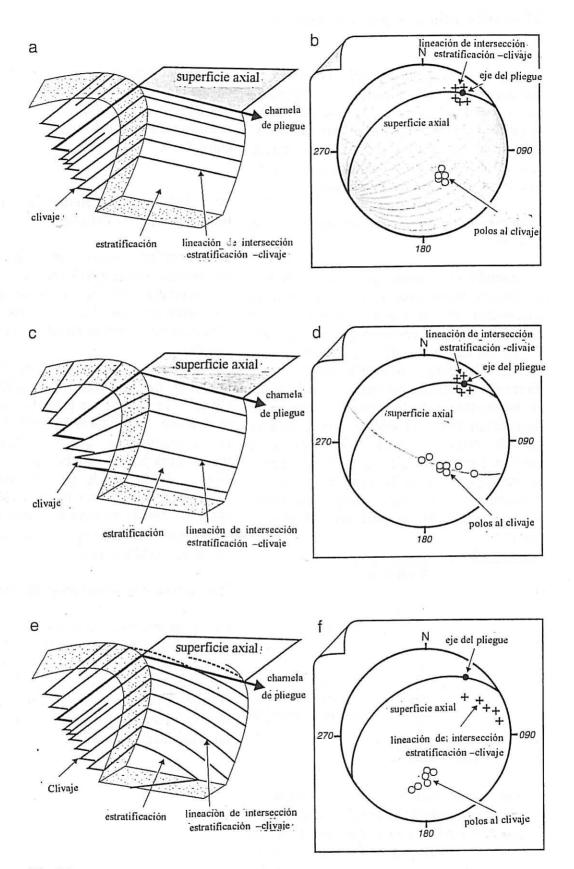


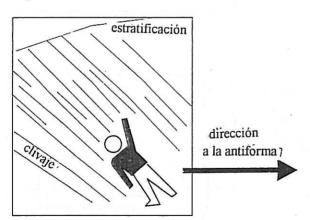
Fig. 26.

27 Analizando pliegues con clivaje

La Figura 27a es un ejemplo de un mapa geológico de un pliegue con símbolos estructurales que registra la orientación de estratificación y el clivaje en afloramientos diferentes. Se explica debajo cómo puede usarse este tipo de información para interpretar la geometría del pliegue.

Deduciendo la situación presente de los pliegues

A menudo el esbozar un corte geológico avuda a la interpretación de los datos que se encuentran en un mapa. La Figura 27b muestra un corte geológico que corresponde la línea x-y de la Figura 27ª. aproximadamente perpendicular dirección del clivaje. Es desaconsejado basar la interpretación de la estructura solo en la disposición de estratificación la cual, en este ejemplo, buza al sur-este a lo largo de la sección. Donde es visible el clivaje así como la estratificación en la sección (o en un afloramiento) la regla simple siguiente permite determinar la posición del pliegue mayor:



Frente al corte geológico, reclinese según el clivaje (vea la figura de arriba). Levante un brazo, alineándolo con el buzamiento de la estratificación. La siguiente antiforma se localiza a la derecha o izquierda, dependiendo de qué brazo se ha levantado.

Al aplicar esta regla a la estratificación y clivaje en el corte geológico (Fig. 27b) indica una antiforma al este de X y oeste de Y. Una antiforma debe localizarse por consiguiente entre X e Y.

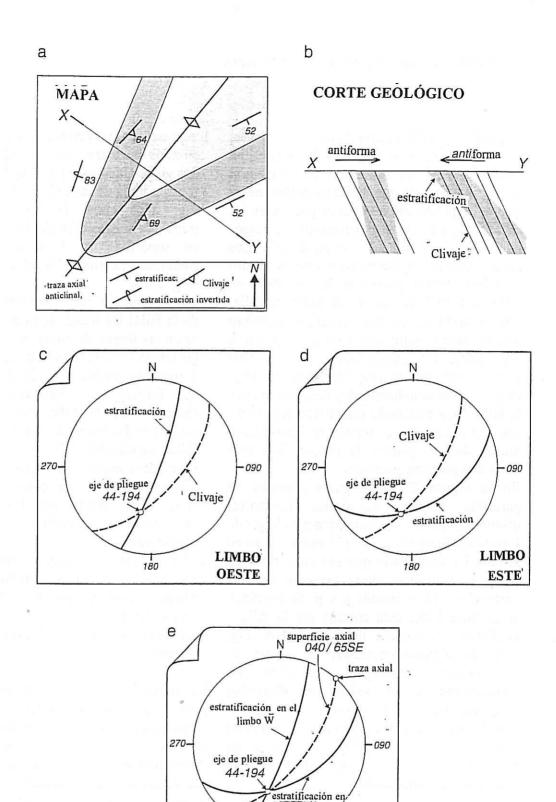
Para determinar la inmersión (plunge) de la línea de charnela del pliegue

La inmersión (plunge) del pliegue puede encontrarse estereográficamente a partir de las medidas de la disposición de la estratificación en los diferentes lugares alrededor de la estructura (el método - π , vea la p.44).

Si el clivaje es planar axial al pliegue, la lineación de intersección estratificación - clivaje (vea pág. 52) es paralela a la línea de la charnela. Las Figuras 27c y 27d muestran la determinación de la lineación de intersección para los limbos este y oeste del pliegue. El hecho de que se obtenga una estimación similar de la inmersión (plunge) (44-194) cuando se usan los datos de ambos limbos apoya el supuesto de que el clivaje es un clivaje de plano axial.

Para estimar la orientación del plano axial

La construcción estereográfica de la superficie axial del pliegue (Fig. 27e) se basa en el hecho de que la superficie axial se fija por medio de dos líneas: el eje del pliegue y la traza axial (línea de afloramiento de la superficie axial). El rumbo de la última se toma del mapa (Fig. 27a).



el limbo E

180

AMBOS

LIMBOS

Fig. 27.

28 Fallas 1. Para calcular el salto neto

Las fallas son discontinuidades en las rocas; son superficies a lo largo de las cuales ha tenido lugar el movimiento. Una estimación de la cantidad de movimiento (salto neto) que se ha producido a veces es posible en las fallas antiguas por el emparejando de rasgos que alguna vez coincidieron en la falla. Los rasgos que se requieren para este propósito necesitan definir puntos en la superficie de falla, uno en cada pared del plano de falla, que, a partir de su compensación permitan que se mida el salto neto (puntos p, p ' en la Fig. 28a). En circunstancias raras estos puntos podrían ser pequeños objetos (e.g. clastos en un conglomerado) desplazados por la falla. Más a menudo los puntos necesarios son definidos por el punto de intersección mutua de tres planos: la propia falla más otras dos guías no paralelas.

En la Figura 28^a, dos guías planares no paralelas (capas, intrusiones laminares, discontinuidades) se encuentran a lo largo de i. su línea de intersección. (El movimiento en la falla ha significado que esa línea i no sea continua sino que ahora consiste en dos partes i e i'.) Los puntos p y p' se localizan en la línea i que está cortada por la falla y posibilitan la medida del salto neto (Fig. 28a). En algunas circunstancias podría ser salto considerar el en conveniente en dirección buzamiento v el salto componentes del salto neto.

Los datos requeridos para el cálculo del salto neto se muestran en la Fig. 28b, qué es un mapa de la falla y de dos guías planares cambiadas de sitio (a, b).

Un método gráfico para encontrar el salto neto de una falla

El método involucra construir la configuración de las guías desplazados cuando aparecen en el propio plano de la falla. i.e. se dibujará un corte geológico en el plano de la falla. Las fases involucradas son:

- 1 represente un estereograma consistente en círculos máximos para la falla y para las dos guías planares *a* y *b* (Fig.28c).
- 2 tome la línea de falla (X-Y en el mapa en la Fig. 28b) como la línea de sección, transfiera la posición de los afloramientos en superficie a, b y sus homólogos cambiados de sitio a',b' al corte geológico (Fig. 28d).
- 3 en el plano del corte geológico (= el plano de la falla) las trazas de planos guías a y b serán las líneas de corte de esas guías, i.e. las líneas de intersección de la falla con a y b respectivamente (Fig. 28c). Los ángulos que forman estas intersecciones con la dirección de la falla son los cabeceos (pitches) de las líneas de corte en el plano de falla (ángulos 68° y 74° en la Fig. 28c). Se usan estos ángulos de cabeceo (pitch) para dibujar las líneas de corte en la sección (Fig. 28d). Éstos son los ángulos de inclinación (tilt) de las líneas de corte desde la horizontal.
- 4 En el corte geológico (Fig. 28d), que muestra las relaciones geométricas en el plano de falla, el punto p se encuentra en la intersección de a y b, y p' en la intersección de a' y b'. La distancia p-p' es el salto neto.

La inmersión (plunge) y la dirección de inmersión (plunge direction) del vector salto neto se pueden determinar midiendo el ángulo del cabeceo (pitch) de la línea de salto neto directamente desde el corte geológico y representando la orientación de la línea de salto neto como un punto en el círculo máximo de la falla en la Figura 28c.

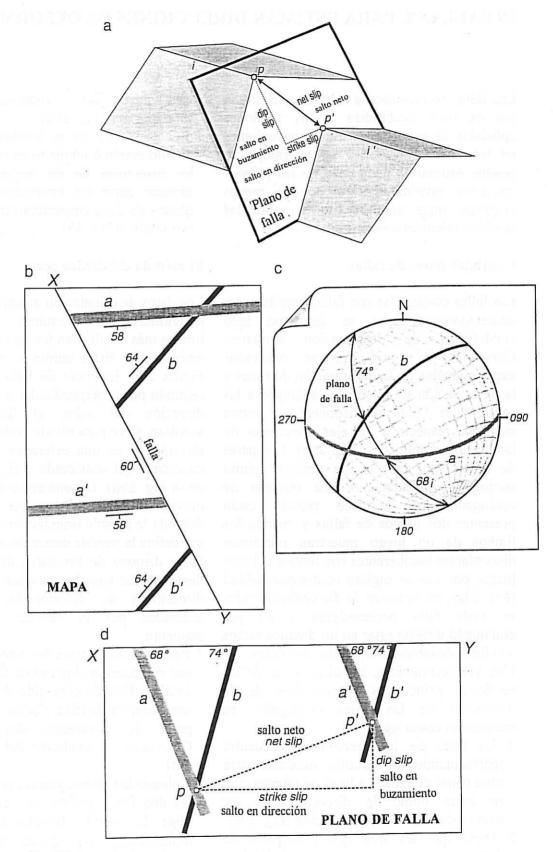


Fig. 28.

29 FALLAS 2. PARA ESTIMAR DIRECCIONES DE DEFORMACIÓN

Las fallas representan la respuesta mostrada por la roca quebradiza a las tensiones aplicadas. Si se toman medidas convenientes en las fallas observadas en el campo es posible estimar la naturaleza de las paleo tensiones involucradas, o por lo menos emplazar unos amplios límites sobre las posibles orientaciones de esas tensiones.

Conjugar pares de fallas

Las fallas conjugadas son fallas ampliamente contemporáneas que se formaron bajo condiciones de deformación similares. Conocidas a partir de los resultados experimentales de la deformación de rocas y la deformación de materiales análogos a las rocas, tales fallas se disponen una forma simétrica respecto a los ejes principales de las tensiones aplicadas (Fig. 29b). Los pares de fallas son dificiles de designar como conjugadas aisladamente. La relación de conjugadas se establece cuando están presentes dos juegos de fallas y cuando los limbos de un juego muestran relaciones discordantes incoherentes con limbos del otro juego, por eso se sugiere contemporaneidad (Fig. 29a). En resumen, la dirección del salto en cada falla perteneciente a un par conjugado debería estar en los ángulos rectos a la línea de intersección de las dos fallas.

Una vez reconocidas, las direcciones de las tensiones principales responsables de la formación de las fallas conjugadas se encuentran como sigue.

- 1 La línea de intersección se encuentra representando los círculos máximos para cada plano de falla. La línea de intersección se toma como la dirección del eje intermedio σ₂ de la deformación (Fig. 29c).
- 2 Dado que los tres ejes principales de deformación son, por definición, mutuamente perpendiculares, los ejes σ_1 y σ_3 deben quedar en un plano en ángulos rectos al eje σ_2 . El círculo máximo para

- esto puede ser representado en el estereograma (Fig. 29c).
- 3 Los ejes σ_1 y σ_3 se localizan dentro del círculo máximo dibujado en el paso 2 como los bisectores de los ángulos agudos y obtusos entre las intersecciones con los planos de falla respectivamente (Fig. 29c. vea también la p.36).

El método del diedro recto

Los datos de orientación a partir de las fallas individuales sólo permiten establecer los límites más amplios en los ejes principales de deformación. Estos límites se muestran en la Figura 29d. El plano de falla junto con un segundo plano perpendicular a la falla y a su dirección del salto, el llamado **plano auxiliar**, sirve para dividir todas las posibles direcciones en una esfera en dos pares de cuadrantes (el sombreado y el no sombreado en la Fig. 29d). Dependiendo del sentido del movimiento de la falla, un par de cuadrantes delimita la posible orientación de σ_1 y el otro par define la posible dirección σ_3 .

Si se dispone de los datos de varias fallas desarrolladas bajo las mismas tensiones, las direcciones de deformación pueden ser estimadas por el método estereográfico siguiente.

- 1 Para cada falla, trace los círculos máximos que representan el plano de falla y el plano auxiliar. Usando el sentido del movimiento observado en la falla, decida cuales son los pares de cuadrantes del σ_1 y σ_3 . Obscurezca el cuadrante del σ_1 (Fig. 29e. 29t).
- 2 Coloque los estereogramas producidos para las dos fallas encima de cada una (Fig. 29g). La factible orientación del eje de deformación σ_1 queda en la parte sombreada del estereograma común a todos los recubrimientos. El eje σ_3 queda dentro de las regiones comúnmente no sombreadas.

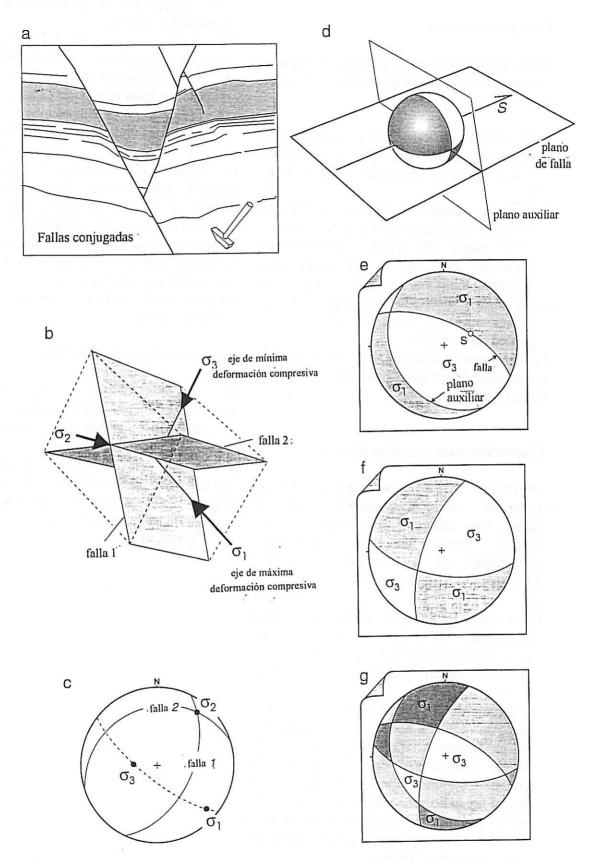


Fig. 29.

30 Conos / círculos menores

Ejemplos de conos

En las aplicaciones de la geología estructural el concepto de cono se encuentra en relación con:

- 1 El análisis de estructuras geológicas en forma de cono. e.g. pliegues cónicos, diques cónicos, fracturas cónicas (Fig. 30a).
- 2 Conos imaginarios definidos por rotación de una línea sobre un eje fijo (Fig. 30b).
- 3 Un juego de líneas variablemente orientadas pero en el que cada línea individual mantiene un ángulo constante (a) con alguna dirección fija (Fig. 30c). e.g. lineaciones que han sido plegadas en geometrías espirales.

Los términos usados para describir la forma y orientación de un cono están definidos en la Figura 30b.

Proyección estereográfica de conos

En las pp. 12 y 14 se explicó cómo se proyectan estereográficamente líneas y planos. Los conos se proyectan de forma similar; como antes, empezamos proyectando en una esfera y después proyectando en un plano.

- 1 El cono se trata tan en un final doble como se muestra en la Figura 30c. Este doble cono se mueve (sin rotación) hasta que el ápice se sitúa en el centro de la esfera (Fig. 30d)
- 2 El conjunto de líneas que constituyen el cono se proyecta hacia fuera hasta que las líneas toquen la superficie interna de la esfera. Los puntos del contacto con la esfera describen círculos. Estos círculos tienen un radio más pequeño que la propia esfera y se llaman círculos menores (vea pág. 12). Así la proyección esférica de un cono es un círculo menor.
- 3 De las líneas que constituyen el cono, ignoramos todas aquéllas que se dirigen hacia arriba (como de costumbre estamos

- sólo interesados en proyecciones en el hemisferio inferior).
- 4 Finalmente proyectamos los puntos en los círculos menores a partir de la superficie de la esfera moviéndolos a lo largo de un camino en línea recta que lleva al cenit de la esfera, pero deteniéndonos cuando se alcance el plano de proyección (Fig. 30e).

La Figura 30f muestra la proyección equiareal del cono en la Figura 30d la cual tiene un eje que se sumerge 10° hacia 230° y un ángulo apical de 30°. El ángulo apical y la inmersión (plunge) del cono determinan la forma del círculo menor resultante. La Figura 30g muestra el efecto, en el círculo pequeño proyectado, de cambiar la inmersión (plunge) del eje del cono.

La proyección estereográfica

Los círculos máximos impresos en la proyección estereográfica ecuatorial (pág. 19) han sido ya empleados para representar planos. El otro juego de curvas en la proyección son los círculos menores que representan a una familia de conos que tienen ángulos apicales diferentes pero comparten un eje horizontal común.

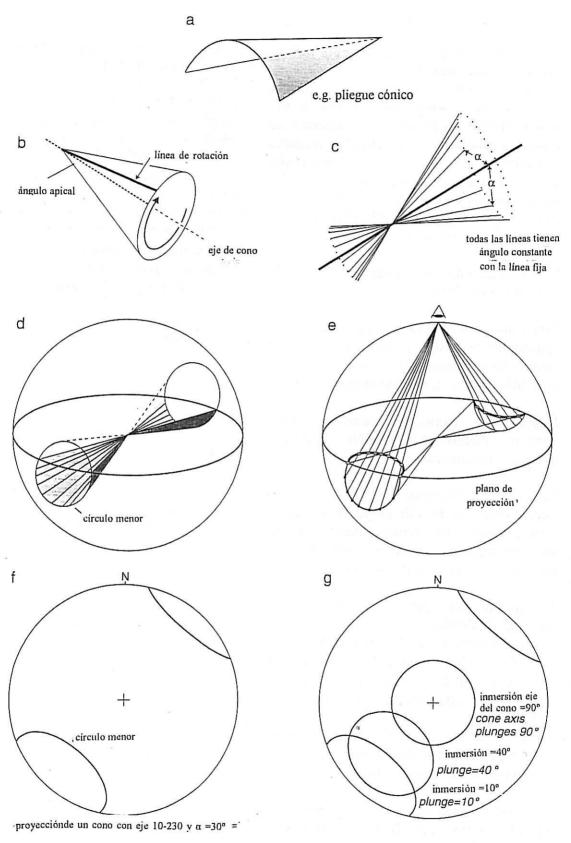


Fig. 30.

31 Representando un cono

Para trazar cualquier cono /círculo menor con un eje horizontal

La relación entre el cono y la falsilla estereográfica es importante debido a sus aplicaciones a las rotaciones, problemas de sondeo y geotécnia. Los círculos menores impresos en la falsilla ecuatorial (estereográfica o equiareal) representan conos con ejes horizontales. El círculo menor con el ángulo apical requerido (2a) se puede trazar directamente (Fig. 31a).

Representar cualquier cono/círculo menor con un eje vertical

Esta construcción se lleva a cabo idealmente empleando la falsilla polar, o dado que el círculo menor requerido es concéntrico con el círculo primitivo, con compás (Fig. 31a).

Representar cualquier cono inclinado /círculo menor (proyección Lambert/ Schmidt o equiareal)

Los círculos menores no son verdaderos círculos con este tipo de proyección. Debido a esto, la forma del círculo pequeño tiene que ser construida uniendo puntos que representan líneas que descansan en el cono.

1 Represente el eje del cono, a (Fig. 31b).

2 Usando la falsilla equiareal ecuatorial, trace un número de líneas al ángulo dado (α) del eje. Esto se hace girando la falsilla, usando el círculo máximo en el que cae α , midiendo hacia afuera fuera el ángulo requerido, α .

3 Cuando se ha trazado el suficiente número de líneas a partir del cono, únalas para formar el círculo menor (Fig. 31b).

Para representar cualquier cono inclinado /círculo menor (Wulff o la proyección estereográfica)

Podemos aquí usar un método más directo debido al hecho de que los círculos pequeños

se proyectan como verdaderos círculos en la proyección estereográfica.

1 Represente el eje del cono, a (Fig. 31c).

2 Empleando un círculo máximo recto en la falsilla (un plano vertical), cuente hacia fuera el ángulo dado α en ambas direcciones desde α , para encontrar los puntos p y p'.

3 Encuentre el punto medio, c, de la línea p-p' (en términos de distancia actual en la

provección, no el ángulo).

4 Dibuje un círculo verdadero con un compás a través de *p* y *p* ' con centro en *c*.

Observe que c se ha desplazado con respecto a a, el eje del cono.

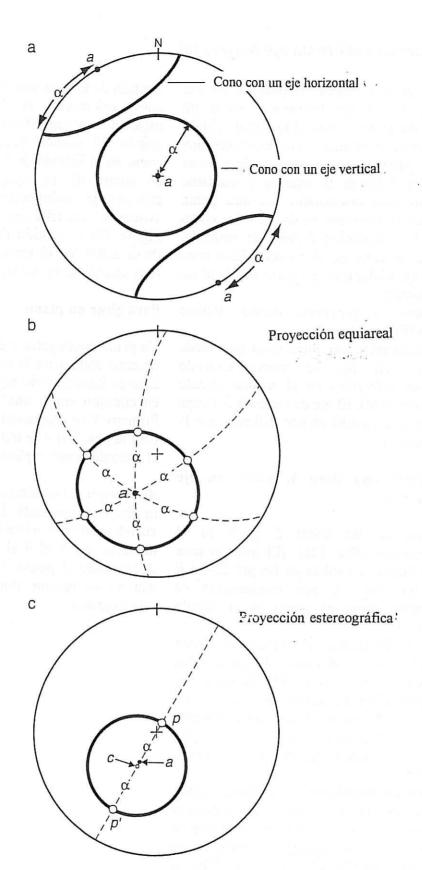


Fig. 31.

32 Rotaciones sobre un eje horizontal

Para ayudar a visualizar la rotación de una línea sobre un eje horizontal, tome un compás de puntas finas (Fig. 32a), ábralo ligeramente, mantenga horizontalmente una punta y gírelo entre sus dedos. Esta punta representa el eje de la rotación y mantiene totalmente esta orientación. La otra punta representa la línea que rueda; observe cómo cambia la orientación durante la rotación. Describe un cono en el espacio. Este cono tiene un eje horizontal que corresponde al eje de la rotación.

Los conos se proyectan dando círculos menores (Fig. 32b).

Por consiguiente, una línea dada que ruede sobre un eje fijo se mueve teniendo posiciones diferentes en el mismo círculo menor (Fig. 32c). El eje de rotación R ocupa el centro del círculo menor definido por la línea que gira.

Para girar una línea L sobre un eje horizontal, R,

1 Represente las líneas *L* y *R* en el estereograma (Fig. 32c). (El método para trazar líneas se explica en las pp. 22-5.) *R* está horizontal y por consiguiente se representa como un punto en el círculo primitivo.

2 Gire la falsilla bajo el estereograma hasta que el punto en el centro de los círculos menores de todo la falsilla se sitúe por debajo de R en el estereograma (Fig. 32d).

3 El círculo menor en el que cae L describe su camino durante la rotación. Por ejemplo, en la Figura 32d, L cae en el círculo menor $\alpha = 30^{\circ}$.

4 La nueva orientación de L (denominada *nueva* en la Fig. 32d) se encuentra moviéndolo alrededor del círculo menor en una cantidad determinada por el ángulo de rotación requerido (50 en la Fig. 32d) en una dirección determinada por el sentido de rotación requerido. El ángulo de rotación es registrado por las divisiones angulares en el círculo menor.

Sentido de la rotación En orden a calcular la nueva orientación de L, el sentido de la rotación debe especificarse tan bien como el ángulo. El sentido puede ser especificado como en el sentido de las agujas del reloj o en contra de las agujas del reloj. Para prevenir la ambigüedad la dirección del visionado necesita ser especificada. En la Figura 32b el sentido de la rotación podría darse como 'en el sentido de las agujas del reloj cuando se ve noroeste'.

Para girar un plano

Un plano puede girarse empleando el método descrito antes para la rotación de una línea. Esto se hace posible representando el plano en cuestión como una línea, su normal N. Primero N se representa estereográficamente (vea la pág. 20) y se trata como la línea L en el procedimiento explicado anteriormente.

Aclaración: El camino completo seguido por la línea denominada L en la Figura 32d cuando giró 360° sobre R es mostrado por los números del 1 al 9 al 1 en la Figura 32e. Alcanzando el punto 3 y después el 7), su camino se resume diametralmente en el estereograma.

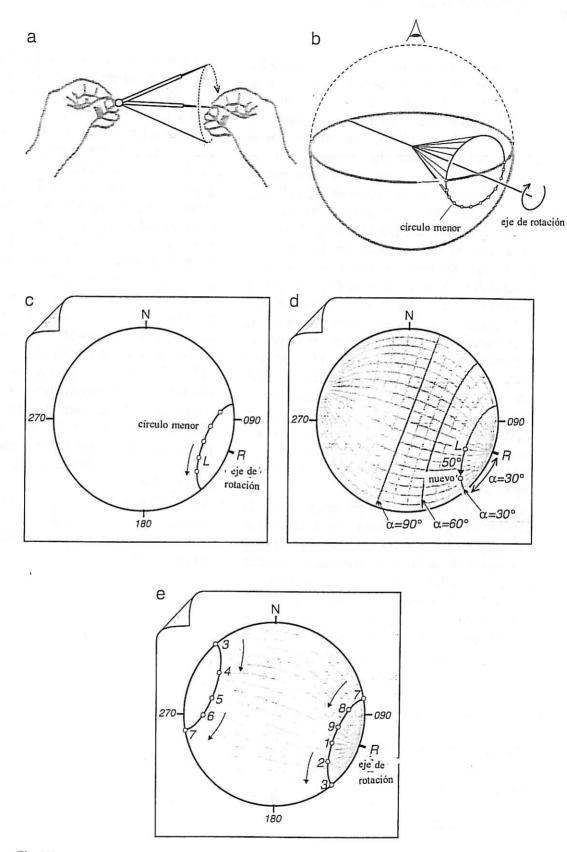


Fig. 32.

33 Ejemplo de rotación sobre un eje horizontal. Restauración de inclinaciones de capas

El capítulo anterior describió cómo calcular los efectos de una rotación horizontal en la orientación de una línea. El mismo procedimiento exacto se puede adoptar para la rotación de un plano, con tal de que el plano sea representado primero en el estereograma por su polo. i.e. la línea que es normal a él. Esto se ilustra en un ejemplo que involucra la corrección de la inclinación de capas bajo una discontinuidad (Fig. 33a).

La discontinuidad angular en la Fig. 33a implica que las rocas que quedan ahora bajo la superficie de discontinuidad (grupo A) ya estaban inclinadas en el momento en el que sobre depositaron rocas se discontinuidad (grupo B). Sin embargo, el buzamiento de las rocas más viejas en ese tiempo era diferente de su disposición actual. Esto es debido a que ocurrió una inclinación de la sucesión entera posterior a la deposición de las rocas del grupo B; esta fase más tardía de inclinación produjo la disposición actual no - horizontal de las capas del grupo B.

Para restaurar las capas del grupo A en la disposición que tenían justo antes del evento que después las inclinó, necesitamos aplicar una rotación hacia atrás apropiada a ambos grupos lo suficiente como para devolver al grupo B la disposición horizontal. El escoger una rotación hacia atrás apropiada con frecuencia es un asunto dificil; no hay normalmente una ruta única para volver a la horizontal. En ausencia de una mayor información asumimos que ese grupo B de rocas adquirieron su buzamiento actual por medio de la rotación sobre su línea de dirección presente (una línea horizontal con rumbo 020°). Usaremos este mismo eje de rotación para eliminar la inclinación.

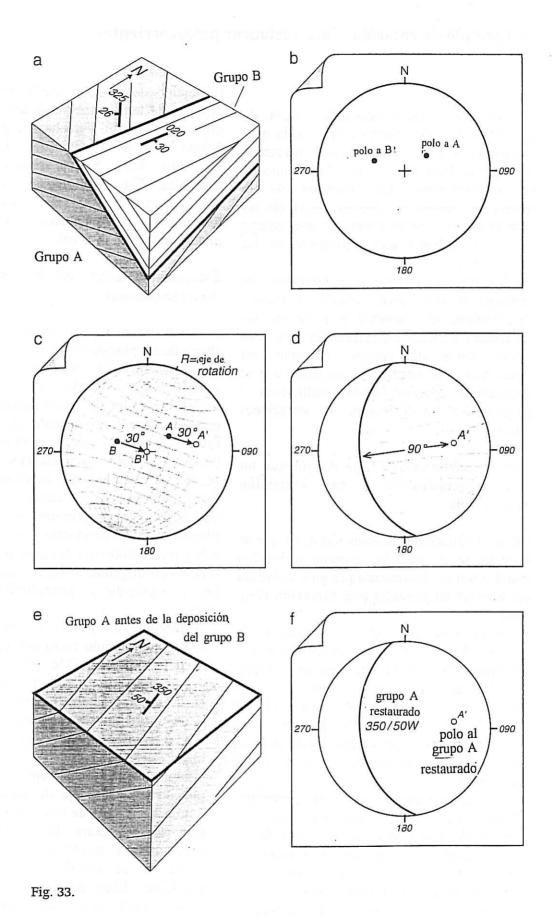
Procedimiento

1 Represente los polos de estratificación de los grupos A y B en al estereograma (Fig. 33b).

2 Represente R, el eje rotación hacia atrás. Esto es una línea horizontal que tiende en dirección 020°, i.e. la dirección de las capas en el grupo B (Fig. 33c).

3 Gire la falsilla bajo el estereograma hasta que el centro de los círculos menores de la falsilla llegue al eje de rotación proyectado (punto R en el estereograma) (Fig. 33c).

- 4 Tome nota del ángulo de rotación hacia atrás exigido para devolver las capas del grupo B a la horizontal, i.e. el ángulo de rotación necesario para traer el polo del grupo B a la vertical (el centro del estereograma). Este es igual al ángulo de buzamiento de las capas del grupo B (30° en el ejemplo presente. Fig. 33c). B se moverá a B ' en la Figura 33c.
- 5 El polo de A es girado en la misma cantidad y en el mismo sentido que B (por medio de 30° en este ejemplo). Esto se consigue moviendo A 30° a lo largo de su propio círculo menor (en el mismo sentido que $B \rightarrow B$) para tomar la nueva posición A' (Fig. 33c).
- 6 En la Figura 33d, se encuentra el círculo máximo que corresponde a A'. Éste es la representación de las capas restauradas del grupo A (Fig. 33e. 33f).



34 Ejemplo de rotación. Para restaurar paleocorrientes

Una variedad de estructuras sedimentarias de tipo linear (e.g. los ripples marks en la pág. 6) proporciona una evidencia de la dirección del flujo de las corrientes en el momento de la sedimentación. Las medidas de la inmersión (plunge) o cabeceo (pitch) de las estructuras se hicieron a menudo en el campo con vista a hacer una estimación de las paleocorrientes.

En los estratos inclinados y plegados, sin embargo, las direcciones actuales no pueden determinarse directamente a partir de las tendencias de tales estructuras lineares. Los toscos datos de campo necesitan ser restaurados a su orientación original. i.e. a su orientación anterior a la inclinación / plegamiento. Se distinguen dos situaciones diferentes.

Estratos inclinados- El eje del pliegue no está sumergiéndose o con inmersión desconocida

En estas situaciones la asunción usual que se hace es la de que los estratos inclinados adquirieron su buzamiento por girar sobre un eje horizontal paralelo a la dirección (Fig. 34a).

1 Represente en el estereograma la orientación actual de la estructura linear medida y la línea de dirección de las capas (= al eje de rotación) (Fig. 34b).

2 Gire la falsilla bajo el estereograma hasta que el centro de los círculos menores de la falsilla coincida con la posición de la línea de dirección representada (= al eje de la rotación).

3 Gire la estructura linear a la horizontal. Esto es logra estereográficamente moviendo hacia atrás la estructura linear representada a lo largo del círculo menor en que cae tanto como el círculo primitivo (L-L', vea la pág. 64). La estructura linear está ahora horizontal y su rumbo original se puede leer directamente del estereograma (Fig. 34b).

El sentido de rotación usado en la fase 3 depende de la orientación de los estratos. Si los capas están derechas (Fig. 34a), el ángulo de rotación requerido será menor de 90° (Fig. 34b). Si las capas estuviesen invertidas (Fig. 34c), la lineación (L) se devuelve a la horizontal mediante una rotación de ángulo mayor que 90°, pero menos de 180° (Fig. 34d).

Estratos inclinados - eje de pliegue que se sumerge (plunging)

A partir de cualquier medida directa de charnelas de pliegue visibles o del análisis de buzamientos de variación de usando el métodoestratificación (explicado en las pp. 44-5) puede estar claro que los pliegues responsables de inclinar los estratos tienen ejes que se están sumergiendo (plunging). En tales circunstancias usualmente se asume (aunque no necesariamente de forma correcta) que las capas (y la lineación en ellos) fueron primero inclinadas por pliegues con eje horizontal y después giradas sobre un segundo eje horizontal en ángulos rectos con el primero. La restauración tiene por consiguiente un procedimiento de dos fases.

1 Seleccione un primer eje horizontal de rotación en ángulo recto con el rumbo del eje del pliegue (Fig. 34e, 34f).

2 Usando este eje, gire el eje del pliegue (f) hasta la horizontal (mediante un ángulo igual a la inmersión (plunge) del pliegue, Fig., 34f) y la estructura linear mediante el mismo ángulo.

3 Empleando el ahora eje horizontal del pliegue (f') como eje de rotación, Figura 34g (segundo eje de rotación en Fig. 34h), gire la estructura linear L' hasta la horizontal, i.e. mueva la línea trazada a lo largo de su círculo menor al círculo primitivo. Esto da la dirección de la paleocorriente corregida (L restaurada).

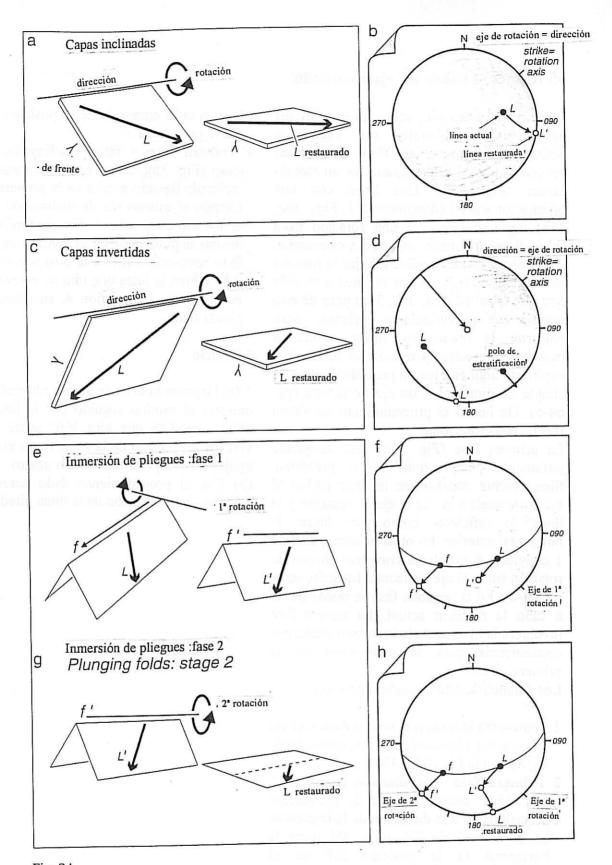


Fig. 34.

35 Rotación sobre un eje inclinado

Cuándo una línea gira sobre un eje fijo sus orientaciones cambiantes son tales que definen un cono (Fig. 35a). El camino proyectado en el estereograma es un círculo menor (Fig. 35b). Una línea con una orientación inicial (denominada 1, Figs. 35a, 35b) logra, después de una rotación dada sobre un eje inclinado, una nueva orientación , denominada 4. Es posible dibujar la ruta del círculo menor seguida por la línea a medida que gira (pág. 62, Fig. 35b, 35c) pero de esta manera el procedimiento práctico para construir la orientación linear girada es bastante impreciso. Un método alternativo explicado aquí emplea un procedimiento más simple de girar sobre un eje horizontal (pp. 64-5). De hecho el procedimiento involucra tres de tales rotaciones.

La primera fase (Fig. 35c) está designada puramente para simplificar el problema. Simplemente consiste en inclinar (sobre al eje horizontal) a la vez el eje de rotación y la línea, lo suficiente como para lograr la horizontal anterior. En otras palabras, La fase 1 convierte el problema completo en uno de rotación sobre el eje horizontal (descrito en la pp. 64-5). En la segunda fase se puede llevar a cabo la rotación actual. La tercera fase involucra la inversa de la inversión hecha por conveniencia para la inclinación en la primera fase.

Los detalles de este procedimiento son:

1 Represente la línea que será rodada y el eje de rotación (denominados respectivamente 1 y RA, en la Fig., 35c, 35d).

2 Primera fase = inclinación (tilting) (Fig. 35c, 35d): usando un eje de inclinación perpendicular a la dirección de la inmersión (plunge direction) de RA, gire RA hasta la horizontal (a la posición RA' en el estereograma) y la línea a 1 mediante el mismo ángulo (para alcanzar la posición 2).

3 Segunda fase = rotación (Fig. 35e, 35f): usando el eje de rotación ahora horizontal (RA'), gire la línea moviéndola a lo largo

de su círculo menor desde su posición 2 a la nueva posición 3.

4 Tercera fase = retro -inclinación (backtilting) (Fig. 35g. 35h): esta fase invierte el
inclinado llevado a cabo en la primera fase.
Usando el mismo eje de inclinación como
el que usó en la primera fase, incline con el
mismo ángulo pero en el sentido opuesto.
Esto retro-trae a RA' a la posición original
RA, si bien la línea que gira se mueve de la
posición 3 a la posición 4, su orientación
girada final.

Ejercicio

- 1 (a) Haga un boceto de un estereograma que muestra el camino seguido por la línea 40-060 a medida que gira 100° sobre el eje vertical. El sentido de la rotación es el de las agujas del reloj (mirando hacia abajo).
- (b) Usa el procedimiento dado antes para calcular la orientación de la línea girada.

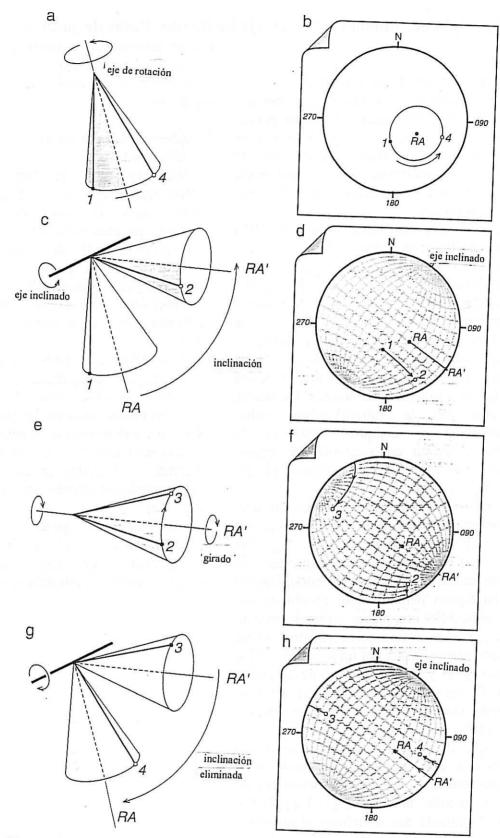


Fig. 35.

36 Ejemplo de rotación sobre un eje inclinado. Datos de sondeo

Un núcleo cilíndrico de roca intacta tomado de un sondeo puede mostrar en su superficie curvada trazas de alguna estructura planar; como ejemplo aquí nos referiremos a la estratificación (Fig. 36a). La forma de esta línea de intersección curvada permite medir el ángulo δ entre la normal a la estratificación y el eje del núcleo.

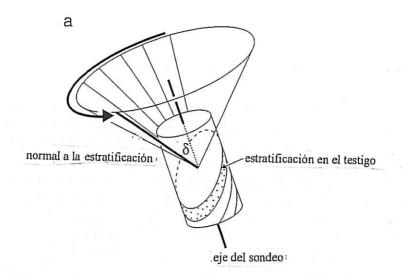
Nuestro objetivo es establecer la disposición in situ de la estratificación. Aunque puedan conocerse la inmersión (plunge) y la dirección de la inmersión (plunge direction) del eje del sondeo, nuestra estimación de la dirección y buzamiento de la estratificación se ve frustrado por el hecho de que el núcleo ha sufrido una rotación desconocida sobre un eje paralelo al eje de la muestra cilíndrica durante su extracción del sondeo. De hecho. polo de la estratificación corresponder a cualquier línea en la superficie de un cono circular de ángulo apical = 2δ y con un eje paralelo al eje del núcleo (Fig. 36a).

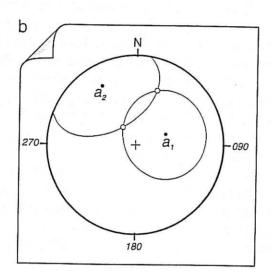
Los datos disponibles se pueden mostrar estereográficamente (Fig. 36b). El eje del sondeo se traza como un punto $(a_1. \text{ Fig. 36b})$ qué forma el centro de un círculo menor de ángulo apical 2δ. El polo de la estratificación cae en alguna parte de este círculo menor, pero se necesita una mayor información para localizarlo. Una información adicional podría proporcionarse quizás por un segundo sondeo con un eje a_2 y ángulo de cono de $2\delta_2$ (Fig. 36b). El segundo sondeo proporcionaría un segundo círculo menor en el que también debe caer el polo de la estratificación. En esta situación, el polo de la estratificación está limitado a dos posibles posiciones en el estereograma: en las dos intersecciones de los dos círculos menores (Fig. 36b). Habrá por consiguiente dos soluciones al problema del cálculo de la disposición de la estratificación.

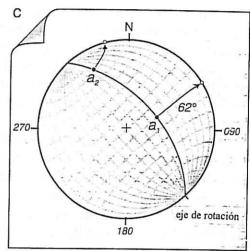
La construcción de círculos menores con ejes inclinados similar a los de la Fig. 36b puede llevar tiempo (vea pp. 62-3), mientras que los círculos menores con ejes horizontales se pueden realizar fácilmente a partir del de la

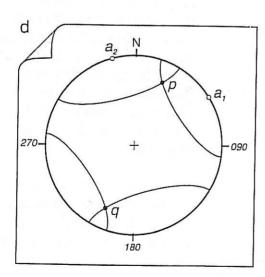
falsilla (estereonet) ecuatorial. Este hecho favorece el procedimiento estereográfico siguiente para su realización mediante un doble sondeo.

- 1 Represente las ejes de ambos sondeos, a₁ y a₂ (Fig; 36c).
- 2 Haciendo girar la falsilla bajo el estereograma, encuentre el plano paralelo a ambos ejes, i.e. encuentre el círculo máximo que pasa por al y a₂.
- 3 Empleando la dirección del plano encontrado en el paso 2 como eje de rotación, gire a₁ y a₂ simultáneamente hasta la horizontal. El ángulo requerido de rotación es 62° en el ejemplo en la Figura 36c
- 4 Dibuje círculos menores alrededor de a_1 y a_2 con ángulos de apertura respectivamente de δ_1 y δ_2 (Fig. 36d). Estos círculos menores deben cortar en dos puntos, p y q.
- 5 Gire p y q el inverso de la rotación llevada a cabo en el paso 3, i.e. use el mismo eje de rotación y el mismo ángulo de rotación pero girando en sentido opuesto (62° en la Fig. 36e).
- 6 Las posiciones giradas de p y q (denominados p', q' en la Fig. 36e) representan las dos posibles orientaciones para la normal a la estratificación.









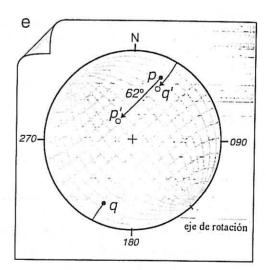


Fig. 36.

37 Trazado de curvas de densidad en estereogramas

El trazado de curvas es una manera de mostrar la densidad de planos representados o líneas en el estereograma y la variación de la densidad a lo largo del estereograma. El dibujo de los contornos de densidad se hace para destacar el modelo de preferente orientación presente en una muestra. El efecto de contorneo es producir una representación aplanada de los datos que enfatiza las propiedades de la asociación de puntos en lugar de a los puntos aislados. Esto es particularmente útil en situaciones en las que han de ser comparadas las muestras de los diferentes estereogramas, sobre todo cuando las similitudes potenciales del modelo están enmascarados por diferencias en la cantidad de datos representados en cada estereograma.

Existe una gran variedad de métodos para calcular las densidades de puntos en el estereograma. La mayoría de éstos involucra el contar el número de puntos que están representados dentro de un área estandar determinada de la falsilla. La densidad se expresa como

densidad =

% del número total de puntos representados que se dan en el área de muestreo / área del área de muestreo como % del estereograma entero

Los unidades por consiguiente son % por el % del área o, más simplemente, la densidad se expresa como un número sin unidades. El método para contornear descrito aquí emplea la falsilla de conteo Kalsbek:

consisten en 1 Los datos a contornear estructuras lineares o polos de estructuras planares (Fig. 37a). Ellos deben ser falsilla representados empleando una falsilla la dado que equiareal estereográfica introduce falso agrupamiento de los datos representados en el punto central del estereograma (pp. 40-1). Si hubiera muchos datos a representar, el uso acelerará la falsilla polar procedimiento de representación (pp. 42-3).

2 La falsilla de conteo Kalsbek (Fig. 37b) tiene un esquema que consiste en solapar hexágonos mutuamente, cada uno con un área igual al 1/100 del área total del estereograma completo. La falsilla Kalsbek se pone bajo el estereograma de los datos representados y sujeta al papel en una posición fija.

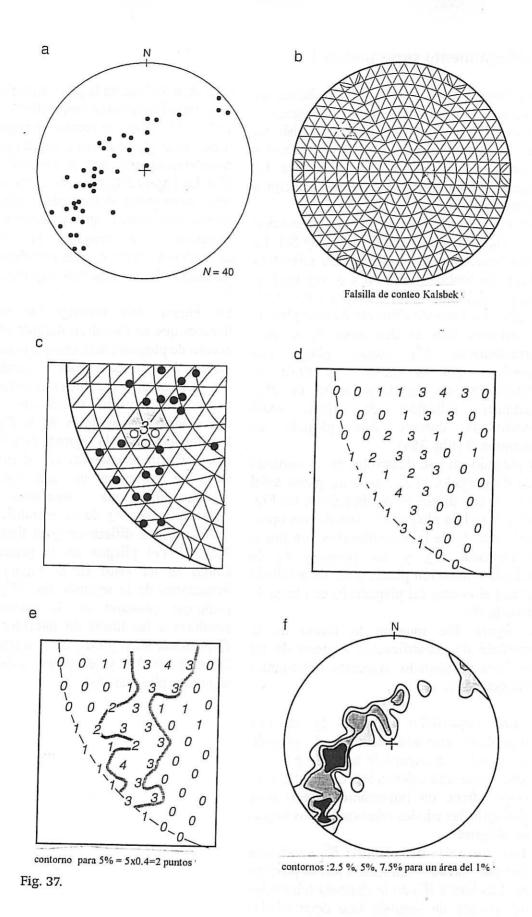
3 Se registra el número de puntos que se dan en cada hexágono (Fig. 37c) y, de esta manera, se obtiene una serie de números que cubren el estereograma (Fig. 37d).

4 En esta fase se hace el cálculo de cuántos números constituye el 1% del total de los datos. Esto se hace simplemente dividiendo el número total de puntos, N, por 100. En la Figura 37a, por ejemplo, N es igual a 40, y por consiguiente el 1% es igual a 40/100 = 0.4 puntos.

5 Para valores de densidad convenientes (e.g. 2.5%, 5%, 7.5% por % del área) se calculan los números de puntos que corresponden a estos, i.e. 2.5 x 0.4, 5 x 0.4, etc.,

6 Los contornos se dibujan ahora según los números de puntos calculados en el paso 5. El contorneo manual involucra la interpolación aproximada de valores con la asunción de que las densidades cambian de forma linear entre valores conocidos en la rejilla hexagonal. Por ejemplo, el contorno para los puntos 2.0 pasará entre la rejilla adyacente a valores de 1.0 y de 4.0 pero estará más próximo a los valores de 1.0 (Fig. 37e).

Las líneas del contorno resultantes (Fig. 37f) no deben cruzarse. Serán además continuas; no deben limitarle al círculo primitivo sino que deben continuar al otro lado del estereograma.



75

38 Plegamiento superpuesto 1

La geometría de las estructuras resultantes de la superposición de dos juegos de pliegues es compleja, y por consiguiente el análisis de tales estructuras resulta pesado con métodos basados en la proyección estereográfica. La Figura 38 ilustra algunos de los principios geométricos involucrados.

Considere un pliegue de primera generación (F_1) (Fig. 38a) de la estratificación (=So). La estratificación tiene disposiciones diferentes en los dos limbos (limbos a y b. vea las Fig. 38a y 38d) donde se les distingue como $S_o(a)$ y $S_o(b)$. La línea de charnela de este pliegue de primera fase se denomina B_I o, más correctamente, B_{I}^{0} porque pliega una superficie que es la S_o . La línea de intersección de $S_o(a)$ y $S_o(b)$ es B^0_1 . de plano axial Cualquier foliación desarrollada durante este plegado denomina S_l (Fig. 38a).

El plegado que se desarrolló en la segunda fase de plegado, el F_2 , tiene un plano axial (S_2) con una disposición dibujada en las Fig. 38b y 38e. Los pliegues F_2 son de dos tipos: el plegado F_2 de la estratificación con líneas de charnela B^0_2 , y los pliegues F_2 de cualquiera foliación planar axial desarrollada durante el evento del plegado F_1 con línea de charnela B^1_2 .

La figura 38c muestra la forma de la superficie de estratificación después de las dos fases de plegado. Aspectos importantes de la geometría son :

1 Las superficies axiales: S_I es una superficie curvada debido al plegado durante F_2 . La superficie axial S_2 , por otro lado, tiene una orientación constante. Este rasgo ofrece un importante criterio para distinguir las edades relativas de dos juegos de pliegues.

2 Las charnelas del pliegue: B^0_1 ahora está curvada; ha sido deformada por el plegado F_2 . Las líneas B^0_2 de la charnela (charnelas del pliegue de segunda fase desarrolladas en la estratificación) tienen una variedad de orientaciones que dependen del limbo del primer pliegue en el que los pliegues F_2 se desarrollaron.

La Figura 38f ilustra la geometría final de B^0_I y de otras lineaciones desarrolladas paralelas a ellas, L^0_I . Estas se formaron originalmente como un juego de líneas paralelas pero ahora están deformadas por el plegado posterior (F_2) . La Figura 38g muestra la orientación de estas lineaciones deformadas. Ellas pueden definir una banda que se encaja junto al círculo máximo (como en la Fig. 38g) o con un círculo menor, dependiendo de la naturaleza de las tensiones impuestas durante F_2 .

La Figura 38h muestra las estructuras lineares que se formaron durante el segundo evento de plegado, denominadas charnelas de pliegue B_2^0 y lineaciones L_2^0 . También éstas son demasiado variables en orientación pero no por la misma razón que para las lineaciones más antiguas de la Figura 38f. Las lineaciones de la segunda fase $(B^0_2 y L^0_2)$ nunca fueron constantes en su orientación. Ellas se formaron en una variedad de dependian que orientaciones disposición pre- F_2 de la estratificación (la cual a su vez difiere entre el limbo a y el limbo b del pliegue de la primera fase). Como se ha visto en la Figura 38i, las lineaciones de la segunda fase B_2^0 y L_2^0 en cualquier posición en la estructura son paralelas a las líneas de intersección de la disposición local pre- F_2 de la estratificación. So(a) y So(b), y el plano axial de los segundos pliegues (S_2) .

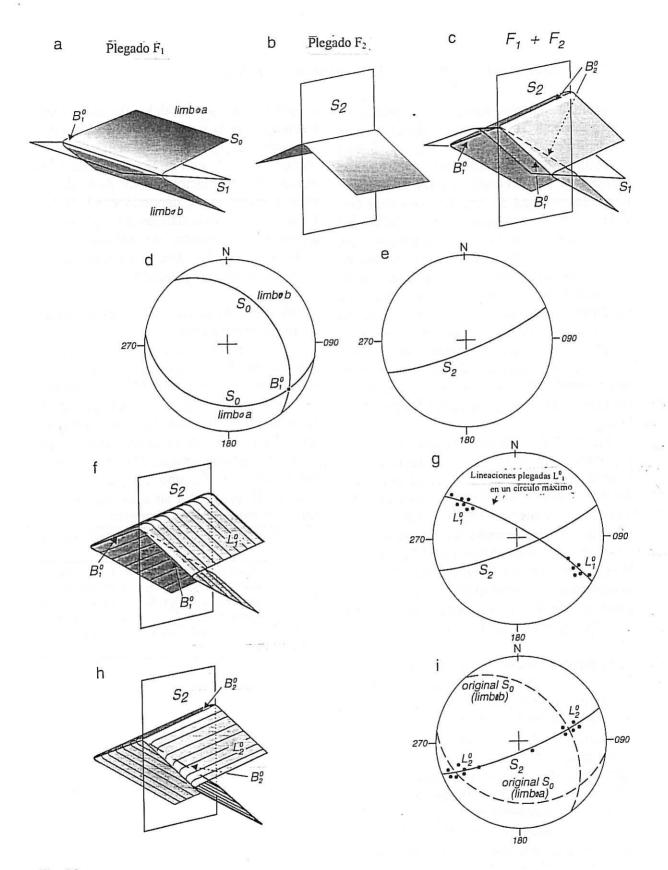


Fig. 38.

39 Plegamiento superpuesto 2. Concepto de sub-área

El capítulo anterior resumió los principios que gobiernan la orientación de elementos estructurales (estructuras planar y lineal) resultantes de las estructuras del pliegue replegadas. Por diversas razones se produce una gran variedad de orientaciones para casi las estructuras, incluyendo pertenecientes a la fase de plegamiento más joven. Si todos los datos coleccionados de una estructura como la de la pág. 76 se representaran en un estereograma modelos complejos resultantes dificiles de analizar. Por ejemplo, los polos de la estratificación mostrarían un barrido disperso, no la gran distribución en cinturón en un círculo máximo que es característico de las estructuras con geometría cilíndrica (vea la pág. 44).

La Figura 38f y 38h muestra que, a pesar de la complejidad de la estructura total, existen dominios espaciales dentro de la estructura los donde elementos estructurales particulares muestran una constancia en la orientación. Por ejemplo, las lineaciones L⁰₂ tienen dirección constante en el limbo b del pliegue original F_1 (vea la Fig. 38h). La interpretación estructural se ayuda ampliamente si se representan separadamente los estereogramas para cada sub-área.

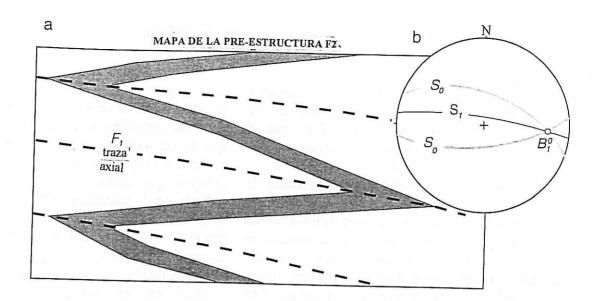
Para escoger límites de sub-área La Figura 39 ilustra un área de plegado repetido. La Figura 39a muestra un mapa geológico de la estructura después del primer evento del plegado, F_I . La estratificación (S_0) está deformada por pliegues verticales F_I con planos axiales y clivaje asociado S_I de orientación E-W. Las trazas axiales (las líneas de afloramiento de los planos axiales) sirve para dividir el área en un número de tiras alargadas que corresponden a los limbos individuales de los pliegues F_I ; un limbo tiene un buzamiento al norte, y el otro tiene un buzamiento al sur (vea la Fig. 39a).

Tras la segunda fase del plegado, el modelo del mapa podría ser el de la Fig. 39c. Las unidades litológicas están plegadas en forma de gancho que son modelos de interferencia resultantes de la superposición de los juegos de pliegues F_1 y F_2 . Los pliegues F_2 tienen un plano axial S_2 con rumbo N-S y las trazas axiales en combinación con los de F_1 dividen el área en sub-áreas; denominadas I, II. III y IV que son representativas de cada tipo de sub-área. Los límites de sub-áreas están definidos por las trazas axiales de los diferentes juegos de pliegues.

Dominios homogéneos con respecto a cada elemento estructural

 S_2 es constante a lo largo de la estructura en Fig. 39c. Se dice que el dominio que consiste en las áreas I + II + III + IV es homogéneo con respecto a S_2 . B^0_2 , las charnelas de los pliegues F_2 de la estratificación, tienen una orientación dada por la intersección de S_0 y S_2 (vea los estereogramas). Hay dos dominios con respecto a B^0_2 , uno compuesto por las áreas I + II; el otro por las áreas III + IV. Los dominios para los otros elementos son:

Elemento		Dominios homogéneos: sub- áreas
S_2 B^{I}_2	plano axial de F_2	1: 1 + II + III + IV
B^{I}_{2}	intersección de S ₁ y	S_2 1: $I + II + III + IV$
S°_2}	intersección de So y	S_2 2: $I + II$, $III + IV$
	plano axial de F_1	2: I + III, II + IV
B^0_I . L^0_I	intersección de So y	S_1 2: $I + II$, $III + IV$



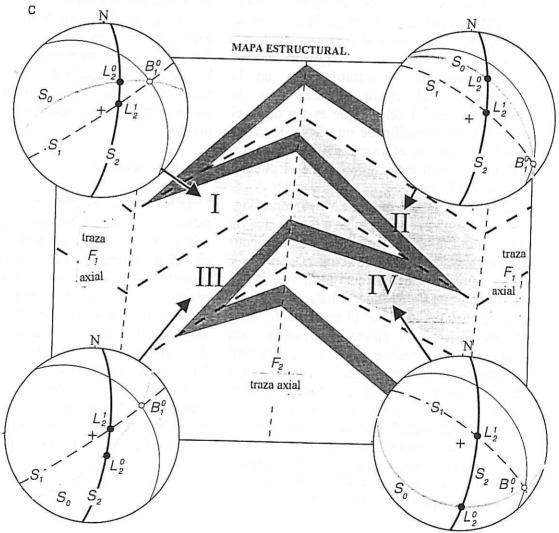


Fig. 39.

40 Ejemplo de análisis de pliegues. Área de Bristol

El área a 20 km al sur-oeste de Bristol, Inglaterra, proporciona un ejemplo de los usos de los métodos estereográficos con el propósito de interpretar las características

geométricas del plegado.

La primera fase involucra la inspección de los datos presentados en el mapa (Fig. 40a). El contraste de las direcciones de buzamiento en las partes norte y sur del área indican un plegamiento de los estratos en el Carbonífero Inferior. Se puede dibujar una línea límite entre los buzamientos norteños y del sur; éste es la traza axial, línea del afloramiento de la superficie axial. La convergencia y cierre de los límites litológicos al este son pues una evidencia añadida de un pliegue y los buzamientos de la estratificación en la proximidad del cierre sugieren que la inmersión (plunge) del pliegue es allí hacia el este. La combinación de un cierre de capas hacia el este en el mapa y una inmersión (plunge) hacia el este sugieren que el pliegue es una antiforma.

La traza axial en el mapa se ve curvada (Fig. 40a); esto podría ser debido a los efectos de la topografia en la traza del afloramiento remonta de la superficie axial o podría ser una expresión de una curvatura real de la superficie axial. El ligero balanceo de las direcciones de las capas al moverse de oeste a este favorece la última explicación. Esta curvatura hace posible que la geometría total sea no cilindrica, una situación que garantiza la división del área en sub- áreas para el análisis separado de los datos de orientación. Los polos de estratificación para las partes al este y al oeste del área han sido representados en estereogramas separados (Fig. 40b) y contorneados (Fig. 40c) usando el método explicado en la pág. 74.

Sub-área occidental

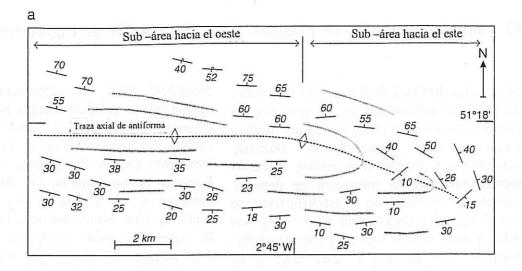
Los datos de estratificación muestran un agrupamiento bimodal muy definido de los polos, sugiriendo la presencia de limbos planares y un estilo chevron de plegado (vea

aiustar puede 24a). Se Fig. La inequívocamente un círculo máximo a estos gruesos agrupamientos, una indicación de que el plegado dentro de esta sub-área es cilindrico (Fig. 40c). Se requiere el circulo máximo que mejor ajuste como parte del método - π de calcular el eje del pliegue (vea pág. 44) el cual se encuentra que está orientado 0-094 i.e. se dice que el pliegue no se sumerge (non-plunging) (pág. 50).

La orientación de la superficie axial del pliegue en el sub-área occidental encuentra por el método explicado en la pág. 46. Tiene de dirección 094° y buza a 73° hacia el sur. Con esta base el pliegue se describiría como fuertemente inclinado (vea la pág. 50). El ángulo del inter-limbo se ha calculado que es (vea la pág. 46) de 83°, y por consiguiente el pliegue se clasifica como ahierto.

Sub-área oriental

Usando los mismos métodos, el plegado en el sub-área oriental se encuentra que es menos cilíndrico que en el oeste y el eje del pliegue algo diferente de orientación (de inmersión 11º hacia la dirección 102°); el sumergiendo (plunging) pliegue se está suavemente. La superficie axial es, como se dirección ligeramente sospechaba, de diferente a la del este (100°), aunque su buzamiento (79°) significa que la porción este del pliegue también se inclina fuertemente. Finalmente, la dispersión de los polos de la estratificación sugiere un ángulo de inter-limbo mayor (112°) para el pliegue en el este.



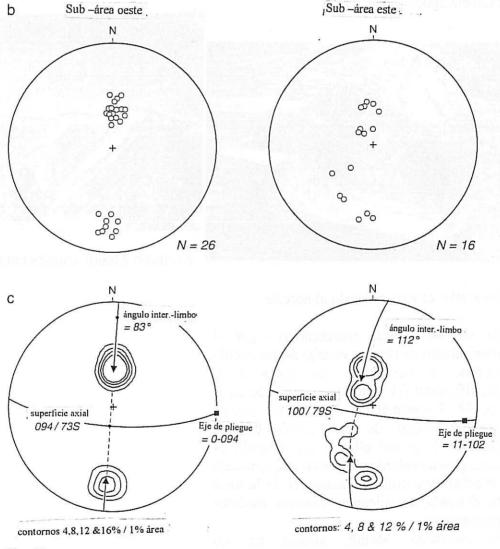


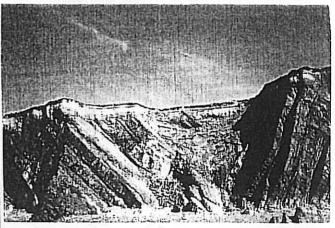
Fig. 40.

41 Análisis geométrico de pliegues. Ejemplos del SW de Inglaterra

En la costa de Cornish al norte de Boscastle, los pliegues asimétricos en las pizarras del Carbonífero están caracterizados por limbos extensos muy desarrollados buzando suavemente y limbos más cortos, buzando fuertemente (vea la fotografía de debajo). Cuando las medidas de la estratificación se transfieren al estereograma (Fig. 41a), los polos a estos limbos forman concentraciones distintas. Este modelo es característico de pliegues con limbos planares y de zonas de charnela agudos (pág. 49).

superficie axial. La orientación de estos rasgos puede ser determinada representando estereográficamente las medidas de los limbos del pliegue (vea la Fig. 41b). La inmersión (plunge) del pliegue, dada por la línea de intersección de los dos limbos, se sumerge a 8-272 (vea la pág. 26 para el método). Una estimación de la orientación de la superficie axial (095/70S) se obtiene encontrando el plano qué disecciona el ángulo del inter—limbo (vea la pág. 36).





Northcott Mouth: cámara miran al este.

Boscastle: cámara mirando al noreste.

Un eje de pliegue representativo por el afloramiento se obtiene encajando un círculo máximo a través de los polos a la estratificación (el método $-\pi$ explicado en la pág. 44). La normal a este círculo máximo da el eje de pliegue de mejor encaje. En este ejemplo el eje del pliegue así obtenido se sumerge suavemente al noreste y se empareja estrechamente con la orientación de la línea de charnela de pliegues menores medidos directamente.

En Northcott Mouth, afloran en los acantilados dos limbos de un pliegue de estilo angular (vea la fotografía de abajo). La línea de charnela del pliegue es disimulada por los derrubios de ladera, haciendo imposible la medida directa de la inmersión (plunge) o de la línea de charnela y de la

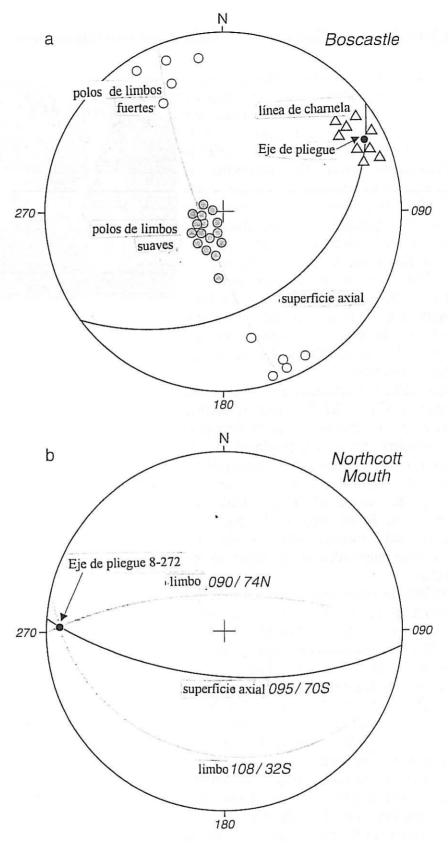


Fig. 41.

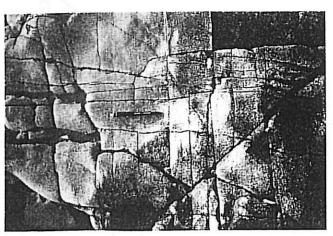
42 Ejemplo de análisis de diaclasado. Costa de Glamorgan

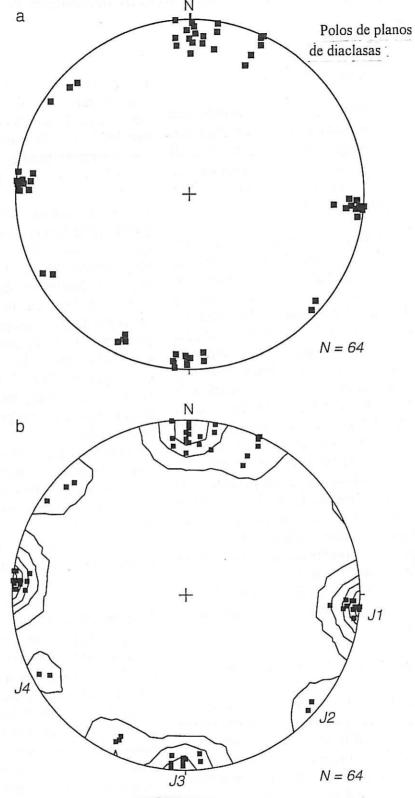
Las diaclasas son estructuras ubicuas, que se encuentran en abundancia en muchos afloramientos rocosos. Son fracturas, con frecuencia aproximadamente planares a lo largo de las cuales ha habido un mínimo desplazamiento lateral. Ellos raramente se dan al azar en su orientación sino que se dan en familias o juegos con una orientación común. Las diaclasas son estructuras que rompen la integridad de la masa rocosa y como tal tienen una influencia importante en propiedades tales como la deformación en cizalla y la permeabilidad. Estas propiedades probablemente varían en las diferentes direcciones de las rocas dependiendo del número y la orientación de los juegos de diaclasas presentes.

En las calizas Carboníferas en la Costa Heritage en Gales del Sur, están presentes varios juegos de diaclasas (vea la fotografía a la derecha). Estas son reveladas por la representación de las normales (polos) de los planos de diaclasas medidos en un estereograma equiareal (Fig. 42a). La concentración de los polos en las porciones externas del estereograma refleja los buzamientos empinados de los planes de las diaclasas.

El modelo de orientación preferente de las estructuras puede a veces ser reforzado por los contornos de densidad (explicado en la pág. 74). Se reconocen cuatro juegos, denominados de J₁ a J₄ en la Fig. 42b, con direcciones de orientación 005°, 045°, 095° y 150° respectivamente. Los juegos J₁ y J₃ se puede ver que son numéricamente dominantes, con la orientación preferente más fuerte antes mostrada.

Los análisis estereográficos claramente ayudan con el despliegue de los datos sobre la orientación de las diaclasas y la identificación de juegos, necesarios para la caracterización de la masa rocosa. Sin embargo, el estereograma no aclara el origen y las relaciones de edad de las diaclasas.





Contornos: 1,5,10,15,20% para el 1% del área

Fig. 42.

43 Aplicaciones geotécnicas. Estabilidad de las laderas rocosas

Análisis de la discontinuidad

Las discontinuidades son planos de debilidad en las masas rocosas creados por diaclasas, fallamiento, clivaje, etc., La presencia de discontinuidades tiene un efecto profundo en el total de la deformación de la masa rocosa y puede tener una fuerte influencia en términos de su estabilidad.

En una típica investigación de un lugar para una propuesta estructura de ingeniería (e.g. trinchera de carretera, túnel, presa) se atención a la prestará frecuencia continuidad de tales planos de debilidad. En suma, la orientación de las discontinuidades será medida en el sitio para evaluar el número de juegos de discontinuidades presente y sus direcciones. La orientación de los planos de debilidad puede afectar ampliamente las predicciones de estabilidad. Por ejemplo, un juego de diaclasas con sus direcciones orientadas perpendiculares a la cara de una trinchera propuesta para su corte puede que no influya de forma importante en la estabilidad de la excavación (Fig. 43b), aunque las claramente paralelas a la línea del corte pueden proporcionar potenciales superficies de deslizamiento (Fig. 43a. 43c). Durante el análisis de la discontinuidad en un lugar, la proyección estereográfica proporciona:

- 1 Una forma vital de visualizar los datos reunidos.
- 2 Unos medios convenientes para identificar el número de juegos de discontinuidad presentes y, con la ayuda de los contornos de densidad, sus orientaciones modales.
- 3 Una representación de las relaciones angulares que existen entre las direcciones dominantes de las discontinuidades y la estructura de ingeniería propuesta (discutido a continuación).

La proyección estereográfica proporciona una forma útil de visualización de la orientación de pendientes rocosas en relación con los juegos de discontinuidades presentes. Esta relación hace posible el evaluar el tipo de rotura que más probablemente pueda ocurrir.

Plano de rotura, por ejemplo (Fig. 43c), podría estar favorecido en situaciones en las aue dirección de un juego discontinuidades se dispusiera paralelo a la ladera y donde las discontinuidades bucen con la ladera en un ángulo que es lo suficientemente empinado como producir el deslizamiento, pero no más empinado que la ргоріа ladera. estereograma (Fig. 43d) muestra, para una ladera rocosa dada, las orientaciones de las discontinuidades que probablemente lleven a la rotura del plano.

La rotura del plano es improbable donde los juegos de diaclasas tienen una dirección qué es oblicua a la ladera rocosa. Dos juegos de diaclasas cortándose oblicuamente a la ladera pueden dar lugar a la rotura en cuña (Fig. 43e). De nuevo el estereograma puede dibujar las condiciones geométricas que conducen a este tipo de rotura. En este forma de rotura la dirección de deslizamiento viene determinada por la dirección de inmersión (plunge) de la línea de intersección. Esta puede ser determinada usando la construcción de la pág. 27. El ángulo de inmersión (plunge) de la línea de intersección determina la tendencia a resbalar. La inestabilidad está ocasionada por un ángulo de inclinación de la inmersión (plunge). La inmersión (plunge) no debe ser demasiado inclinada dado que otra limitación geométrica en este tipo de rotura es que la línea de intersección necesita aflorar dos veces; una vez en la ladera y de nuevo en la superficie por encima de la ladera (Fig. 43e. 43f).

Construcciones geométricas

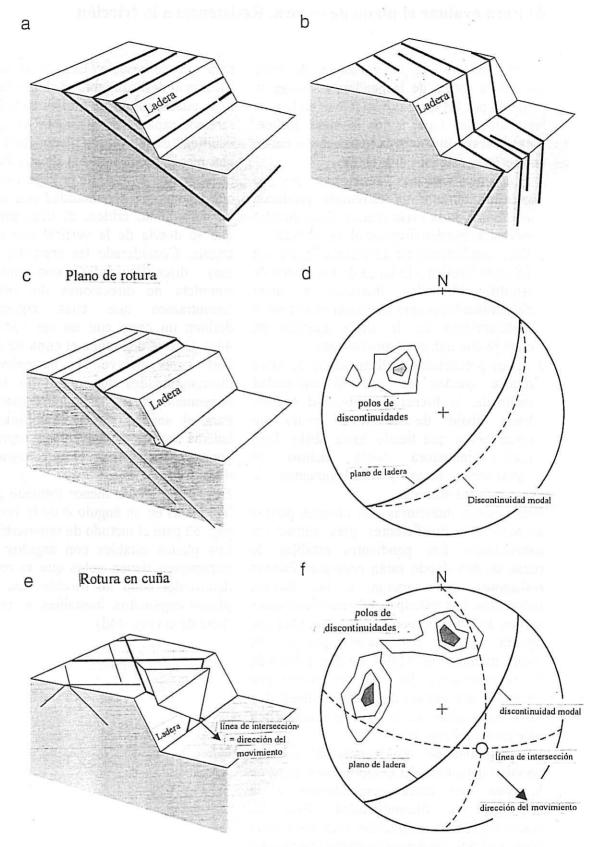


Fig. 43.

44 Para evaluar el plano de rotura. Resistencia a la fricción

El movimiento de un volumen de roca durante la rotura de la pendiente rocosa es inducido por las fuerzas que actúan en la roca las cuales dan lugar a que la masa deslice. Estas **fuerzas inductoras** (*driving forces*) tienen una serie de orígenes diferentes:

- 1 Las aceleraciones impuestas por la sacudida durante un terremoto producen una fuerza en la masa rocosa. Éstas fuerzas indirectas pueden disparar el movimiento.
- 2 Bajo condiciones de saturación la presión del agua freática a lo largo de los planos de estratificación, las fracturas y otras discontinuidades que limitaron el potencial deslizamiento de la masa ejercen un empuje que induce el movimiento.
- 3 Si los potenciales deslizamientos de masa rocosa quedan en una discontinuidad inclinada, la fuerza de gravedad tirando hacia abajo de la roca tendrá un componente que tiende hacia abajo. Esta fuerza inductora opera incluso en condiciones secas y en momentos de tranquilidad sísmica.

Estas fuerza inductoras son ubicuas pero a menudo son insuficientes para causar un movimiento. Las pendientes estables de rocas se dan donde están presentes fuerzas resistentes que superan a las fuerzas inductoras. Las principales fuerzas resistentes surgen de la fricción en la discontinuidad que planos como potenciales operan deslizamiento (Fig. 44a). La fricción depende de la naturaleza del material rocoso por encima y por debajo de la discontinuidad y de la naturaleza de la discontinuidad (que esté plana, rellena, etc.)

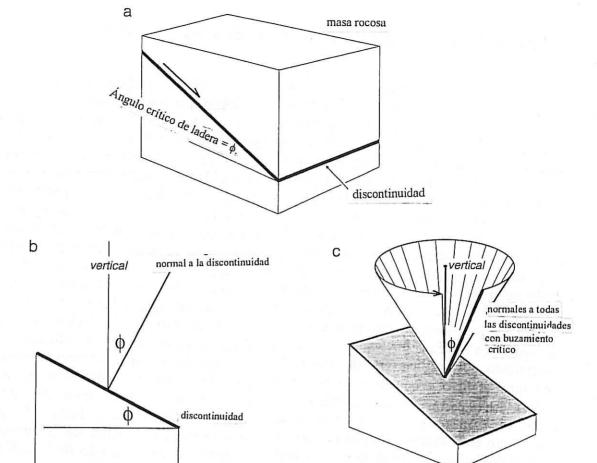
La magnitud de las fuerzas de fricción también dependen del componente - peso de la roca que actúa perpendicular a la superficie de discontinuidad. Para las discontinuidades empinadas esta resistencia friccional por consiguiente disminuye aunque se incremente la fuerza de la ladera hacia abajo en la masa que se desliza debido a la gravedad. Por consiguiente existe un ángulo crítico de la pendiente de la discontinuidad

para que se resbale. Éste es el ángulo de fricción al deslizamiento, ϕ (Fig. 44a).

Si se puede estimar el pertinente valor del ϕ , seremos capaces de distinguir los planos de debilidad estables y los planos inestables con una masa rocosa basados en sus ángulos de buzamiento. A partir de la Figura 44b vemos que cualquier discontinuidad con un ángulo de buzamiento crítico, ϕ , tiene una normal que se desvía de la vertical con el mismo ángulo. Considerado las normales de todas discontinuidades con una completa de direcciones de buzamiento. colectivamente ellas aue encontramos definen un cono con un eje vertical (Fig. 44c). Éste se denomina el cono de fricción . Este cono incluye las normales de las discontinuidades que posen un ángulo de buzamiento menor del ángulo crítico.

Para el análisis de la estabilidad de las laderas rocosas es conveniente representar el cono de fricción en el estereograma (Fig. 44d).

Este es un círculo menor formado por líneas inclinadas en un ángulo ϕ de la vertical (vea pág. 62 para el método de representar conos). Los planos estables con ángulos bajos de buzamiento tienen polos que se representan dentro del cono de fricción; los polos de planos empinados, inestables, se representan fuera de él (Fig. 44d).



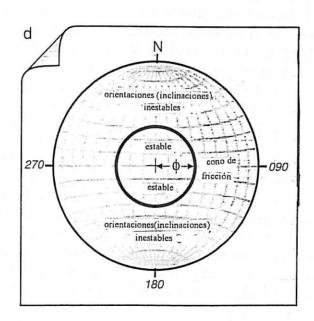


Fig. 44.

45 Para evaluar el plano de rotura. Resurgiendo (Daylighting)

En el capítulo anterior hemos examinado un requisito geométrico para la rotura plana en las pendientes rocosas: la discontinuidad basal tiene que buzar en un ángulo lo suficientemente empinado como para superar la fricción. Sin embargo, ésta no es la única condición para una rotura plana. La que estar tiene discontinuidad adecuadamente orientada para permitir la separación de la masa de la roca a resbalar y para su movimiento hacia fuera de la pendiente. Esta condición se describe como la necesidad de que el plano basal potencial resurja a su vez (daylights) en la pendiente.

La Figura 45a ilustra la dirección prevista del movimiento en un plano de debilidad. La roca suprayacente resbalará en la dirección del buzamiento del plano de debilidad. Para que se dé la rotura plana esta dirección de buzamiento en el sentido de la inclinación ha de ser dirigida hacia fuera de la superficie de pendiente. En la Figura 45b, discontinuidad con dirección de buzamiento en el sentido de la inclinación denominada 2 no dará lugar al movimiento porque está impedido de resbalar en la dirección opuesta a la superficie de la pendiente debido a la falta de espacio. La dirección 1, por otro lado, corresponde al buzamiento, en el sentido de la inclinación, de un plano que buza hacia fuera de la superficie de la pendiente, i.e. un plano que encuentra la condición de resurgir (daylighting) como plano

Empleamos al estereograma para evaluar la condición de resurgir de cualquiera plano de debilidad en particular. En el estereograma definimos la orientación tomada en el campo de planos que resurgen. Esta zona de resurgimiento está limitada por una aureola de resurgimientos (daylight envelope) en el estereograma, una curva constituida por los polos de los planos que son marginales en términos de la condición de resurgir. Las direcciones 3 y 4 en la Figura 45b son ejemplos de direcciones de buzamiento en el

sentido de la inclinación de planos de debilidad que son transición entre el resurgir y el no resurgir. Ellos ni buzan fuera de la pendiente ni en la pendiente; son planos de debilidad con direcciones de buzamiento en el sentido de la inclinación paralelas al plano de la superficie de la pendiente. Por estereograma el consiguiente en direcciones de buzamiento en el sentido de la inclinación se representan como puntos que permanecen en el círculo máximo de la pendiente (Fig. 45c). A partir de la Figura 45a está claro que la dirección de buzamiento en el sentido de la inclinación de una es perpendicular, discontinuidad sumerge (plunge) en la dirección opuesta, al polo de la discontinuidad. Por consiguiente podemos localizar el polo de cualquiera plano contando hacia fuera 90° por el estereograma a lo largo de la dirección de buzamiento en el sentido de la inclinación. Esto se ilustra para la dirección 3 en la figura 45c. Repetimos esto para la dirección 4 y las demás direcciones de buzamiento en el sentido de la inclinación que quedan en el círculo máximo de la pendiente (Fig. 45d); esta serie de polos define la aureola de los resurgimientos. Cualquiera plano que se represente dentro de la aureola es uno que resurge en la pendiente y reúne la condición de resurgimiento como plano de rotura.

ambas simultáneamente Considerando condiciones como plano de rotura (fricción y resurgimiento), superponemos el cono de fricción y la aureola de resurgimiento. El área (obscurecida en la Fig. 45e) que queda fuera del cono de fricción y dentro de la aureola de resurgimiento contiene los polos de los planos de debilidad que podrían potencialmente inducir a la rotura plana de la

pendiente.

Una inspección de las discontinuidades en el orientaciones tales si revelarán peligrosas están presentes en la masa rocosa.

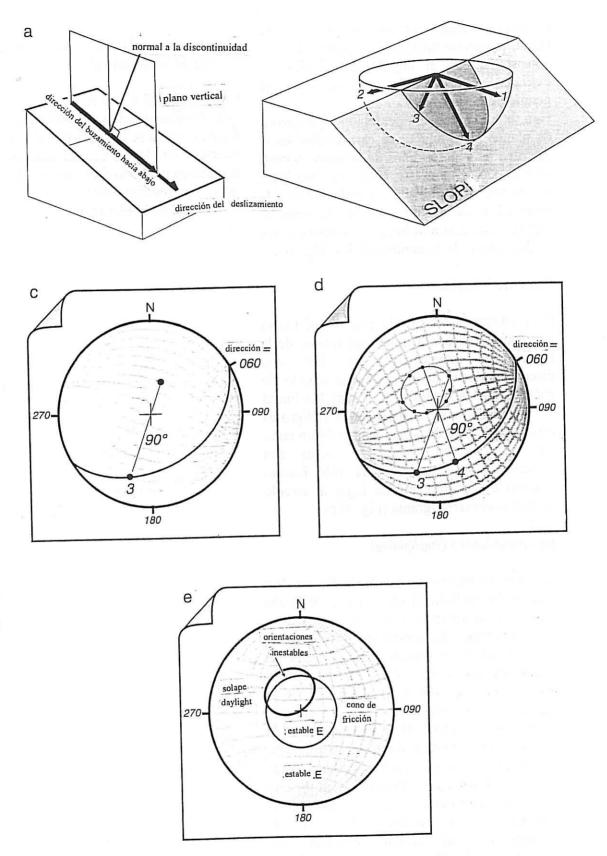


Fig. 45.

46 Para evaluar la rotura en cuña

La cinemática de rotura en cuña, como rotura plana, puede ser analizada a partir de datos consistentes en el ángulo de fricción de deslizamiento, ϕ , y la orientación de la pendiente de la roca.

Con rotura plana, las orientaciones peligrosas de planos de debilidad se cartografían en el estereograma en términos de su plano normal (polos). Como contraste, cuando se considera la rotura en cuña consideramos la orientación de la dirección de la cuña al resbalar, paralela a la línea de la intersección de dos juegos de discontinuidades (Fig. 46a).

Cono de fricción

Para superar la resistencia a la fricción bajo condiciones secas, la inmersión (plunge) de la línea de intersección de las dos discontinuidades debe exceder al ángulo de fricción por deslizamiento. Todas las líneas de intersección en disposiciones peligrosas (las húmedas) se disponen dentro de un cono que consiste en todas las líneas con inmersión (plunge) igual a ϕ (Fig. 46b). Éste es el cono de fricción que da lugar al círculo menor en el estereograma (Fig. 46c).

Resurgimientos (Daylighting)

La línea de intersección 1 en la Figura 46d permite la posibilidad de la rotura en cuña porque se sumerge (plunge) (o al menos tiene un componente de inmersión -plunge-) en la dirección de la pendiente natural y hay un ángulo de inmersión -plunge- menor que el buzamiento aparente de la pendiente en la dirección de la inmersión -plunge-. La línea de intersección 2 (Fig. 46d) no permitiría la rotura en cuña porque tiene un componente de inmersión -plunge- en la pendiente. Las líneas 3 y 4 son casos intermedios en los que la línea de intersección está en el plano de la pendiente. Рог consiguiente. estereograma, el círculo máximo representa el plano de la pendiente corresponde a la aureola de resurgimiento (daylight envelope). Las líneas de intersección que se representan en el área creciente

(sombreada) en la Figura 46e están dentro de la zona de resurgimiento (daylight zone).

Cuando fricción y resurgimiento limitados son considerados a la vez encontramos que la rotura en cuña se hace posible si la línea de la intersección de un par de discontinuidades cae dentro del cono de fricción y dentro de la zona de resurgimiento, i.e. en la región sombreada de la Figura 46f.

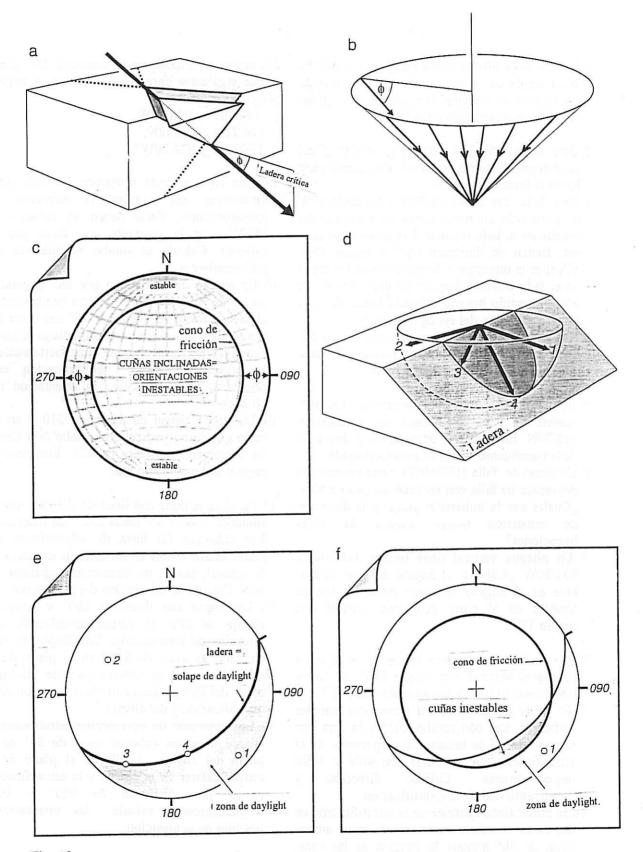


Fig. 46.

- 1 Gire la línea 30-060 sobre un eje horizontal E-W, a través de un ángulo de 100° en sentido antihorario de rotación mirando al este. ¿Cual es la nueva orientación de la línea?
- 2 Gire la línea 50-340 sobre el eje 0-020. ¿Cuál es el ángulo mínimo de rotación necesario para hacer la línea horizontal?
- 3 Una falla con dirección 030° y buzando 60W ha permitido un movimiento de rotatorio del bloque en su lado oriental. Las capas en el lado este tienen de dirección 067° y buzan 35N. ¿Cuál es la dirección y buzamiento de las capas en el lado oriental después de una rotación de 40° en sentido horario mirando hacia abajo la inmersión (plunge) del eje de rotación?
- 4 Una charnela de pliegue se sumerge (plunge) 58° hacia 212° y otra se sumerge (plunge) 62° hacia 110°. ¿Cuál es el ángulo entre ellas?
- 5 una falla lamentan con orientación 130/30N cambia de sitio una capa con orientación 118/70N. Encuentre la buzamiento y dirección de la buzamiento de la línea corte-apagada.
- 6 Un plano de falla (150/50W) tiene lineaciones del espejo de falla con un cabeceo (pitch) a 60N. ¿Cuáles son la inmersión (plunge) y la dirección de inmersión (plunge direction) de estas lineaciones?
- 7 Un pliegue vertical tiene limbos 180/60E y 031/80W. ¿Calcule el ángulo del inter-limbo? Que es el ángulo aparente entre los limbos visibles en el corte geológico vertical con rumbo 170°.
- 8 ¿Cuál es el buzamiento aparente, en al corte geológico vertical con rumbo 040°, de capas con dirección 020° y buzamiento real 60E?
- 9 El frente de una cantera tienen dos paredes verticales, una con rumbo 002° y la otra con rumbo 135°. Los buzamientos aparentes de la estratificación en las caras son 40N y 30SE respectivamente. Calcule dirección y buzamiento real de la estratificación.
- 10 El buzamiento aparente de la estratificación en dos caras verticales de la cantera es en ambos casos de 30° aunque lo rumbos de las caras difieren unos 60°. ¿Cuáles son los dos posibles ángulos para el buzamiento real?
- 11 Al inspeccionar un diaclasado se ha decidido asignar sólo dos diaclasas al mismo juego si

difieren en su orientación en menos de 25°. ¿Cual de los siguientes pares se pondría en el mismo juego.

180/70W y 020/60W; 066/71N y 058/42N; 137/14W y 032/20W?

- 12 Una capa volcada orientada 125/60N tiene estructuras que indican la dirección de paleocorrientes. Éstas tienen un cabeceo de 60NW. con la corriente que fluye por el cabeceo. Calcule el rumbo original de las paleocorrientes.
- 13 Un testigo de un sondeo con una inmersión (plunge) de 60° hacia 165° muestra que la normal al clivaje forma un ángulo de 50° con el eje del testigo. En un afloramiento superficial el plano del clivaje se puede ver que buza fuertemente y la lineación clivaje estratificación está orientada 2-029. Calcule la orientación del clivaje.
- 14 Las capas tienen de dirección 210 y en un corte geológico vertical con rumbo N-S tienen un buzamiento aparente de 40S. Encuentre el ángulo de buzamiento real.
- 15 Un pliegue tiene una línea de charnela que se sumerge (plunge) 46º hacia 253º. La traza axial Los cabeceos (la línea de afloramiento del plano axial), visible en un corte de carretera N-S vertical, tienen un buzamiento aparente de 70N. Calcule la orientación del plano axial.
- 16 Las capas con dirección 230° y dirección clivaje de 170° se cortan produciendo una lineación de intersección. Esta lineación tiene un cabeceo (pitch) de 82W en el plano de la estratificación y un cabeceo (pitch) de 44S en el plano del clivaje. Encuentre la orientación de la estratificación y del clivaje.
- 17 Una lineación de intersección estratificaciónclivaje tiene un cabeceo (pitch) de 30° en el plano del clivaje y 50° en el plano de la estratificación. Si el clivaje y la estratificación tienen una dirección de 020° y 060° respectivamente, calcule las orientaciones posibles de la lineación.
- 18 Un dique vertical con rumbo 065° sufre una rotación durante un plegamiento. El eje sobre el que tiene lugar la rotación es horizontal y con rumbo 120°. Calcule la nueva orientación del

dique tras una rotación de 50° en el sentido de las agujas del reloj (de cara al sur-este).

- 19 Dos diques con orientaciones 340/70E y 040/60SE cortan discordantemente el bandeado de neises con una disposición 140/58NE. ¿Cual de los diques muestra la discordancia mayor con los neises?
- 20 Irregularidades a pequeña escala en la superficie de una discontinuidad dan que pensar que su orientación medida en el afloramiento puede diferir en 28° de su verdadera orientación a gran escala. Una medida de campo de la superficie es 079/40S. Muestre las posibles orientaciones para la discordancia como polos en el estereograma.
- 21 La estratificación en las calizas Carboníferas tiene una dirección 227° y buza 60NW. Una trinchera vertical de ferrocarril cortando a través de estas rocas muestra un buzamiento aparente de la estratificación de 44°. ¿Cuáles son las posibles orientaciones del ferrocarril?
- 22 Un pliegue tiene una línea de charnela que se sumerge (plunge) 40° hacia 300°. En un mapa de esta estructura, la traza del plano axial del pliegue tiene un rumbo de 088°. Calcule la dirección y el buzamiento del plano axial.
- 23 Una línea con una inmersión (plunge) 30-120 está sometida a dos rotaciones sucesivas:
 - (i) sobre un eje vertical, rodando 60° en el sentido de las agujas del reloj (mirando hacia abajo).
 - (ii) sobre un eje horizontal (0-220), girando 100° en sentido antihorario (mirando al suroeste).
 - (a) Determine la orientación final de la línea tras las dos rotaciones.
 - (b) Repita la construcción, esta vez haciendo las rotaciones en orden inverso. ¿Qué concluye del resultado?
- 25 Dos limbos de un pliegue chevrón (A y B) tienen las siguientes orientaciones:

Limbo A = 120/40SW;

Limbo B = 070/60NW.

Determine

- (a) la inmersión (plunge) de la línea de chamela del pliegue.
- (b) el cabeceo (pitch) de la línea de charnela en el limbo A.
- (c) el cabeceo (pitch) de la línea de charnela en el limbo B.
- 25 Un cuerpo mineralizado en forma de pipe se da a lo largo de la intersección de una veta (060/50NW) y un dique (125/60N). Calcule el ángulo y dirección de la inmersión del cuerpo mineralizado, el cabeceo (pitch) del cuerpo

mineralizado en la veta y el cabeceo (pitch) del cuerpo mineralizado en el dique.

- 26 En el análisis de la estabilidad de la ladera de un corte para una carretera se calcula que la discontinuidad potencialmente más peligrosa tiene una orientación 070/55E. ¿Cual de los siguientes planos de diaclasado medidos está más próximo a esa orientación:
- (a) 096/50S;
- (b) 099/70S;
- (c) 046/26SE?
- 27 Se observa un pliegue en sección con caras de diaclasas en un afloramiento. Las trazas de la superficie axial del pliegue son 22-264 y 20-168. Determine la orientación de la superficie axial.
- 28 Las medidas de planos de estratificación en un pliegue importante son como sigue:

228/72SE 238/56SE 270/36S 293/32S 340/35SW 003/46W 018/62W 030/79NW

Calcule la dirección y el valor de la inmersión (plunge) del eje del pliegue. Dado que la traza de la superficie axial en una superficie horizontal tiene de rumbo 076-256, determine la orientación de la superficie axial.

29 La orientación de "ripple marcks" (marcas de marea) es de 45-074 en plano de estratificación 040/60SE. Determine el rumbo original de las "ripple marcks". Establezca la asunción principal hecha en el método de restauración.

30 En un plano de estratificación invertida 310/70NE, los "groove cast" (molde de surco) tienen una inmersión (plunge) de 54° hacia 341°. Determine el rumbo original de las ondas.

- 31 Los ejes aparentes de alargamiento de los guijarros en un conglomerado deformado tienen una orientación 49-139 medida en un plano de afloramiento 040/50SE. En otro plano de orientación 120/50SW la inmersión (plunge) axial aparente es 46-238. Determine el verdadero eje de alargamiento de los guijarros asumiendo que éstos tienen una forma alargada (como de puro).
- 32 Dos fallas conjugadas tienen las orientaciones siguientes: 046/50SE, 147/40NE. Calcule las orientaciones de los ejes de deformación principales (σ_1 , σ_2 y σ_3).
- 33 Una falla rotacional 040/50SE corta una secuencia de capas horizontales. El bloque sureste, labio elevado es girado en tijera hacia abajo hacia el sur-oeste mediante un ángulo de 30°. La rotación involucrada se produjo sobre un eje que es normal al plano de falla. Determine la dirección y buzamiento de las capas en el bloque levantado.

- 34 Se dan lineaciones del espejo de falla con rumbo 074° en una falla 120/50N. Determine la inmersión (plunge) de estas lineaciones y su cabeceo (pitch) en el plano de la falla.
- 35 Juegos de discontinuidades se piensa que tienen orientaciones de 290/40N y 036/30SE. ¿Si se produce roturas en cuña lo que implica el deslizamiento simultáneo en ambos juegos, cual será la dirección de este deslizamiento?
- 36 El frente de una cantera cuya orientación es 030/60SE está cortado por dos juegos de diaclasas: el juego A 050/70SE (i.e. buzamiento = 70, dirección de buzamiento = 140) y el juego B 160/70NE (buzamiento = 70, dirección de buzamiento = 70), Represente estos rasgos en un estereograma y discuta la posibilidad de la rotura en cuña.
- 37 El frente de arenisca de una trinchera de ferrocarril tiene una ladera de 70° y su pendiente una orientación de 150°. Un estudio estructural del sitio revela que la estratificación de la arenisca constituye importantes planos de debilidad. La disposición de la estratificación es 010/50NE y el ángulo de fricción es de 30°. Indique el tipo de rotura que puede ocurrir y muestre sus razones.
- 38 Un talud rocoso con un ángulo de pendiente de 60° e inclinándose hacia la dirección 052° es cortado por dos juegos de diaclasas (juego A y juego B) con orientaciones 124/50NE (i.e. buzamiento = 50, dirección de buzamiento = 034) y 036/50SE (buzamiento = 50, dirección de buzamiento = 126) respectivamente. Asumiendo un ángulo de fricción de 33°, discuta el posible modo de rotura del talud

rocoso.

48 Soluciones a los ejercicios

p.24

- 1 140° y 280°
- 2 20-340
- 3 Cuando la estructura linear cae en un plano vertical o cuando cabecea (pitch) = 0.
- 4 40°
- 5 32°

p.26

- 1 15-047
- 2 62-100
- 3 20-231 (a) 50W (b) 23S
- 4 El rumbo de línea de charnela es 126°, i.e. inmersión (plunge) en dirección 126° o 306°.

p.28

1 134/64N

p.32

1 (a) 52° (b) 40° (c) 88°

p.52

1 Un pliegue fuertemente inclinado, con fuerte inmersión (plunging). Es un pliegue tumbado.

p.70

1 (b) 40-160

pp. 88 ff.

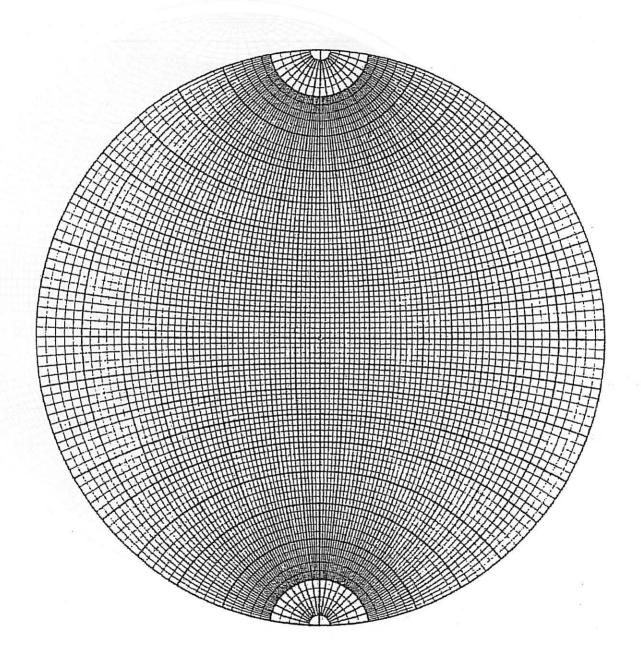
- 1 16-113
- 2 61°
- 3 023/25N
- 4 45N
- 5 8-105
- 6 41-282
- 7 50°,88°
- 8 29°

9 154/61E

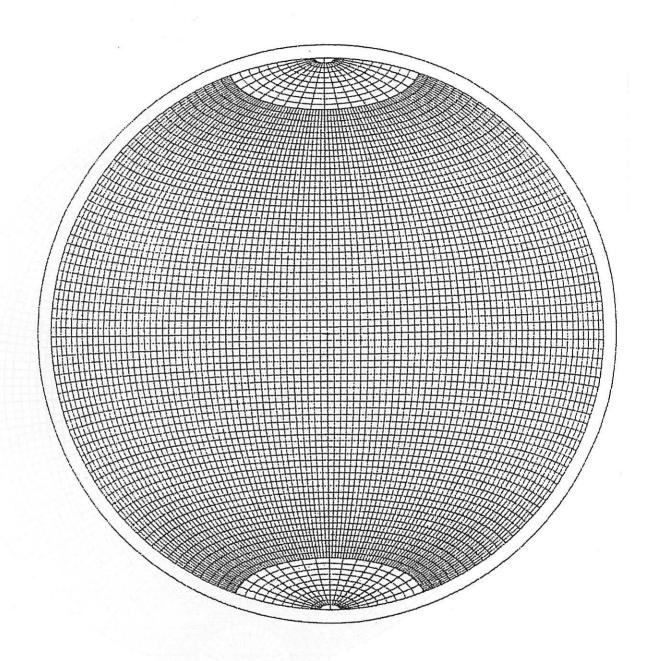
- 10 34° y 50°
- 11 primero y terceros pares.
- 12 065°
- 13 030/68W
- 14 030/60E
- 15 055/73N
- 16 Estratificación 230/41S; clivaje 170/68E.
- 17 32-017 y 32-197
- 18 054/63N
- 19 el segundo dique
- 21 014-194 y 080-260
- 22 088/58N
- 23 (a) 27-259. Si la rotación se aplica en orden inverso resulta 49-076. Por consiguiente el orden afecta el resultado final.
- 24 (a) 31-270 (b) 43° (c) 37°
- 25 49-347, 80E, 60W
- 26 Los ángulos son (a) 22°, (b) 28° y (c) 32°. i.e. la primera diaclasa es más cercana.
- 27 130/30S
- 28 30-217. 076/44S
- 29 093°. Asuma que las capas han girado sobre la dirección.
 - 30 070-250
 - 31 70-297
 - 32 $\sigma_1 = 8-181$. $\sigma_2 = 36-085$. $\sigma_3 = 53-281$.
 - 33 123/24S
 - 34 40°, 58°E
 - 35 079°
 - 36 no es posible la rotura en cuña; la línea de intersección de los juegos de diaclasas A y B no resurge en la pendiente.

- 37 Plano de rotura a lo largo de la estratificación. Razones: el polo de la estratificación cae en la región del resurgimiento (daylighting) del estereograma y también cae fuera del cono de fricción.
- 38 El plano de rotura en el juego B de diaclasas es imposible porque estas diaclasas no resurgen (daylight). El plano de rotura en A y la rotura en cuña, ambos, son cinemáticamente posibles, aunque el anterior es más probable porque el buzamiento del juego A es mas empinado que la inmersión (plunge) de la línea de intersección de los juegos A y B.

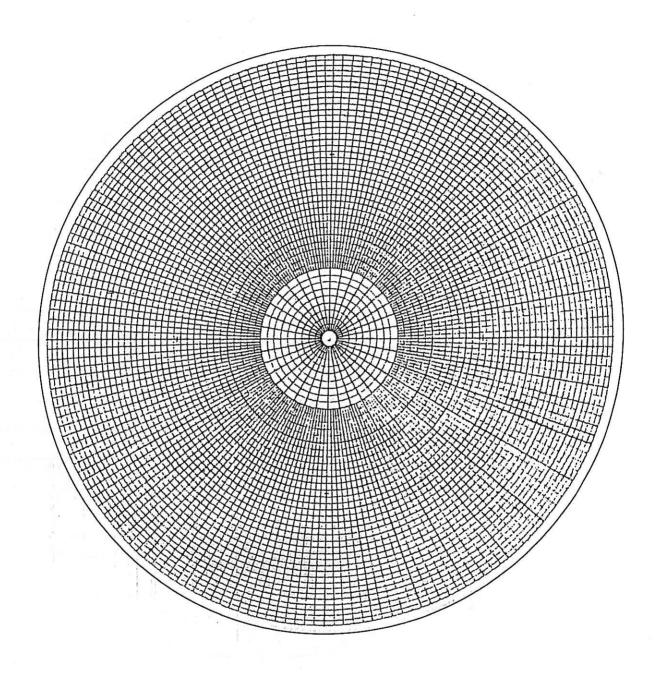
Apéndice 1 Falsilla stereográfica ecuatorial (Wulff)



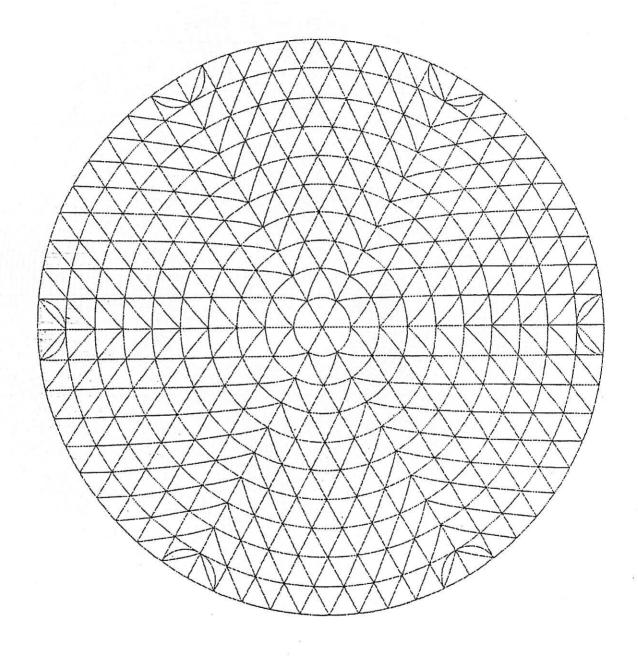
Apéndice 2 Falsilla ecuatorial equiareal



Apéndice 3 Falsilla polar equiareal

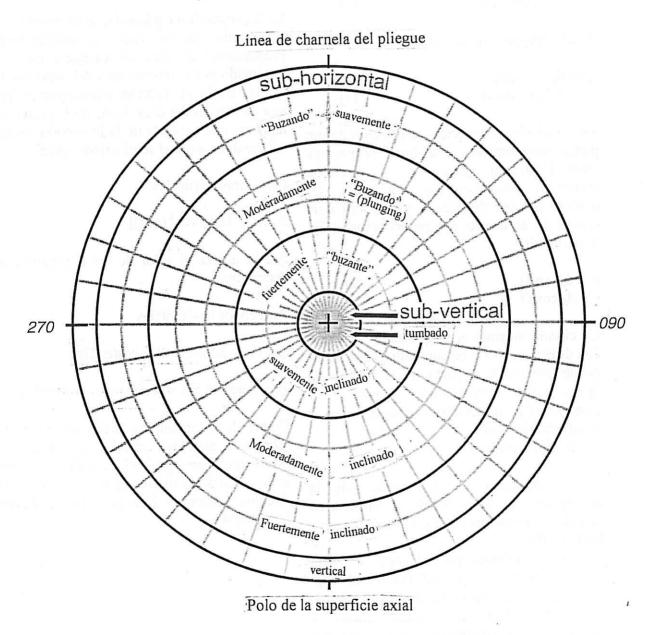


Apéndice 4 Falsilla de conteo Kalsbeek



Apéndice 5 Gráfico de clasificación para orientaciones de pliegues

El estereograma equiareal del polo a la superficie axial del pliegue y la línea de charnela se ponen encima del mapa para clasificar el pliegue en términos de orientación (vea p.50).



Apéndice 6 algunas formulas útiles

Una dirección con una inmersión (plumge) de p dada se representa a la distancia (d_p) desde el centro del estereograma que depende de p y el radio del círculo primitivo, d_0 (que es la distancia correspondiente cuando p = 0).

Para la proyección estereográfica (Fig. A6a),

$$d_p = d_0 \tan(\pi/4 - p/2),$$

$$p = \pi/2 - 2 \tan^{-1}(d_p/d_0).$$
(1)

Para la proyección equiareal (Fig. A6b).

$$dp = d_0 \quad 1 - \sin p$$

$$p = \sin^{-1}[1 - (d_p/d_0^2)].$$
(3)

Para cualquier proyección, la posición de un punto representando una línea proyectada (con inmersión (plunge) p y dirección inmersión (plunge direction) D) puede ser descrita por coordenadas x, y referidas a un origen en el centro del estereograma (Fig. A6c), donde

$$x = d_p \operatorname{sen} D,$$

$$y = d_p \operatorname{cos} D.$$
(5)
(6)

Un círculo máximo que representa un plano con dirección N-S y buzamiento δ (Fig. A6d) puede construirse a partir de la familia de líneas cuyas inmersiones (plunge) p y direcciones de inmersiones (plunge directions) D están referidos por

$$p = tan^{-1}(tan \delta sinD). (7)$$

Las coordenadas de los puntos de la proyección de estas línea se encuentran usando las ecuaciones (1) o (3) seguidas por las (5) y (6).

Un círculo pequeño para el cono con semi ángulo apical α y eje N-S horizontal (Fig. A6e) puede construirse similarmente a partir de líneas cuyas inmersiones (plunge) y direcciones de inmersión (plunge directions) están mutuamente relacionadas por

$$p = \cos^{-1}(\cos \alpha/\cos D) \tag{8}$$

A rasgo linear representado a cierta distancia del centro del estereograma representa una inmersión (plunge) de p_s en la proyección estereográfica y la inmersión (plunge) de p_e en la proyección equiareal. Estos dos ángulos están relacionados por:

$$\operatorname{sen} p_e = 1 - \left[(1 - \operatorname{sen} p_s) / \cos p_s \right]^2$$

En la proyección equiareal el área incluida en el círculo menor (A_e) es directamente proporcional al área del casquete esférico producido por la intersección del cono con la esfera. En la proyección estereográfica hay una distorsión del área A_s/A_e de los círculos menores que depende de la inmersión (plunge) del eje del cono y el semi ángulo apical.

Para conos verticales:

$$A_s/A_e = 1/2[2 \cos^2(\alpha/2)]$$

qué se acerca al valor de 0.5 a medida que disminuye α .

Para conos horizontales:

$$A_s / A_e = 2/[sen(\alpha/2) + cos(\alpha/2)]^2$$
.

qué se acerca a 2 a medida que α disminuye.

Conos de orientaciones diferentes pero de idéntico ángulo apical se proyecta estereográficamente dando círculos menores incluyendo áreas diferentes (Fig. A6c). Estos círculos varían en área por encima de un factor de 4.

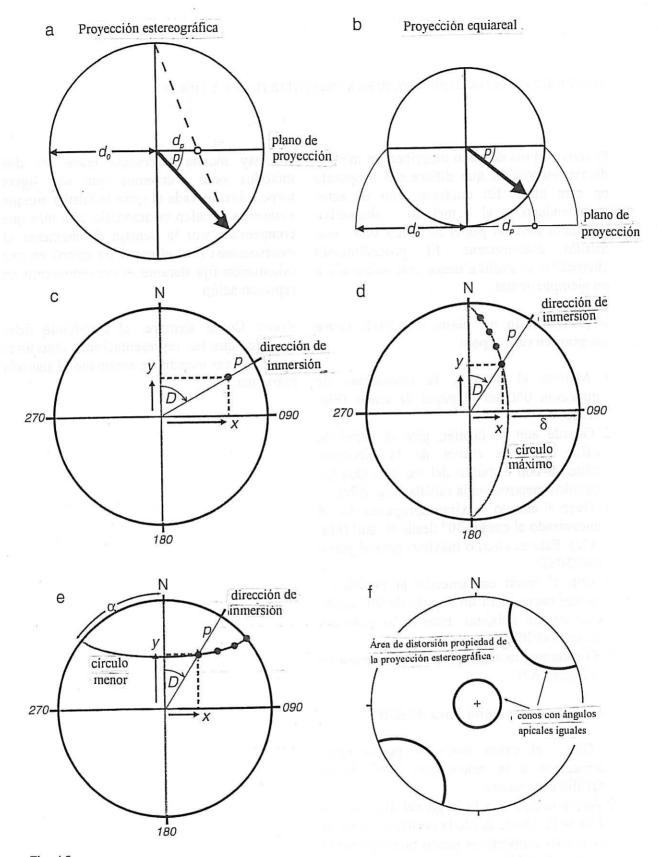


Fig. A6.

Diversos libros de texto describen un método de representación que difiere del propuesto en este libro. En contraste con el antes recomendado, el método alternativo involucra girar el papel de calco sobre una falsilla estacionaria. El procedimiento alternativo se explica mejor con referencia a un ejemplo actual.

Representando un plano 060/30SE como un gran círculo y polo

- 1 Marque el norte y la orientación de dirección 060 en el papel de calco (Fig. A7d).
- 2 Guarde aún la falsilla, gire el papel de calco hasta la marca de la dirección alineada con el punto del eje de todos los círculos menores en la falsilla (Fig. A7e).
- 3 Trace el círculo máximo apropiado. i.e. el encontrado al contar 30° desde el 'sur' (Fig. A7e). Éste es círculo máximo para el plano 060/30SE.
- 4 Con el calco conteniendo la posición, cuente hacia fuera un ángulo de 90° desde este círculo máximo. Esto da el polo del plano 060/30SE.
- 5 El estereograma completado se muestra en la Figura A7f.

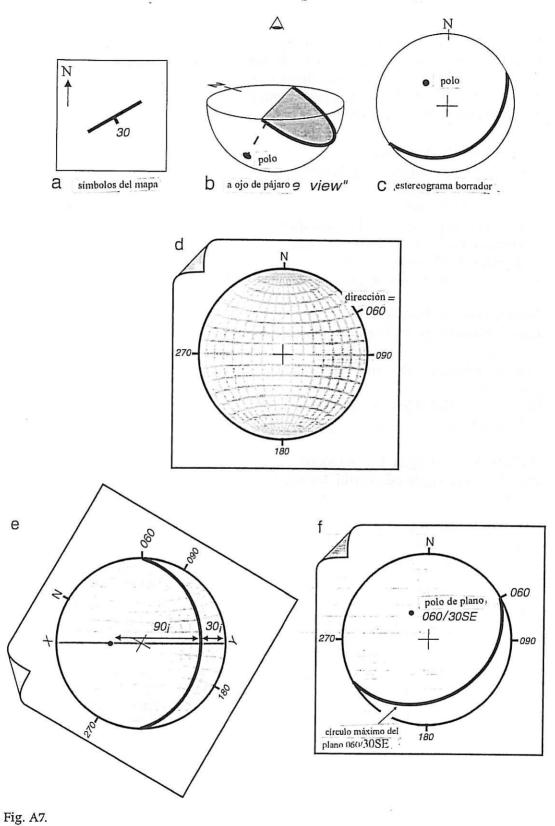
Para representar una línea 30-050

- 1 Gire el calco hasta el punto norte adyacente a la orientación 050° en la falsilla subyacente.
- 2 Ahora mida 30° a lo largo del diámetro 0-180 de la falsilla desde la periferia a 0 hacia el centro e inserte el punto que representa la línea 30-050.
- 3 Restaure el trazado a su lineación correcta.

No hay mucha diferencia entre los dos métodos pero creemos que una ligera torpeza involucrada al girar la falsilla aunque mantenga el calco estacionario está más que compensada por la ventaja de mantener el estereograma (i.e. el papel de calco) en una orientación fija durante el procedimiento de representación.

Aviso: Como siempre, el estudiante debe verificar que las representaciones anteriores son correctas usando de antemano el método aproximado.

Para representar el plano 060/30SE



Apéndice 7 Método alternativo para representar planos y líneas

Disponibilidad de programas de ordenador para representar estereogramas

Existen diversos programas de ordenador para la representación y el análisis de los datos de orientación. Esta lista da algunos de programas más populares, autores, nombre del programa y dirección website.

Allmendiger. R. *Stereonet* ftp://www.geo.comell.edu/pub/rwa/

Duyster. J. Stereo-nett http://homepage.ruhr-unir-bochum.de/ Johannes.P.Duyster/stereo/stereo1.htm Holcombe. R. Georient http://wwww.earthsciences.uq.edu.au/~rodh/software/

Mancktelow. N. Stereoplot http://eurasia.ethz.ch/~neil/stereoplot.html

van Everdingen, D. and van Gool. J. *Quickplot* http://www.vy12.dial.pipex.com/products/dve/quickplot.html

Walters, M., y Morgan, L., Stereopro http://frespace.virgin.net/martin. walters /

Lecturas complementarias

- Badgley, P. C., 1959. Structural Methods for the Exploration Geologist. New York: Harper.
- Davis, G. H., and Reynolds, S. J., 1996. Structural Geology of Rocks and Regions, 2nd edition. New York: John Wiley.
- Goodman, R. E., 1980. Introduction to Rock Mechanics. New York: John Wiley.
- Hobbs, B. E., Means, W. D., and Williams, P. F., 1976. An Outline of Structural Geology. New York: John Wiley.
- Hoek, E., and Bray, J. W., 1981. Rock Slope Engineering, 3rd edition. London: E. & F. N. Spon.
- John, K. W., 1968. Graphical stability analysis of slopes in jointed rocks. Proceedings of the American Society of Civil Engineers, 497–526.
- Marshak, S., and Mitra, G., 1988. Basic Methods of Structural Geology. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall.
- McClay, K. R., 1987. The Mapping of Geological Structures. Milton Keynes, Bucks: Open University Press.
- Phillips, F. C., 1971. The Use of the Stereographic Projection in Structural Geology, 3rd edition. London: Edward Arnold.
- Priest, S. D., 1985. Hemispherical Projection Methods in Rock Mechanics. London: Allen & Unwin.
- Priest, S. D., 1993. Discontinuity Analysis for Rock Engineering. London: Chapman & Hall.
- Ragan, D. M., 1985. Structural Geology: An Introduction to Geometrical Techniques, 3rd edition. New York: John Wiley.
- Ramsay, J. G., and Huber, M. I., 1985. The Techniques of Modern Structural Geology. London: Academic Press.
- Richards, L. R., and Atherton, D., 1987. Stability of slopes in rocks. In Bell, F. G. (editor), Ground Engineer's Reference Book. London: Butterworth.
- Rowland, S. M., and Duebendorfer, E. M., 1994. Structural Analysis and Synthesis: a Laboratory Course in Structural Geology, 2nd edition. Oxford: Blackwell.
- Turner, F. J., and Weiss, L. E., 1963. Structural Analysis of Metamorphic Tectonites. New York: McGraw-Hill.

- van Everdingen, D. A., van Gool, J. A. M. and Vissers, R. L. M., 1992. Quickplot: a microcomputer-based program for the processing of orientation data. *Computers and Geosciences*, 18, 183–287.
- Wyllie, D. C., 1999. Foundations on Rock, 2nd edition. London: E. & F. N. Spon.

ÍNDICE

agrupamiento, de polos 48,	cuaderno de campo 10
alineación aparente 38	curvatura 48
Allmendiger, R. 108	
análisis de la estabilidad 2	datos de dirección 2
ángulo de buzamiento aparente 30	datos del sondeo 72
de discordancia 34	densidades de direcciones representadas 40
de fricción 88	diaclasa 2,3, 5, 84
de fricción 92	diagrama de roseta 10
de inmersión 8	dip: ver buzamiento
de rotación 64, 72	dirección 4, 5, 8, 10
diedro 34	de corriente 6
entre dos líneas 18, 32	de buzamiento 4
entre dos planos 34	
inter-limbos 10, 44, 46, 82	de inmersión (plunge direction) 8, 22
antiforma 54	de la brújula 4 del buzamiento en el sentido de la inclinación 90
aplicaciones geotécnicas 86	salto en 58
asimetría 48	direcciones al azar 40
	discontinuidad 2, 56, 86, 88
Bahía West Angle 10	discordancia 2, 56
bandeado neísico 2, 3,	superficie de 66
ígneo 2	•
bisector agudo 36	Duyster, J 108,
de dos planos 36	1 10
obtuso 36	ecuador 12
Boscastle 82	efectos de la topografía, en modelo de mapa 80
Bristol 80	eje del sondeo 72
brújula 4	ejes de esfuerzos 2, 58
buzamiento 4, 5	de rotación 6, 64, 68
aparente 30	esfuerzos principales 6
real 30	geológicos 2
icai 50	impulsores 88
cabacao (-;;;,t) 9 22 56	tectónicos 52
cabeceo (pitch) 8, 22, 56	esquistosidad 2
cabeceo (rake) 8	estereograma 12, 16
capas buzando 5	de configuración angular 76
círculo pequeño 12, 18, 60, 64, 72	estereogramas aproximados 14
primitivo (proyección estereográfica) 12, 14	estilo del plegamiento 48
círculos máximos 12, 16,	estratificación 2, 3,5
clinómetro 4, 8	invertida 5
clivaje 2, 3, 5, 10, 52,	estructura lineal 6, 8, 14
convergente en abanico 52	planar 4
divergente en abanico 52	estructuras sedimentarias 6
en abanico 52	excavaciones subterráneas 2
compacidad, de pliegue 48,	
conglomerado 6	falla 2, 3, 56, 58
deformado 6	conjugadas 58
cono 60, 62, 64, 70,	fases de plegado 76
de fricción 88, 90,92	"flute casts" 6
ontorneando 74	foliación 2, 10, 24
ontornos de densidad 74, 84	de plano axial 76
onvención de dirección de buzamiento 4	formulas 104
orrección del basculamiento de capas 66	fracturas 2. 84
orte geológico 30, 54, 56	cónicas 60

fricción 90	para corregir direcciones de paleocorrientes 68 para proyectar líneas en un plano 38
geotécnia i, vii,	Pembroke 10
Glamorgan 84	pitch : <i>ver cabeceo</i>
	plano auxiliar de falla 58
hemisferio inferior 12	plano axial, de pliegue 2
Holcombe, R. 108	plano de falla 6, 38
huellas de marea (ripple marks) 6, 68	de debilidad 86
	de laderas rocosas 88
inclinación 90	de perfil 44
inmersión (plunge) 6, 8, 22, 42	de pliegue 2
de línea de charnela 82	de proyección 12
intersección de dos planos 6	que contiene dos líneas 18
intrusiones en láminas 56	plantilla-falsilla- 18, 20, 22, 40, 60, 74
investigando la discontinuidad 90	(de conteo) Kalsbek 74, 102,
Total control and the state of the control and the state of the state	ecuatorial 42
juegos (sets) (familias)	ecuatorial polar 101
de discontinuidades 86	equiareal 18, 40, 74, 100
de diaclasas 84	estereográfica ecuatorial 99
de diacidado o r	estereográfica (estereonet) 72
ladera –pendiente-talud-rocosos 90	Lambert 40
limbo de 46, 82	polar 42
línea de charnela 3, 44, 54	proyección 62
de charnela del pliegue 28	Schmidt 40
de inflexión 46	Wulff 18
de interrupción (cut-off) 56	plegamiento 52
de intersección 10, 26, 36, 52, 56	superpuesto 76
línea de intersección 92 &&&&&	pliegue 3
lineación 6	abierto 46, 80,
del espejo de falla 6, 8,	cerrado 46
intersección estratificación-clivaje 26, 52	charnela de 6, 176
lineaciones de alargamiento 6	compacto 46
de intersección 6	cónico 60
de minerales 6	de inmersión (plunging) suave 50
longitud 12	de segunda- fase 76
	eje de 6, 44, 50
Mancktelow, N. 108	forma del perfil del 48
mapa de clasificación, para pliegues 103	fuertemente inclinado 50, 80
masa rocosa 2, 86, 88	isoclinal 46
método - π 82	ligeramente inclinado 50
de los diedros rectos 58	limbo de, 26
para descubrir ejes de pliegue 44	neutro 50
para descubrit ejes de pliegue 44 para calcular ejes de pliegue 26	no- cilíndrico 80
modelo de interferencia, de plegado 78	no- sumergiéndose (non-plunging) 80
Morgan. L. 108	suave 46
movimiento de la falla 6	sumergiéndose (plunging) fuertemente 50
	sumergiéndose (plunging) moderadamente 50
normal a un plano 6	vertical 50
Northcott Mouth 82	reclinado 50
	recto 50
orientación	recumbente 50
de pliegues 50	intersectados 52
del plano axial 54	plunge :ver inmersión
preferente 40	plunge directión: ver dirección de inversión
an.	polo de un plano 20, 36, 42
paleo - esfuerzos 58	pozos de perforación 72
paleocorrientes 68	problemas del sondeo 62
•	124 C

programas de ordenador 108 proyección 62 esférica 12 estereográfica 62 ortogonal 38

resurgiendo (daylighting) 90, 92, roca quebradiza 58 rotación 10, 44. 64, 68 sobre el eje horizontal 66 sobre el eje inclinado 70, 72 rotura en cuña 86, 92 plana 86, 90, 92 rumbo, de planos verticales 22

salto, 56
de falla 38
en buzamiento 56
en dirección 56
neto 56
sentido de la rotación 64
set: ver juegos
símbolo del mapa 4, 5, 8, 14, 16
solape del resurgimiento (daylight envelope) 90
strike: ver dirección
sub-área 80
concepto 78
superficie axial 3, 5, 10, 50, 76, 82
de pliegue 2, 28, 46
Suroeste de Inglaterra 82

tectonitas metamórficas 6 tendencia de los pliegues a ser cilíndricos 44, 48, 78 till 40 traza 78 de superficie axial 28, 80

van Everdingen, D., 108 van Gool, J 108, vector salto 56

Walters. M. 108