

José Sellés Martínéz

---

# LA PROYECCION ESTEREOGRAFICA

## PRINCIPIOS Y APLICACIONES EN GEOLOGIA ESTRUCTURAL

---

ASOCIACION GEOLOGICA ARGENTINA

Serie B: DIDACTICA Y COMPLEMENTARIA Nº 18



BUENOS AIRES  
REPUBLICA ARGENTINA  
1988

JOSÉ SELLÉS MARTÍNEZ

**LA PROYECCION  
ESTEREOGRAFICA.**

**PRINCIPIOS Y APLICACIONES  
EN GEOLOGIA ESTRUCTURAL**

*Publicación especial.*

**ASOCIACION  
GEOLOGICA  
ARGENTINA**

**BUENOS AIRES  
1988**

## PROLOGO

*La aplicación de métodos gráficos en Geología Estructural, Microtectónica y Análisis petrofábrico permite resolver problemas de posición de puntos, intersección de líneas, de líneas y planos y de planos en el espacio.*

*Una amplia variedad de problemas que a diario se presentan al geólogo ya sea en el campo, en un yacimiento o en una obra subterránea pueden ser resueltos aplicando las técnicas que aquí se exponen. Los dos métodos que abarca esta obra, la Proyección Ortográfica y la Proyección Estereográfica son de aplicación simple y rápida. El primero es quizá algo más laborioso, pero permite el cálculo de distancias por medición directa, en tanto que el de proyección estereográfica es más expeditivo. Este emplea para la representación de los datos redes estereográficas impresas pero sólo resuelve problemas de relaciones angulares y direccionales, así como también el tratamiento estadístico de datos.*

*Actualmente el ingeniero se vale de este recurso para el cálculo en problemas de estabilidad de taludes, en excavaciones subterráneas en el estudio del sostenimiento de hastiales y bóvedas, etc., haciendo de él un instrumento útil y práctico. Si bien en general existe cierta renuencia por parte del ingeniero en el uso de la proyección estereográfica por su aparente complejidad, ya que escapa a los métodos utilizados tradicionalmente por éste, con un mínimo de tiempo dedicado a su estudio y aplicación práctica puede utilizárselo con amplias ventajas sobre otros métodos.*

**Arturo J. Amos**

*Profesor Titular*

*Cátedra de Geología Estructural*

*Cátedra de Microtectónica*

*Universidad de Buenos Aires*

## A LOS LECTORES

Este manual ha sido escrito con el propósito de ser utilizado en las clases de Geología Estructural, y es por ello que se ha puesto especial énfasis en la presentación gráfica de los sucesivos pasos involucrados en la resolución de cada problema, así como en la presentación de diferentes métodos que permitan la obtención del resultado buscado, en la inteligencia, surgida de la experiencia recogida durante el dictado de la materia en el Departamento de Ciencias Geológicas de la Universidad de Buenos Aires, de que distintas técnicas resultan más claras a diferentes personas y que el problema más grave que enfrentan quienes se inician en la Proyección Estereográfica lo constituye la comprensión del significado espacial de las maniobras que se realizan sobre la red impresa.

Dado que los ejemplos presentados han sido procesados en forma manual los resultados obtenidos están afectados por los errores lógicos inherentes a todas las técnicas gráficas, es por ello que el lector puede obtener valores ligeramente diferentes al resolver algunos de los ejercicios, sin que ello implique un error en la aplicación del método. Al final de la obra se presenta una colección de las redes y falsillas de uso más común para que puedan ser seleccionados por el usuario de acuerdo con sus necesidades.

El autor desea agradecer a M. Mozetic y a R. Vignes, quienes fueron sus docentes de Geología Estructural, por haberlo iniciado con entusiasmo en esta disciplina, al Dr. A.J. Amos y a la Lic. R. Juan por la revisión del manuscrito y a la Asociación Geológica Argentina por haber accedido a la publicación del mismo.

*José Sellés Martínez*



<b>I.- PRINCIPIOS DE LA PROYECCION ESTEREOGRAFICA</b>		<b>2.- Métodos basados en la proyección polar</b>	<b>50</b>
1.- Principios geométricos de la proyección estereográfica	7	a.- Primer Método	
2.- Construcción de la red estereográfica	7	b.- Segundo Método	
3.- Representación de líneas	7	<b>V.- CALCULO DEL RECHAZO DE FALLAS</b>	
4.- Representación de planos	7	1.- Resolución de problemas que involucran fallas no rotacionales	50
a.- Representación polar		2.- Resolución de problemas que involucran fallas rotacionales	54
b.- Representación ciclográfica			
5.- Lectura de actitudes	13		
a.- Actitud de una línea			
b.- Actitud de un plano			
<b>II.- RESOLUCION DE PROBLEMAS BASICOS DE GEOLOGIA ESTRUCTURAL</b>		<b>VI.- APLICACIONES DE LA RED ESTEREOGRAFICA EN EL TRATAMIENTO ESTADISTICO DE DATOS ESTRUCTURALES</b>	
1.- Determinación de la actitud de planos a partir de datos parciales.	16	1.- Trazado de contornos de igual densidad de puntos	55
a.- Determinación a partir de dos inclinaciones aparentes.		a.- Método de Mellis	
2.- Cálculo de la actitud de la recta determinada por la intersección de dos planos	16	b.- Método de conteo libre	
3.- Cálculo del hundimiento de una línea	16	c.- Método de Schmidt o de rejilla	
4.- Algunas variaciones posibles de los casos anteriores	18	d.- Método de Kalsbeck	
a.- Determinación de la actitud de dos planos conociendo la de su intersección y sendas inclinaciones aparentes.		e.- Método de Hoek y Brown	
b.- Idem conociendo la actitud de su intersección y sus rumbos.		f.- Método de Trommsdorff	
c.- Idem conociendo el rumbo de uno de ellos, el hundimiento de la recta de intersección sobre éste y sendas inclinaciones aparentes.		<b>VII.- ANALISIS DE LA GEOMETRIA Y RELACIONES TECTONICAS DE ESTRUCTURAS PLEGADAS</b>	
5.- Determinación del valor del ángulo entre dos planos	18	1.- Determinación de la actitud del eje de un pliegue a partir de datos de actitud de los bancos.	61
a.- Medición sobre el plano perpendicular a ambos		a.- Determinación del polo	
b.- Medición sobre un plano cualquiera.		2.- Determinación de la actitud del plano axial de un pliegue	61
c.- Aplicación al estudio de estructuras planares.		3.- Análisis de la forma de un pliegue	62
		4.- Petrología estructural y determinación de la orientación de los esfuerzos	62
<b>III.- ROTACION DE LINEAS Y PLANOS</b>		<b>VIII.- ESTUDIO DE LA ESTABILIDAD DE HASTIALES, BOVEDAS Y TALUDES</b>	
1.- Rotación según ejes horizontales	19	1.- Estudio de la estabilidad de taludes	62
a.- Rotación de una línea		2.- Estudio de la estabilidad de hastiales y bóvedas	79
b.- Rotación de un plano			
2.- Rotación según ejes inclinados	30	<b>IX.- APENDICES</b>	
a.- Rotación de una línea		1.- Propiedades de la proyección estereográfica	93
b.- Rotación de un plano		2.- Trazado de arcos de circunferencias menores	94
c.- Variación a la técnica anterior		3.- Construcción geométrica y analítica de las redes	95
d.- Método del plano auxiliar		a.- Red equiangular polar	
3.- Rotación según ejes verticales	41	b.- Red equiangular ecuatorial	
		c.- Construcción de la red equiareal polar	
<b>IV.- DETERMINACION DE ACTITUDES A PARTIR DE DATOS OBTENIDOS DE TESTIGOS</b>		d.- Construcción de la red equiareal ecuatorial	
1.- Métodos basados en la proyección ciclográfica	41	Listado de trabajos citados en el texto	96
a.- Primer Método			
b.- Segundo Método			
c.- Tercer Método			

## I.- PRINCIPIOS DE LA PROYECCION ESTEREOGRAFICA

### I.1.- Principios de la proyección estereográfica

Esta técnica de representación utiliza como foco de proyección un punto ubicado en la superficie de una esfera tal como el punto P de la figura 1. Hacia éste parten las líneas originadas sobre la superficie esférica, cuya intersección con el plano de representación da origen a la denominada "proyección estereográfica". El plano de representación puede ser interior o exterior a la esfera, siendo las figuras resultantes en ambos casos semejantes. En la figura 1 se señalan dos planos posibles, uno de ellos es el plano ecuatorial de la esfera y el otro un plano exterior a la misma y paralelo a aquél.

Si ubicamos el elemento que deseamos representar en el centro de la esfera, es decir lo hacemos pasar por el punto C, el plano o línea en cuestión se proyecta de la siguiente manera: Sea el caso del plano de la figura 2, el que al ser ubicado en el centro de la esfera corta a la misma en dos hemisferios, y su intersección con la superficie de aquella determina una circunferencia máxima (recordemos que denominamos circunferencia máxima a aquella cuyo centro coincide con el de la esfera). Podemos elegir un grupo cualquiera de puntos pertenecientes a la circunferencia (tales como los identificados con las letras V, W, X, Y y Z) y desde ellos trazamos líneas hasta el punto P. Al cortar el plano ecuatorial estas líneas originan una serie de puntos que definen la traza de la proyección de la intersección del plano con la esfera, (son éstos los puntos V, W', X', Y' y Z). Como puede observarse, los puntos V y Z al estar sobre el plano de proyección no se desplazan. La figura definida por los puntos V, W', X', Y' y Z es la proyección estereográfica del plano. A medida que el mismo cambia su posición acercándose a la vertical, la longitud del arco de circunferencia correspondiente a la proyección va disminuyendo hasta convertirse en una línea coincidente con un diámetro de circunferencia ecuatorial. Esto puede observarse en la figura 3. En forma opuesta y tal como se ha representado en la figura 4, la proyección de un plano paralelo al de representación coincide con la traza perimetral de la circunferencia ecuatorial.

### I.2.- Construcción de la red estereográfica

Si se desea utilizar este sistema de proyección para la resolución de problemas se hace imprescindible contar con un reticulado o red de referencia equivalente a las coordenadas que se utilizan en los mapas; esto puede lograrse mediante la confección de una grilla en la forma que indican las figuras 5 y 6. En la primera de ellas vemos como las trazas originadas por una serie de planos verticales, paralelos y equidistantes que intersecan una superficie esférica corresponden a circunferencias menores, que al ser proyectadas sobre el plano ecuatorial originan arcos de circunferencia. El semicírculo D, G, E, F del ejemplo genera el arco D, G', E', F. Se obtiene así el tercer diagrama de la figura 5.

En la figura 6 se observa como en forma similar a la anterior puede proyectarse otro conjunto de planos, coaxiales en este caso que dan origen a una serie de circunferencias máximas (como la F, G, H, I, J) cuyas proyecciones sobre el plano ecuatorial son arcos de circunferencia (como el F, G', H', I', J). En el tercer diagrama de la figura se muestra el diseño resultante sobre el plano ecuatorial.

Combinando ambos elementos en forma preestablecida podemos originar una plantilla de referencia de utilización universal. Si referimos tanto la dirección de la perpendicular a los planos de la figura 5, como la línea axil de los de la figura 6 a la dirección norte, obtenemos un sistema de referencia asimilable al de paralelos y meridianos, pero no siempre equivalente, ya que se trata de ángulos con respecto al norte y a la horizontal y no de latitudes y longitudes.

La plantilla o red estereográfica obtenida se denomina habitualmente "Red de Wulff" y se ilustra en la figura 7; en ella el distanciamiento entre líneas es de  $2^\circ$ . Sobre la circunferencia ecuatorial pueden leerse los valores de orientación. Los arcos de circunferencias máximas o "meridianos" se utilizan para la representación de los valores de inclinación. Los "paralelos" corresponden a isovalores angulares con respecto al eje norte-sur y su utilidad se verá en el Capítulo dedicado a la rotación de planos y líneas.

Por convención en geología estructural se utiliza siempre la proyección de las intersecciones con el hemisferio inferior de esta manera cada elemento, aparece representado en la posición que le corresponde al "hundirse" en el suelo.

Existen aparatos especiales para trabajar con la red estereográfica, como el fabricado por Leitz, con sistemas de fijación del papel transparente a una corona metálica que gira alrededor de una red impresa. Cuando no se dispone de éstos, es de uso habitual pasar una chinche por el centro de la red impresa fijada sobre un cartón y sobre la misma se pincha el papel transparente, consiguiéndose de esta manera que el mismo gire libremente.

### I.3.- Representación de líneas

La representación estereográfica de una línea es un punto, proyección a su vez de aquél en el cual dicha línea atraviesa a la superficie esférica. La técnica a seguir se ilustrará con el siguiente ejemplo:

Sea la actitud del eje de un pliegue un buzamiento de  $25^\circ$  en dirección Az  $135^\circ$ . Para graficar estos datos se coloca el transparente sobre la red estereográfica y se señala la dirección norte, el centro de la red, su perímetro y el Az  $135^\circ$ , tal como se ilustra en la figura 8a. Se gira luego el papel transparente hasta que la marca correspondiente al Az  $135^\circ$  quede en la dirección este-oeste, y se cuentan desde el borde la red hacia el centro los  $25^\circ$  correspondientes al buzamiento de la línea, marcándose así el punto P, cuya posición muestra la figura 8b. Finalmente se vuelve la dirección norte a su posición original (figura 8c).

### I.4.- Representación de planos

Existen dos formas de representar un elemento planar, la primera es la que se ha utilizado en los

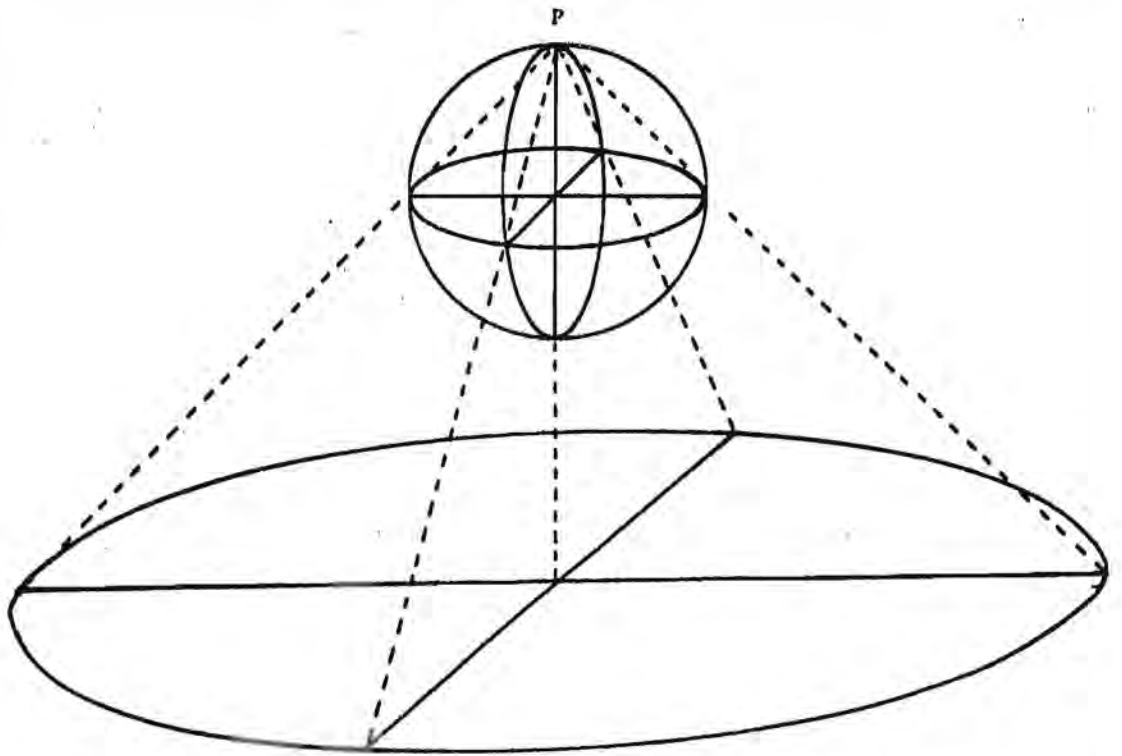


Figura 1

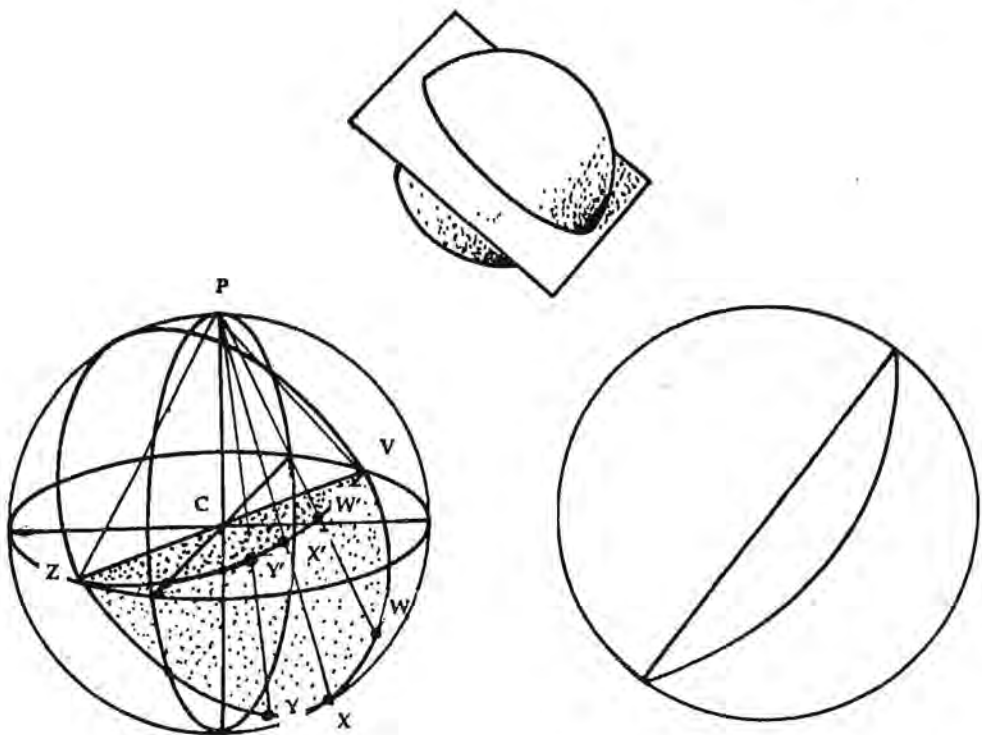


Figura 2

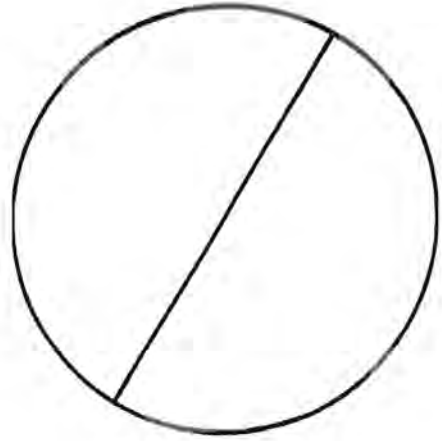
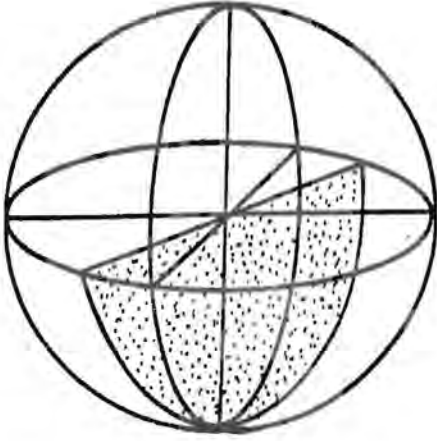
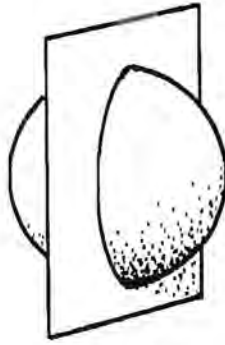


Figure 3

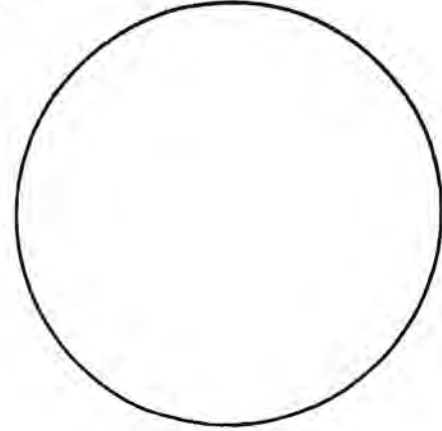
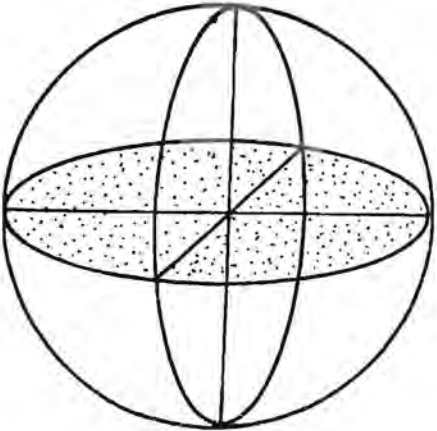
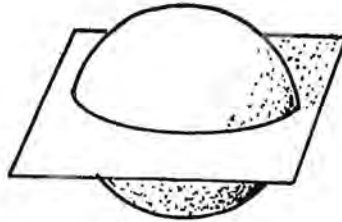


Figure 4



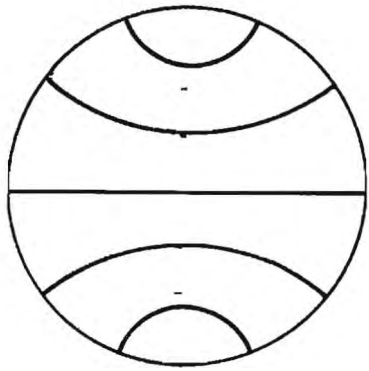
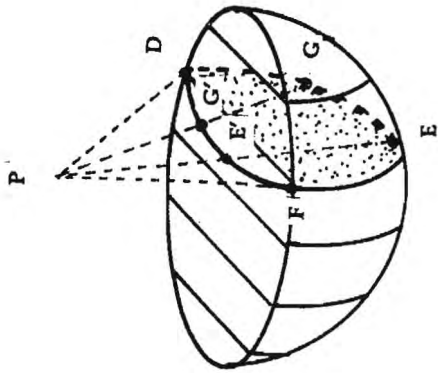
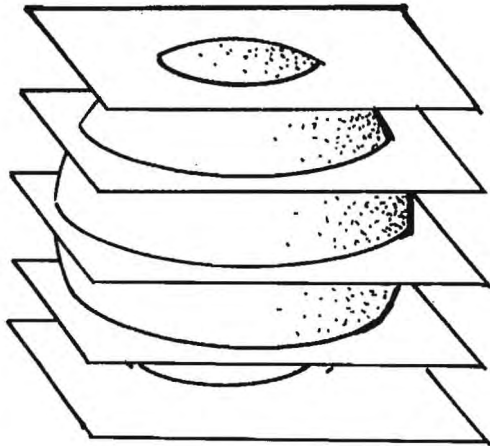


Figura 5

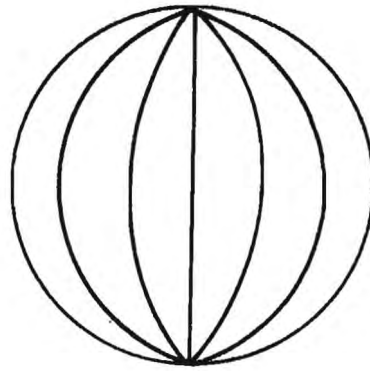
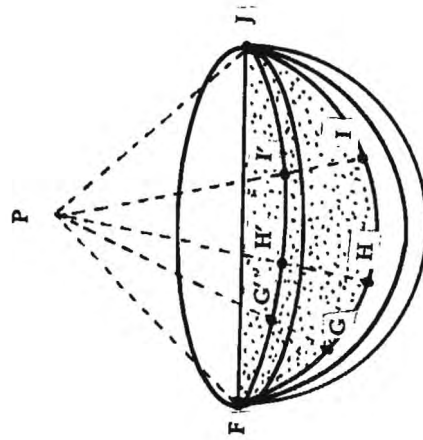
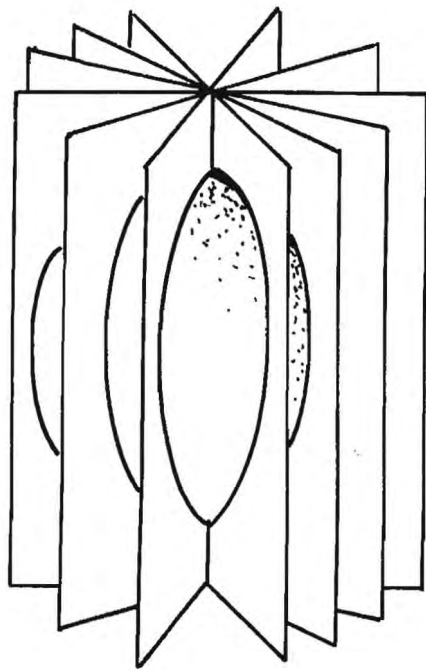


Figura 6

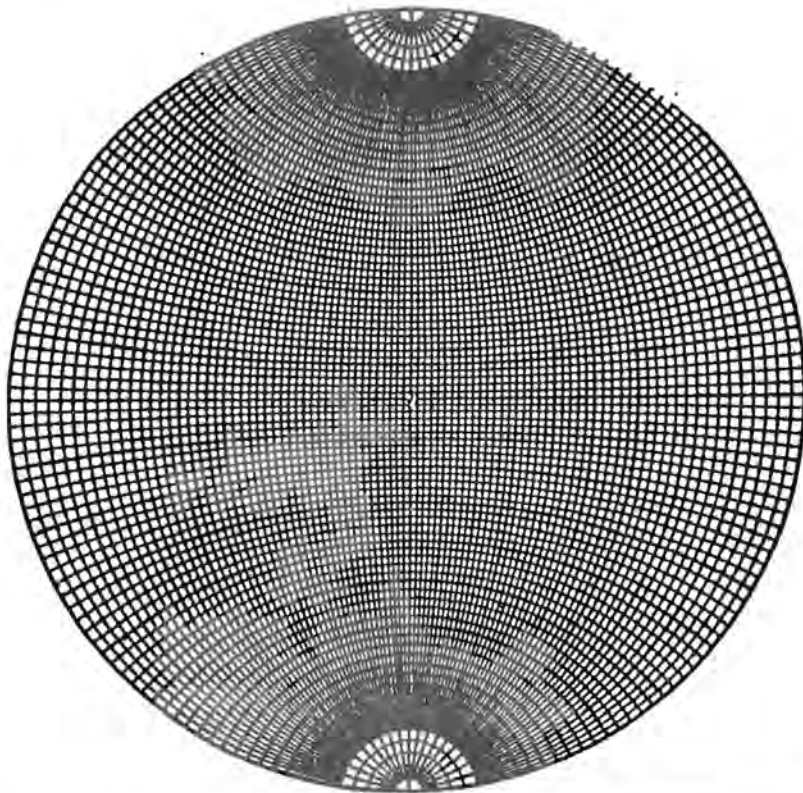
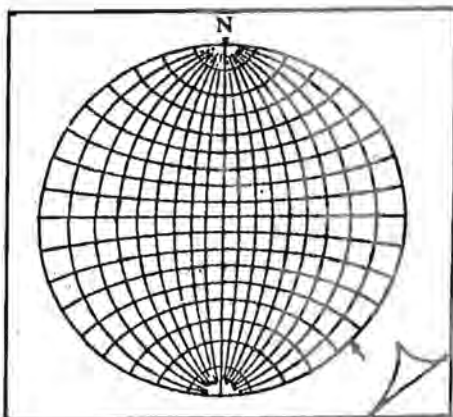
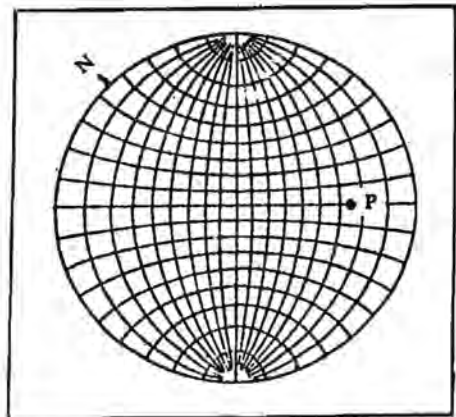


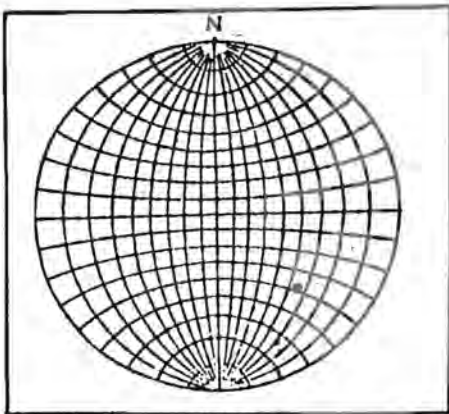
Figura 7



(a)



(b)



(c)

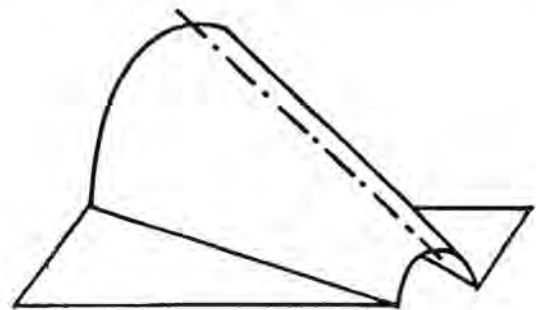


Figura 8

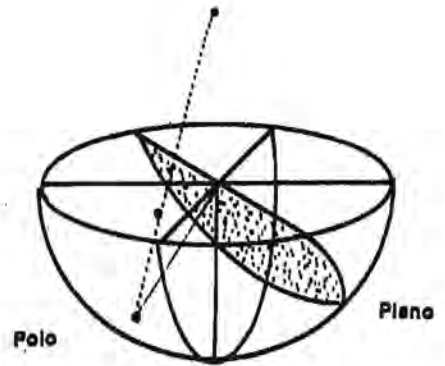
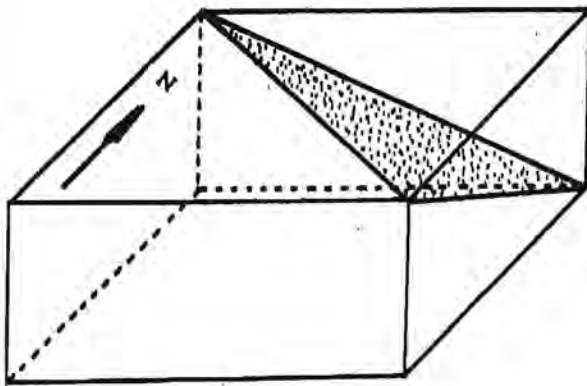


Figura 9

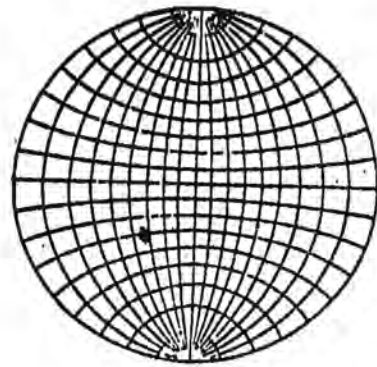
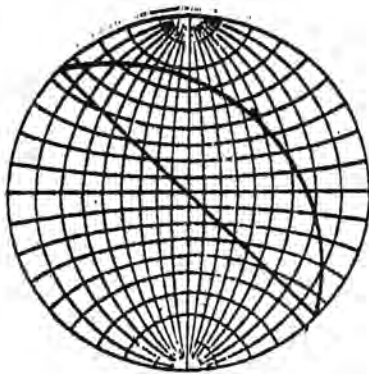
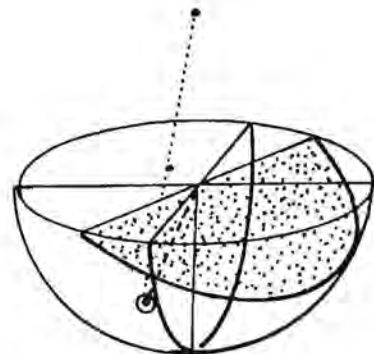
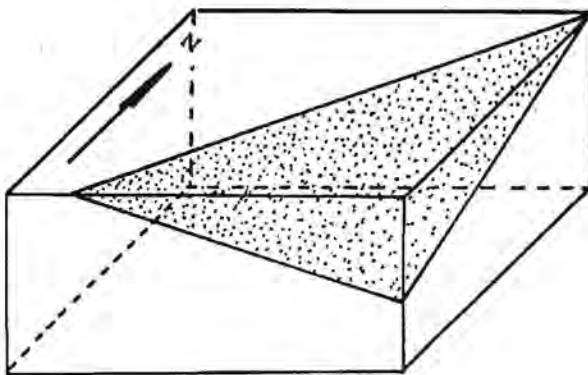


Figura 10



(a)

Figura 11

items anteriores y se denomina "proyección ciclográfica", pues en ella se representa la línea definida por la intersección del plano con la esfera. En la denominada "proyección polar" en cambio, un plano es representado por la proyección del punto de intersección de una recta perpendicular al mismo con la superficie esférica, tal como se ilustra en la figura 9. En la figura 10 se presentan los estereogramas correspondientes a ambos tipos de representación para un mismo ejemplo.

Si bien la representación ciclográfica es en principio más fácil de visualizar, cuando es necesario representar una gran cantidad de datos, como por ejemplo cuando se hace estadística utilizando la proyección estereográfica, la representación polar es más adecuada, tanto porque evita el empaste de líneas, como porque facilita enormemente el recuento.

#### I.4.a.- Representación polar

Al ser por definición la posición del polo perpendicular al plano, su actitud queda definida por el Az a  $90^\circ$  del rumbo y su inclinación es el complemento de la inclinación del plano. Para el ejemplo de la figura 11a cuya actitud es Rumbo Az  $30^\circ$  e inclinación  $35^\circ$  al sureste, se procede de la siguiente manera; se calcula la posición del polo; sumando o restando  $90^\circ$  al valor del rumbo del plano, según corresponda, en dirección opuesta a la de la inclinación. En el caso del ejemplo  $Az\ 30^\circ - 90^\circ = Az\ 300^\circ$ . Si el valor del rumbo del plano hubiera estado expresado como  $Az\ 210^\circ$ , la posición polar vendría dada por  $Az\ 210^\circ + 90^\circ = Az\ 300^\circ$ , que obviamente coincide con el valor anterior. Otra forma, quizás más sencilla, de calcular la dirección del polo consiste en sumar  $180^\circ$  a la dirección de máxima inclinación. En el caso del ejemplo (rumbo Az  $30^\circ$ ), la dirección de máxima inclinación es Az  $120^\circ$ , por lo tanto la dirección del polo es  $Az\ 120^\circ + 180^\circ = 300^\circ$ . El buzamiento es directamente  $90^\circ - 25^\circ = 65^\circ$  al noroeste. Una vez obtenidos estos valores, buzamiento  $65^\circ$  en dirección Az  $300^\circ$  se coloca un papel transparente sobre la red estereográfica, se marca la posición del norte y el Az  $300^\circ$ , luego se gira el transparente hasta que la marca correspondiente al Az  $300^\circ$  se encuentre en la dirección este-oeste y desde el borde hacia el centro se cuentan los  $65^\circ$  correspondientes al buzamiento. Se marca entonces el punto P de la figura 11b. Finalmente se lleva el norte a su posición original.

Una técnica alternativa consiste en una vez colocado el transparente marcar el Az del Rumbo ( $30^\circ$ ) y la dirección de la inclinación (sureste) tal como se ilustra en la figura 11c. Se lleva luego la marca del Az  $30^\circ$  a la dirección norte (figura 11d) y sobre la dirección este-oeste desde el centro de la red, hacia el extremo opuesto al de la inclinación del plano se cuentan tantos grados como vale la misma ( $25^\circ$ ). Se marca entonces el punto P. Finalmente se restituye el norte a su dirección inicial, obteniéndose la figura 11e.

#### I.4.b.- Representación ciclográfica

La forma de operación será ilustrada mediante el caso de un plano de Rumbo Az  $45^\circ$  que inclina  $30^\circ$  hacia el sureste. Para la representación se procede de

la siguiente manera: Sobre la plantilla se coloca el papel transparente en el cual se marca el centro de la red y la dirección norte, así como el perímetro.

Se traza entonces una vez hecho lo anterior una línea diametral que pasa por el punto correspondiente a los  $45^\circ$ , esta línea corresponde al rumbo del plano y es la representación de la intersección del mismo con el plano ecuatorial tal como vimos antes. Esta parte de la operación está ilustrada en la figura 12a. Para representar la inclinación se lleva la línea trazada a la dirección norte-sur y desde el borde este (ya que el plano inclina hacia el sureste) se miden los  $30^\circ$  correspondientes, obteniéndose la figura 12b, trazando el arco de circunferencia respectivo. Se restituye luego la dirección norte a su posición original (figura 12c).

### I.5.- Lectura de actitudes

#### I.5.a.- Actitud de una línea

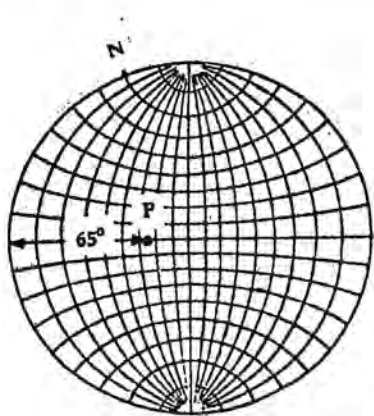
En el caso de una línea como la representada en la figura 13a se coloca el transparente sobre la red haciendo coincidir ambos nortes y se gira luego el mismo hasta que el punto queda en la dirección este-oeste. Se mide entonces el valor angular entre la periferia y el punto obteniéndose así el valor del buzamiento de la línea (figura 13b). Se marca en el transparente la dirección este y al volver a hacer coincidir los nortes se mide el azimut correspondiente a la posición del trazo recién señalado. En el ejemplo la recta buza  $48^\circ$  en dirección Az  $35^\circ$ , tal como se muestra en la figura 13c.

Advertencia importante: Si bien como se verá luego, el rumbo de un plano puede expresarse en forma indistinta por valores que difieren  $180^\circ$  entre sí, teniendo sólo cuidado de dejar bien expresado el sentido de su inclinación, en el caso de una línea sólo es válido expresar la dirección de su buzamiento.

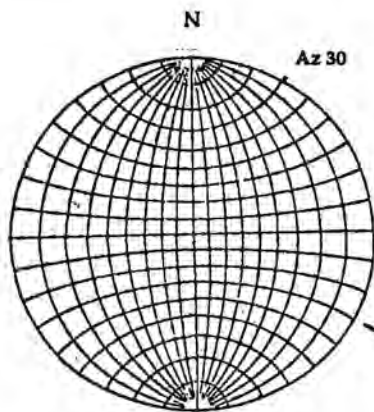
#### I.5.b.- Actitud de un plano

Para leer la actitud de un plano se lleva la dirección norte del transparente a coincidir con el norte de la red y se lee el valor de la declinación en el punto donde queda ubicada la línea diametral o de Rumbo. Como puede observarse en la figura 14a pueden leerse dos valores, uno correspondiente al Az  $65^\circ$  y otro al Az  $245^\circ$ , cualquiera de estos dos valores es correcto, pero debe tenerse especial cuidado al indicar la dirección en la cual inclina el plano, en este caso al noroeste. La inclinación se obtiene llevando la traza diametral a la dirección norte-sur y contando desde fuera hacia el centro en la dirección este-oeste el valor angular correspondiente, que como se señala en la figura 14b es de  $60^\circ$ .

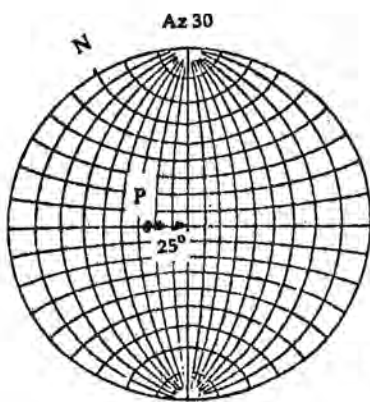
En algunas disciplinas geológicas, como la petrología estructural y el paleomagnetismo, la determinación y expresión de la actitud de un plano al extraer muestras orientadas se hace en forma unívoca estableciéndose el sentido del rumbo hacia la derecha de quien realiza la medición y con el plano inclinando hacia él. Otra forma de expresar la posición del plano es mediante el valor de su inclinación y la dirección de la misma. Digamos resumiendo que la actitud de un mismo plano puede quedar expresada de cualquiera de las tres formas siguientes:



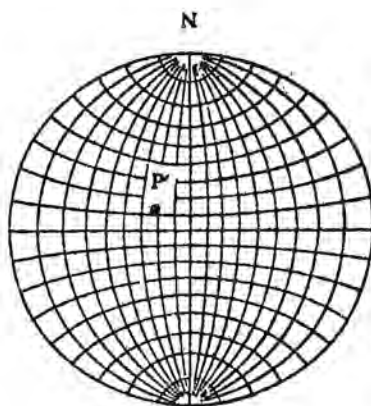
(b)



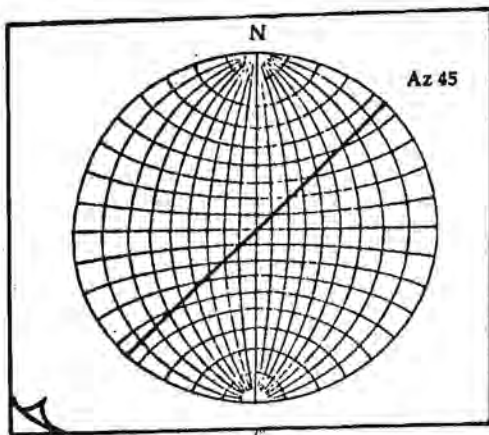
(c)



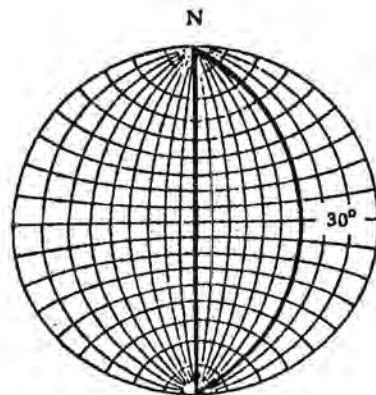
(d)



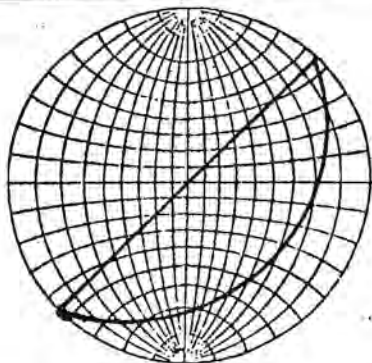
(e)



(a)



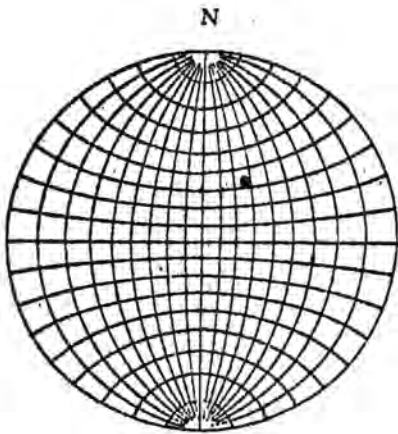
(b)



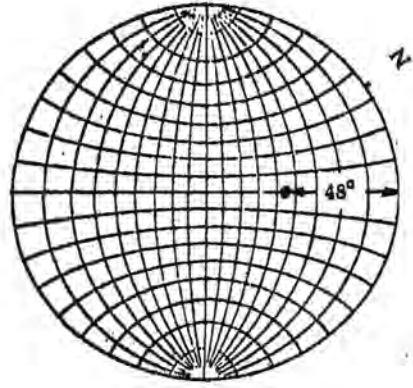
(c)

Figura 12

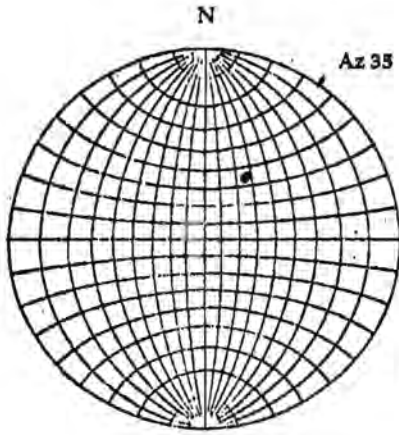




(a)

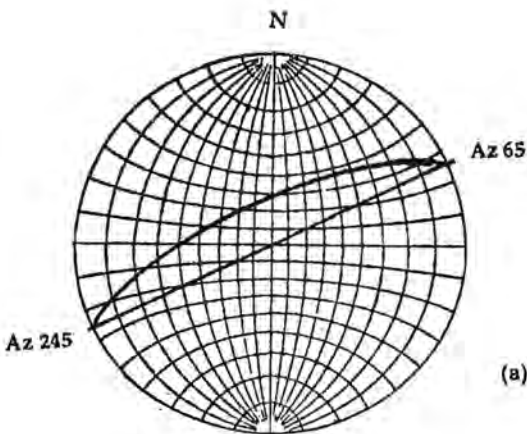


(b)

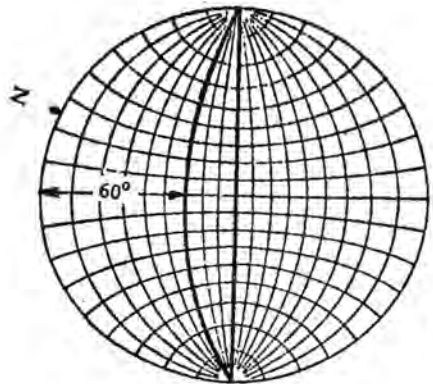


(c)

Figura 13



(a)



(b)

Figura 14

- a) Rumbo Az  $120^{\circ}$  e inclinación  $45^{\circ}$  al noreste  
Rumbo Az  $300^{\circ}$  e inclinación  $45^{\circ}$  al noreste
- b) Rumbo Az  $300^{\circ}$  e inclinación  $45^{\circ}$
- c) Inclinación  $45^{\circ}$  en dirección Az  $30^{\circ}$

## II.- RESOLUCION DE PROBLEMAS BASICOS DE GEOLOGIA ESTRUCTURAL

### II.1.- Determinación de la actitud de planos a partir de datos parciales

En el campo no siempre es posible determinar la orientación de los contornos estructurales y por lo tanto no se puede saber la inclinación verdadera del plano que se está estudiando. Es en cambio factible determinar dos o más valores de inclinación en diferentes direcciones, o bien el Rumbo y sólo una inclinación aparente, etc., debido a la existencia de cortes de caminos o canteras, etc, que brindan una superficie de observación adecuada.

#### II.1.a.- Determinación a partir de dos inclinaciones aparentes

El ejemplo de la figura 15 permitirá ilustrar el método. Sean dos valores de inclinación de  $30^{\circ}$  y  $25^{\circ}$  medidos en las direcciones Az  $40^{\circ}$  y Az  $100^{\circ}$  respectivamente. Se coloca el transparente sobre la red de Wulff, se marca la dirección norte y luego las correspondientes a los Az  $40^{\circ}$  y  $100^{\circ}$  tal como puede verse en la figura 15b. Se gira el transparente hasta que la marca correspondiente al Az  $40^{\circ}$  llegue a la dirección este-oeste (figura 15c), se miden entonces los  $30^{\circ}$  correspondientes a la inclinación obteniéndose el punto 1 de la figura 15c. Se lleva luego a la dirección este-oeste la marca correspondiente al Az  $100^{\circ}$  y se miden los  $25^{\circ}$  de inclinación, marcandose el punto 2 de la figura 15d. Se hace girar entonces el transparente hasta que ambos puntos coincidan con un arco de circunferencia máxima o "meridiano" y se traza entonces sobre el transparente dicho arco y el diámetro correspondiente a la dirección norte-sur tal como se ilustra en la figura 15e. Se llevan nuevamente a coincidir los nortes y se lee el Az correspondiente al Rumbo del plano, tal como se ilustra en la figura 15g. Para obtener el valor de la inclinación verdadera se lleva el Rumbo a la dirección norte-sur y se lee el valor de la inclinación sobre la dirección este-oeste, como se muestra en la figura 15f. La actitud determinada para el plano del ejercicio es: Rumbo Az  $328^{\circ}$  e inclinación  $32^{\circ}$  al noreste.

#### II.1.b.- Determinación a partir del rumbo y una inclinación aparente

En el caso que se halla podido determinar el rumbo y el valor de la inclinación aparente en una dirección dada, la determinación del valor de la inclinación verdadera es sumamente sencilla. En el ejemplo de la figura 16 se sabe que un plano cuyo Rumbo es Az  $138^{\circ}$  inclina  $30^{\circ}$  en dirección Az  $100^{\circ}$ . Para calcular la inclinación verdadera se traza el Rumbo del plano y luego se marca la dirección de inclinación conocida como está indicado en la figura 16a. Se lleva entonces esta marca a la dirección este-oeste y se miden los  $30^{\circ}$ , obteniéndose el punto identificado con la letra A

en la figura 16b. Se gira luego el transparente hasta que la línea del rumbo quede en dirección norte-sur y se traza el arco que pasa por el punto A, tal como muestra la figura 16c. En esta posición se mide el valor angular correspondiente a la inclinación verdadera que es en este ejemplo de  $44^{\circ}$ .

#### II.1.c.- Determinación de la inclinación aparente de un plano en una dirección cualquiera

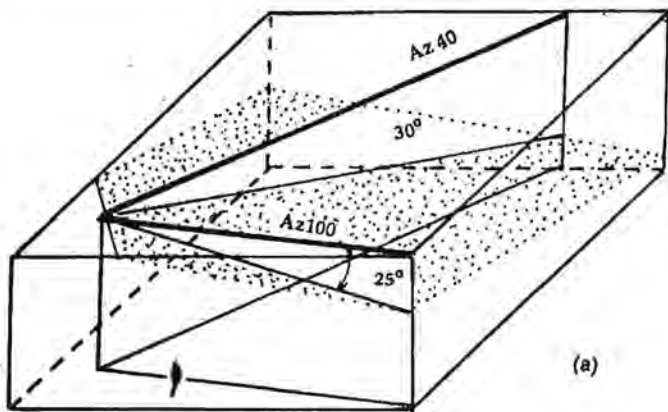
Si se trata del problema inverso, es decir si se desea conocer el valor de la inclinación de un plano en una dirección determinada, conociéndose de antemano su Rumbo e inclinación verdadera se procede de la siguiente forma: Se traza el plano sobre el transparente, por ejemplo uno cuyo Rumbo es Az  $23^{\circ}$  y su inclinación  $50^{\circ}$  al noroeste tal como el ilustrado en la figura 17. Se desea conocer el valor de su inclinación en la dirección Az  $350^{\circ}$ . Una vez dibujado el plano se hacen coincidir los nortes y se marca la dirección Az  $350^{\circ}$  tal como se ilustra en la figura 17a. Se gira luego nuevamente el transparente hasta que la dirección señalada coincida con la este-oeste y se lee el ángulo comprendido entre el borde de la red y la traza del plano según puede verse en la figura 17b, obteniéndose un valor de  $33^{\circ}$ . Tal como se ha dicho antes este valor corresponde a una inclinación aparente, una forma de controlar la corrección del procedimiento es verificar que su valor sea menor que el de la inclinación verdadera.

### II.2.- Cálculo de la actitud de la recta determinada por la intersección de dos planos

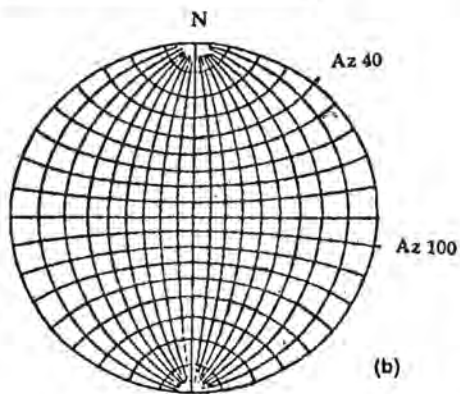
En muchas ocasiones es necesario conocer la actitud de la recta definida por la intersección de dos planos pudiendo ser estos los flancos de un pliegue, y en este caso su intersección nos daría la actitud del eje del mismo, o bien la intersección de un plano de falla con la estratificación y se desea conocer la traza de la misma por estar asociada a determinada mineralización, etc. En estos casos se procede de la siguiente manera: Según lo ilustrado anteriormente se representan los planos en cuestión, que para el ejemplo de la figura 18 son el plano  $\alpha$  de Rumbo Az  $70^{\circ}$  e  $i = 28^{\circ}$  al sureste y el plano  $\beta$  de Rumbo Az  $148^{\circ}$  e  $i = 45^{\circ}$  al suroeste. El punto correspondiente a la intersección de ambos con la superficie de la esfera queda definido por el punto de intersección de los dos arcos de circunferencia máxima, identificado con la letra A en la figura 18b. La orientación de la recta se obtiene prolongando imaginariamente la misma hacia el borde de la red, donde se lee el Az correspondiente, tal como se ilustra en la figura 18c, se gira luego el transparente hasta que el punto A queda en la dirección este-oeste y se lee el ángulo de buzamiento señalado en la figura 18d. La actitud de la línea correspondiente al ejemplo es de un buzamiento de  $27^{\circ}$  en la dirección Az  $180^{\circ}$ .

### II.3.- Cálculo del hundimiento de una línea

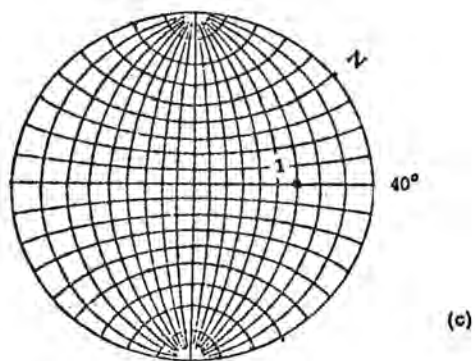
La determinación del valor del hundimiento se realiza según el procedimiento siguiente: Sea por ejemplo un plano de Rumbo Az  $340^{\circ}$  e  $i = 30^{\circ}$  al noreste sobre el que existe una línea que buza en



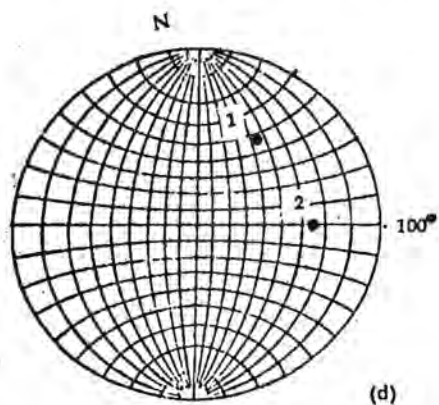
(a)



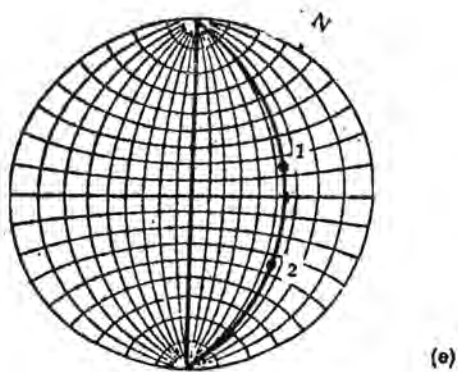
(b)



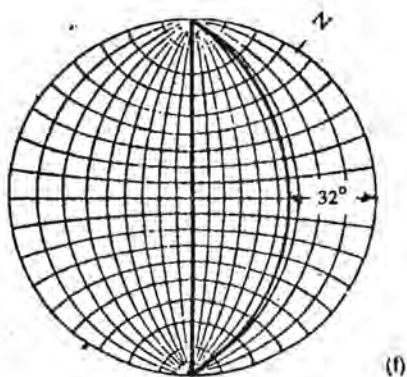
(c)



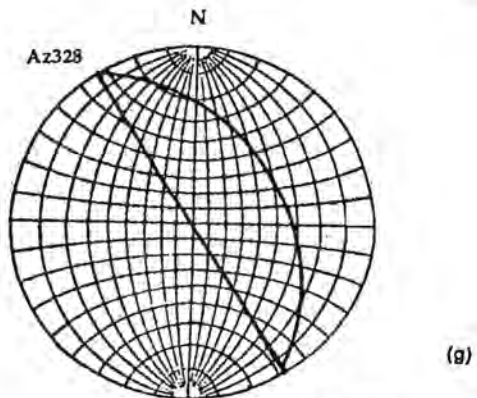
(d)



(e)



(f)



(g)

Figura 15

dirección Az  $20^\circ$  tal como se ha representado en la figura 19. Se desea obtener el valor del hundimiento de esta lineación sobre el plano. Una vez representado el plano y señalada la dirección de la línea tal como se ilustra en la figura 19a, se lleva el punto a la dirección este-oeste y se obtiene el valor del buzamiento,  $21^\circ$  en este caso según la figura 19b. Se gira luego el transparente hasta hacer coincidir el Rumbo del plano con la dirección norte-sur como en la figura 19c y sobre el arco de circunferencia máxima correspondiente a la traza del plano se mide el ángulo entre la línea de Rumbo y la traza de la lineación, representados por los puntos P y L en la figura. La línea del ejemplo hunde  $45^\circ$  desde el noroeste.

Con respecto al tema del hundimiento es importante realizar algunas aclaraciones: a) El hundimiento se mide generalmente en el sentido en que el ángulo entre la horizontal y la lineación sea menor de  $90^\circ$  (figura 19d); b) A veces no es necesario conocer el valor del buzamiento de la línea, ya que por definición la misma está contenida en el plano y por lo tanto aquel será igual a la inclinación aparente del plano en la dirección de buzamiento de la línea; c) Es importante tener claro que el valor del hundimiento no es igual a la diferencia entre el rumbo del plano y la dirección del buzamiento de la línea, salvo en dos casos que son: Cuando el rumbo del plano y la dirección de buzamiento coinciden (hundimiento igual a 0) y cuando difieren en  $90^\circ$ , (hundimiento igual a  $90^\circ$ ). En todos los demás casos el valor del hundimiento es función del ángulo entre ambas direcciones y el valor de la inclinación del plano.

#### II.4.- Algunas variaciones posibles de los casos anteriores

Existen numerosas combinaciones de datos que permiten resolver los problemas anteriores o bien enfocarlos en forma inversa, a continuación se analizarán algunos ejemplos.

##### II.4.a.- Determinación de la actitud de dos planos conociendo la de su intersección y sendas inclinaciones aparentes.

Este caso se reduce en realidad a determinar la actitud de cada plano a partir de dos inclinaciones aparentes, por el método explicado anteriormente, ya que la actitud de la recta de intersección es implícitamente igual a la inclinación aparente de los planos en esa dirección se sabe que la inclinación de  $\alpha$  en dirección Az  $270^\circ$  es de  $25^\circ$  y la de  $\beta$  es de  $15^\circ$  en dirección Az  $200^\circ$ , siendo ambas inclinaciones aparentes. La intersección de ambos planos buza  $18^\circ$  en dirección Az  $70^\circ$ . En la figura 20a se han representado estos tres puntos identificados con las letras A, B y C (puntos que pertenecen a  $\alpha$ , a  $\beta$  y a ambos respectivamente). Se gira la red hasta que los puntos A y C coincidan en un arco de circunferencia máxima y se trazan éste y el diámetro correspondiente, obteniéndose la figura 20b. Se gira luego el transparente hasta que B y C coincidan ahora en otro arco de circunferencia máxima y se trazan también la misma y el diámetro correspondiente, produciendo la figura 20c. Se tiene ya la traza de ambos planos. Si bien en rigor no correspondería unir el punto C con el centro

de la red para marcar la recta de intersección de los planos, ya que sólo se proyectan las intersecciones con la superficie de la esfera, y la intersección de una línea con ésta es sólo un punto y por consiguiente su proyección es también un punto, habitualmente se la traza para facilitar la comprensión de las figuras. La actitud de los planos del ejemplo es para  $\alpha$  Rumbo Az  $258^\circ$  e  $i = 68^\circ$  al noroeste y para  $\beta$  Rumbo Az  $43^\circ$  e  $i = 35$  al sureste. Tal como se ilustra en la figura 20d.

##### II.4.b.- Idem conociendo la actitud de su intersección y sus rumbos.

Tomando como ejemplo el caso de un plano  $\alpha$  de Rumbo Az  $100^\circ$  cuya intersección con un plano  $\beta$  de Rumbo Az  $80^\circ$  buza  $60$  en dirección Az  $30^\circ$ . Se grafican los datos sobre el transparente obteniéndose la figura 21a y luego se gira éste hasta que la traza del Rumbo del primer plano tome la dirección norte-sur, como en la figura 21b y se traza el arco de circunferencia máxima correspondiente que pasa por el punto 1 (actitud de la línea de intersección). En esta posición se lee la inclinación correspondiente al plano  $\alpha$ , obteniéndose un valor de Rumbo Az  $100^\circ$  e inclinación  $62^\circ$  al noreste. En forma similar se obtiene la inclinación de  $\beta$  que es igual a  $67^\circ$  al noroeste tal como se ilustra en la figura 21c. Finalmente se lleva el Norte a su posición original (figura 21d).

##### II.4.c.- Idem conociendo el rumbo de uno de ellos, el hundimiento de la recta de intersección sobre éste y sendas inclinaciones aparentes.

El problema se resuelve de la siguiente manera: Sean por ejemplo los siguientes datos, la inclinación aparente del plano  $\alpha$  en dirección Az  $324^\circ$  es de  $15^\circ$  y la actitud del plano  $\beta$  es de Rumbo Az  $10^\circ$  y su inclinación aparente en dirección Az  $140^\circ$  es de  $40^\circ$ . La traza de la intersección hunde  $30^\circ$  hacia el norte sobre el plano  $\beta$ . Se dibujan entonces las inclinaciones aparentes en las direcciones correspondientes y el Rumbo del plano  $\beta$  en la forma ya conocida y que se ilustra en la figura 22a. Se lleva luego el Rumbo de  $\beta$  al norte y se traza su inclinación (por el arco de circunferencia máxima que pasa por el punto 1, correspondiente a la inclinación conocida). A continuación, desde el norte, ya que la línea buza en esa dirección medimos los  $30^\circ$  correspondientes al hundimiento obteniéndose el punto 3 de la figura 22b. Giramos luego la red hasta que el punto 3 y la inclinación aparente del plano  $\alpha$  (punto 2) coincidan con la traza de un arco de circunferencia máxima. Se dibuja el diámetro y se miden Rumbo e inclinación en la forma habitual, de acuerdo con la figura 22c los valores obtenidos son: Rumbo Az  $102^\circ$  e  $i = 22^\circ$  al noreste para el plano  $\alpha$  y para  $\beta$   $i = 49^\circ$  al SE. La figura 22d muestra el diagrama resultante.

#### II.5.- Determinación del valor del ángulo entre dos planos

Es a veces necesario conocer el valor del ángulo determinado por la intersección de dos planos. Normalmente el valor que se mide es el máximo, es decir aquel ángulo determinado sobre un plano perpendicular a los dos en cuestión, y por lo tanto perpen-



dicular a la recta determinada por la intersección de los mismos. Por razones de representación, al trabajar con la red estereográfica el ángulo que se mide es aquel cuya bisectriz es más próxima a la vertical. Recuérdese que salvo que ambos planos sean perpendiculares la intersección de los mismos define dos pares de ángulos opuestos por el vértice, un par agudo y el otro obtuso.

#### II.5.a.- Medición sobre el plano perpendicular a ambos

Sean por ejemplo dos planos,  $\alpha$  y  $\beta$  cuyas actitudes son para  $\alpha$  Rumbo Az  $60^\circ$  e  $i = 50^\circ$  al sureste y para  $\beta$  Rumbo Az  $270^\circ$  e inclinación  $30^\circ$  al norte. De acuerdo a las técnicas ya explicadas dibujamos los planos y su intersección, obteniendo la figura 23a. Para encontrar el plano perpendicular a la línea de intersección llevamos ésta a la dirección este-oeste y medimos su buzamiento, que en el ejemplo es de  $12^\circ$ , tal como se ilustra en la figura 23b. Sin girar el transparente trazamos un diámetro en la dirección norte-sur y desde el extremo opuesto a la dirección de buzamiento de la línea se mide un ángulo de inclinación del plano igual al complemento del valor de buzamiento de la línea, es decir  $78^\circ$  y dibujando el arco de círculo máximo correspondiente obtenemos la traza del plano buscado. El mismo corta a los planos  $\alpha$  y  $\beta$  en los puntos A y B respectivamente. Medimos entonces el valor del ángulo comprendido entre ambos puntos sobre el arco AB, obteniendo un valor de  $104^\circ$ , por diferencia sabemos que el otro ángulo será de  $76^\circ$ .

#### II.5.b.- Medición sobre un plano cualquiera

Un procedimiento similar nos permite calcular fácilmente el valor del ángulo entre dos planos medido esta vez sobre un tercer plano no perpendicular a ellos.

Sean ahora dos planos  $\alpha$  y  $\beta$  cuyas actitudes son para  $\alpha$  Rumbo Az  $288^\circ$  e  $i = 25^\circ$  al NE y para  $\beta$  Rumbo Az  $35^\circ$  e  $i = 40^\circ$  al SE, los que se muestran en la figura 24. Se desea conocer el ángulo que forman entre sí las trazas de  $\alpha$  y de  $\beta$  sobre un plano  $\delta$  cuya actitud es Rumbo Az  $160^\circ$  e  $i = 38^\circ$  al suroeste. En la forma habitual se representan los tres planos. La intersección de  $\delta$  con  $\alpha$  y  $\beta$  determina los puntos A y B de la figura 24a. Se gira el transparente llevando el Rumbo de  $\delta$  a coincidir con el norte y sobre el arco correspondiente se mide el valor del ángulo entre A y B, que en el ejemplo es de  $122^\circ$  tal como se muestra en la figura 24b.

#### II.5.c.- Aplicación al estudio de estructuras planares

Estos métodos nos proporcionan una herramienta útil para reconstruir actitudes de planos de clivaje o de otro origen cuando debido a las características de las rocas dichos planos no se presentan como superficies directamente medibles, pero su traza es identificable sobre otros planos (diaclasas, etc).

Tomemos como ejemplo dos lineaciones de fractura que forman entre sí ángulos de  $48^\circ$  y  $132^\circ$  sobre un plano de Rumbo Az  $70^\circ$  e  $i = 70^\circ$  al sureste. Una de las trazas hunde  $30^\circ$  hacia el suroeste con respecto a la horizontal sobre el plano de medición y la otra

$78^\circ$  en la misma dirección. Sobre otro plano de Rumbo Az  $197^\circ$  e  $i = 40^\circ$  al oeste aparecen dos trazas que hunde  $47^\circ$  al sur y  $83^\circ$  al norte respectivamente. Estos datos están ilustrados en la figura 25. Se supone que sólo existen en el área tres direcciones de fractura y se desea verificar esta hipótesis y determinar la actitud de los tres planos. Para ello se procede de la siguiente manera: Sobre el transparente se marcan el norte, los planos conocidos y los puntos correspondientes a los hundimientos. Quedan así fijados los puntos A, B y C de la figura 25a. El punto B corresponde a la intersección de los dos planos cuyo rumbo se conoce. Para determinar la actitud del tercer plano llevamos los puntos A y C a coincidir con un arco de circunferencia máxima y trazamos la misma y su diámetro, obteniendo la figura 25b. Los valores correspondientes a las actitudes de los tres planos son:

F1 Rumbo Az  $197^\circ$  e  $i = 40^\circ$  al noroeste  
 F2 Rumbo Az  $70^\circ$  e  $i = 70^\circ$  al sureste  
 F3 Rumbo Az  $134^\circ$  e  $i = 70^\circ$  al suroeste

Se confirma así la hipótesis de la existencia de tres planos que en la figura 25c se presentan con el estereograma nuevamente orientado.

### III.- ROTACION DE LINEAS Y PLANOS

La proyección estereográfica nos permite realizar rápidamente y con exactitud rotaciones de líneas y planos, operación que puede ser de gran utilidad en el cálculo de actitudes de estratos por debajo de discordancias, o actitudes previas a una determinada rotación tectónica, o cálculo de paleocorrientes en secuencias inclinadas, etc. Tanto la proyección ciclográfica como la polar pueden ser utilizadas y las rotaciones pueden ser realizadas según ejes horizontales o inclinados.

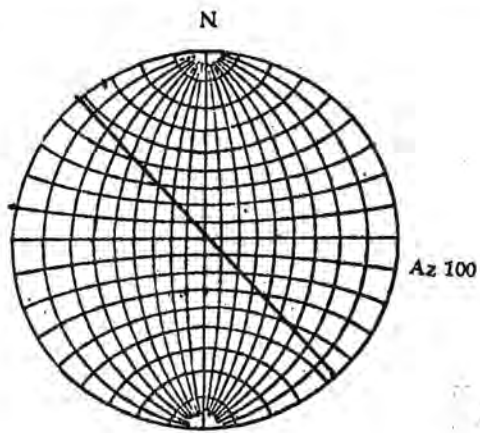
Cabe recalcar que al establecerse el sentido de giro del eje de rotación el observador o punto de referencia se encuentra ubicado fuera de la esfera de proyección y mirando hacia su centro. Esto es importante de tener en cuenta ya que según vemos en la figura 26 un giro determinado establecido en sentido horario al observarlo desde el centro del plano ecuatorial (Observador A) equivale al mismo giro, pero en sentido antihorario al observarlo desde un punto exterior a la hemisfera (Observador B). En forma opuesta se tiene que a un giro en sentido antihorario para el observador A corresponde un giro en sentido horario para el observador B. Es para facilitar la aplicación del sentido de giro, observado como ya se ha dicho desde fuera de la esfera de proyección, que se lleva la posición del eje de giro a la dirección sur, pues así el significado de los términos "en sentido horario" y "en sentido antihorario" es directo, produciéndose en el primer caso el desplazamiento de los puntos de derecha a izquierda sobre la red estereográfica, y en el segundo de izquierda a derecha, tal cual se ilustra en las figuras 27a y 27b respectivamente.

#### III.1.- Rotación según ejes horizontales

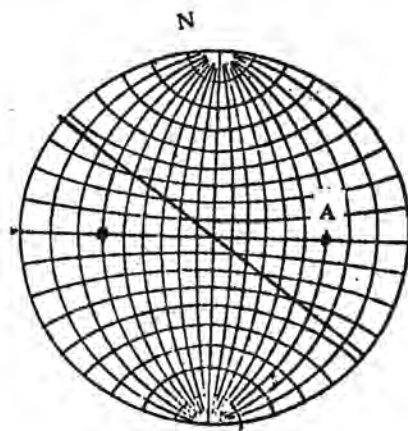
##### III.1.a.- Rotación de una línea

Es el caso más sencillo. Tomemos como ejemplo el caso de una línea que buza  $50$  en dirección Az  $90^\circ$  la que debe ser rotada  $48^\circ$  en sentido horario según un

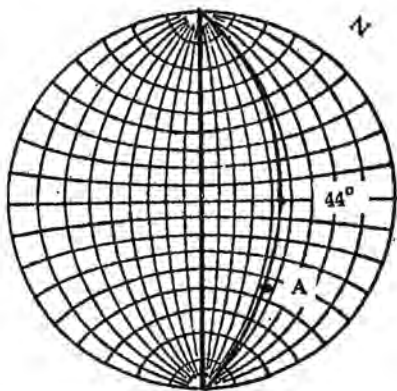




(a)

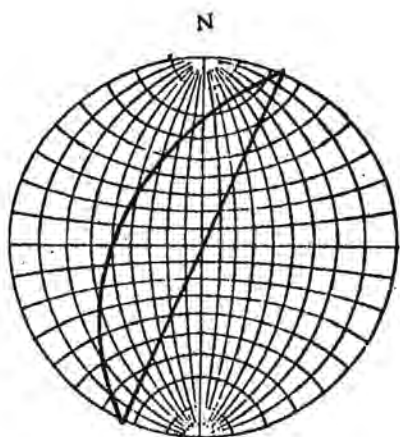


(b)

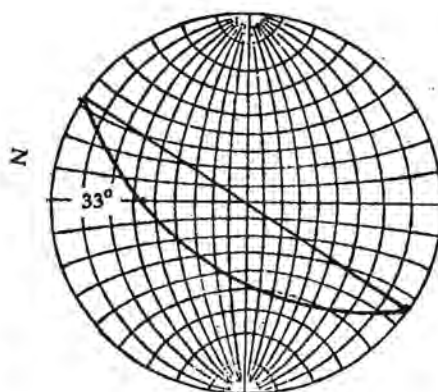


(c)

Figura 16

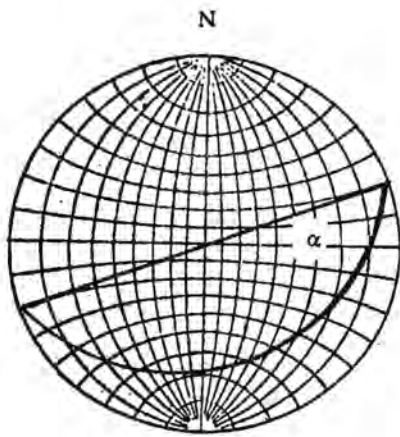
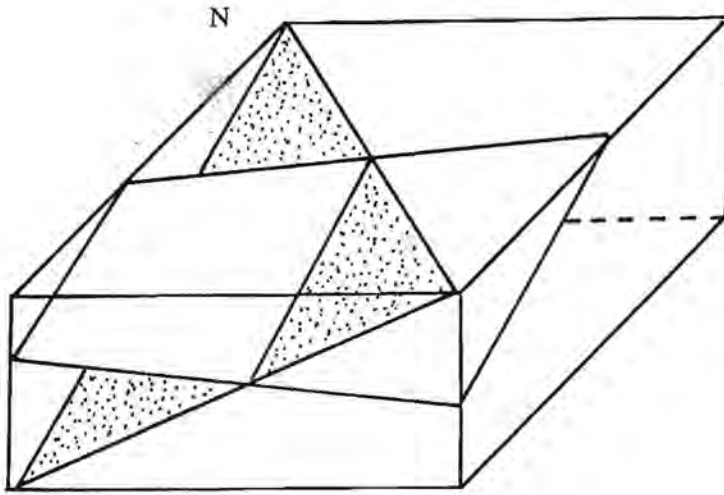


(a)

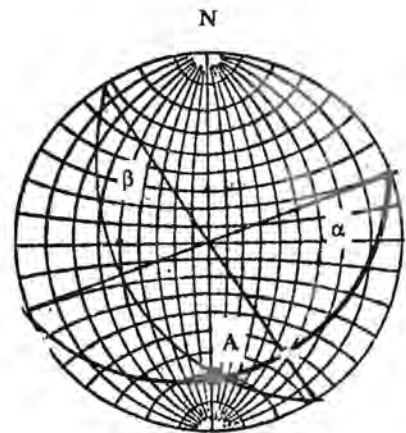


(b)

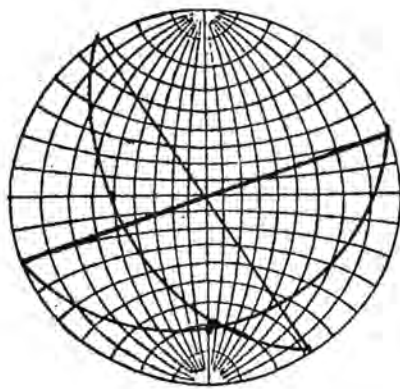
Figura 17



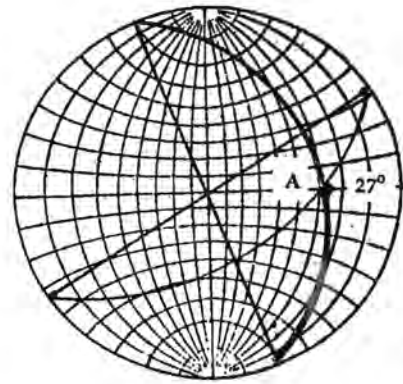
(a)



(b)

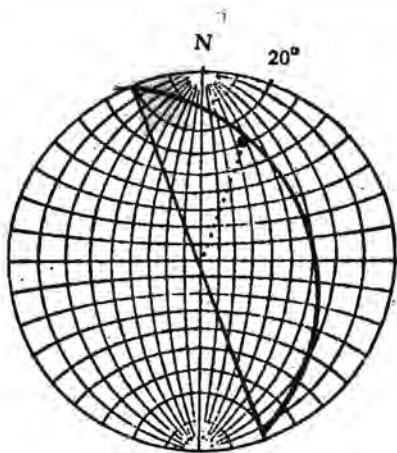


(c)

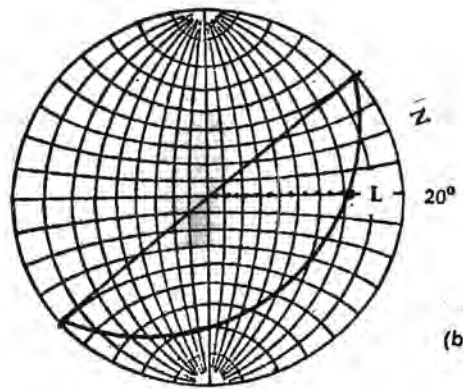


(d)

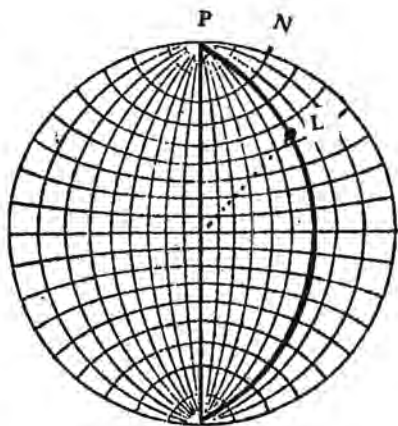
Figure 18



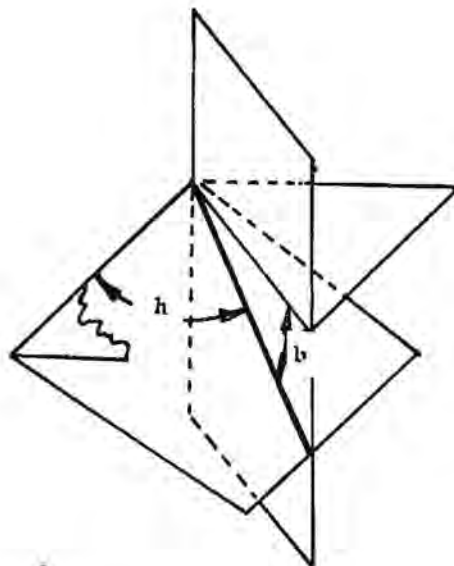
(a)



(b)



(c)

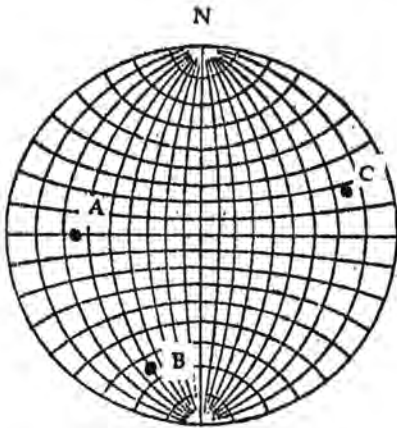
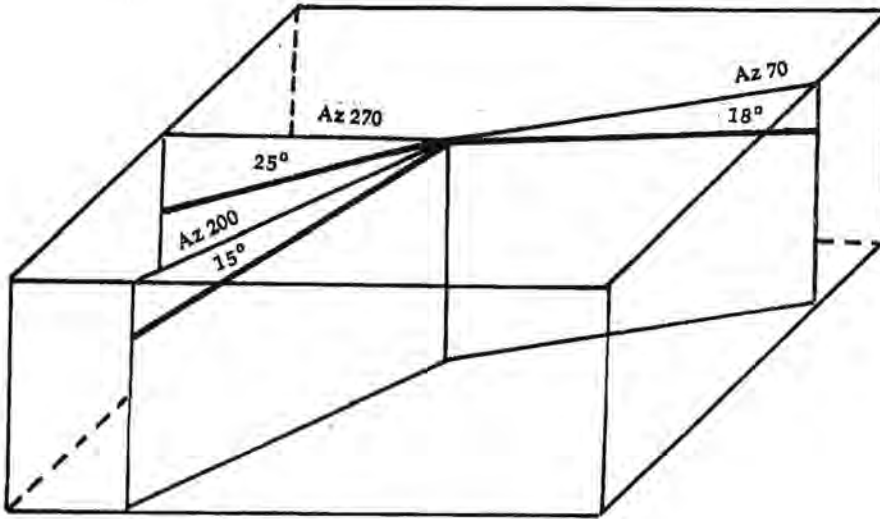


(d)

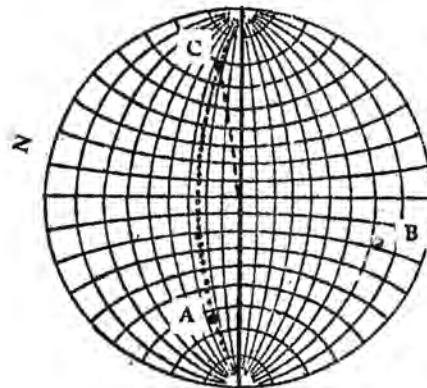
**h = hundimiento**

**b = buzamiento**

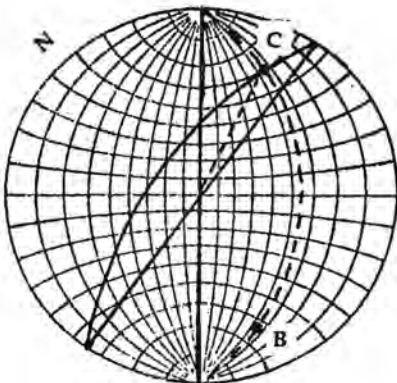
Figura 19



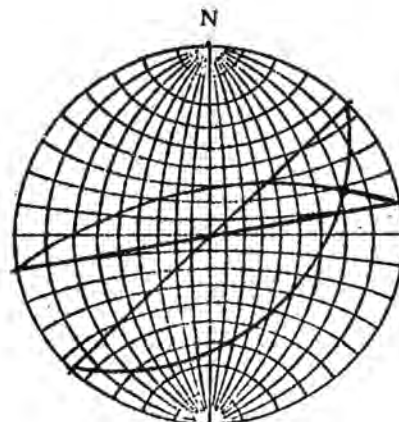
(a)



(b)

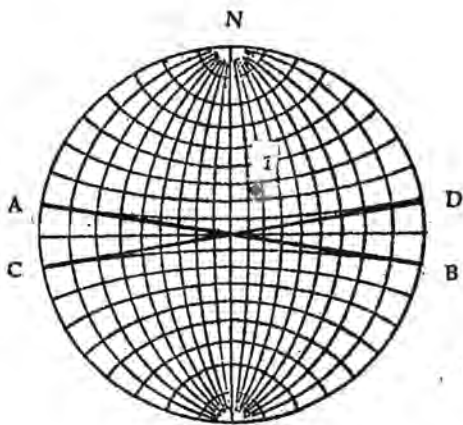
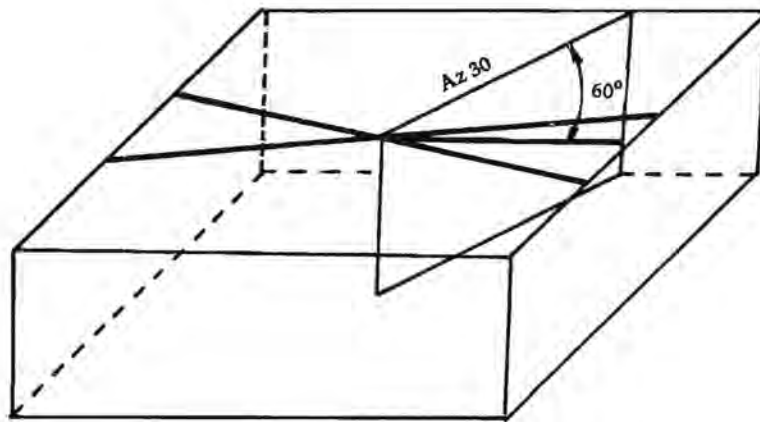


(c)

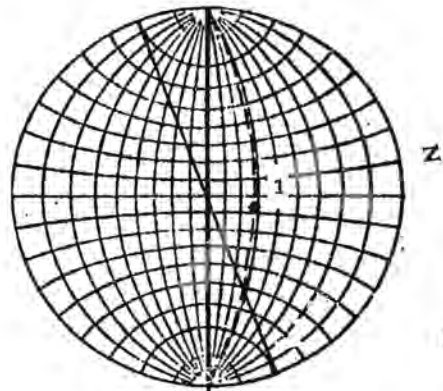


(d)

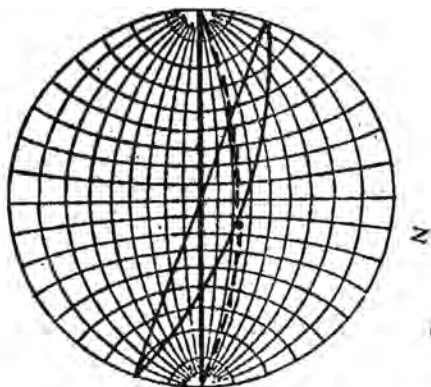
Figura 20



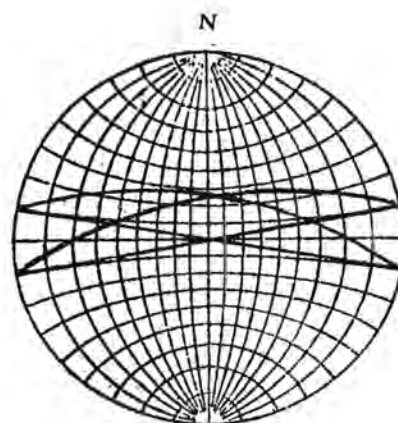
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 21



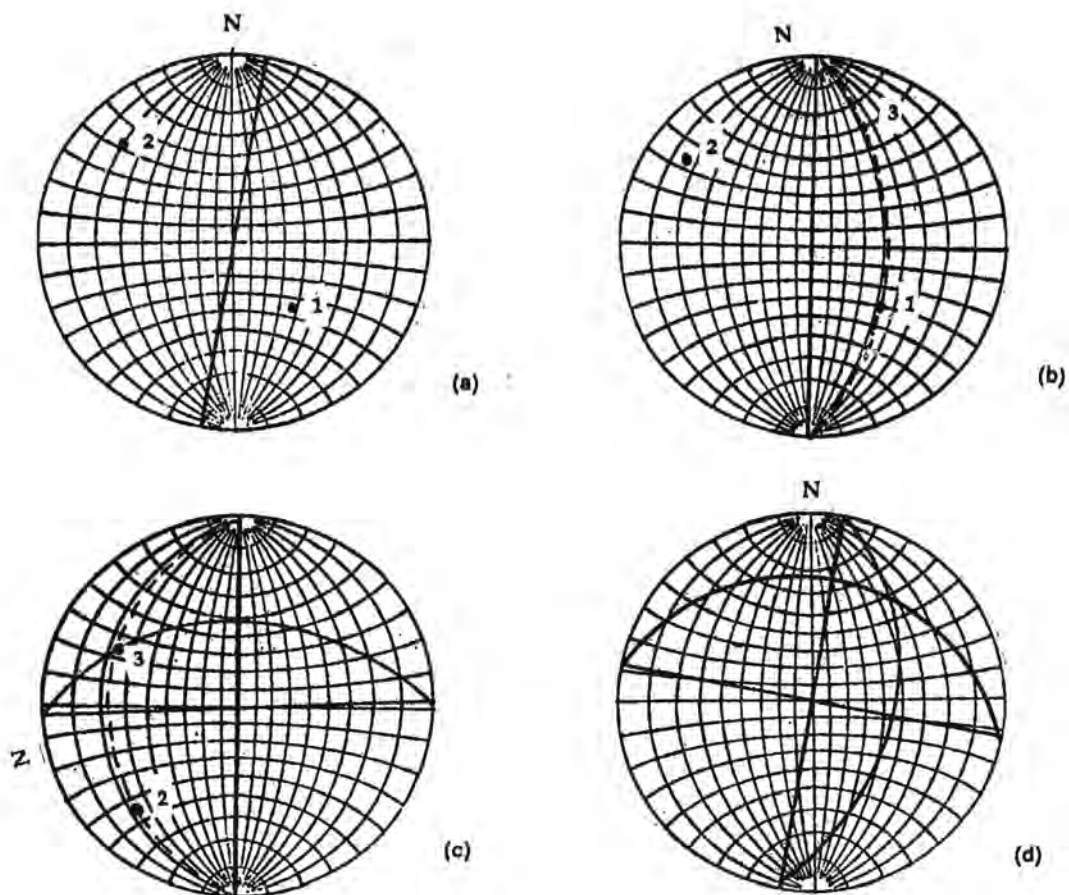
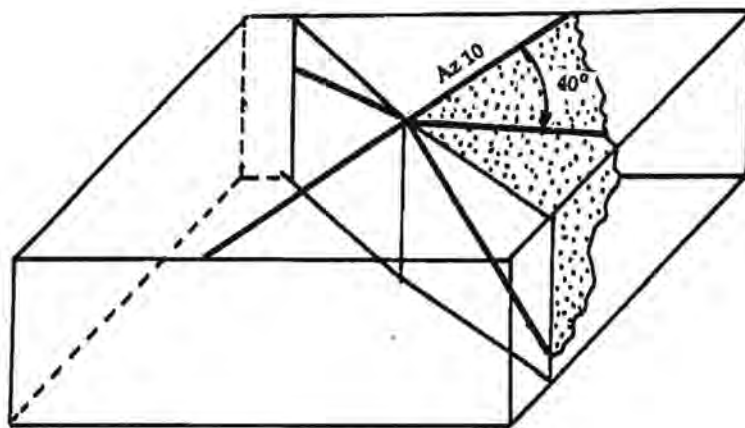
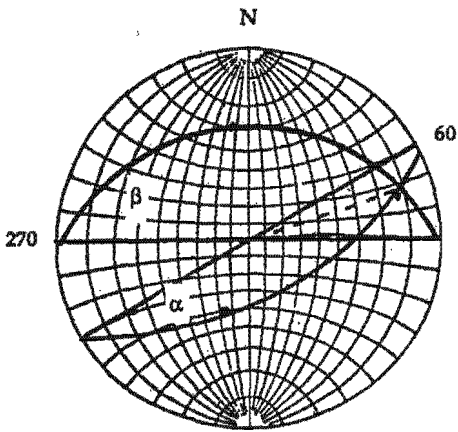
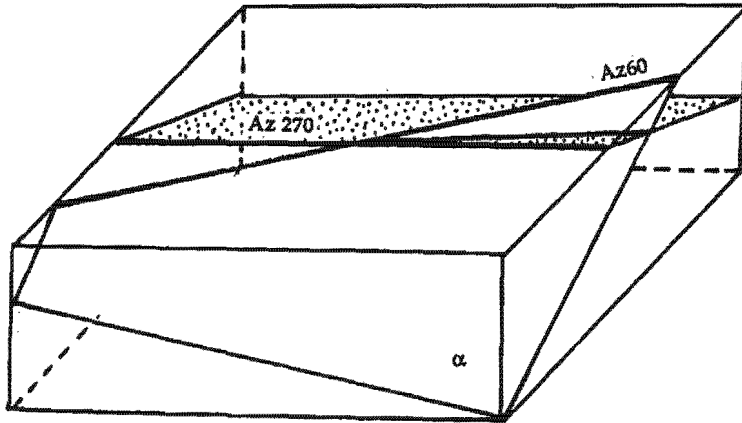
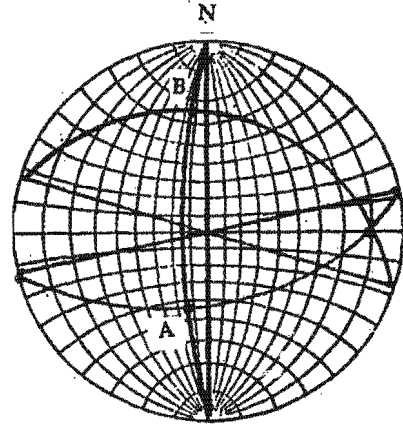


Figura 22



(a)



(b)

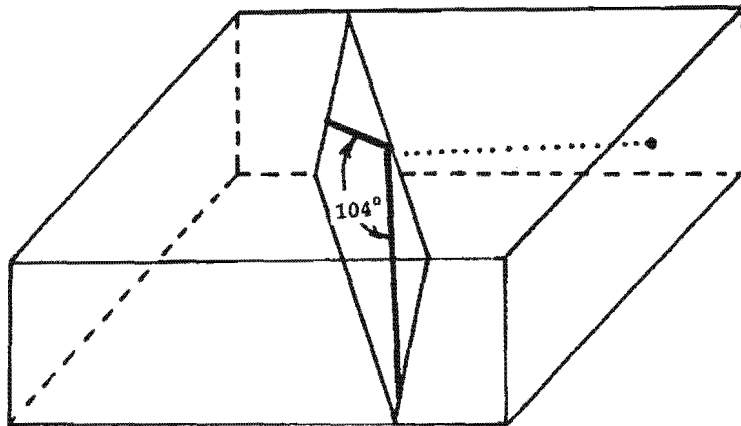
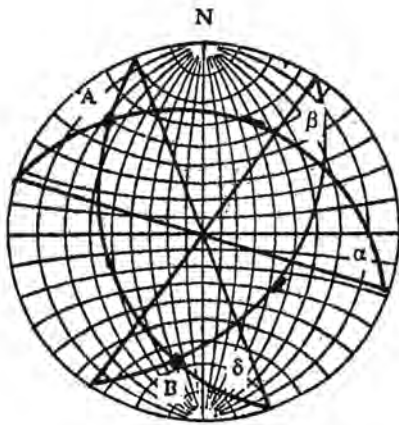
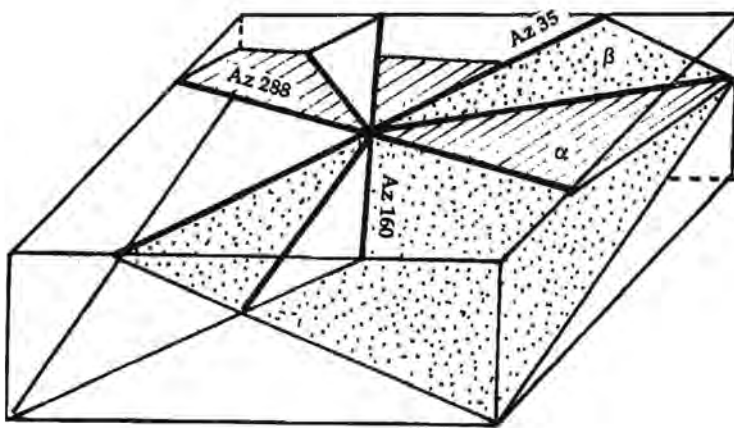
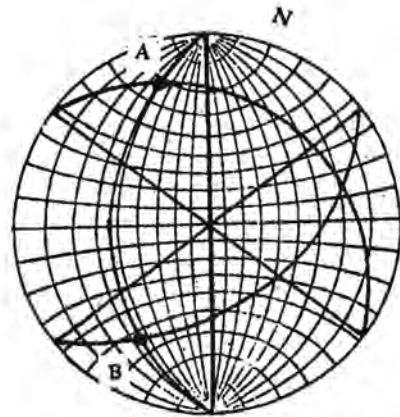


Figura 23



(a)



(b)

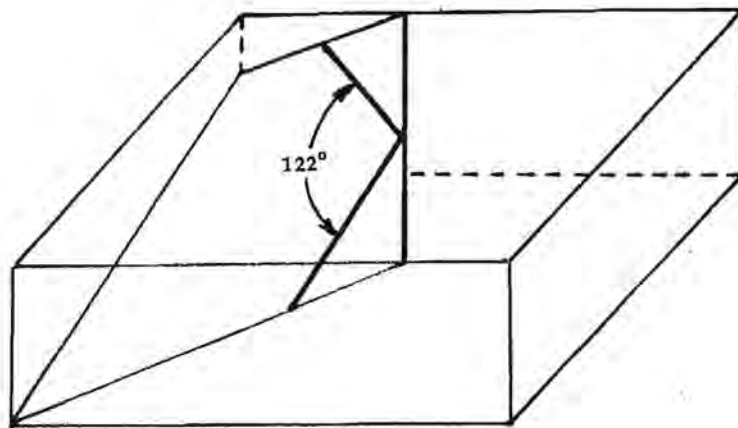
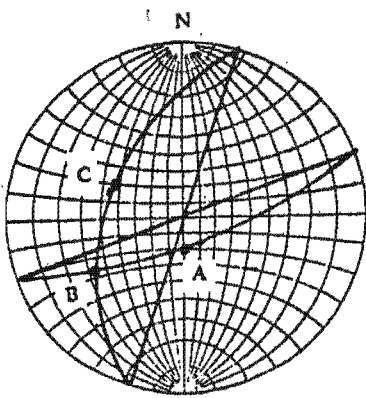
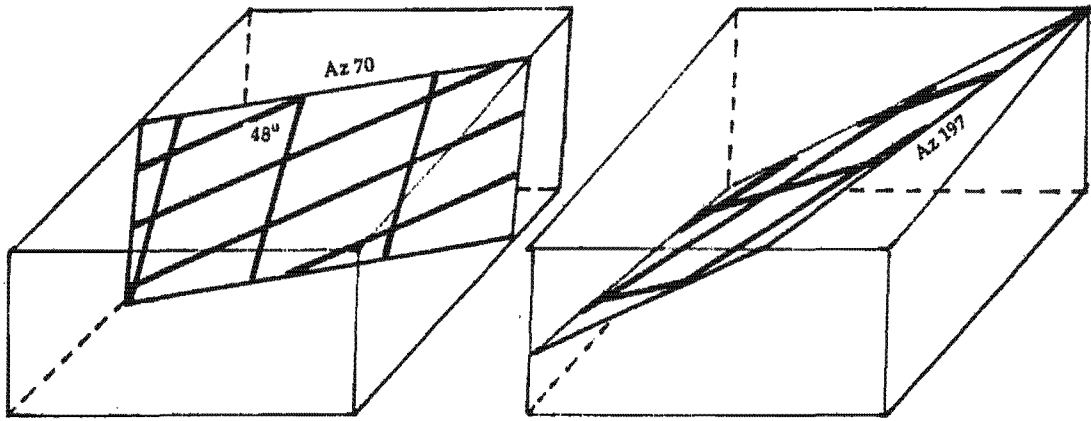
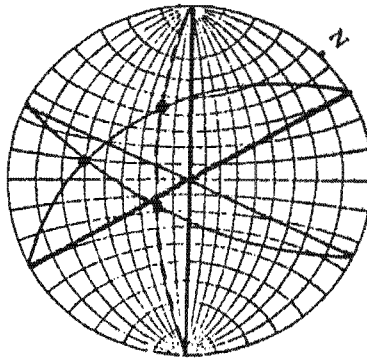


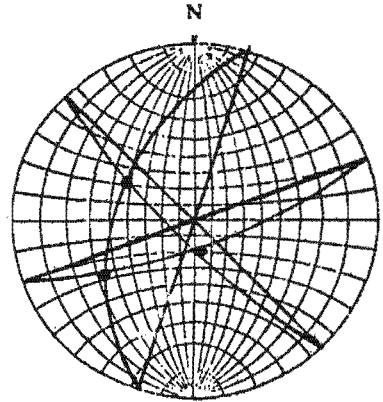
Figura 24



(a)



(b)



(c)

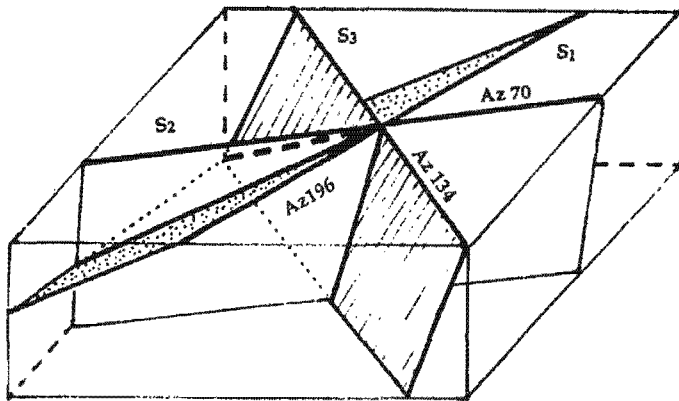
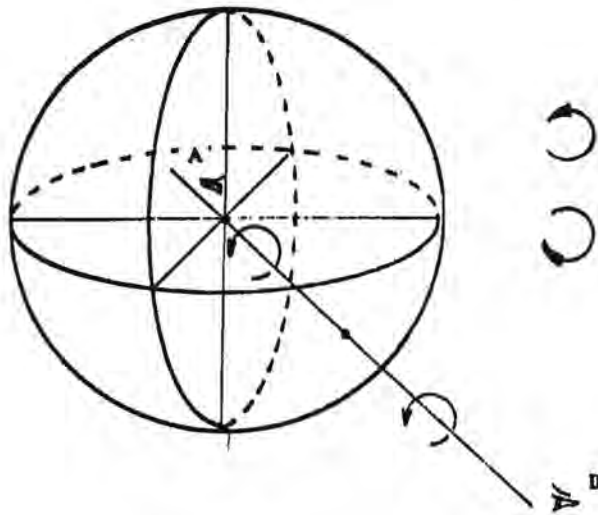


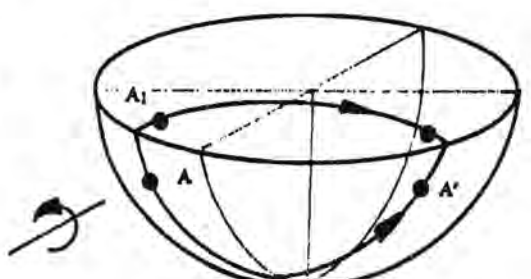
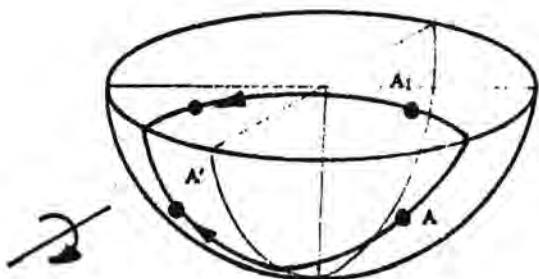


Figura 25

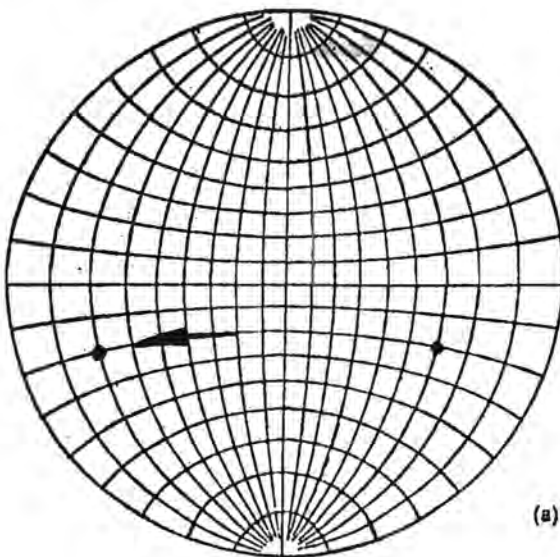


 Observador en B  
 Observador en A

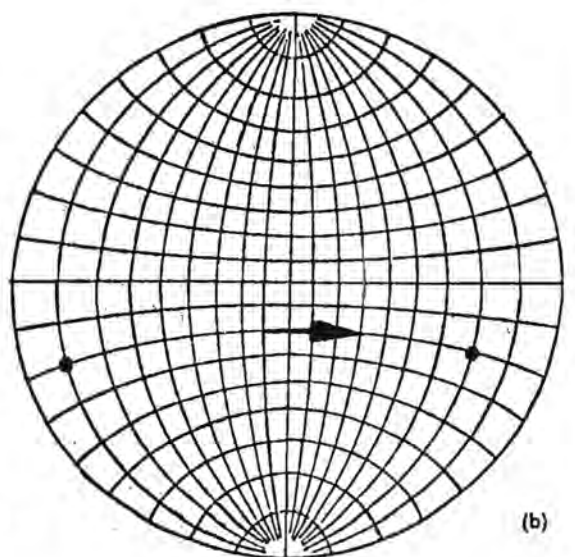


N

Figura 26  
N



(a)



(b)

Figura 27



eje horizontal de dirección Az 150°. En la figura 28a se muestra la red de Wulff con los datos representados, identificándose con la letra A la posición del punto que señala la actitud de la recta. A continuación se lleva el eje de rotación a la dirección norte-sur, tal como se muestra en la figura 28b. Teniendo en cuenta que la rotación debe efectuarse en sentido horario y que la proyección se realiza sobre el hemisferio inferior al efectuar el giro del eje el punto A debe desplazarse hacia la izquierda, hasta ocupar la posición A' señalada en la figura 28b, recorriendo los 48° requeridos sobre un arco de circunferencia menor. Para leer los valores de buzamiento y dirección de la recta se lleva el punto A' a la dirección este-oeste y se leen los mismos. En el ejemplo y tal como se ilustra en la figura 28c se obtiene un valor de buzamiento de 79° en la dirección Az 180°. En la figura 28d se han llevado a coincidir los nortes de la red y el transparente para mostrar cada elemento en su posición real. En la figura 29 se ha esquematizado la secuencia de pasos seguidos sobre la hemisfera de proyección.

### III.1.b.- Rotación de un plano

Para ejemplificar la rotación utilizaremos primero la proyección ciclográfica y luego la proyección polar para el mismo caso de un plano de Rumbo Az 45° e inclinación 60° al sureste, el cual debe ser rotado 40° en sentido antihorario por un eje horizontal de dirección Az 120°.

1º) Mediante proyección ciclográfica: De acuerdo con las técnicas ya explicadas se representa el plano y el eje de rotación obteniéndose la figura 30a, se lleva luego el eje de rotación a la dirección norte-sur, tal como se ilustra en la figura 30b, se eligen 3 ó 4 puntos sobre el arco de circunferencia que representa el plano y que han sido señalados como A, B, C y D. Como el sentido de giro establecido es antihorario los puntos deben desplazarse hacia la derecha sobre el plano de proyección y siempre, como es lógico, sobre el arco de circunferencia menor correspondiente a cada punto. Se obtienen así los puntos A', B', C' y D', separados 40° de los anteriores. Se gira el transparente hasta que los cuatro puntos hallados coincidan en un nuevo arco de circunferencia máxima, tal como se muestra en la figura 30c y se traza el mismo. En esta posición se lee la inclinación correspondiente al plano y su Rumbo se obtiene llevando a coincidencia ambos nortes, el resultado final Rumbo Az 44° e  $i = 61^\circ$  al sureste se muestra en la figura 30d y en la figura 31 se ilustra la secuencia seguida.

Puede darse el caso que al trasladar uno de los puntos elegidos sobre el arco de circunferencia menor se llegue al borde de la red antes de completar el número de grados exigidos para la rotación. Tal sería el caso ilustrado en la figura 32a, en la que el punto A debía ser rotado 60° en sentido antihorario según el eje horizontal norte-sur y al desplazarlo hacia la derecha se llega al borde al contar 25°, por lo cual los 35° restantes deben contarse desde el punto antípoda, tal como se ilustra en la figura 32b, en la que se ha señalado la posición final de A'.

2º) Mediante proyección polar: Para la resolución del mismo ejemplo de la figura 30 empleando la proyección polar se parte de la representación de los

datos tal como se ilustra en la figura 33a, se lleva luego el eje de rotación a la dirección norte y se desplaza el polo del plano (identificado con la letra P en la figura 33b) hasta la nueva posición P'. Se gira a continuación este punto P' hasta la dirección este-oeste y se mide el ángulo entre el centro y el punto P', tal como se ilustra en la figura 33c, obteniéndose así la inclinación del plano, ya que la misma es el complemento del buzamiento de la perpendicular al mismo que determina el polo. Se marca entonces el punto correspondiente al extremo sur (identificado con la letra Q en la figura 33c) y se gira el transparente hasta coincidencia de los nortes. Se lee entonces, tal cual se ilustra en la figura 33d el Az correspondiente al Rumbo del plano. Como era de esperar el valor obtenido, Rumbo Az 41° e  $i = 60^\circ$  al sureste comparable con el resultado obtenido aplicando la proyección ciclográfica.

### III.2.- Rotación según ejes inclinados

La técnica es esencialmente similar a la anterior, pero con el agregado que, siendo el eje de rotación inclinado es necesario llevar el mismo a la horizontal (para lo que se utiliza un eje de rotación auxiliar) antes de realizar la rotación requerida, naturalmente al desplazar el eje de rotación hacia la horizontal se desplaza también solidariamente el elemento, línea o plano, a rotar. Una vez hecho esto y rotado el sistema hasta su nueva posición todo el conjunto es nuevamente girado en forma inversa a la inicial hasta llevar el eje de giro principal a su posición inclinada original.

#### III.2.a.- Rotación de una línea

Para el caso de una línea tomemos como ejemplo una que buza 30° en dirección Az 90°. La misma debe ser girada 60° en sentido horario por un eje que buza 80° en dirección Az 45°. Al representar los datos se obtiene la figura 34a, en la cual se ha identificado con la letra L la posición de la línea y con X la del eje de rotación. Se lleva a continuación el punto X a la dirección este-oeste y mediante el eje auxiliar Y se produce un giro en sentido antihorario que lleva el punto X hasta X'. Como L debe desplazarse tantos grados como X y llega al borde la red antes de haber completado los 80° se debe continuar el conteo desde el extremo diametralmente opuesto. Esta secuencia se ilustra en la figura 34c. A continuación se lleva el punto X' a la dirección sur y se gira el conjunto tal como se pedía 60° en sentido horario por lo que el punto L' se desplazará hacia la izquierda hasta L'' tal como muestra la figura 34d. Luego y para llevar nuevamente el sistema a la posición inicial se gira el transparente hasta que X' quede en la dirección este y se gira el eje auxiliar Y en sentido horario hasta que X' vuelva a X y L'' se desplaza, no hasta L, pues existe un giro intermedio, sino hasta el punto L''' de la figura 34e, que es su posición definitiva. Se lleva este punto a la dirección este-oeste para determinar el buzamiento (figura 34f) y luego al llevar a coincidencia los nortes se determina el Az correspondiente (figura 34g). Una vez girada según los datos del problema la recta adquiere un buzamiento de 21° en la dirección Az 50°.

### III.2.b.- Rotación de un plano

1ª) Mediante proyección ciclográfica: Tomemos por ejemplo un plano de Rumbo Az  $45^\circ$  e  $i = 70^\circ$  al noroeste, el cual debe ser girado  $30^\circ$  en sentido horario por un eje buzante  $60^\circ$  en dirección Az  $180^\circ$ . En la figura 35a se representan estos elementos habiéndose identificado con la letra X la posición del eje. Se lleva a continuación el punto X a la dirección este-oeste y mediante el eje auxiliar Y que gira en sentido antihorario se lleva X hasta X'. En forma solidaria, y tal como se ilustra en la figura 35b, los puntos F, G y H pertenecientes al plano se desplazan hasta las posiciones F', G' y H'. Se lleva luego el punto X' a la dirección sur y como el eje debe moverse en sentido horario los puntos se desplazan hacia la izquierda dando origen a F'', G'' y H'' de la figura 35c. Al volver a la dirección este-oeste y revertir el sentido del giro auxiliar los puntos se desplazan a las posiciones F''', G''' y H''' que son las definitivas y se muestran en la figura 35d. Se gira ahora el transparente para buscar el arco de circunferencia máxima que contenga a estos tres puntos y se traza el mismo. Tal como puede verse en la figura 35e la actitud correspondiente al plano después de rotarlo es Rumbo Az  $24^\circ$  e inclinación  $56^\circ$  al noroeste.

2ª) Mediante proyección polar: La rotación de planos mediante ejes inclinados es mucho más sencilla utilizando la representación polar, pues en lugar de tener que realizar el desplazamiento de tres puntos como en el ejemplo anterior basta con uno solo, ya que el hecho de que el polo sea un punto en la superficie de la hemisfera hace que la técnica sea similar a la utilizada en el caso de la línea. En la figura 36a se han representado los datos correspondientes al mismo ejemplo anterior, identificándose con X la posición del eje y con P la del polo correspondiente al plano. Al llevar X a la dirección este-oeste y girarlo por el eje auxiliar, el mismo se desplaza hasta X' y el punto P hasta P', tal como se muestra en la figura 36b. Se gira luego el transparente hasta llevar X' al sur y se produce el giro de  $30^\circ$  en sentido horario, lo que desplaza el punto P' hasta P'' tal como puede verse en la figura 36c. A continuación se gira el transparente hasta la posición de la figura 36b y se vuelve atrás el giro auxiliar introducido. El punto P'' se desplaza hasta P''' (figura 36d) y éste es el polo del plano ya rotado, cuya actitud (buzamiento  $34^\circ$  en dirección Az  $114^\circ$ ) es concordante con el valor obtenido aplicando la técnica anterior según puede verse en la figura 36e.,  $R = \text{Az } 22^\circ$  e  $i = 57^\circ$  al noroeste.

Como es lógico, si la rotación impuesta al eje, cualquiera sea su posición, es de un giro completo, es decir  $360^\circ$ , el punto obtenido en tercer lugar (P''' en el ejemplo) debe coincidir con el punto origen (P en el ejemplo). Esto se ilustra en la figura 37a en la cual un plano de Rumbo Az  $180^\circ$  e  $i = 45^\circ$  al oeste debe ser girado  $360^\circ$  mediante un eje X que buza  $45^\circ$  en dirección Az  $180^\circ$ . En la figura 37b se observa el desplazamiento de P hasta P' al girar el eje auxiliar  $45^\circ$  en sentido antihorario. En la figura 37c se ve como al contar  $360^\circ$  para el giro del eje X (al ser un giro completo es indiferente realizar el mismo hacia el sentido horario o antihorario) el punto P'' se ubica coincidente con P' por lo que al volver el sistema a la

posición de la figura 37b y revertir el giro auxiliar el punto P'' vuelve hasta P', por lo tanto P''' coincide con éste.

### III.2.a.- Variación a la técnica anterior

Una variación a esta técnica consiste en hallar la posición del eje de rotación auxiliar, llevando tanto el eje de rotación principal como el punto a rotar a coincidir sobre un arco de circunferencia máxima (en lugar de llevar el eje de rotación principal a la dirección este-oeste como antes), y una vez hallado el plano común a ambos se gira éste hasta la horizontal, de tal forma ambos puntos (el que determina la posición del eje de rotación principal y el que representa el elemento a rotar) pasan a la periferia de la red. Se lleva luego el eje de giro a la dirección norte y se impone la rotación pedida, el procedimiento continúa luego en forma análoga al anterior. El siguiente ejemplo permitirá ilustrar el desarrollo de esta técnica: sea el caso de un plano de Rumbo Az  $60^\circ$  e inclinación  $70^\circ$  al sureste. El mismo debe ser rotado  $130^\circ$  en sentido antihorario por un eje buzante  $45^\circ$  en dirección Az  $180^\circ$ . En la figura 38a se ha identificado con X la posición del eje y con P la del polo del plano. Se gira el transparente hasta que P y X coincidan en un arco de circunferencia máxima, determinándose así la posición del eje auxiliar, y se gira éste hasta que P y X pasan a ocupar los puntos P' y X' en la periferia de la red, obteniéndose la figura 38b. Se vuelve a girar el transparente llevando el punto X' a la dirección sur y se produce el giro de  $130^\circ$  en sentido antihorario. Según puede observarse en la figura 38c, el punto P' al tener que ser girado en sentido antihorario se desplaza hacia la derecha, por el arco de circunferencia menor correspondiente los  $130^\circ$  pedidos hasta ocupar el punto P''. Se vuelve a girar el transparente hasta llevar el eje auxiliar nuevamente a la posición sur y se revierte la rotación introducida mediante el mismo, obteniéndose la figura 38d, en la que puede observarse como el punto P'' se ha desplazado hasta P'''. Puede determinarse entonces la nueva actitud del polo que buza  $22^\circ$  en el Az  $264^\circ$  ( $R = \text{Az } 354^\circ$  e inclinación  $68^\circ$  al este para el plano) tal como se ilustra en la figura 38e.

### III.2.d.- Método del plano auxiliar

Otra técnica, quizás la más sencilla, ya que elimina el pasaje del eje de giro inclinado a la horizontal y su posterior restitución a la posición original consiste en utilizar para la medición del ángulo de rotación un plano auxiliar. Este plano auxiliar es perpendicular al eje de giro y la técnica se basa en la utilización del plano que contiene el eje de giro y al polo que se desea rotar, teniendo en cuenta que la distancia angular entre la intersección del plano auxiliar y este último es constante.

Supongamos un ejemplo que requiere un giro de  $30^\circ$  en sentido horario, efectuado según eje que buza  $30^\circ$  en dirección Az  $270^\circ$ , sobre un plano de Rumbo Az  $190^\circ$  e  $i = 80^\circ$  al noroeste. Sobre el papel transparente se traza el norte como es costumbre, se marca la posición del eje de rotación (X) y el polo del plano que debe ser rotado (P) tal como se observa en la figura 39a. A continuación se traza la actitud del

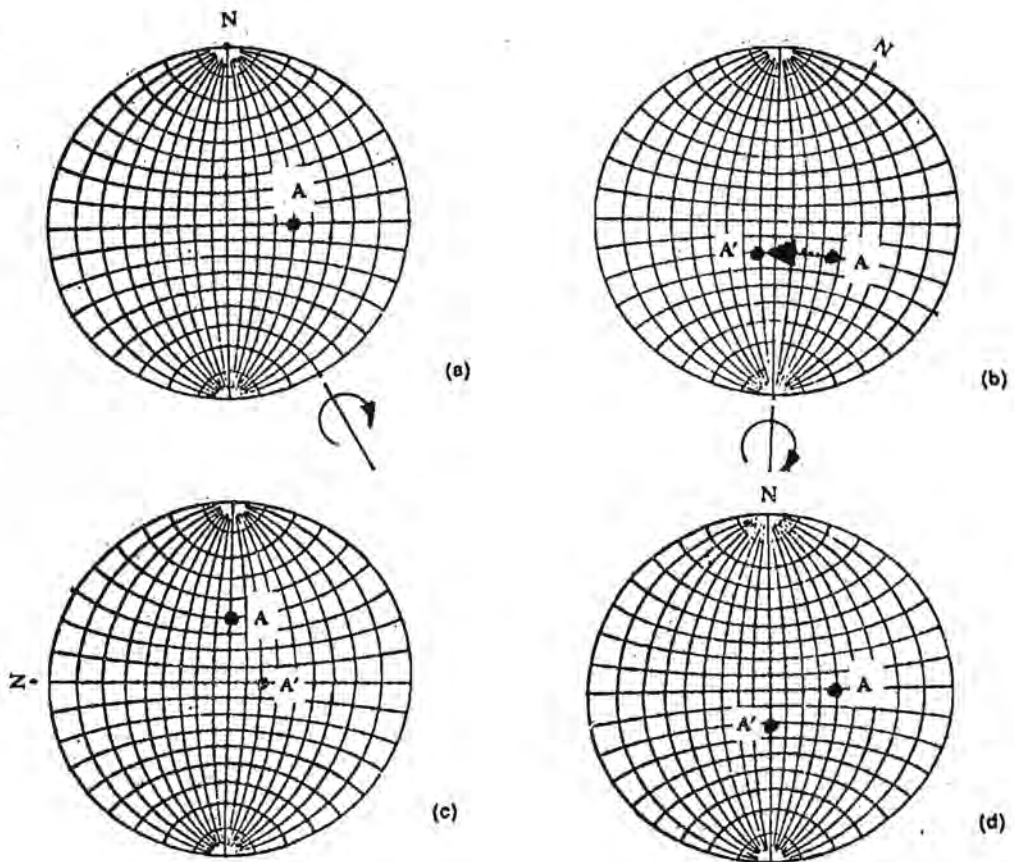


Figura 28

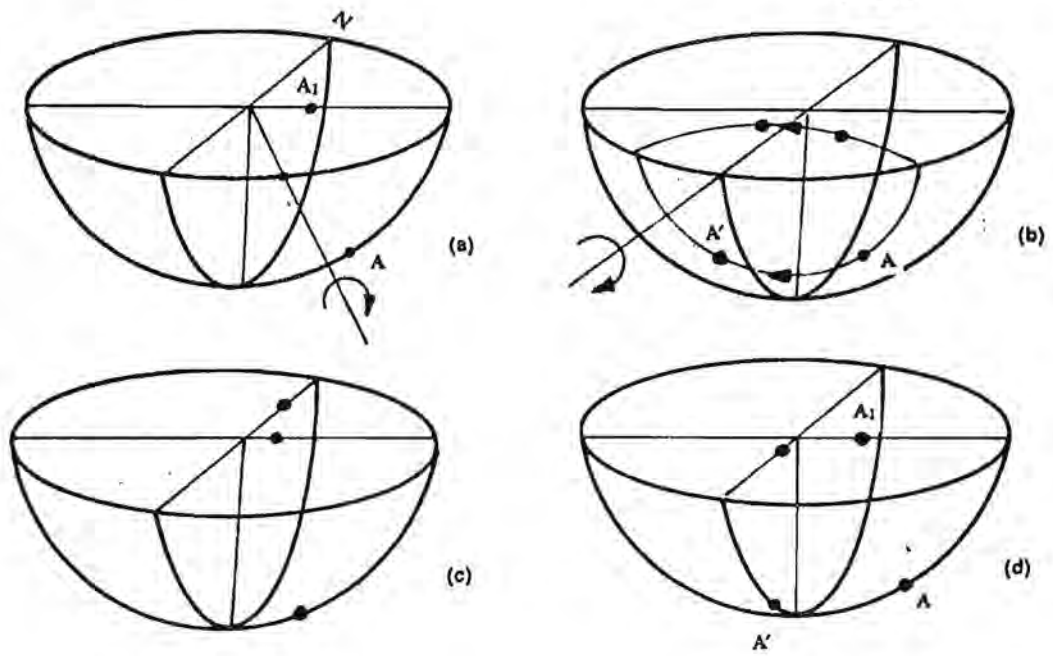


Figura 29

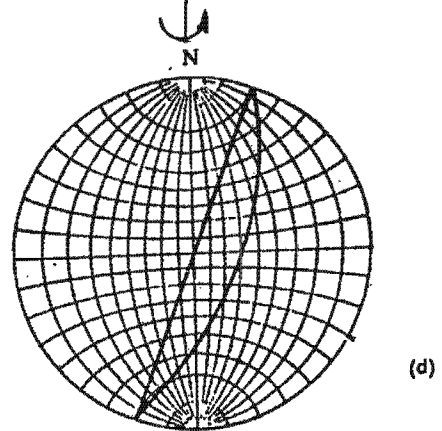
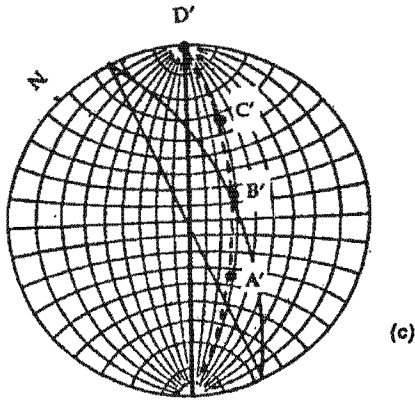
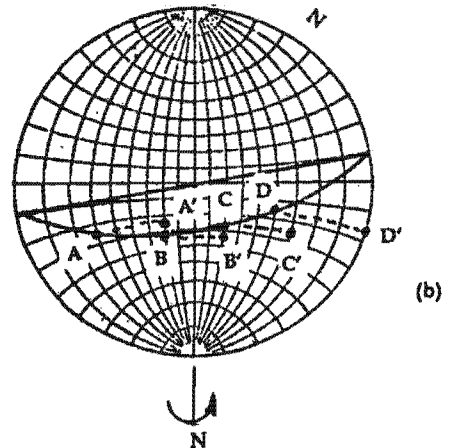
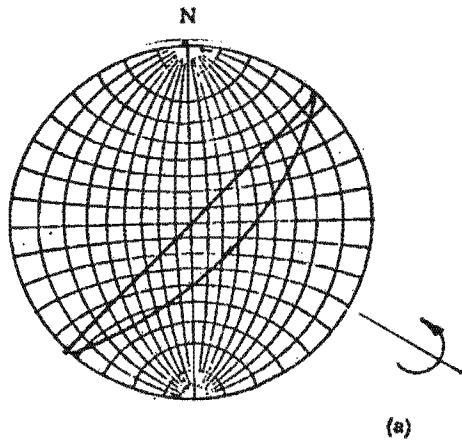


Figura 30

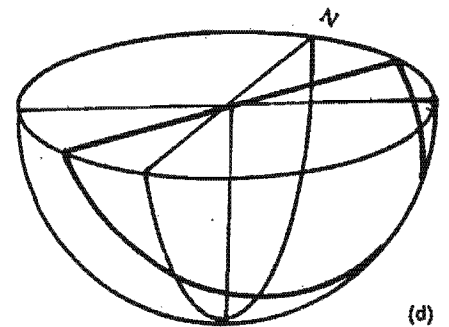
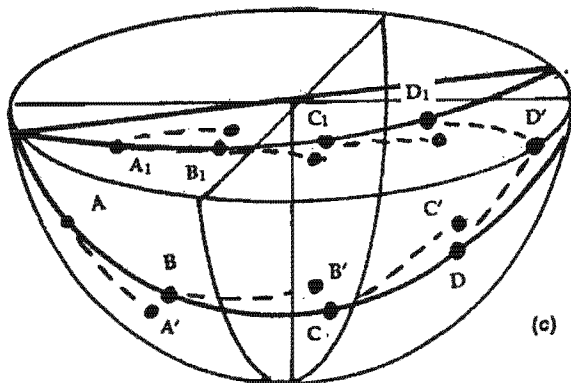
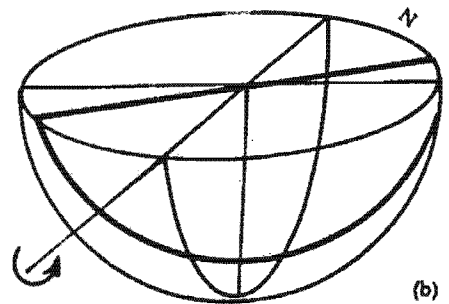
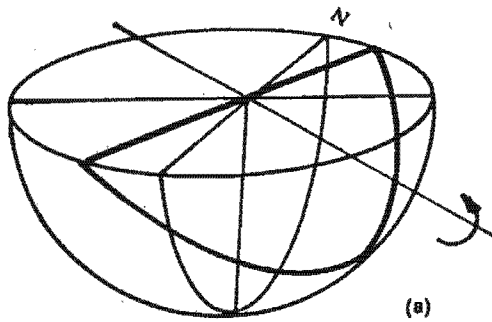
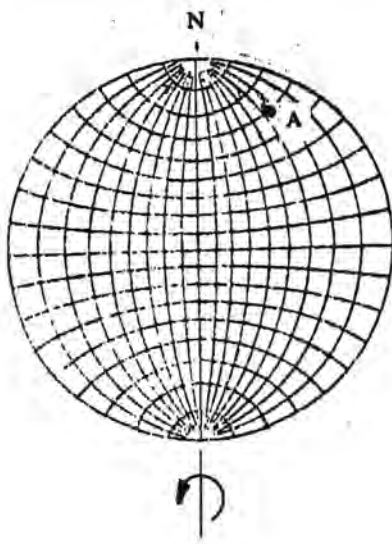
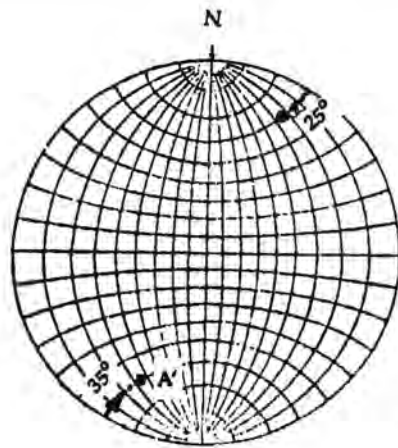


Figura 31

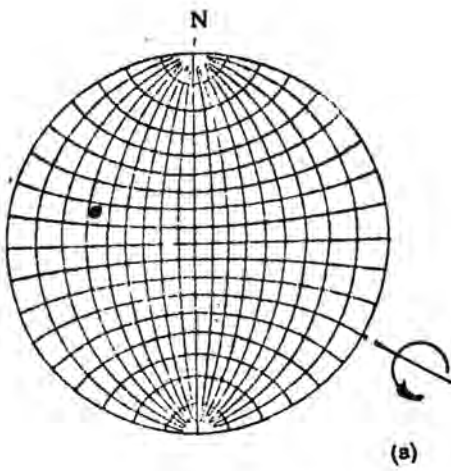


(a)

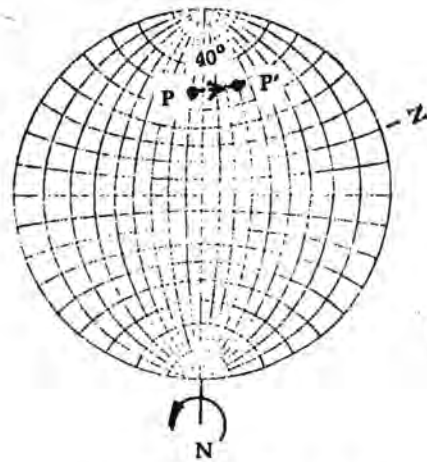


(b)

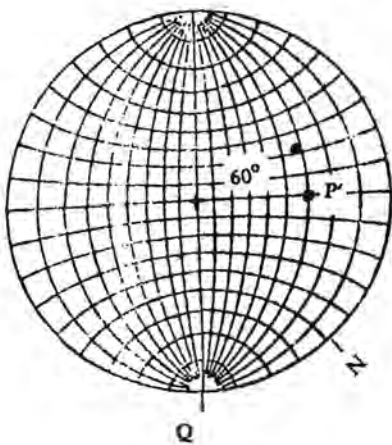
Figura 32



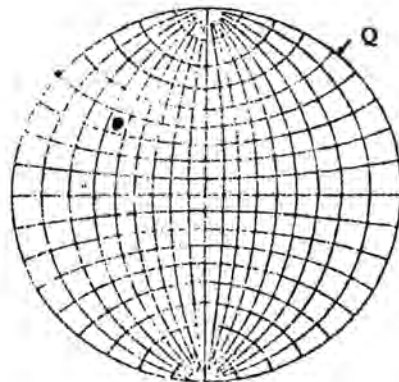
(a)



(b)



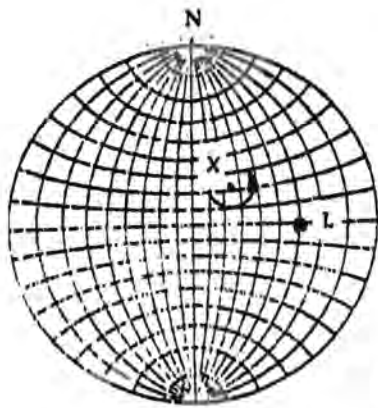
(c)



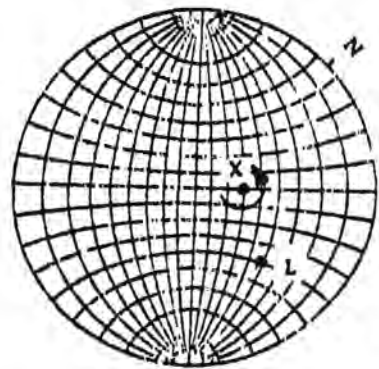
(d)

Figura 33

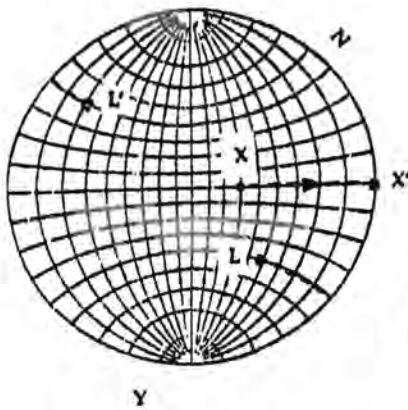




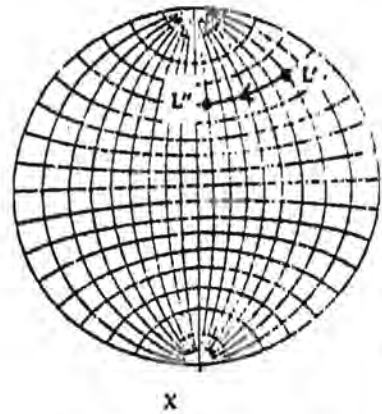
(a)



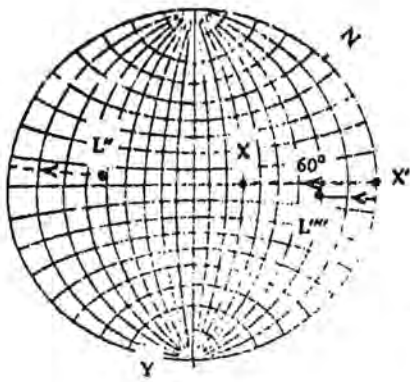
(b)



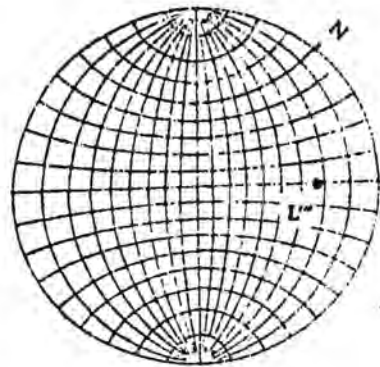
(c)



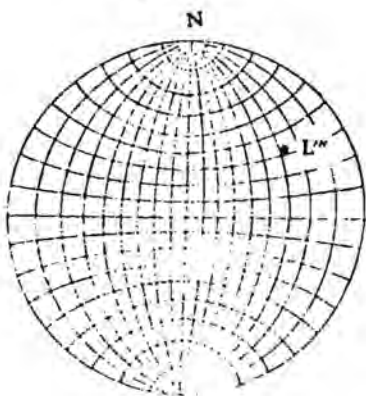
(d)



(e)

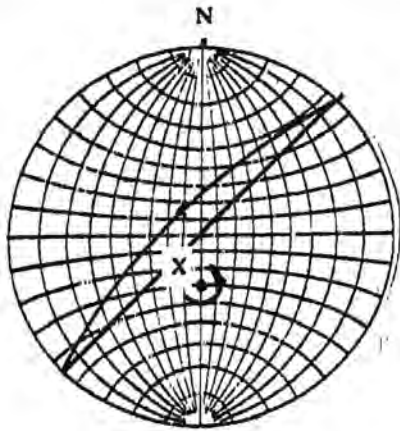


(f)

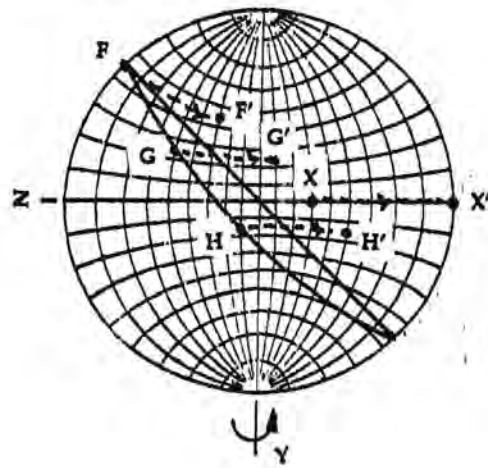


(g)

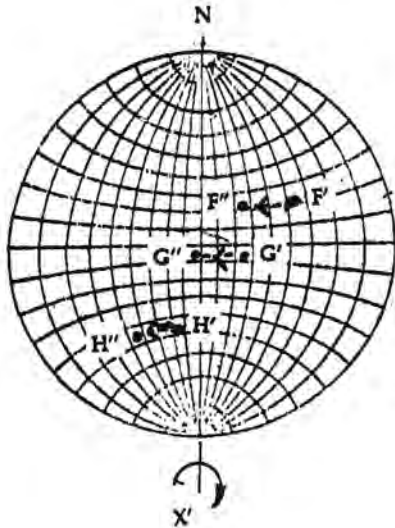
Figura 34



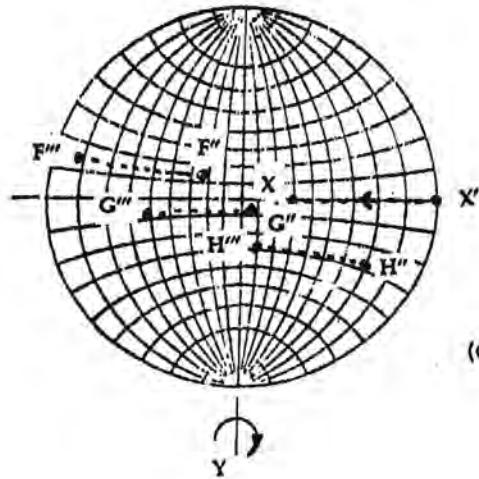
(a)



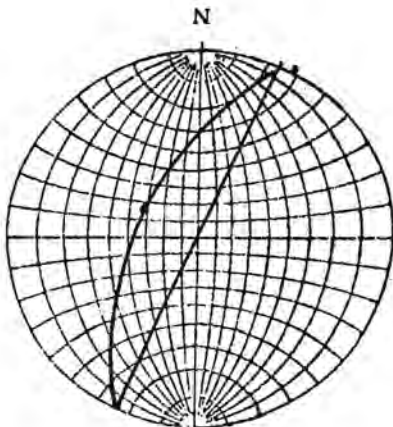
(b)



(c)

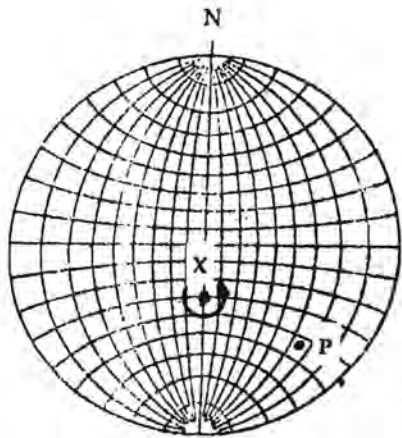


(d)

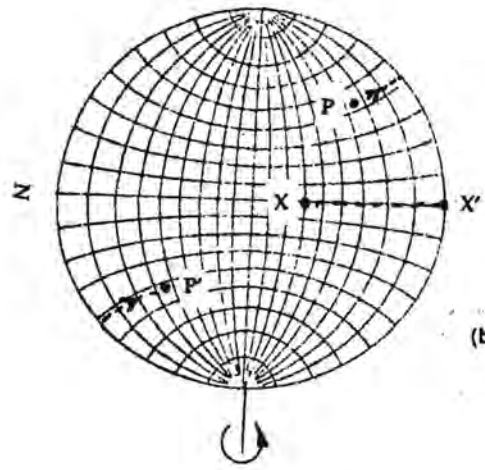


(e)

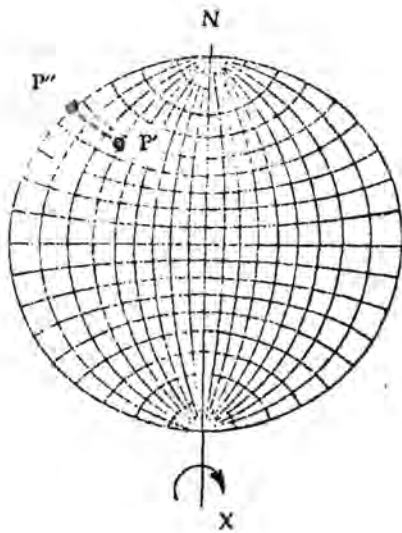
Figura 35



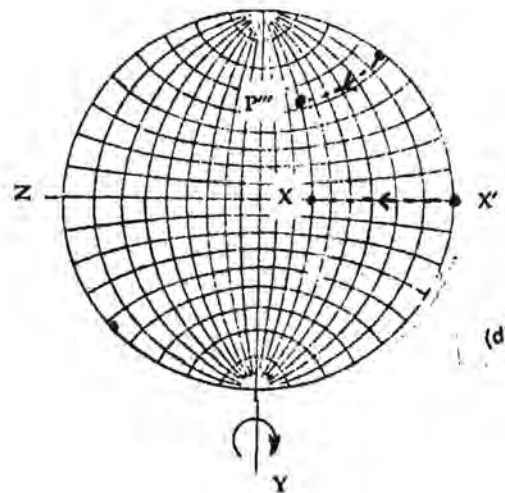
(a)



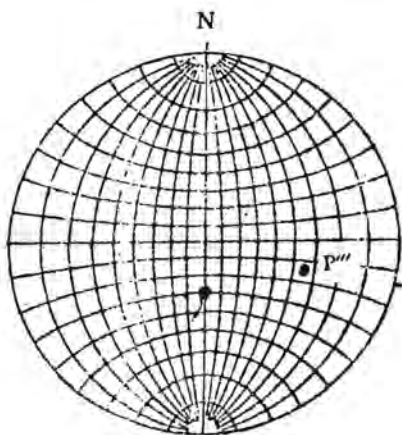
(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 36

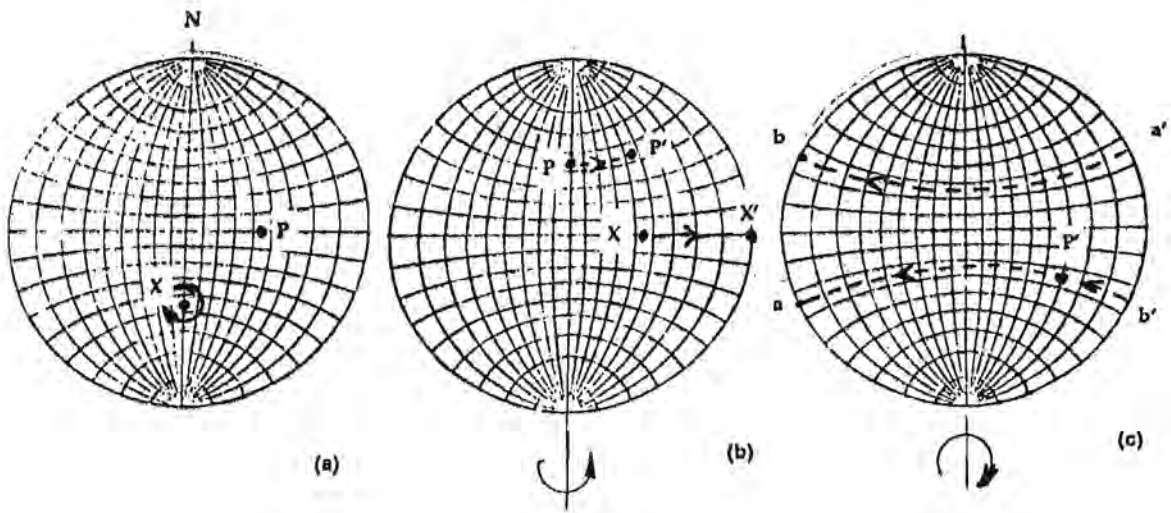


Figura 37

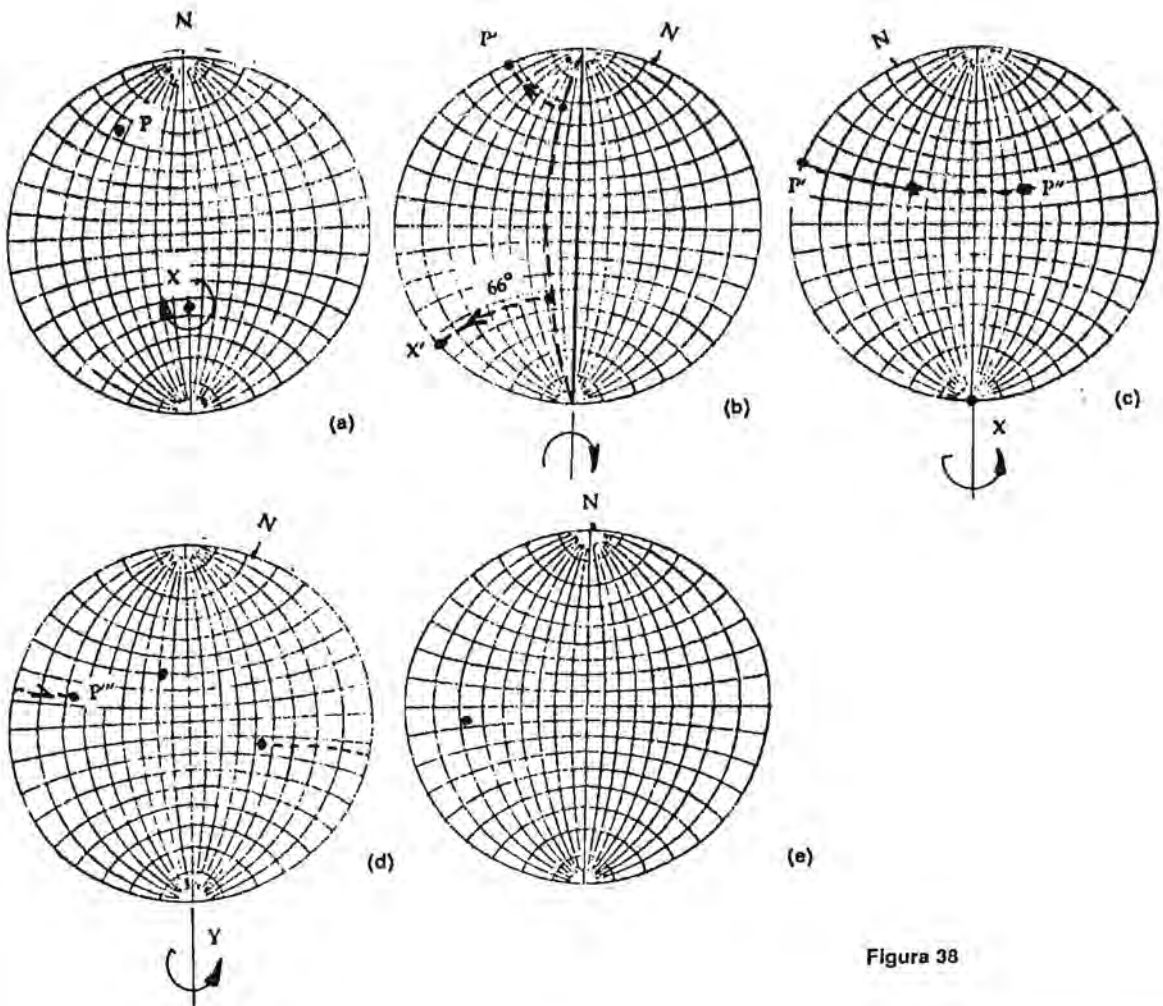
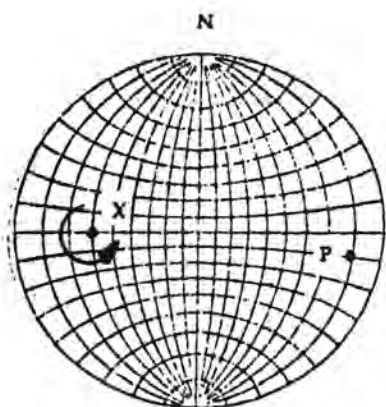
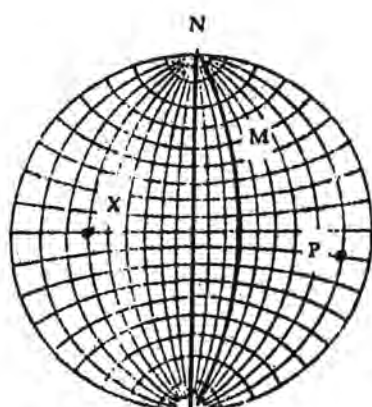


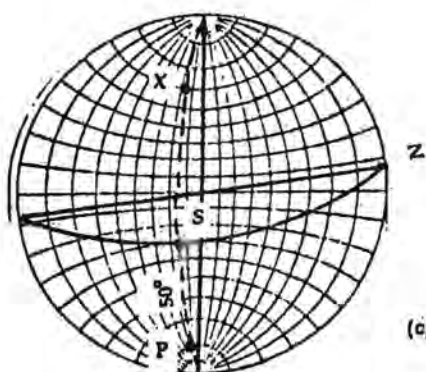
Figura 38



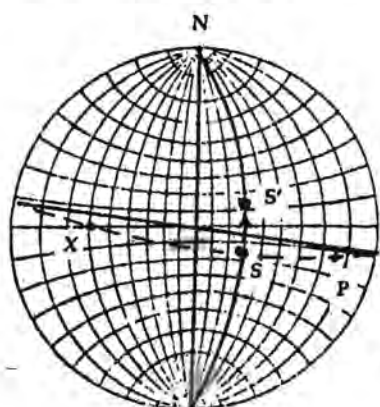
(a)



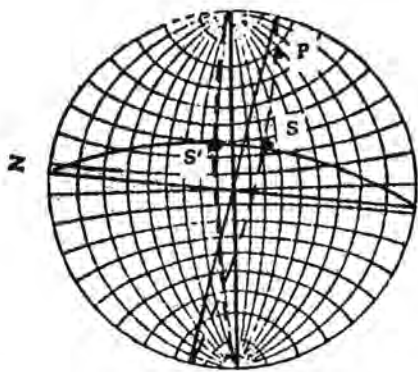
(b)



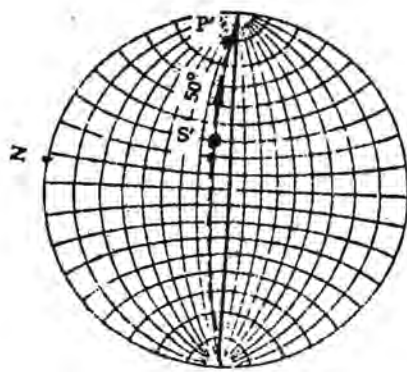
(c)



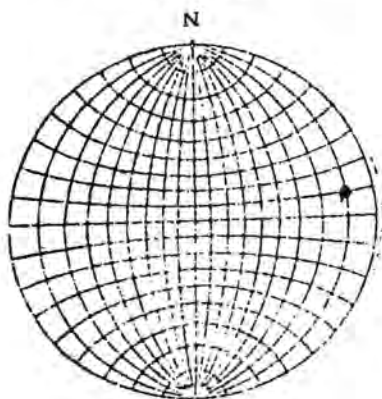
(d)



(e)



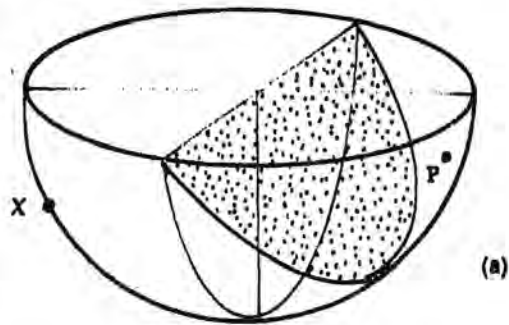
(f)



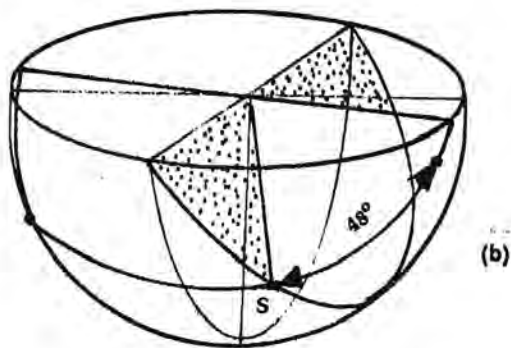
(g)

Figura 39

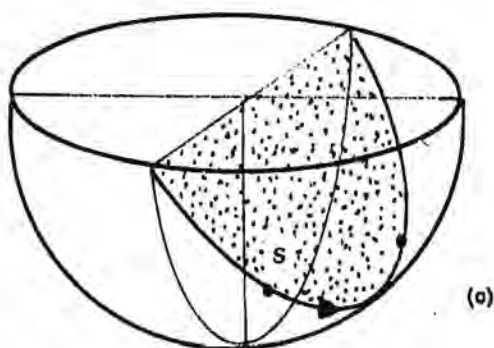




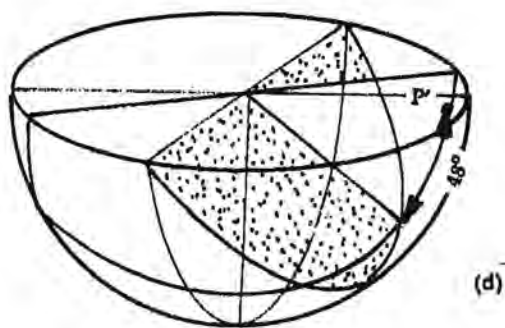
(a)



(b)

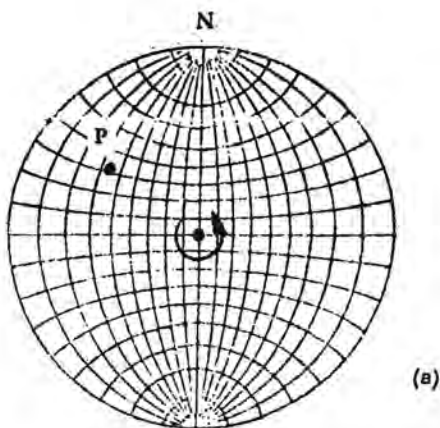


(c)

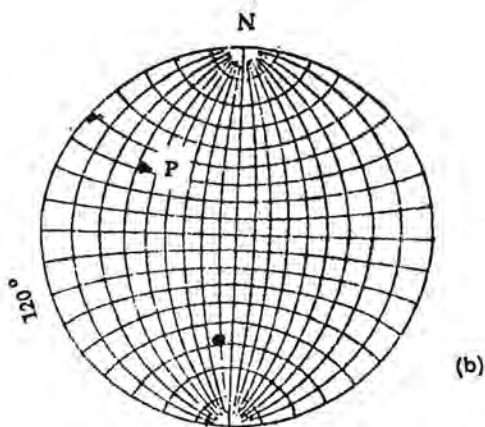


(d)

Figura 40



(a)



(b)

Figura 41

plano perpendicular a X. Para ello se lleva X a la dirección este-oeste (en este caso en particular, como el eje buza en la dirección Az  $270^{\circ}$ , ya está en esa dirección), luego desde el punto X y hacia el centro de la red se cuentan  $90^{\circ}$  y se marca el arco de circunferencia máxima que pasa por ese punto, tal como se ilustra en la figura 39b. Se gira luego el transparente hasta que el punto X y el punto P coincidan sobre un arco de circunferencia máxima y se traza ésta, el punto en el cual se intersecan este plano y el auxiliar M se señala con la letra S en la figura 39c. Se mide el ángulo entre S y P, en el ejemplo  $50^{\circ}$ . A continuación, sobre la traza del plano auxiliar M y a partir del punto S, hacia el extremo norte de la red (dado que se pedía un giro en sentido horario) se cuentan los  $30^{\circ}$  que debe girar el eje. Se encuentra así el punto S' de la figura 39d. Se traza a continuación un nuevo arco de circunferencia máxima, tal que pase por el punto X y el punto S', ilustrado en la figura 39e. El polo debe encontrarse sobre este plano y a una distancia de  $50^{\circ}$  del punto S. Se mide dicha distancia y se halla la posición de P', la cual se halla ilustrada en la figura 39f y corresponde, según se ilustra en la figura 39g a un buzamiento de  $10^{\circ}$  en el Az  $82^{\circ}$  para el polo, es decir que el plano tiene ahora una inclinación de  $80^{\circ}$  al suroeste y un Rumbo Az  $172^{\circ}$ . En las figuras 40a a 40d se da un esquema tridimensional de los fundamentos del método.

### III.3.- Rotación según ejes verticales

La rotación según ejes verticales es sumamente sencilla y se explicará solamente para un caso de representación polar, ya que aún tratándose de un caso de representación ciclográfica, la individualización de tres o cuatro puntos cualesquiera sobre el arco de circunferencia máxima que representa al plano a rotar y la aplicación a cada uno de ellos de la técnica que se explicará permite la resolución de dicho problema. Sea un plano cuya actitud es R Az  $37^{\circ}$  e  $i = 60^{\circ}$  al sureste, el cual debe ser girado  $120^{\circ}$  en sentido horario por medio de un eje vertical. Como siempre se coloca el transparente sobre la red y se señala la posición del norte y del polo del plano (P), al que corresponde un buzamiento de  $30^{\circ}$  en la dirección Az  $307^{\circ}$ , tal como se muestra en la figura 41a. El eje de rotación X se encuentra en el centro de la red. Sobre el borde de la misma y en sentido antihorario se cuentan los  $120^{\circ}$  y se marca un punto (que coincidirá con el Az  $187^{\circ}$ , se lleva luego éste a la dirección este-oeste y se cuentan los  $30^{\circ}$  correspondientes al buzamiento del polo, determinándose la posición de P', tal como ilustra la figura 41b.

Debe recordarse que, de acuerdo a lo ya destacado, el observador se encuentra fuera de la esfera de proyección, por lo tanto tratándose de un eje vertical se encontraría en el nadir, si el sentido de giro es horario para dicho observador el desplazamiento debe ser antihorario sobre el papel.

Obviamente no es necesaria la representación gráfica para las rotaciones verticales, pues con sólo sumar o restar (según el caso) el ángulo de giro al Az del Rumbo del elemento a rotar, se obtiene la nueva posición, pero se lo describe aunque sea brevemente a título informativo.

## IV.- DETERMINACION DE ACTITUDES A PARTIR DE DATOS OBTENIDOS DE TESTIGOS

Debido a la dificultad inherente a la obtención de testigos orientados cuando se realizan perforaciones, y por lo tanto a la imposibilidad de medir directamente Rumbos e inclinaciones sobre aquellos, numerosas son las técnicas que se han desarrollado para obtener el máximo de información a partir de la menor cantidad posible de perforaciones. Estos métodos pueden ser incluso empleados en aquellos casos en los que no existen niveles correlacionables, pero que sí corresponden a una misma secuencia.

Antes de desarrollar los diferentes métodos es conveniente recordar como se obtienen los datos que se utilizarán. En la figura 42 se muestra en esquema un trozo de testigo en el cual se indica como *a* el eje de la perforación y como *b* la traza del plano de estratificación. El ángulo entre el eje del testigo y el plano de estratificación se denomina en inglés "hade" y es el ángulo que determinan la recta eje del testigo y una recta paralela al plano de estratificación que buza según la máxima inclinación del mismo. La medición de este valor se realiza rotando el testigo hasta que al observarlo lateralmente la traza de la estratificación aparece como una línea recta, según se ilustra en la figura 43b.

En el caso de perforaciones verticales el valor del hade es complementario del de la inclinación verdadera del plano de estratificación. Al hacer rotar el testigo sobre su eje la línea que marca la dirección de la inclinación verdadera describirá un doble cono tal como el que se muestra en la figura 44. Por otra parte si contamos con dos testigos, que originan sendos conos, si bien a cada uno corresponde un número infinito de Rumbos (todos los planos tangentes al cono) sólo aquellos que sean comunes a ambos conos tendrán posibilidades de existencia real, (siempre y cuando, por supuesto, la actitud de la secuencia entre ambos puntos de perforación se mantenga constante). Para ilustrar esto en la figura 45 se han representado una perforación vertical a la que corresponde un hade de  $30^{\circ}$  y otra inclinada cuyo eje buza  $50^{\circ}$  en dirección Az  $90^{\circ}$  y el hade correspondiente es de  $30^{\circ}$ . Dado que en este caso no existe un horizonte guía, ambas perforaciones pueden dibujarse como originadas en el mismo punto (aunque en realidad esto no sea así) ya que sólo calcularemos la actitud del plano y no su distancia a otro punto determinado, o cualquier otro parámetro que involucre mediciones de distancias. En la figura 45a se han representado los conos que se originarían por rotación del testigo, y en la figura 45b el esquema correspondiente al modelo estereográfico. La proyección en la red de Wulff se muestra en la figura 45c. Como ya se ha dicho antes, los planos tangentes a ambos conos serán los que definan los dos rumbos posibles, en este caso Rumbo Az  $70^{\circ}$  e  $i = 60^{\circ}$  al noroeste y R Az  $110^{\circ}$  e  $i = 60^{\circ}$  al suroeste respectivamente.

### IV.1.- Métodos basados en la proyección ciclográfica

Antes de comenzar a exponer los diferentes métodos debe destacarse como una importante propiedad

de la proyección estereográfica que las circunferencias trazadas sobre la superficie de la esfera de proyección, (como por ejemplo al ser intersecada ésta por una superficie cónica), se proyectan sobre el plano ecuatorial como circunferencias.

Los métodos desarrollados son muy diversos, algunos implican para su resolución la rotación de los ejes de las perforaciones hacia la horizontal para dibujar las intersecciones de los conos con la semiesfera inferior como arcos de circunferencias menores de la red estereográfica (los "paralelos" de la red) y otros dibujan las circunferencias menores directamente sobre la proyección de los ejes de las perforaciones, sin efectuar la rotación mencionada. Si bien cada uno de los autores menciona su método como el más sencillo, en general todos ellos son rápidos una vez que se los ha tomado la mano. Por lo tanto se explicarán varios, aplicándose todos ellos a un mismo ejemplo.

Sea el caso de dos perforaciones, una vertical y otra inclinada tal como las de la figura 46 y a las que corresponden los siguientes datos: perforación vertical: hade  $25^\circ$ ; perforación inclinada: su eje buza  $50^\circ$  en dirección Az  $70^\circ$  y el hade es de  $20^\circ$ .

#### IV.1.a.- Primer Método

Sobre la red estereográfica y desde su centro trazamos sobre el transparente un círculo de radio igual al hade de la perforación vertical ( $25^\circ$  en este caso), luego se marca la dirección y buzamiento de la perforación inclinada, identificada con la letra A, obteniéndose la figura 47a. Se lleva este punto a la dirección este-oeste y se mide el valor de hade correspondiente hacia un lado y otro del punto, obteniéndose los puntos B y C de la figura 47b. Se marca luego el punto D, a mitad de distancia entre B y C, el que no coincide con A (ya que la longitud de un grado sobre el borde de la red es mayor que junto al centro de ella). Con centro en D se traza el círculo correspondiente a la proyección de la intersección del cono generado por la rotación del testigo de la perforación inclinada. Una vez obtenida la figura 47c se gira el transparente hasta encontrar los arcos de circunferencias máximas tangentes a los círculos dibujados, que son los que se muestran en las figuras 47d y 47e. Una vez trazados los mismos se tienen definidos los Rumbos posibles para la secuencia, figura 47f. La inclinación verdadera había sido ya obtenida del hade de la perforación vertical y era de  $65^\circ$ . En este ejemplo la traza de la circunferencia correspondiente a la perforación inclinada queda completamente incluida en el hemisferio sur, en el apéndice 2 se explicará el procedimiento a seguir cuando ello no ocurre.

#### II.1.b.- Segundo Método

Este método, similar al recién tratado, involucra sin embargo la rotación de los ejes de las perforaciones hasta la horizontal para dibujar los arcos de circunferencias menores directamente sobre el transparente sin necesidad de utilizar el compás. Se procede de la siguiente manera: tal como en el caso anterior dibujamos los puntos que indican la intersección de los ejes de las perforaciones con la hemisfera, ob-

teniendo así los puntos identificados como X y A en la figura 48a. Rotamos luego el transparente hasta que ambos puntos queden sobre un mismo arco de circunferencia máxima (como en el caso ejemplificado el punto X está en el centro de la red estereográfica, la dirección de alineación corresponde al arco de circunferencia cuya proyección coincide con el diámetro norte-sur de la red) obteniendo la figura 48b. Luego se desplazan ambos puntos a lo largo de los arcos de circunferencias menores correspondientes hasta los puntos X' y A' ilustrados en la figura 48c y que están en el borde de la circunferencia. Se lleva a continuación el punto A' hasta el punto norte de la red y desde el mismo se cuentan los  $20^\circ$  correspondientes al hade de esta perforación, marcando el arco buscado tanto alrededor del punto norte como del sur. En forma similar se procede con el punto X' trazando los arcos correspondientes al hade de  $30^\circ$ , obteniéndose las figuras 48 d y e. Se trazan luego los planos tangentes a los arcos tal como se muestra en la figura 48f. Luego vuelve a rotarse todo el sistema a su posición original de forma tal como se ilustra en las figuras 48g y 48h y finalmente se lleva el norte a su posición original obteniéndose la figura 48i.

#### IV.1.c.- Tercer Método

El empleo de un plano vertical orientado según la dirección de la perforación inclinada como plano de proyección diferencia a este método de los anteriores. En este caso el plano ecuatorial de la red no es horizontal sino vertical, la dirección norte corresponde al punto zenital y lo que antes era la proyección del plano vertical de Rumbo este-oeste corresponde ahora a la traza de la intersección de la esfera con la superficie horizontal. En la figura 49 se muestran estas nuevas condiciones de proyección. Para la perforación vertical la representación de su eje corresponde al segmento OL de la Figura 50a. Por los arcos de circunferencia menores correspondientes a  $30^\circ$  trazamos los arcos que marcan la intersección del cono generado por la rotación del eje de la perforación vertical, tal como se ilustra en la misma figura. El eje de la perforación inclinada se representa mediante el segmento OF, el cual se aleja de la horizontal un valor igual al de su buzamiento ( $50^\circ$ ), obteniéndose la figura 50b. Cabe aquí señalar que como estamos representando sobre el plano vertical que contiene al eje de la perforación la traza de éste es continua en todo el diámetro de la circunferencia, y no un punto como en el caso cuando proyectábamos su intersección con la hemisfera inferior. Se gira a continuación el transparente hasta que el segmento OM coincide con la dirección vertical y se trazan los arcos correspondientes a la intersección del cono generado por la rotación del eje de la perforación inclinada, tal como se muestra en la figura 50c. Se buscan luego los arcos de circunferencia máxima que sean tangentes a los arcos ya trazados y se dibujan sobre el transparente, obteniéndose la figura 50d. Para leer la actitud correspondiente a estos planos se procede de la siguiente forma: recordemos que la dirección este de la red correspondía ahora al Az de la dirección de la perforación inclinada ( $70^\circ$ ) por lo tanto al punto que se ha señalado con la letra Q en la

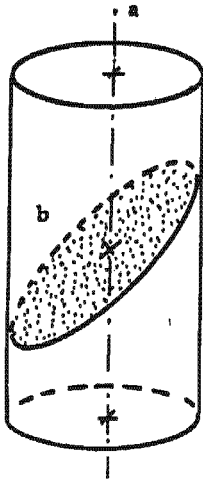
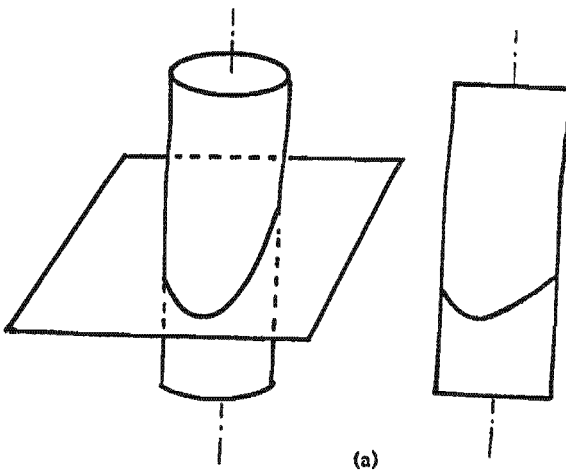
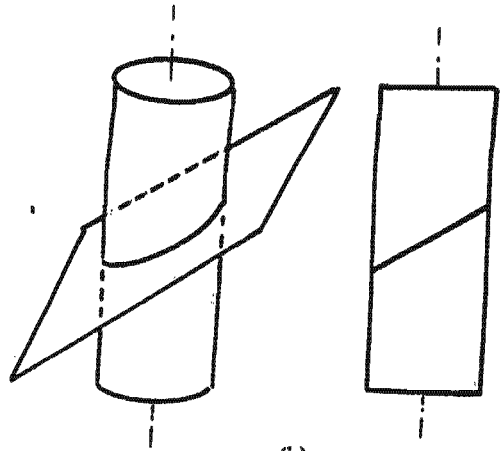


Figura 42



(a)



(b)

Figura 43

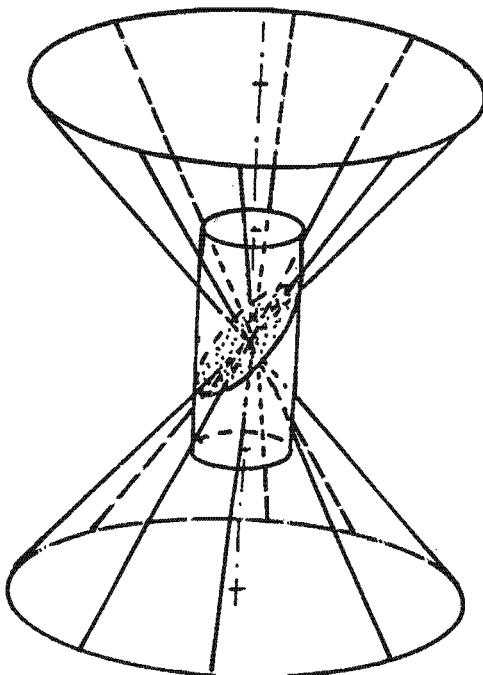
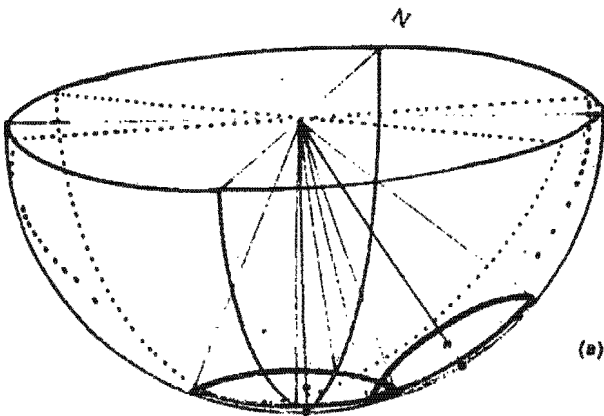
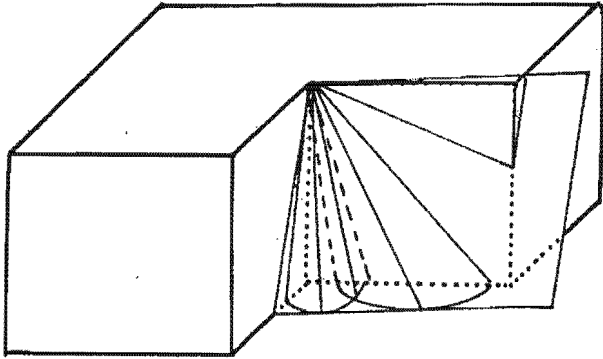
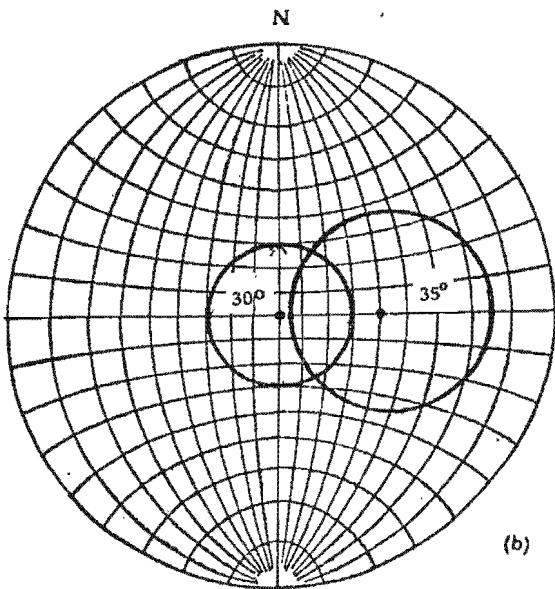


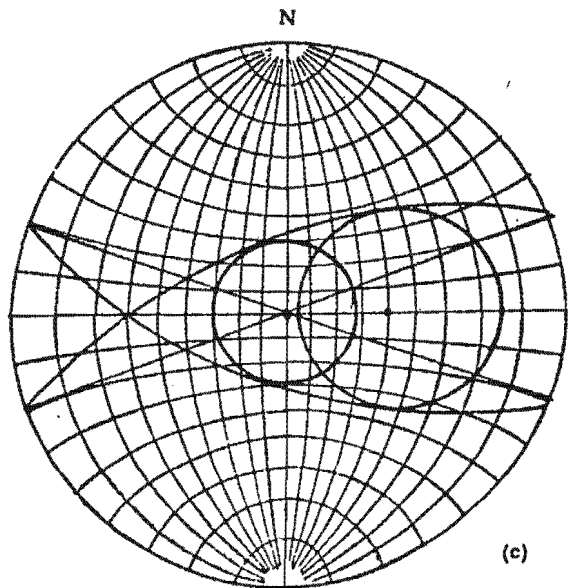
Figura 44



(a)



(b)



(c)

Figura 45



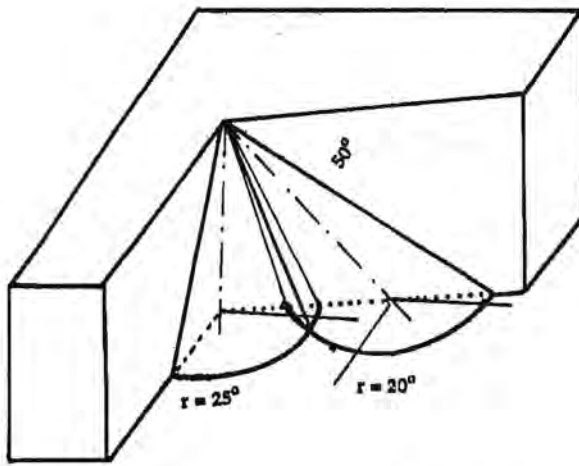


Figura 46

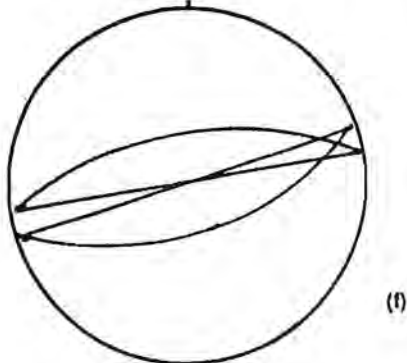
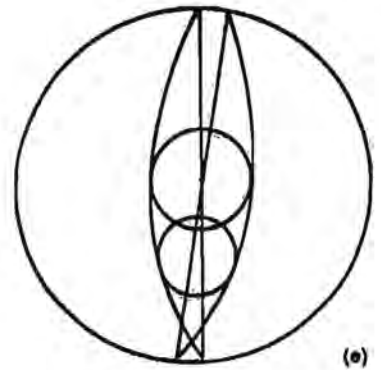
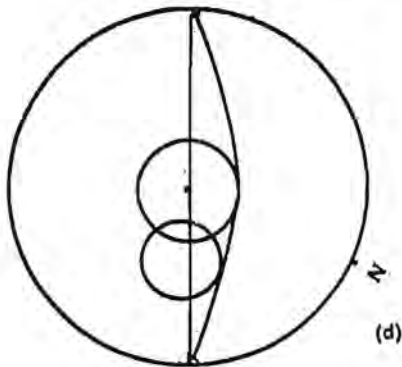
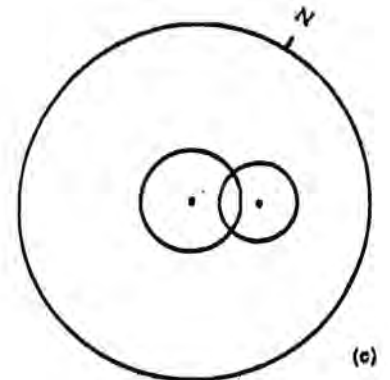
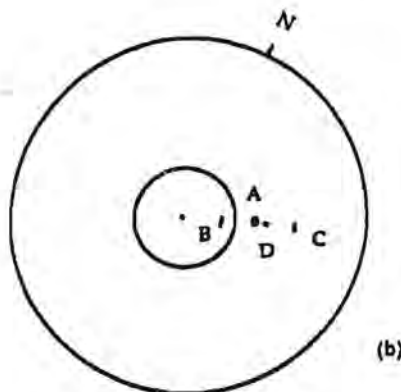
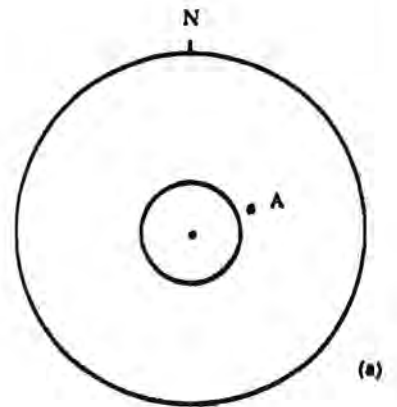


Figura 47

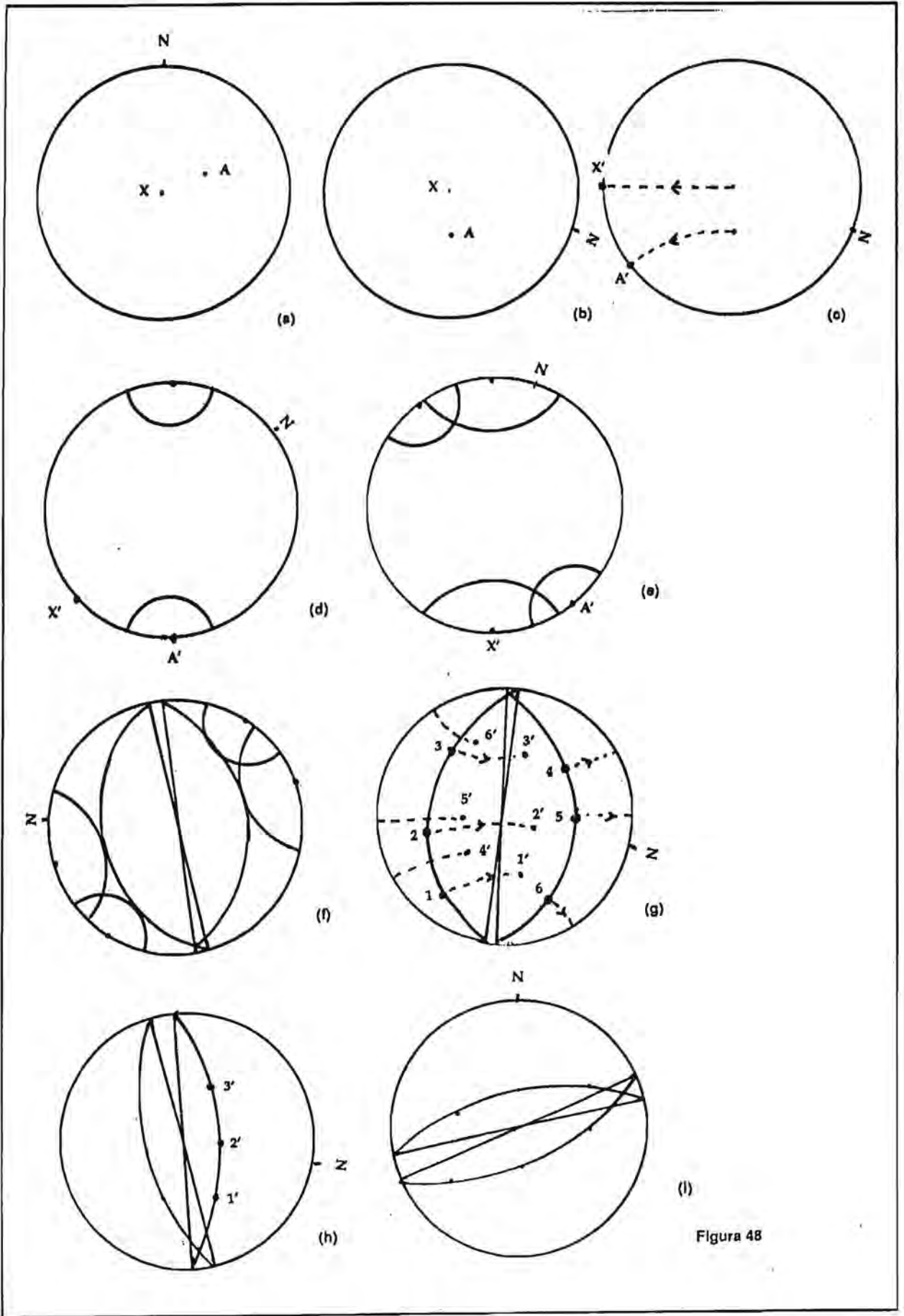


Figura 48

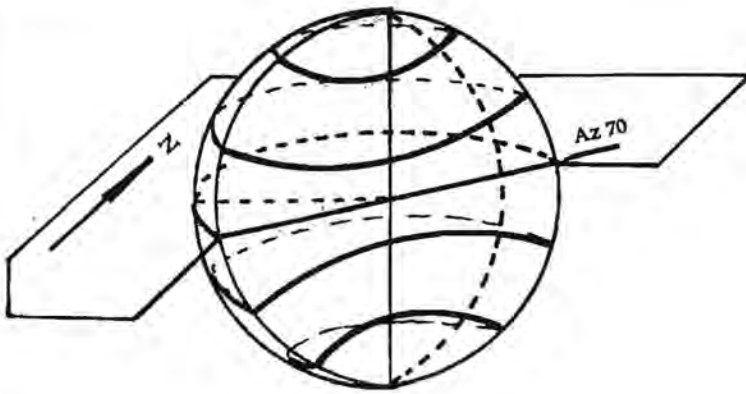
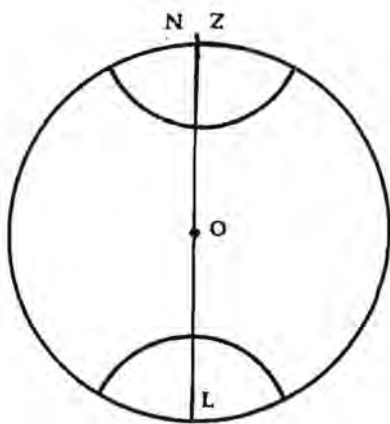
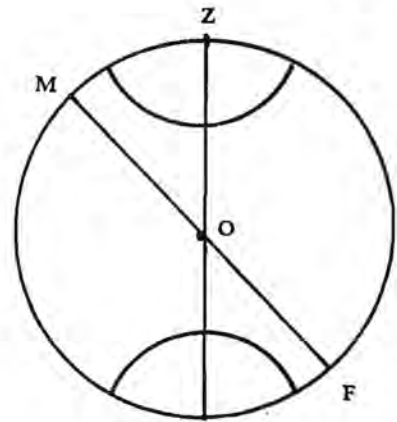


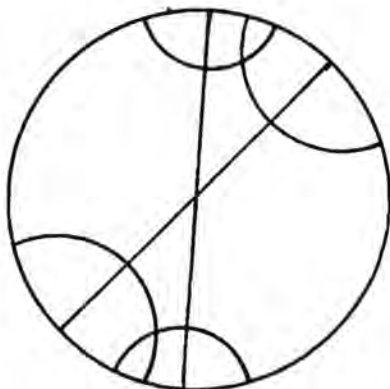
Figura 49



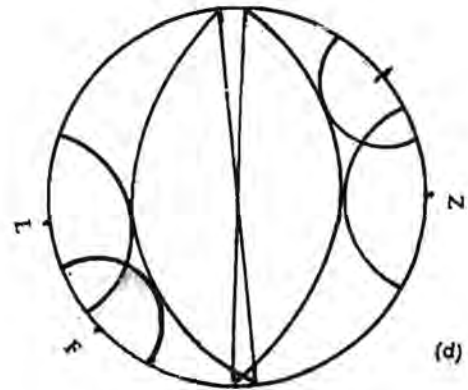
(a)



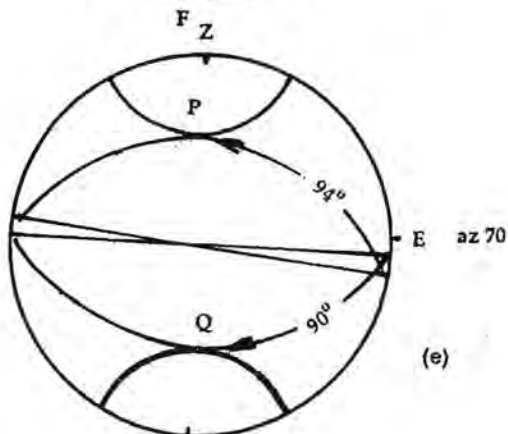
(b)



(c)

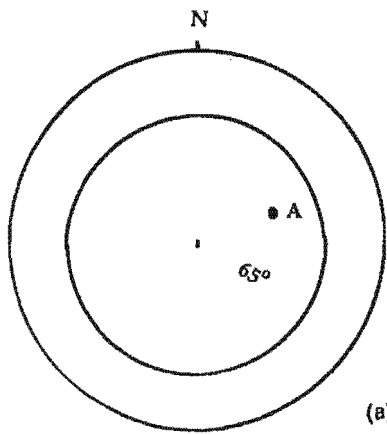


(d)

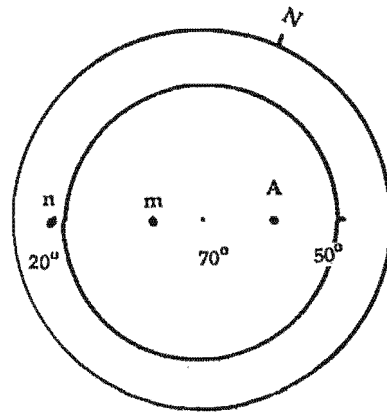


(e)

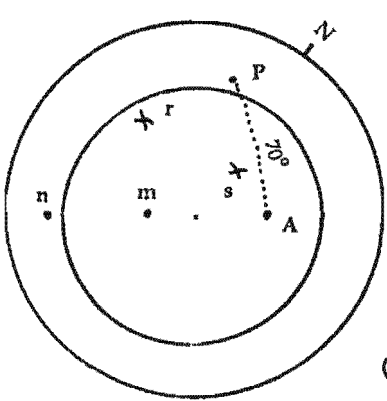
Figura 50



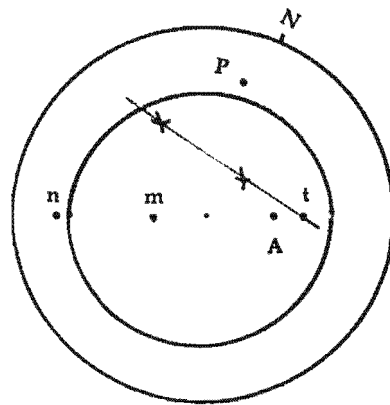
(a)



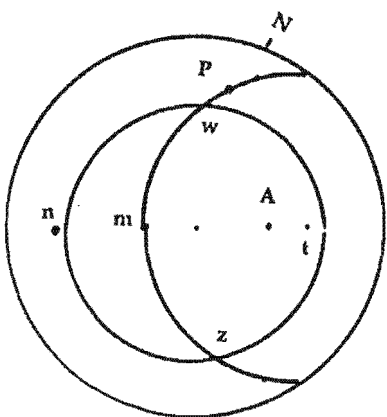
(b)



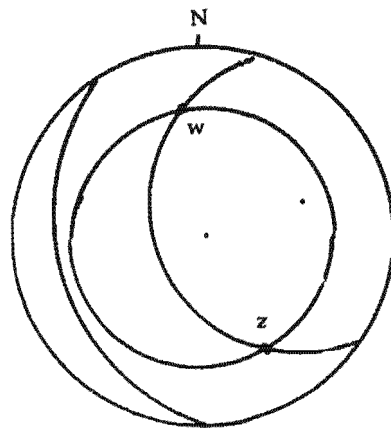
(c)



(d)

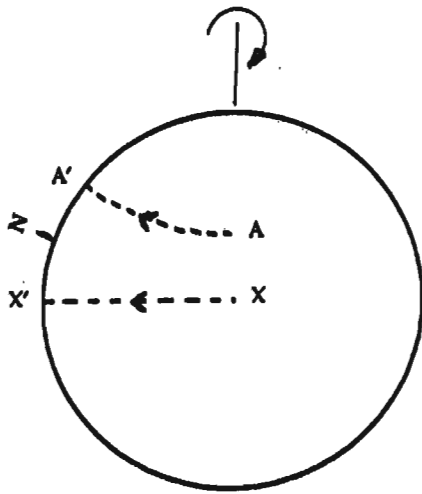


(e)

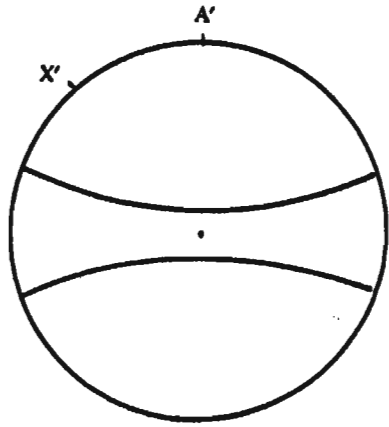


(f)

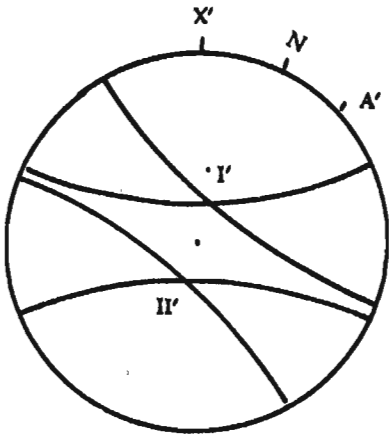
Figura 51



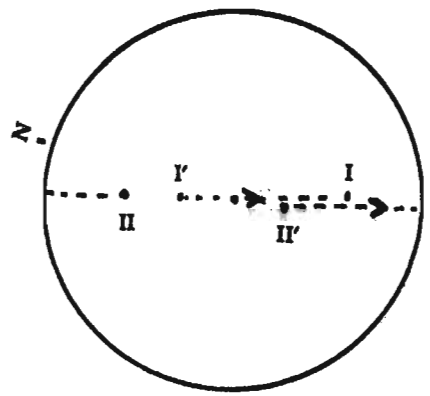
(a)



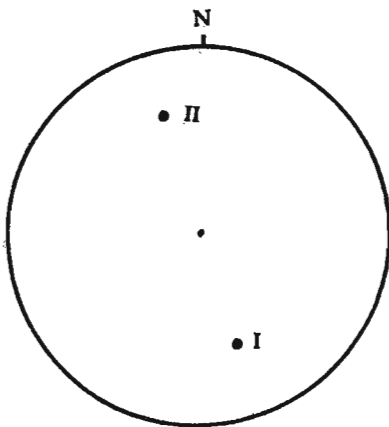
(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 52



figura 50e corresponde un Az que se encuentra  $90^\circ$  más al oeste. Para verificar el valor de la inclinación (que ya conocemos por el complemento del hade de la perforación vertical) debemos tener en cuenta que la dirección de máxima inclinación del plano será aquella en la cual la traza del mismo se hace tangente al arco de circunferencia menor de radio más reducido. Este punto corresponde a un Az a  $90^\circ$  del Rumbo. Los valores que se obtienen son entonces: para el punto Q una inclinación de  $30^\circ$  en el Az  $340^\circ$ , lo que significa que el rumbo del plano es Az  $70^\circ$  y la otra posibilidad de rumbo está dada por el punto P el cual se encuentra a  $94^\circ$  de la dirección Az  $70^\circ$  y le corresponde por lo tanto un Az  $336^\circ$  y en consecuencia el Rumbo del plano será Az  $66^\circ$  y su inclinación también  $30^\circ$ .

#### IV.2.- Métodos basados en la proyección polar

Los métodos basados en este tipo de representación pueden ser algo más difíciles de visualizar al comienzo pero finalmente resultan más sencillos y rápidos como técnicas de uso habitual. Al producirse la rotación del testigo alrededor de su eje el polo del plano de estratificación generará también una trayectoria circular sobre la superficie de la hemisfera, al contar con dos trayectorias circulares correspondientes a dos perforaciones, los puntos de intersección de las mismas darán las posibilidades de Rumbo e inclinación para la estratificación.

##### IV.2.a.- Primer Método

Continuando con el ejemplo de la perforación vertical con hade  $25^\circ$  y otra inclinada cuyo eje buza  $50^\circ$  en dirección  $70^\circ$  con un hade de  $20^\circ$ . El polo correspondiente a la estratificación en el testigo vertical describirá una circunferencia cuyo ángulo con respecto al centro de la red es igual a la diferencia entre  $90^\circ$  y el hade, o sea  $65^\circ$ . En forma similar para la perforación inclinada el polo describirá una circunferencia a  $70^\circ$  del eje de la perforación. Con centro en el de la red trazamos una circunferencia de radio  $65^\circ$ , a continuación se marca el punto señalado con la letra A en la figura 51a correspondiente al Az  $70^\circ$  y que representa el eje buzante  $50^\circ$ . Se lleva este punto a la dirección este-oeste y se cuentan  $70^\circ$  hacia la izquierda, ubicándose el punto señalado como m en la figura 51b, al contar hacia la derecha nos encontramos que hemos alcanzado el borde de la red con un valor de  $50^\circ$ , por lo tanto se sigue contando desde el otro extremo hasta llegar al punto n al cual corresponden los  $70^\circ$ . Para determinar la posición del centro de la circunferencia, (la posición de su proyección es el punto A), se puede proceder de la siguiente forma: sobre el arco de circunferencia máxima que contiene a A contamos  $70^\circ$  y se obtienen el punto que en la figura 51c se identifica como P. A continuación primero con centro en m y luego con centro en P trazando pequeños arcos (cuyas intersecciones son los puntos r y s de la figura 51c) se determina una recta. La intersección de esta recta que une los puntos r y s con la dirección este-oeste nos da la posición del centro de la circunferencia, señalado con la letra t en la figura 51d. Las intersecciones determinadas por los puntos w y z de la figura 51e nos dan las actitudes posibles para la estratificación, las que se muestran en la figura 51f.

#### IV.2.b.- Segundo Método

Para evitar la complicación que en el método anterior supone trabajar con compás, éste propone la rotación de los centros de los círculos hasta la horizontal y el trazado directo de los mismos empleando los arcos de circunferencias menores impresos en la red. En la figura 52a se muestran los puntos X y A que han sido llevados a coincidir sobre un arco de circunferencia máxima y rotados hasta la horizontal, generando los puntos X' y A'. Se lleva luego el punto A' a la dirección norte y se cuentan hacia el centro los  $70^\circ$  correspondientes al cono de  $90^\circ$  menos el hade de la perforación A y se traza el arco de circunferencia correspondiente. Un arco similar se traza en el extremo sur tal como se ilustra en la figura 52b. Luego se lleva el punto X' a la dirección norte, tal como se muestra en la figura 52c y se trazan los arcos de circunferencia correspondientes a  $65^\circ$  ( $90^\circ$  menos el hade de la perforación vertical). Los puntos identificados como I', II' en esta figura corresponden a las intersecciones y son las posibles actitudes de la estratificación una vez que se las haya rotado a las posiciones correspondientes en forma solidaria con el fin de anular la rotación introducida al principio, generando los puntos I y II de la figura 52d. Finalmente quedan determinadas las actitudes en la figura 52e.

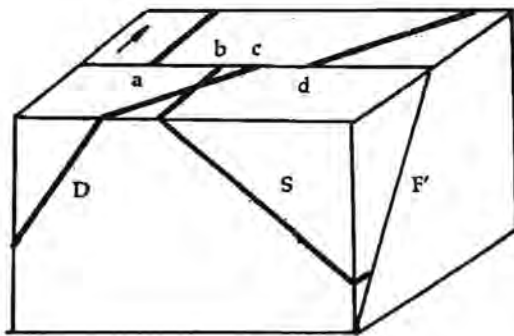
En el capítulo correspondiente al Apéndice de esta obra se explica en detalle el trazado de los arcos de circunferencias menores, por ello y porque no es necesario en la resolución de este problema en particular se omite aquí la explicación de la técnica a seguir para trazar el arco que pasa por el punto n.

### V.- CALCULO DEL RECHAZO DE FALLAS

La proyección estereográfica permite una simplificación de los problemas de cálculo del rechazo de fallas; los cuales involucran, para ser resueltos por técnicas ortográficas una tarea prolija y laboriosa, que en el caso de fallas rotacionales es casi inabordable. Se explicarán a continuación algunos ejemplos que demuestran la eficacia de las técnicas estereográficas, aunque debe destacarse que las mismas por sí solas no permiten llegar al resultado final, pues, como se puso de relieve en los primeros párrafos del libro, sólo resuelven problemas de relaciones angulares entre los distintos elementos, pero no de distancias entre ellos, para esto último la proyección ortográfica es insustituible, si bien es cierto que teóricamente algunos problemas podrían resolverse analíticamente por funciones trigonométricas sin necesidad de realizar la construcción de perfiles y/o plantas.

#### V.1.- Resolución de problemas que involucran fallas no rotacionales

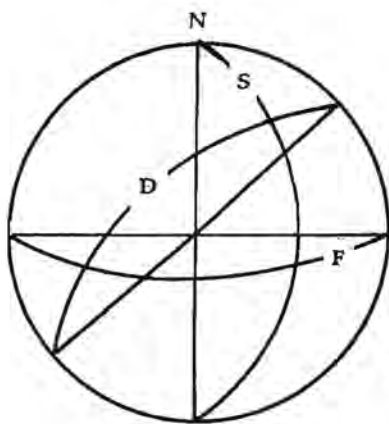
Sea el caso ilustrado en la figura 53 en la cual se tiene una falla de Rumbo Az  $90^\circ$  e  $i = 60^\circ$  al sur, esta falla desplaza los aloramientos de un banco guía y un dique en el bloque norte y el sur. Si se desea conocer tanto el rechazo neto como sus componentes y se adopta la técnica de proyección ortográfica deben realizarse:



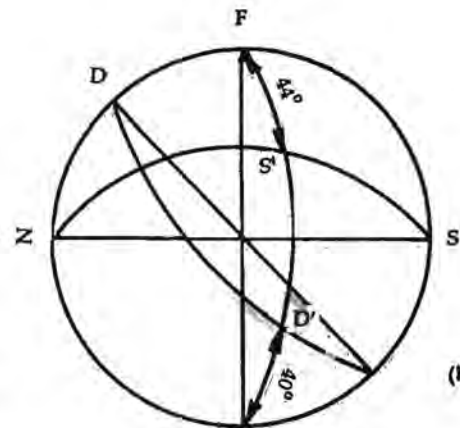
F: R Az  $90^\circ$  i:  $60^\circ$  al S  
 S: R Az  $360^\circ$  i:  $40^\circ$  al E  
 D: R Az  $45^\circ$  i:  $60^\circ$  al NO

ab = 100m  
 bc = 50m  
 cd = 38m

Figura 53



(a)



(b)

Figura 54

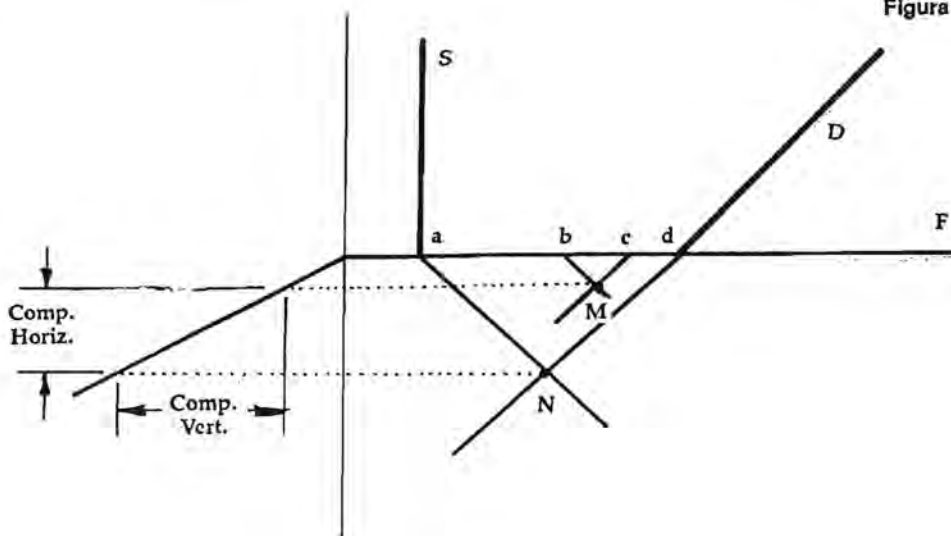


Figura 55

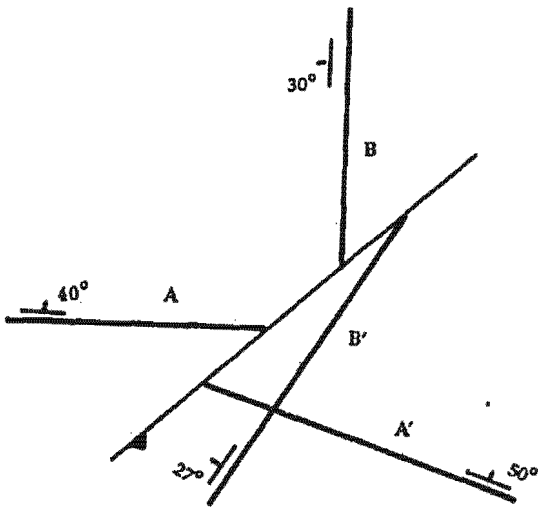
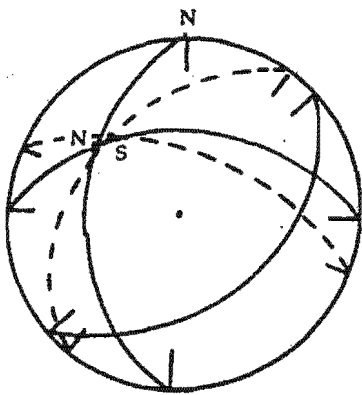
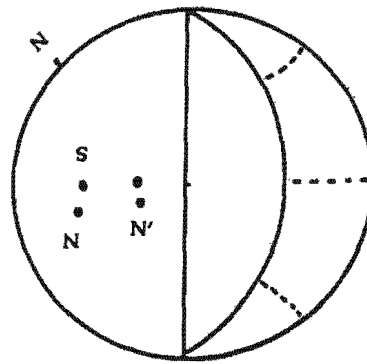


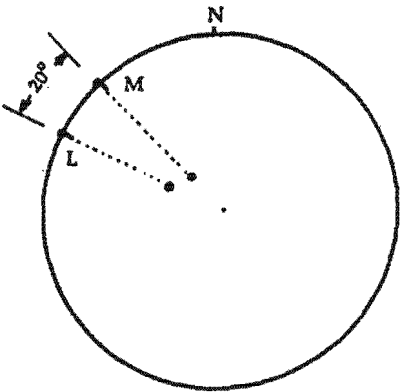
Figura 56



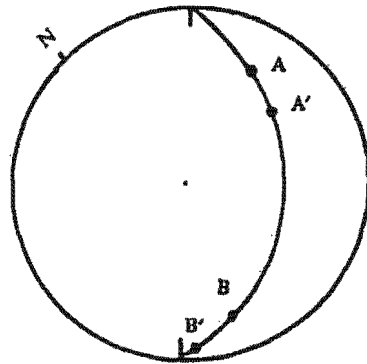
(a)



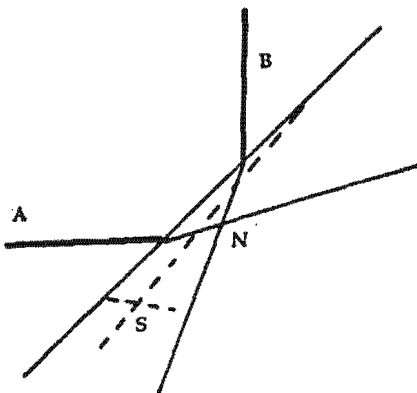
(b)



(c)

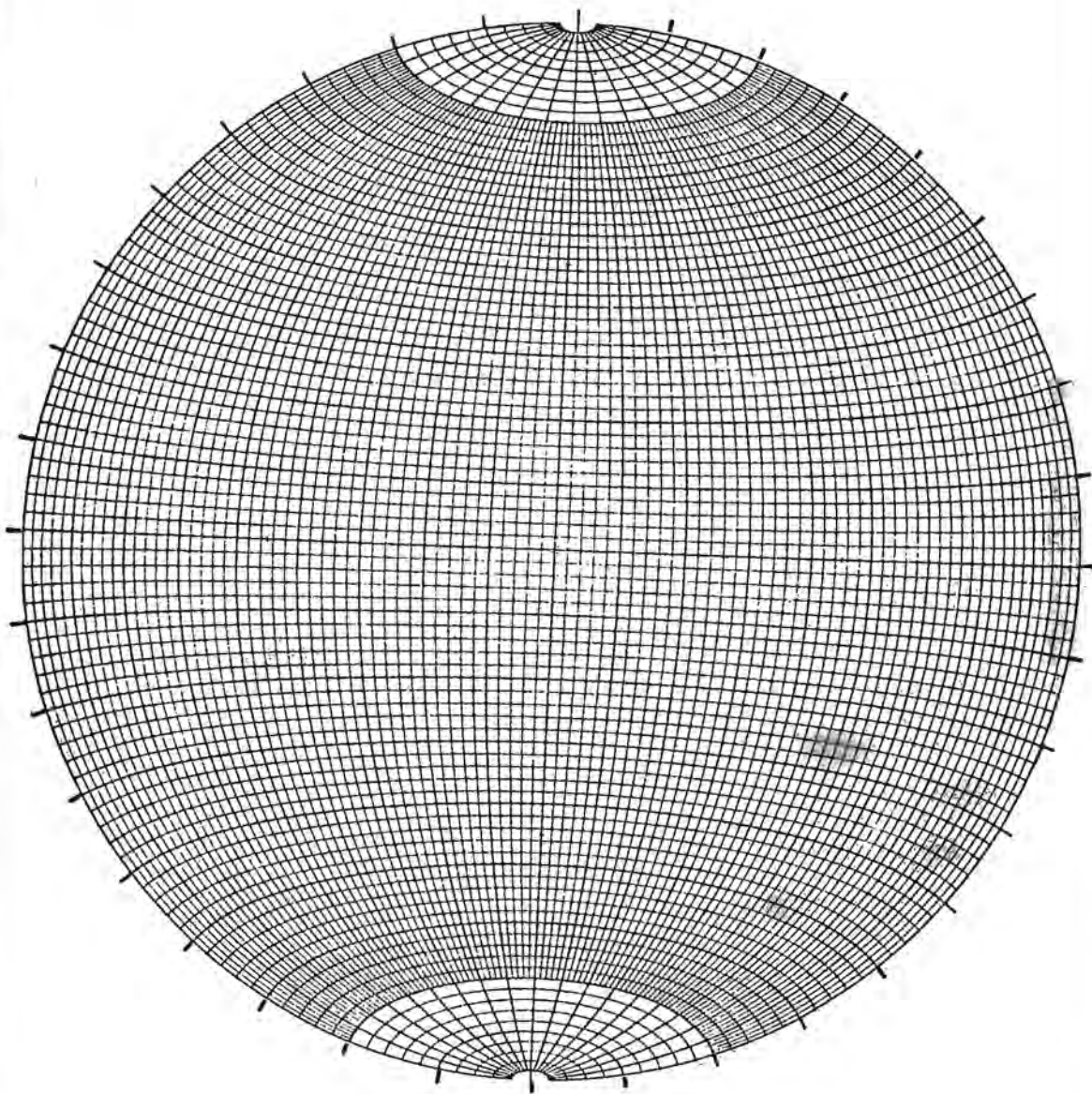


(d)



(e)

Figura 57



Red de Schmidt

Figura 58

- a) Perfiles transversales a los 3 elementos presentes.
- b) Trazado de contornos estructurales.
- c) Determinación de las trazas de la intersección de cada una de los otros planos sobre el plano de falla
- d) Rebatimiento de este plano a la horizontal con el fin de poder medir distancias reales (y no proyectadas).
- e) Translación de algunos de los datos al perfil transversal a la falla para poder medir la componente vertical del desplazamiento.

Al disponer de la red estereográfica la traza de la intersección de los planos del banco gufa y el dique sobre el plano de la falla puede ser realizada directamente conociendo el valor del hundimiento correspondiente. Para ello se procede de la siguiente manera. Se representa sobre la red estereográfica (figura 54a) la actitud de la falla (F), del banco gufa (S) y del dique (D), se lleva luego el rumbo de la falla a la dirección norte-sur (figura 54b) y sobre el arco de circunferencia máxima se mide el hundimiento correspondiente a la intersección de F y S, que es de  $44^\circ$  (arco F - S'), y el de F y D, que es de  $40^\circ$  (arco F' - D'). Recordemos que el primero se midió desde el extremo este de la falla y el segundo desde el extremo oeste.

A continuación se realiza el trazado de estas líneas sobre el plano de falla de acuerdo a los puntos de afloramiento en la intersección con la superficie, tal como se ilustra en la figura 55, (se ha utilizado línea gruesa para los datos correspondientes al bloque sur). Las trazas correspondientes a cada bloque se intersecan en los puntos M y N respectivamente. La distancia entre ambos es el desplazamiento neto de la falla. Su descomposición en dos vectores, uno paralelo y otro perpendicular a la traza de la falla nos permite calcular el desplazamiento de inclinación.

## V.2.- Resolución de problemas que involucran fallas rotacionales

Se fundamentan estas técnicas en la suposición que la rotación ha sido la misma sobre todo el plano de falla (en valor angular) y que el eje de rotación es perpendicular al plano de falla.

Suponiendo el caso del ejemplo de la figura 56, donde tenemos una falla de Rumbo Az  $45^\circ$  e  $i = 30^\circ$  al sureste. Esta falla desplaza dos diques cuyas actitudes son diferentes en el bloque noroeste y el bloque sureste por lo que se supone una componente rotacional en el desplazamiento. El procedimiento para calcular el valor de la componente rotacional y el sentido del giro es el siguiente. Se representan la falla, y los planos estructurales correspondientes a uno y otro bloque, tal como se ilustra en la figura 57a y se señalan las posiciones correspondientes a las actitudes de las rectas de intersección de A y B (N) y de A' y B' entre sí (S).

Se lleva a la dirección norte-sur la traza del rumbo del plano de falla, se rota éste hasta la horizontal, los puntos N y S se trasladan solidariamente tal como se ha explicado en el capítulo III hasta ocupar las posiciones N' y S' (figura 57b). En esta posición

ambos deben mostrar un mismo buzamiento ya que el ángulo entre la línea de intersección y el plano de falla permanece constante durante este tipo de proceso de fallamiento. El ángulo azimutal entre ambos puntos (Arco L-M de la figura 57c) nos da el valor del giro y la posición relativa de cada punto el sentido del mismo. Para el ejemplo utilizado el giro es de  $20^\circ$  y el bloque sur ha rotado en sentido horario con respecto al bloque norte. El cálculo de los rechazos correspondientes se realiza en forma similar a la explicada en el caso anterior pero teniendo en cuenta que los hundimientos no son iguales para las trazas en el bloque norte que en el sur. Para el ejemplo  $30^\circ$  en el bloque norte y  $50^\circ$  en el sur y  $25^\circ$  en el bloque norte y  $5^\circ$  en el sur para los planos A y A' y planos B y B' respectivamente. Como puede verse, la diferencia entre los valores del hundimiento para cada plano en cada bloque son iguales al ángulo de rotación, por lo tanto, el paso realizado en la figura 57b puede obviarse y medir directamente la rotación sobre el plano de falla como diferencia de hundimientos (figura 57d). La figura 57e muestra estos valores graficados y se señala con N-S el valor del desplazamiento neto. El cálculo de sus componentes es similar al expuesto para el ejemplo anterior. Obsérvese que el buzamiento del desplazamiento neto y su dirección no guardan relación visual directa con el valor y sentido de la rotación.

## VI. APLICACIONES DE LA RED ESTEREOGRAFICA EN EL TRATAMIENTO ESTADISTICO DE DATOS ESTRUCTURALES

Cuando se dispone de una buena cantidad de datos o bien cuando la representación de los mismos sobre un diagrama tridimensional no es lo suficientemente clara, resulta de gran utilidad su representación mediante la proyección estereográfica. Tales serían los casos de determinación de la orientación de un sistema de diaclasas a partir de numerosos datos de rumbo e inclinación, medidas en el campo, los que en primera observación pueden parecer anárquicos, pero el representarlos en la red estereográfica muestran cierta coherencia, o bien recogidos sobre un pliegue del que nos interesa también conocer el buzamiento del eje o incluso la actitud de un plano axial.

Para poder aplicar la proyección estereográfica con fines estadísticos se debe realizar una modificación sutil en la red de Wulf.

A simple vista puede observarse que los cuadrados de dos grados por dos grados determinados por la intersección de circunferencias máximas y menores no tienen superficies proporcionales a las que tenían en la superficie esférica en todos los puntos de la red, siendo la distorsión mayor hacia los bordes que en el centro. Esto produce una distorsión en la concentración de datos, por lo cual y dado que los sistemas de conteo utilizan patrones de área constante es necesario que la red estereográfica la mantenga también. Tal es el caso de la red denominada de Lambert o de Schmidt que se ilustra en la figura 58. Pueden observarse en ella dos hechos notables: 1º) La superficie correspondiente a un área determinada de dos grados de lado es proporcional al área original en



la superficie esférica. 2º) Los arcos de circunferencias menores se encuentran ahora deformados en arcos elípticos.

### VI.1.- Trazado de contornos de igual densidad de puntos

Tanto en el caso de polos correspondientes a planos de clivaje como cuando se trata de fracturas o lineaciones puede ser conveniente el trazado de contornos de igual concentración de puntos. Existen varias técnicas para realizar el conteo. Describiremos en primer lugar aquellas basadas en la utilización de la reglilla o contador de ventana circular. El mismo se representa en la figura 59 y sus dimensiones se adecúan al tamaño de la red de Schmidt que se está utilizando de forma tal que la distancia entre los centros de las ventanas sea igual al diámetro de la red y su superficie un 1 % de la misma, es decir, su diámetro debe ser 1/10 del de la red. Para realizar el conteo el contador se coloca sobre el diagrama de puntos (en la forma indicada por la técnica que se está utilizando) y el número de puntos (o bien el % de puntos con respecto al total) que aparece dentro de la ventana se inscribe en su centro. Cuando los puntos se encuentran muy cercanos al borde de la red (a una distancia menor que el diámetro de la ventana) deben tenerse en cuenta los puntos que se encuentren en el extremo diametralmente opuesto, para ello se debe centrar perfectamente la reglilla y en este caso es de utilidad la ranura central de la misma, la cual permite la rotación y desplazamiento de aquella tal como se ilustra en la figura 60.

Según Turner y Weiss (1963) los procedimientos de conteo y trazado de contornos "son en general arbitrarios y su significado estadístico no ha sido aún evaluado rigurosamente", es por ello que realizan una serie de recomendaciones que se reproducen a continuación por considerárselas de interés.

- 1.- En cada diagrama el número de contornos o intervalos no debe superar los seis.
- 2.- El contorno máximo debe elegirse para enfatizar y diferenciar máximos lo suficientemente extensos como para aparecer claramente en gráficos de unos 5 a 7 cm de diámetro. Por ejemplo, si las áreas con concentraciones locales del 10 al 12 por ciento son pequeñas, puede ser más indicado dibujar el contorno máximo como del 8 %.
- 3.- En todos los diagramas los intervalos de contorno deben ser preferentemente los mismos.
- 4.- Es habitual, cuando es posible, dibujar el contorno mínimo en correspondencia con concentraciones de un punto por uno por ciento del área. Este contorno define el límite exterior de un área completamente desprovista de puntos.
- 5.- En cualquier análisis es deseable, si bien no siempre es posible, medir el mismo número de puntos y usar los mismos contornos de intervalo para los diagramas que representan datos del mismo tipo de diferentes dominios. Esto facilita la comparación del grado y diseño de la orientación preferencial entre dominios comparables.

6.- Cuando un contorno corta la circunferencia ecuatorial debe aparecer en el punto diametralmente opuesto.

#### VI.1.a.- El método de Mellis

El método de Mellis o "del círculo" es de utilidad en aquellos casos en que no se cuenta con muchos datos (150 puntos o menos), cuando las concentraciones son débiles y también para el trazado del contorno de mínima densidad, que como ya se ha dicho es generalmente de 1 punto por uno por ciento de área. El centro de la ventana circular se superpone sucesivamente a cada uno de los puntos representados y se dibuja un círculo utilizando la ventana. Una vez realizado esto en todos los puntos se obtiene un gráfico como el de la figura 61a que muestra un gran conjunto de círculos superpuestos. Se trazan luego los contornos correspondientes a las áreas de superposición de 3 ó más círculos (contorno de 3 % para cien puntos) y el de 1 círculo (contorno de 1 %). (Tomado de Turner y Weiss, 1963).

#### VI.1.b.- Método de conteo libre.

Este método brinda buenos resultados, cuando el número de datos oscila entre 200 y 400 y las concentraciones son más o menos moderadas, menores de unos 12 puntos. En función del número de datos se determina el número de puntos correspondientes al tanto por ciento considerado apropiado. El contorno máximo se dibuja entonces uniendo los centros de los círculos en cuyo interior caen los dichos puntos mediante un desplazamiento continuo de la reglilla. Los contornos de concentraciones menores se van trazando a continuación en forma similar obteniéndose el esquema de la figura 62. En la figura 62a se ha trazado el contorno de 4 % y en la 62b se ha agregado el 2 % (correspondientes a 12 y 16 puntos por uno por ciento de área respectivamente).

#### VI.1.c.- Método de Schmidt o de retícula.

Quando se dispone de más de 400 datos, o cuando las concentraciones de puntos son muy altas este método es más aconsejable. El diagrama de puntos se superpone a una grilla cuadrículada de 1 cm de espaciado, (este espaciado es utilizado para redes con un diámetro de 20 cm). La reglilla de conteo se va desplazando entonces centrada con los cruces del retículo y sobre el papel se va anotando el número de puntos que aparecen en cada posición. En los bordes de la red se utilizan las intersecciones de las líneas del retículo con la circunferencia para centrar la ventana de conteo. Sobre otro papel transparente se van uniendo los puntos con iguales valores con el fin de trazar los contornos correspondientes, tal como se ilustra en la figura 63 (tomado de Turner y Weiss, 1963).

#### VI.1.d. El método de Kalsbeek (1963)

Se basa en la utilización de una grilla de paso hexagonal tal como la ilustrada en la figura 64. La técnica de conteo es la siguiente. Cada uno de los hexágonos se halla dividido en seis triángulos unidos por el vértice. Al superponer la red de Kalsbeek al diagrama de puntos se cuenta cuántos de éstos caen

en cada hexágono y este número se anota en el centro del mismo. Como puede verse en la figura 65 los puntos ubicados dentro de cada uno de los pequeños triángulos se cuentan tres veces ya que dicho triángulo pertenece simultáneamente a tres hexágonos. Existen puntos especiales de la red donde el conteo debe realizarse con un cierto cuidado. Los medios hexágonos de los bordes se suman a los medios hexágonos diametralmente opuestos y el total se anota en ambos extremos. Para los extremos de las direcciones a  $30^\circ$ ,  $90^\circ$  y  $120^\circ$ , así como para el centro se utilizan los semicírculos complementarios y el círculo respectivamente. Como cada punto se cuenta en tres hexágonos, la suma de los números inscriptos en los hexágonos debe ser el triple del total de puntos en el diagrama, salvo en las áreas circulares donde se introducen pequeñas desviaciones. Al utilizar el contador circular y la grilla cuadrículada cada punto se cuenta aleatoriamente dos, tres o cuatro veces, lo cual si bien no tiene importancia directa en el trabajo estadístico es menos cómodo que tener conjuntos de números directamente vinculados con el diagrama real.

Para la calificación de las líneas de isovalores debe tenerse en cuenta que cada hexágono representa un 1 % de la superficie por lo tanto si en un hexágono tenemos un punto de un total de cien representados, el mismo representará una concentración del 1 %, por uno por ciento de área. Si fueran cuatro, un cuatro por ciento. Si fueran 200 puntos el total representado sería un 0,5 % y un 2 % en cada caso. Debe entonces recordarse que es necesario realizar la conversión a tantos por ciento en función del número total de puntos representados.

#### VI.1.e. Método de Hoek y Brown.

Estos autores (Hoek y Brown, 1980) presentan una técnica que difiere de las anteriores en cuanto utiliza para la representación de los datos la denominada "red estereográfica polar" y para el conteo una falsilla adaptada a la misma. Ambos elementos se ilustran en las figuras 66 y 67 respectivamente. La representación en este tipo de red es bastante rápida ya que una vez establecidas las coordenadas del polo no hace falta rotar el transparente pues la graficación se realiza en una sola operación tal como se ejemplifica a continuación. Sea el caso de un polo que buza  $30^\circ$  al Az  $120^\circ$ . Una vez colocado el transparente sobre la red se busca la posición del Az  $120^\circ$  y luego se cuentan desde el borde exterior los  $30^\circ$  correspondientes, tal como se ilustra en la figura 68. Otra forma de representación, a partir del dato de dirección de máxima inclinación y valor de ésta es la siguiente. Sea el mismo ejemplo anterior, el caso de un plano de R Az  $30^\circ$  e  $i = 60^\circ$ , (al que correspondía el polo en Az  $120^\circ$  e  $i = 30^\circ$ ); por lo tanto la dirección de inclinación verdadera es Az  $300^\circ$ . Entrando en la red polar (por los números en negrilla en caso de utilizar una red similar a la presentada por estos autores) o bien, en caso contrario numerando en la red los Az en sentido horario pero con el 0 en el sur ( $90^\circ$  al oeste,  $180^\circ$  al norte y  $270^\circ$  al este). Se busca el valor  $300^\circ$  y desde el centro hacia el borde se cuentan los  $60^\circ$  correspondientes a la inclinación. Tal como era de esperar y se ilustra en la figura 69 la posición del polo coincide con la determinada con la técnica anterior.

Con respecto a la técnica de conteo de los datos representados en este tipo de red y su grado de comparación con la técnica de Karlsbeek los autores (Hoek y Brown, *op. cit.*) determinan que las diferencias no son significativas dentro de los límites de error aceptables en los trabajos geológicos habituales.

#### VI.1.f. Método de Trommsdorff (1963)

Presenta un método mecánico de trazado por proyección de una pantalla perforada con la posición de los polos representados y obtención de una imagen fotográfica en la cual la superposición de haces de luz en las zonas de mayor concentración de perforaciones (mayor densidad de puntos) queda evidenciada por una tonalidad más alta de gris. Este método que posiblemente y según su autor en ese momento redundaba en un ahorro muy grande de tiempo (pues las tonalidades de gris eran directamente equivalentes al trazado de curvas o áreas de igual densidad) hoy en día ha sido ampliamente superado por la sencillez de las técnicas ya descriptas y todas ellas en la actualidad han sido reemplazadas con amplia ventaja por el empleo de computadoras, si bien aún siguen siendo de utilidad en la representación de datos en el campo.

Digamos finalmente que al realizar la representación de los resultados resulta más conveniente señalar las áreas de concentraciones crecientes con tonos cada vez más oscuros de gris, utilizando el negro para el área de mayor concentración. Esta forma es más fácilmente descifrable que la utilización de rastras, las que suelen crear confusión al observarlas, sobre todo cuando los dibujos son de tamaño reducido.

Cuando se realiza el graficado manual de una gran cantidad de puntos y no se dispone de la red equiareal polar pueden ser de gran utilidad para evitar una rotación continua del transparente (lo que involucra una gran pérdida de tiempo y un deterioro del gráfico por agrandamiento del agujero central) la utilización de un instrumento del tipo presentado en la figura 70 cuyos bordes están graduados en la misma forma que los diámetros norte-sur y este-oeste de la red. Este instrumento fue desarrollado por G. K. Biemesderfer (En Whitten, 1966) y se coloca sobre el centro de la red en forma tal que puede girar libremente.

### VII.- ANALISIS DE LA GEOMETRIA Y RELACIONES TECTONICAS DE ESTRUCTURAS PLEGADAS

Los gráficos de concentración de direcciones de alineaciones y de las diferentes superficies o planos tanto sedimentarios como estructurales son de gran utilidad en el estudio de las estructuras de deformación y permiten a veces la vinculación genética de las mismas. En la preparación de los diagramas debe ponerse especial cuidado en la recolección de los datos con el fin de que los diagramas de concentraciones no se encuentren influenciados por una inapropiada distribución. Tampoco debe descuidarse el hecho que los datos deben provenir de una sola unidad estructural cuyas dimensiones serán elegidas en función de la complejidad del sistema, pero debe tenerse siempre presente el peligro de la mezcla de in-

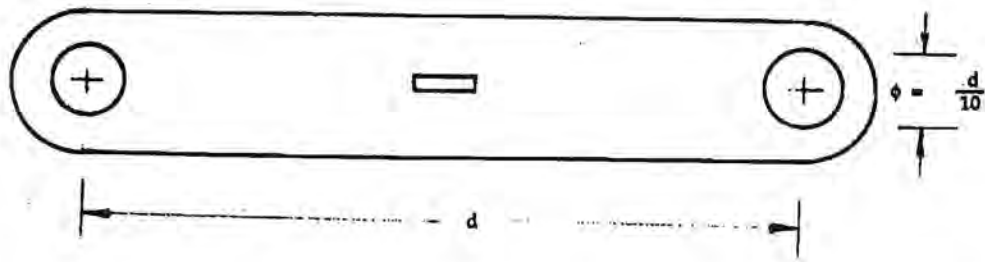


Figura 59

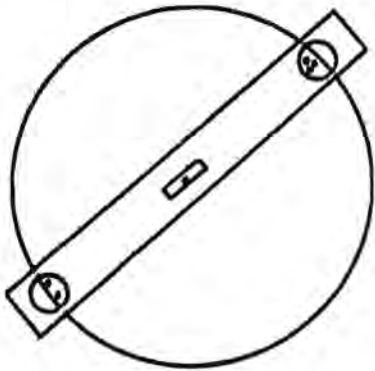


Figura 60

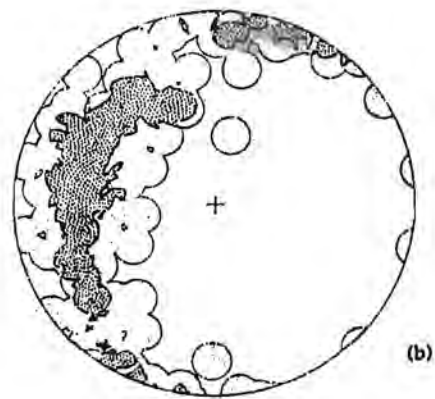
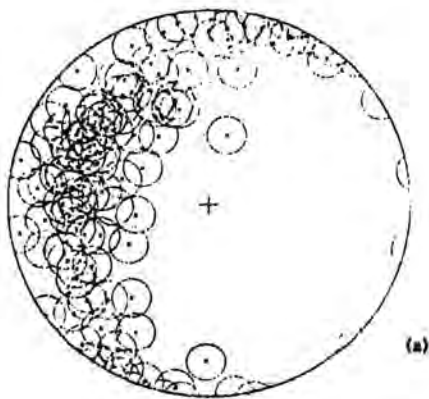


Figura 61

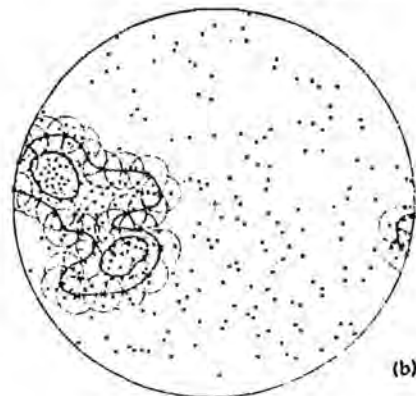
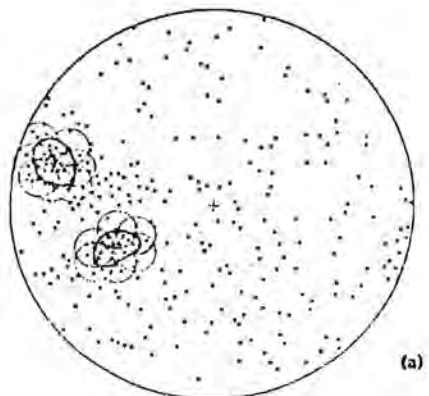
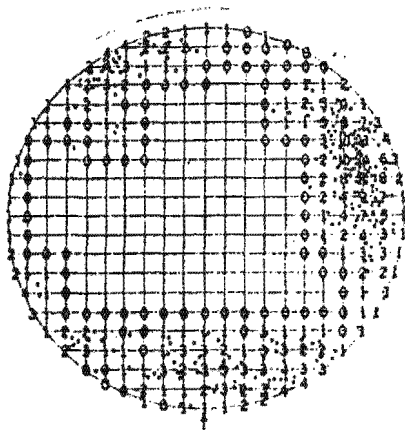
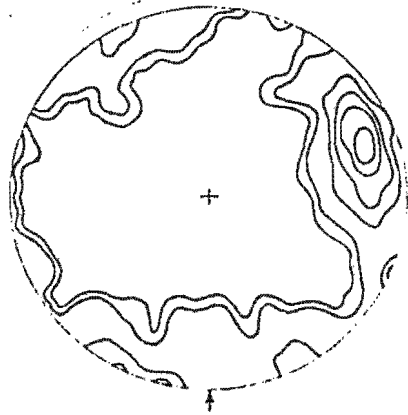


Figura 62



(a)



(b)

Figura 63

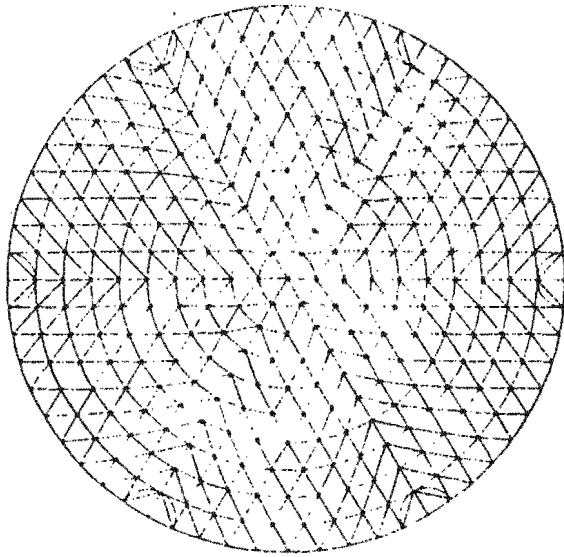


Figura 64

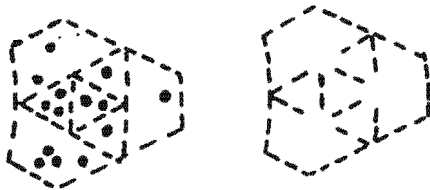


Figura 65



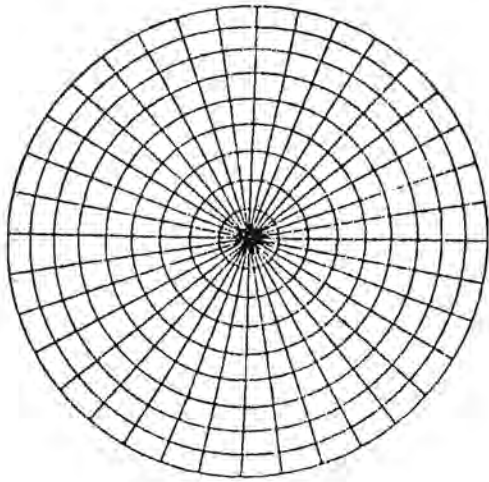


Figura 66

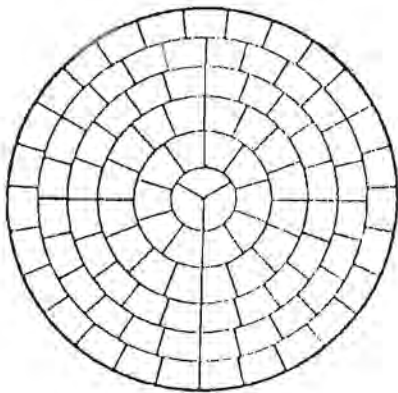


Figura 67

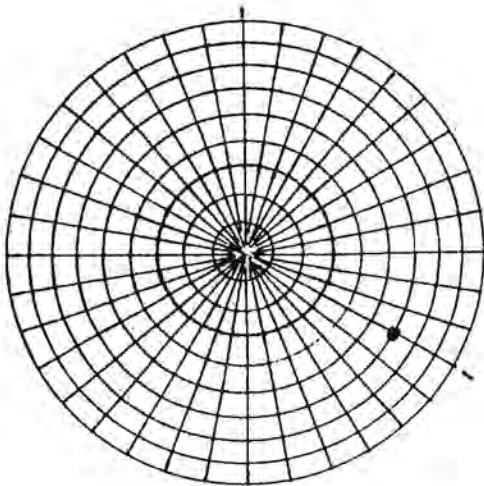


Figura 68



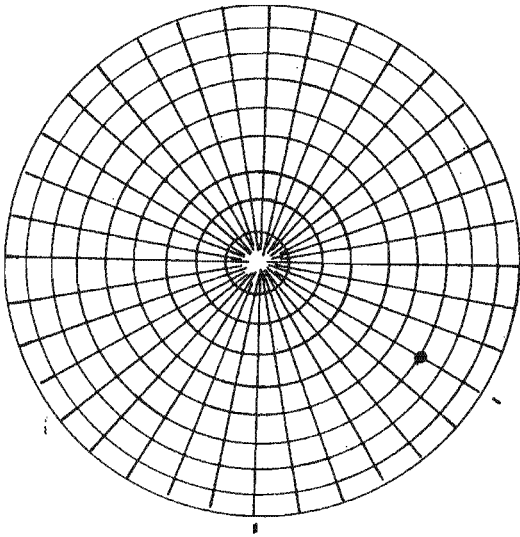


Figura 69

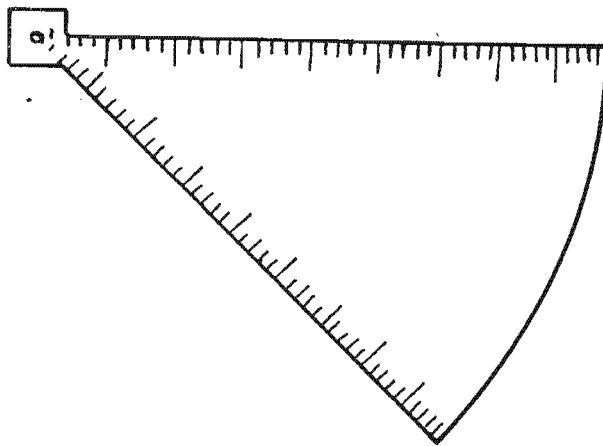


Figura 70

formación proveniente de diferentes "ambientes estructurales" que invalidaría las conclusiones.

Entre los autores que se han ocupado tanto de los métodos de recolección de datos como de la interpretación de los resultados merecen destacarse Whitten (1966), Turner y Weiss (1963), Cloos (1946), Hobbs, Means y Williams (1976) y Knopf y Ingerson (1938).

### VII.1.- Determinación de la actitud del eje de un pliegue a partir de datos de actitud de los bancos

Si se observa el esquema presentado en la figura 71 se verá que una estructura plegada puede ser interpretada en función de los datos de rumbo e inclinación como una serie de infinitos planos tangentes a la superficie del pliegue. Dichos planos son en el caso de pliegues cilíndricos perpendiculares al radio del pliegue y paralelos al eje del mismo.

Por lo tanto y de acuerdo con el diagrama de la figura 72a los polos correspondientes a los planos de estratificación alrededor de un pliegue se ordenarán en la red estereográfica de Wulf según la trayectoria de una circunferencia máxima tal como se muestra en la figura 72b. Es importante destacar que sólo en el caso de un pliegue cilíndrico cuyo eje es horizontal se obtendrá el esquema representado, pues el arco de circunferencia máximo correspondiente es un diámetro de la red. Si el eje del pliegue fuera buzante, tal como se ejemplifica en la figura 73a se obtendría el diagrama estereográfico de la figura 73b.

Una vez determinada por las técnicas normales la actitud del plano que contiene a las perpendiculares a los planos de estratificación es muy sencillo obtener el dato de orientación y buzamiento de la línea que representa al eje del pliegue, ya que la misma es perpendicular a este plano. En la figura 74a se muestra el esquema tridimensional y en la figura 74b la ubicación del punto que representa al eje del pliegue en la red estereográfica. Este punto así hallado ha sido denominado "polo  $\pi$ " por algunos autores y coincide con el eje B del pliegue. La traza del plano perpendicular equivalente se denomina "círculo  $\pi$ " (en rigor debiera denominarse "circunferencia  $\pi$ ").

Otra manera de determinar la posición del polo  $\pi$  es trazar directamente las actitudes de los planos mediante proyección ciclográfica, lo que para el mismo ejemplo de la figura 74 daría el diagrama de la figura 75. Como puede observarse la representación se hace más confusa a medida que aumenta el número de datos, y en forma similar aumenta también el número de intersecciones de los planos de acuerdo con la fórmula

$$N^{\circ} \text{ int} = \frac{N^{\circ} \text{ polos} (N^{\circ} \text{ polos} - 1)}{2}$$

lo cual hace que habitualmente y con el fin de hacer más clara la representación la determinación del polo  $\pi$  se haga en forma indirecta a partir del círculo  $\pi$ .

Se ilustrarán a continuación con un mismo ejemplo ambas técnicas para un pliegue cilíndrico.

#### VII.1.a.- Determinación del polo $\pi$

Sea el caso de un pliegue sobre el cual se han medido las siguientes actitudes

Medición	Plano		Polo	
	R	I	Az	Bto
A	138°	82° SO	48°	8°
B	148°	73° SO	58°	17°
C	156°	60° SO	66°	30°
D	163°	58° O	73°	32°
E	175°	50° O	85°	40°
F	188°	47° O	98°	43°
G	205°	41° NO	115°	49°
H	215°	44° NO	125°	46°
I	231°	37° NO	141°	53°
J	236°	40° NO	146°	50°
K	248°	40° NO	158°	50°
L	262°	46° N	172°	44°
M	270°	49° N	180°	41°
N	272°	47° N	182°	33°
Ñ	280°	48° N	190°	32°
O	285°	65° NE	195	25°
P	294°	70° NE	204°	20°
Q	298°	74° NE	208°	16°
R	303°	81° NE	213°	9°
S	311°	90° NE	221°	0°

La representación ciclográfica correspondiente es la figura 76. Observamos que se han originado numerosas intersecciones debido fundamentalmente a pequeños errores en la toma de datos y a la falta de precisión en la representación de los mismos. De todos modos puede decirse que el eje será aproximadamente buzante 40° en dirección Az 311°.

#### VII.1.b.- Determinación del círculo $\pi$

En la figura 77 se presenta el diagrama de polos correspondiente al ejemplo anterior, la determinación de la posición del polo se realiza rápidamente de la siguiente manera. Una vez dibujados los polos de los planos de estratificación se gira el transparente hasta que se encuentra el arco de circunferencia máxima que mejor se ajuste al conjunto de puntos y luego tal como se señala en la figura 78 se traza sobre el diámetro este-oeste el polo  $\pi$  a 89-90° de la traza de la circunferencia  $\pi$  (Punto  $\pi$  de la figura 78).

En el caso de tratarse de pliegues cónicos los puntos se distribuyen sobre un arco de circunferencia menor, tal como se ilustra en la figura 79 a y b (compárese con la figura 73).

### VII.2.- Determinación de la actitud del plano axial de un pliegue

Si bien la dirección del eje  $\beta$  de un pliegue puede ser medida con relativa facilidad en el campo o bien calculada a partir de un diagrama de polos (item VII.1) no siempre se cuenta con afloramientos adecuados para medir la actitud del plano axial. Es sumamente sencillo reconstruir la actitud del mismo en función de la actitud del eje  $\beta$  y del hundimiento de la traza del plano axial en un plano cualquiera cuya actitud es de fácil determinación en el campo.

Sea el caso ilustrado en la figura 80 en el cual tenemos que la dirección del eje anticlinal es Az 180° y su buzamiento 0°. En un talud de rumbo Az 70° e

inclinación 40° al sureste la línea que une los puntos de máxima curvatura de los bancos hunde 38° hacia el oeste. El procedimiento a seguir es el siguiente: se grafican en la red estereográfica la posición del eje  $\beta$ , la del plano y el valor del hundimiento correspondientes obteniéndose la figura 81. Se traza a continuación el arco de circunferencia máxima que pasa por el punto h, correspondiendo la actitud del plano axial así determinado a un Rumbo Az 180° e inclinación 37° al oeste (figura 82).

En la figura 83 se presenta otro ejemplo en el cual el eje del pliegue presenta un determinado buzamiento, 15° en el Az 200°. Sobre un plano de actitud R Az 100° e inclinación 60° al sur la línea que une los puntos de máxima curvatura hunde 45° hacia el sureste. Estos datos han sido representados en la figura 84. En la figura 85 se han llevado los puntos  $\beta$  y h a coincidir sobre un arco de circunferencia máxima. Se traza a continuación dicho arco y se lee la actitud del plano en la forma corriente. El valor obtenido es R Az 38° e inclinación 38° al sureste (figura 86).

### VII.3.- Análisis de la forma de un pliegue

Los diagramas representativos de los polos de la superficie de estratificación pueden ser de gran utilidad en el análisis de la forma de los pliegues. Se dan en la figura 87 una serie de esquemas característicos para diferentes casos y en forma más exhaustiva se presentan los diagramas correspondientes a las distintas posibilidades de disposición de pliegues cilíndricos y cónicos en la figura 88 y 89.

M. J. Rickard (1971) combina la clasificación de Fleuty (1964) con diagramas estereográficos obteniendo esquemas de correspondencia semejantes a los que se presentan en la figura 90.

### VII.4.- Petrología estructural y determinación de la orientación de los esfuerzos

Es sabido que un determinado sistema de fuerzas da origen a un cierto número de estructuras asociadas al producirse la deformación del sistema rocoso. En la figura 91 se presentan las estructuras que pueden originarse en un bloque de roca a partir de diferentes situaciones de esfuerzo. De Sitter (1976) señala como consecuencia de sus trabajos de campo una serie de conclusiones que se considera interesante reproducir. Son ellas:

- "a.- Los sistemas de grietas dependen del carácter litológico de la roca, una arenisca masiva o una grauvaca o una pizarra tienen cada una su propio momento de fracturación, con frecuencias y direcciones características para cada litología.
- b.- Algunos sistemas pueden ser de origen temprano, por lo tanto se pliegan al avanzar la deformación.
- c.- Los sistemas que se desarrollan en la zona de charnela pueden responder a campos locales y no desarrollarse en los flancos.
- d.- Aunque los sistemas pueden ser regulares en áreas reducidas dicha regularidad desaparece al aumentar el área de muestreo cuando las estructuras son complejas".

Puede añadirse a lo anterior que dado que las estructuras desarrolladas en una primera fase intro-

ducen nuevas anisotropías e inhomogeneidades en el macizo, cada vez es menos simple la relación entre las estructuras póstumas y los esfuerzos generadores de las mismas.

En la figura 92 se presentan a modo de ejemplo los diagramas de polos correspondientes a distintas estructuras dentro de diversos dominios de un sistema de pliegues no cilíndricos. La misma ha sido tomada de Turner y Weiss (1963).

Además de las estructuras de origen mecánico (fracturas, pliegues) pueden desarrollarse durante el proceso de deformación "fábricas" minerales resultantes de la orientación preferencial de los minerales lineares o planares (o de sus ejes cristalinos) como respuesta al campo tensional. El análisis petrográfico brinda una herramienta de gran utilidad, tanto para la correlación de las estructuras microscópicas con las macroscópicas como para en algunos casos diferenciar distintas fases de deformación en función de los minerales involucrados. Se presentan en la figura 93 los diagramas correspondientes a las distintas clases de simetría que es dable observar en los diagramas petrográficos, remitiéndose al lector a las obras de Turner y Weiss (1963), Hobbs, Means y Williams (1976), Griggs y Handin (1960), Knopf e Ingerson (1938), Cloos (1946), Whitten (1966), para un tratamiento más extenso del tema, cuya amplitud escapa a los propósitos del presente trabajo.

## VIII.- ESTUDIO DE LA ESTABILIDAD DE HASTIALES, BOVEDAS Y TALUDES

Los métodos basados en la proyección estereográfica han demostrado ser de gran utilidad en la evaluación de los riesgos de desprendimiento y caída de bloques en taludes, hastiales y bóvedas de túneles y excavaciones en general desarrollados en macizos fracturados. Con la adición de técnicas de proyección ortográfica pueden incluso calcularse tanto el volumen de los trozos que se desprenderán como los sectores en los cuales ello tendrá lugar teniendo en cuenta la frecuencia de los planos de discontinuidad y las dimensiones de la obra.

### VIII.1.- Estudio de la estabilidad de taludes

El grado de fracturación y la orientación relativa de las fracturas con respecto al frente del talud, así como la pendiente del mismo son los factores principales que controlan la estabilidad de estas superficies. El análisis mediante la proyección estereográfica permite un rápido examen de las áreas potencialmente más inestables brindando orientación para estudios posteriores de detalle. Los factores que se deben considerar son:

- Orientación y pendiente del talud.
- Actitud de los distintos planos de discontinuidad presentes en el macizo rocoso.
- Angulo de fricción de los materiales involucrados.
- En los estudios de mayor detalle deben considerarse además las características del relleno de las discontinuidades, circulación de agua, etc.

Las condiciones básicas de estabilidad estarían aseguradas cuando en la dirección perpendicular a la

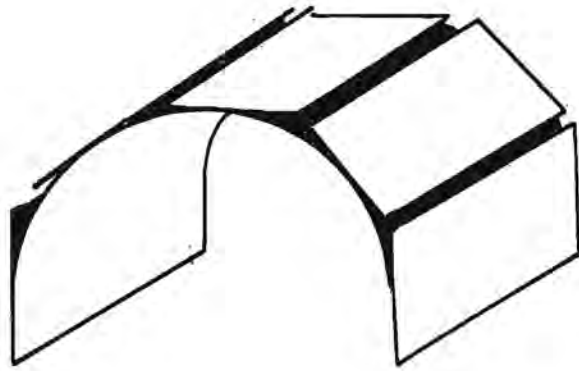


Figura 71

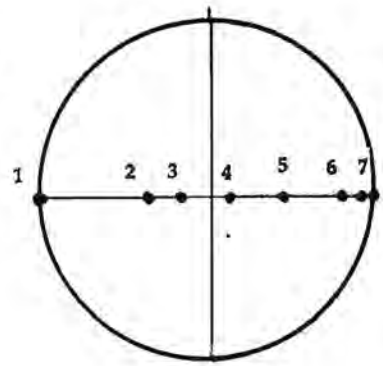
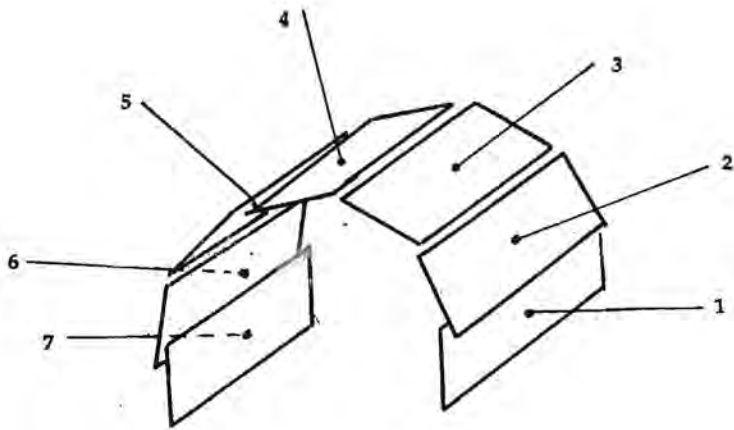


Figura 72

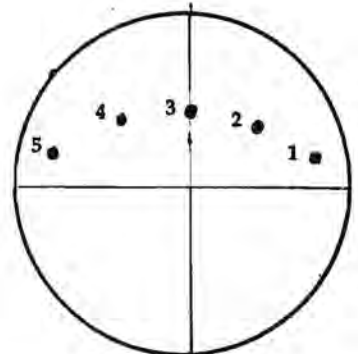
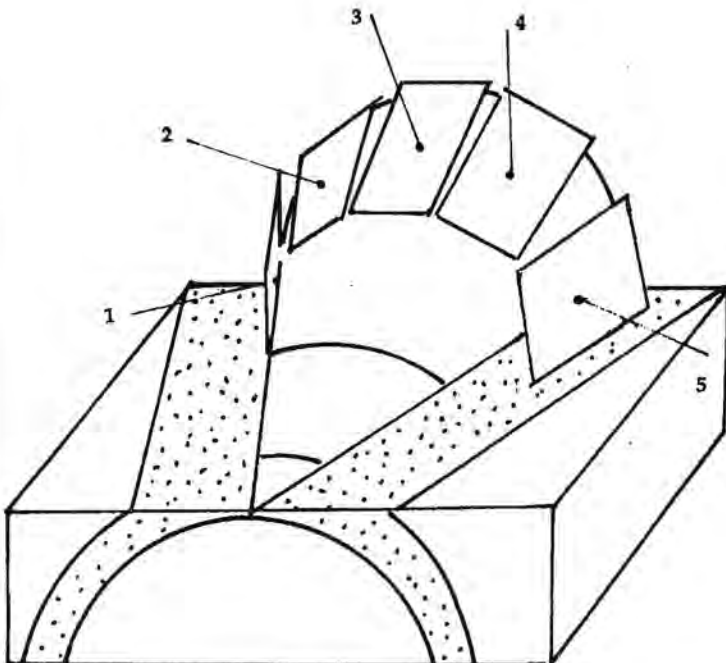
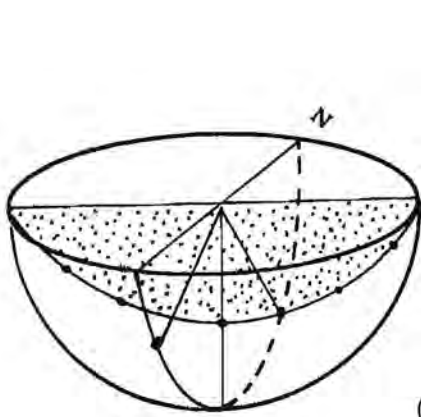
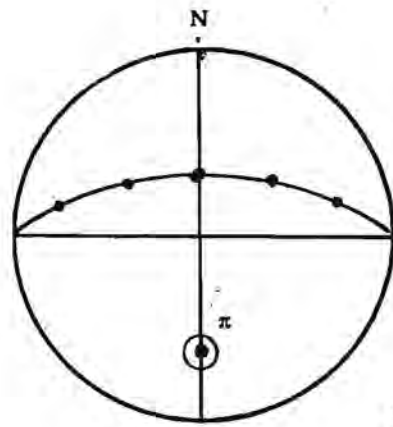


Figura 73



(a)



(b)

Figura 74

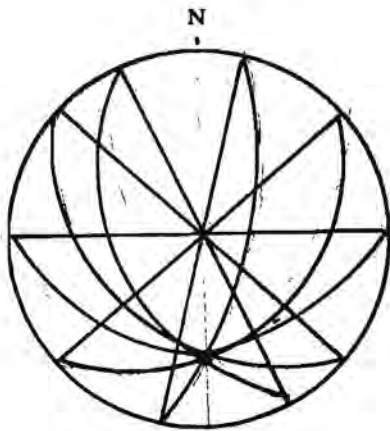


Figura 75



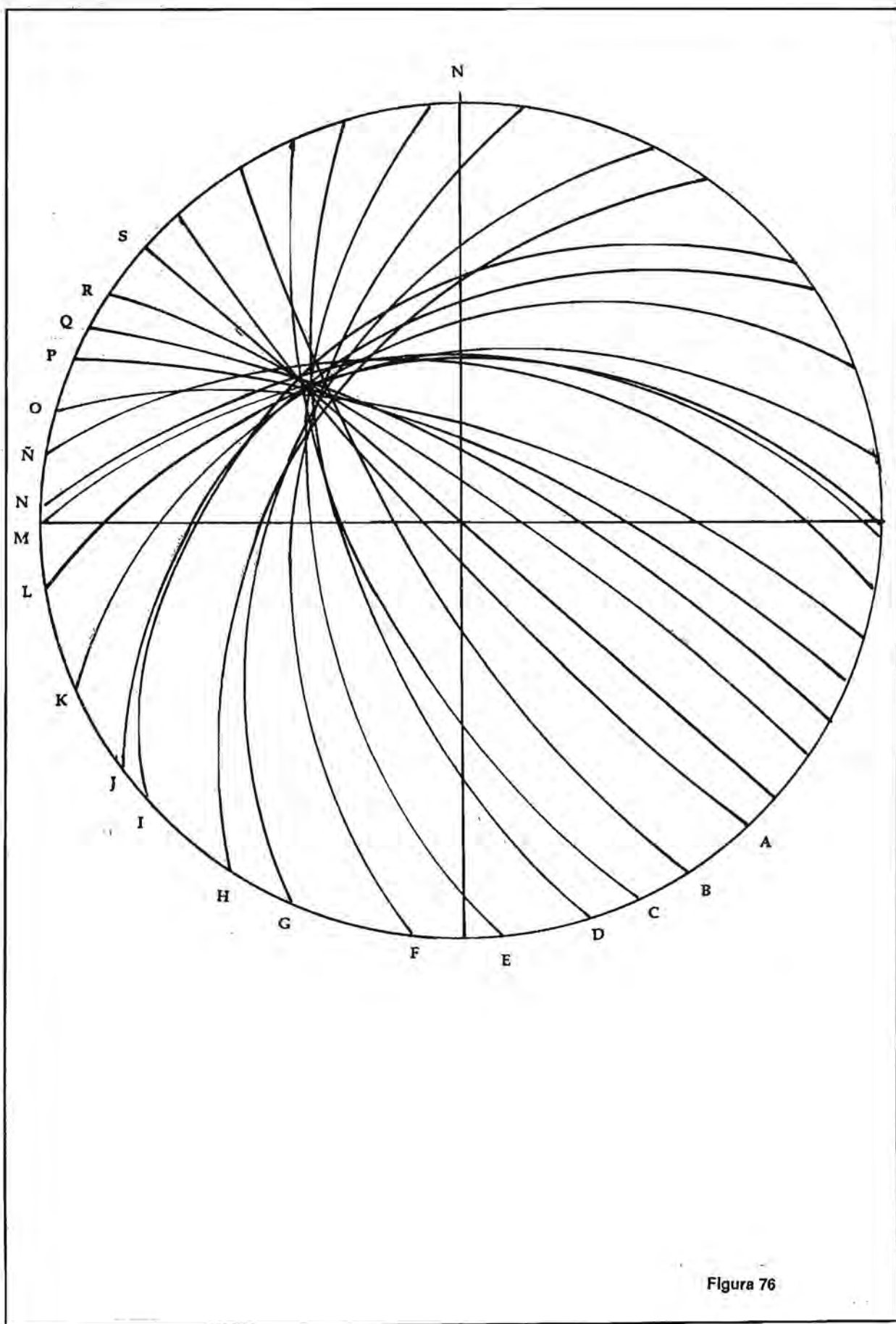


Figura 76

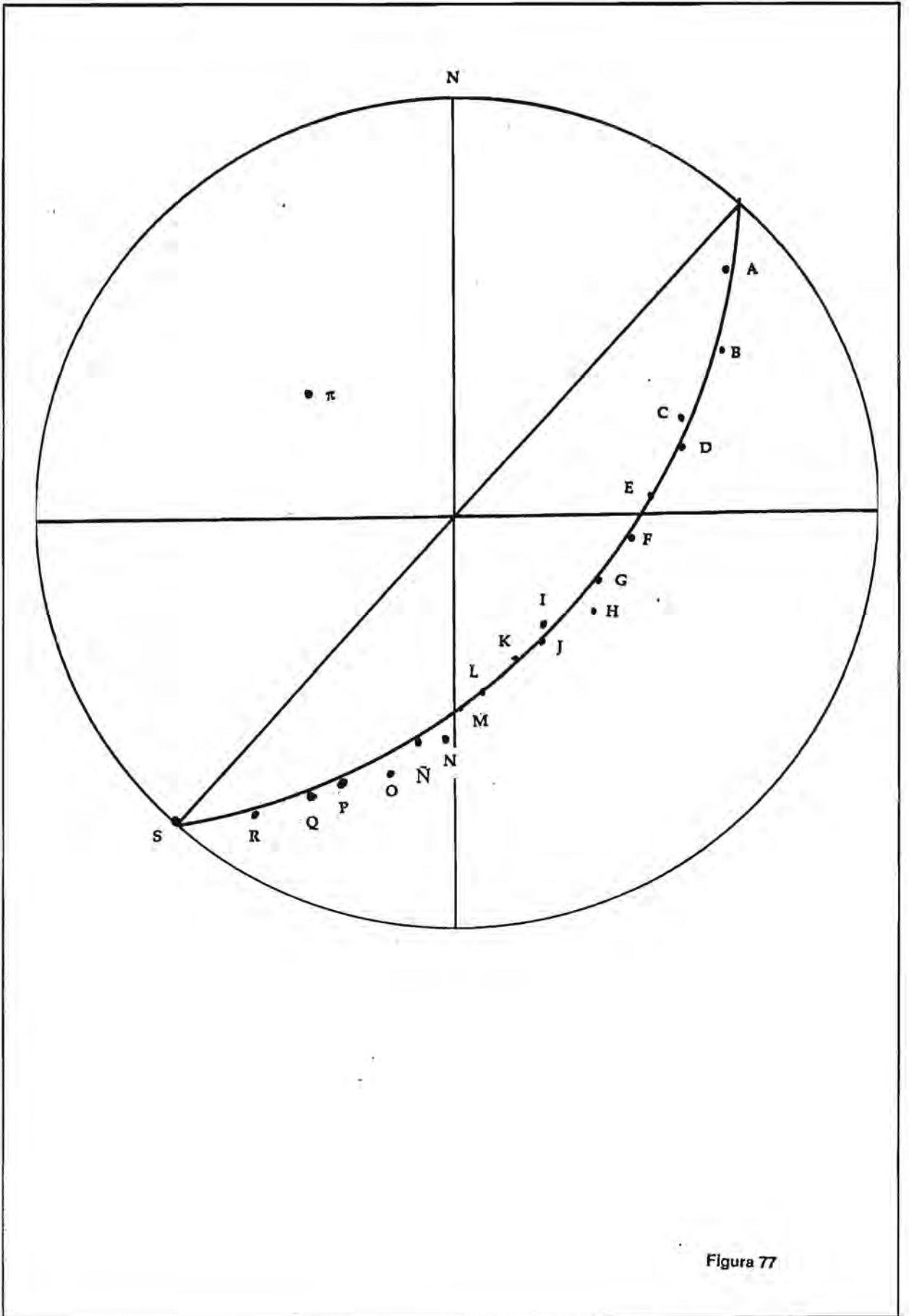


Figura 77

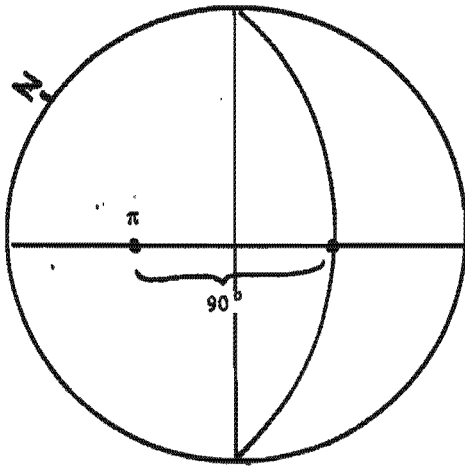


Figura 78

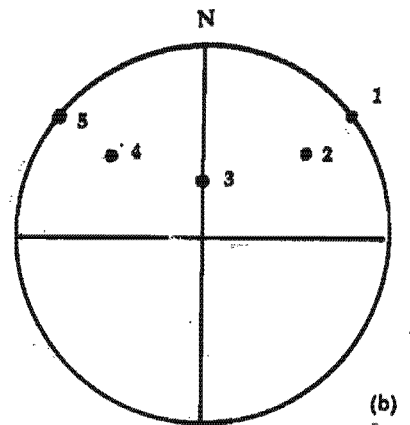
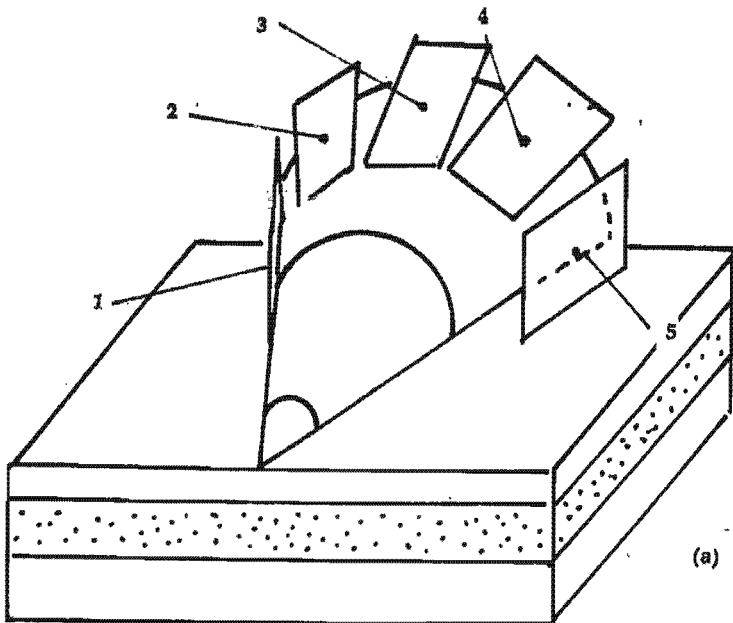


Figura 79

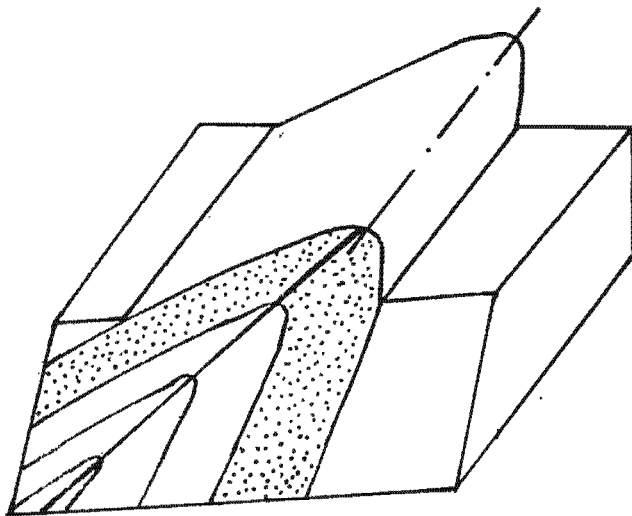


Figura 80

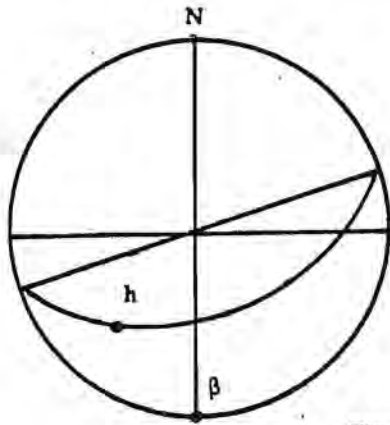


Figura 81

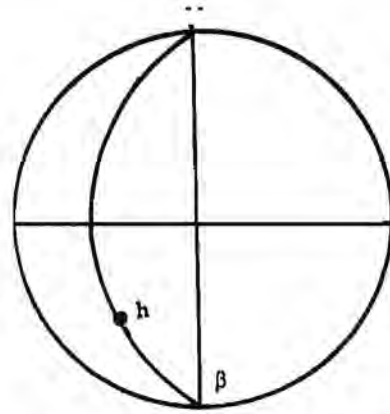


Figura 82

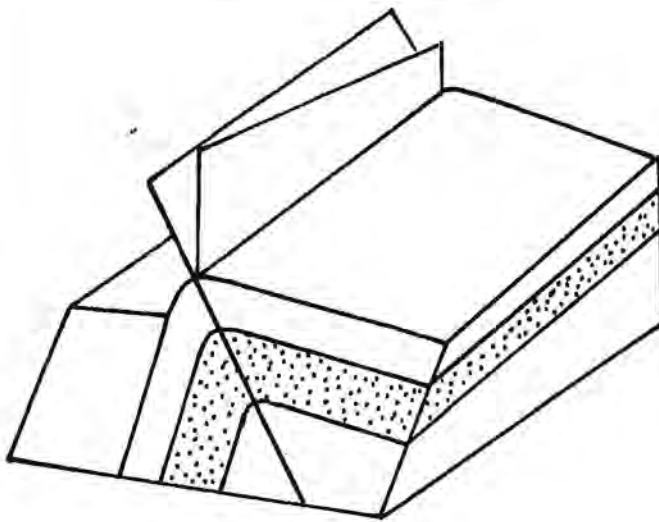


Figura 83

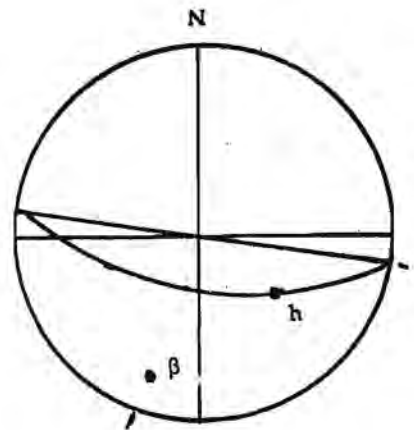


Figura 84

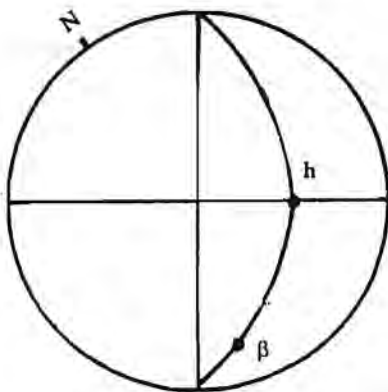


Figura 85

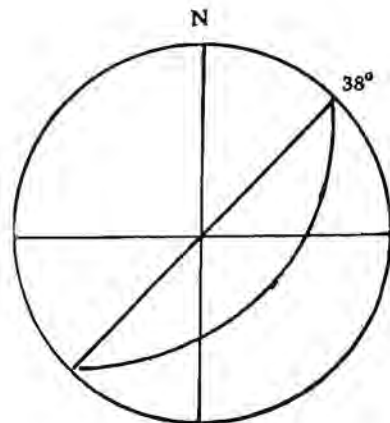


Figura 86

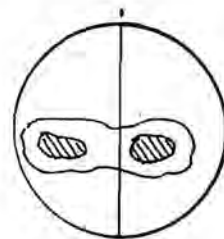
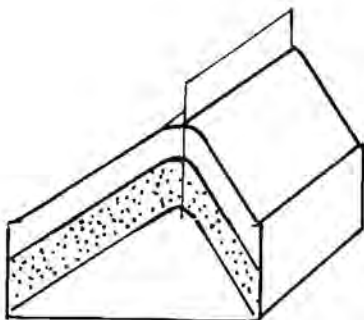
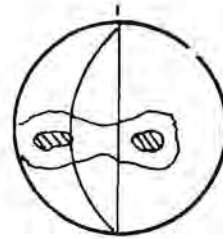
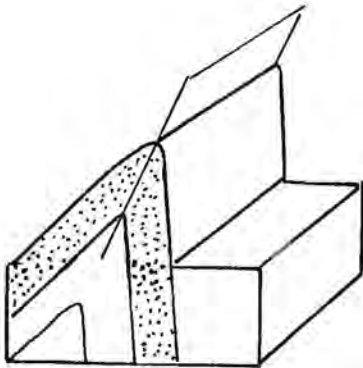
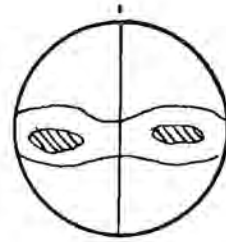
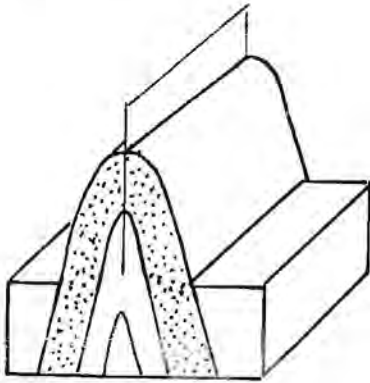
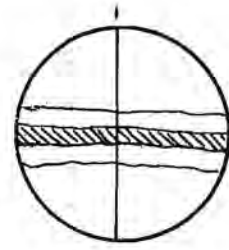
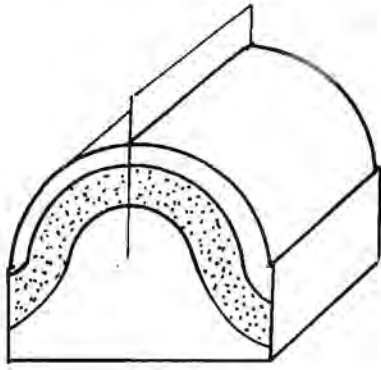


Figura 87



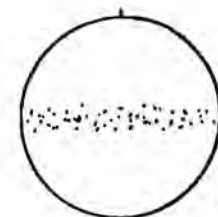
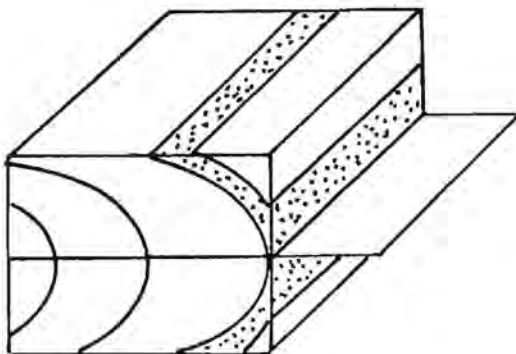
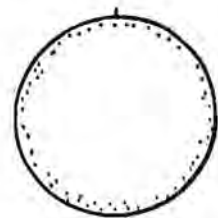
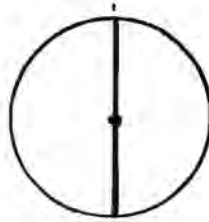
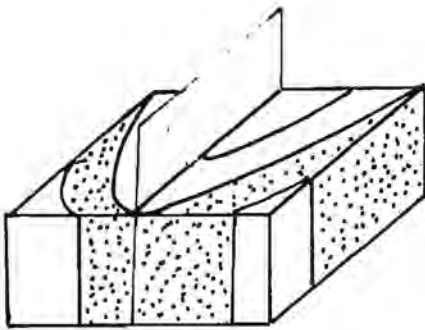
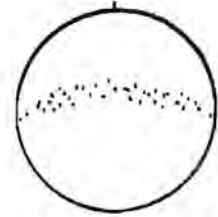
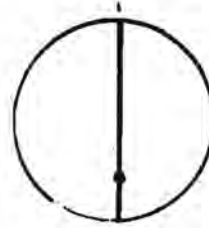
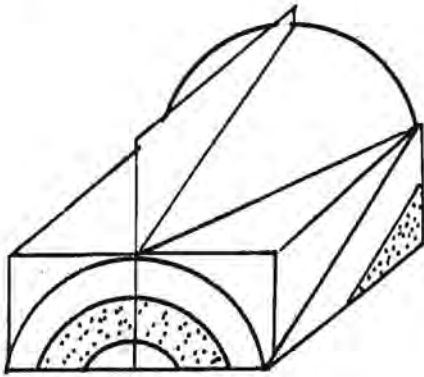
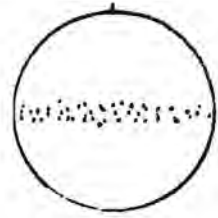
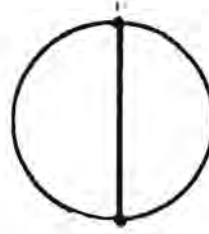
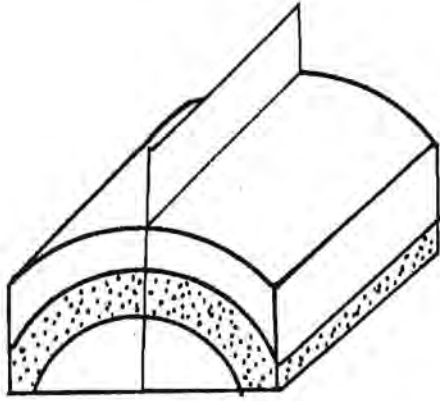


Figura 88

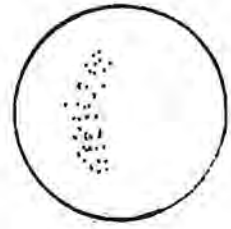
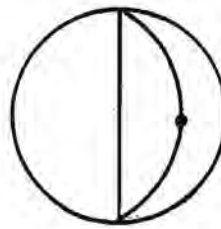
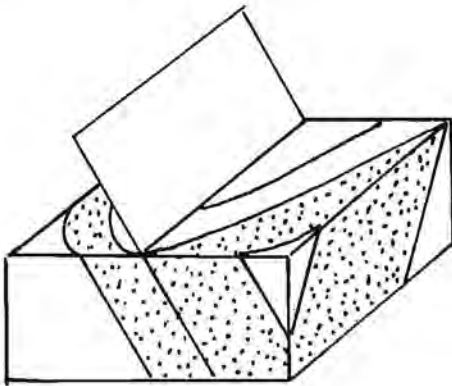
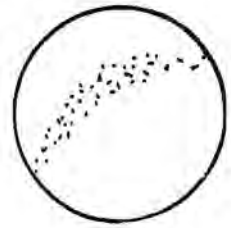
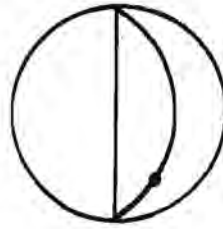
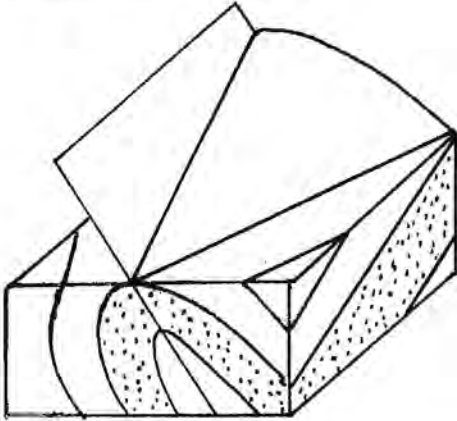
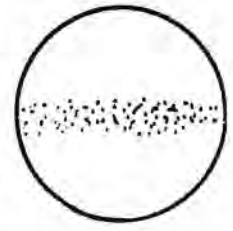
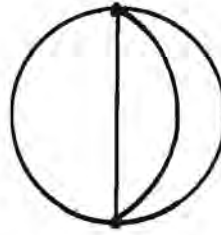
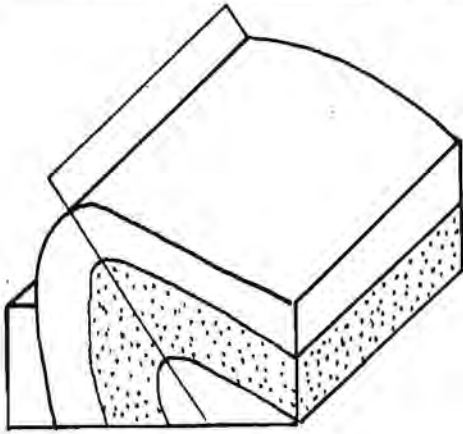


Figura 88 (cont.)

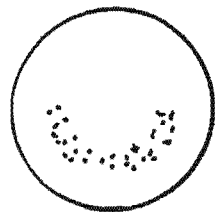
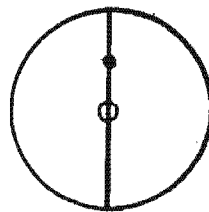
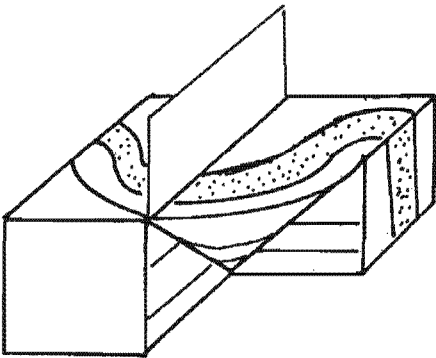
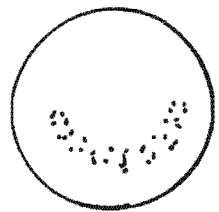
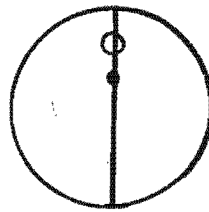
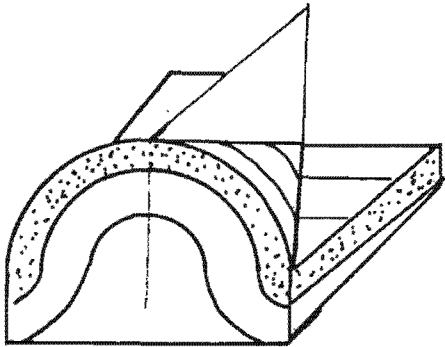
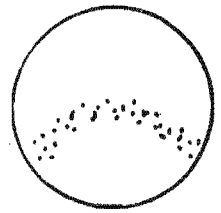
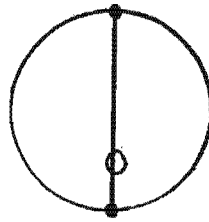
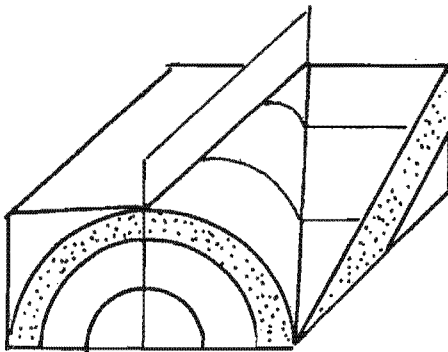
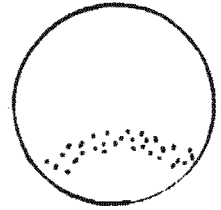
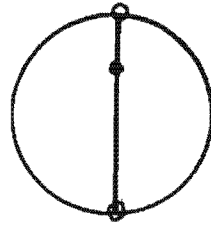
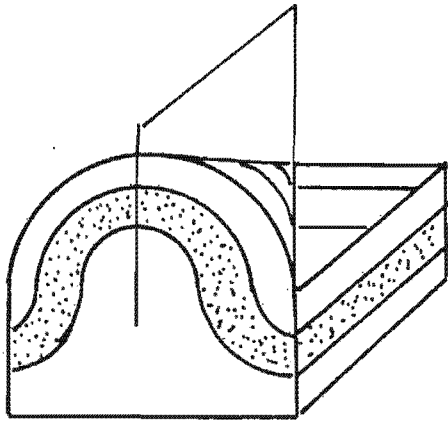


Figura 89

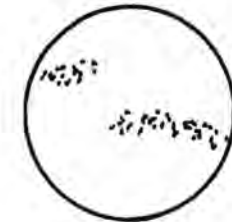
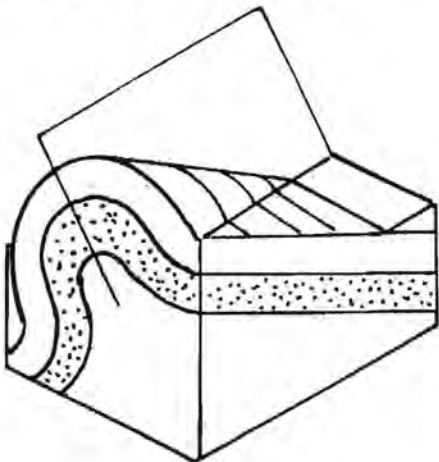
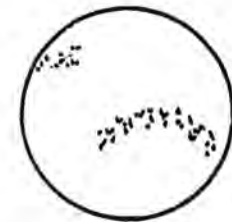
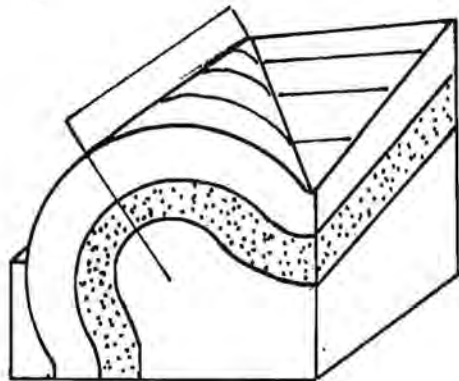
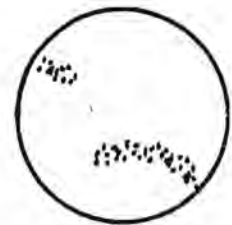
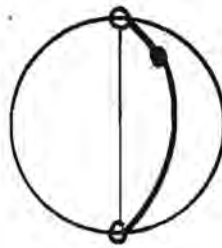
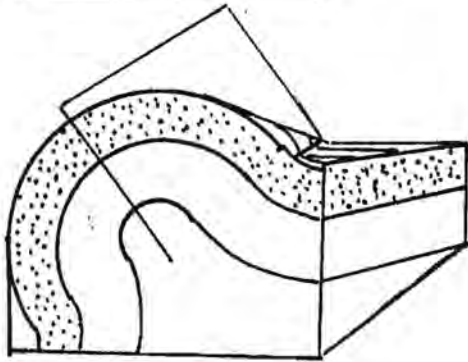
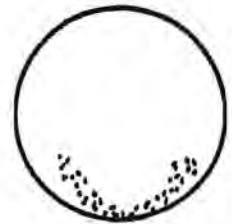
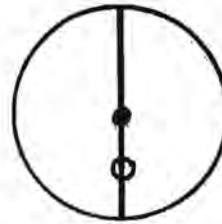
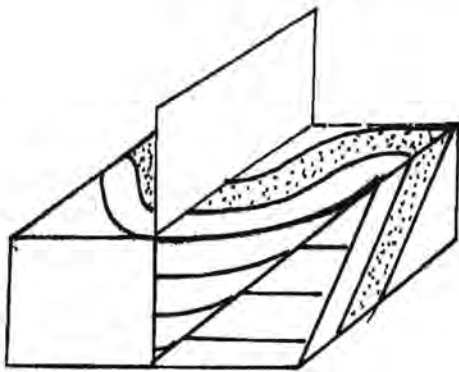


Figura 89 (cont.)

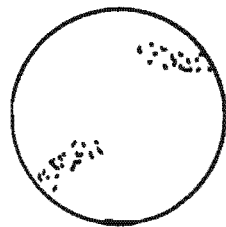
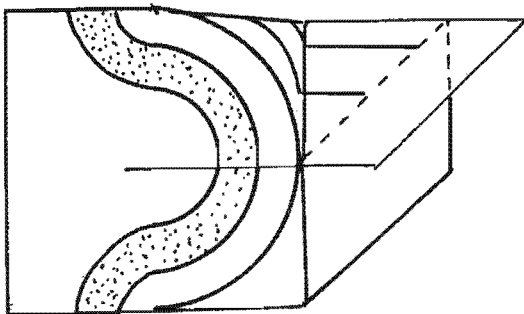
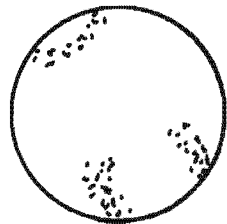
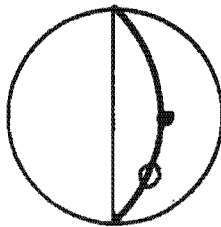
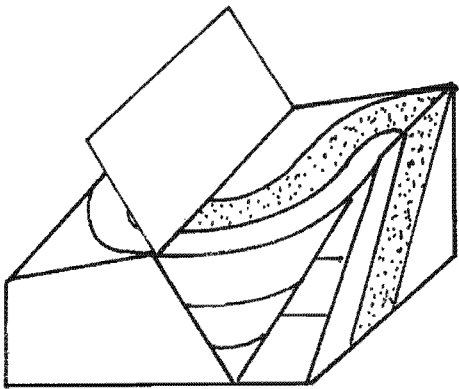
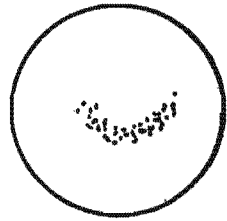
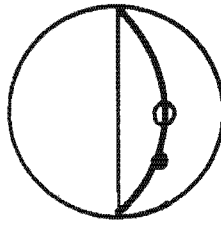
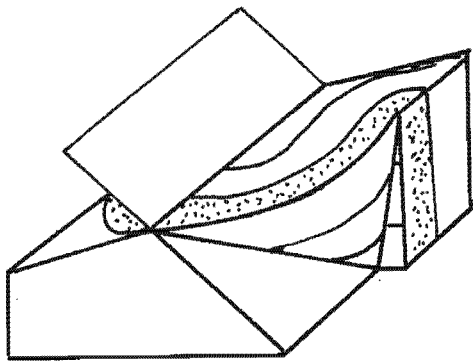


Figura 89 (cont.)

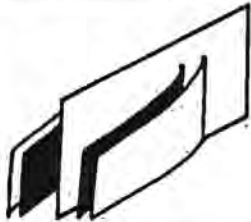
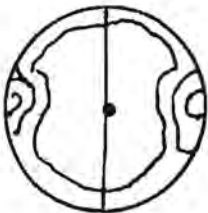
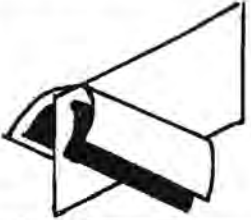

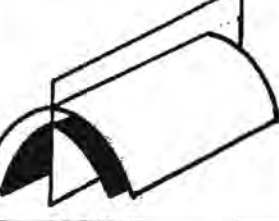
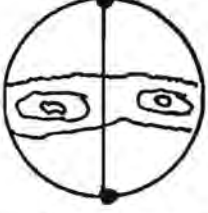


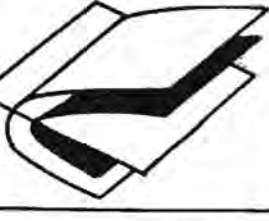
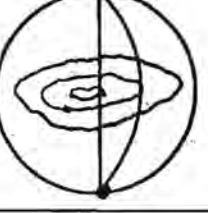
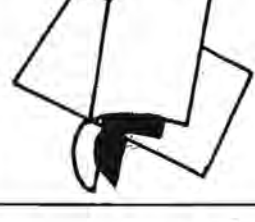
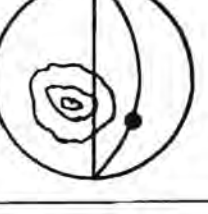


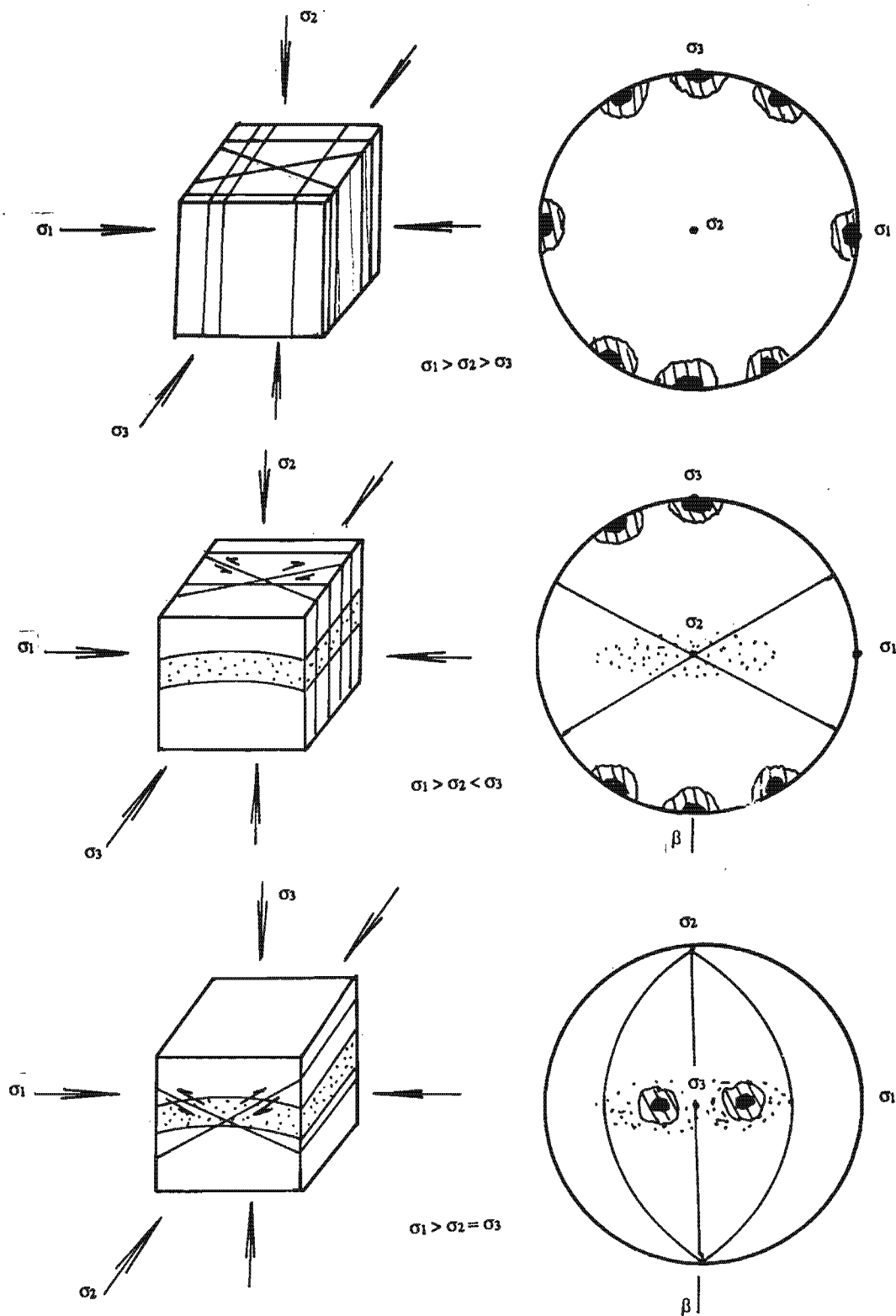
		<p>Vertical</p>
		<p>Normal buzante</p>
		<p>Normal horizontal</p>
		<p>Inclinado buzante</p>
		<p>Inclinado horizontal</p>
		<p>Volcado</p>
		<p>Recumbente</p>

Figura 90





Concentración de fracturas



Polos a  $\sigma_1$

Figura 91

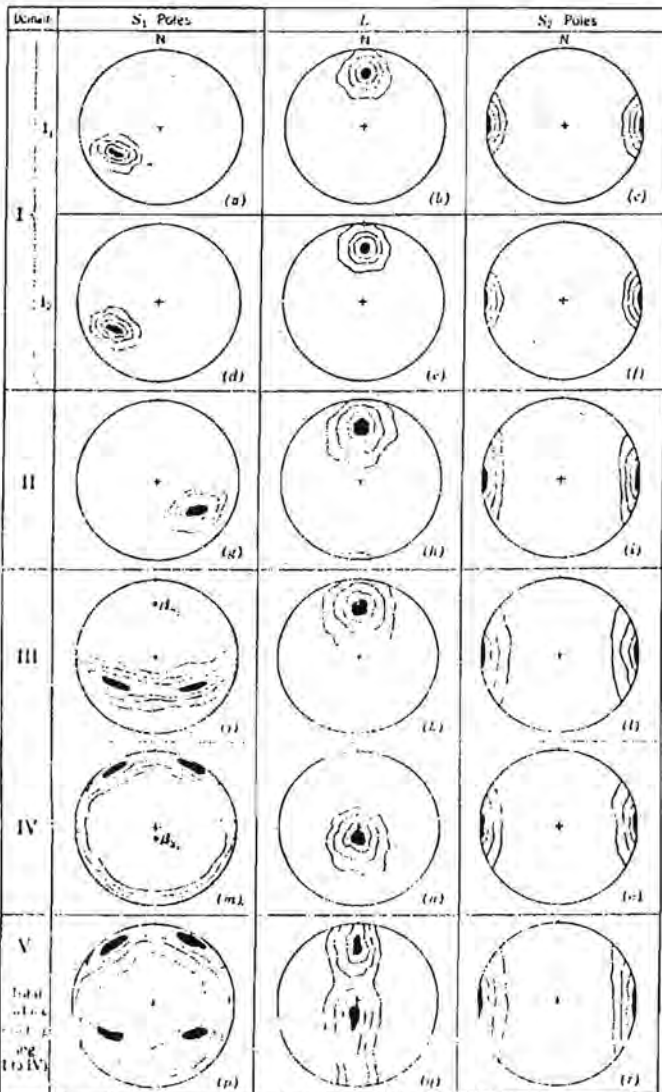
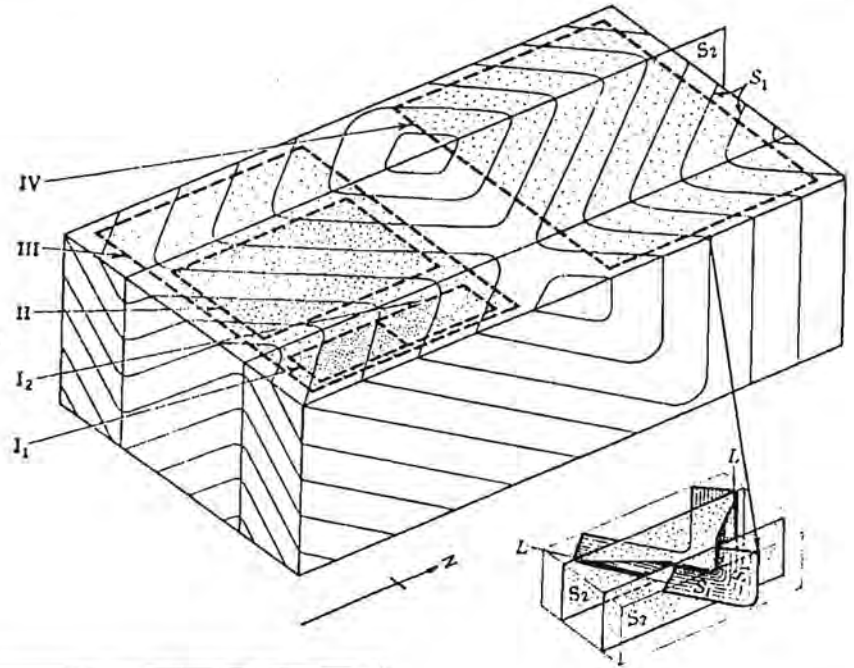
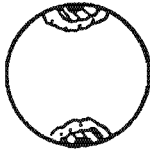
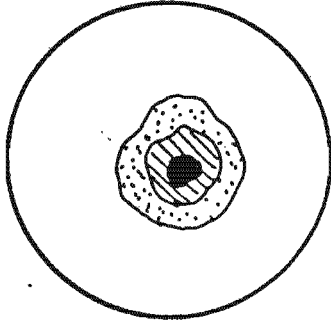


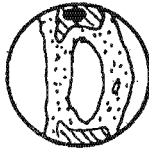
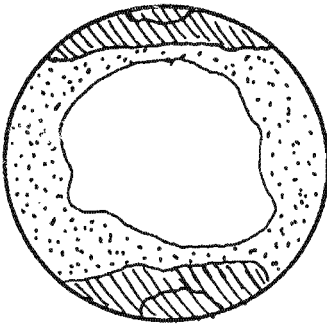
Figura 92



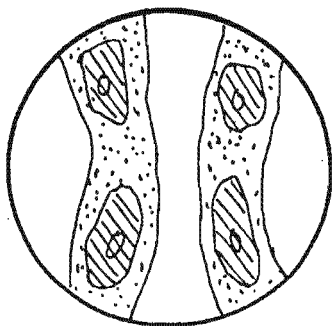
Caótica



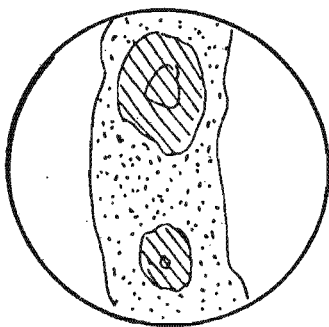
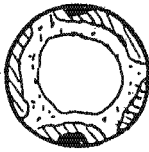
Axial



Ortorrónica



Monoclínica



Triclínica

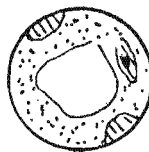


Figura 93

superficie libre del talud no existen planos ni intersecciones cuya inclinación o buzamiento respectivamente sea menor que la pendiente del talud por una parte ni mayor que el ángulo de fricción por la otra. En el caso de la figura 94 las condiciones serán de estabilidad para el plano A pero de inestabilidad con respecto a B.

Cuando se trata de líneas de intersección de planos vemos que para el ejemplo de la figura 95 la cuña C se mantendrá estable pues el buzamiento de la intersección de sus planos (bc) es menor que el ángulo de fricción, mientras que para la cuña D, se producirá el deslizamiento ya que el buzamiento de su intersección (bd) es mayor que el ángulo de fricción.

El procedimiento a seguir para determinar las condiciones de estabilidad es el siguiente: una vez representados los diferentes planos de discontinuidad (y entre ellos debe incluirse el de estratificación) se agrega al diagrama la traza de la superficie del talud, obteniéndose por ejemplo un diagrama como el de la figura 96. A continuación se traza la circunferencia menor representativa del ángulo de fricción, obteniéndose la figura 97, en la cual se ha sombreado el "área crítica" correspondiente a aquellos valores comprendidos entre la inclinación del talud y el ángulo de fricción. La intersección entre S1 y S2 (los dos juegos de diaclasas) cae dentro de dicha área por lo tanto el talud diseñado sería inestable para ese sistema de discontinuidades. Por el contrario no presentaría problemas con respecto a las intersecciones entre el plano de estratificación (Ss) y el juego S1 pues su intersección buza con un ángulo mucho menor que el de fricción y la intersección entre Ss y S2 buza en dirección contraria al talud.

Plantado el problema en forma inversa, es decir, cual sería la dirección más adecuada para construir un talud en condiciones de mayor seguridad, lo que se hace es trazar los planos de discontinuidad y el círculo correspondiente al ángulo de fricción y luego buscar (en función de la inclinación estimada y otros parámetros de interés) la orientación más conveniente.

Un análisis más detallado del esquema estereográfico permite incluso establecer si el deslizamiento de la cuña inestable se producirá a lo largo de la línea de intersección (figura 98) o sobre uno de los planos determinantes de la misma (figura 99). Para que esto último ocurra la dirección de máxima inclinación del plano sobre el cual se producirá el deslizamiento debe caer dentro de la zona sombreada en la figura 99 y entre la dirección de intersección y la de máxima inclinación del talud.

## VIII.2.- Estudio de la estabilidad de hastiales y bóvedas

En la figura 100 se muestra un esquema del plano del techo de una excavación en el que se han señalado las actitudes de tres juegos de diaclasas presentes. Junto al mismo se observa un esquema tridimensional y la proyección estereográfica correspondiente, en perspectiva y en el plano de la red.

Otro caso algo diferente se ha representado en la figura 101. Si comparamos ambas vemos que en el

primer caso el centro de la red estereográfica queda dentro del triángulo determinado por la intersección de los tres planos, por lo tanto la cuña de roca caerá por su propio peso, ya que no existe ninguna superficie que pueda actuar como sostén. En el segundo caso el centro de la red (que, como en el caso anterior representa a la vertical) queda fuera del triángulo representativo de la cuña, por ello queda inhibida la posibilidad de la caída libre del bloque. El factor determinante será ahora el valor del ángulo de fricción correspondiente al material rocoso involucrado. Si el valor de dicho ángulo es menor que el valor de la inclinación de alguno de los planos de fractura o de la intersección de un par de ellos el bloque se deslizará sobre esa superficie o línea y caerá. Por el contrario si el ángulo de rozamiento es mayor las condiciones serán de estabilidad. El valor de  $\phi$  se grafica trazando una circunferencia menor con centro en el de la red y radio igual al complemento de  $\phi$  (medido directamente sobre la dirección este-oeste de la red). En la figura 102 se ilustra el diagrama correspondiente al caso recién comentado.

La estabilidad de los muros puede estudiarse de acuerdo al procedimiento ya detallado para el caso de taludes, teniendo en cuenta en este caso que el buzamiento del talud son  $90^\circ$ .

Otra forma de realizarlo es proyectando sobre un plano vertical. Por otra parte, así como para el techo utilizamos la hemisfera inferior pues era en esa dirección en la cual nos interesaba estudiar la posición de las cuñas de roca, en el caso de las paredes nos interesa el tratamiento de la hemisfera que queda del lado del túnel en cada uno de los muros. En el ejemplo que se ilustra en la figura 103 para el muro este interesa la hemisfera oeste y en forma simétrica para el muro oeste interesa la representación de la hemisfera este. Estos conceptos se amplían en la figura 104. Como puede observarse las situaciones son completamente diferentes en cada muro, pues los planos que inclinaban hacia el túnel para uno de ellos (favorecen las condiciones de inestabilidad), lo hacen hacia el macizo en el otro revirtiendo la situación. Para la interpretación de los diagramas debe recordarse que siempre se observa desde el macizo rocoso hacia el túnel.

Uno de los métodos que puede utilizarse para la proyección de los datos en el plano vertical es el siguiente:

a.- Tomando el ejemplo de la figura 105 se desea construir a través de ese macizo rocoso un túnel en dirección Az  $145^\circ$ . De la figura 105a que corresponde a la representación de los datos pueden obtenerse los valores de las inclinaciones aparentes de cada uno de los planos en la dirección del muro. Estos valores se denominan  $\alpha 1$ ,  $\alpha 2$ ,  $\alpha 3$ . Si se ha decidido representar los datos correspondientes al muro sudoeste se construye entonces la figura 106 de la siguiente manera: El plano de proyección de la red corresponde ahora al plano vertical del muro como ya se dijo, por lo tanto la dirección señalada como norte-sur corresponde a la dirección de la plomada con el norte hacia arriba y el sur hacia abajo. El extremo derecho (este) corresponde a la dirección Az  $145^\circ$  y el izquierdo (oeste) al Az  $325^\circ$ . La línea este-oeste representa la intersección de un plano horizontal con el plano de



proyección y al centro de la red corresponde la proyección de una línea horizontal en dirección Az  $55^\circ$ . Recuérdese que un razonamiento similar a éste se utilizó en el Capítulo IV. (Tercer método). Para representar las trazas de las intersecciones de S1, S2 y S3 sobre el plano vertical se representan los valores de  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  y  $\alpha_3$  (obtenidos de la figura 105) teniendo cuidado de representar adecuadamente la dirección de inclinación. Se obtiene de esta manera la figura 107.

Para trazar los arcos de circunferencia máxima representativos de cada plano nos serviremos de los valores correspondientes al rumbo de cada uno de ellos, es decir, Az  $55^\circ$  para S1, Az  $90^\circ$  para S2 y Az  $0^\circ$  para S3. Se procede luego según el siguiente razonamiento: Si la dirección este de la red corresponde, tal como se ha dicho antes, al Az  $145^\circ$ , contando de este extremo hacia el centro iremos recorriendo los distintos valores, llegando al Az  $55^\circ$  en el centro, y luego al continuar hacia el extremo oeste pasando por el Az  $0^\circ$  se llega al Az  $325^\circ$  en el borde de la red. En el caso que el dato correspondiente al rumbo del plano quede fuera del rango abarcado por la hemisfera se trabaja con el valor correspondiente a la dirección a  $180^\circ$ , ya que el mismo es equivalente (véase Capítulo I). En la figura 108 se han indicado los valores correspondientes mediante los puntos 1', 2' y 3' y en la figura 109 se ha superpuesto esta información sobre la figura 107. Tenemos ahora elementos suficientes para trazar los arcos de circunferencia buscados. Para ello llevamos cada traza diametral a la dirección norte-sur de la red y trazamos el arco que pasa por el punto correspondiente (Punto 1' para S1, punto 2', para S2 y punto 3' para S3). De este modo se obtienen las figuras 110, 111 y 112.

Como el plano R Az  $55^\circ$  es perpendicular al muro del túnel la traza es una línea recta. En la figura 113 se ha restituido la línea norte-sur a la vertical.

Veamos ahora la forma de representar las condiciones en el otro muro (el noreste) para compararlas. El plano de proyección será también vertical, con la dirección norte-sur de la red representando la dirección de la plomada, pero la dirección este-oeste si bien corresponde a la horizontal representa ahora en su extremo derecho (este) el Az  $325^\circ$  y en su extremo izquierdo (oeste) al Az  $145^\circ$ , correspondiendo por ende a la perpendicular al centro de la red el Az  $235^\circ$ .

En la figura 114 se ha representado la primera parte del diagrama, teniendo en cuenta los valores y direcciones de inclinación aparente correspondientes a las trazas de las intersecciones de los planos y los puntos correspondientes a la dirección del Rumbo obteniéndose los puntos 1', 2' y 3'\*. Se hallan luego los círculos máximos correspondientes como se ilustra en las figuras 115 a 117. Si se compara la figura 118 con la figura 113, se observa que una es la imagen complementaria de la otra, por lo tanto y como era de esperar las condiciones de estabilidad pueden ser diferentes en cada lado del túnel. Es por ello de capital importancia establecer con claridad las direcciones

\* Obsérvese que ahora, si bien el dibujo es simétrico al de la figura 113 no lo es la posición de los puntos 2' y 3' por lo cual como se verá a continuación la imagen que se tiene es diferente.

(azimut) correspondientes a los bordes este y oeste de la red estereográfica (bordes izquierdo y derecho) cuando se utiliza la misma para proyectar sobre un plano vertical, teniendo en consideración la convención que la hemisfera debe estar del lado "del túnel" (por contraposición al lado "del macizo").

Tanto en el caso de muros como en el de taludes, para que pueda producirse el deslizamiento de los bloques, uno de los planos o una de las intersecciones por lo menos debe presentar una inclinación mayor que el ángulo de rozamiento. A diferencia de la representación de  $\emptyset$  con el plano de proyección horizontal (en la cual se obtiene una circunferencia menor, cuyo centro coincide con el de la red) cuando dicho plano es vertical la representación de  $\emptyset$  coincide con un arco de circunferencia cuyo centro se ubica sobre la línea norte-sur de la red, (y que coincidirá con los "paralelos" de la red, lo cual facilita su trazado). Esto se aclara en la figura 119. Completando el ejemplo utilizado se presentan las figuras 120 a y b de cuyo análisis surge que las condiciones son de estabilidad para el muro sudeste, ya que ninguna de las intersecciones buza más de  $35^\circ$  en dirección a la cavidad, mientras que por el contrario en el muro noreste la intersección de los dos planos de mayor inclinación buza más que el valor del ángulo de fricción, por lo cual las cuñas de roca se deslizarán hacia el túnel. En la figura 121 se presentan las hemisferas sobre la pared del túnel.

Completando el esquema propuesto se presenta en la figura 122 el diagrama correspondiente al techo o bóveda, en el mismo puede observarse que si bien la dirección vertical, (centro de la red) queda fuera del triángulo grisado y por lo tanto el bloque no caerá libremente, el buzamiento de la intersección de los planos de R Az  $0^\circ$  y R Az  $90^\circ$  es mayor que el valor del ángulo de fricción asumido, existiendo por lo tanto la posibilidad de caída de bloques. La figura 123 muestra una perspectiva aproximada del aspecto del túnel si se hubieran "corporizado" en el mismo las hemisferas de proyección utilizadas en el análisis de estabilidad.

En algunos casos puede no ser necesario construir los diagramas de proyección vertical para establecer las condiciones de estabilidad de muros y taludes. Para el mismo ejemplo anterior se ha construido la figura 124 en la que se ha señalado la dirección del túnel. En la misma puede observarse que los puntos correspondientes a las intersecciones de los distintos planos de discontinuidad con las paredes del túnel (identificados con las letras S, T, U) presentan diferentes relaciones tanto con la circunferencia menor representativa del ángulo  $\emptyset$  como además diferente dirección relativa de la inclinación máxima de cada uno de los tres planos con respecto a la pared. Cuando la dirección de inclinación es hacia el túnel y el ángulo de intersección es mayor que  $\emptyset$  la situación es inestable, siendo estable cuando el ángulo es menor que  $\emptyset$  y por supuesto cuando la dirección de inclinación es hacia el interior del macizo. Pero debe tenerse cuidado en realizar el análisis con respecto a los bloques definidos por la intersección de los planos y no para cada plano por separado. Un bloque puede ser estable con respecto a una de sus caras pero inestable con respecto a otra.

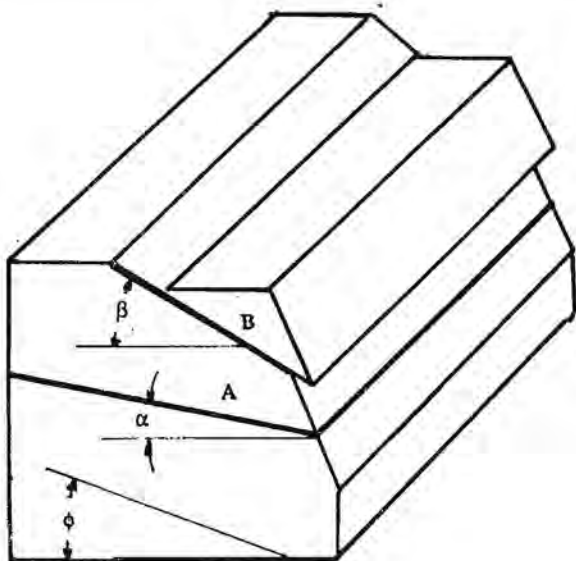


Figura 94

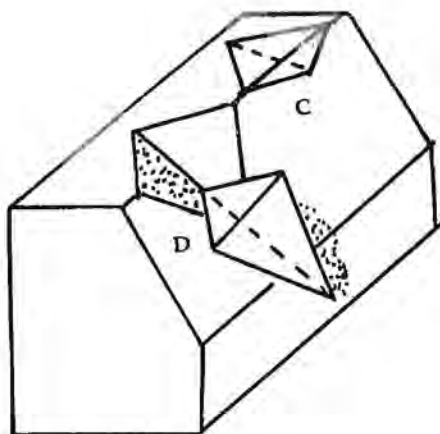


Figura 95

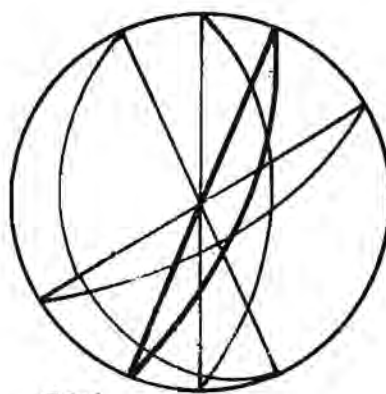
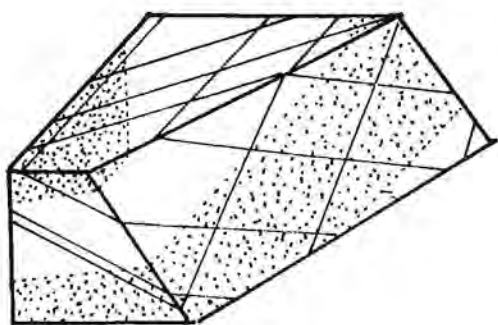


Figura 96



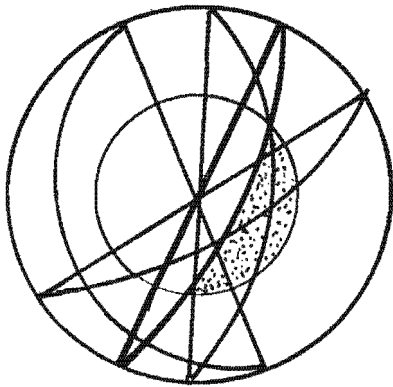


Figura 97

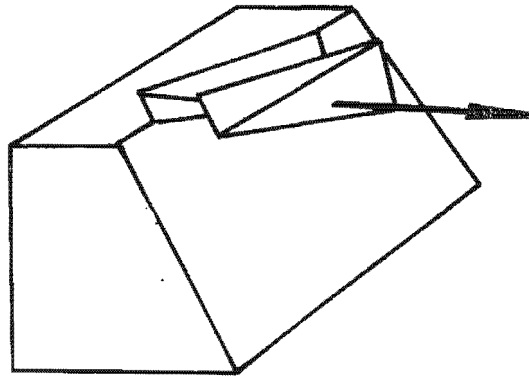
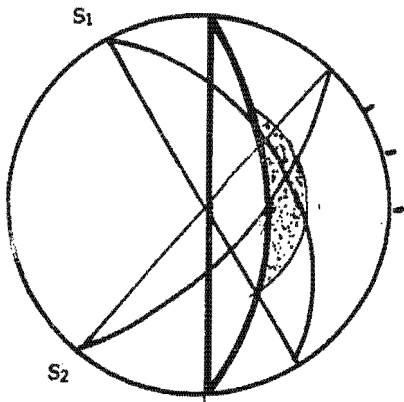


Figura 98

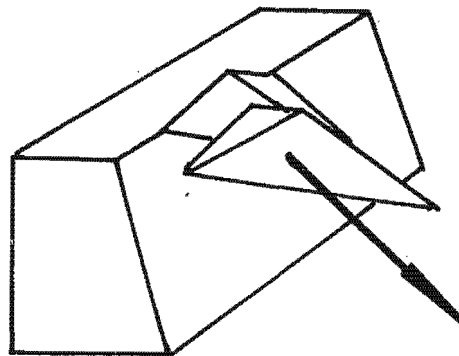
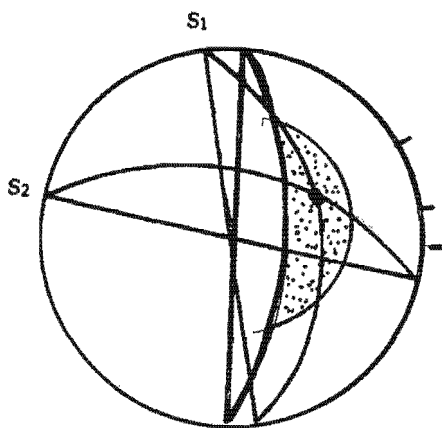
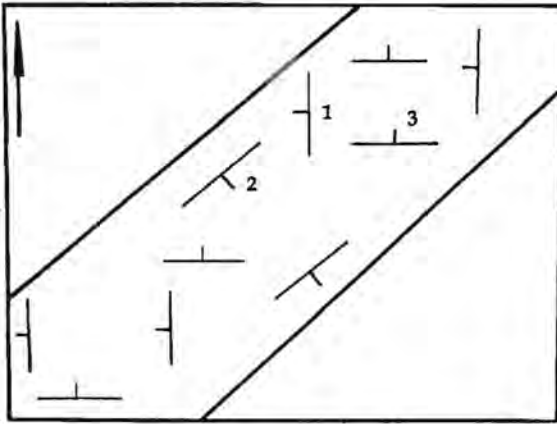


Figura 99



1 R Az 0 l: 30° al O  
 2 R Az 45 l: 60° al SE  
 3 R Az 90 l: 45° al N

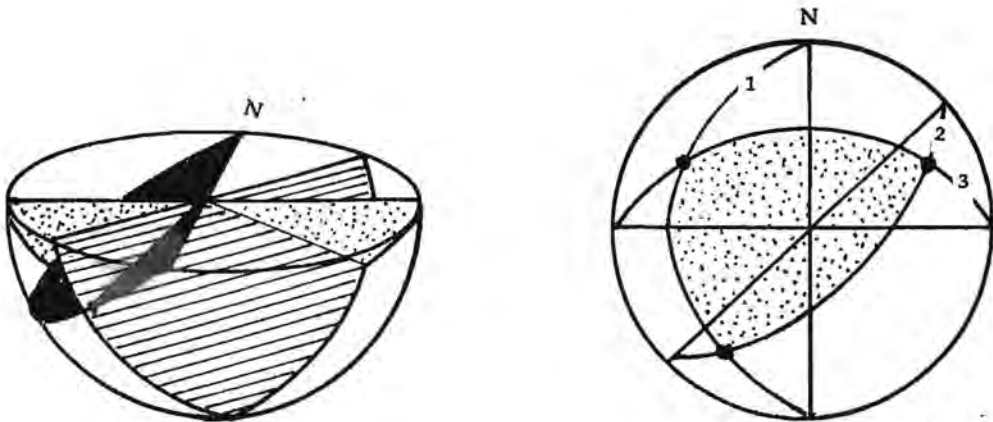
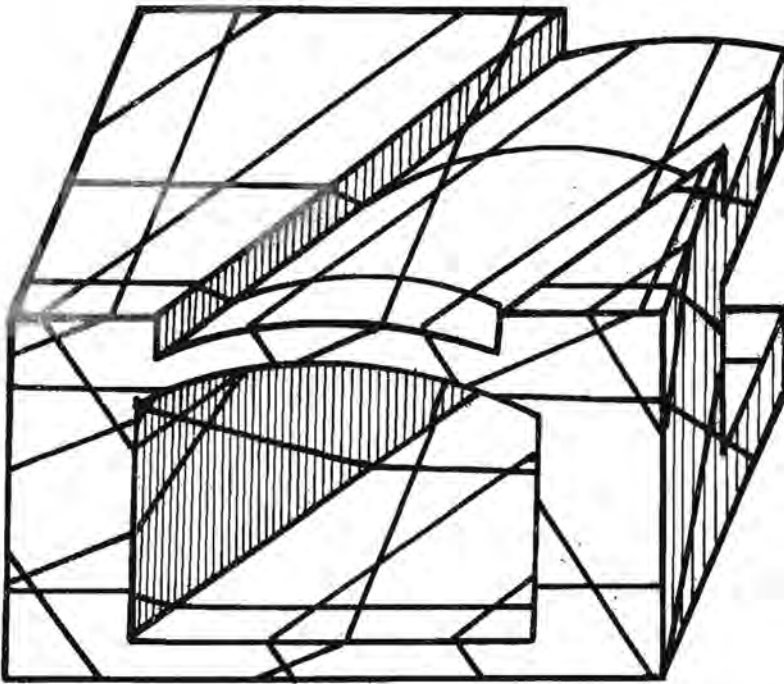
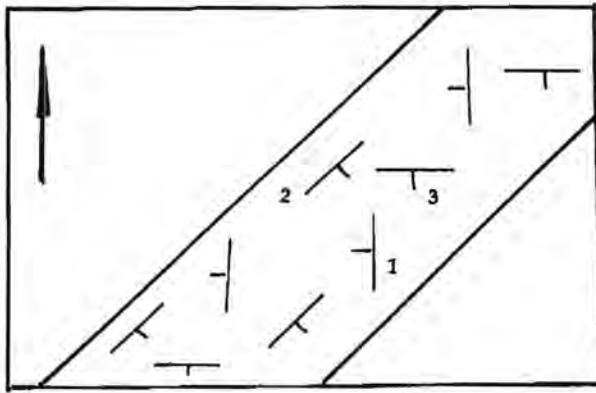


Figura 100



1 R Az 0 l: 20° al O  
 2 R Az 45 l: 35° al SE  
 3 R Az 90 l: 60 al S

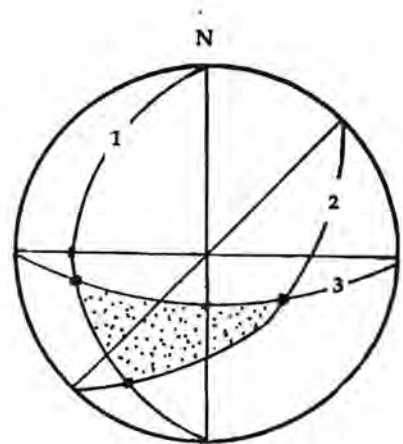
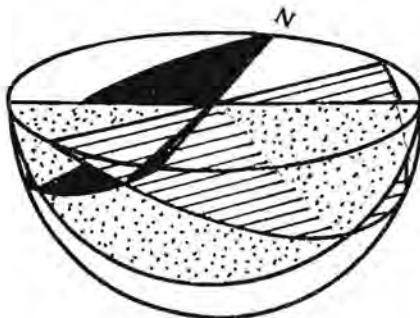
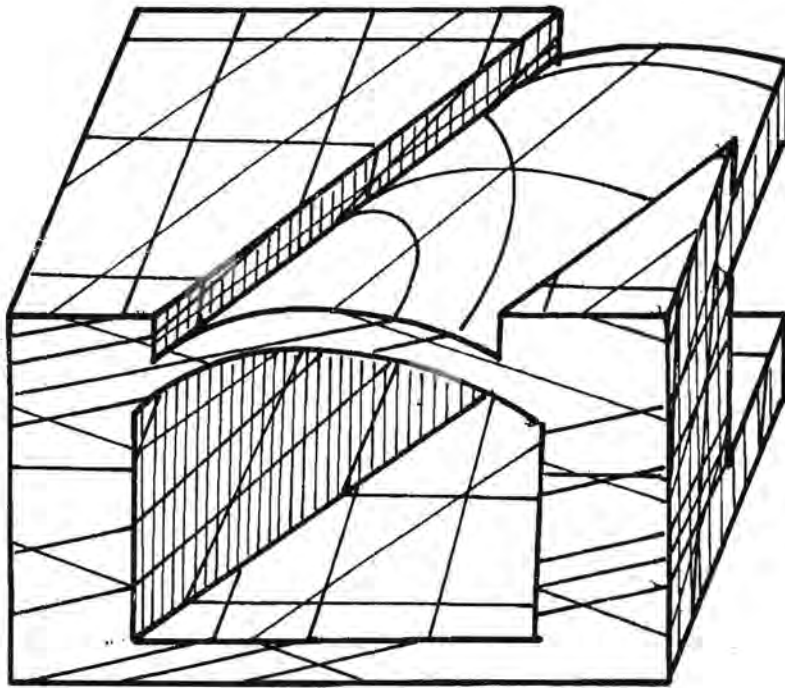
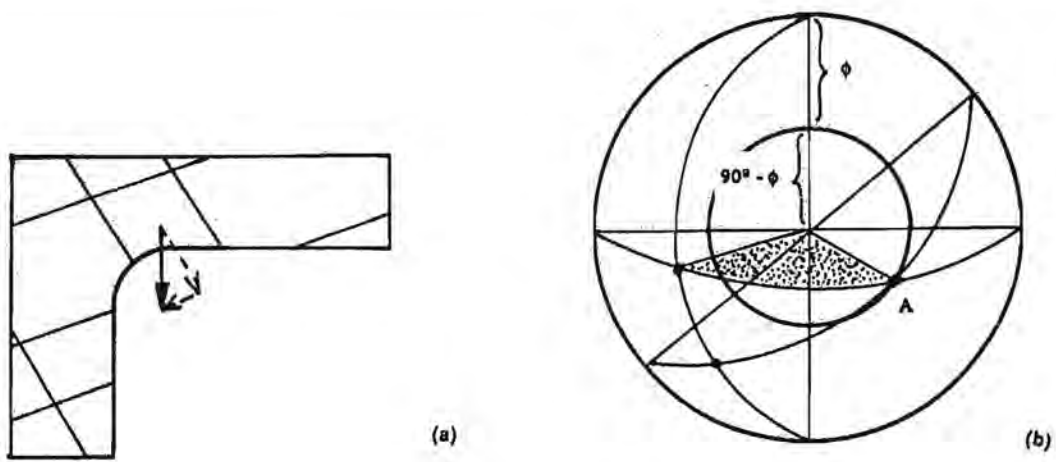
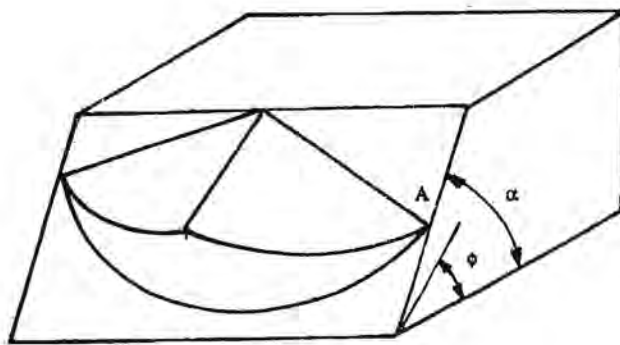


Figura 101



(a)

(b)



(c)

Figura 102

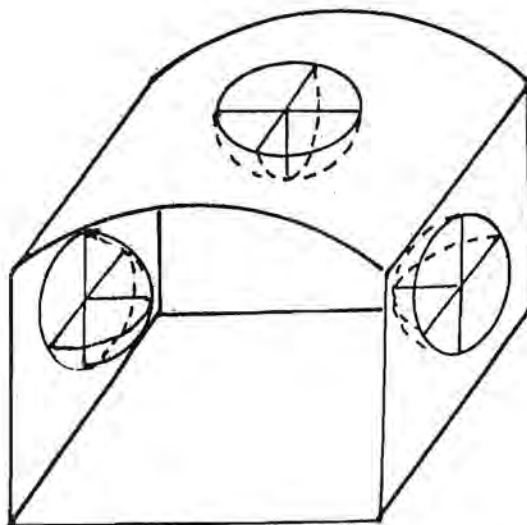


Figura 103

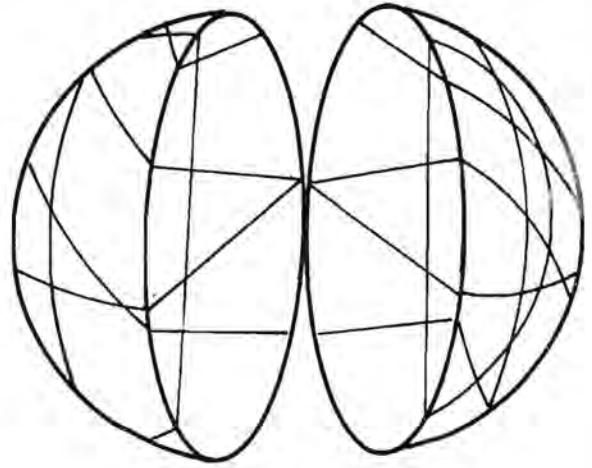
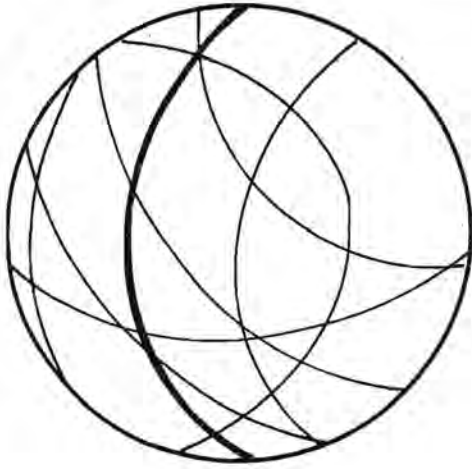
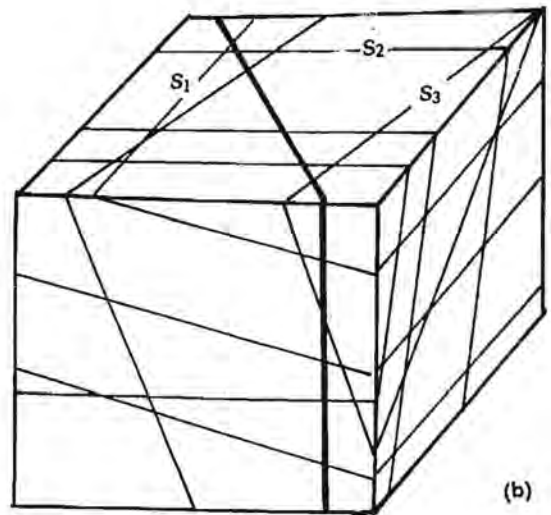
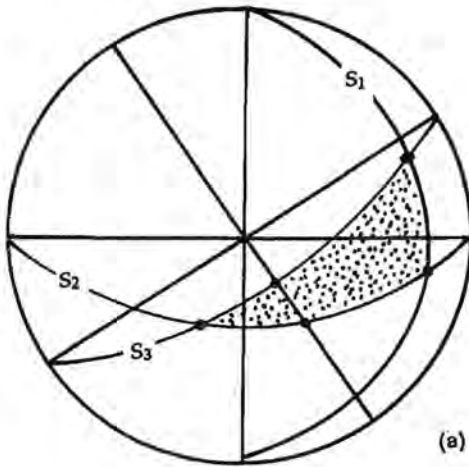


Figura 104



$S_1$ : R Az 360 i:  $18^\circ$  al E  
 $S_2$ : R Az 90 i:  $60^\circ$  al S  
 $S_3$ : R Az 55 i:  $76^\circ$  al SE

Figura 105

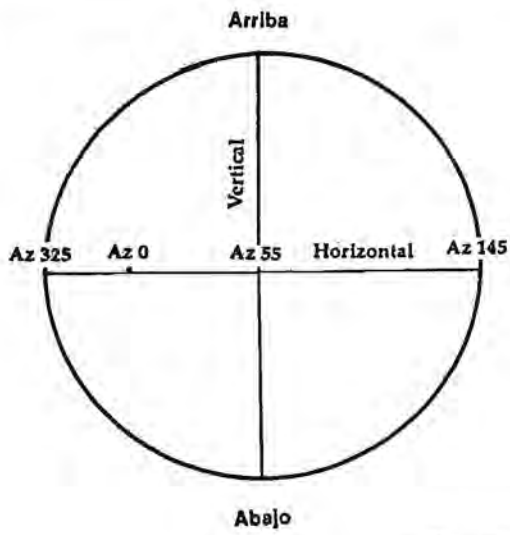


Figura 106

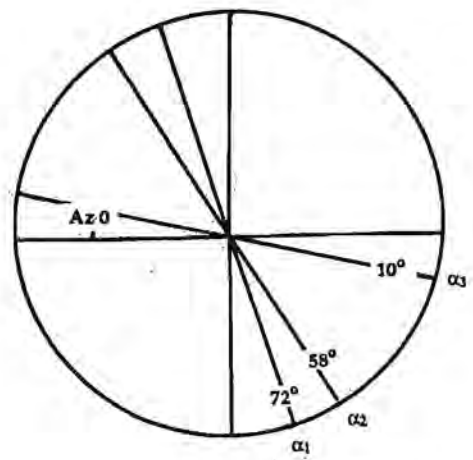


Figura 107

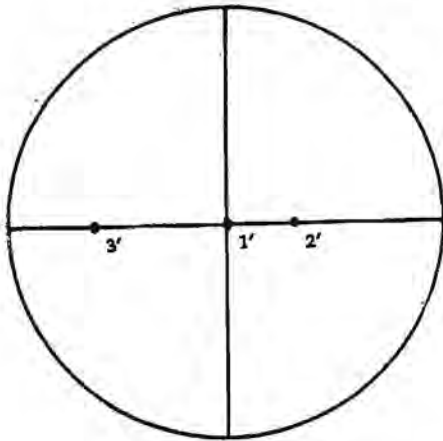


Figura 108

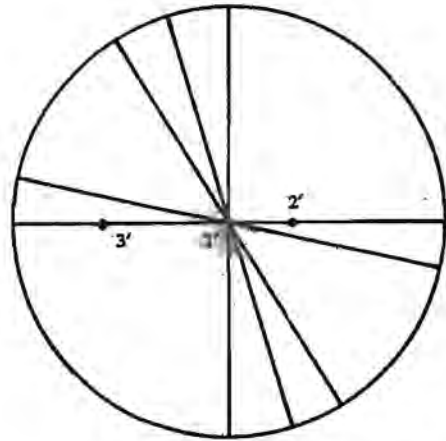


Figura 109

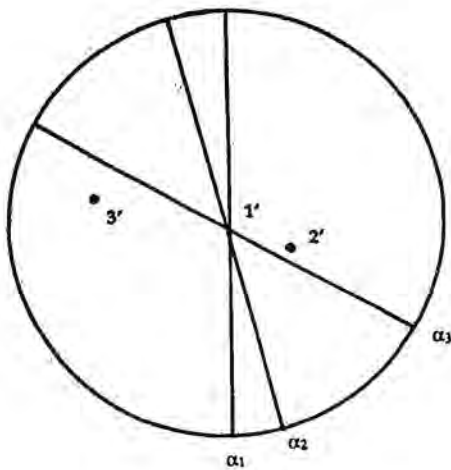


Figura 110

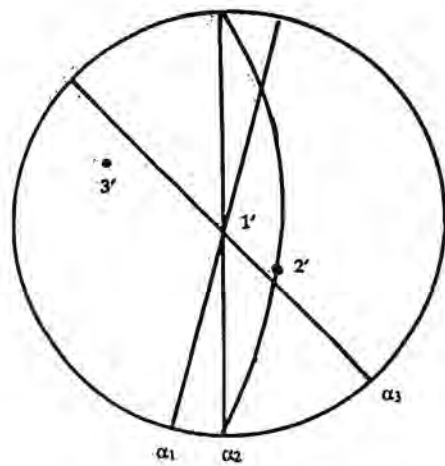


Figura 111



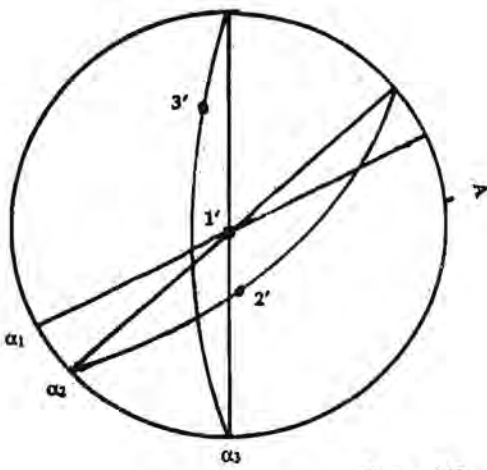


Figura 112

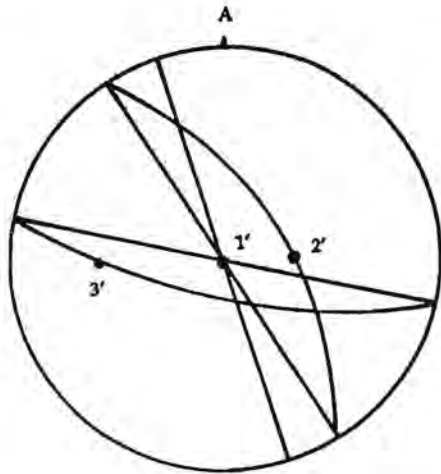


Figura 113

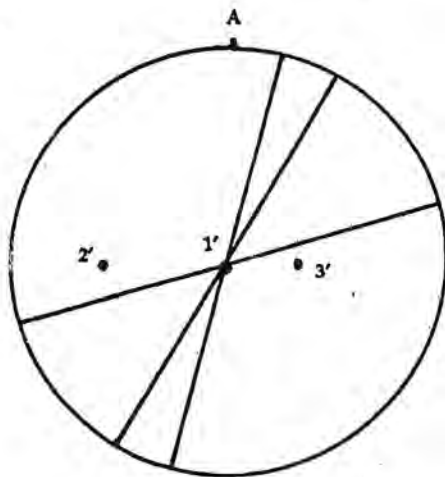


Figura 114

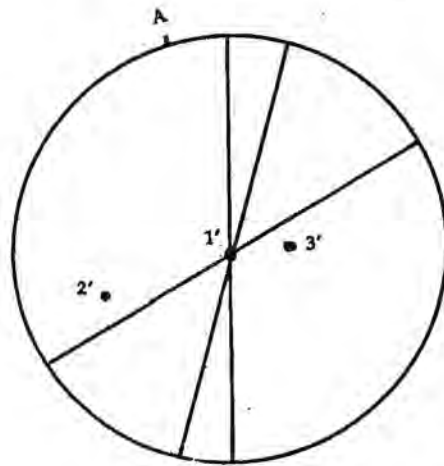


Figura 115

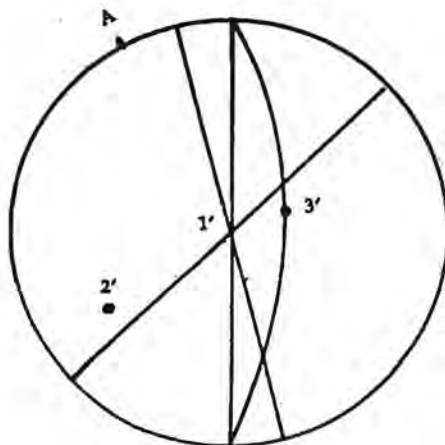


Figura 116

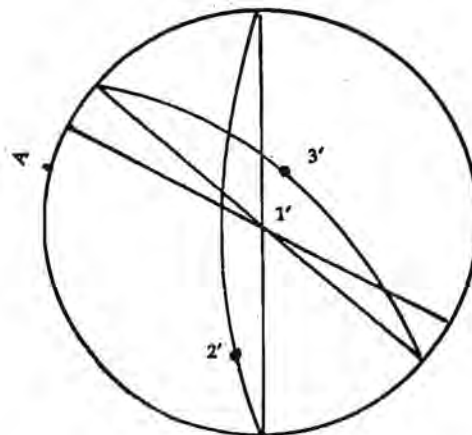


Figura 117

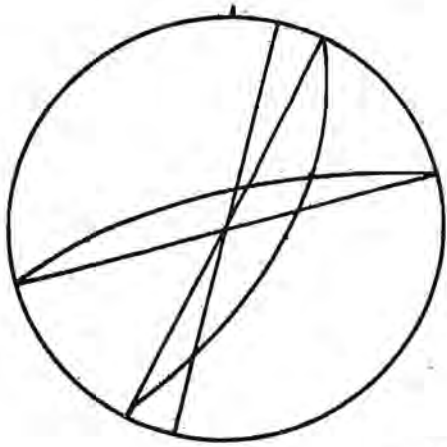


Figura 118

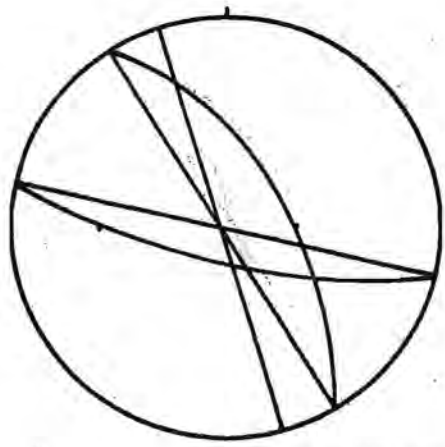


Figura 113 (repetición)

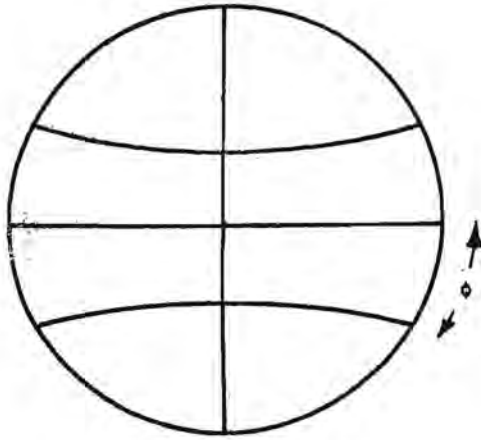
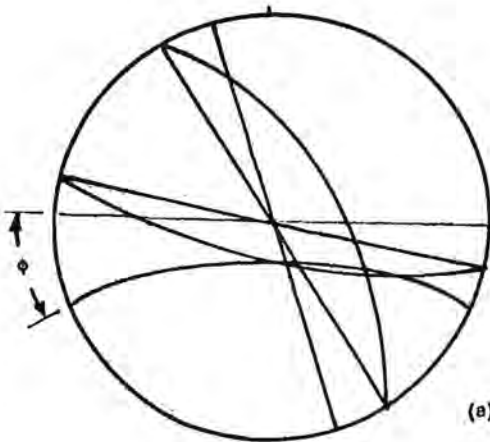
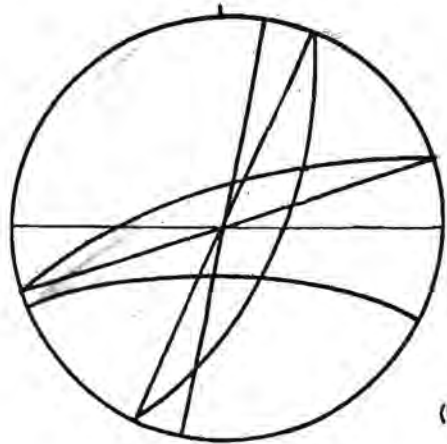


Figura 119



(a)



(b)

Figura 120

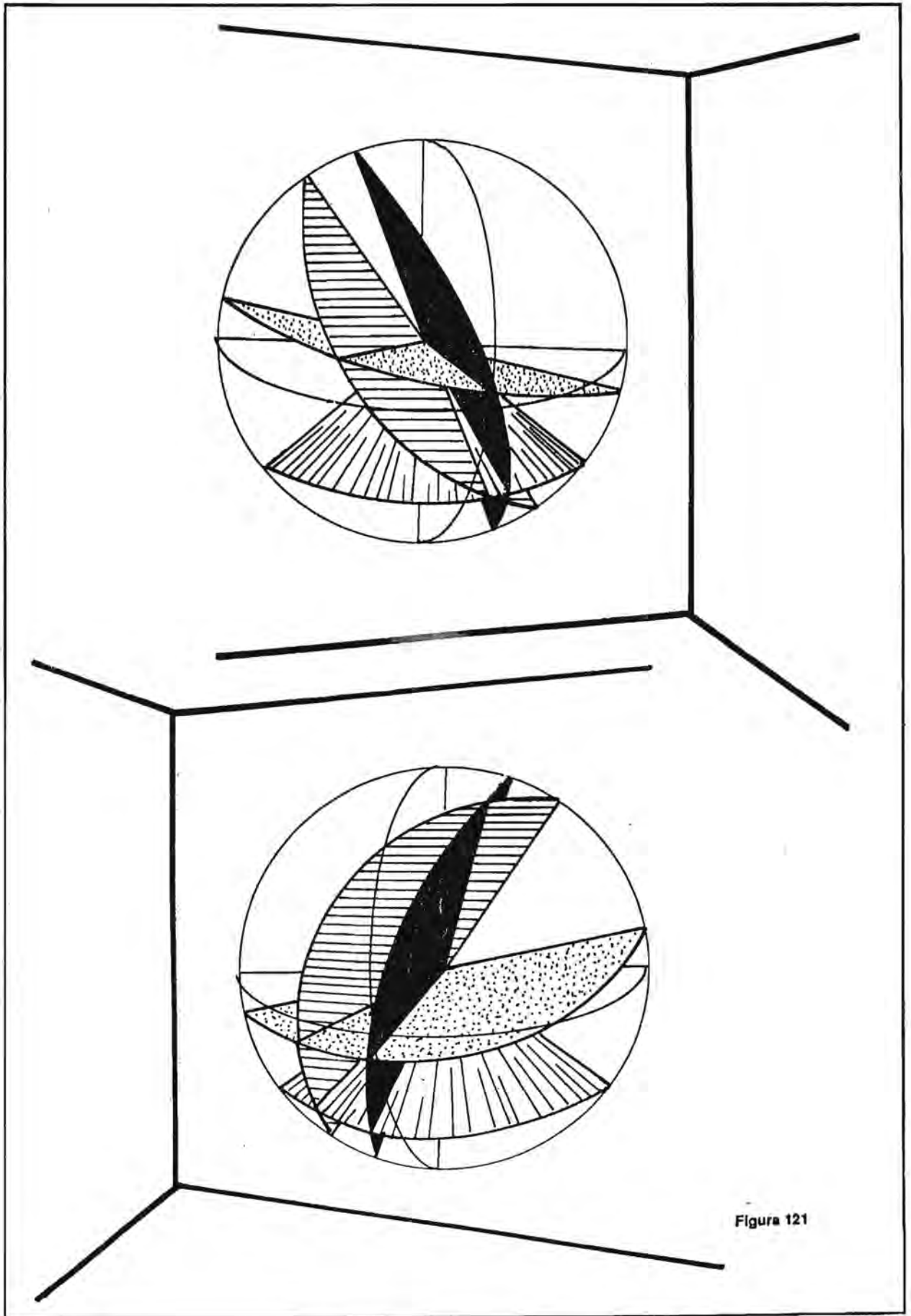


Figura 121

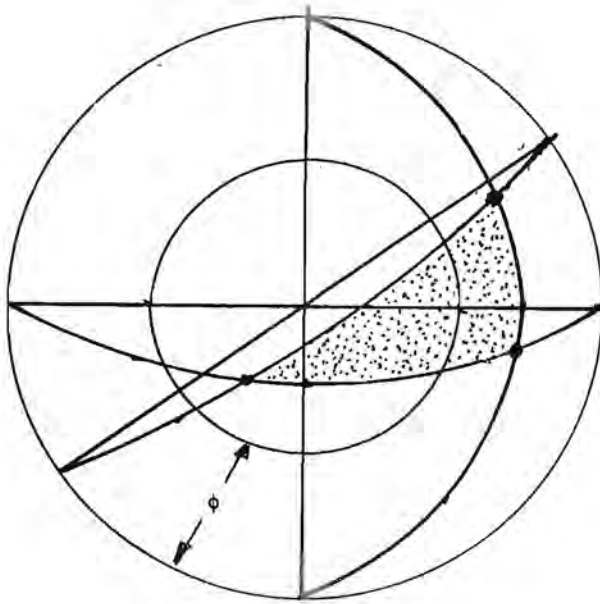


Figura 122

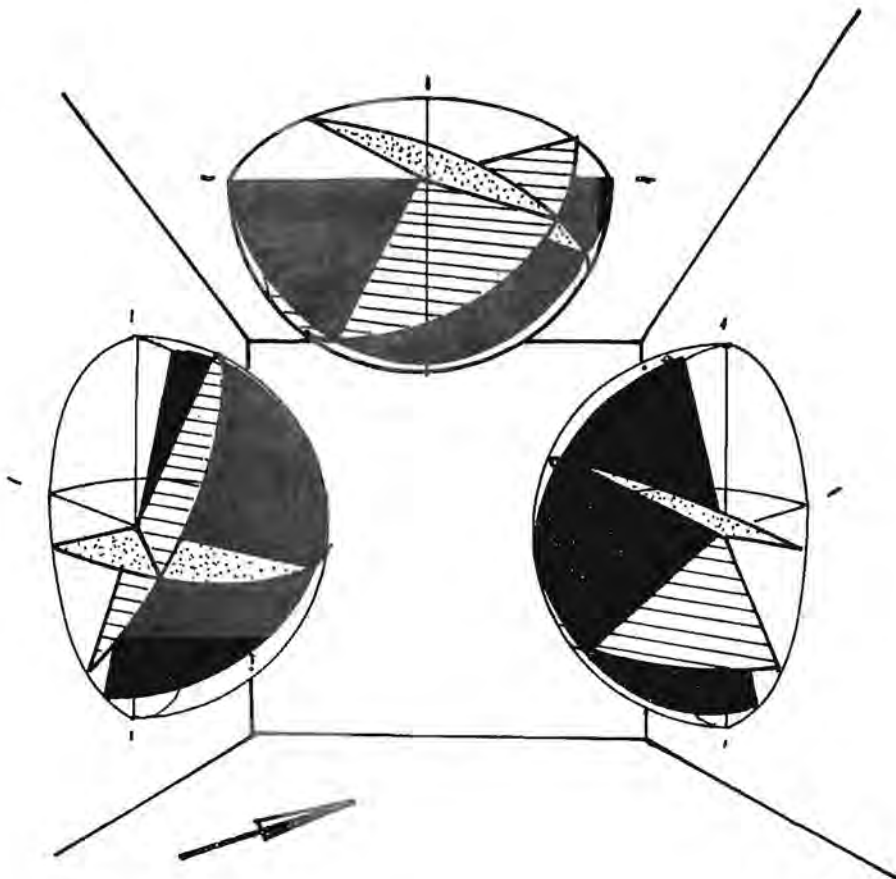


Figura 123

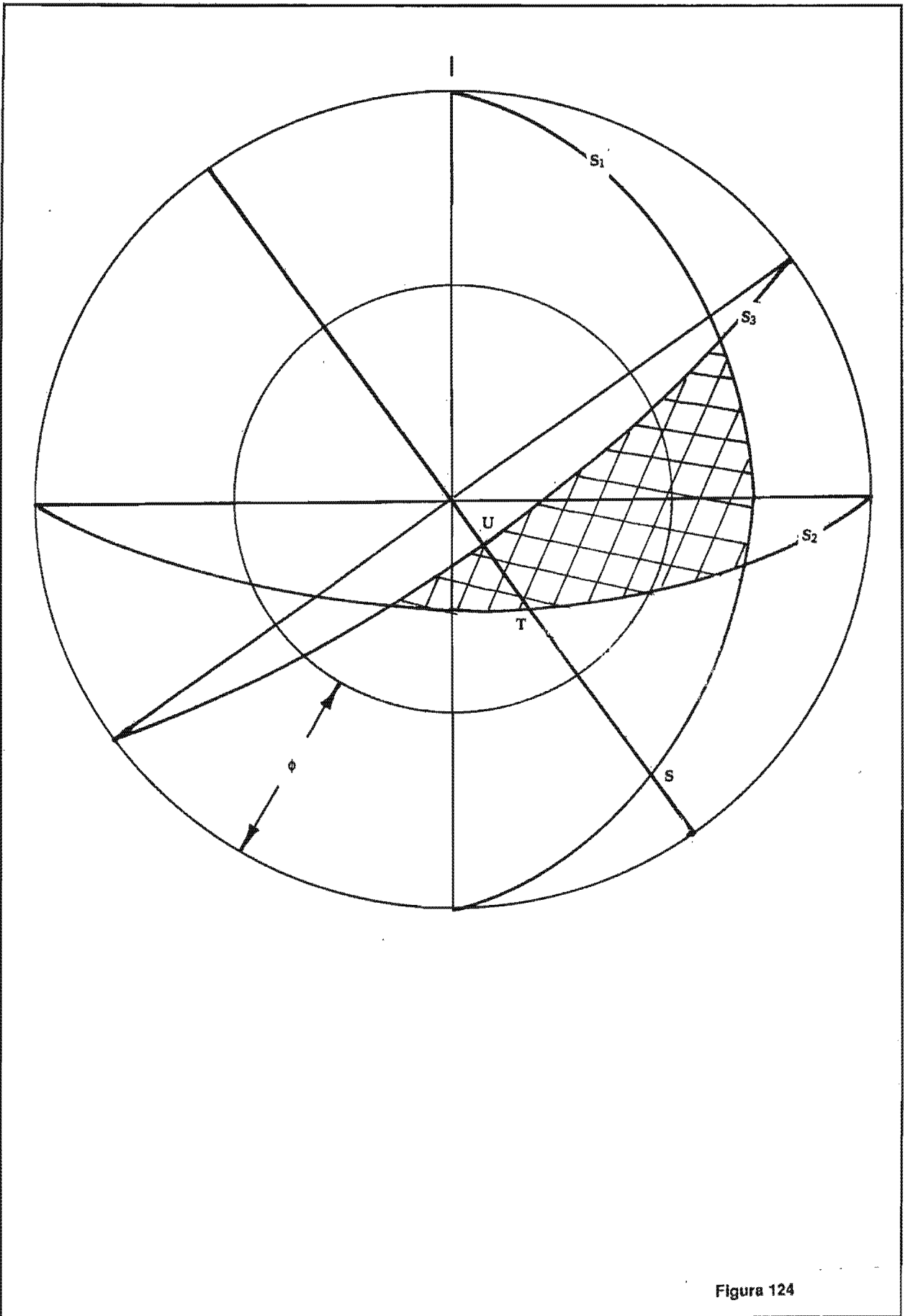


Figura 124

Vemos entonces que para el bloque sudoeste, (al que corresponden los puntos identificados con S, T y U), la inclinación de S1 (punto S), es menor que  $\emptyset$ , y aunque tenga componente direccional hacia el túnel no ofrece peligro, la de S2 (punto T) por el contrario es menor que  $\emptyset$  pero, como está dirigida hacia el interior del macizo no ofrece problemas. Con respecto a S3 (punto U) como la dirección de máxima inclinación es paralela al rumbo, aunque su valor sea mayor que  $\emptyset$  tampoco ofrece problemas.

En el bloque noreste la situación es por supuesto diferente, tanto el plano S2 como S3 tienen inclinaciones mayores que  $\emptyset$  en la dirección del túnel y si bien la situación es análoga a la del muro sudoeste para S3, no lo es para S2 (punto T) pues la componente de inclinación es hacia la cavidad, creando la situación de inestabilidad. La situación respecto a S1 no ofrece peligro pues el buzamiento es menor que  $\emptyset$  y además la inclinación es hacia el macizo.

## IX.- APENDICES

### IX.1.- Propiedades de la proyección estereográfica

Tres son las propiedades más importantes de este tipo de proyección, ellas son:

- 1.- Las circunferencias máximas que pasan por el centro de proyección se representan como rectas en el plano de proyección, cualquier otra circunferencia sobre la esfera se proyecta como una circunferencia sobre el plano de proyección.
- 2.- Los ángulos formados por las circunferencias sobre la esfera son iguales a los ángulos formados por las tangentes a las circunferencias proyectadas sobre el plano ecuatorial u otro paralelo al mismo.
- 3.- Cuando la esfera gira alrededor del eje que pasa por el polo de proyección y su centro los elementos proyectados sobre el plano ecuatorial u otro paralelo al mismo giran un ángulo igual.

Dado el interés que reviste para las técnicas a utilizar se demostrará la primera de estas propiedades, para luego explicar los diferentes métodos de trazado de las circunferencias menores.

Es importante recordar en principio que la proyección de un punto cualquiera ubicado sobre la superficie de la esfera se realiza sobre un plano que es perpendicular al plano de proyección y pasa por el polo de proyección. Tal como se ilustra en la figura 125 el punto A, que se encuentra sobre la esfera de proyección se proyecta al plano  $\alpha$  a lo largo de la línea PA, la cual pertenece al plano  $\beta$ , que a su vez contiene al centro de la circunferencia (O).

Si la circunferencia inscrita sobre la esfera es una circunferencia máxima que pasa por el punto P, entonces la misma se halla contenida en un plano con las mismas características que  $\gamma$ . Como puede verse en la figura 126 todos los puntos de la curva al ser proyectados se alinean en dirección al centro de la circunferencia (puntos A', B', ... N') según la dirección de la línea de intersección de los planos  $\alpha$  y  $\gamma$ .

Una circunferencia trazada sobre la superficie de la esfera puede ser considerada como generada por la intersección de ésta con un cono recto cuyo ápice

coincide con el centro de la esfera. Tal es el caso ilustrado en la figura 127, ésta era por otra parte la situación expuesta en el caso de la resolución de problemas que involucraban el empleo de datos provenientes de testigos de perforaciones (Capítulo IV).

Para la demostración de la primera propiedad consideraremos inicialmente el caso más sencillo de un cono con eje vertical, tal como el ilustrado en la figura 128. La intersección de dicho cono (con origen en X') y la esfera es una circunferencia que se ha identificado con las letras A, B, C y D. Al proyectarse estos puntos al polo P originan otro cono, también recto, cuya intersección con el plano ecuatorial ha sido identificada con las letras A', B', C' y D'. Esta es también una circunferencia ya que el plano ecuatorial es perpendicular al eje del cono y toda sección perpendicular al eje se ha identificado como un círculo. Una forma de demostrarlo es mediante la ecuación de la circunferencia, en la figura 129 se muestra el segmento MN, perpendicular al diámetro AB, es propiedad de la circunferencia que:

$$(MN)^2 = AN \cdot NB$$

cualquiera sea la ubicación del punto N siempre que el segmento MN sea perpendicular a AB.

Volviendo al caso de la figura 128, ABCD era una circunferencia por construcción y por lo tanto puede decirse que

$$(AX)^2 = DX \cdot XB$$

Para que su proyección sobre el plano ecuatorial sea un círculo debe cumplirse que

$$(A'X')^2 = D'X' \cdot B'X' \quad (1)$$

Tanto los triángulos AXP y A'X'P de la figura 128 como los BXP y D'X'P y los DXP y D'X'P de la misma son proporcionales entre si pues tienen sus ángulos iguales, por lo que puede decirse:

$$\frac{AX}{A'X'} = \frac{BX}{B'X'} = \frac{DX}{D'X'}$$

como por construcción  $XA = XB = XD$  entonces

$$A'X' = B'X' = D'X'$$

lo cual satisface la ecuación (1).

Cuando el eje del cono con origen en C buza menos de  $90^\circ$ , como en el caso de la figura 130, al proyectar los puntos de la circunferencia hasta P el cono que se origina no es ya un cono recto como en el caso anterior sino un cono oblicuo. Este tipo de conos presenta la particularidad que a diferencia del cono recto posee no una sino dos secciones circulares. Trátase entonces de demostrar que dichas secciones circulares son, una paralela al plano ecuatorial y la otra paralela al plano que contiene a la circunferencia trazada sobre la esfera.

En el ejemplo de la figura 130 tanto la sección contenida en el plano  $\delta$  (perpendicular al cono con centro en O) como la contenida en el plano de proyección son circunferencias.



Dado que para el caso general es muy laborioso demostrar la igualdad de los ángulos PSQ y PC'Q se demostrará ésta para el caso particular en el cual el cono con origen en O tiene un ángulo apical de 90° y su eje buza 45° tal como se ilustra en la figura 131. El plano D contiene al eje del cono y las intersecciones de este con el plano D que son OA y OC. La proyección del punto C en el plano ecuatorial coincide con el punto O; la del punto A, al estar éste sobre el plano de proyección no se desplaza; la de X es X'. El segmento CA pertenece al plano que contiene a la circunferencia ABCD originada por la intersección del cono con dicho plano (y con la esfera). Trazamos entonces por el punto Q, en el centro del segmento OA una paralela a CA que identificamos como TS. Siendo TS paralela a CA la intersección del plano perpendicular a D que contiene a TS con el cono será también una circunferencia, para la cual se debe cumplir que

$$(QR)^2 = SQ \cdot QT \quad (2)$$

y debe demostrarse que también se cumple (véase figura 132b)

$$(QR)^2 = C'Q \cdot QA' \quad (3)$$

Volviendo a la figura 131, sabemos que el triángulo PC'A' es isósceles pues dos de sus lados son radios de una esfera y que POA es un ángulo recto, por lo tanto

$$C' A' P = 45^\circ$$

En forma similar el ángulo OCA vale también 45° y por lo tanto siendo TS paralelo a CA tenemos que OTA es también de 45°, por consiguiente:

$$OTS = PA'C'$$

como además

$$TPS = C'PA'$$

ambos triángulos son semejantes y puede expresarse la proporcionalidad

$$\frac{TQ}{C'Q} = \frac{QA'}{QS}$$

o lo que es lo mismo

$$TQ \cdot QS = C'Q \cdot A'Q$$

Reemplazando en la ecuación (3) obtenemos la número (2), quedando así demostrada la propiedad para este caso.

Como habrá podido observarse en las figuras anteriores el centro de la circunferencia inscrita en el plano horizontal no coincide con la proyección del centro de la circunferencia inscrita sobre la esfera. Esto es fundamental para la comprensión de los métodos que se exponen en el Apéndice N° 2.

## IX.2.- Trazado de arcos de circunferencias menores

Se describe en este apartado el método a seguir cuando se requiere el trazado de circunferencias menores o arcos de las mismas.

Sea el caso que se desea construir una circunferencia de radio igual a 70°, originada por la intersección de la esfera con un cono cuyo eje buza 45° hacia el

Az 90°. En la figura 133 se ha señalado con la letra X la posición de la proyección del eje del cono y con las letras A, B, C y D los puntos correspondientes a los dos diámetros ortogonales de la circunferencia proyectada. Estos puntos han sido hallados contando 70° hacia cada lado del punto X sobre el diámetro de la red y sobre el arco de circunferencia máxima que pasa por X.

Para hallar el centro de la circunferencia que pasa por A, B, C, y D (y que como se demostró en el Apéndice 1 no coincide con X) sabemos que el mismo se encuentra sobre la línea que pasa por X y por O, trazamos entonces pequeños arcos con compás desde A y D con el fin de determinar la dirección de la perpendicular a AD que es en realidad la bisectriz del ángulo determinado por A, el centro de la circunferencia y D. La intersección de esta línea con la que une O y X origina el punto Q que es el centro buscado. El razonamiento expuesto se ilustra en la figura 134. Trazamos a continuación el segmento de circunferencia que une los puntos A, C y D obteniendo la figura 135. Para la determinación de la proyección del segmento de circunferencia correspondiente al cono que se opone por el vértice al recién trazado (véase el esquema de la figura 136) se fija la posición de los puntos M' y N', diametralmente opuestos a los puntos M y N donde la circunferencia interseca el borde de la red. Repitiendo la operación anterior de trazado de los arcos desde B y M' y uniendo ambos puntos se determina el punto Q' que es el centro del arco N'BM'. Como puede observarse en la figura 137 dicho punto queda bastante por fuera de la red. El trazado de arcos con radios tan grandes puede a veces tornarse engorroso, para evitar esto es posible utilizar un camino diferente. Una vez determinada la posición de N', B y M' se separa el papel transparente y se desplaza el mismo hasta que dichos puntos coincidan sobre un arco de circunferencia menor, tal como se ilustra en la figura 138.

Este método podía haber sido utilizado para la traza del arco MDN pero generalmente los arcos de circunferencias menores de radio reducido impresos en la red son demasiado cortos para resultar de utilidad.

La posición de los puntos M y N sobre el borde de la red puede ser hallada también antes de trazar el arco de circunferencia con centro en Q de la siguiente manera: se gira el transparente hasta que el punto X se encuentre sobre un arco de circunferencia menor a una distancia de (90° - 70°), o sea 20° del diámetro este-oeste y se marca el punto en el cual el arco de circunferencia máxima que pasa por X interseca el borde de la red, punto que por supuesto coincide con la dirección norte o sur de la misma.

En la figura 139 se ilustra la posición del transparente cuando se marca el punto M y en la figura 140 cuando se marca el N. Contando así con 5 puntos el trazado de la circunferencia puede realizarse directamente con una plantilla perforada como las que son de uso común en arquitectura.

Si en lugar de la intersección del hemisferio sur con el cono opuesto por el vértice al generado alrededor del eje OX se desea proyectar el segmento de circunferencia que queda en la hemiesfera superior (véase la figura 141), el mismo debe ser proyectado al

(véase la figura 141), el mismo debe ser proyectado al plano ecuatorial hacia el polo P' ubicado en el nadir de O. Sobre la red es fácil determinar la posición de B', pues una vez llegados al borde de ésta regresamos sobre la misma trayectoria hasta completar el ángulo necesario (70° en el ejemplo). En la figura 142 se ilustra lo dicho. A partir de los puntos M, E y N, por cualquiera de los métodos recién expuestos se traza el arco correspondiente.

### IX.3.- Construcción geométrica y analítica de las redes

#### IX.3.a.- Red equiangular polar

Esta red es muy sencilla de construir gráficamente y los fundamentos del método se ilustran en la figura 143. En ella se han señalado las líneas de proyección de los puntos A, C, B y D que están sobre los diámetros de dos circunferencias menores respectivamente. Por otra parte las circunferencias máximas que pasan por O y P (como por ejemplo la que contienen a los puntos A', B', C' y D') se proyectan como diámetros de la circunferencia ecuatorial, obteniéndose la línea EF de la figura 144, el espaciamiento de estas líneas diametrales se realiza utilizando un transportador.

Para la construcción analítica de esta red debe tenerse en cuenta que

$$d = 2r \operatorname{tg} \varnothing$$

$$d = 2r \operatorname{tg} \frac{90^\circ - \varnothing}{2}$$

donde d es la distancia al centro (radio del círculo menor), r es el radio de la circunferencia primitiva (borde de la red) y  $\varnothing$  el ángulo de inclinación correspondiente.

Suponiendo entonces que se desea dibujar la circunferencia correspondiente a una inclinación de 70° para una red cuyo diámetro es de 20 cm se obtiene

$$d = 2 \cdot 10 \operatorname{cm} \cdot \operatorname{tg} 10^\circ$$

$$= 20 \cdot 0.176 \operatorname{cm} = 3,52 \operatorname{cm}.$$

Los diámetros se trazan directamente con ayuda de un transportador, tal como en la construcción gráfica anterior.

#### IX.3.b.- Red equiangular ecuatorial

En la figura 145 se ha esquematizado la manera de trazar los círculos máximos de la red de Wulff. Desde el punto S se traza una línea hasta el punto del borde de la red correspondiente (en grados azimutales) al doble del buzamiento del plano cuya intersección con la esfera se desea representar. En el ejemplo para trazar el plano que inclina 10° hacia el oeste se traza una línea desde S hasta Az 20°, en el punto A, donde esta línea corta al eje este-oeste se ubica el centro de la circunferencia cuyo arco de norte a sur se traza. Para el caso de un plano que inclina 60° se hace pasar la línea por Az 120°, punto B sobre la línea este-oeste de la misma figura y desde allí se traza el arco que une los puntos norte y sur, tal como se ilustra.

Para dibujar las circunferencias menores se trazan primero las tangentes a los puntos correspondientes a los azimutes. En la figura 146 se ha señalado con la letra d la recta tangente a la circunferencia que pasa por el punto Az 20°, ésta interseca al eje norte-sur en el punto D que es el centro de la circunferencia menor indicada. En forma similar, para el trazado de la circunferencia de 45° se utiliza el punto E y el F para la de 60°. Como para 90° corresponde un centro en el infinito se obtiene una recta que coincide con el diámetro este-oeste de la red en construcción.

Como la determinación gráfica de la posición de los centros es bastante laboriosa y puede estar sujeta a errores en el trazado de las tangentes, es conveniente utilizar las fórmulas que dan la posición de los diferentes centros.

Para la circunferencia máxima

$$d = r \cdot \operatorname{tg} \varnothing$$

siendo d = distancia al centro

r = radio de la circunferencia primitiva (borde de la red que se va a construir)

$\varnothing$  = ángulo de inclinación correspondiente al plano cuya intersección con la esfera se va a representar,

La posición de los centros de las circunferencias menores surge de la fórmula

$$d = r / \cos \alpha$$

siendo  $\alpha$  = ángulo comprendido entre la dirección de la línea sobre la que se ubican los centros y el radio de la circunferencia primitiva en el punto de tangencia.

#### IX.3.c.- Construcción de la red equiareal polar

Una vez trazada la circunferencia, a partir de un punto cualquiera P se trazan los valores de los ángulos correspondientes a las inclinaciones que se quieren representar mediante circunferencias menores (sean por ejemplo el punto A al cual corresponde un ángulo de inclinación  $\varnothing = 30^\circ$ , el punto B con  $\varnothing = 60^\circ$ , al punto P corresponde  $\varnothing = 0^\circ$  y a Q  $\varnothing = 90^\circ$ ). Las cuerdas PA, PB, PQ, etc. son los radios buscados tal cual se ilustra en la figura 147 y en la 148. Como puede observarse el radio correspondiente a una circunferencia representativa de las inclinaciones de 0° es mayor que el radio de la circunferencia inicial, tal como se desprende por otra parte de la fórmula que corresponde a este tipo de proyección y que es

$$d = 2r \operatorname{sen} \frac{(90^\circ - \varnothing)}{2}$$

Por lo tanto es necesario introducir una modificación en la fórmula para que la misma no distorsione el tamaño de la red, ello se logra utilizando un factor de multiplicación raíz de 2 en lugar de 2, o sea

$$d = \sqrt{2} r \operatorname{sen} \frac{(90^\circ - \varnothing)}{2}$$

En la reconstrucción gráfica ello equivaldría a dar al segmento PQ el radio de la circunferencia primitiva que se desca obtener, y luego, sabiendo que es la base de un triángulo isósceles de  $45^\circ$  determinar la posición del punto O para trazar a continuación la circunferencia y hallar las distancias PA, PB, etc.

El trazado de los meridianos se realiza directamente con el transportador como en los casos anteriores.

#### IX.3.d. Construcción de la red equiareal ecuatorial

Esta red presenta la particularidad de transformar los arcos de circunferencias menores en curvas o arcos elípticos.

En las figuras 149 a 151 se ilustran el principio de construcción de esta red.

La distancia al centro para un punto cualquiera está dada por

$$d = 2 r \operatorname{sen} \frac{\pi}{4} = \frac{\varnothing}{2}$$

#### Lista de trabajos citados en el texto

- CLOOS, E., 1946. *Lineation, a critical review and annotated bibliography*. Geol. Soc. of America Memoir, 18.
- DE SITTER, L. U., 1976. *Geología Estructural*. Cuarta Ed. Editorial Omega, Barcelona.
- FLEUTY, M. J., 1964. *The description of folds: Proceedings of the Geologists Association*. V. 75, P. 461-492.
- GRIGGS, D. y J. HANDIN, 1960. *Rock Deformation (A Symposium)*. Geol. Soc. of America Memoir, 79.
- HOBBS, B. E., W. D., MEANS y P. F. WILLIAMS, 1976. *An outline of structural geology*. John Wiley, New York, 571 p.
- HOEK, E. y E. T. BROWN, 1980. *Underground excavation in rock*. The Institution of Mining and Metallurgy, London.
- KALSBECK, F., 1963. *A hexagonal net for the counting out and testing of fabric diagrams*. Neues Jahrbuch für Mineralogie, Monatshefte, v. 7, p. 173-1776.
- KNOPE, E. B. y E. INGERSON, 1938. *Estructural Petrology*. Geol. Soc. of America, Memoir 6.
- RICKARD, M. J., 1971. *A classification diagram for fold orientation*. Geological Magazine, v. 108, p. 23-26.
- TROMMSDORFF, B. von, 1963. *Die photographische Auswertung von Gefügediagrammen*. Neues Jahrbuch für Mineralogie. Nona shaft, v. 7, p. 173-177.
- TURNER, F. J. y L. E. WEISS, 1963. *Structural analysis of metamorphic tectonites*. McGraw-Hill, New York, 545 p.
- WHITTEN, E. N. T., 1966. *Structural geology of folded rocks*. Rand Mc Nally, Ed. Chicago.

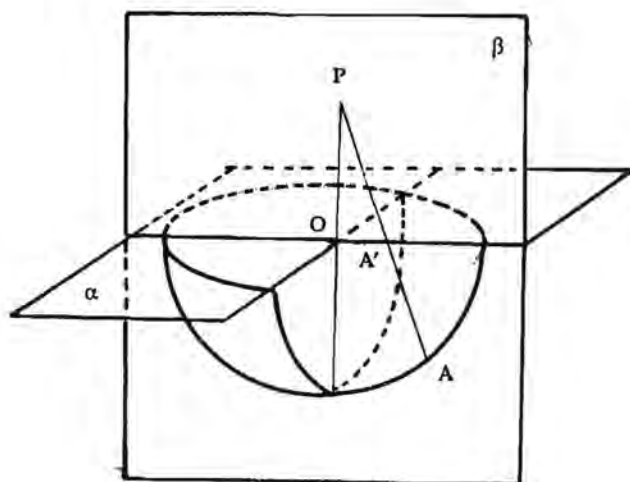


Figura 125

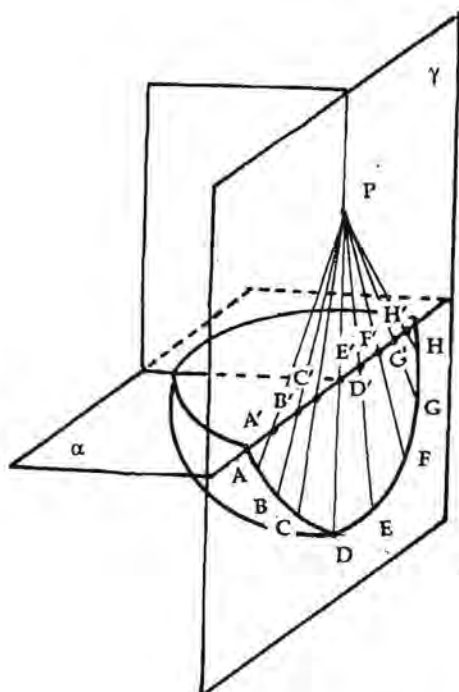


Figura 126

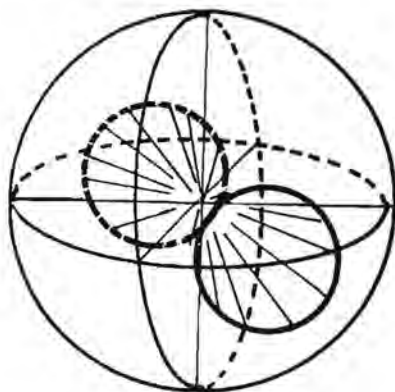


Figura 127

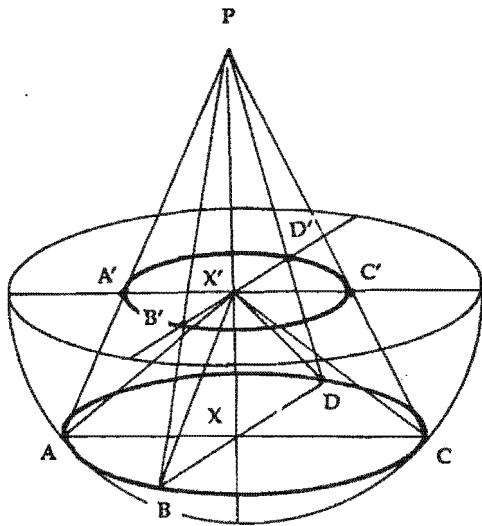


Figura 128

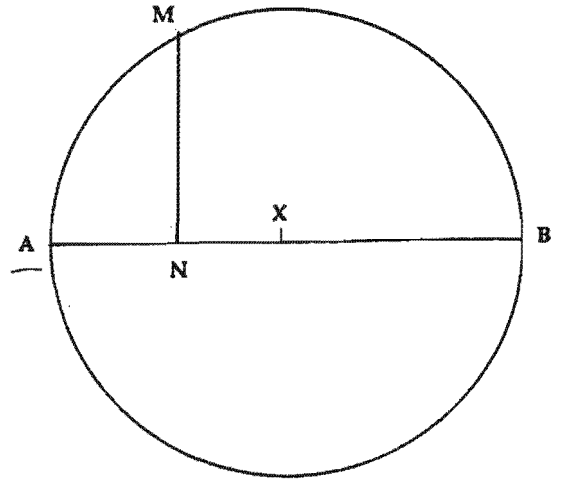


Figura 129

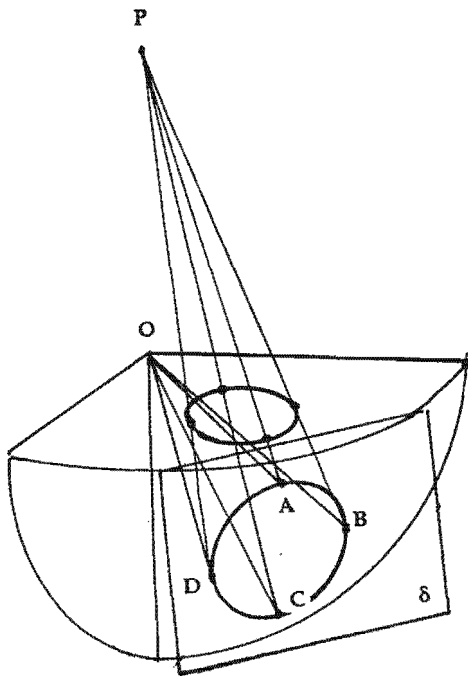


Figura 130

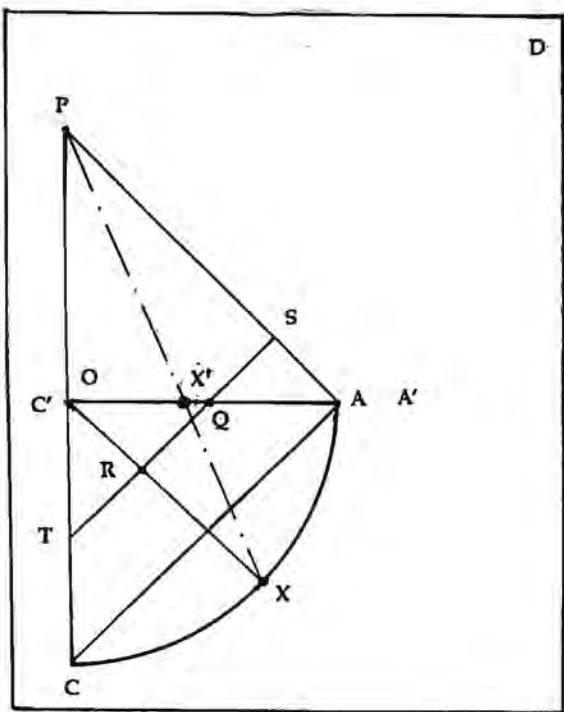


Figura 131

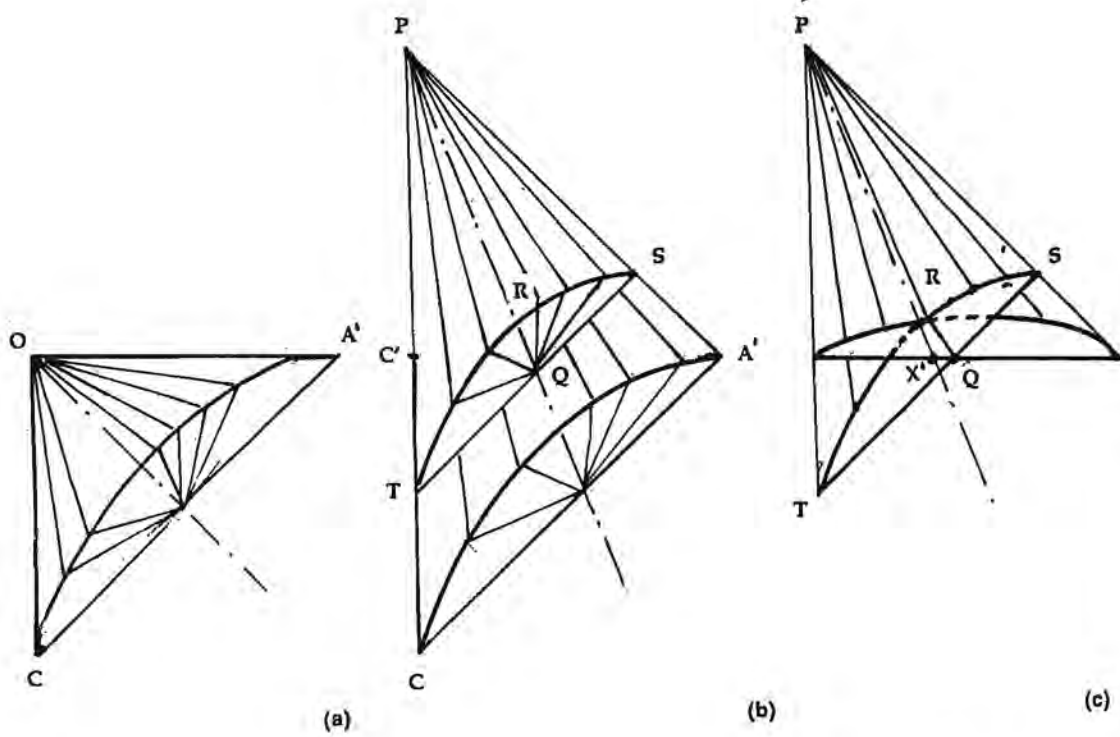


Figura 132



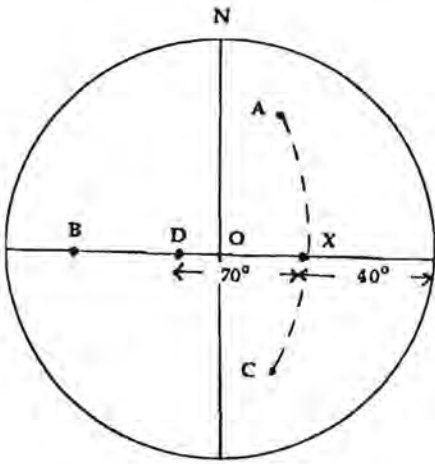


Figura 133

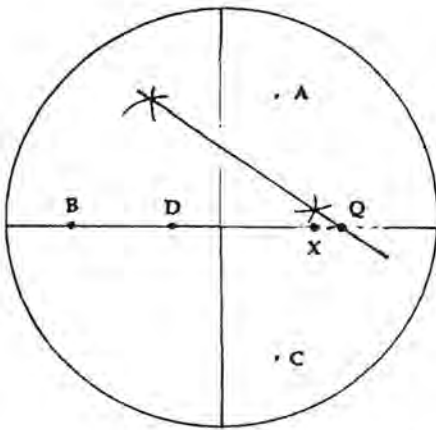


Figura 134

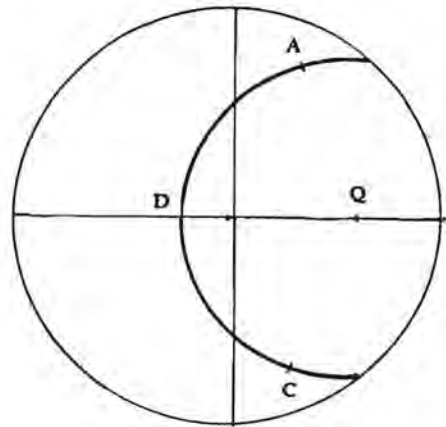
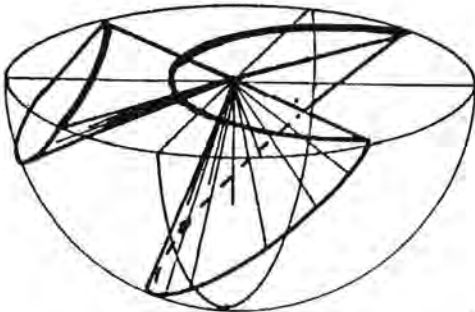
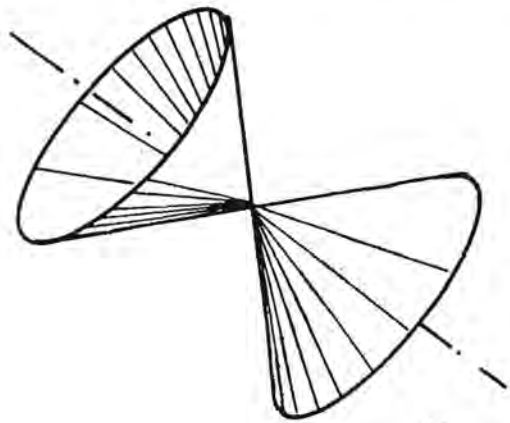


Figura 135



(a)



(b)

Figura 136

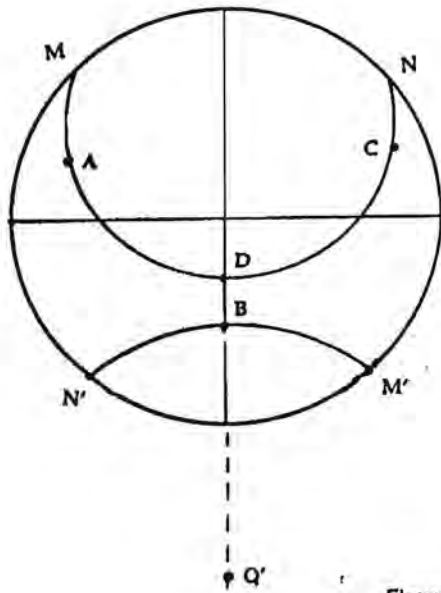


Figura 137

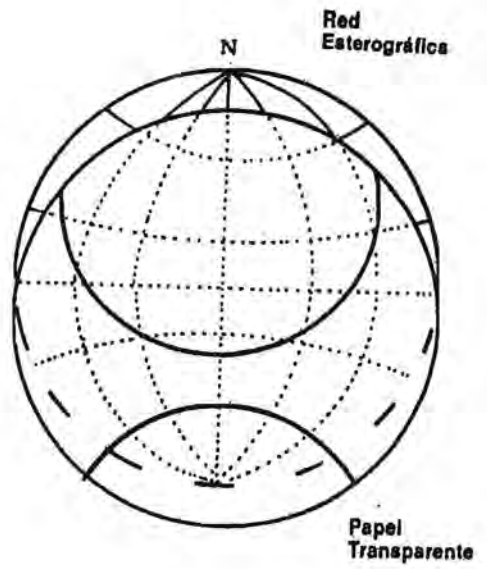


Figura 138

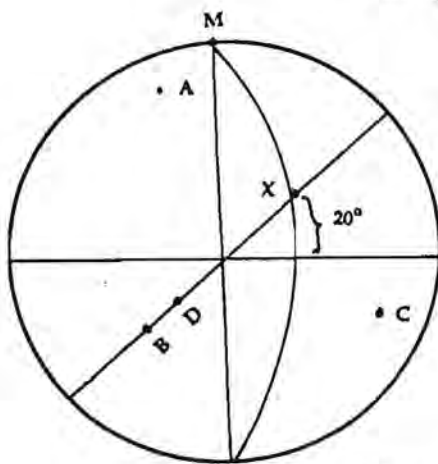


Figura 139

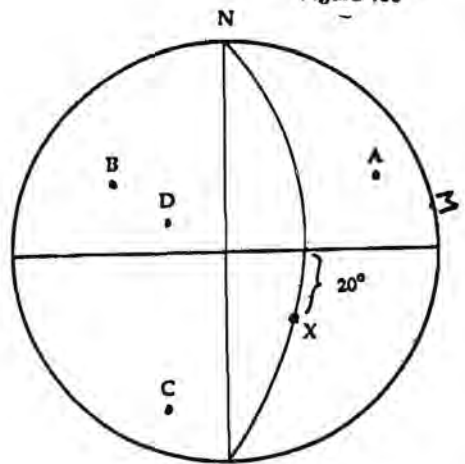


Figura 140

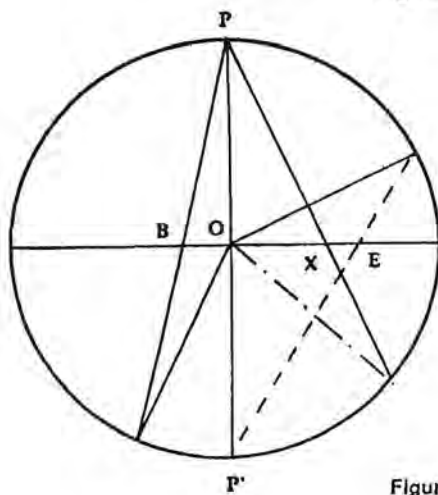


Figura 141

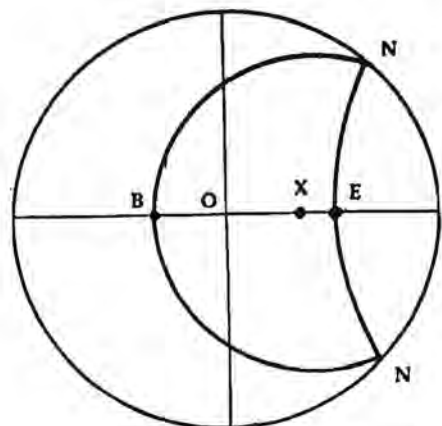


Figura 142

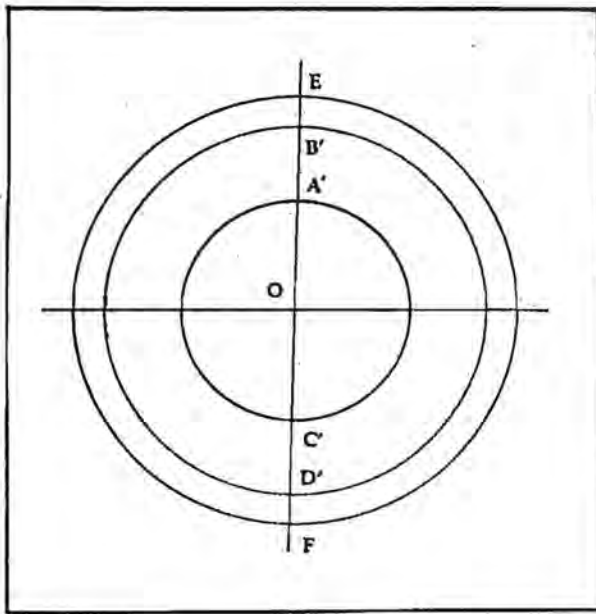


Figura 143

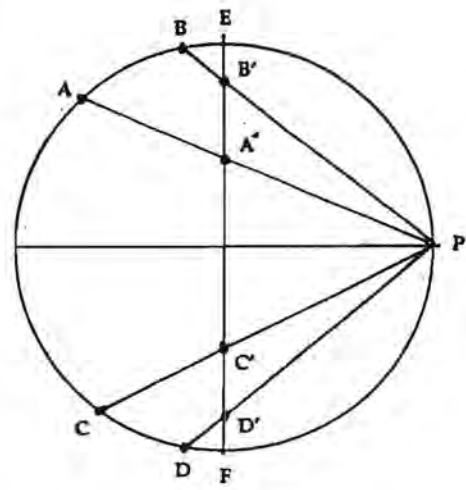


Figura 144

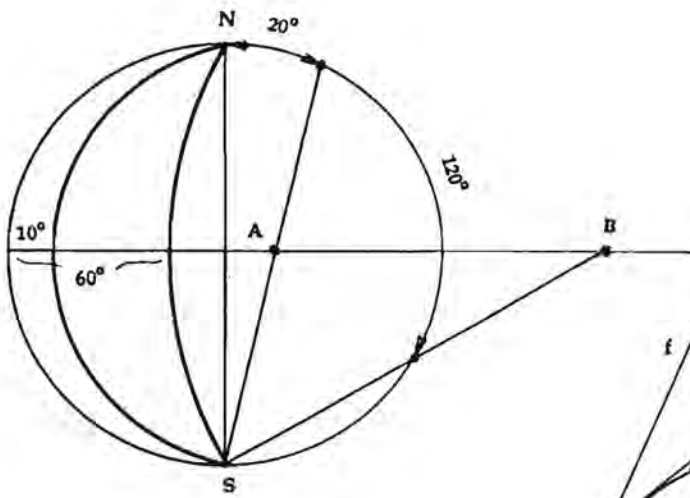


Figura 145

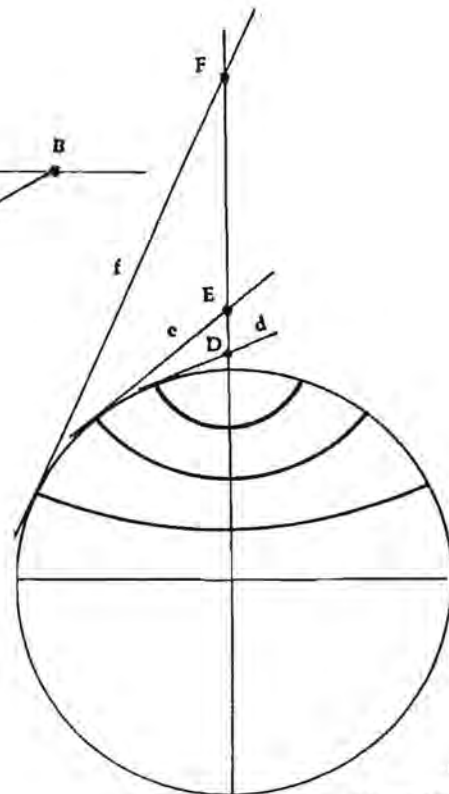


Figura 146

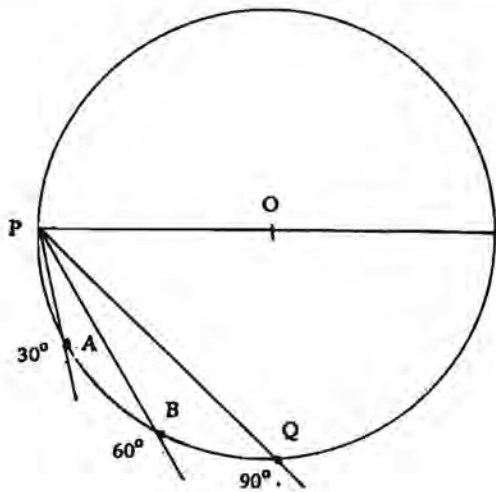


Figura 147

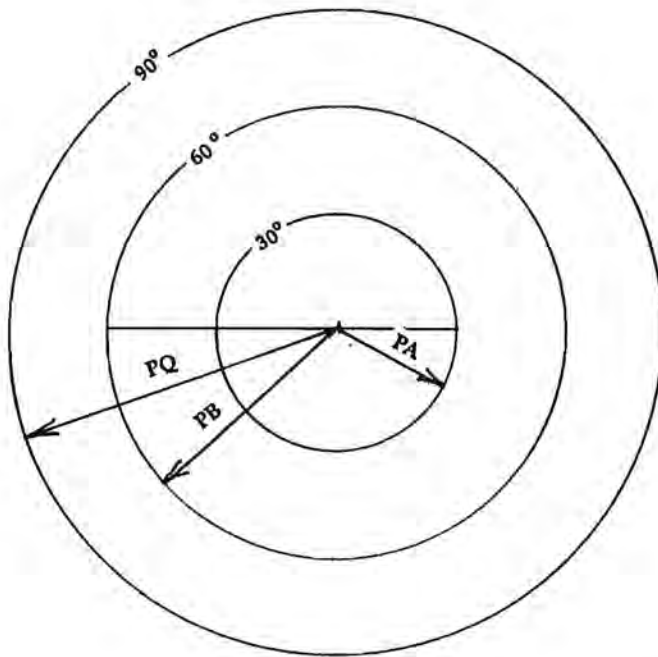


Figura 148

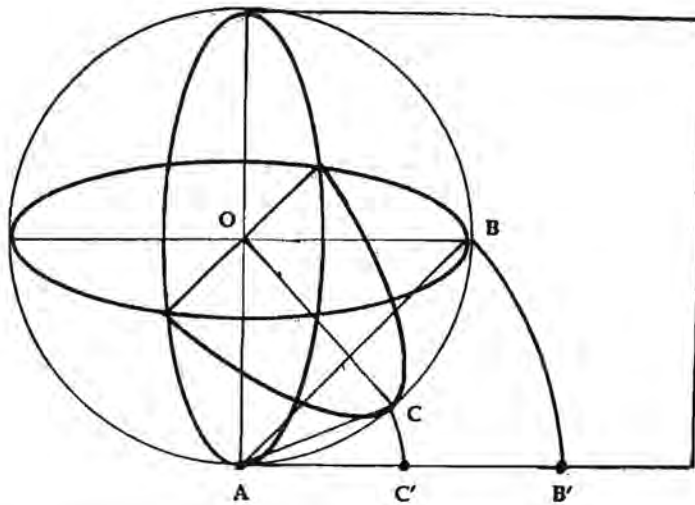
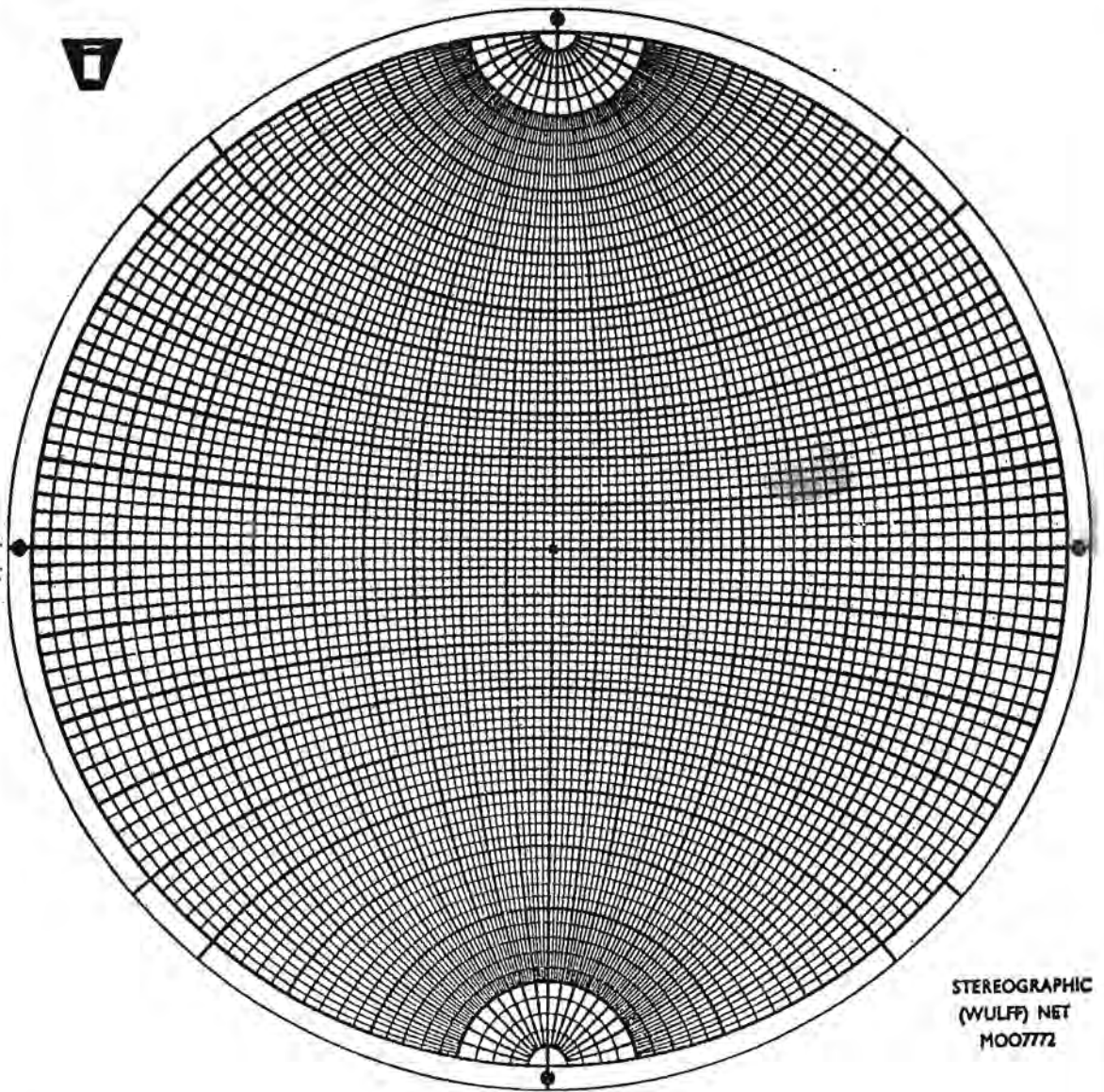


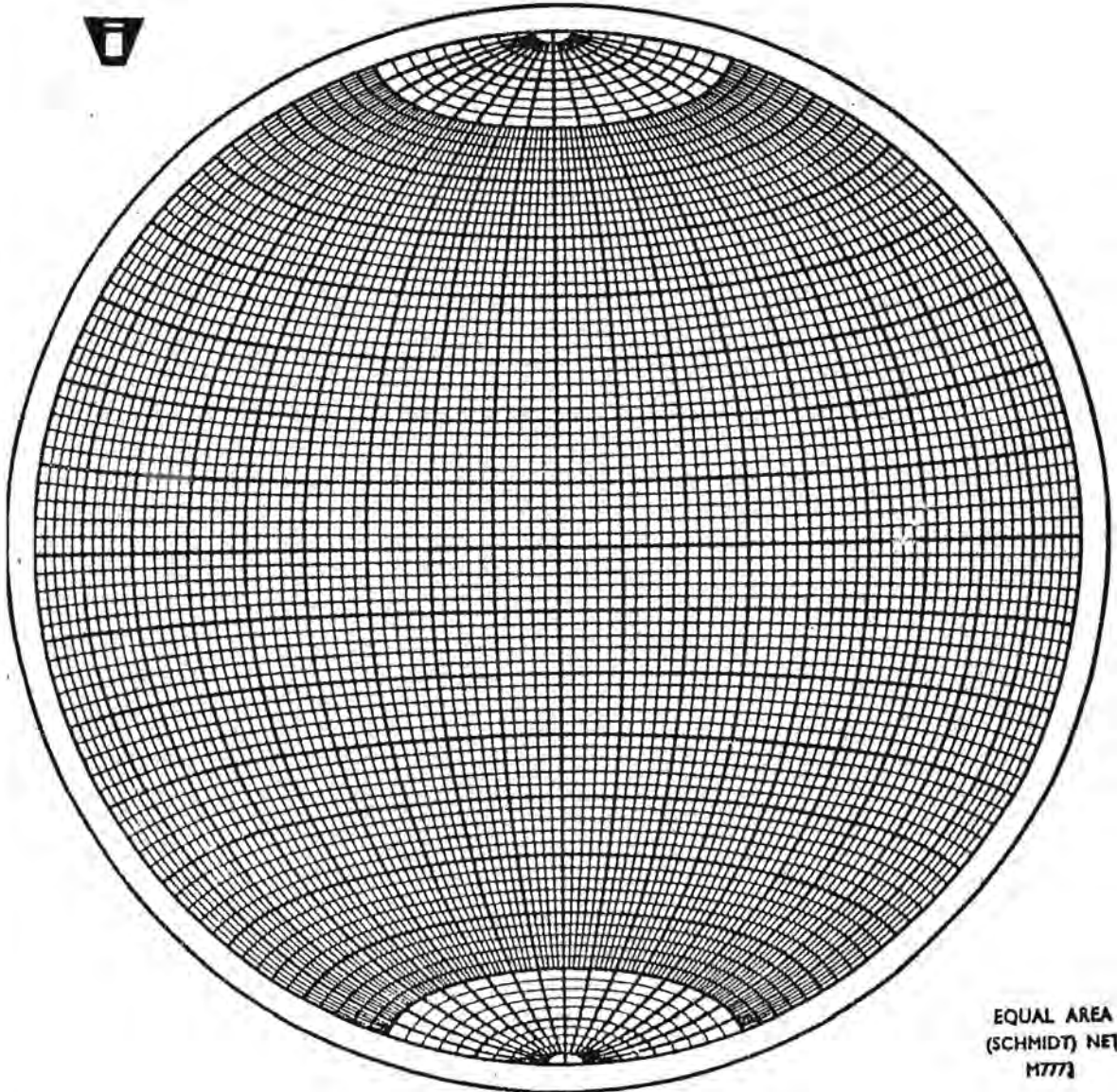
Figura 149



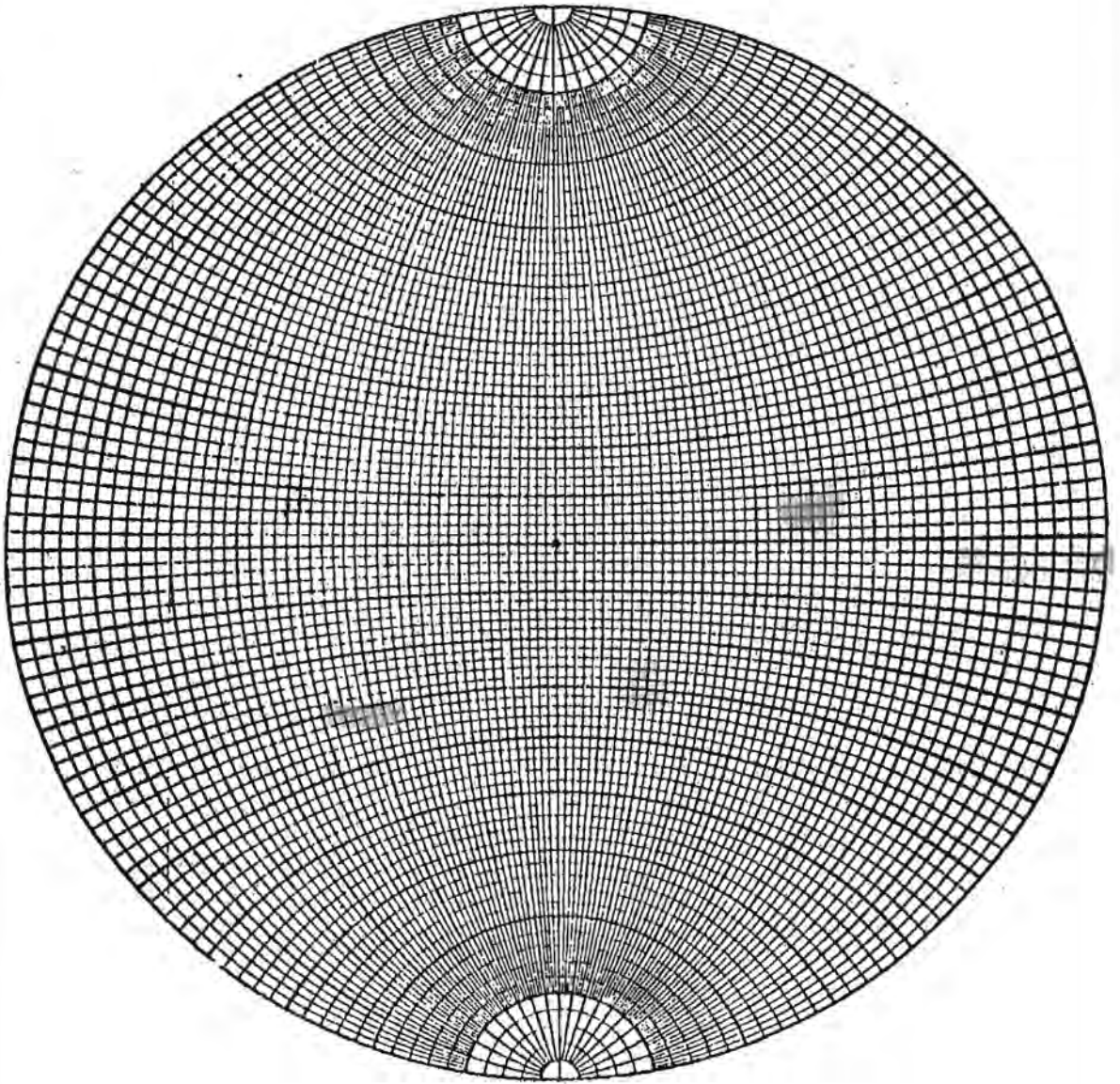


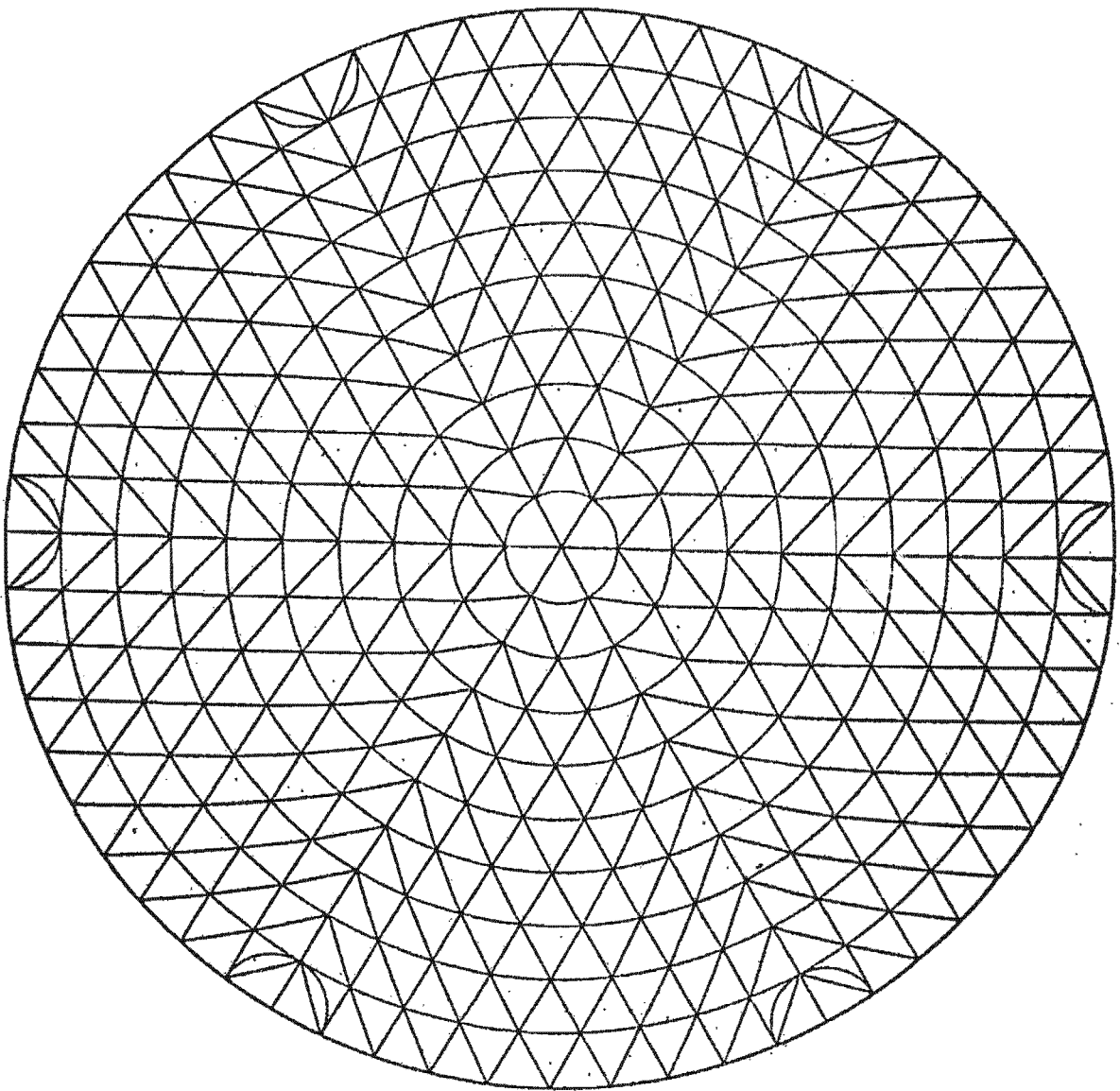
STEREOGRAPHIC  
(WULFF) NET  
MOO772

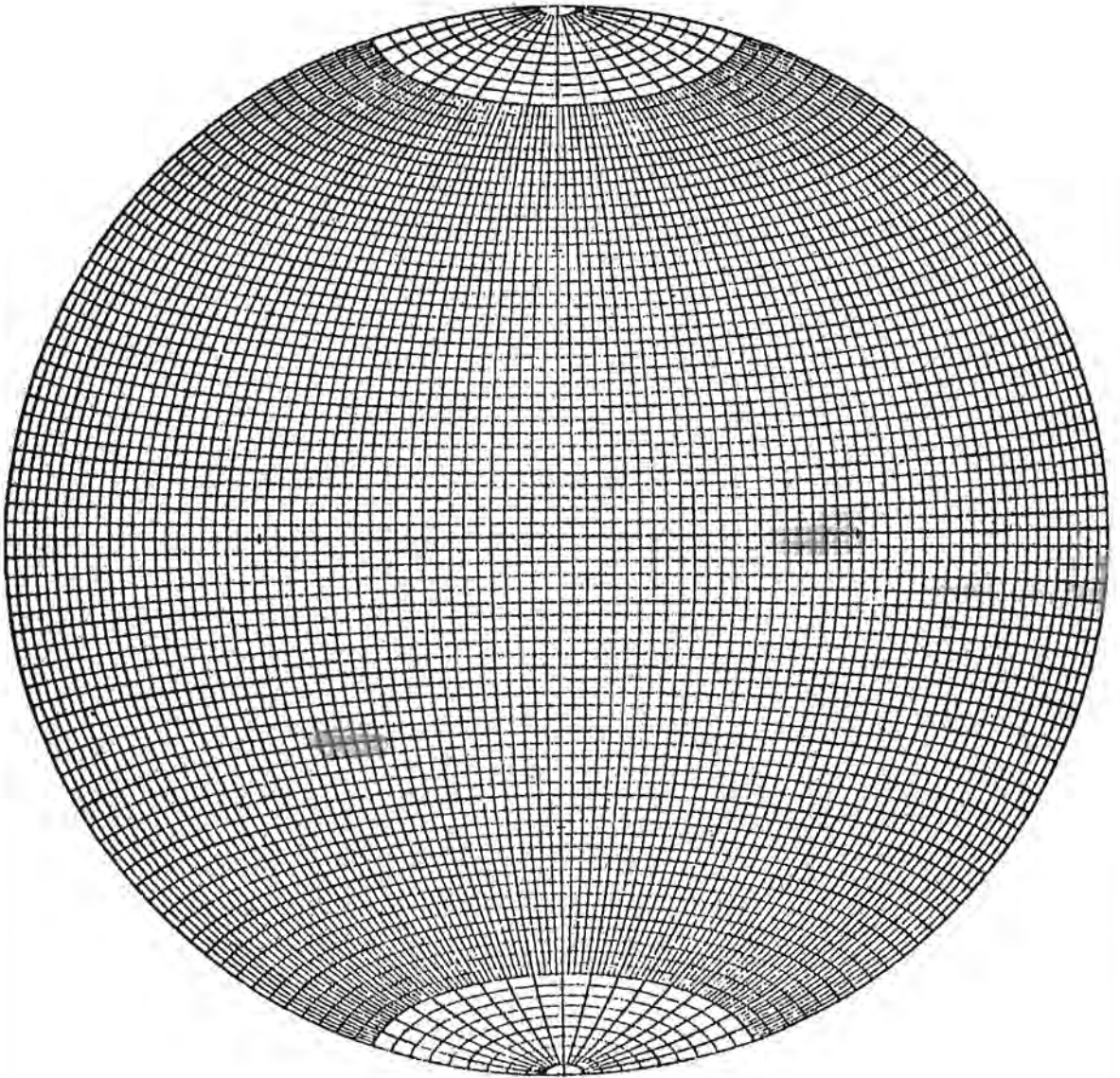




EQUAL AREA  
(SCHMIDT) NET  
M777







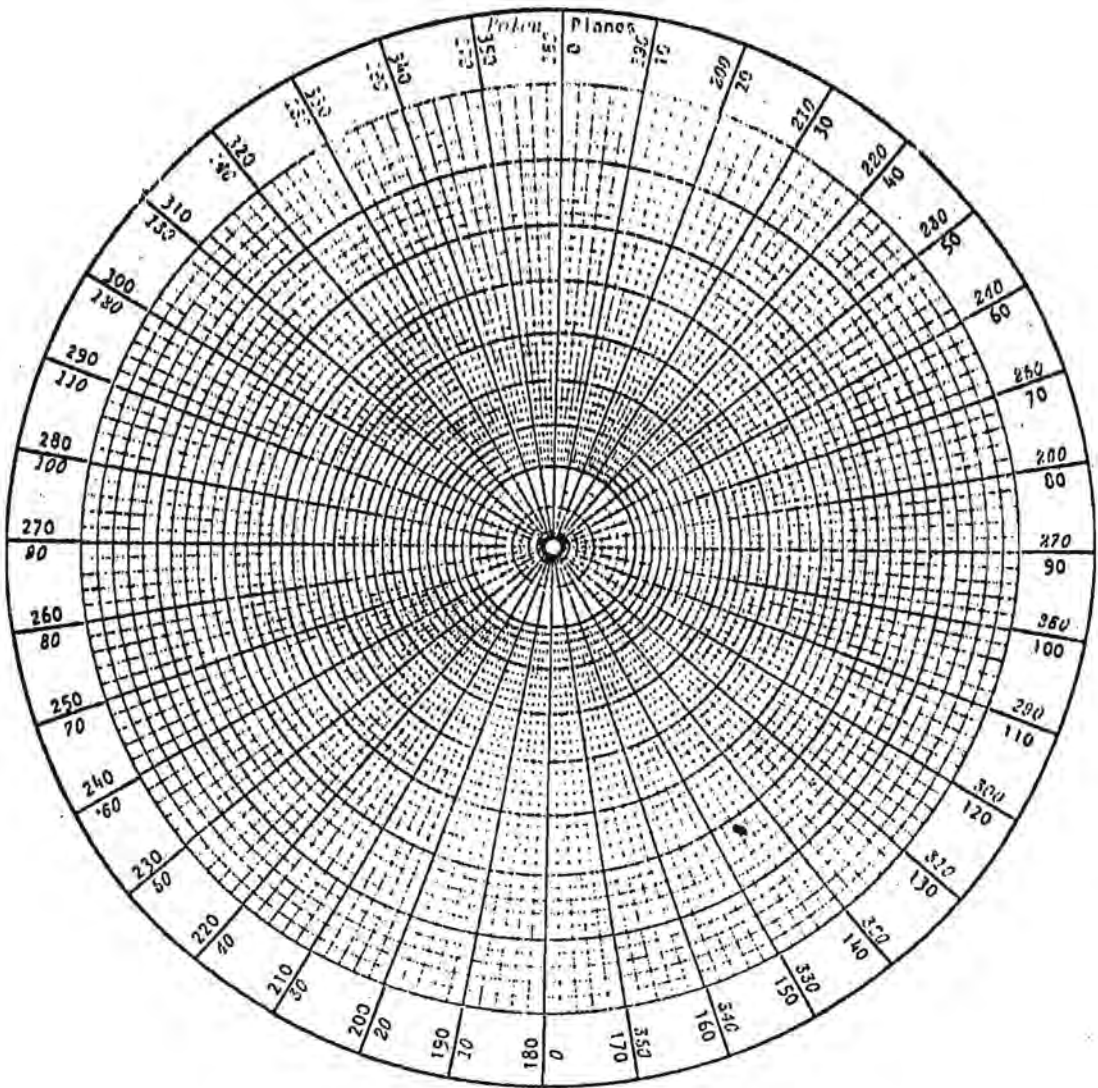
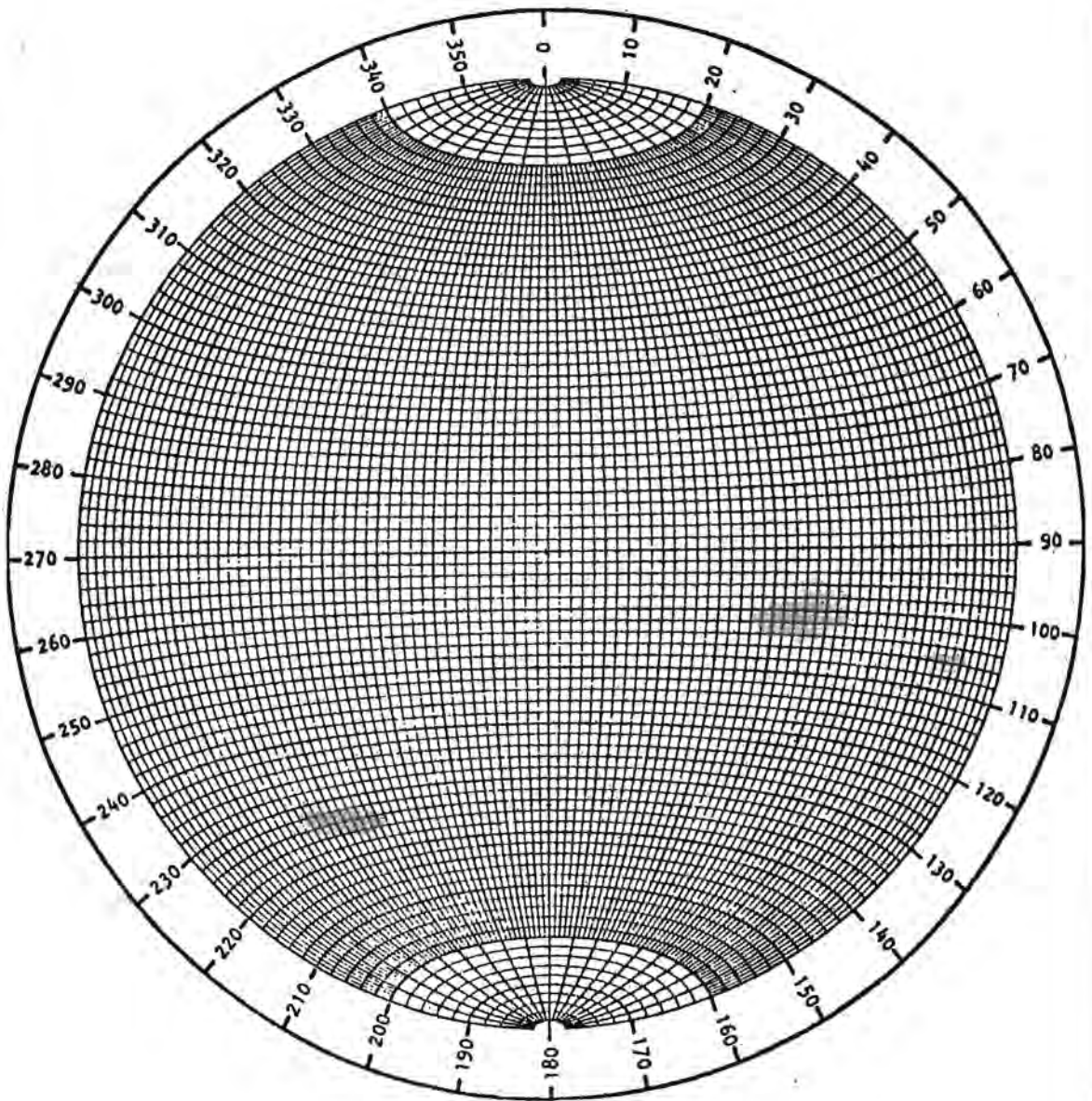


Figure 29 : Polar stereographic net on which the poles of geological planes can be plotted.

Computer drawn by Dr. C.M. St John of the Royal School of Mines, Imperial College, London.





Equatorial equal-area stereonet marked in  $2^{\circ}$  intervals.

*Computer drawn by Dr C.M. St John of the Royal School of Mines,  
Imperial College, London.*



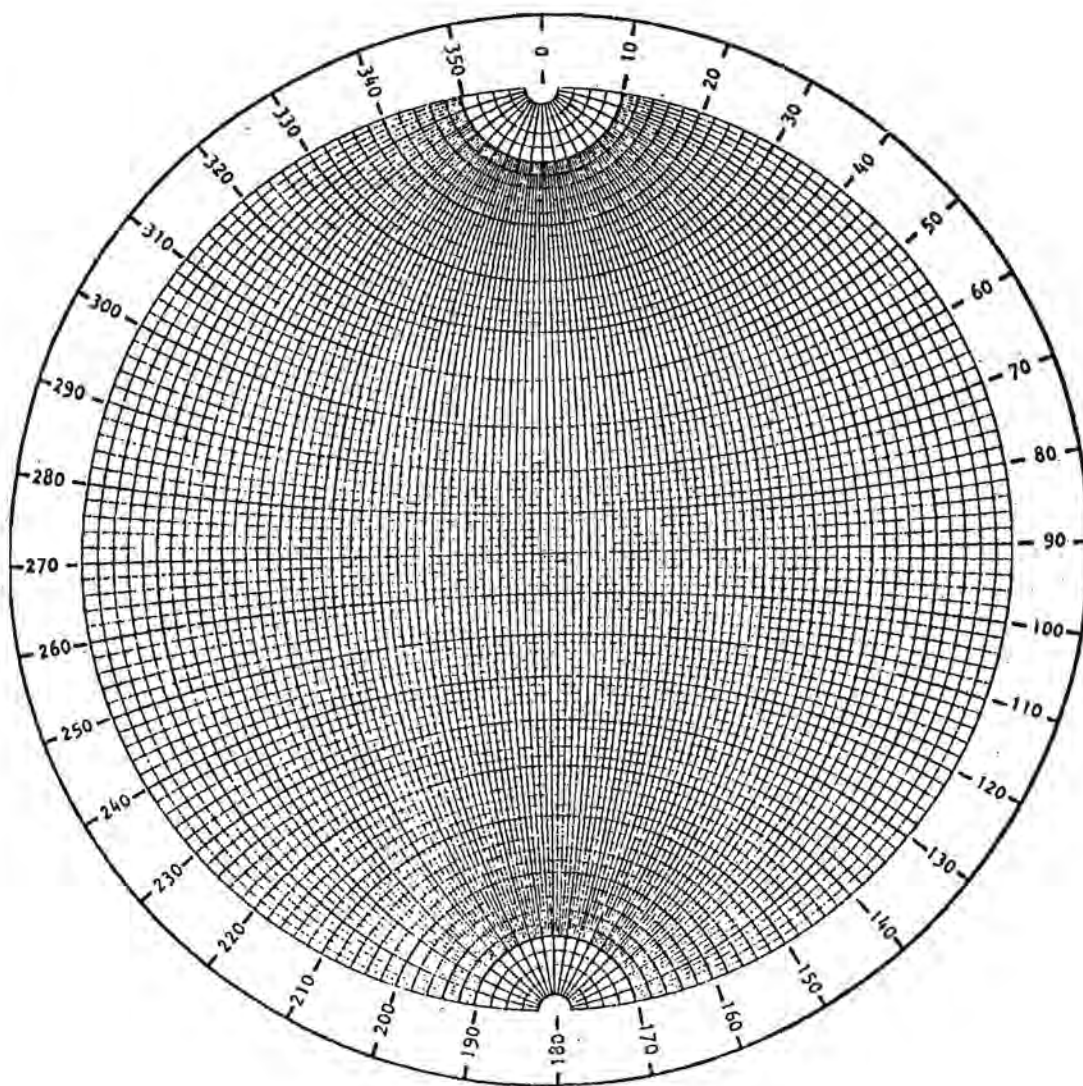
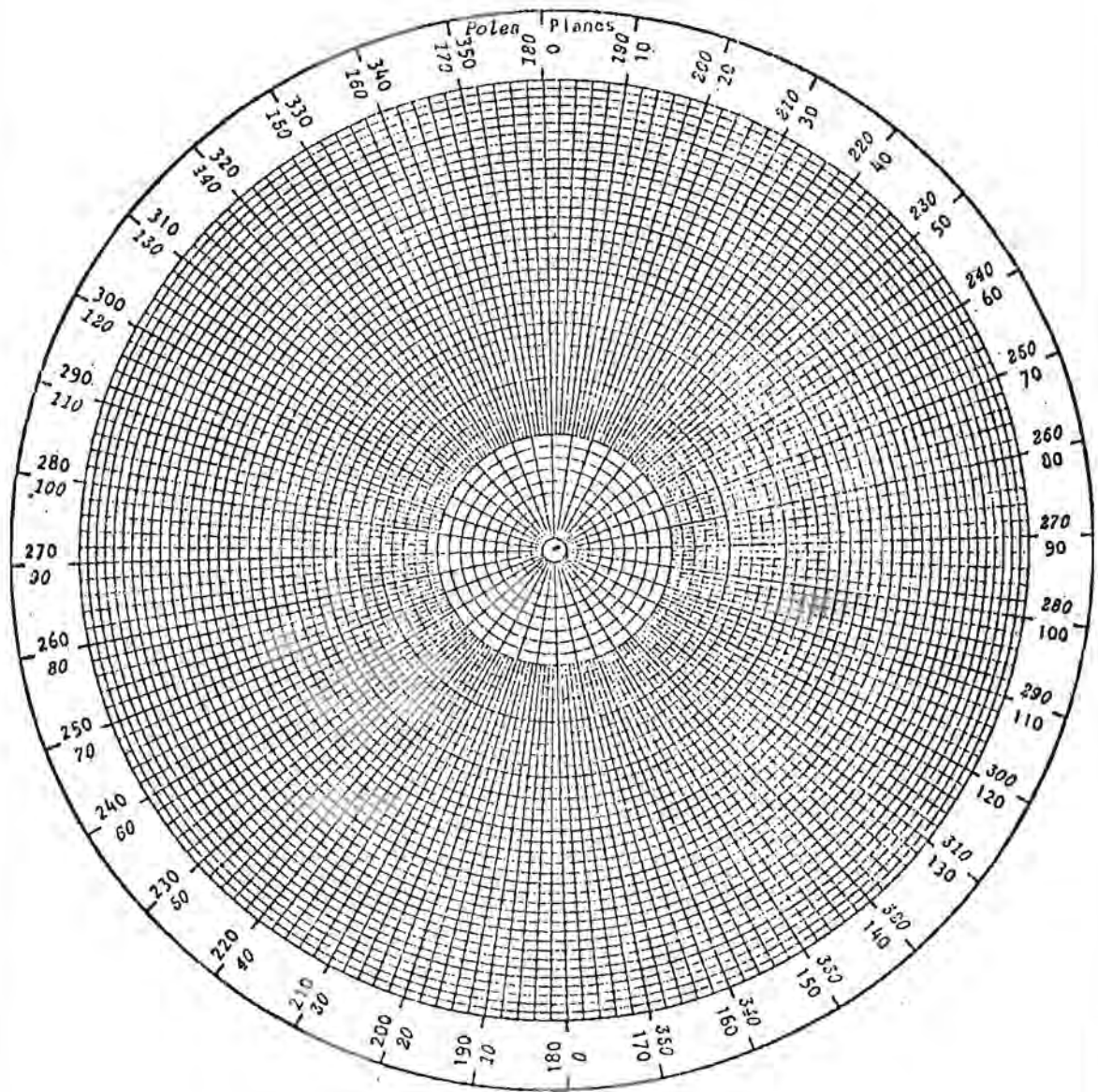


Figure 28 : Meridional stereographic net for the analysis of structural geology data.

*Computer drawn by Dr. C.K. St John of the Royal School of Mines, Imperial College, London.*



Polar equal-area stereonet marked in  $2^{\circ}$  intervals.

Computer drawn by Dr C.M. St John of the Royal School of Mines,  
Imperial College, London.

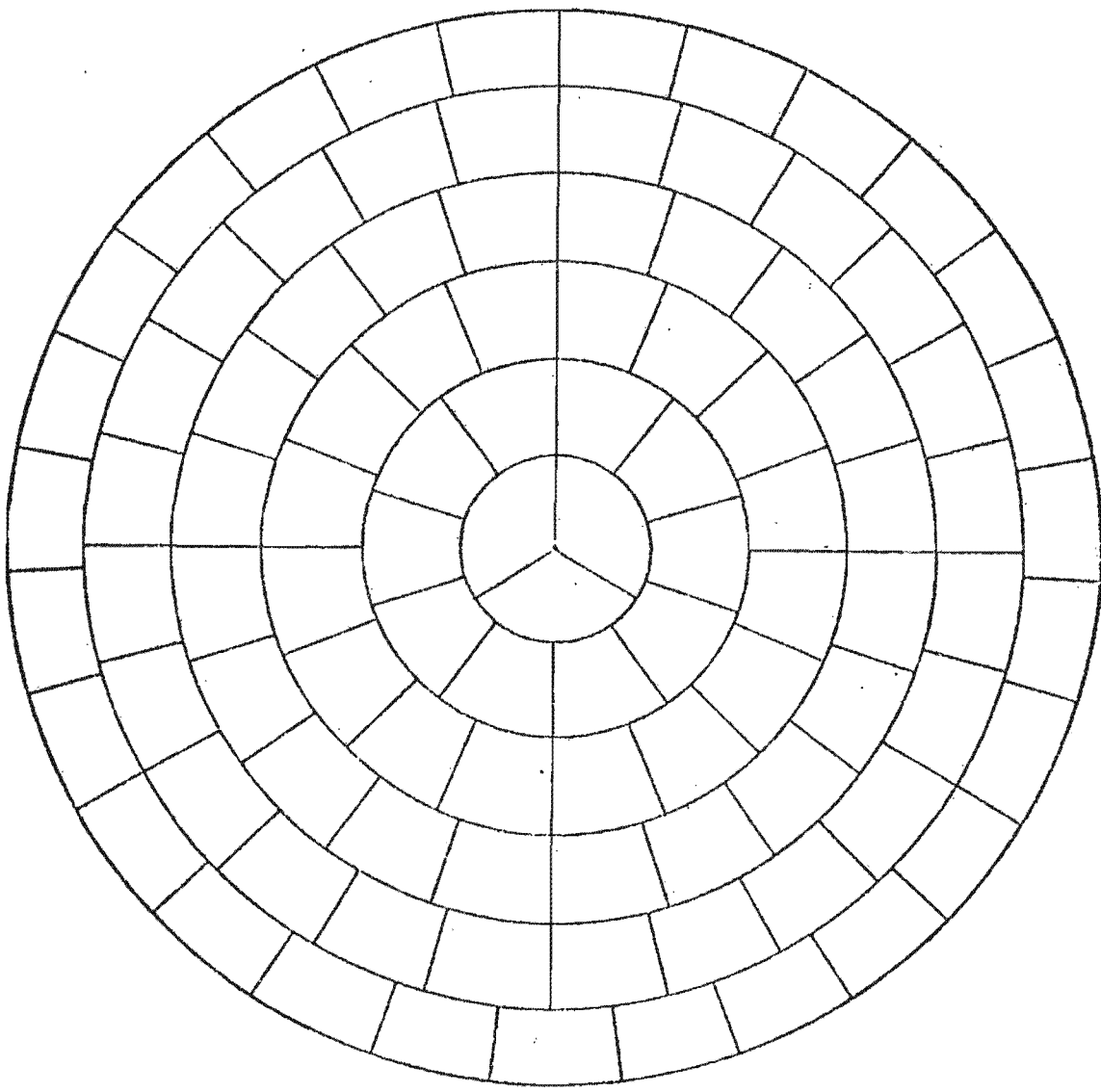


Figure 17 : Denness type B curvilinear cell counting net.

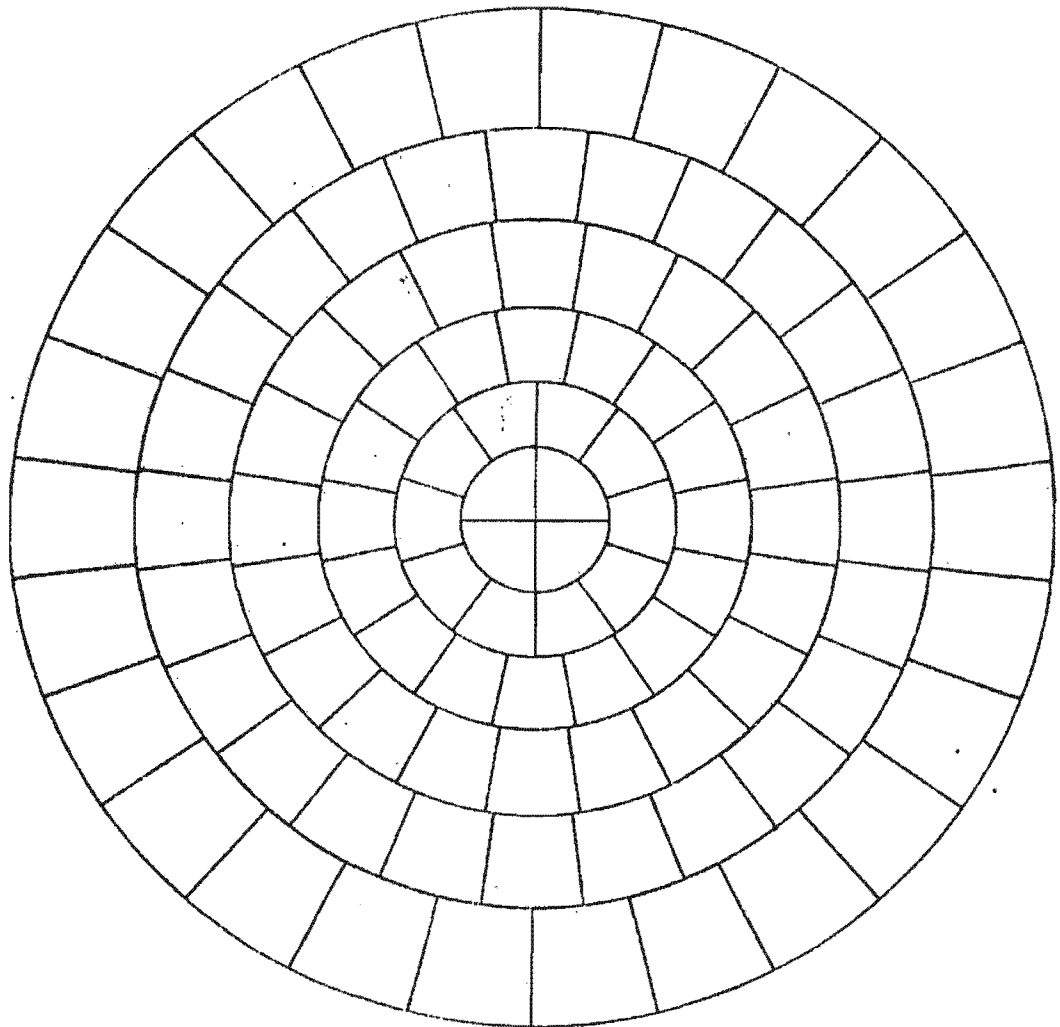


Figure 30 : Counting net for use in conjunction with the polar stereographic net given in figure 29.

*Reproduced with permission of Pierre Leode, Coyne & Bellier, Paris.*

La presente entrega se terminó de imprimir  
el 3 de noviembre de 1988 en la Asociación  
Geológica Argentina, Maipú 645, 1er. piso.  
1006 Buenos Aires, República Argentina.



# ASOCIACION GEOLOGICA ARGENTINA

(Miembro de la Unión Internacional de Ciencias Geológicas IUGS)

## COMISION DIRECTIVA

(1987-1989)

*Presidente:* DR. HÉCTOR A. LEANZA  
*Vicepresidente:* DR. MIGUEL A. ULIANA  
*Secretario:* DR. RICARDO VARELA  
*Tesorero:* LIC. LUIS A. FAUQUE

### Vocales:

DR. JORGE O. CODIGNOTTO  
LIC. ADELMA BAYARSKY  
LIC. LUIS GRIECO

### Vocales Suplentes:

LIC. ROBERTO R. KOKOT  
DR. SERGIO MATHEOS  
LIC. ANA MARÍA SATO

*Director de la Revista:* DR. FRANCISCO E. NULLO

*Coordinador de Publicaciones:* DR. JORGE O. CODIGNOTTO

## COMITE EDITORIAL

DR. FLORENCIO G. ACEÑOLAZA, ING. VICTORIO ANGELELLI, DR. ARTURO J. AMOS, DRA. MILKA K. DE BROODTKORB  
DR. HORACIO H. CAMACHO, DR. ROBERTO CAMINOS, DR. CARLOS CINGOLANI, DR. GUALTER CHEBLI, DR. LUIS DALLA SALDA,  
DR. FRANCISCO FIDALGO, DR. FÉLIX GONZALEZ BONORINO, DR. EMILIO GONZÁLEZ DÍAZ, ING. ANTONIO INTROCASO,  
DR. HÉCTOR A. LEANZA, DR. ENRIQUE LINARES, DR. EDUARDO J. LLAMBIAS, DR. NORBERTO MALUMIAN, DR. ROSENDO PASCUAL  
DR. VÍCTOR A. RAMOS, DR. CARLOS W. RAPELLA y DR. JOSÉ A. SALTIFY

## DELEGADOS EN EL INTERIOR

*Bahía Blanca:* Dra. Graciela Mas, Paraná 849, 8000 Bahía Blanca.  
*Catamarca:* Dr. Gustavo A. Toselli, Dr. Adolfo Cano 1876, Bo. Güemes, 4700 Catamarca.  
*Corrientes:* Lic. Oscar Orfeo, CC 217, 3400 Corrientes.  
*Comodoro Rivadavia:* Dr. Ricardo Clavijo, Y.P.F., Departamento de Geología de Exploración, Golfo San Jorge, km 3, 9005 Comodoro Rivadavia.  
*Córdoba:* Lic. Zulema Herrera, FCEF y N-UNC, Cátedra de Estratigrafía, Av. Vélez Sarsfield 299, 5000 Córdoba.  
*Jujuy:* Lic. José Alcázar, Dinamarca 1043, 4600 S. S. de Jujuy.  
*La Rioja:* Dra. Ana Prieri de Vega, Plan La Rioja, C. C. 1538, 5300 La Rioja.  
*La Plata:* Dr. Sergio D. Matheos, Centro de Investigaciones Geológicas, Fac. Cs. Nat. y Museo de La Plata, Calle 1 N° 644, 1900 La Plata.  
*Mar del Plata:* José L. Cionchi, C. C. 722, Correo Central 7600 Mar del Plata.  
*Mendoza:* Lic. Julio César Benítez, Y.P.F., Departamento Geológico Cuyo, San Martín Sur 36, 5501 Godoy Cruz, Mendoza.  
*Mendoza:* Lic. Juan C. Zanetti, Dirección de Fabricaciones Militares, CC 160, 5500 Mendoza.  
*Mina Aguilar:* Lic. Pablo Diccindio, Dpto. de Geología, 4634 Mina Aguilar, Jujuy.  
*Neuquén:* Lic. Carlos Gullisano, Comisión Geológica N° 1, CC 25, 8300 Neuquén.  
*Paraná:* Lic. Juan C. Bertolini, Corrientes 476, 3100 Paraná, Entre Ríos.  
*Plaza Huincul:* Lic. Fernando Bettini, Casa N° 245, Campamento 1, Y.P.F., 8318 Plaza Huincul.  
*Río Cuarto:* Lic. Mario Canni, Univ. Nac. de Río Cuarto, Est. N° 9, 5800 Río Cuarto.  
*Río Gallegos:* Lic. Muriel Miller, CC 246, 9400 Río Gallegos, Santa Cruz.  
*Río Turbio:* Lic. Oscar R. Cabrera, Y.P.F., División Geología, 9407 Río Turbio, Santa Cruz.  
*Rosario:* Dra. Pierina Pasotti, Av. Pellegrini 494, 2000 Rosario.  
*Salta:* Dr. José Antonio Saltify, Pasaje N. Roldán 57, 4400 Salta.  
*San Juan:* Lic. Silvio H. Peralta, Fac. Cs. Nat., Edificio Malvinas Argentinas, Av. Ignacio de la Roza y Meglioli, 5400 Rivadavia, San Juan.  
*San Luis:* Nilda E. Urbina, Las Heras 1180, 5700 San Luis.  
*Santa Fe:* Dra. Ofelia Tujchneider, Juan de Garay 2871, 3000 Santa Fe.  
*Santa Rosa:* Lic. Silvio Casadio, Mendoza 685, 6300 Santa Rosa, La Pampa.  
*Santiago del Estero:* Lic. Julia Cortés, Mitre 337, 4200 Santiago del Estero.  
*Tucumán:* Dr. Hugo A. Peña, Fundación Miguel Lillo, Miguel Lillo 205, 4000 S. M. de Tucumán.  
*Vespucio:* Lic. Bernardo Pozo, Distrito Geológico, Campamento Vespucio, 4562 Salta.  
*Viedma:* Dra. Elena Bernabé de Greco, Rivadavia 1027, 8500 Viedma.  
*Ushuaia:* Lic. Gustavo Bujalevsky, CADIC, CC 92, 9410 Ushuaia.  
*Zapala:* Lic. Marta Franchini, Dir. Gral. de Minería, Etcheluz y Monti, 8340 Zapala, Neuquén.

## DELEGADOS INSTITUCIONALES EN BUENOS AIRES

*Agua y Energía:* Lic. Guillermo Turazzini, Alem 1134, 1001 Buenos Aires.  
*Banco Nacional de Desarrollo:* Dr. Pedro Grandi, 25 de Mayo 145, 5° p., 1002 Buenos Aires.  
*Bridas S.A.P.I.C.:* Lic. Marcos Mozetic, Av. Leandro N. Alem 1180 (1001).  
*CIRGEO:* Dr. Juan P. Spikermann, Ramírez de Velasco 839 (1414).  
*Comisión Nacional de Energía Atómica:* Lic. Oscar Elena, Libertador 8350 (1429).  
*Comisión Nacional de Investigaciones Espaciales (F.A.):* Lic. Luis Humberto Perpozzi, Mitre 3100 (1663) San Miguel.  
*Consejo Federal de Inversiones:* Lic. Roberto M. Sarudiansky, San Martín 871 (1004).  
*Dirección General de Fabricaciones Militares:* Dr. Vicente Méndez, Cabildo 65 (1526).  
*Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, U.B.A.:* Lic. Ana Virginia Vrba, Ciudad Universitaria, Pabellón 2, 1428 Núñez.  
*Servicio de Hidrografía Naval:* Lic. Roberto A. Violante, Montes de Oca 2124 (1271).  
*Instituto Nacional de Ciencias y Técnicas Hidráulicas:* Lic. Graciela S. Felici, CC 9, 1802 Ezeiza.  
*Castelli, Cabañas y Reseros, 1712 Castelar.*  
*Instituto Nacional de Tecnología Industrial:* Lic. Alejandra Pietrilli, Av. Gral. Paz s/n, 1650 San Martín.  
*Museo Argentino de Ciencias Naturales:* Miguel Soria, Angel Gallardo 470 (1405).  
*Secretaría de Minería:* Lic. Norma Pezzutti, Avda. Santa Fe 1548 (1060).  
*Yacimientos Petrolíferos Fiscales:* Lic. Raúl V. Marinelli, Diagonal Norte 777 (1035).  
*Laboratorio Yacimientos Petrolíferos Fiscales:* Lic. Flore Rey Cabalcero, Av. Crisólogo Larralde, km 23500, 1188 Florencio Varela.

## DELEGADOS EN EL EXTERIOR

*Brasil:* Dra. Norma M. de Melo Da Costa, Lamin. Secao de Bioestratigrafia. Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais, CPRM, Av. Pasteur 401 - Praia Vermelha 20000, Rio de Janeiro.  
*Dr. I. de Maderios Tinoco.* Escola de Geologia. Universidad Federal de Pernambuco, Recife. Caixa Postal 2492  
*Dr. Oscar Róster.* Instituto de Geociencias USP, Caixa Postal 20899, 01.00 Sao Paulo.  
*Chile:* Dr. John Davidson. Dep. Geol. Univ. Chile. Casilla 13518 - C. 21, Santiago.  
*Francia:* Dr. Jean Claude Vicente, Laboratoire de Geologie Structurale, 4 Place Jussieu, Tour 26, 3° Etage, 75230 Paris, Francia.  
*Paraguay:* Dr. Gustavo Vera Morinigo - C.C. 1662 - Asunción.  
*Perú:* Dr. Jean Claude Vicente. Departamento de Geología. Univ. Nac. San Agustín, Casilla 572, Arequipa.