

GEOMEC

BOLETIN DE DIVULGACION GEOTECNICA

TALUDES EN MACIZOS ROCOSOS
"LA ESTABILIDAD GEOESTRUCTURAL EN EL MARCO DE
LA ZONIFICACION DE RIESGOS GEOLOGICOS"
POR: GIANFRANCO PERRI



Nº 10

ABRIL, 1982

caracas

Volvemos con este número al tema de los "Taludes en macizos rocosos", y lo hacemos presentando un nuevo e interesante ejemplo de aplicación de las técnicas de las proyecciones hemisféricas al análisis de estabilidad en un área perteneciente a las Colinas de Caracas.

Específicamente, en este trabajo realizado por el prof. Gianfranco - Perri se presenta en el marco de un estudio de zonificación de riesgos geológicos del territorio, una metodología para el análisis de la estabilidad geoes estructural de las pendientes rocosas, mediante una extensión de las conocidas técnicas de las proyecciones hemisféricas para el estudio de la estabilidad de taludes en rocas.

Después de breves indicaciones sobre la problemática general de la estabilidad de los taludes rocosos y de un estudio con las técnicas de las proyecciones hemisféricas, en forma detallada se presenta la metodología elaborada, con su aplicación a un caso real estudiado por el autor.

En las conclusiones se hace hincapié sobre el aspecto más general de la zonificación de riesgos geológicos en el contexto de la cual, el análisis geoes estructural presentado representa solamente uno de los aportes necesarios.

Hemos finalmente considerado buena la ocasión para reproducir en anexo, un trabajo realizado unos años atrás por el prof. Gianfranco Perri, titulado "La cohesión en el análisis estereográfico de estabilidad de taludes".

En efecto este trabajo se complementa perfectamente con la problemática, hasta aquí presentada, relativa al uso de las técnicas de las proyecciones hemisféricas para el análisis y diseño de taludes en macizos rocosos.

Caracas, abril de 1982.

TALUDES EN MACIZOS ROCOSOS
"LA ESTABILIDAD GEOESTRUCTURAL EN EL MARCO DE
LA ZONIFICACION DE RIESGOS GEOLOGICOS"

POR: GIANFRANCO PERRI (*)

(*) Profesor de Mecánica de Rocas en la U.C.V.

INTRODUCCION

En el presente trabajo, pretendemos ilustrar solamente uno de los aspectos involucrados en la metodología que hemos venido desarrollando para lograr una eficaz zonificación del territorio frente al problema de los riesgos geológicos.

En efecto, el aspecto de la estabilidad geoes estructural, que aquí comentaremos, se integra y se complementa con los otros numerosos aspectos que concurren a la definición final de una zonificación de riesgos geológicos del territorio. Para solamente citar los dos principales, debemos mencionar el aspecto geolitológico y el geomorfológico, ambos entendidos en su mayor amplitud.

Queremos presentar aquí la metodología para el análisis de la estabilidad geoes estructural por considerarla un tanto novedosa y especialmente eficaz para los efectos de un estudio a escala mediana (de 1:1.000 a 1:10.000) de zonificación del territorio.

Por otro lado se trata simplemente de una ampliación de aquellos conceptos y metodologías conocidas como técnicas de las proyecciones hemisféricas ya ampliamente ilustradas por numerosísimos autores; por ejemplo: Hoek y Bray (1974), Goodman (1976).

LA PROBLEMATICA GENERAL

En un ambiente rocoso, caracterizado por un comportamiento mecánico altamente anisótropo debido a la presencia de superficies de menor resistencia sistemáticamente ordenadas en el interior de un macizo, los parámetros que en manera decisiva controlan la estabilidad de los taludes son de dos órdenes principales:

- por un lado los parámetros de resistencia al corte (cohesión y fric

ción) que pueden desarrollarse a lo largo de las diferentes superficies de menor resistencia o planos de discontinuidad geológico - estructural;

- por el otro las ubicaciones recíprocas entre estos planos de discontinuidad y los planos de las superficies libres de los macizos rocosos: las caras de los taludes.

En particular frente al problema de la estabilidad de taludes en rocas, pueden definirse por lo menos tres situaciones características posibles:

- a) Condiciones cinemáticamente estables. Esto es, ubicación relativa en el espacio entre los planos involucrados en el problema, que no da lugar a la existencia de algún grado de libertad cinemática para toda la estructura, la cual en consecuencia, resulta estable independientemente de las características de resistencia al corte que puedan desarrollarse.

Más explícitamente, para que ocurran movimientos de volúmenes rocosos en el talud, es necesario que las líneas de intersección entre planos de discontinuidades no paralelas existentes en el macizo rocoso buzen hacia la cara del talud y con ángulo de buzamiento menor del que presente el mismo talud en el sentido del potencial movimiento.

Por otro lado podrán desarrollarse movimientos de tipo planares, además de los de cuñas de rocas ya citados, cuando el plano de discontinuidad sea pseudo-paralelo al del talud y presente un ángulo de buzamiento en el mismo sentido y menor que el del talud mismo.

En otras palabras es necesario, para que haya posibilidad de movimiento, que tanto la línea de intersección de los planos de discontinuidad

nuidad en el caso de cuña, como el plano mismo de la discontinuidad en el caso de movimiento planar, afloran en la cara del talud; de lo contrario se estarán verificando las condiciones de estabilidad cinemática.

- b) Condiciones de inestabilidad cinemática y de estabilidad mecánica. Cuando están dadas las condiciones geométricas de inestabilidad cinemática, interviene para oponerse al movimiento, la resistencia al corte que puede desarrollarse en el contacto entre los planos de discontinuidad en cuestión.

Esta resistencia al corte, que es función de diferentes variables físicas y principalmente de la naturaleza geológica de los materiales que constituyen la masa rocosa y de las condiciones morfológicas de las superficies de las discontinuidades, es debida en general a dos distintos factores mecánicos: la fricción y la cohesión.

El primer parámetro, la fricción, hace desarrollar fuerzas resistentes que no están ligadas a las dimensiones de las superficies de contacto y en consecuencia no dependen de la escala del problema sino simplemente del buzamiento de los planos de discontinuidad; el segundo parámetro, la cohesión, en cambio desarrolla fuerzas resistentes de intensidad directamente proporcional a las dimensiones de las superficies en contacto y que por lo tanto están muy ligadas a la escala del problema (en particular a la altura del talud), mientras son independientes de las relaciones angulares y de ubicación en el espacio de las estructuras.

Ahora bien, estas fuerzas resistentes que pueden desarrollarse al contacto de las superficies de discontinuidad, puede ocurrir que sean de magnitud superior a las fuerzas actuantes (esencialmente debidas a los efectos de la gravedad) tendientes a producir el movimiento, y en este caso el talud seguirá siendo un talud estable definiéndose

para él un factor de seguridad (F_s) igual a la relación existente entre fuerzas resistentes y fuerzas actuantes; ambas calculadas en sus componentes paralelas a la dirección del potencial movimiento.

- c) Condiciones de inestabilidad cinemática y mecánica. Si además de verificarse situaciones de inestabilidad cinemática, ocurre que las fuerzas actuantes superan en intensidad a las correspondientes de resistencia, el factor de seguridad del talud resultará menor que 1 y el talud mismo será inestable.

Igualmente puede ocurrir que el factor de seguridad a pesar de ser mayor que la unidad, sea de magnitud no aceptable para el tipo de obra en estudio o, en otras palabras, puede ocurrir que se requiera garantizar un factor de seguridad mínimo superior a la unidad. En ambos casos, se requerirá una estabilización artificial del talud. La misma podrá llevarse a cabo en diferentes formas que van desde la modificación de la geometría del talud hasta la aplicación de fuerzas externas estabilizantes que se vayan a sumar a las fuerzas resistentes o que, alternativamente o contemporáneamente, se vayan a sustraer a las fuerzas actuantes.

LA TECNICA DE LAS PROYECCIONES HEMISFERICAS

Como ya mencionamos al comienzo, las técnicas de representación e interpretación de problemas geoestructurales mediante las proyecciones hemisféricas son muy conocidas y difundidas entre los ingenieros geólogos y geotécnicos, así como las correspondientes aplicaciones básicas a problemas de análisis y cálculo de estabilidad de taludes rocosos.

Por lo tanto no vamos a dedicar páginas a la explicación de estas técnicas básicas, enviando, a los lectores que así lo necesiten, a la abundante bibliografía disponible y solamente en mínima parte reportada al final de este escrito.

Vamos sólo a comentar que todas aquellas consideraciones sobre la problemática general del análisis de estabilidad, ilustradas en el párrafo anterior encuentran, en las técnicas de las proyecciones hemisféricas, un soporte ideal para su representación, análisis, estudio y cuantificación del problema. En efecto las técnicas en mención representan un instrumento extremadamente cómodo y simple para la representación en un plano (sobre la base de un retículo) de los complejos fenómenos de interacción espacial entre las estructuras geométricas involucradas; y más aún, es igualmente cómodo y fácil introducir en la representación, los efectos de la resistencia mecánica al corte en su componente friccional y hasta cohesiva; finalmente las técnicas más avanzadas permiten la cuantificación completa del problema hasta la determinación de los valores numéricos de los factores de seguridad y de los efectos de eventuales fuerzas externas no debidas a la gravedad.

LA METODOLOGIA DEL ANALISIS

Ya hemos mencionado los factores que juegan un papel fundamental en la problemática de la estabilidad de taludes rocosos. El segundo de estos factores lo hemos denominado: ubicación recíproca entre los planos geoestructurales y los planos topográficos; en otras palabras, es fundamental la interacción geométrica entre estas dos familias de planos: la primera intrínseca de la naturaleza geológico - estructural de las formaciones rocosas y la segunda, consecuente de la topografía del área: rumbos y buzamientos que definen las diferentes pendientes integrantes del relieve.

Ahora bien, resulta claro que en un enfoque a gran escala, como es el que nos hemos propuesto, la metodología a usar debe estar íntimamente ligada a conceptos estadísticos y probabilísticos en consideración del hecho que no estamos estudiando una situación extremadamente localizada (por ejemplo un sólo talud), sino una amplia área; así como no esta

mos buscando la solución a un problema local, sino persiguiendo una zonificación de riesgos geológicos. El mismo término de riesgo, por otro lado, implica directamente los mencionados conceptos estadísticos y probabilísticos.

Por lo tanto también es obvio que la eficacia y la confiabilidad de los resultados, cualquiera que sean, de un estudio de este tipo están íntimamente ligadas a la abundancia y representatividad de los datos de entrada.

En nuestro caso los datos de entrada, por lo menos en la primera parte del análisis son: la ubicación en el espacio, asociada a la naturaleza geológico - geotécnica, de las discontinuidades estructurales presentes en las formaciones rocosas del área (la primera familia de planos) y, la ubicación en el espacio de los planos de las pendientes topográficas de la misma área (la segunda familia de planos).

Sucesivamente se tratará de analizar con criterios adecuados las interacciones existentes, por un lado entre los diferentes planos de la primera familia y luego, entre éstos y los planos de la segunda familia.

Este tipo de análisis será el que nos permitirá evidenciar interesantísimos aspectos del problema y nos conducirá hasta la cuantificación y localización del fenómeno en su integridad.

Para ilustrar la metodología en cuestión haremos referencia a un ejemplo práctico relativo a la zonificación de riesgos geológicos realizadas para un área de 100 hectáreas aproximadamente, en la que se proyecta desarrollar un urbanismo de carácter residencial, ubicadas en las colinas del suroeste del valle de la Ciudad de Caracas. Más precisamente se trata de la Urbanización Colinas de Valle Arriba, cuyo ambiente geológico se corresponde con la Formación Las Mercedes del Grupo Caracas, descrita originalmente por Aguerrevere y Zuloaga (1937) como

una secuencia de esquistos calcáreos con zonas grafitosas localmente micáceas.

El primer grupo de datos importantes deriva directamente de las labores de levantamiento geoestructural de campo. El resultado de esta investigación, además de la definición de unidades y sub-unidades geológicas y respectivas características peculiares, nos entrega todo el volumen de los datos estructurales constituídos por la ubicación y descripción geomorfológica de los principales accidentes estructurales existentes. Estos, para el trabajo en objeto, han sido agrupado en foliaciones, diaclasas y fallas menores. En la figura 1-a se representa el diagrama de concentración de polos de discontinuidades; nótese el elevado número de estructuras medidas y analizadas: 1130.

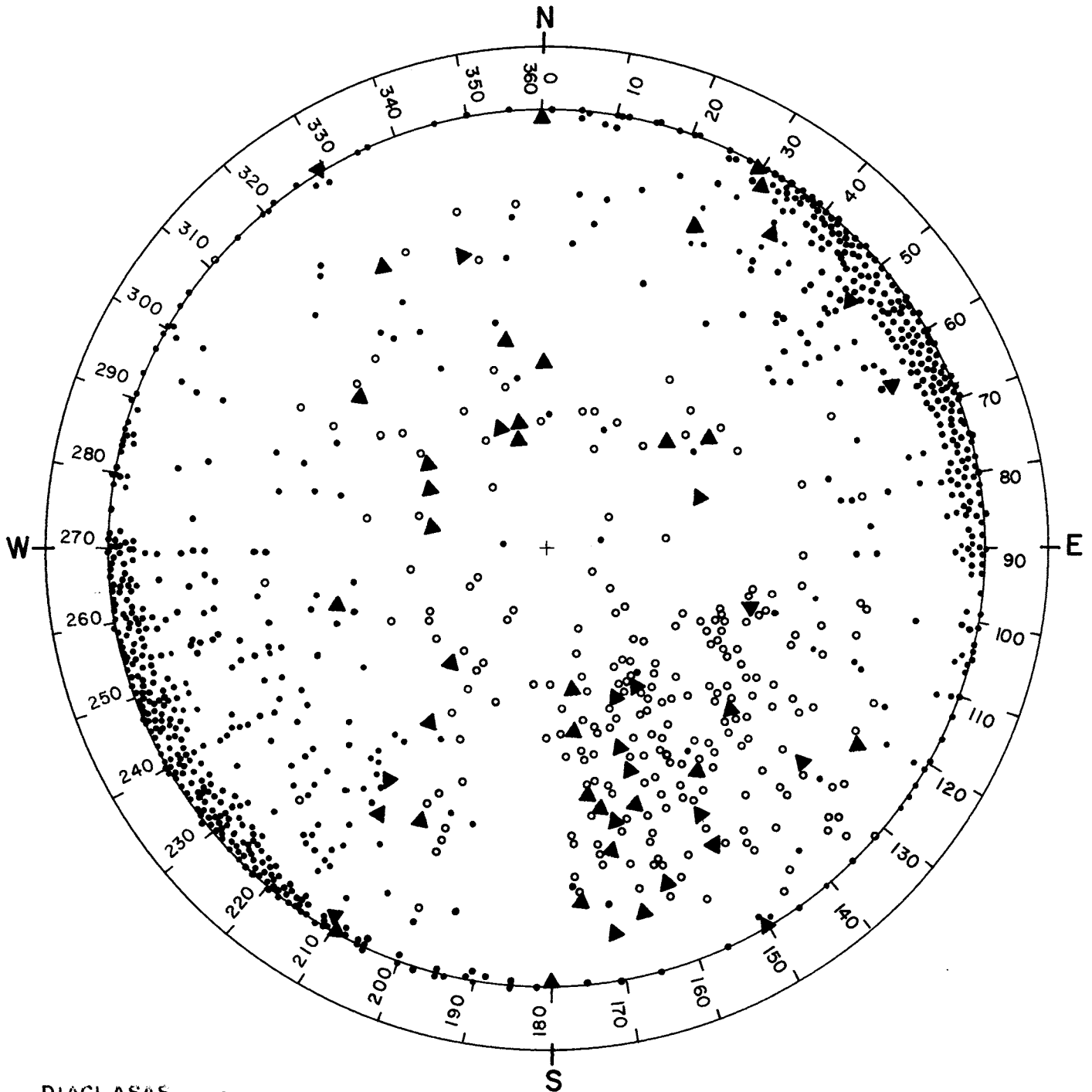
En la figura 1-b se representa el correspondiente diagrama de contornos de polos; el mismo nos permite observar la existencia de dos claros patrones de discontinuidades: un primero correspondiente a los planos de foliaciones y un segundo a los planos de diaclasas. Las fallas menores siguen un patrón similar al de las foliaciones.

Como complemento útil para las consideraciones que haremos sucesivamente, hemos reportado en las figuras 2-a y 2-b respectivamente las envolventes de los círculos de meridiano de los planos de foliaciones y de los de diaclasas; en ambas figuras hemos también delineado el área común de estas envolventes, la misma que representa la zona en que quedan ubicadas las intersecciones entre las dos familias de planos de discontinuidades; en otras palabras las líneas de todas las posibles cuñas estructurales presentes en el área en estudio.

Con esto hemos analizado y ordenado las características relativas al primer parámetro en juego: el aspecto geoestructural. Debemos ahora pasar a analizar y ordenar el segundo parámetro en juego: el aspecto topográfico.

Fig. 1a.

DIAGRAMA DE CONCENTRACION DE POLOS



DIACLASAS ●

FOLIACIONES ○

FALLAS. ▲

Nº DE POLOS DE FOLIACION = 226

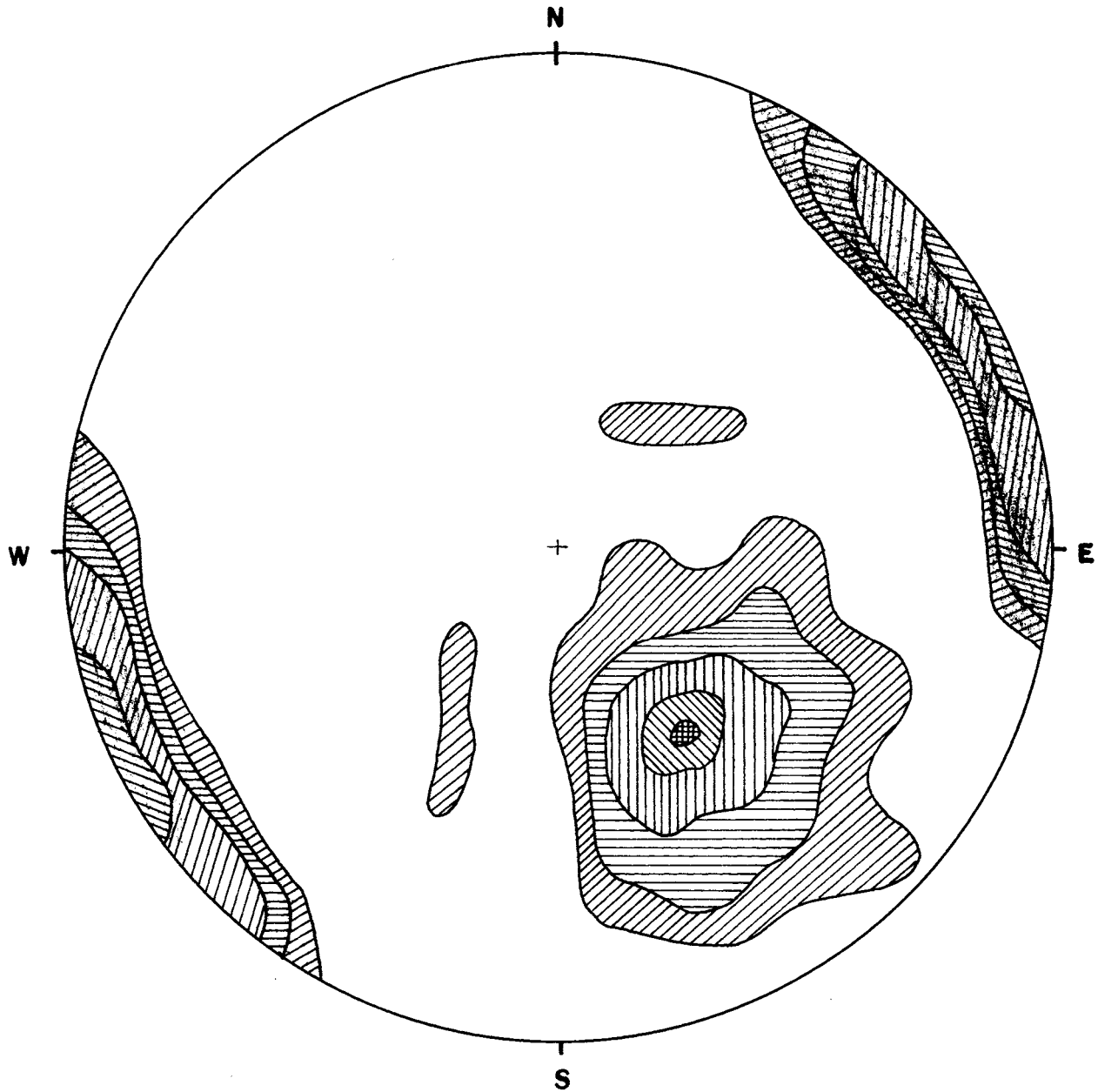
Nº DE POLOS DE DIACLASAS = 850

Nº DE POLOS DE FALLAS = 54

Nº TOTALES DE POLOS = 1.130

Fig. 1 b.

DIAGRAMA DE CONTORNO DE POLOS








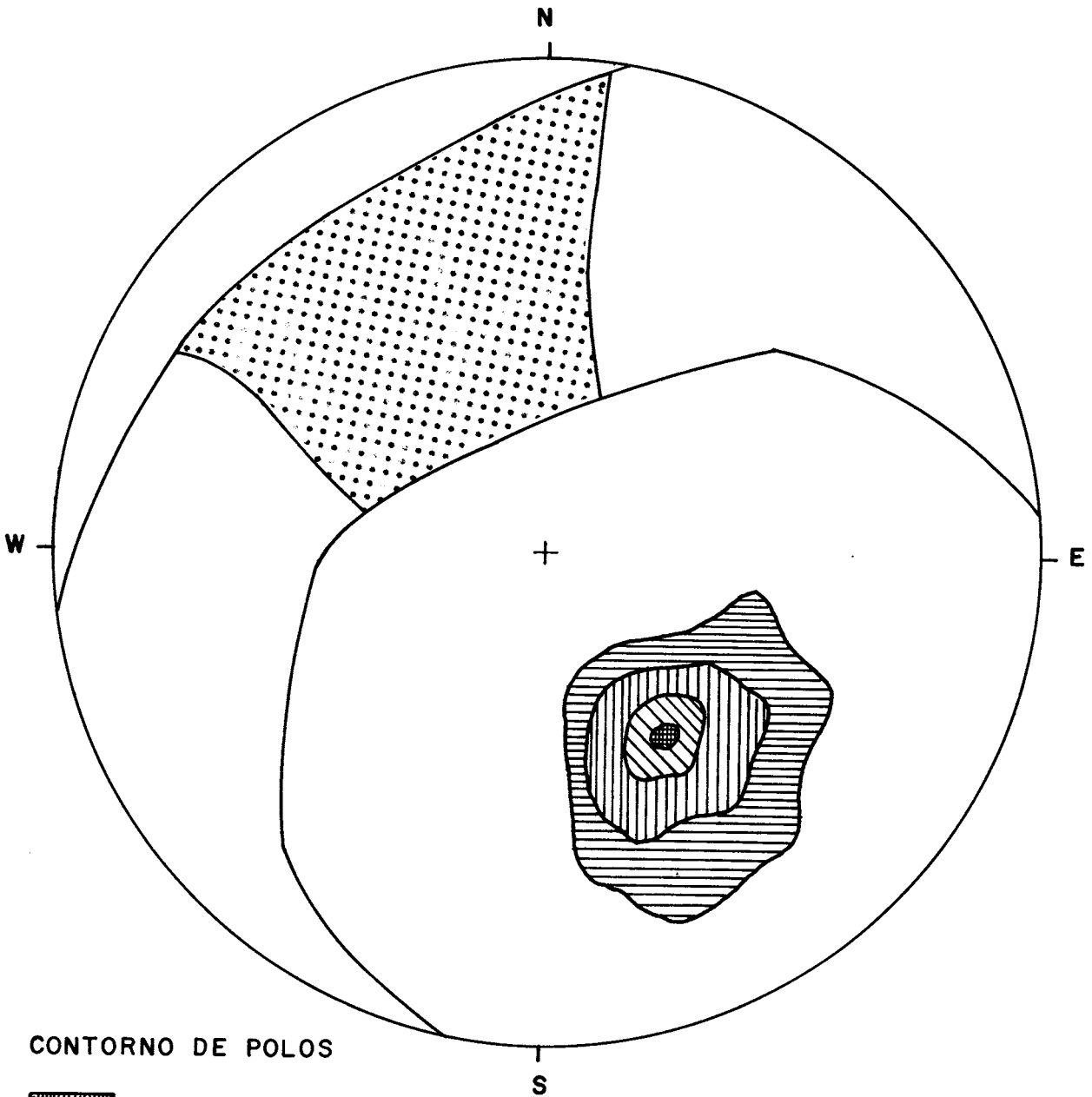
FOLIACIONES				DIACLASAS	
	10 %	23	PUNTOS	—	—
	8 % - 10 %	19 - 23	PUNTOS	—	68 - 85 PUNTOS
	6 % - 8 %	14 - 19	PUNTOS	—	51 - 68 PUNTOS
	4 % - 6 %	9 - 14	PUNTOS	—	34 - 51 PUNTOS
	2 % - 4 %	4 - 9	PUNTOS	—	17 - 34 PUNTOS


Fig. 2 a.


ENVOLVENTE DE PLANOS DE FOLIACIONES




CONTORNO DE POLOS

 10%

 8% - 10%

 6% - 8%

 4% - 6%

UBICACION DE LAS
INTERSECCIONES
FOLIACIONES - DIACLASAS

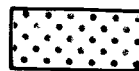
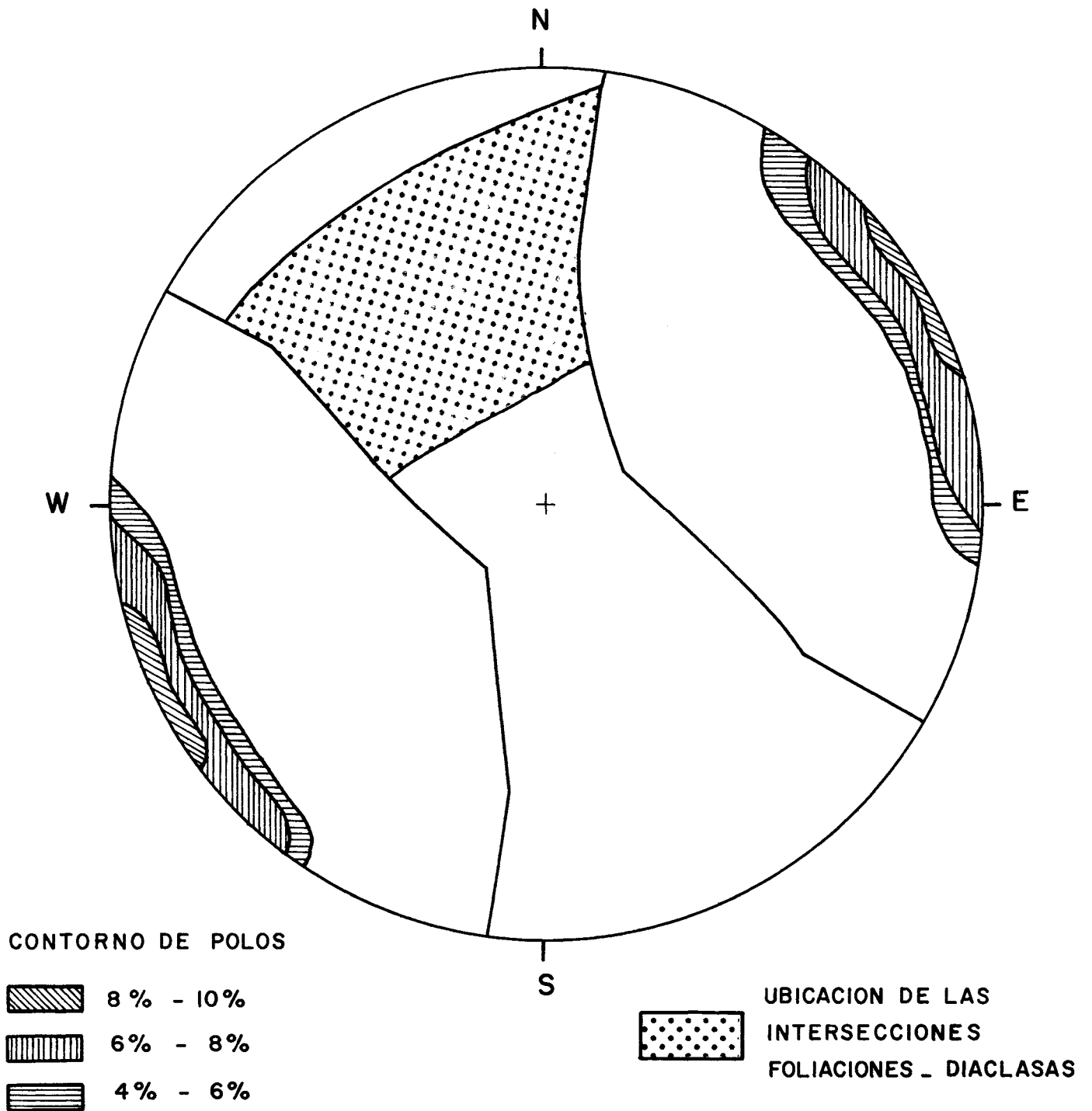


Fig. 2b.

ENVOLVENTE DE PLANOS DE DIACLASAS



A este propósito resulta cómodo imaginarnos las colinas conformante el área, como el conjunto de un número muy grande de pequeños taludes cada uno de los cuales, representando una pequeña porción de la ladera cresta o base de un relieve, está caracterizado por un valor bien definido de buzamiento y un valor, igualmente bien definido, de rumbo o sea de orientación de la pendiente.

Si hemos logrado ajustarnos a esta imaginación, tendremos simplemente que dedicarnos a cuantificar el problema, o sea definir y localizar para cada uno de estos taludes ideales, que por cierto son numerosísimos, las correspondientes características geométricas de rumbo y buzamiento.

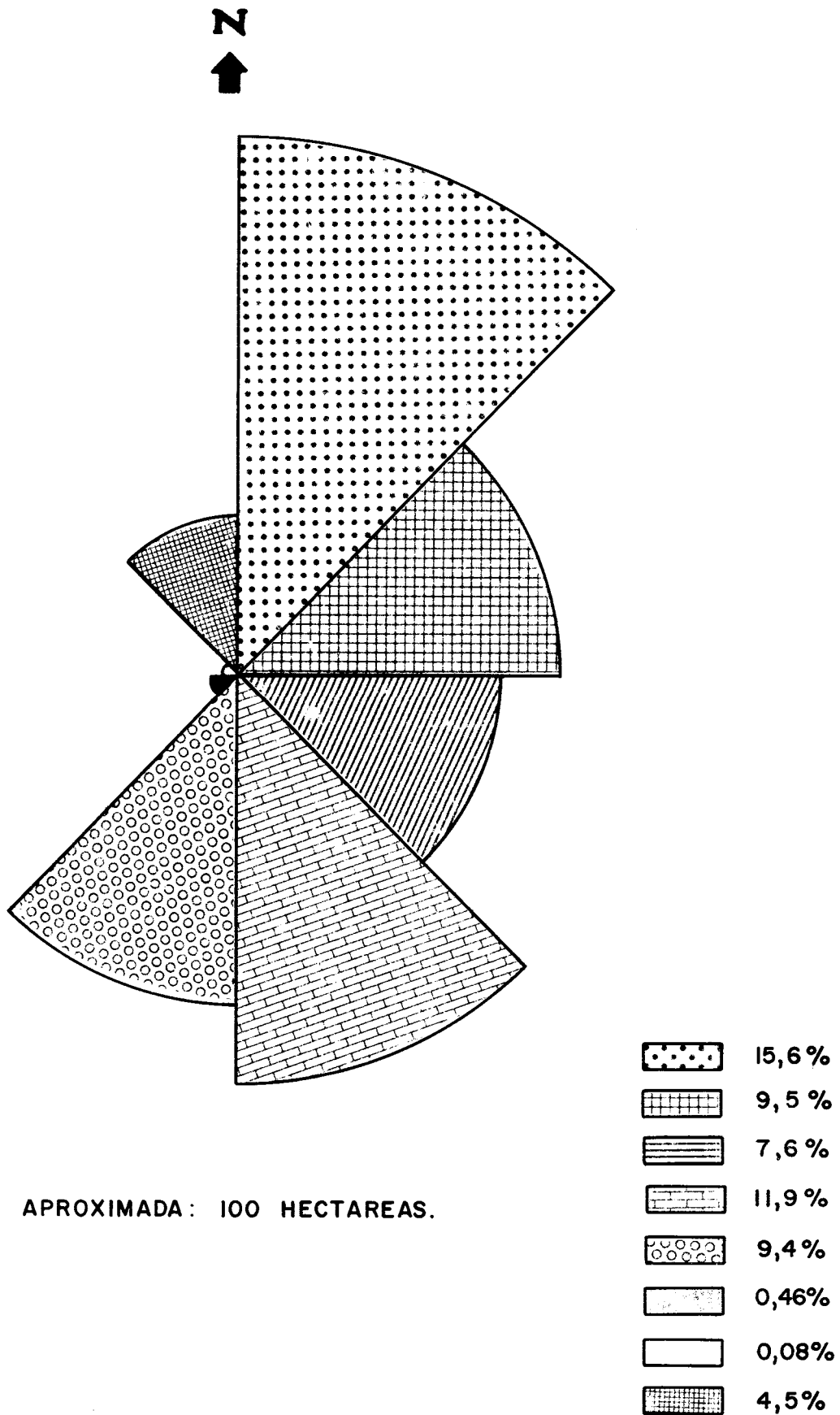
Con tal objeto hemos construído un mapa de pendientes, el cual además que estar caracterizado por los valores de buzamiento de cada porción del área, contiene en sí la información relativa a la orientación de estas pendientes o sea el rumbo mismo.

Se utilizaron cuatro rangos de buzamiento y ocho rangos de pendientes los mismos que están indicados en las figuras 3-a y 3-b en que se dan en forma de diagrama, los resultados cuantificados de este análisis para el área en estudio.

Ahora bien vamos a utilizar en forma original la idea mediante la cual hemos asociado al relieve de la roca un conjunto constituído por pequeños taludes los cuales, geoméricamente, no son otra cosa que planos cuya orientación en el espacio, rumbo y buzamiento, conocemos con suficiente precisión. Así mismo sabemos representar en proyección hemisférica este conjunto de planos mediante un simple diagrama de concentración de polos el cual nos permite construir un diagrama de contornos de polos de pendientes y la envolvente de los círculos meridianos correspondientes. Estos mismos se reportan en la figura 4.a.

Fig. 3a.

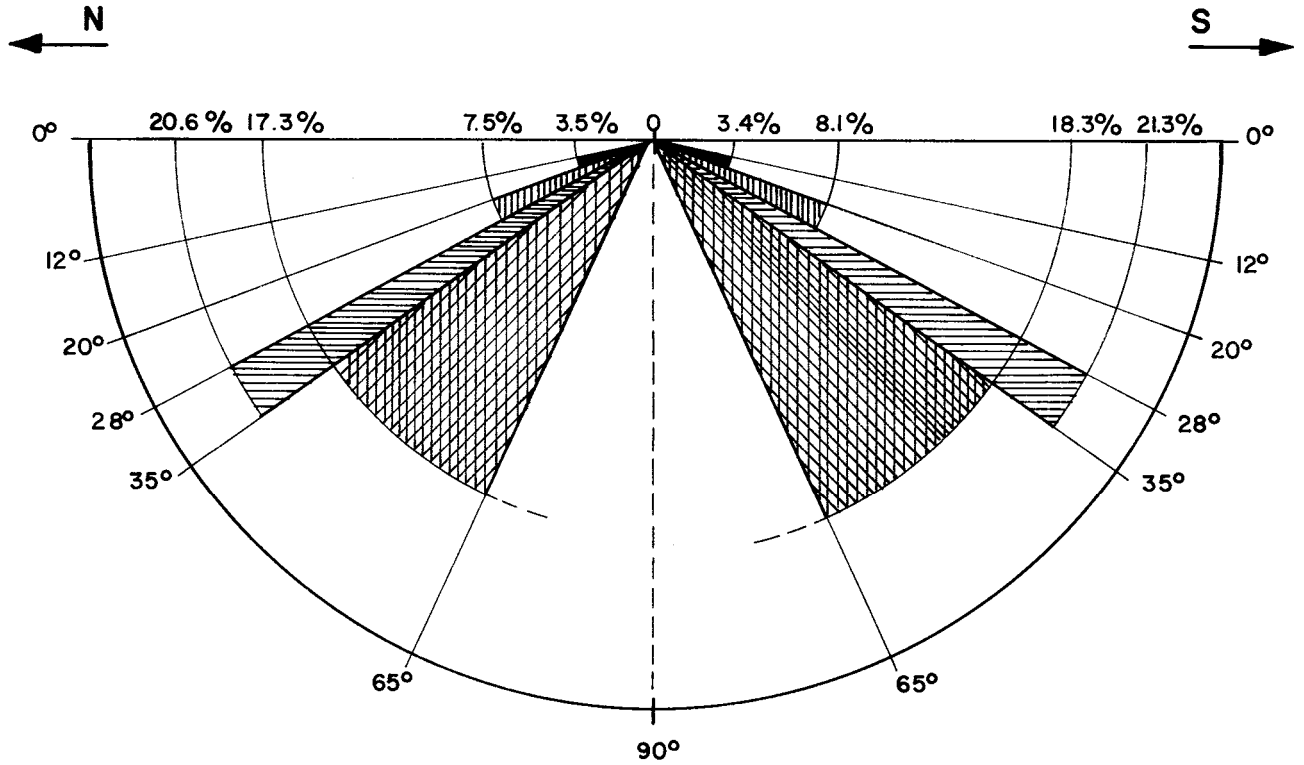
DISTRIBUCION DE ORIENTACION DE PENDIENTES



SUPERFICIE TOTAL APROXIMADA: 100 HECTAREAS.

Fig. 3b.

DISTRIBUCION DE BUZAMIENTOS DE PENDIENTES



- (12° - 20°) 6.9%
- ▨ (20° - 28°) 15.6%
- ▧ (28° - 35°) 41.9%
- ▩ (> 35°) 35.6%

A este punto nos estamos acercando a las fases conclusivas del análisis. Una vez que hemos definido los aspectos cualitativos y sobre todo cuantitativo de los factores involucrados en el problema, nos queda de poner a confrontación los mismos y deducir las conclusiones correspondientes relativas a la estabilidad geoestructural del área estudiada.

Recordando a las que hemos definido al comienzo de este artículo como las tres (a, b, c) características situaciones posibles frente al problema de la estabilidad de taludes en rocas, es evidente que nos interesa por un lado individualizar las condiciones cinemáticamente estables para ya no ocuparnos de ellas, y por el otro individualizar cuáles, entre las condiciones de inestabilidad cinemática, puedan revestir caracteres de inestabilidad mecánica y cuáles no.

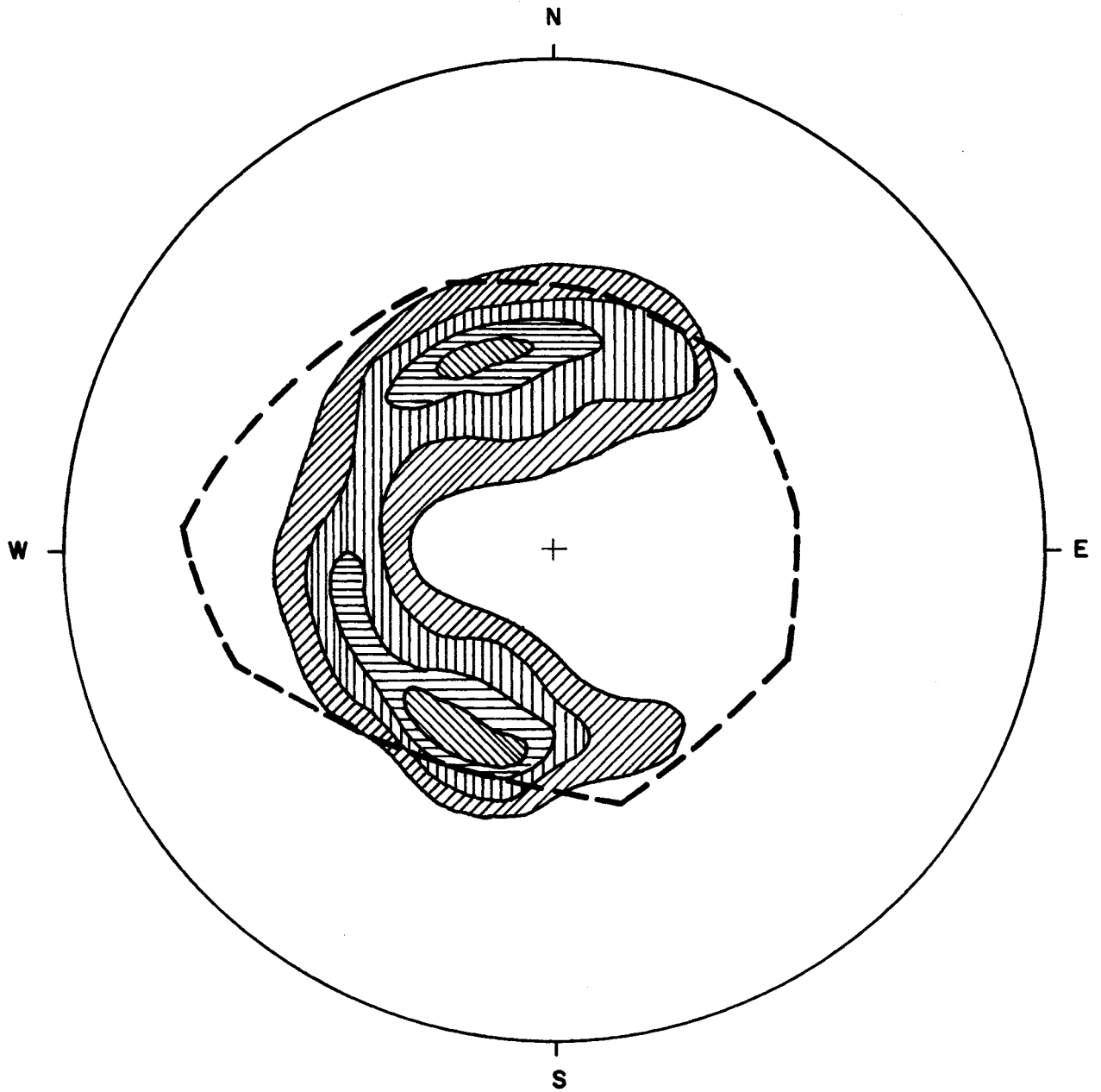
A pesar de que dejaremos en general al análisis de detalle los cálculos exactos del factor de seguridad para los taludes cinemáticamente inestables, es casi siempre posible en esta fase de zonificación general, tomar en cuenta un valor mínimo del parámetro friccional de resistencia al corte que seguramente se va a desarrollar a lo largo de las diferentes superficies de discontinuidad analizadas.





Esto nos permitirá reducir aún más los casos a ser analizados detenidamente en la sucesiva fase de estudio de detalle incluyendo o sea, en el grupo de los taludes seguramente estables (cinemáticamente), también aquellos que lo son (mecánicamente) con la contribución del sólo parámetro friccional de resistencia al corte evaluado por ahora con sentido conservador.

Las técnicas de las proyecciones hemisféricas en efecto nos brindan esta posibilidad en manera extremadamente simple; solamente con el trazar en el diagrama un círculo concéntrico con la red que demarca, desde la periferia hacia el centro, el valor del ángulo de fricción disponible. En la figura 4-b, tomando en cuenta lo que acabamos de men-

Fig. 4a.

DIAGRAMA DE CONTORNO DE POLOS DE PENDIENTES
ENVOLVENTE DE PLANOS CORRESPONDIENTES

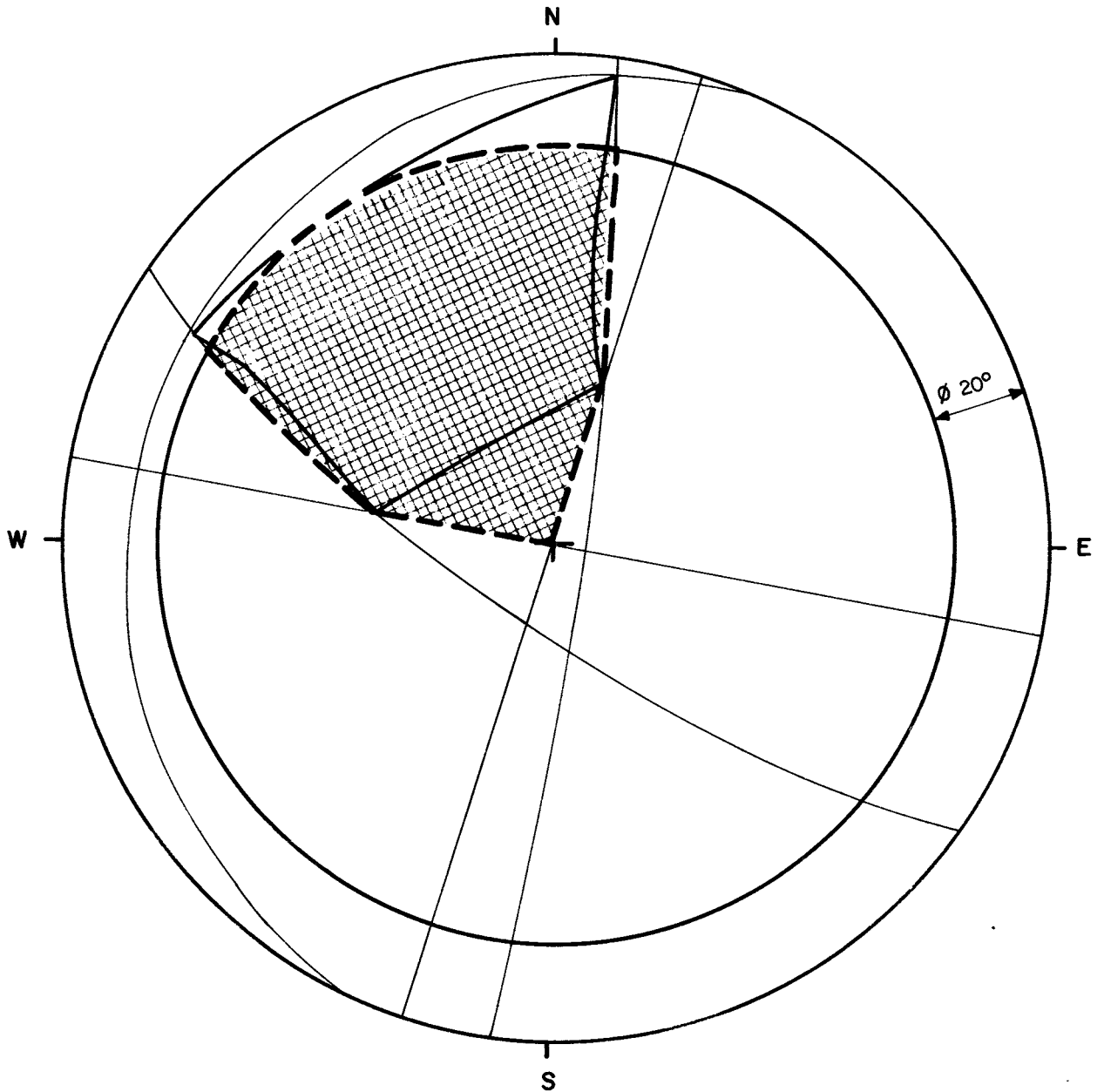


-  > 5%
-  4% - 5%
-  3% - 4%
-  2% - 3%

----- ENVOLVENTE

Fig. 4b.

ENVOLVENTE DE PLANOS DE PENDIENTES ESTABLES



AREA DE TALUDES POTENCIALMENTE INESTABLES



cionar, se delimita el área que no debe ser interceptada por los círculos meridianos de taludes estables con respecto a deslizamientos de cuñas.

Volviendo al ejemplo práctico que estamos analizando, el aspecto cualitativo del problema de la estabilidad resulta ya evidente y fácilmente deducible a la etapa de análisis en que hemos llegado con nuestra elaboración y representación de todo el conjunto de los datos recogidos: por un lado observamos que las estructuras de foliaciones buzcan hacia el N-W, las de diaclasas son pseudo verticales con rumbo NE-SW y las estructuras de cuñas potenciales también buzcan hacia el N-W; por el otro lado el relieve del área presenta pendientes que buzcan predominantemente hacia N-E y S-E y en todo caso sin buzcan hacia el W.

Sin embargo nuestros propósitos incluían también la cuantificación del problema y con tal objeto, sobre la base de los datos ya presentados, procedemos a realizar una simple y nueva elaboración de los mismos de la forma siguiente:

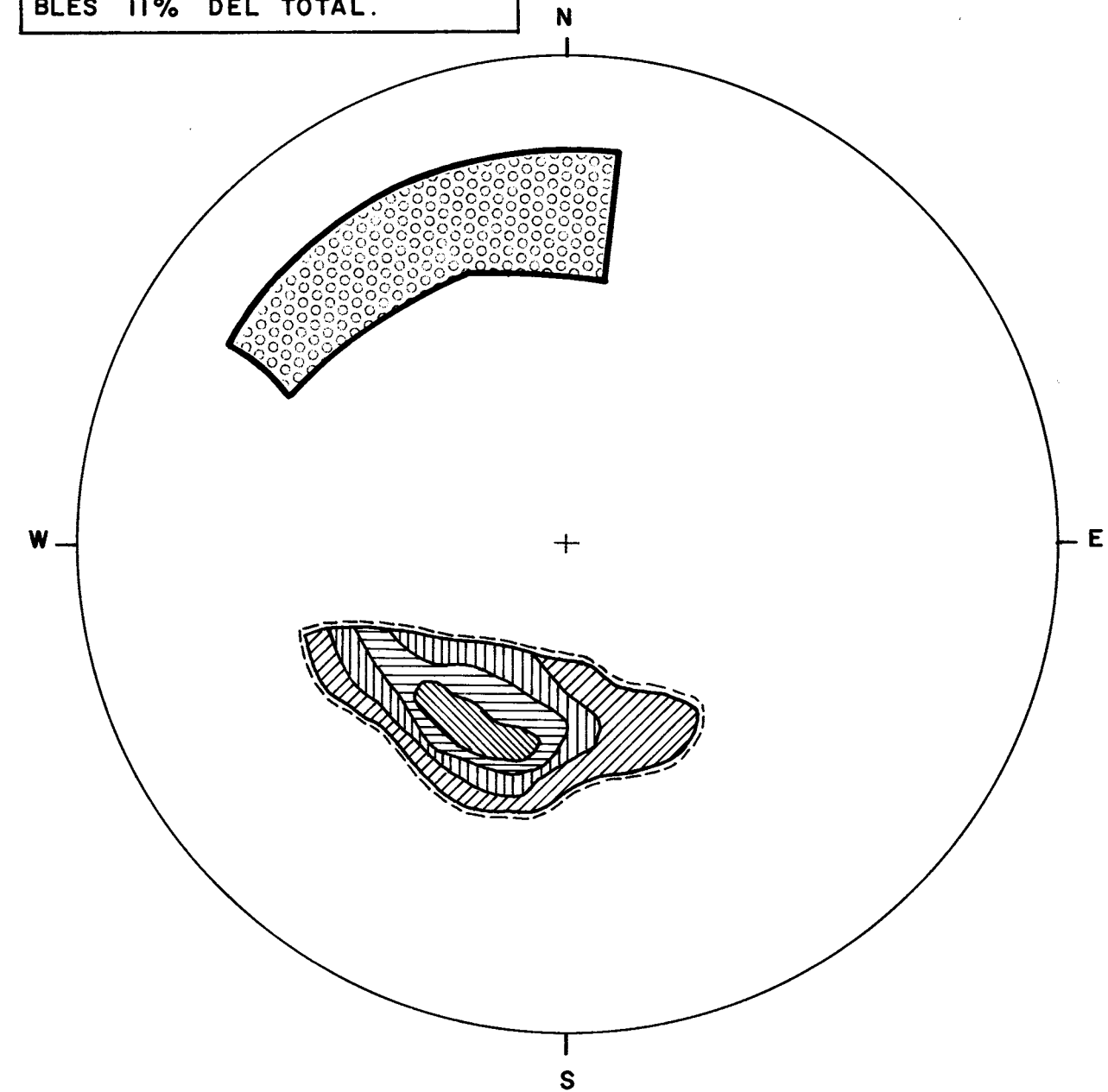
- Superponemos las representaciones reportadas en las figuras 4-a y 4-b.
- Demarcamos la figura delimitada por la envolvente de los planos de las pendientes y por el área de taludes potencialmente inestables.
- Delimitamos la porción del diagrama de contorno de polos de las pendientes correspondientes solamente a los polos cuyos círculos meridianos están comprendidos en la figura delimitada en el paso anterior. En otras palabras, entre todas las pendientes existentes, individualizamos los polos de aquellas cuyos círculos meridianos interceptan en todo su largo la mencionada figura del paso anterior.


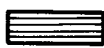


El resultado es la figura 5, de la observación y análisis de la cual


Fig. 5a.


DIAGRAMA DE CONTORNO DE POLOS DE PENDIENTES
POTENCIALMENTE INESTABLES

TALUDES PROBABLEMENTE INESTABLES 11% DEL TOTAL.



-  Δ 5%
-  4% - 5%
-  3% - 4%
-  2% - 3%

UBICACION DE LAS INTERSECCIONES FOLIACIONES - DIACLASAS POTENCIALMENTE INESTABLES (50% DEL TOTAL). 

CONTORNO DE POLOS DE PENDIENTES POTENCIALMENTE INESTABLES (22% DEL TOTAL) 

podemos observar que:

- a) el área de ubicación de las intersecciones foliaciones - diaclasas potencialmente inestables (por poseer ángulo de buzamiento menor que el de los taludes) representa cerca del 50% del total del área de ubicación de estas intersecciones.
- b) el área de contorno de polos de pendientes potencialmente inestables (por poseer ángulo de buzamiento mayor que el de las líneas de cuñas) representa cerca del 22% del total del área de contorno de polos de pendientes.
- c) en consecuencia de (a) y (b) los taludes probablemente inestables (para los cuales se verifican simultáneamente las dos condiciones desfavorables) serán cerca del 11% del total existente en toda el área estudiada (obviamente de solamente todos aquellos reportados en el diagrama de contorno de polos y correspondientes a inclinaciones superiores a los 20°.

A este punto debería repetirse el procedimiento de análisis, que hemos ilustrado con referencia a la estabilidad de las cuñas estructurales, también para analizar la estabilidad relativa a los dos sistemas de discontinuidades presentes considerados en forma separada, siguiendo exactamente todos los mismos pasos ya descritos.

En este caso particular estos otros análisis revisten una importancia secundaria debido a que por un lado las diaclasas son perpendiculares y por el otro las foliaciones dan lugar a situaciones de inestabilidad coincidentes con las ya individualizadas para las cuñas. En consecuencia, cualitativa y cuantitativamente lo indicado en el anterior punto (c), no va a sufrir variaciones importantes.

Una vez cuantificado el problema nos queda simplemente ubicarlo en el área estudiada para un mayor provecho aplicativo. Esta última opera-

ción de esta etapa de zonificación general relativa al problema de la estabilidad geométrico - estructural de los taludes, es inmediata considerando que poseemos ya todas las informaciones necesarias para ello. Los resultados están reportados en el plano de la figura 6 que hemos denominado "Mapa de análisis de estabilidad", resumen en sí de todos los principales aspectos involucrados en el problema y antes comentados.

A pesar de haberse podido realizar una zonificación más detallada, o sea individualizando un número grande de rangos posibles así como lo hubiera permitido la gran cantidad de información disponible, hemos preferido utilizar una zonificación de solamente tres rangos, en consideración del grado de precisión disponible y sobre todo en consideración de los fines prácticos de la utilización de este tipo de análisis. En otras palabras consideramos que una subdivisión más detallada en esta etapa y a esta escala del estudio resultaría quizás una pura especulación académica.

Hemos utilizado los siguientes rangos de zonificación:

a) Zonas de potencial inestabilidad geométrico - estructural; que comprenden taludes con rumbo sub-paralelo al de las estructuras de foliación y buzando con ángulo mayor que 28° en el mismo sentido de la foliación.

Así mismo estas zonas comprenden taludes con pendientes mayores que 28° en las caras de los cuales afloran líneas de intersección de discontinuidades con dirección pseudo-perpendicular al rumbo del talud; así como taludes con pendientes mayores que 35° en la cara de los cuales afloran líneas de intersección de discontinuidades con dirección no perpendicular al rumbo del talud.

b) Zonas de potencial inestabilidad geométrico - estructural reducida; comprenden taludes con pendientes mayores que 35° y en la cara de

los cuales eventualmente puedan aflorar líneas de intersección de discontinuidades con dirección pseudo-paralela al rumbo del talud. Así mismo están incluidos taludes con pendientes mayores que 28° en la cara de los cuales afloran discontinuidades con dirección no paralela al rumbo del talud.

- c) Zonas de estabilidad geométrico - estructural; que comprenden taludes con pendientes menores que 28° y taludes con pendientes superiores que están orientados en forma tal de no permitir condiciones cinemáticas de inestabilidad debido a la ubicación favorable de las estructuras geológicas.

En el mismo plano de la figura 6 hemos representado también los resultados del análisis de estabilidad detallado realizado como segunda etapa, mediante cálculo del factor de seguridad para todos aquellos taludes ubicados en las zonas críticas definidas en la primera etapa de zonificación general. No entra en nuestros propósitos describir estos análisis detallados, los mismos que por otro lado hemos realizado utilizando las metodologías ya rutinarias de los cálculos hemisféricos gráficos, tomando en cuenta para cada discontinuidad los respectivos parámetros de resistencia al corte (cohesión y fricción) desarrollables (PERRI, 1979). (*)

CONCLUSION

Hemos presentado, con aplicación a un caso real, una metodología para la zonificación del territorio con respecto al problema de la estabilidad geoestructural de las pendientes en un medio rocoso caracterizado por la existencia de superficies (discontinuidades) de menor resistencia y comportamiento francamente anisotropo.

La metodología basada sobre el uso de las técnicas de las proyecciones hemisféricas, se encuadró en la problemática más amplia de la zonifica

(*) Reproducido en anexo.

ción de riesgos geológicos de un territorio, respecto a la cual constituye solamente una de las facetas fundamentales.

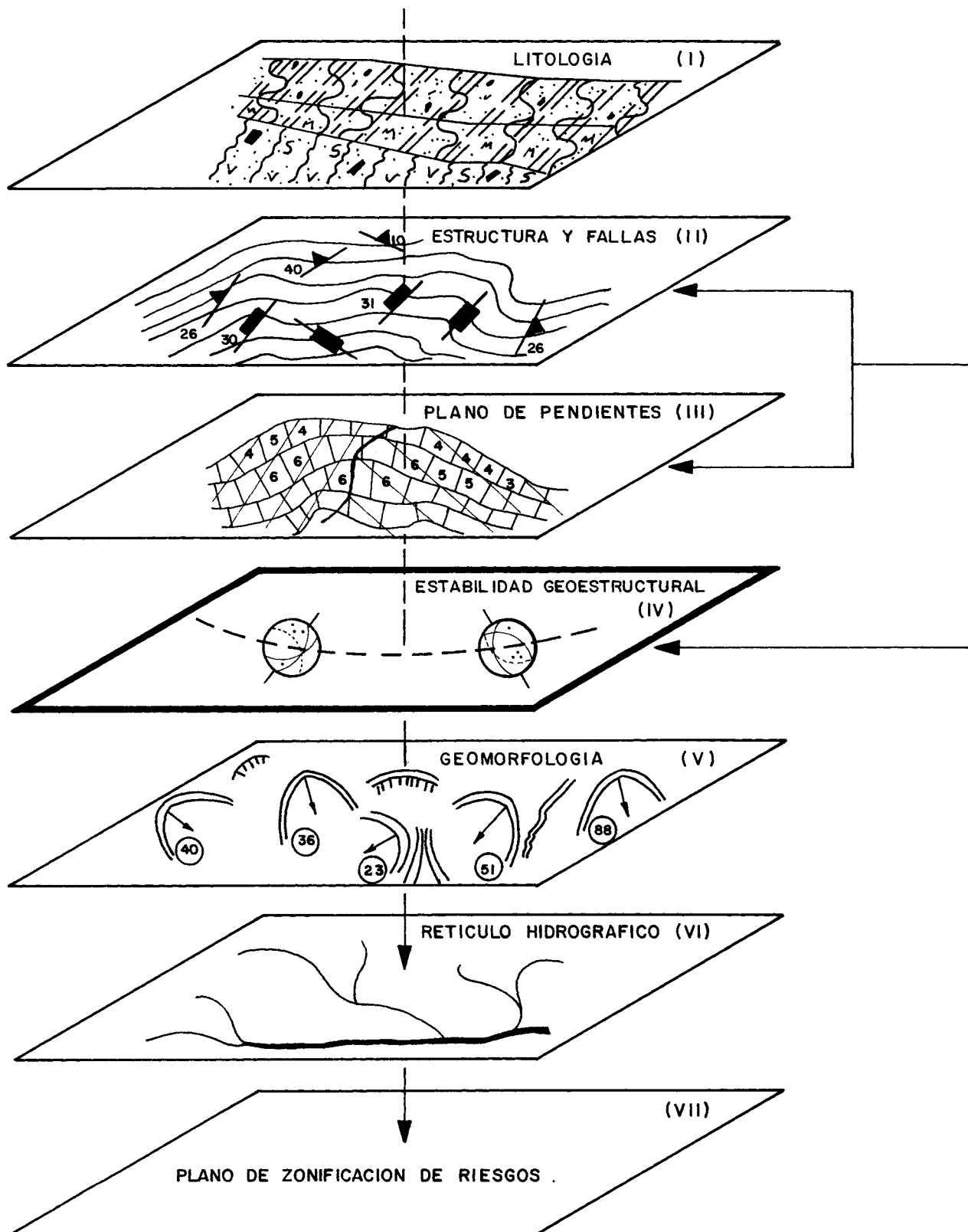
El resultado producido por el análisis de la estabilidad geoestructural es en efecto por sí mismo, insuficiente para una definición completa del problema.

Se trata en efecto de un análisis que hemos encontrado cómodo definir de tipo "frío", para subrayar que no toma en cuenta los factores geomorfológicos en toda su amplitud y principalmente en todos sus aspectos referentes a la degradación y alteración superficial y profunda, a las intervenciones naturales y artificiales, al control de las aguas, a la forestación, etc.

De hecho en nuestro trabajo completo de la zonificación de riesgos geológicos para el caso presentado, hemos analizado detalladamente los factores litológicos y esencialmente morfológicos del área produciendo específicamente un mapa de "zonificación morfológica" (el análisis de tipo "caliente") además de un mapa "Geológico - Estructural" y uno del "Retículo Hidrológico". Estos, sumados e integrados a los mapas de "Pendiente" y al ilustrado mapa del "Análisis de Estabilidad", finalmente representan el conjunto de aspectos que nos permiten elaborar el mapa de la "Zonificación de Riesgos Geológicos" que es el resultado de seado (ver figura 7).

Fig. 7

ANALISIS SECUENCIAL DE INFORMACION PARA LA OBTENCION
DEL PLANO DE ZONIFICACION DE RIESGOS GEOLOGICOS



BIBLIOGRAFIA

AGUERREVERE, S.E. y ZULOAGA, G. (1937) "Observaciones geológicas en la parte central de la cordillera de la costa", Bol. Geol. y Min., Caracas, 1(2-4): pp. 3 - 22.

GOODMAN, R. (1976) "Methods of geological engineering in discontinuous rocks", West Publishing Co., New York, t. pp. 472.

HOEK, E. y BRAY, J.W. (1974) "Rock slope engineering", Institution of mining and metallurgy, London, t. pp. 402.

PERRI, G. (1979) "La cohesión en el análisis estereográfico de estabilidad de taludes", Revista Latinoamericana de Geotecnia, Caracas, 5 (2): pp. 71 - 76.

A N E X O

LA COHESION EN EL ANALISIS ESTEREOGRAFICO
DE ESTABILIDAD DE TALUDES

POR: GIANFRANCO PERRI (*)

(*) Profesor de Mecánica de Rocas en la U.C.V.

**LA COHESION EN EL ANALISIS ESTEREOGRAFICO DE ESTABILIDAD DE
TALUDES.-**

por doctor Gianfranco PERRI (*)

(*) Ingeniero consultor. Profesor de Mecanica de Rocas,
Universidad Central de Venezuela.

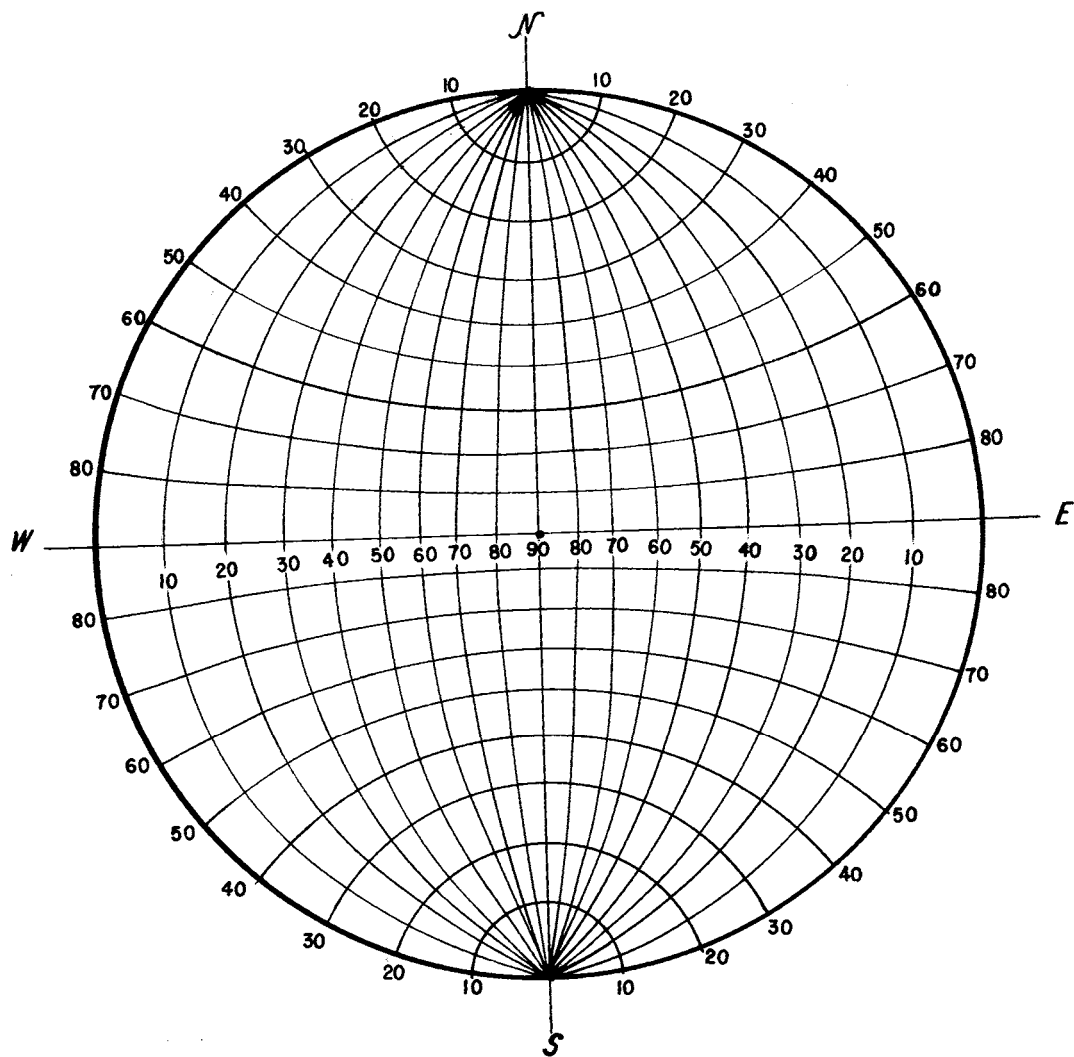
INTRODUCCION:

En las estructuras rocosas marcadamente anisotropas, caracterizadas por la presencia de discontinuidades estructurales bien definidas y distribuidas en forma de atribuir al problema de estabilidad del talud un caracter esencialmente tridimensional, es muy comun el empleo de las técnicas de la proyección estereográfica para el análisis y los cálculos de estabilidad.

La proyección estereográfica resulta en efecto un instrumento muy eficaz y simple para el estudio de las relaciones angulares entre planos y rectas en el espacio; y las discontinuidades geológicas que cortan a las masas rocosas y a los taludes respectivos, pueden ser consideradas como planos en el espacio mientras que las intersecciones entre las discontinuidades o entre estas y los taludes, son rectas en el espacio.

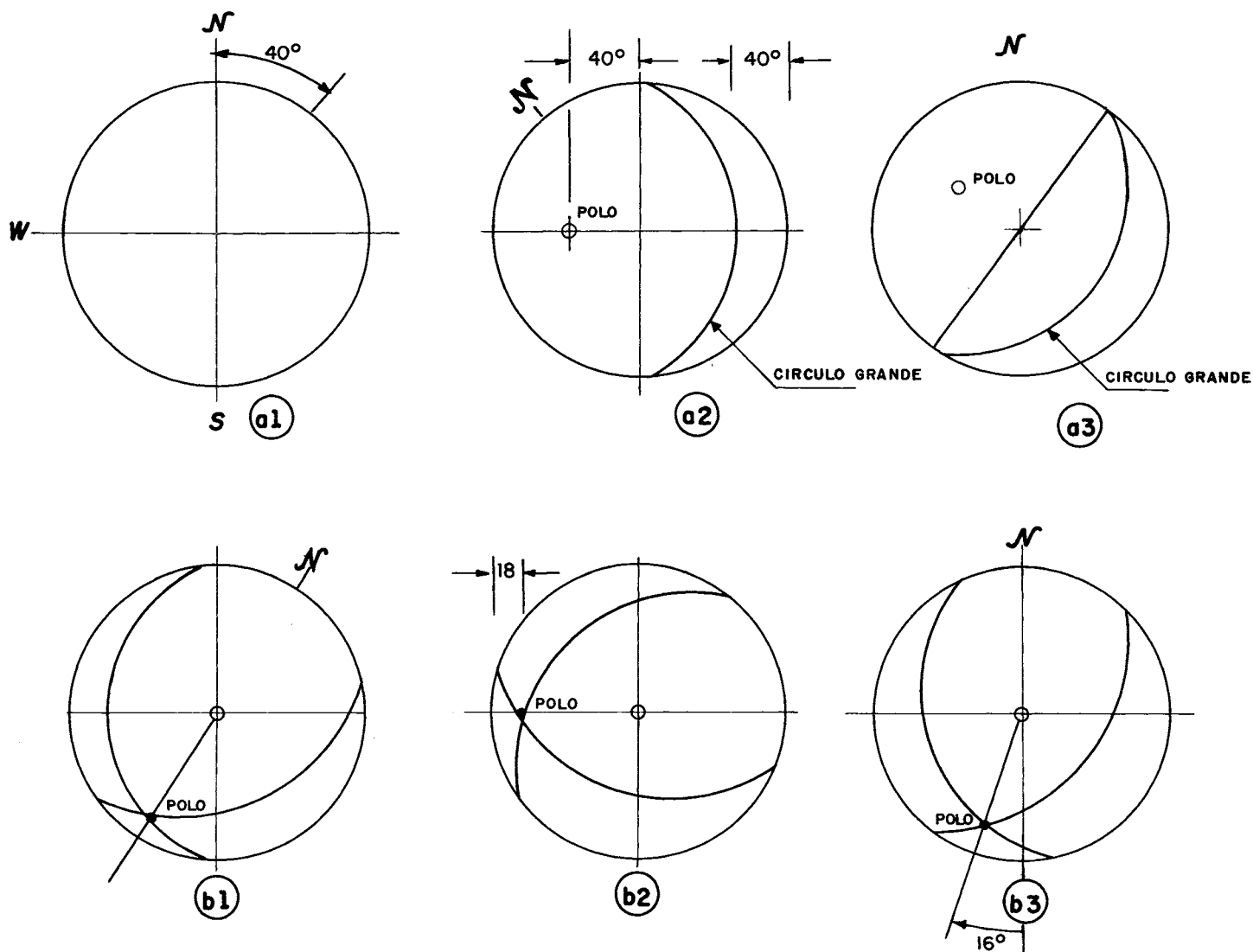
Entre las diferentes proyecciones estereográficas existentes, aquella de Wulf denominada "de igual ángulo" se ajusta muy bien para los fines del análisis de estabilidad de taludes en cuanto tiene como principal característica el hecho que en ella los ángulos entre planos y planos, planos y rectas, rectas y rectas, no están sujetas a ninguna deformación, o sea quedan iguales a los correspondientes reales. En el diagrama o retículo de Wulf (Fig. -1-); un plano puede ser representado por un círculo grande (determinado por la orientación del respectivo diámetro, su rumbo, y por la distancia diametral del círculo grande desde el borde del retículo, su inclinación) o por el correspondiente polo (diametralmente opuesto al círculo grande respectivo y a distancia complementaria de él) y una recta está representada por su polo que define su rumbo e inclinación, (Ver Fig. -2-). El análisis de estabilidad para planos, cuñas o bloques en general, de rocas perteneciendo a un talud, pasa por tres etapas fundamentales que en el orden son:

- a) Verificación de la existencia de potencial inestabilidad en base a las características geométricas de la estructura en objeto. Para el caso de un simple plano de deslizamiento, el ángulo de inclinación, aparente o verdadero de la superficie potencial de deslizamiento, debe ser inferior al ángulo de inclinación de talud. En otras palabras es necesario que la super-



Reticulo estereográfico "de igual angulo" de Wulff

FIGURA -1-



- (a) Ejemplificación de la construcción del círculo grande y del correspondiente polo relativos a un plano de rumbo $N 40^\circ E$ e inclinación 40° hacia S.
- (b) Ejemplificación de la construcción del polo de la recta intersección de dos planos que resulta poseer rumbo $S 16^\circ W$ e inclinación 18° hacia S.

ficie de deslizamiento aflore en la cara libre del talud. Como otro ejemplo, de igual manera, para la que se refiere a cuñas deslizantes a lo largo de la línea de intersección entre las dos discontinuidades constituyentes la cuña, la condición geométrica para que la inestabilidad ocurra, es que la misma línea aflore en la cara libre del talud, o sea que la inclinación de la intersección esté dirigida hacia el exterior del talud según un ángulo inferior a la correspondiente pendiente del mismo en una dada orientación.

- b) Para las situaciones de potencial inestabilidad geométrica según explicado en "a", cuantificación de las resistencias al deslizamiento y cálculo del factor de seguridad. Este punto será tratado mas extensamente en los párrafos siguientes.
- e) Para las situaciones correspondientes a factores de seguridad menores o iguales a la unidad determinados según la etapa "b", verificación y/o estimación de la existencia o no de los suficientes grados de libertad que permitan transformar la situación de potencial inestabilidad en "real inestabilidad".

LA RESISTENCIA AL CORTE EN LA PROYECCION ESTEREOGRAFICA:

Una característica y al mismo tiempo limitación de los métodos de proyección estereográfica en los análisis de estabilidad, esta dada por considerarse para la resistencia, la contribución de la sola fricción a lo largo de las superficies de potencial deslizamiento, despreciando o sea la contribución del segundo parámetro de resistencia al corte que es la cohesión.

En efecto para una roca con discontinuidades representadas por diaclasas, juntas de estratificación fallas y fracturas en general, abiertas en una roca de buenas características de resistencia de fricción y que no esten rellenas por materiales de bajas calidades mecánicas, como generalmente ocurre en aquellos taludes rocosos en donde se aplica el método de la proyección estereográfica, siempre la contribución de la cohesión cuando no es realmente nula, resulta despreciable por respecto a aquella de la fricción.

De esta forma los calculos de estabilidad mediante proyección estereográfica se simplificanmucho debido a que el problema queda en terminos de relaciones. simplemente geométricas entre los elementos estructurales de la roca, el plano del talud y el ángulo o los ángulos de fricción existentes entre las superficies de potencial deslizamiento; en fin no entran en juego el peso específico de la roca y la altura del talud o del bloque en potencial deslizamiento.

Por otro lado no son raros en la práctica casos donde la naturaleza de la masa rocosa constituyente el talud es tal que actuando según las hipótesis de arriba, o sea despreciando la cohesión, se cae en errores bastante grande de subestimación de la resistencia al corte desarrollable y entonces en un demasiado conservador diseño de la estructura.

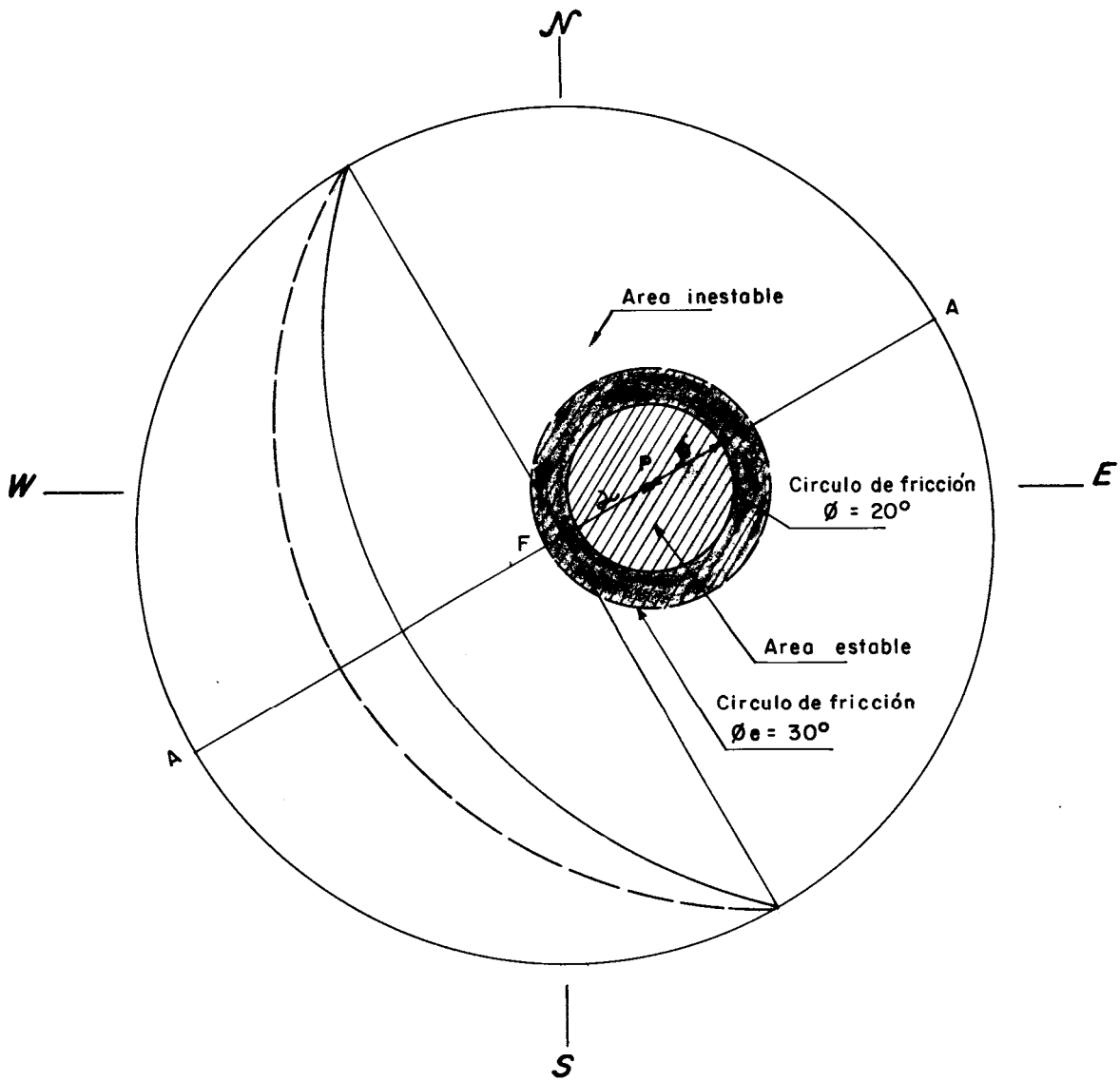
Se trata de aquellas rocas como por ejemplo algunos esquistos micáceos y/o filitas mas o menos meteorizadas, que tanto comunes son en la región de Caracas y en las cuales los valores del ángulo de fricción desarrollable a lo largo de los planos de sedimentación o de foliación no son muy altos sino que estan comprendidos entre 5 y 20.

Para estas rocas, los cálculos demuestran en muchas cosas la considerable influencia de la cohesión en la determinación del valor del factor de seguridad y es para estos casos que debe renunciarse al interesante auxilio de los métodos clásicos que emplean proyección estereográfica en los cálculos de estabilidad, si no se toma en cuenta de alguna forma el efecto de la cohesión.

Ahora bien el fin de este trabajo es justamente aquel de presentar un método suficientemente simple que permita tomar en cuenta la existencia de la cohesión en los análisis de estabilidad sin alterar en lo minimo la metodología normalmente usada para el calculo del factor de seguridad en la proyección estereográfica.

CALCULO DEL FACTOR DE SEGURIDAD:

Conviene aquí comentar brevemente el método de cálculo del factor de seguridad normalmente usado en la proyección estereográfica en presencia de la sola fricción a lo largo de las discontinuidades. Se hace el ejemplo simple del potencial deslizamiento a lo largo de un solo plano en donde se ha verificado la existencia de las condiciones geométricas de potencialidad del deslizamiento. Por ejemplo; plano de talud con inclinación $i = 45^\circ$; discontinuidad con el mismo rumbo e inclinación $\beta = 25^\circ < i$ (Ver Fig. -3-). El paso siguiente a la etapa "a" es trazar sobre el retículo, alrededor del polo "P" del plano de discontinuidad, el círculo de fricción relativo al ángulo de fricción ($\phi = 20^\circ$) existente a lo largo de la superficie de discontinuidad; dicho círculo del cual P no es necesariamente el centro, es la proyección estereográfica sobre el retículo de Wulf del cono de fricción relativo al plano de la discontinuidad y al ángulo de fricción correspondiente. Ahora bien, el círculo de fricción delimita en el retículo de Wulf dos áreas una interna a él denominada "área estable" y la otra externa a él denominada "área inestable"; cuando el polo de la fuerza resultante deslizante (generalmente el peso del volumen potencialmente deslizable) cae internamente al círculo de fricción hay estabilidad, cuando cae fuera hay inestabilidad; el factor de seguridad está dado por:



- Plano del talud: rumbo N 30° W, inclinación 45° hacia W
- - - Plano de discontinuidad: rumbo N 30° W, inclinación 25° hacia W
- .P Polo del plano de discontinuidad
- .F Polo de la fuerza resultante deslizando.

FIGURA - 3 -

$$FS = \frac{\text{Tang } \phi}{\text{Tang } \alpha} = \frac{\text{Tang } 20}{\text{Tang } 25} = 0.78$$

siendo α la distancia angular entre el polo P y el polo de la resultante de las fuerzas deslizantes (F en el ejemplo de la figura 3) leído sobre el círculo grande pasante por P y F (en el ejemplo, el diámetro A-A).

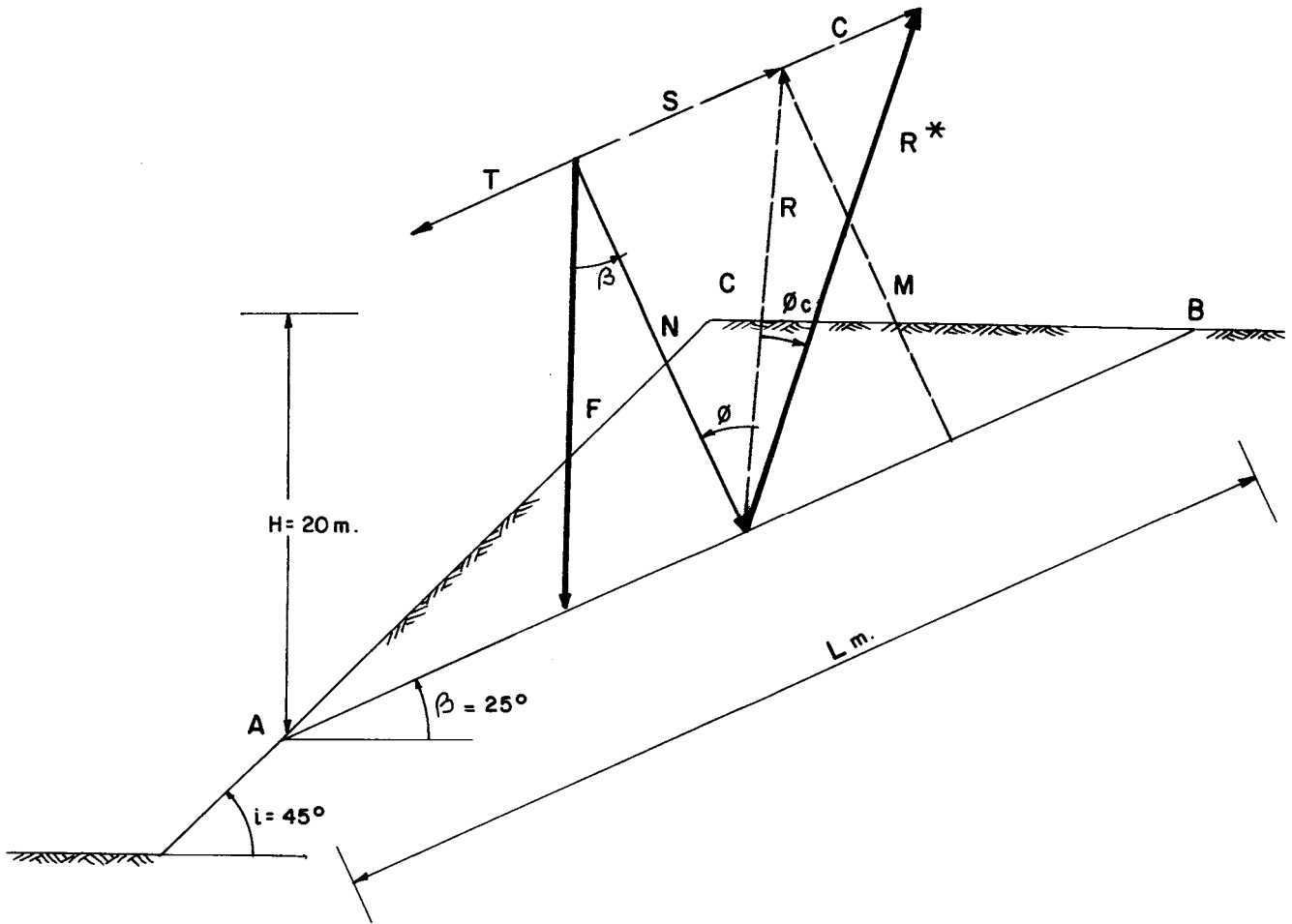
En caso mas general, el polo F no necesariamente coincide con el centro del reticulo y así mismo la delimitación del reticulo en un area estable y una inestable, no necesariamente esta dada por un solo círculo de fricción sino por la combinación de mas de ellos (por ejemplo dos en el caso de deslizamiento de cuñas sobre dos planos).

TOMANDO EN CUENTA EL EFECTO DE LA COHESION:

En la Figura 4, se esquematiza el problema de estabilidad de un talud a lo largo de un plano de discontinuidad que podría ser el mismo del ejemplo anterior si la sección representada es la N 60° E.

La fuerza activa sobre el plano de discontinuidad AB es el peso F del volumen en potencial inestabilidad ABC, con dirección vertical y con sus dos componentes $N = F \cos \beta$, perpendicular a AB y $T = F \sin \beta$, paralela a AB; la fuerza resistente es R inclinada de ϕ respecto a la vertical de AB, siendo ϕ el ángulo de fricción entre las caras de la discontinuidad y con sus dos componentes $M = R \cos \phi$ paralela igual y contraria a N y $S = R \sin \phi$ paralela y contraria a T.

PERFIL N 60° E



Representación gráfica de las fuerzas y ángulos en juego para la determinación del factor de seguridad en el ejemplo considerado.

Ahora bien la condición de equilibrio limite está dada por $S = T$ ó $\phi = \beta$, ocurriendo la inestabilidad por $S < T$ ó $\phi < \beta$. Sobre el reticulo estereográfico el problema ya se había visualizado trazando el círculo de fricción alrededor del polo P de AB y el polo de la fuerza activa F que en este caso coincide con el centro del reticulo; efectivamente la condición de equilibrio limite ($\phi = \beta$) es aquella que ve el polo de F ubicado exactamente sobre el círculo de fricción, mientras que, como ya se comentó, la condición de inestabilidad ($\phi < \beta$) es aquella correspondiente al ejemplo que ve el polo F afuera del círculo de fricción.

Se considere ahora la existencia de cohesión a lo largo de AB (por ejemplo $c = 2 \text{ ton/m}^2$); la fuerza resistente de cohesión paralela a AB y con sentido igual a S vale $C = cxL$, L es el largo de AB. Resulta una fuerza resistente global de fricción y cohesión R^* que resulta inclinada de un ángulo que se llamará ϕ_c por respecto a la fuerza R, (reacción debida a la sola fricción).

Ahora bien resulta facil demostrar la existencia de la siguiente relación trigonométrica entre las variables involucradas:

$$\frac{4x \cdot c/x \cdot \cos \phi}{\gamma H_x \cdot \sin 2\beta_x (\cotg \beta - \cotg i)} = \frac{\sin \phi_c}{\cos (\phi + \phi_c)}$$

en donde la unica variable aún no definida es γ que es el

peso específico del material contenido en el volumen ABC en potencial deslizamiento. Para agilizar la fórmula puede escribirse:

$$K c = \frac{\text{sen } \phi c}{\cos (\phi + \phi_e)} \quad (I)$$

siendo K una característica del problema en estudio y que

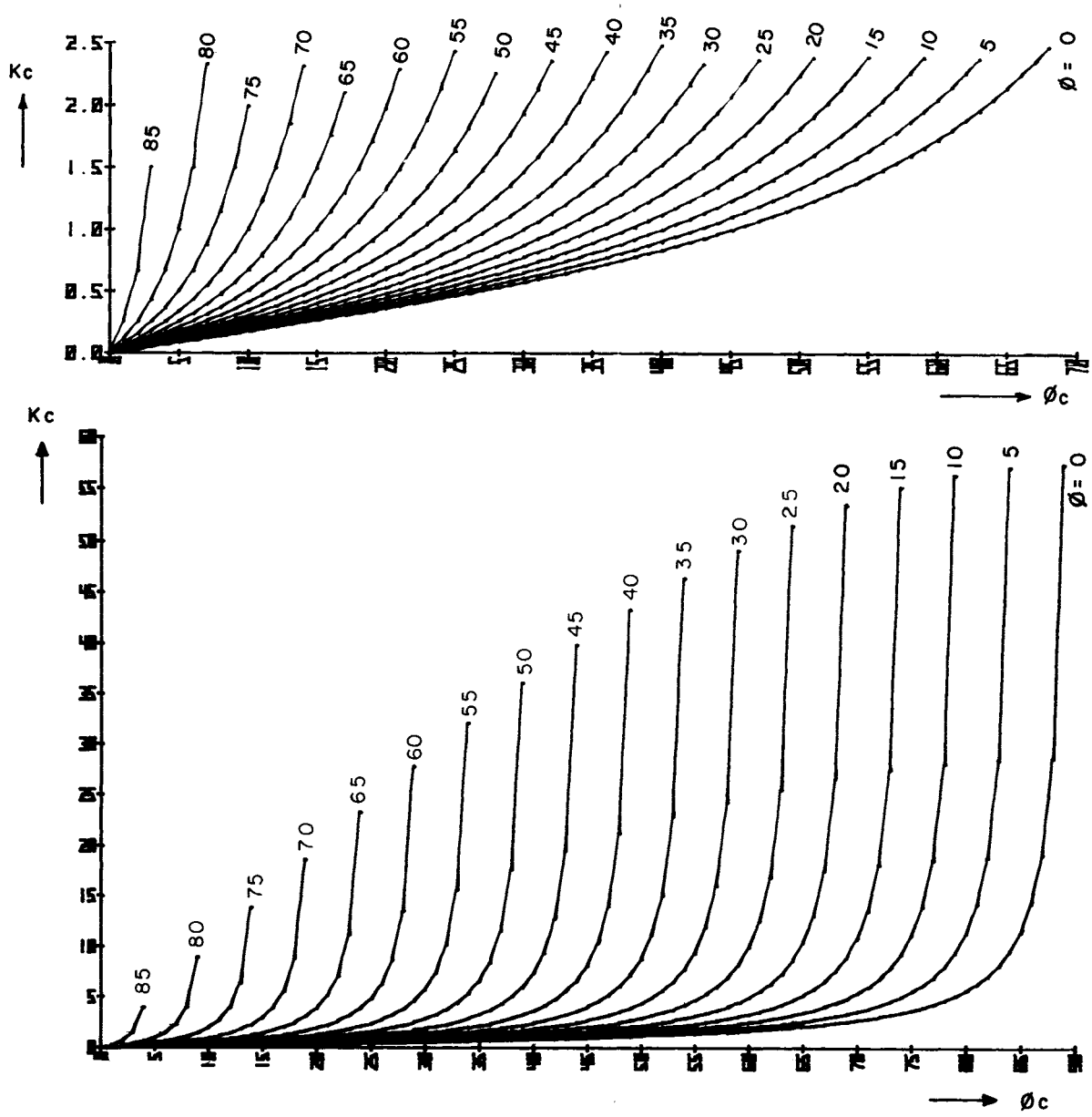
$$\text{vale } K = \frac{4x \cos \phi}{\gamma H x \text{ sen } 2 \beta x (\cotg \beta - \cotg i)}$$

Finalmente el último paso ha sido aquel de graficar la (I) resultando el diagrama representado en la figura 5.

En este diagrama se entra por un lado con el valor Kc , producto de la cohesión y del parámetro K, que a su vez es función de la geometría del problema en estudio, del ángulo de fricción ϕ y del peso específico ; por el otro lado se esboza la curva en función del ángulo de fricción ϕ y sobre el eje horizontal se obtiene directamente el valor de ϕ_e que puede bien definirse como "ángulo de fricción equivalente al efecto de la cohesión"; Finalmente puede definirse un ángulo de fricción equivalente ($\phi_e = \phi + \phi_e$) del efecto combinado de cohesión y fricción real y de esta forma tratar el problema del análisis de estabilidad exactamente en los mismos términos del caso de existencia de solo fricción con la simple sustitución del valor real de ϕ con el valor ϕ_e .

Para completar el ejemplo anterior: (para $\gamma = 2 \text{ ton/m}^3$ y $H=20$)

$$K = 0.108 \quad \text{y} \quad Kc = 0.216$$



Angulo de fricción (ϕ_c) equivalente al efecto de la cohesión (c) para diferentes valores del angulo de fricción real (ϕ) y del paramento (k) caracteristico de la geometría del talud y del peso específico del volumen deslizable.

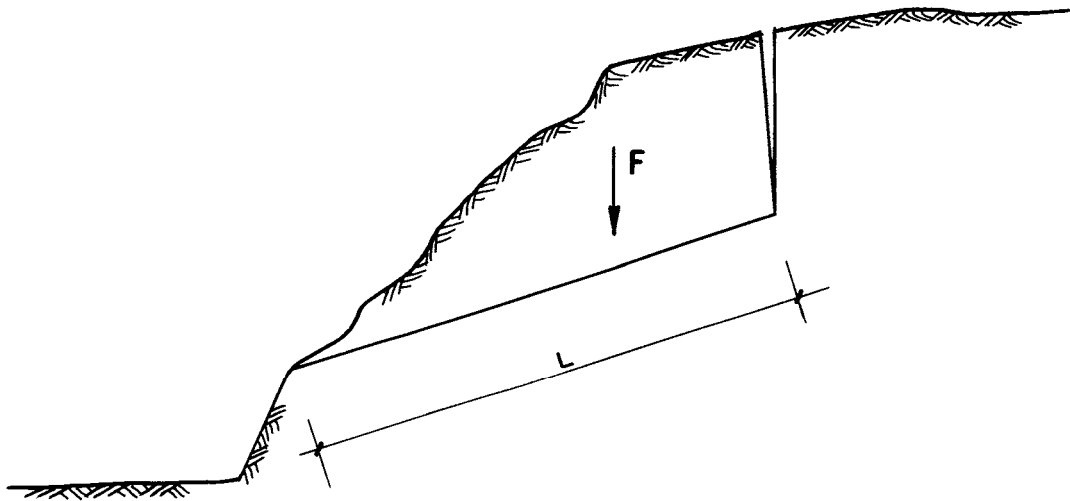
entonces en correspondencia de la curva $\phi = 20^\circ$ el diagrama de $\phi_c = 10^\circ$ o sea $\phi_c = 30^\circ$. Se traza el marco de un nuevo círculo de fricción correspondiente al valor de ϕ_c y se ve sobre el retículo que la situación del talud es ahora de estabilidad siendo que el polo F, que no ha variado su posición, cae adentro del nuevo círculo de fricción.

Finalmente puede calcularse el nuevo valor del factor de seguridad FS = $\frac{\text{Tang } \phi_c}{\text{Tang } \alpha} = \frac{\text{Tang } 30}{\text{Tang } 25} = 1.24$

En aquellos casos de geometría del talud no tan regular (por ejemplo ver Figura 6) el diagrama de Figura 5 puede aun usarse siendo en el caso general $K = \frac{L \cos \phi}{F \cos B}$ en donde L es el largo del plano en que se desarrolla la cohesión y F el peso del volumen potencialmente inestable.

En conclusión se hacen unas nuevas consideraciones a cerca de lo que muestra el diagrama de la Figura 5:

- Para iguales condiciones geométricas e igual cohesión, el valor del "ángulo de fricción correspondiente al efecto de la cohesión", aumenta con la disminución del ángulo de fricción real ; esto es decir que cuanto mas bajo es el ángulo de fricción real tanto mas importancia cuantitativa toma la contribución de la cohesión.



Ejemplo de talud con geometría irregular

- El ángulo ϕ_c aumenta al aumentar el producto K_c y para valores de este, mayores que 5, el valor de ϕ_c queda prácticamente igual a su valor máximo correspondiente a cada valor del ángulo ϕ .
- desde un punto de vista práctico los valores numéricos de K_c están limitados a un rango de 0 a pocas unidades.

Caracas, septiembre de 1978

Sanfiorenzo