

METODOLOGIA PARA ANALIZAR LA ESTABILIDAD DE AREAS EN PENDIENTES
ROCOSAS CON EJEMPLOS DE APLICACION A LAS COLINAS DE CARACAS.

Por: Ing. Gianfranco Perri

RESUMEN

A través de dos ejemplos de aplicación, correspondientes a dos sectores de las Colinas de Caracas, se presenta una metodología de análisis de estabilidad para taludes en rocas que bien puede aplicarse, con las debidas limitaciones, al estudio de los macizos rocosos meteorizados del área metropolitana.

Se trata de una metodología basada sobre el uso de las técnicas de las prospecciones hemisféricas y especialmente eficaz a nivel de anteproyecto cuando se trata de zonificar el territorio sobre la base de la estabilidad geotécnica de los taludes.

Concretamente los ejemplos tratados son: Parcela N° 48 de la Urbanización La Esmeralda y Urbanización Colinas de Valle Arriba.

INTRODUCCION

En este trabajo se presenta una metodología elaborada para realizar el análisis de la estabilidad de taludes naturales y artificiales de corte en áreas rocosas, especialmente eficaz para los efectos de un estudio a escala mediana (de 1:500 a 1:5.000) de zonificación del territorio y cuyos campos de posibles aplicaciones son numerosos: urbanizaciones, vialidad, etc.

Se trata de una ampliación de aquellos conceptos y metodologías co-

ocidas como técnicas de las proyecciones hemisféricas ya ampliamente ilustradas por numerosísimos autores; por ejemplo: Hoek y Bray (1974), Goodman (1976), Salcedo (1978).

Uno de los aspectos que se quiere destacar en este trabajo es la posibilidad de utilizar la metodología de las proyecciones hemisféricas para evaluar y analizar problemas de estabilidad de taludes en rocas metamórficas meteorizadas, tales como las que constituyen las colinas alrededor de Caracas.

Es indudable que el método que se describirá a continuación, encuentra su campo natural de aplicación a macizos rocosos en los cuales cualquier tipo de movimiento o rotura esté controlado por la resistencia al esfuerzo cortante, que a lo largo de sus discontinuidades estructurales es supuesta mucho menor que la resistencia de la roca misma.

Por consecuencia, es natural y justo que surjan dudas sobre su efectividad y/o legitimidad de aplicación en ambientes rocosos meteorizados en los cuales las rocas van perdiendo sus características originales hasta un punto donde su comportamiento geomecánico se hace prácticamente isótropo e independiente de la orientación de las discontinuidades y la rotura resulta controlada directamente por los parámetros de resistencia al corte de la roca, produciéndose superficies de deslizamientos típicas de los taludes en suelo.

Sin embargo, las rocas metamórficas que constituyen las colinas que bordean el valle de Caracas, presentan variados grados de meteorización según su ubicación, encontrándose situaciones en que su comportamiento se asemeja más al de una roca (comportamiento anisótropo) o al de un suelo (comportamiento isótropo). Para los casos intermedios, donde existan dudas sobre su verdadero comportamiento, es recomendable atacar el problema bajo los dos criterios, es decir, analizando el talud primeramente como si fuera isótropo y

luego asumiendo que la orientación de las discontinuidades controle su comportamiento. En base a los resultados de ambas metodologías, el juicio profesional y la experiencia previa en los materiales, conducirán a optimizar la decisión, y siempre el análisis geoes estructural contribuirá en aclarar, si no definir, la situación.

En efecto, es bueno destacar que si bien es cierto que una roca muy meteorizada a descompuesta se comportará en forma más semejante a un suelo, existen muchos factores geológicos que deben ponderarse para conocer sus efectos en la estabilidad y entre aquellos seguramente gran relevancia reviste el aspecto geométrico-estructural.

LA ESTABILIDAD DE LOS TALUDES EN ROCAS Y LAS PROYECCIONES HEMISFÉRICAS.

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 fricción) que pueden desarrollarse a lo largo de las diferentes superficies de menor resistencia o planos de discontinuidad geológico-estructurales;
- 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.
- b) Condiciones de inestabilidad cinemática pero 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. Cuando esta resistencia es de magnitud superior a las fuerzas estabilizantes, el talud será 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.

Como ya se mencionó 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 es el caso de dedicar páginas a la explicación de estas técnicas básicas enviando a los lectores que así lo deseen, a la abundante bibliografía disponible y solamente en mínima parte reportada en las referencias citadas.

Solo cabe comentar que todas las consideraciones ilustradas sobre la problemática general del análisis de estabilidad encuentran, en las técnicas de las proyecciones hemisféricas, un soporte ideal para su representación, análisis, estudio y cuantificación. En efecto, estas técnicas representan un instrumento extremadamente cómodo y simple para la representación en 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 (Perri, 1979); finalmente las metodologías 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 PROPUESTA PARA EL ANALISIS

Ya se han mencionado los factores que juegan un papel fundamental en la problemática de la estabilidad de taludes rocosos. El segundo de estos factores se ha 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, consecuencia de la topografía del área: rumbos y buzamientos que definen las diferentes pendientes integrantes del relieve.

Los datos de entrada para el análisis son por lo tanto inicialmente 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, y finalmente se introducirán también los aspectos mecánicos relativos a la resistencia al corte disponible.

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

Para ilustrar la metodología en cuestión se presentan dos ejemplos relativos a estudios de estabilidad llevados a cabo en dos áreas de desarrollo residencial, ubicadas en las colinas del sureste del valle de la ciudad de Caracas.

El primer caso hace referencia a un área limitada, concretamente una parcela de aproximadamente 3 hectáreas de superficie para la cual el análisis se llevó a cabo a escala 1:400; mientras que el segundo ejemplo se refiere a un área más extensa, con aproximadamente 100 hectáreas de superficie, para la cual el análisis se llevó a cabo a escala 1:2.000.

EJEMPLO N° 1

En la Fig. 1, se reportan sobre la base topográfica de la parcela, que era en parte modificada y en parte natural, los resultados del reconocimiento geológico de superficie el cual, debido a la naturaleza geolitológica de las rocas existentes, comprendió un sistemático levantamiento geoestructural, concentrado en las zonas más directamente interesadas por la eventual existencia de potenciales condiciones de inestabilidad (principalmente el talud suroeste).

Las rocas constituyentes del subsuelo del área en estudio fueron identificadas como metamórficas, esencialmente filitas sericíticas y secundariamente esquistos micáceos, pertenecientes a la denominada Formación Las Brisas del Grupo Caracas.

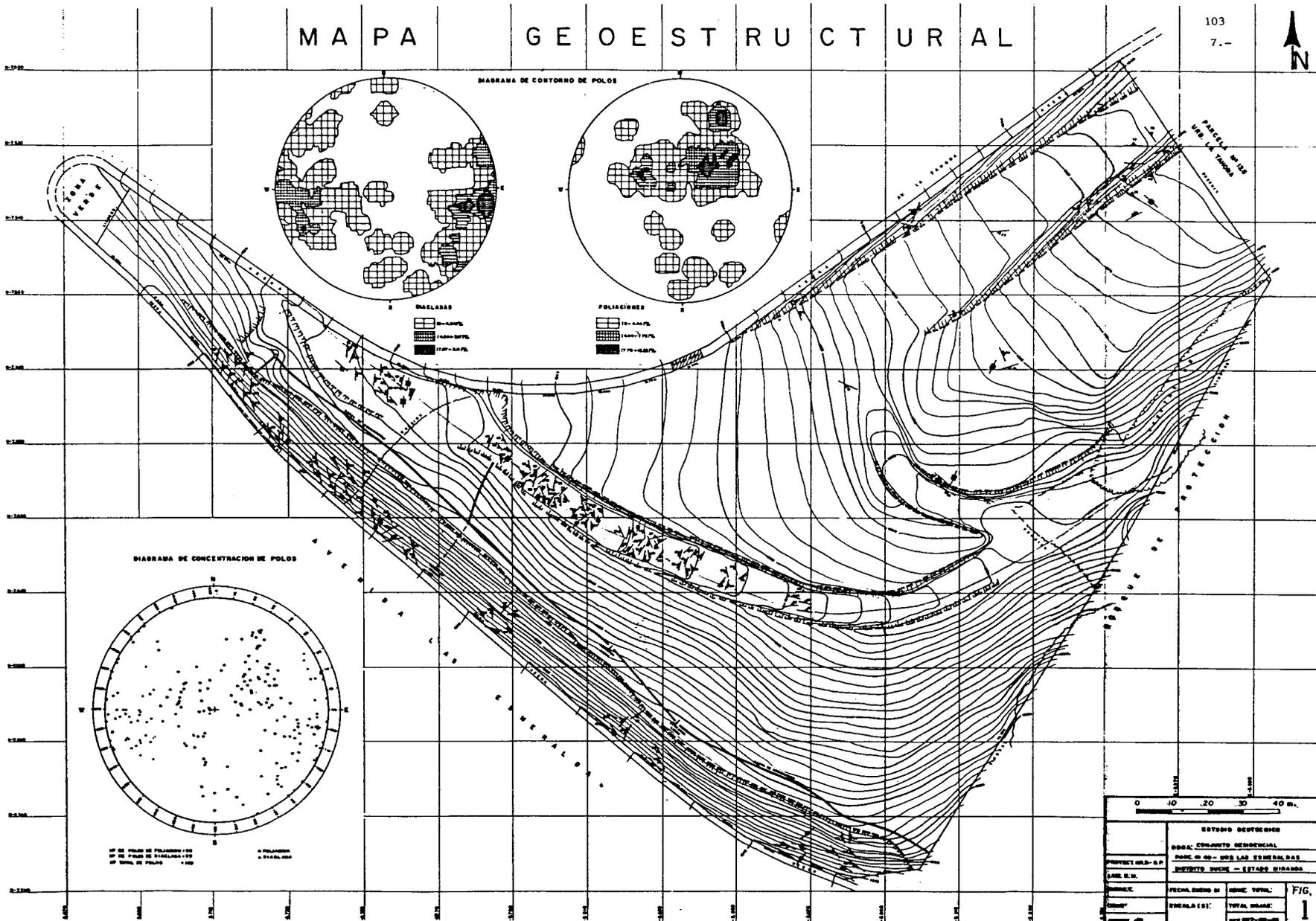
Los resultados del levantamiento estructural sistemático llevado a

M A P A

G E O E S T R U C T U R A L

103

7.-



103 7.-

cabo, se resumen en los detalles de la misma Fig. 1 en los que se reportan gráficamente los resultados de la elaboración estadística de los datos, realizada mediante procedimiento automático por computador.

A este respecto puede observarse que la foliación presentó un patrón de orientación principal con rumbo noroeste-sureste y buzamiento $(20 - 60)^\circ$ hacia el suroeste.

Las diaclasas también se presentaron en patrón de orientación definido con el rumbo norte-sur y buzamiento sub-vertical $(60 - 90)^\circ$ preferentemente hacia el oeste.

Cabe sin embargo señalar que en los dos casos, no se trata de patrones absolutos, sino predominantes y representativos para los fines de una evaluación general de las condiciones de estabilidad del talud suroeste.

En el detalle (A) de la Fig. 2, se reporta en proyección hemisférica equiareal, la envolvente de los planos topográficos del talud. El rango de rumbos es bastante definido: norte $(45 - 90)^\circ$ oeste; y el buzamiento, hacia el suroeste, refleja prácticamente los dos valores de 25° y 45° representativos respectivamente de la pendiente natural superior y de la pendiente de corte en la parte inferior del talud.

En los detalles (B) y (C) de la misma Fig. 2, se reportan las envolventes respectivamente para los planos de foliaciones y de diaclasas, relativos al área del talud suroeste. Estas envolventes han sido trazadas tomando en cuenta solamente los planos de máximas frecuencias de los correspondientes diagramas de contornos de polos que se indicaron en la Fig. 1.

El objeto principal de la primera fase del análisis fue evaluar en términos globales y estadísticos la situación geostática del talud

suroeste para los dos modos posibles de fallas: planas a lo largo de la foliación y de cuñas a lo largo de la intersección foliación-diaclasa.

Para el análisis de fallas planas se debensuperponer entre ellas, la envolvente de los planos de foliación y la de los planos topográficos, delimitándose de esta manera la porción de foliaciones en condiciones cinemáticamente inestables (con buzamiento menor que el del talud y rumbo pseudo paralelo al de éste). Resultan el 50% de las foliaciones en condiciones cinemáticamente inestables. (Ver detalle (D) de la Fig. 2).

Para el análisis de fallas de cuñas, primero es necesario superponer entre ellas las envolventes de foliación y diaclasas, obteniéndose el área de ubicación de las líneas de cuñas foliaciones-diacclasas, y sucesivamente superponer la figura obtenida, nuevamente a la envolvente de los planos de las pendientes del talud; de esta manera se delimita, igualmente al caso de fallas planas, la porción de cuñas en condiciones cinemáticamente inestables (las con buzamiento menor que el del talud y rumbo pseudo perpendicular al de éste). Resultan el 50% de las cuñas en condiciones cinemáticamente inestables. (Ver detalle (E) de la Fig. 2).

A este punto del análisis, se pasó a definir las condiciones de estabilidad en términos mecánicos, o sea tomando en cuenta, obviamente para las solas condiciones correspondientes a inestabilidad cinemática, la contribución de la resistencia al corte. Para esto se hizo necesaria la estimación de los dos parámetros mecánicos que entran en juego: fricción y cohesión a lo largo de las discontinuidades geológicas presentes.

A este respecto, a falta de ensayos de corte específicos realizados sobre las rocas del talud en estudio, y en base a la experiencia directa e indirecta sobre el comportamiento mecánico de rocas de la misma especie y en similares condiciones físico-mecánicas de las rocas en cuestión, se estimaron los siguientes rangos entre los cuales debían encontrarse los valores efectivos de los parámetros mencionados: fricción $\bar{\phi} = (8 - 10)^\circ$; cohesión $\bar{c} = (2 - 4) \text{ Ton/m}^2$.

Se trata de parámetros a largo plazo y correspondientes a los planos de foliación, los que en este caso controlan la dinámica de la estabilidad.

Utilizando aún las técnicas de la proyección hemisférica pudieron evaluarse los factores de seguridad para los diferentes casos de inestabilidad eventual, tomando en cuenta la resistencia ofrecida al corte.

En primera aproximación, utilizando el ábaco que se reporta en la Fig. 3, pudo evaluarse el ángulo " ϕ_c " de fricción equivalente al efecto de la cohesión, para el caso de fallas planas y para una data geometría del problema y peso unitario " γ " de la roca. Considerando $\phi = 9^\circ$ y $c = 3 \text{ Ton/m}^2$ se obtuvo, para $\gamma = 2 \text{ Ton/m}^3$, $\beta = 35^\circ$ (valor medio), $L = 35 \text{ m}$ y $P = 120 \text{ Ton}$, un valor de $K = 1.05$, de $\phi_c = 40^\circ$ y un ángulo equivalente $\phi_e = \phi + \phi_c = 9 + 40 = 49^\circ$.

Aunque el ábaco de la Fig. 3 no tiene validez para el caso de cuñías, el valor de ϕ_c obtenido pudo ser aplicado con sentido conservador también para este tipo de falla.

El factor de seguridad mínimo se calculó en:

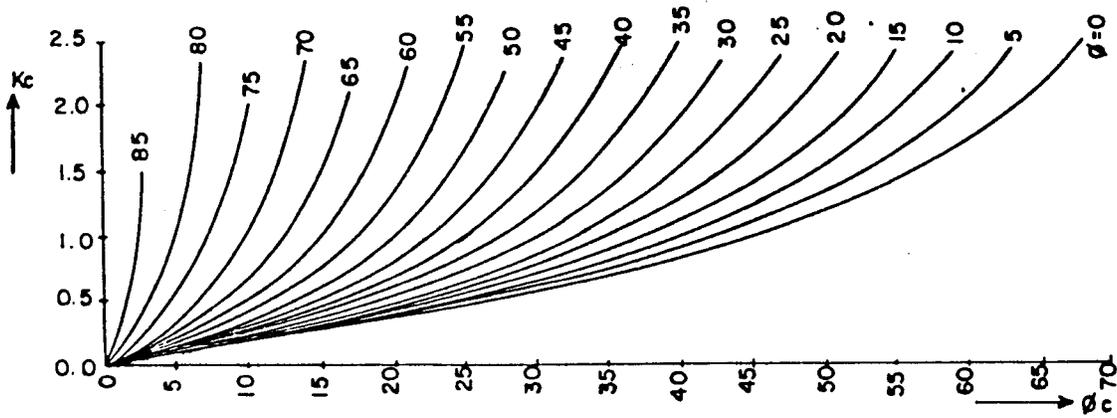
$$Fs_{\text{min}} = \text{Tang } \phi_c / \text{Tang } \beta_{\text{max}} = \text{Tang } 49^\circ / \text{Tang } 45^\circ = 1.15$$

mientras que el factor de seguridad medio fue de:

$$Fs_{\text{medio}} = \text{Tang } 45^\circ / \text{Tang } \beta_{\text{med}} = \text{Tang } 49^\circ / \text{Tang } 35^\circ = 1.64$$

Los resultados de esta fase de análisis general indicaron que el talud en estudio era mecánicamente estable en términos generales, siendo la porción superior natural, cinemáticamente estable, y su porción inferior de corte cinemáticamente inestable (al 50%) pero mecánicamente estable.

Sin embargo los anteriores resultados señalaron también la posibilidad de que localmente pudieran concurrir circunstancialmente las condiciones más desfavorables y dar lugar al establecimiento de factores de seguridad cercanos al valor mínimo de 1.15, lo que a su vez indicaría



Angulo de fricción (ϕ_c) equivalente al efecto de la cohesión (c) para diferentes valores del ángulo de fricción real (ϕ) y del parámetro (k) característico de la geometría del talud y del peso específico del volumen deslizable. (PERRI, 1979).

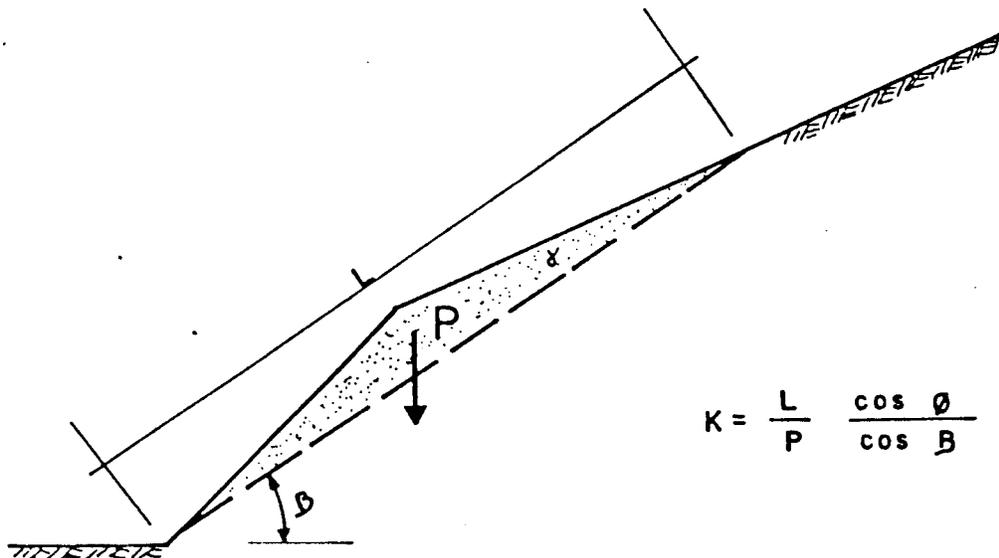


FIG.- 3-

la existencia de condiciones de equilibrio límite precarias y susceptibles de transformarse en fenómenos de inestabilidad localizados.

EJEMPLO N° 2

El área estudiada en este segundo caso se encuentra emplazada en un ambiente geológico que se corresponde con la Formación Las Mercedes del Grupo Caracas, caracterizada litológicamente por una secuencia de esquistos calcáreos con zonas grafitosas localmente micáceas.

El primer grupo de datos necesarios para el análisis, otra vez derivó directamente del levantamiento geoestructural de campo, cuyos resultados, además de la definición de unidades y sub-unidades litológicas y respectivas características peculiares, suministraron 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, fueron agrupados en foliaciones, diaclasas y fallas menores. En la Fig. 4-a se representa el diagrama de concentración de polos de discontinuidades; nótese el elevado número de estructuras medidas y analizadas: 1130.

En la Fig. 4-b se representa el correspondiente diagrama de contornos de polos, el mismo 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 se harán sucesivamente se reporta en las figuras 5-a y 5-b respectivamente las envolventes de los círculos de meridianos de los planos de foliaciones y de los de diaclasas; en ambas figuras se ha delineado también 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.

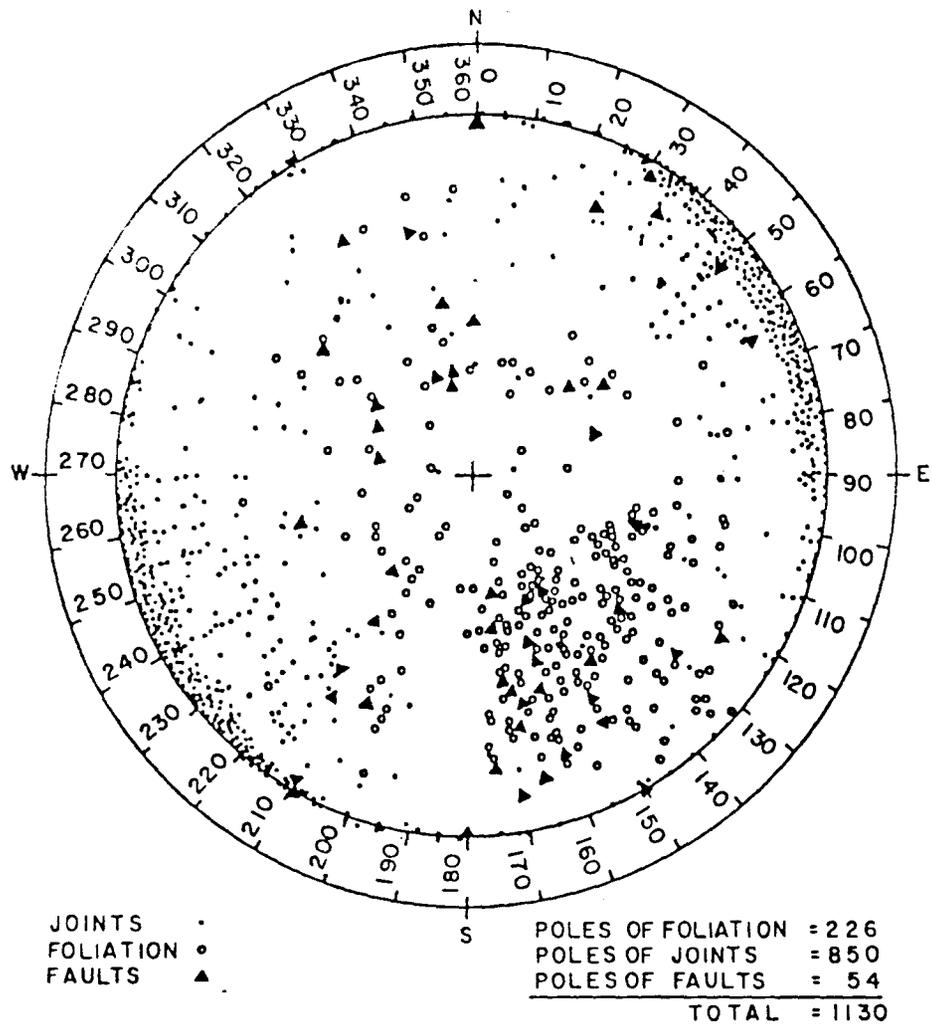


FIG. 4-a Diagrama de concentración de polos

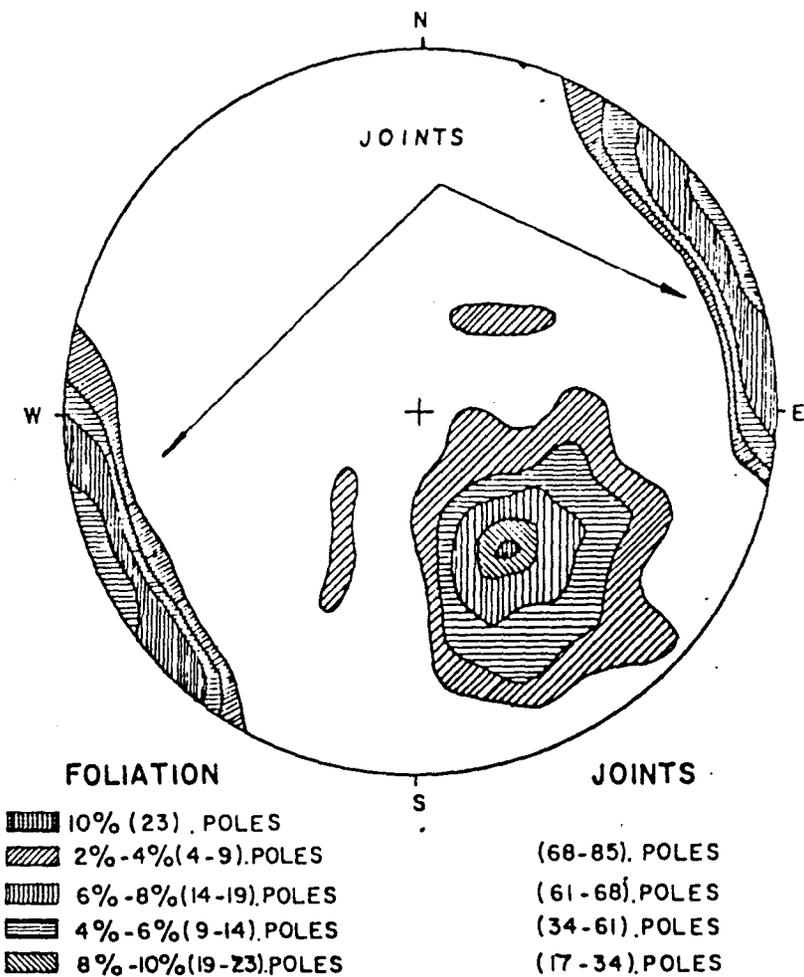


FIG. 4-b Diagrama de contornos de polos

Pasando al aspecto topográfico, resulta cómodo imaginarse 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.

Una vez ajustados a esta imaginación, se trató de cuantificar el problema, o sea definir y localizar para cada uno de estos taludes ideales, que por cierto eran numerosísimos, las correspondientes características geométricas de rumbo y buzamiento.

Con tal objeto se construyó un mapa de pendientes, el cual además de estar caracterizado por los valores de buzamiento de cada porción del área, contenía 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 se indican en las figuras 6-a y 6-b en las que se dan en forma de diagrama, los resultados cuantificados de este análisis para el área en estudio.

A este punto del análisis pudo utilizarse en forma original la idea mediante la cual se había asociado al relieve de la roca, un conjunto constituido por pequeños taludes los cuales, geométricamente, no son otra cosa que planos cuya orientación en el espacio, rumbo y buzamiento, se conocían con suficiente precisión. Así mismo pudo representarse en proyección hemisférica este conjunto de planos mediante un simple diagrama de concentración de polos el cual permitió construir el diagrama de contornos de polos de pendientes y la envolvente de los círculos meridianos correspondientes. Estos mismos se reportan en la figura 7-a.

Recordando a las que se han 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 interesó por un lado individualizar las condiciones cinemáticamente estables para ya no ocuparse de ellas, y por el otro individualizar cuáles, entre las condiciones de inestabilidad cinemática, pudieran revestir caracteres de inestabilidad mecánica y cuáles no.

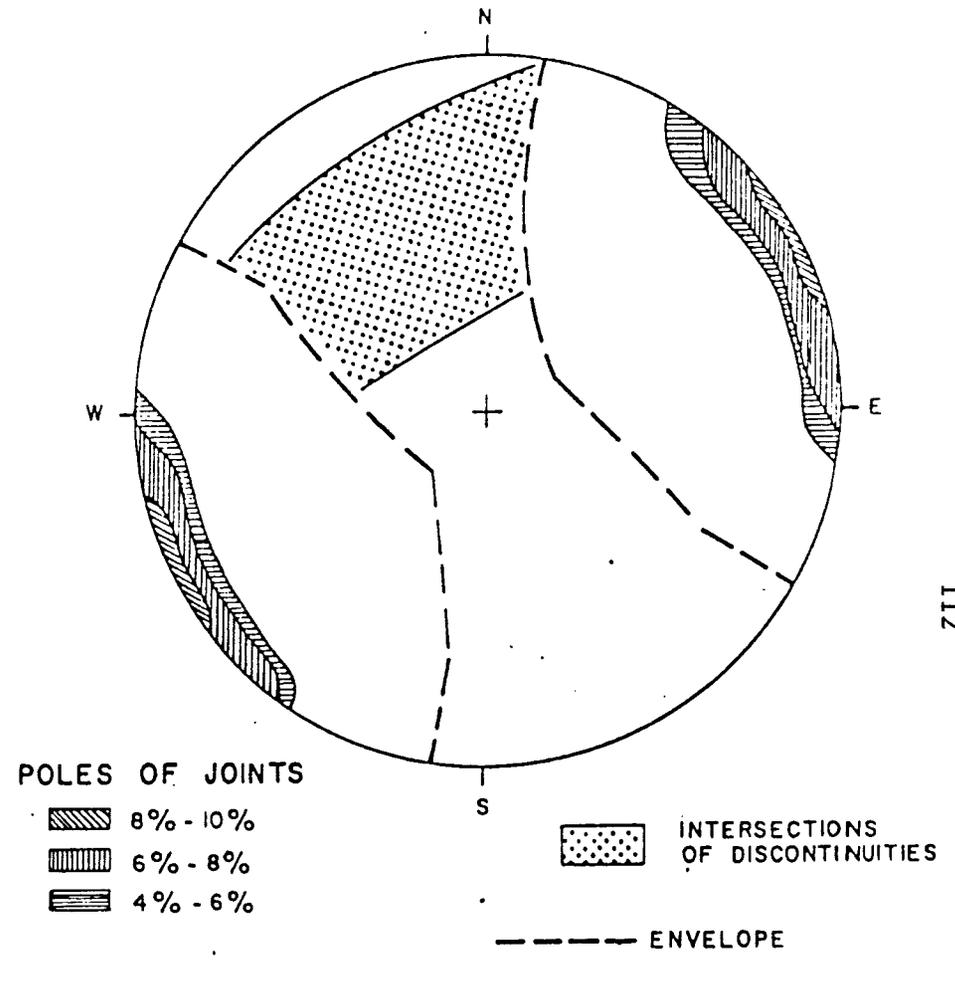
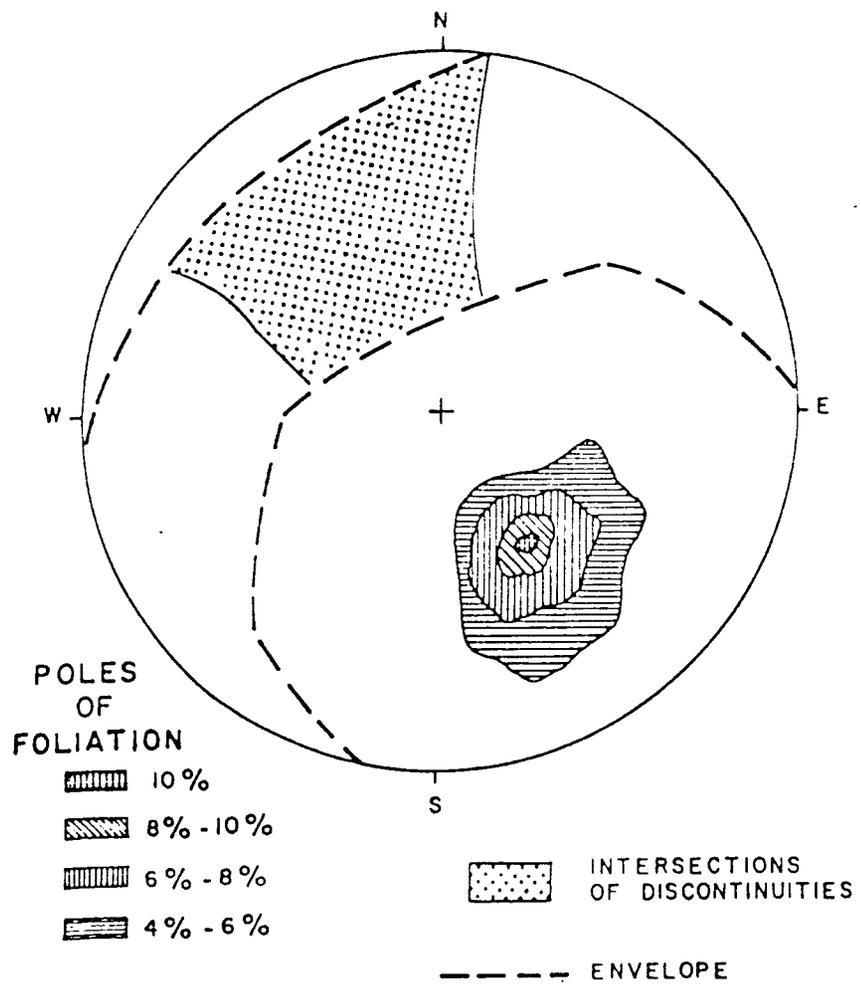


FIG. 5-a Envolvente de planos de foliación

FIG. 5-b Envolvente de planos de diaclasas.

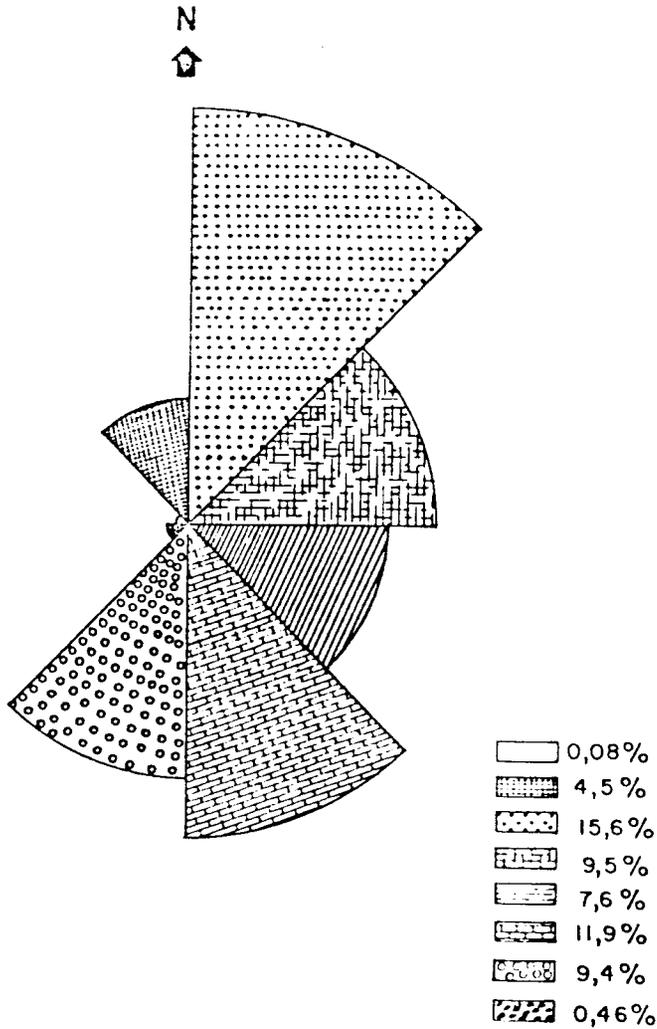


FIG. 6-a Distribución de orientación de pendientes.

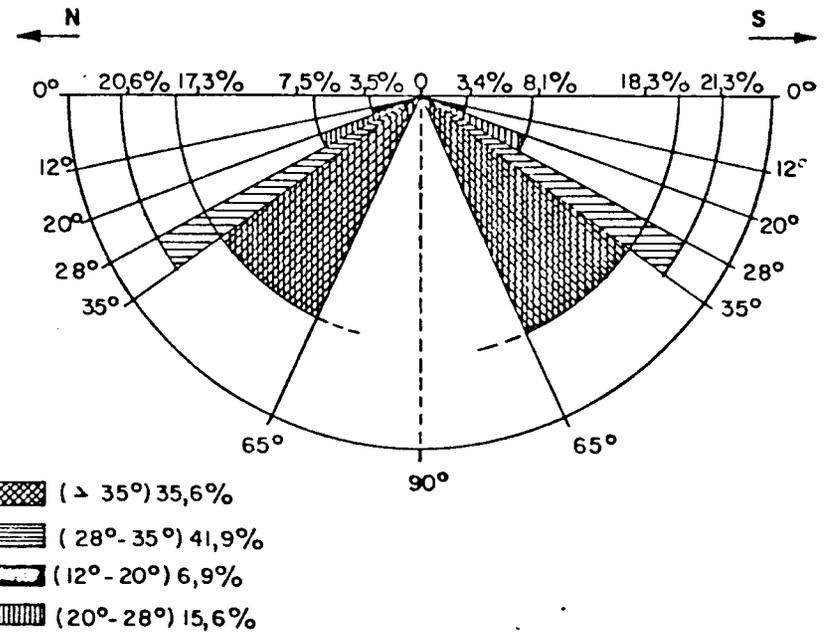


FIG. 6-b Distribución de buzamiento de pendientes.

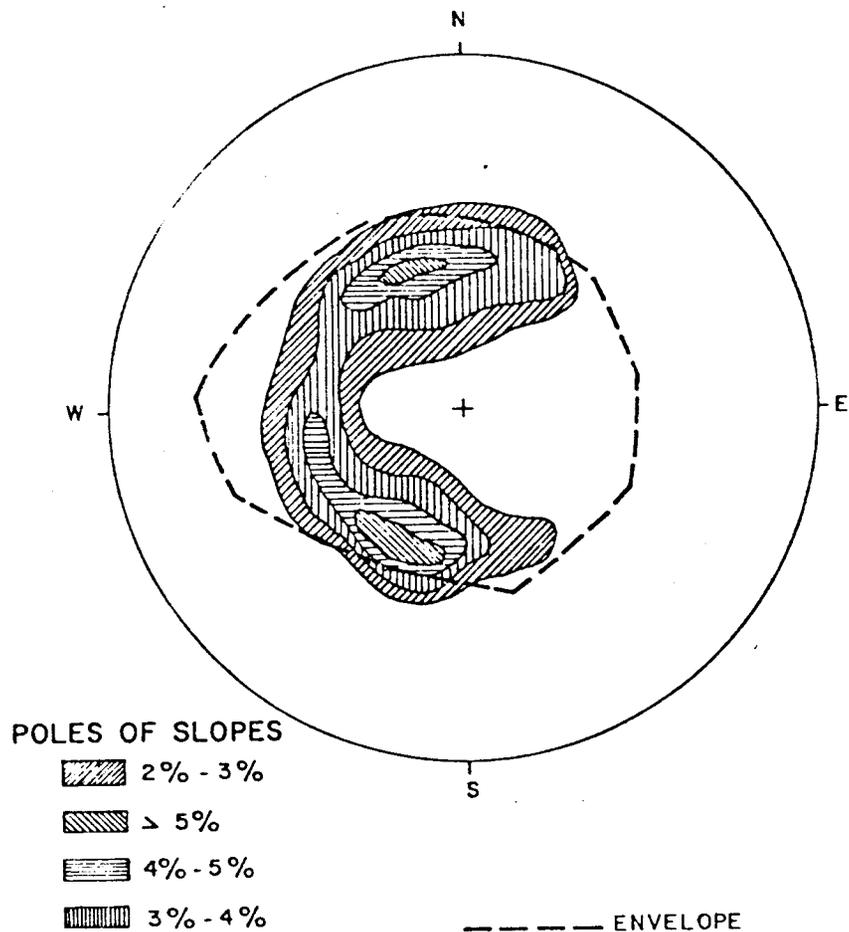


FIG. 7-a Diagrama de contornos de polos y envolvente de planos de pendientes.

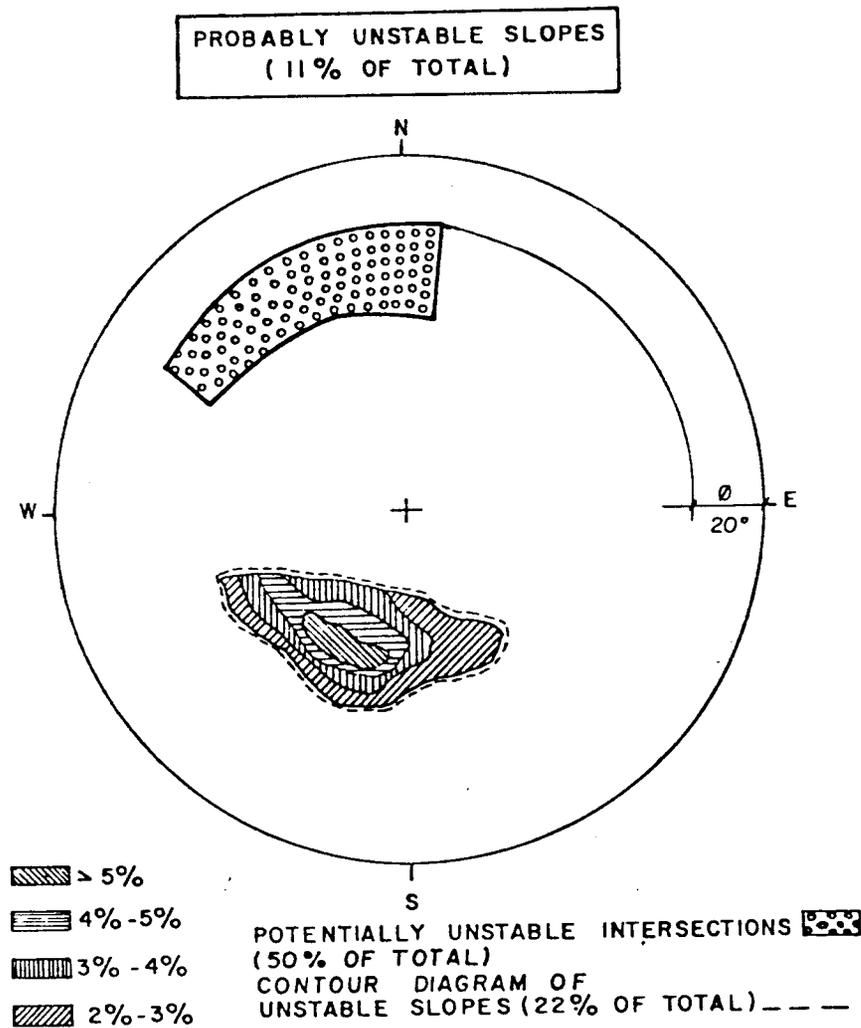


FIG. 7-b Diagrama de contornos de polos de taludes potencialmente inestables.

A pesar de que se dejan al análisis de detalle los aspectos mecánicos y los cálculos exactos del factor de seguridad para los taludes cinemáticamente inestables, es casi siempre posible, aún 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, con el objeto de 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 en esta fase con sentido conservador ($\phi=20^\circ$)

Pudo de tal manera pasarse a la cuantificación del problema de la estabilidad y con tal objeto, sobre la base de los datos ya presentados, se procedió a realizar una simple y nueva elaboración de los mismos de la forma siguiente:

- Superposición de las representaciones reportadas en las figuras 7-a y 5-a (o 5-b).
- Demarcación de la figura delimitada por la envolvente de los planos de las pendientes y por el área de ubicación de las intersecciones foliaciones-diaclasas.
- Delimitación de 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 y por el círculo del ángulo de fricción $\phi = 20^\circ$. En otras palabras, entre todas las pendientes existentes, se individualizaron los polos de aquellas cuyos círculos meridianos interceptaba en todo su largo la figura mencionada al paso anterior.

El resultado fue la figura 7-b de la observación y análisis de la cual pudo observarse que:

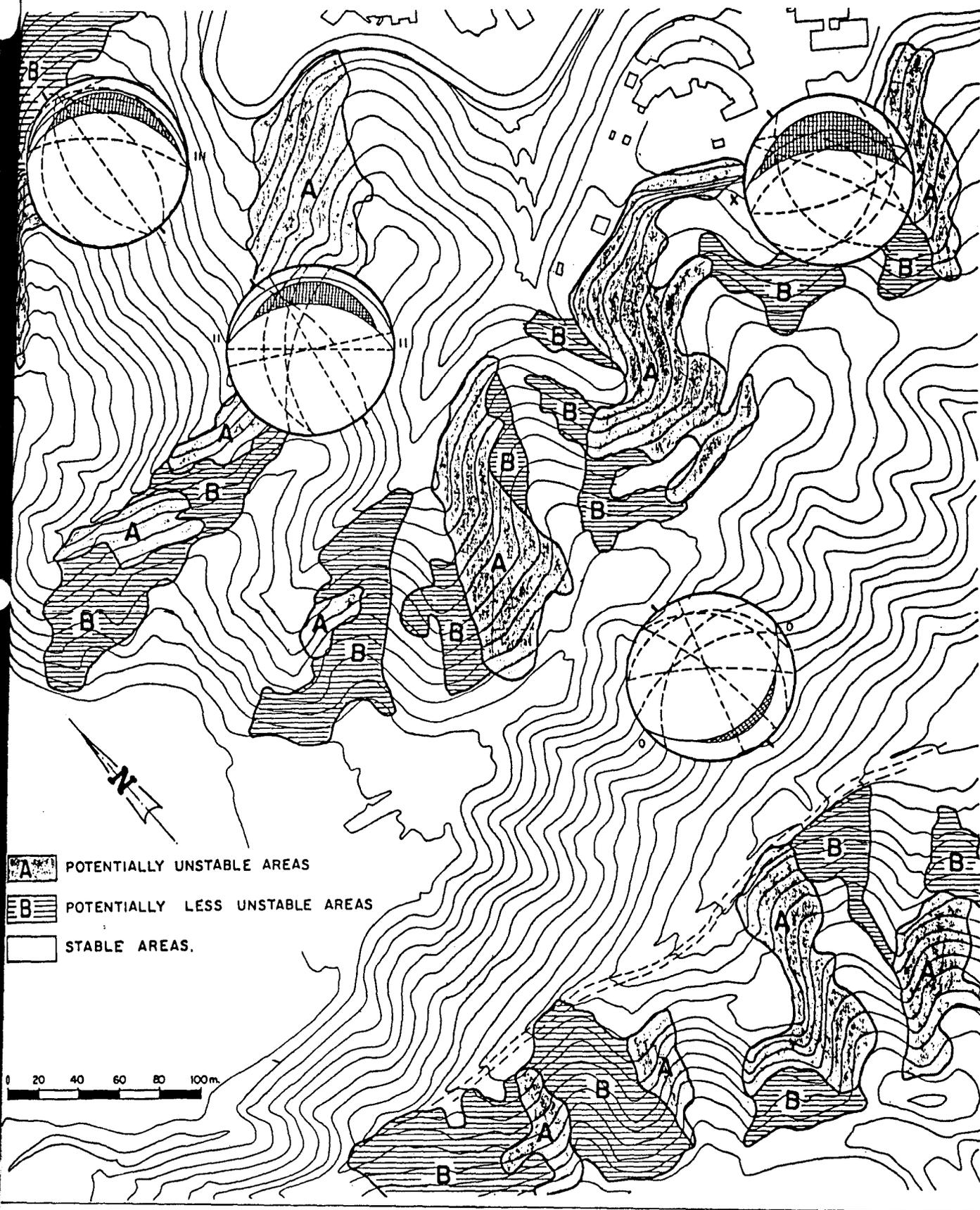


Fig. 8 Representación parcial del "Mapa de Análisis de Estabilidad".
 El área total era aproximadamente un millón de metros cuadrados.

caracterizado por la existencia de superficies (discontinuidades) de menor resistencia y comportamiento francamente anisótropo.

Por otro lado se ha querido enfatizar la posibilidad y conveniencia de utilizar esta metodología también en ambientes rocosos caracterizados por rocas meteorizadas pero que aún conservan con claridad su macro-estructura y luego su comportamiento mecánico esencialmente anisótropo.

Obviamente la transición entre los dos extremos del comportamiento mecánico es gradual y en naturaleza se encontrarán a menudo casos para los cuales es arduo establecer a priori cuáles entre los dos comportamientos es el que controla la estabilidad del talud.

Para estos casos se recomienda sin embargo también la utilización de las técnicas propuestas, aunque el estudio deberá complementarse con los análisis relativos a la evaluación de otros potenciales mecanismos de falla, cuales son por ejemplo los que hacen referencia a superficies pseudocirculares propias de los taludes en suelos y de comportamiento isótropo.

REFERENCIAS

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

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

SALCEDO, D. (1978) "El uso de las proyecciones hemisféricas como técnica de predicción y análisis de problemas relativos a estabilidad de taludes en macizos rocosos", U.C.V., Caracas.

PERRI, G. (1979) "La cohesión en el análisis estereográfico de estabilidad de taludes", Revista Latinoamericana de Geotecnia, Caracas, Vol. V N° 2.