

Geología y geotecnia en terrenos inclinados modelo para la elaboración de planos geológico-geotécnicos

Por: Alejandro Chica Sánchez*

INTRODUCCION

El desarrollo urbanístico de algunos pueblos y ciudades con morfología irregular, ha generado su expansión por laderas con pendientes constantes o variables, en muchos de los casos, sin la estabilidad requerida para asentamientos humanos permanentes. Bogotá, Medellín, Manizales, la mayor parte de los municipios de Antioquia y Caldas, son ejemplos típicos de la situación planteada.

Actualmente, tanto entidades oficiales como privadas, patrocinan estudios geológico-geotécnicos que se enfocan a la delimitación, dentro de dichos terrenos pendientes, de sus zonas estables, entre otras, y así, planificar las obras civiles proyectadas, evitando al tiempo catástrofes como las que ocurren sobre todo en las épocas de lluvia y en los comienzos de las épocas secas.

En relación con este tema de la geología y la geotecnia, el presente artículo tiene como objetivo presentar un orden y una razón de las investigaciones que, a juicio del autor, son fundamentales para la elaboración de mapas geológico-geotécnicos que involucren tanto aspectos morfológicos y geológicos como geomecánicos y aquellos de orden social, legal y de planificación urbana en general; además para llegar a resultados, conclusiones y recomendaciones confiables. Dentro de los análisis propuestos se hace énfasis en la REGIONALIZACION geoestadística de datos de campo y laboratorio, para definir el FENOMENO DE ESCALA, fundamental en problemas que consideran parámetros que pueden variar en el espacio —horizontal y verticalmente— y con el tiempo.

CONSIDERACIONES INICIALES DE LA INVESTIGACION (Planteamiento del problema)

Como puede observarse en la Figura No. 1, se tienen tres zonas que para fines prácticos se definen así:

1. Terreno en pendiente visto regionalmente.
2. Unidad morfológico-geológica con comportamiento geomecánico independiente (unidad básica de trabajo).
3. Zona de interés. Específicamente es en esta área donde se proyecta un complejo de obras civiles (urbanizaciones, vías, plantas recolectoras de agua, etc.).

Antes de dar comienzo a las investigaciones geológicas y geotécnicas dentro de la ZONA DE INTERES, se debe

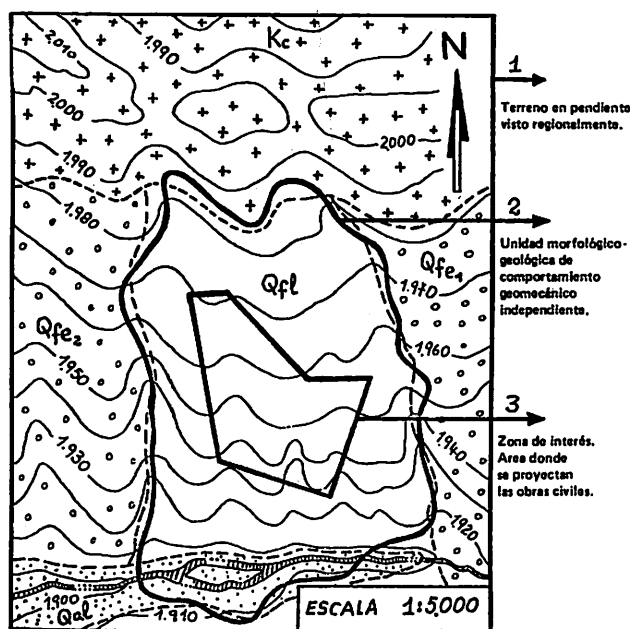


FIGURA No. 1. Zonas que se deben considerar en un estudio geológico-geotécnico de áreas en terrenos pendientes.

cumplir con una fase de estudios regionales, la cual consiste en lo siguiente:

* Ingeniero Geólogo - Sección de Geología Aplicada, Facultad de Minas.

A. Conocimiento geológico y morfológico de una zona amplia-que incluya cambios definitivos de pendiente, basados en la inclusión de cuchillas topográficas y valles fluviales principales donde drenan las aguas que corren por el terreno en pendiente considerado. Este estudio se apoya básicamente en revisiones de estudios geológicos regionales existentes, revisiones bibliográficas relacionadas con el tema y el área, estudios fotogeológicos y algunas verificaciones de campo cuya intensidad y detalle depende del alcance logrado con los otros elementos de apoyo mencionados. Con base en la información recolectada, se enmarca la zona de interés en un contexto morfológico y geológico regional.

B. Definición de la unidad morfológico-geológica de comportamiento geomecánico independiente. Esto se logra combinando criterios morfológicos, litológicos y estructurales que permitan delimitar una zona cuya estabilidad no dependa del comportamiento de las zonas vecinas y complementariamente el caso viceversa. Inicialmente se puede aceptar que los límites de esta unidad básica son los cambios definitivos de pendiente (cuchillas, valles fluviales, cañones profundos, terrenos planos relativamente extensos, etc.); sin embargo, las unidades litológicas presentes, sus propiedades geomecánicas y las estructuras geológicas pueden ampliar o reducir la extensión de la unidad básica morfológicamente definida.

C. Revisión detallada de la superficie y, hasta donde sea posible en profundidad de la unidad básica del estudio, con el propósito de IDENTIFICAR, LOCALIZAR y DIMENSIONAR los accidentes geológicos y morfológicos presentes, los cuales constituirán el primer grupo de parámetros que condicionan la estabilidad de la unidad, vista como un todo.

Ejemplos de dichos detalles geomorfológicos son los siguientes:

- Evolución de la superficie de la unidad, basada en el estudio comparativo de fotografías aéreas de distintas épocas.
- Variación de pendientes, resumible en el mapa de pendientes.
- Señales de reptación: árboles y muros inclinados, grietas de tensión alineadas, perfiles topográficos convexos, etc.

- Derrumbes activos e inactivos asociados a cicatrices de deslizamientos.
- Aguas de escorrentía y su manejo; además, sitios de retención o empozamiento de aguas superficiales.
- Vegetación y el manejo de ésta (cambio de cultivos, tala de bosques, quemadas, etc.).
- Pluviosidad.
- Daños ocasionados por el hombre o por animales (madrigueras, sobrepastoreo, etc.).

— Estado de las unidades rocosas y discontinuidades estructurales que las separan o les afectan su continuidad tanto lateral como vertical.

En este aparte de las investigaciones, se debe hacer un estimativo de la estabilidad global de la unidad geomorfológica básica, apoyados en los siguientes parámetros obtenibles con el apoyo de afloramientos, apiques, trincheras y algunas perforaciones; además, siempre y cuando sea posible, con estudios geofísicos:

- Perfil completo de las unidades litológicas presentes: suelos, rocas transportadas, paleosuelos; rocas "in situ" totalmente meteorizadas, saprolíticas, fracturadas de transición y normalmente frescas-fracturadas. Este perfil se debe implementar también con espesores y variaciones o tendencias de espesores; rugosidad, continuidad y buzamiento de las superficies de contacto.
- Discontinuidades estructurales: Estratificaciones, contactos, foliaciones, fallas, fracturas, diaclasas, etc.
- Sismología local.
- Pendiente máxima promedio global.
- Propiedades geomecánicas de las unidades litológicas: cohesión, ángulo de fricción interna, peso específico, etc.
- Condiciones hidrológicas: aguas subsuperficiales y freáticas.

Si después de calcular el factor de seguridad de la unidad básica, considerando todos los parámetros citados, se concluye que es ESTABLE, se deben continuar las investigaciones, pues de lo contrario es preferible abandonar el proyecto ya que la estabilización de una ladera puede llegar a ser muy costosa dependiendo de su magnitud y de la profundidad del

terreno potencialmente inestable. Habrá criterios para elegir lo mejor.

En el caso mencionado de estabilidad favorable, son los accidentes geomorfológicos los que, a partir de este momento, se deben considerar puesto que constituyen los parámetros que pueden llegar a deteriorar el grado de estabilidad calculado y esperado con el análisis anterior.

D. Con el estudio detallado de los accidentes morfológicos, las condiciones litológicas, estructurales e hidrológicas, se puede determinar la influencia de la unidad básica, exterior a la zona de interés, en ésta y viceversa.

Para citar solamente algunos casos que merecen atención en lo relacionado con este aspecto, tenemos: dinámica regresiva de algunos deslizamientos (avance de la corona del derrumbe afectando terrenos topográficamente más altos); sitios de empozamiento de aguas y terrenos permeables (aumento del volumen de aguas infiltradas que pueden desestabilizar terrenos topográficamente más bajos); vías y otras obras que deterioran los niveles impermeables superiores de un perfil litológico del terreno; pérdida de contrapeso de taludes naturales o, aumento de peso en los mismos, situación que disminuye la estabilidad local, llegando a ser el inicio de un deslizamiento progresivo de escala mayor.

E. Primeras conclusiones y recomendaciones. Entre ellas considerar las modificaciones a los diseños propuestos dentro de la zona de interés para evitar daños en su exterior. Igualmente, considerar los correctivos dentro de la unidad básica para garantizar, en principio, la estabilidad de la zona de interés como un todo y hacer factible el desarrollo del proyecto en cuestión. Asegurada la estabilidad GLOBAL de la zona de trabajo, se puede pensar en la presencia posible de subzonas TIPO "A" o ESTABLES, las cuales se explicarán más adelante.

F. Estudio de la zona de interés (objetivo de la investigación propuesta).

De acuerdo con un razonamiento lógico conjugando todos los parámetros observados, elaborar un mapa geológico-geotécnico preliminar o cualitativo de la zona de interés. Este mapa consiste en mostrar, con límites lo más exactos posibles, subzonas con grados de estabilidad diferentes y con utilización también diferente, como se muestra en la Figura No. 2 y cuya explicación resumida es la siguiente:

- SUBZONAS TIPO "A" ... Su estabilidad es de alto grado pues sus condiciones naturales son muy favorables. Posiblemente llegaría a depender del manejo mismo que se le dé al terreno.
- SUBZONAS TIPO "B" ... Su estabilidad depende de factores externos, los cuales se deben corregir. Tam-

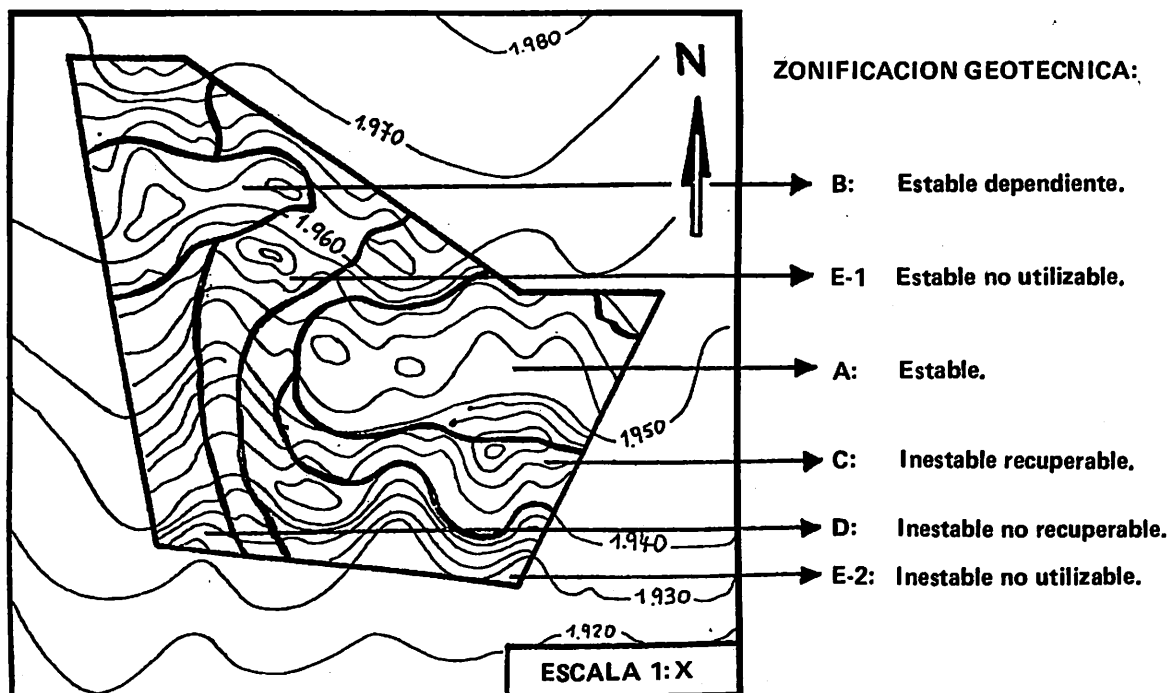


FIGURA No. 2. Mapa geológico-geotécnico de la zona de estudio
Análisis cualitativo del terreno.

bién, de factores internos que implican un manejo determinado del terreno y cierto tipo de obras civiles que garanticen el no deterioro de esa estabilidad natural inicial.

- SUBZONAS TIPO "C" ... La estabilidad de estos terrenos es crítica o presenta inestabilidad manifiesta; sin embargo, con algunos correctivos específicos se puede mejorar la estabilidad y, en consecuencia, adelantar ciertas obras civiles en su interior.
- SUBZONAS TIPO "D" ... Terrenos con inestabilidad manifiesta cuya recuperación no es posible o demasiado costosa comparada con las inversiones y tipos de obra proyectadas.
- SUBZONAS TIPO "E-1" ... Terrenos estables pero restringidos por condiciones urbanísticas u otras como, por ejemplo, estar ubicadas en vegas de inundación o cerca de frentes libres de taludes desprotegidos.
- SUBZONAS TIPO "E-2" ... Terrenos inestables y restringidos por condiciones como las mencionadas en la subzona anterior.

Una zona de interés puede mostrar varias subzonas del mismo tipo pero con condiciones diferentes tanto de estabilidad como de manejo y tipos de corrección. En estos casos la nomenclatura sería A-1, A-2, B-1, B-2, C, D, E-1.1, E-1.2, etc., como ejemplo.

Las observaciones de campo para la elaboración de estos mapas se basan en afloramientos, destapes naturales, apiques, trincheras, perforaciones, ensayos de percolación y todos aquellos admisibles en una fase de prefactibilidad. La Figura No. 3 muestra estos aspectos de manera complementaria.

El cuadro siguiente resume el objetivo del orden presentado y su importancia para llegar a los resultados finales:

1	Datos geológicos, morfológicos e hidrológicos puntuales, a veces locales.
2	La correlación detallada de los datos anteriores permite una REGIONALIZACION confiable dependiendo del cuidado de ésta y del muestreo —estadístico— de campo.
3	Los datos de campo ya regionalizados permiten la elaboración del mapa geológico-geotécnico preliminar o cualitativo.

4	Datos o resultados puntuales de ensayos de laboratorio (cohesión, ángulo de fricción interna, peso específico, permeabilidad, etc.).
5	Los datos de laboratorio deben ser REGIONALIZADOS horizontal y verticalmente, a pequeña escala, de acuerdo con la regionalización de datos de campo. Correlación integrada.

El concepto de regionalización o "FENOMENO DE ESCALA" es fundamental en los estudios geológicos y geológico-geotécnicos y debe considerar, entre otros, los siguientes criterios:

- Variaciones litológicas, estructurales e hidrológicas.
- Matriz rocosa y bolas de roca: variaciones composicionales de la matriz rocosa; porcentaje de bolas de roca; entrelazamiento de las bolas de roca (estos datos se pueden complementar con lectura de apiques y trincheras. Además, un apique o una perforación abandonada puede indicar un 100% de bolas de roca en el primer caso y un entrelazamiento en el segundo).
- Estado de las rocas emplazadas (meteorización a nivel matricial y de las bolas de roca).
- Contactos de las unidades litológicas (deposicionales o por fallas que interrumpen la continuidad de los cuerpos).

G. Para la verificación de los resultados cualitativos, se propone la elaboración de perfiles longitudinales y transversales que cubran, idealmente, la totalidad de las variaciones litológicas y morfológicas de la zona de interés.

INVESTIGACION

GEOLOGICO-GEOTECNICA DEFINITIVA.

(Verificación y ajuste del mapa geológico-geotécnico preliminar y conclusiones finales).

De acuerdo con la fase anterior, se determina el grado de necesidad de más datos de campo y de laboratorio; en otras palabras, lo pertinente para una fase de factibilidad. La Figura No. 3 muestra el estado de las investigaciones, las cuales continúan con el análisis detallado de cada perfil longitudinal y transversal, seguido de una adecuada correlación de resultados de los mismos.

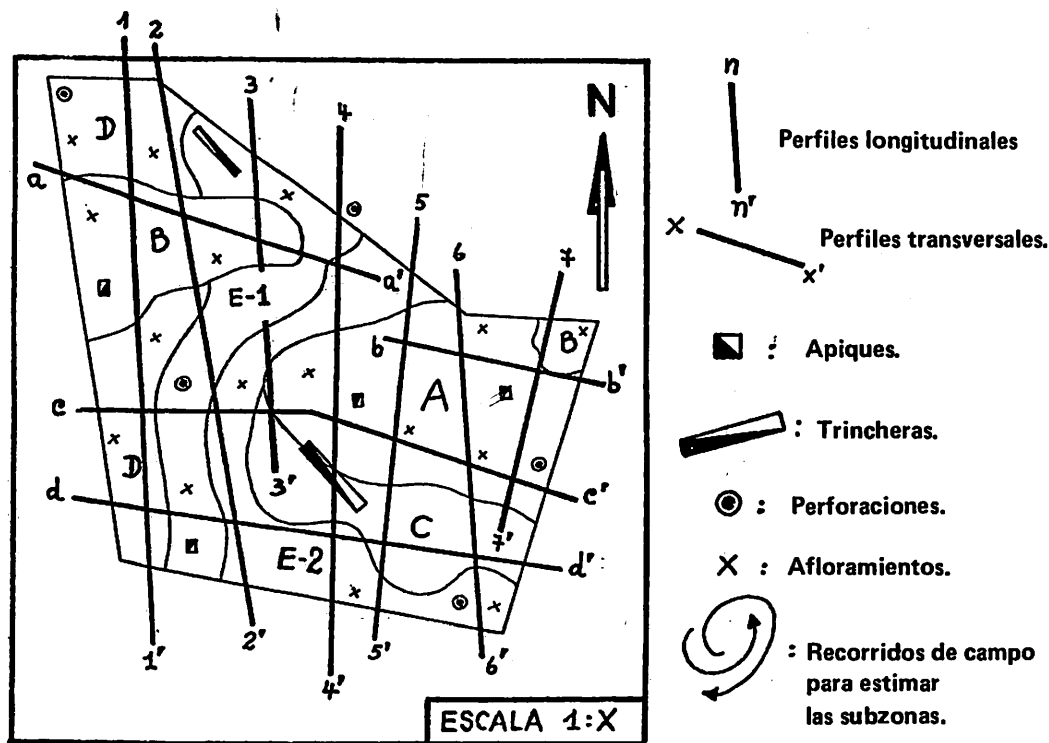


FIGURA No. 3. Definición de perfiles longitudinales y transversales que cubran la zona de interés.

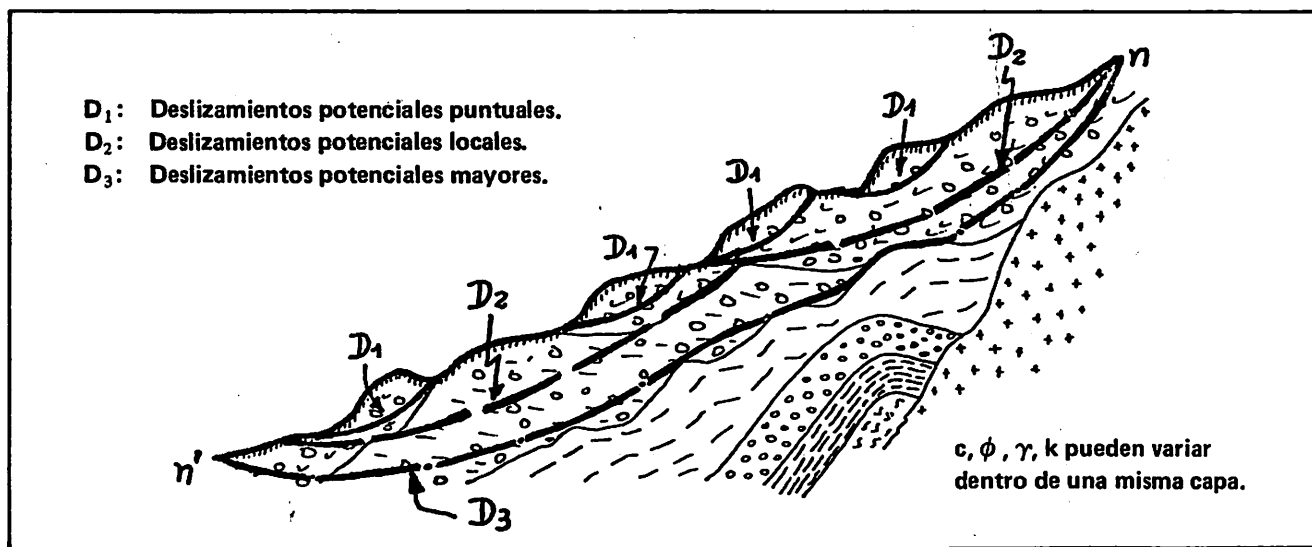


FIGURA No. 4. Interpretación y cálculos de un perfil.

Después de elaborados e interpretados los perfiles longitudinales, se procede a la interpretación de cada uno, considerando, como la muestra la Figura No. 4, deslizamientos potenciales puntuales (D_1), locales (D_2) y mayores (D_3), rotacionales, planares, diédricos, volcamientos, reptacionales u otro, según el caso particular.

Se puede deducir fácilmente lo siguiente:

Estabilidad de los sitios D_1, D_2 y D_3 = F (todos los parámetros geométricos y geomecánicos).

Estabilidad de los sitios D_1 = F (Estabilidad de los sitios D_2 y D_3).

Estabilidad de los sitios D_2 = F (Ocurrencia del deslizamiento D_1 y estabilidad del sitio D_3).

Estabilidad de los sitios D_3 = F (Ocurrencia de los deslizamientos D_1 y/o D_2).

En gran parte, evitar la ocurrencia de un deslizamiento D_1 y/o D_2 puede evitar la ocurrencia de uno D_3 y asegurar la estabilidad global del terreno cubierto por el perfil analizado. Se deduce también que el orden de análisis para los cálculos de factores de seguridad (F.S.), debe ser, en la mayoría de los casos, como sigue y a medida de recomendación:

F.S. $_{D_3}$ en condiciones naturales.

F.S. $_{D_1}$ en condiciones naturales.

F.S. $_{D_2}$ en condiciones naturales y posteriormente considerando la ocurrencia del deslizamiento D_1 .

F.S. $_{D_3}$ considerando la ocurrencia de deslizamientos D_1 y/o D_2 .

El orden de recomendación de correctivos, si ese es el caso, debe ser el mismo al igual que los cálculos suponiendo que dichos correctivos se pongan en práctica.

Para el cálculo de los F.S., es conveniente insistir que los parámetros geomecánicos, basados en ensayos "in situ" o en laboratorio, utilizados deben cumplir:

Parámetro análisis = F (Parámetro medido + Regionalización de datos de campo + Regionalización a pequeña escala de los datos de ensayos).

La confrontación del mapa geológico-geotécnico preliminar o cualitativo con los resultados de F.S. de todos los perfiles, permite hacer correcciones y ajustes suficientes para elaborar el mapa geológico-geotécnico definitivo.







OBSERVACIONES FINALES

En la zonificación preliminar A, B, C, D, E-1 y E-2, aparte de todo lo mencionado, se debe tener en cuenta lo siguiente:

- Tipo de obra civil proyectada.
- Densidad de construcciones.
- Estimación del manejo del terreno a lo largo del tiempo, por sus moradores.
- Restricciones por la ley.
- Manejo de las aguas de escorrentía y sanitarias.
- Tiempo de construidas las obras civiles pre-existent.

Para explicar la relación entre el Parámetro análisis y el Parámetro medido, se pueden hacer varias consideraciones, de entre las cuales se plantea la siguiente (resumida en forma de cuadro o clasificación):

El modelo de trabajo expuesto, aparentemente extenso de poner en práctica, es sencillo y posiblemente nada fuera de lo normal. Con él se pretende organizar las ideas relacionadas con estudios geotécnicos y remarcar los conceptos de unidades geomecánicamente independientes, regionalización de datos de campo, regionalización a pequeña escala de datos de ensayos "in situ" o en laboratorio y, proponer una zonificación geotécnica práctica y socialmente comprensible. En relación con esta forma de zonificar un terreno, varios estudios para el Valle del Aburrá así se han llevado a cabo, aunque posiblemente de manera parcial por el alcance mismo de las investigaciones.

Talud Homogéneo	TOTAL		Parámetro análisis = Parámetro medido $P_a = P_m$
	POR CAPAS		$P_a = P_m$ ponderado.
	EN LA MATRIZ ROCOSA		$P_a \neq P_m$ *
Talud Heterogéneo	TOTAL		$P_a \neq P_m$ * * Si el entrelazamiento de bloques es continuo $P_a > P_m$
	A NIVEL DE CAPAS		$P_a \approx P_m$ Depende del espesor de la capa heterogénea y sus características.
Talud Estructuralmente Controlado	HOMOGENEO O HETEROGENEO		$P_h = F c, \phi$ de la(s) discontinuidad(es) crítica(s) Si $C, \phi_{disc} < C, \phi_{rocas}$