

XI Congreso Panamericano de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica
Conferencia Principal, Sesión de Especialidad No. 7,
"Estabilidad de Taludes y Terraplenes"
Foz de Iguassú, Brasil
Memorias, Volumen 4

ZONIFICACION GEOTECNICA CUANTITATIVA POR MEDIO DE
LA METODOLOGIA DE TALUDES NATURALES (MTN)

*QUANTITATIVE GEOTECHNICAL ZONATION BY MEANS OF
THE NATURAL SLOPE METHODOLOGY (NSM)*



Tomás Shuk Erdos
Ingeniero Adjunto de Investigación, Instituto Colombiano de Investigaciones
Geotécnicas y Consultor Independiente

Bogotá, Colombia
Agosto de 1999

Zonificación Geotécnica Cuantitativa por Medio de la Metodología de Taludes Naturales (MTN)

Tomás Shuk Erdos

Ingeniero Adjunto de Investigación, Instituto Colombiano de Investigaciones Geotécnicas, y consultor independiente. Bogotá, Colombia.

SINOPSIS:

Este trabajo presenta la aplicabilidad de la Metodología de Taludes Naturales (MTN) en estudios de zonificación geotécnica, por sí sola, - como un cuerpo integrado de conocimientos y técnicas analíticas enmarcadas dentro del campo de la Macrogeotecnia -, o como una herramienta adicional (o complementaria) a las de las actuales metodologías convencionales de zonificación geotécnica. La MTN, - que parte del supuesto primario de "la Naturaleza es el mejor ensayo in-situ" -, permite la cuantificación de un número apreciable de parámetros geomecánicos, y de otros parámetros pertinentes a la zonificación geotécnica tales como el factor de seguridad y la probabilidad de falla (amenaza); y su enlace con estimativos de decisión económica. Esta cuantificación se logra por sus cimientos teórico-empíricos y su sistema analítico, y sin la necesidad de informaciones adicionales, trabajos de campo, sondeos, ni ensayos de laboratorio o in-situ, excepto para ciertas comparaciones o sustentaciones adicionales y/o para profundizar en las tendencias y patrones de sus resultados.

PALABRAS CLAVE: Taludes Naturales, Macrogeotecnia, Zonificación Cuantitativa, Variabilidad, Costos Esperados.

1. INTRODUCCION

Este trabajo presenta la aplicación de la Metodología de Taludes Naturales (MTN), - como una herramienta por sí sola, o complementaria, adicional y equiparable a las de las metodologías geotécnicas convencionales -, para la zonificación geotécnica cuantitativa.

La Metodología de Taludes Naturales (MTN), - enmarcada dentro del campo conceptual de la Macrogeotecnia -, constituye un conjunto metodológico que permite la determinación y cálculo de parámetros geomecánicos y de estabilidad, solamente con base en planos topográficos de escala y calidad adecuadas, y que indiquen los contactos entre las diferentes formaciones geológicas (o miembros); y que, - partiendo del supuesto "la naturaleza es el mejor ensayo in-situ" -, utiliza el análisis de la observación y medición

organizada y sistemática de dos parámetros geométricos cuantitativos (L,H), que se obtienen de agrupaciones adecuadamente delimitadas en los niveles de medición de taludes naturales (familia, subpoblación, población o universo) que se describen más adelante (numeral 2.7).

De esta manera y exceptuando los objetivos de ciertas comparaciones o sustentaciones adicionales y/o de profundizaciones de las disposiciones, tendencias y patrones de sus resultados, la MTN en sí no requiere de informaciones adicionales, de sondeos, ni de ensayos de laboratorio o in-situ; y la economía de costos y la rapidez en la ejecución de los trabajos, le confieren a la MTN una ventaja comparativa significativa, - en tiempo, costos y elementos físicos y humanos requeridos -, con respecto a las metodologías convencionales de zonificación.

El cuerpo de este texto se fundamenta en un trabajo anterior (Shuk, 1996b) no publicado, el cual ha sido corregido y complementado a la luz de resultados recientes; y se inicia con un tratamiento introductorio resumido de los aspectos generales de la MTN. Luego continúa con uno algo más amplio y detallado de aquellas de sus herramientas analíticas que se utilizan para la aplicación objeto de este trabajo, e incluyendo algunos resultados de casos prácticos.

Finalmente, termina con las conclusiones derivadas de los resultados obtenidos en los proyectos ejecutados hasta este momento, y los agradecimientos a las entidades que los hicieron posibles y que autorizaron la publicación de los resultados aquí presentados.

Inmediatamente después del texto, se incluye la lista de referencias, y dos apéndices: el primero con la nomenclatura y símbolos matemáticos, y el segundo con la descripción litológica de aquellos materiales geológicos que no se describen en los cuadros o en las gráficas del texto. Todo el material ilustrativo (figuras y cuadros) se presentan en forma integrada al texto.

El tratamiento de los diversos aspectos de la MTN pertinentes al objeto de este escrito, - tanto generales, como específicos -, no pretende en ningún momento ser de tipo exhaustivo, ni de mostrar caminos plenamente comprobados y/o únicos. Sino, más bien, su propósito es el de plasmar algunos aspectos de ciertos puntos básicos o, en algunos casos, unas posibilidades y/o primeras aproximaciones para el futuro desenvolvimiento de algunos temas con los que aún no se ha logrado un nivel de solidez y desarrollo satisfactorio y acorde con las necesidades actuales. Pero, sobre todo, el de abrir nuevas fronteras y horizontes, y señalar explícita e implícitamente el vasto campo de investigación y aplicación práctica ofrecido por la MTN en los albores del siglo XXI.

2. ASPECTOS GENERALES DE LA MTN

Los resultados cuantitativos obtenibles por medio de la MTN han sido el resultado de dos

épocas diferentes de su desarrollo investigativo, y muy espaciadas entre sí: el decenio 1960 - 1970 (Shuk, 1968 y 1970), y desde 1987 hasta el presente.

Dichos resultados cuantitativos están constituidos por un buen número de parámetros geomecánicos de cuatro tipos (parámetros geomecánicos de presurización, de densidad & fase, de resistencia y de deformabilidad) y de parámetros de estabilidad (factor de seguridad, probabilidad de falla y otros), a los cuales se ha llegado por medio de los análisis, y los esfuerzos para lograr la mejor (pero no única) interpretación posible de los resultados que emanan del supuesto primario de la MTN ya mencionado en la introducción: "la naturaleza es el mejor ensayo in-situ".

Además del anterior lineamiento analítico general, dichos esfuerzos y análisis se distinguen por el propósito de compatibilizar e integrar, hasta donde resulta posible, el cuerpo teórico y los resultados de la MTN con los de la Microgeotecnia convencional.

Los elementos básicos de la MTN ya se han descrito en forma resumida en trabajos anteriores (Shuk, 1994b y 1995b) y se están preparando para una presentación detallada en el manuscrito básico de la MTN (Shuk, 1999).

2.1 Aplicaciones de la MTN

Aunque el propósito inicial del desarrollo de la MTN se circunscribía al campo de la estabilidad de taludes, los resultados investigativos y de aplicación en varios tipos de proyectos prácticos han resultado además en otras aplicaciones que no tienen ni siquiera una relación remota con dicho propósito inicial, tales como: la de servir de herramienta auxiliar para exploración geológica y la detección de rasgos geoestructurales; la exploración para yacimientos de minerales pesados y para agregados de concreto; y para el planeamiento, exploración y diseño de obras subterráneas.

Durante la segunda época del desarrollo de la MTN y a partir de 1990, - además de un número de tareas de investigación -, se ha utilizado la MTN en 19 proyectos y estudios de diferentes tipos, tamaños, áreas y objetivos:

cinco estudios de zonificación geotécnica de amenazas por inestabilidad de taludes y movimientos en masa; doce estudios centrados alrededor de la estabilidad de taludes naturales para vías, oleoductos, embalses, desarrollos urbanos, y diferentes componentes de

proyectos hidroeléctricos; y en dos estudios específicamente para túneles.

En el Cuadro 1 se presentan dichas aplicaciones y su grado de verificación posterior a los estudios en que se descubrieron por primera vez.

CUADRO 1
APLICACIONES DE LA METODOLOGIA DE TALUDES NATURALES (MTN)

Objeto	Items de Análisis, Parámetros Principales	(1)	Ref. (2)	Utilizable para:
Estabilidad de cortes, excavaciones y taludes naturales	<i>Aplicación Directa: (Fsr)</i> Parámetros de estabilidad de taludes. Altura potencial máxima. Anisotropía de la cohesión. Diferenciación y caracterización de suelos derivados.	V P P P	94b/261-265 94a/248-249 94a/249-252 94a/245-248	Cortes y excavaciones en todo tipo de proyectos de Ingeniería Civil. Minería a tajo abierto. Zonificación geotécnica cuantitativa. Taludes alrededor de un embalse.
	<i>Combinación convencional & MTN (Fs):</i> Parámetros geomecánicos pertinentes.	V	94b/258-259	
Obras subterráneas	Zonas de alto riesgo de infiltraciones anomalías altas de η . Tendencias de activación o desactivación de fallas (u). Diseño de soportes de techo (c, ϕ). Diseño de soportes temporales o permanentes (Md). Sectorización de las tasas relativas de excavación (η , ϕ y otros).	V P P P P	94c/274 94c/272, 273 94c/274-276 94c/274-276 94c/274	Túneles, cavernas, cámaras, etc.
Fundaciones	Capacidad de soporte; parámetros geomecánicos (u, γ , c, ϕ) pertinentes.	P	94b/258-259	Edificaciones, puentes, otros tipos de estructuras.
Construcción de obras civiles	Parámetros geomecánicos para la optimización de equipos de excavación y de explosivos (γ , c, $\tan\phi$, η).	P	94b/258-259	Uso más racional de equipos de excavación y explosivos.
Otros: Como Herramienta Auxiliar	Detección de ciertos rasgos geoestructurales*.	V	96a/1-38	Exploración geológica. Sismología para Ingeniería.
	Anomalías positivas de peso específico.	P	96a/28-29	Exploración para minerales pesados.
	Detección de ciertos rasgos geoestructurales*.	V	96a/1-38	
	Anomalías positivas de η y otros.	P	94c/274	Exploración para petróleos
	Detección de ciertos rasgos geoestructurales*.	V	96a/1-38	
	Anomalías de presurización en exceso ($\bar{u}$). Detección de ciertos rasgos geoestructurales*.	P V	96a/21-28 96a/1-38	Fuentes de agua artesiana. Geohidrología.

(1) V: Validado P: Posible

(2) Ver referencias (dos últimos dígitos del año/páginas números).

* Rasgos no detectados a veces por los métodos convencionales de exploración.

Parámetros Geoestructurales: c: cohesión ϕ : ángulo de fricción γ : peso unitario
 η : porosidad u: presurización Md: módulo de deformación

(Traducido de Shuk, 1998)

Además de la correspondiente al objeto de este trabajo, las aplicaciones de la MTN que se indican en el Cuadro 1 surgen de la posibilidad de una masiva cuantificación de los parámetros geomecánicos y de estabilidad de la MTN en una área dada de estudio; y de su consecuente herramienta analítica consistente en la elaboración de mapas de

curvas de isovalores (aritméticos o residuales) de cualquiera de estos parámetros (Shuk, 1994c, 1995a, y 1996a; Shuk y Universidad de los Andes, 1993). A su vez, esta herramienta permite la incorporación de los resultados de la MTN a programas de SIG.

Complementando lo relativo a la zonificación geotécnica, está la posibilidad del enlace de los parámetros probabilísticos de estabilidad con análisis de decisión económica, lo cual permite alcanzar un mayor grado de racionalidad y objetividad en la toma de decisiones relativas a la inestabilidad de taludes.

Finalmente, se debe destacar el papel que podría desempeñar la MTN en investigación aplicada y cuasi-básica: en Geotecnia y complementaria con varias ramas de la Geología, tales como: Geodinámica, Geohidrología, Geomorfología, Geotectónica, Geología Estructural y Física, e Ingeniería Geológica; y con la Mecánica de Sólidos y Resistencia de Materiales.

Para una hipotética igualdad de condiciones de cubrimiento y densidad de los datos y resultados obtenidos, la relación entre los costos de la MTN y los de las metodologías geotécnicas convencionales imperantes varía entre 1/1000 y 1/10000, según las circunstancias de cada caso; y el tiempo requerido para la terminación de un estudio dado empleando la MTN, es una fracción del que se necesitaría con alguna de esas metodologías convencionales.

2.2 Macrogeotecnia y Microgeotecnia

La MTN está inscrita dentro del marco conceptual de la Macrogeotecnia, la cual tiene características propias que contrastan con las de la Microgeotecnia y, a la vez, la complementan (Shuk, 1990).

En ciertas ramas del conocimiento los prefijos micro y macro se usan para designar dos dimensiones diferentes del análisis de una misma realidad. En este momento, la existencia simultánea de la Microgeotecnia y la Macrogeotecnia es evidente en toda la amplia gama del conjunto de publicaciones geotécnicas, aunque mucho más la de la primera, por constituir el marco conceptual básico y único durante casi todo el proceso de desarrollo de la Geotecnia, desde los comienzos de la Mecánica de Suelos, hasta tiempos relativamente recientes, en que la

Macrogeotecnia comienza a asomarse principalmente en los estudios de tipo regional para el mapeo y zonificación de riesgos por inestabilidad de taludes.

En el Cuadro 2 se describen algunas de las diferencias más significativas entre micro y macrogeotecnia, las cuales, a su vez, reflejan algunas de las potencialidades y limitaciones de cada una.

En este punto es necesario enfatizar que dentro del sentido conceptual utilizado en este texto, los prefijos micro y macro no tienen ninguna connotación de cantidad o magnitud relativa, ni de calidad, ya que la Microgeotecnia y la Macrogeotecnia forman parte de un continuo que abarca la misma y única realidad aún no lograda en la casi totalidad de los aspectos de la Geotecnia; y ninguna de las dos es mejor o superior a la otra.

Más bien, ambas son interdependientes e indispensables para llegar eventualmente a esa única realidad deseada, proceso que se aceleraría en la medida en que se incremente y permee en la práctica profesional una conciencia de la existencia simultánea de ambas y sus implicaciones. Entre estas últimas está la muy positiva del vasto campo de complementación y retroalimentación mutua.

Además de las diferencias conceptuales descritas en dicho cuadro, en algunos casos también se presentan diferencias entre los resultados empíricos de la Micro y Macrogeotecnia (ej.: subnumeral 3.4.6).

Todos los esfuerzos investigativos y de aplicación práctica de la MTN siempre han girado alrededor del propósito de beneficiar al máximo posible sus resultados, por medio de una fructífera integración entre estos dos campos conceptuales de la Geotecnia (Microgeotecnia y Macrogeotecnia) antes descritos, con base en su interrelación y retroalimentación mutua; y por medio del objetivo de alcanzar la mejor interpretación cuantitativa posible de los resultados producidos por los procesos masivos de adaptación de la naturaleza, - que bien pueden calificarse como masivos ensayos in-situ -, una parte de cuyo producto observable en cualquier momento está constituido por

los dos parámetros geométricos (L,H) de un proyección horizontal.
talud, donde H es su altura, y L su

CUADRO 2
MICROGEOTECNIA Y MACROGEOTECNIA

ASPECTOS	MICROGEOTECNIA	MACROGEOTECNIA
GENERALES: Aplicables a toda la Geotecnia.		
Dimensión	Micro.	Macro.
Población Objetivo	Individuo.	Grupo, familia, población y universo.
Dirección de visión	Del interior al exterior; de lo particular a lo general.	Del exterior al interior; de lo general a lo particular.
Proceso analítico	Prima el pensamiento inductivo. Base de datos estrecha. Análisis de casos.	Prima el pensamiento deductivo. Base de datos amplia. Análisis de grupos, poblaciones o universos.
Proceso histórico en la geotécnia	Unica directriz desde sus inicios hasta recientemente. Preeminente hasta hoy.	Aparece recientemente en estudios regionales de riesgo por inestabilidad de taludes.
ESPECIFICOS: Aplicables sólo al nicho conceptual de la Metodología de Taludes Naturales (MTN)		
Materiales	Denominación: SUELO Y ROCA.	Denominación: MATERIALES GEOLOGICOS.
	Propiedades y comportamientos diferentes, los cuales, -en la gran mayoría de los casos-, demandan metodologías analíticas distintas.	Suelos y rocas siguen las mismas leyes y no presentan diferencias de comportamientos; diferencias analíticas a niveles inferiores del modelo macro, de incidencia mínima.
Características de las discontinuidades de la masa	Esenciales en cada caso para determinar la estabilidad en rocas.	Sólo inciden los de mayor magnitud o los de significancia regional, y únicamente para el agrupamiento o diferenciación de unidades estadísticas.
Modo de falla	Varios modos de falla y cada uno tiene su análisis y formulación propios, que son esenciales para determinar la estabilidad.	Generalmente poca incidencia en el modelo macro; esta incidencia es algo mayor para los contrastes entre modos muy disímiles (ej.: deslizamiento vs. volcamiento).
Geometría de la superficie de falla	Varios tipos de geometrías y cada uno tiene su análisis y formulación propios, que son esenciales para determinar la estabilidad.	No incide en el modelo macro. Aparentemente una sola geometría promedia, configurada por los parámetros de la función L vs.H.
Mecanismo de falla	Varios tipos de mecanismos; esencial en cada caso para determinar la estabilidad.	No se requiere en el modelo macro, ni este lo puede determinar o explicar.
Condición de equilibrio limite	Esencial en cada caso para el análisis de estabilidad.	No opera ni incide en el modelo macro; alguno o algunos miembros individuales de una familia de taludes naturales pueden estar en esta condición.
Trabajos de campo y laboratorio.	Generalmente se requieren en todos los casos; en proyectos grandes pueden ser de mucha intensidad, costo y tiempo.	No se requieren, o sólo se necesitan para verificación de algunos aspectos y resultados.*

(Tomado de: Shuk, 1990; y revisado en Septiembre, 1995)

* Bajo el supuesto de la disponibilidad de una adecuada base de datos cartográficos y geológicos.

El análisis de los resultados de correlación de estos dos parámetros, y sus subsecuentes aplicaciones prácticas, se fundamentan en la Hipótesis Básica de Equilibrio (subnumeral 2.4.1) y en las relaciones de causalidad fisico-geomecánicas que subyacen dicha correlación, y que se tratan más adelante (numerales 2.5 y 3.3).

2.3 Base de Datos de la MTN.

Hasta el momento actual se han medido 5880 familias de taludes naturales en 298 poblaciones (formaciones o miembros geológicos) y subpoblaciones diferentes, que cubren un amplio rango de litologías (desde rocas cristalinas masivas de origen ígneo, pasando por rocas metamórficas y sedimentarias, hasta llegar a los suelos coluviales, residuales y depositados,

incluyendo arcillas marinas), y la gama completa de orígenes geológicos, de edades y clasificaciones de textura.

Extrapolando los resultados de los sistemas de medición aplicados simultáneamente en taludes individuales y en familias, estas 5880 familias pueden ser equivalentes a alrededor de 190000 taludes individuales. La mayor parte de la base de datos proviene de información obtenida en Colombia, y también incluye datos de taludes naturales en Canadá, Francia (Alpes Franceses), Hong Kong, Panamá (Canal de Panamá), España y en varias áreas del suroeste y oeste medio de los Estados Unidos.

2.4 Hipótesis de Trabajo de la MTN.

Los resultados obtenidos hasta ahora por medio de la MTN permiten formular las siguientes hipótesis de trabajo, que se presentan en el orden en que surgieron durante su desarrollo:

2.4.1 Hipótesis Básica de Equilibrio.

La función matemática que relaciona los parámetros geométricos (L y H) de la tendencia de pendientes promedias de cualquier familia (subnumeral 2.7.4) de taludes naturales, expresa una condición de equilibrio matemáticamente exacta con respecto al campo endógeno y exógeno de esfuerzos aplicados por la naturaleza, en el momento que corresponde a la fecha de la ejecución de los levantamientos topográficos que sirven de base para el plano topográfico sobre el cual se mide dicha familia.

Este equilibrio es temporal, pero puede ser de larga duración (desde 40 a 50 años, hasta un tiempo de escala geológica). Sin embargo los taludes individuales que conforman la familia medida pueden estar en equilibrio a un plazo más corto, más largo, o similar al de la familia; y uno o más de estos taludes individuales pueden inclusive estar en la así llamada "Condición de Equilibrio Límite" de la Microgeotecnia, sin que esto afecte los resultados de la MTN.

2.4.2 Hipótesis de la Velocidad Relativa del Proceso de Adaptación.

La velocidad del proceso de adaptación de una familia de taludes naturales, como respuesta a un conjunto o campo de esfuerzos exógenos y/o endógenos de la naturaleza cuya resultante produce condiciones de mejoría gradual en su masa de materiales geológicos, es significativamente más lenta que la que se produce como respuesta a la resultante de unas condiciones desfavorables graduales.

2.4.3 Hipótesis de la Brecha Permanente de Tiempo.

El estado del Proceso de Adaptación en el momento dado por la fecha de los levantamientos para el plano topográfico utilizado para la medición de una familia dada de taludes naturales, está reflejado en todos los casos por las magnitudes de aquellos parámetros de presurización, densidad & fase, resistencia y deformabilidad que moldean su morfología evidenciada en ese momento.

Pero, -por la anterior hipótesis de trabajo-, algunas de esas magnitudes (especialmente las de presurización) no representan en la fecha de su cuantificación por medio de la MTN el valor real y verificable en el terreno (por medio de sondeos, instrumentación, y/o ensayos, etc.) de esos mismos parámetros. Por lo tanto, la diferencia entre estos dos resultados siempre se debe a una brecha de tiempo que la subyace permanentemente.

Esta brecha desemboca en estimativos conservadores en el caso de regiones sujetas a solevantamiento tectónico donde las características geomecánicas mejoran con el tiempo, como es el caso generalmente en la Zona Andina de Colombia.

2.4.4 Hipótesis del Ecosistema de Memoria.

Si ocurre un evento catastrófico que afecta a uno (o a un grupo) de sus taludes individuales, una familia de taludes naturales

tiene la capacidad de conformar una especie de ecosistema de memoria en sus taludes individuales remanentes. Todos los indicadores de esta memoria forman parte del grupo de los parámetros de presurización (subnumeral 3.4.4).

Por los resultados obtenidos hasta ahora por medio de la MTN, estos indicadores permanecen evidentes entre más de 1000 años (en arcillas marinas depositadas), y más de 1000000 de años (en masas de rocas sanas); y sólo desaparecen en un tiempo muy corto (o casi inmediatamente) después de un evento catastrófico en depósitos de suelos muy predominantemente (o de casi totalmente a totalmente) granulares.

2.4.5 Hipótesis del Código Genético.

El elemento constitutivo (único, mayoritario, o promedio) de una masa rocosa, evidencia una especie de código genético que permite estimar algunos de los parámetros geomecánicos de los suelos que eventualmente se derivarían de dicha masa, bajo la forma de suelos residuales o coluviales.

2.4.6 Hipótesis del Angulo Básico de Fricción.

En masas rocosas y en el contexto de población (o subpoblación) de la MTN (subnumeral 2.7.2 y 2.7.3), el ángulo básico de fricción (ϕ_b) es una característica única, inherente (a la masa), estable e isotrópica, cuyo valor está determinado básicamente por el ángulo de fricción entre los minerales (ϕ_m) que componen la masa (Figura 6); y es independiente de la cohesión, de la presurización, y en general, del campo de esfuerzos exógeno y endógeno aplicado en forma permanente y masiva por la naturaleza.

El ángulo básico de fricción es igual para cualquier tendencia de pendientes dentro del Patrón Triangular de una formación rocosa, y su valor es similar al del ángulo de fricción residual efectivo de la masa rocosa ($\tan' \phi_{rm}$), pero solamente en el límite

inferior (subnumeral 3.3.5) de dicho patrón; y es un poco superior o inferior (3 a 5 %) al del ángulo de fricción residual obtenido por medio de ensayos de corte tipo Hoek y Bray (1977).

2.4.7 Hipótesis del Origen de los Taludes Naturales.

Todos los taludes naturales existentes en la actualidad se originaron inicialmente por eventos catastróficos inducidos por fenómenos relativamente puntuales, o de tipo gradual. El proceso de la falla de taludes naturales se repite en la Naturaleza un número indeterminado de veces hasta llegar a su configuración actual; y, - tarde o temprano -, todos y cada uno de los taludes naturales existentes fallarán.

2.4.8 Hipótesis del Grado de Fracturación de las Masas Rocosas.

Con la excepción de zonas locales alrededor de perturbaciones geológicas (intrusiones, fallas, etc.), el mayor factor determinante del grado de fracturación de una masa rocosa es la porosidad primaria de su elemento constitutivo; y, -después de sobrepasado el umbral de los esfuerzos de compresión relativamente pequeños requeridos para iniciar la propagación de las grietas de tensión postuladas por la teoría de Griffith para las fallas en materiales quebradizos -, el grado de su fracturación es independiente del nivel de los grandes esfuerzos geotectónicos de compresión impuestos por la Naturaleza.

2.5 Relaciones de Causalidad.

La MTN evidencia dos tipos de relaciones de causalidad para el grado "casi perfecto" del coeficiente de correlación que cuantifica la interrelación entre las dos dimensiones geométricas L y H de las mediciones de taludes naturales, y que desemboca en un valor promedio de 0.997 para las 5880 familias medidas hasta ahora; y en el caso de las subpoblaciones y poblaciones, puede bajar hasta 0.95 o menos.

El primero de estos tipos se denomina relación de causalidad de proceso, y se deriva a partir de las tasas relativas de crecimiento de dos dimensiones geométricas diferentes pero interdependientes (Shuk, 1999).

El segundo tipo corresponde a la relación de causalidad físico - geomecánica, cuya forma directa se trata someramente más adelante, pero solamente en lo relativo al Patrón Triangular (numeral 3.3), y que se explora en forma más amplia en el manuscrito básico de la MTN (Shuk, 1999).

Además de las relaciones de causalidad físico-geomecánicas que determinan directamente el Patrón Triangular, y su límite superior inicial o de origen (subnumeral 3.3.4), e inferior (subnumeral 3.3.5), los siguientes rasgos encontrados por medio de la MTN y de sus resultados cuantitativos, también sustentan en forma indirecta dichas relaciones de causalidad:

- su grado satisfactorio de identidad con los resultados empíricos y de estabilidad de la Microgeotecnia en los casos en que se han efectuado comparaciones, y algunos de sus resultados ya se han incluido en otros escritos (Shuk, 1994a y c). Las limitaciones de esta identidad satisfactoria se tratan más adelante (subnumeral 3.4.6);

- la replicabilidad de sus resultados en todos los niveles operacionales, analíticos y de medición de la MTN, con la excepción del proceso de delimitación de las familias, en donde aún faltan por convertir algunos pasos dados con base en decisiones de naturaleza subjetiva, a pasos de tipo objetivo;

- su identidad con la casi totalidad de los resultados esperados con base en los conceptos y criterios básicos de la Microgeotecnia convencional, tales como (por ejemplo) las relaciones inversas entre la resistencia y la presurización, y entre el peso unitario y la presurización; y, finalmente,

- su capacidad de discriminación y contraste frente a ciertas características y rasgos geológicos (litología, geoestructura y sus procesos formativos, geotectónicos, de mineralización secundaria y de fracturas o diaclasas, y otros). Esta capacidad de la MTN se describe con cierta amplitud en un escrito

anterior (Shuk, 1996a).

Todo lo anterior constituye la sustentación más fehaciente de que, por ahora, con los resultados de la MTN se logra una interpretación, - desde aceptable hasta buena -, de las posibilidades de cuantificación de los masivos ensayos in-situ de la Naturaleza; y que con las anteriores formas directas e indirectas de sus relaciones de causalidad físico - geomecánicas, se apuntala claramente la validez científica y técnica de la MTN.

2.6 Presurización y Despresurización.

Estos vocablos engloban todos los efectos de la presión del agua sobre la masa de materiales geológicos. Esta presión puede ser causada directamente por el agua, o el agua puede sólo ser un medio de transmisión. Como bien lo manifiestan los originadores del término "despresurización" (Hoek y Bray, 1977; p. 313), es la presión del agua y no su cantidad o volumen lo que afecta la masa; esto se manifiesta a veces dramáticamente, y con mecanismos detonantes en apariencia insignificantes, que pueden surgir a causa de la fenomenología del "bloqueo del alivio de presiones".

Por una parte, la presurización positiva incluye las siguientes condiciones desfavorables para la masa: presiones de filtración, y excesos de presión (por encima de la tabla de agua o de la superficie del terreno) producidos por uno (o por la combinación) de los siguientes fenómenos: eventos catastróficos del pasado, condición artesiana, bloqueo del alivio de presiones, deformaciones imperceptibles de índole tectónica, bolsas de gas a presión y otros; y por otra parte, la presurización negativa origina la condición favorable de presiones de succión. Sin embargo, y bajo ciertas condiciones tales como las que se presentan en la Zona Andina de Colombia, esta favorabilidad puede ser engañosa.

La despresurización, en un sentido puntual o corto en el tiempo, se refiere generalmente a las soluciones ingenieriles para la reducción de los efectos de la

presurización positiva nocivos para la masa; y en un sentido gradual (o continuo), al proceso de reducción de la presurización positiva aducible a ciertos procesos de adaptación de la masa, como los que pueden ocurrir, - entre otros -, en áreas de solevantamiento geotectónico, de retroceso de glaciares y de relajación de esfuerzos.

2.7 Niveles Operacionales, Analíticos y de Medición de la MTN.

A continuación se presentan los niveles operacionales, analíticos y de medición de taludes naturales: universo, población, subpoblación y familia.

Además de la utilización de todos estos niveles para propósitos de zonificación geotécnica, que se ilustran más adelante en varias figuras, otro ejemplo de la utilización de todos estos niveles se presenta en un escrito que trata sobre la caracterización geomecánica y de estabilidad del gran corte requerido para la casa de máquinas del Proyecto Urrá-1 (Shuk, 1994a).

2.7.1 Universo.

Está constituido por todos los taludes naturales localizados y medidos dentro de un área o zona dada de estudio.

2.7.2 Población.

El marco operacional del término "población" se aparta del significado técnico utilizado por la Estadística. En el contexto de la MTN se utiliza para denominar los taludes naturales medidos dentro de una sola categoría o unidad geológica de igual composición litológica (homogénea, estratificada o mezclada) edad y origen, y que corresponde a una categoría geológica no mayor a la de una "formación", o en ciertos casos, a la de un "miembro".

2.7.3 Subpoblación.

Una formación geológica (o miembro) de gran extensión puede contener un número de

zonas geomorfológicas claramente diferenciadas; o, en zonas de actividad geotectónica manifiesta, dentro del área cubierta por una formación se pueden presentar un número de zonas con rasgos estructurales determinantemente diferentes, tales como fallas de cierta incidencia.

Estas, y otras posibles condiciones, pueden afectar los resultados de la Metodología de Taludes Naturales y su adecuado análisis; y las divisiones o agrupaciones delimitadas dentro del área cubierta por la población que resulten de las anteriores u otras consideraciones pertinentes, se denominan subpoblaciones.

Este nivel de subpoblación también puede requerirse cuando una misma formación geológica aflora en dos o más zonas no cercanas dentro de un área dada de estudio, o de una región.

2.7.4 Familia.

Es el conjunto de taludes naturales individuales ubicado dentro de un área delimitada por mediciones de una misma direccionalidad (generalmente perpendicular a la dirección general de las curvas de nivel). Dentro de una misma población o subpoblación, dos áreas delimitadas y medidas con la misma direccionalidad pero alejadas entre sí, o contiguas pero con diferentes pendientes topográficas promedias, constituyen dos familias diferentes (Figura 3).

2.8 Información Requerida por la MTN.

La información requerida como mínimo para las mediciones de familias de taludes naturales es de dos tipos: topográfica, para la medición en sí, y geológica para la delimitación de las poblaciones y subpoblaciones de taludes naturales.

2.8.1 Información Topográfica.

Los planos topográficos deben ser una fiel representación de la realidad física, o sea que deben tener un grado adecuado de precisión.

Los requerimientos de intervalos entre curvas de nivel están ligados a las escalas de los planos topográficos; y la Regla General, aplicable a todo tipo de proyectos y estudios basados en la medición de taludes naturales, es la siguiente: el intervalo entre las curvas de nivel no debe exceder de un quinto de la altura límite (H_{LD}) máxima de la familia (o de las familias) de taludes naturales a medirse.

En términos generales, la escala ideal para la zonificación geotécnica de masas rocosas en la Zona Andina del país es de 1:10000, con intervalos de 10 m entre curvas de nivel; y en el caso de formaciones rocosas con una expresión morfológica abrupta, y con prevalencias de alturas límites (H_{LD}) mayores de 150 m, se puede utilizar una escala de 1:25000 con intervalos de 25 m entre curvas de nivel.

En los casos en que el área objeto de la zonificación está constituida por materiales degradados y desagregados (residuales, coluviones, terrazas, etc.), el intervalo entre curvas de nivel debe ser menor, y acorde con los requerimientos de la Regla General.

La carencia de planos topográficos de escalas e intervalos adecuados entre curvas de nivel de muchas áreas de Colombia, es una de las mayores limitantes para la aplicación de la MTN en zonificación geotécnica. Sin embargo, el costo de las restituciones requeridas en esas áreas, generalmente solo equivaldría a los costos de un número muy pequeño de perforaciones, de las muchas cuya utilización se puede evitar por medio de la MTN.

2.8.2 Información Geológica.

La información geológica mínima e indispensable para el análisis por medio de taludes naturales consiste en la descripción y delimitación de formaciones geológicas, - y en algunos casos, de miembros geológicos -, donde formación y miembro son categorías de igual origen, edad y composición litológica (homogénea, estratificada o mezclada); y para muchos tipos de proyectos, - y más para zonificación geotécnica -, también se requieren los trazos de los rasgos

estructurales importantes tales como plegamientos, discontinuidades mayores y fallas. Estas informaciones se pueden encontrar usualmente en los mapas geológicos y las publicaciones geológicas disponibles.

2.8.3 Información Complementaria.

Esta clase de información es útil para comparar y/o verificar los resultados obtenidos por medio de la MTN, y para profundizar en sus disposiciones, tendencias y patrones; y para guiar su revisión y modificación:

- información geológica específica: información más detallada sobre rasgos geoestructurales, descripciones litológicas más completas, resultados de levantamientos de diaclasas y geohidrología, etc.;
- información geomorfológica: adicional a la contenida en los mapas topográficos; e
- información geotécnica: resultados de las exploraciones de campo (sondeos, apiques, trincheras, galerías de exploración, etc.) y de los ensayos de laboratorio e in-situ.

En ciertas situaciones, también pueden resultar útiles otros tipos de información y de resultados, especialmente los relacionados con el clima, la pluviosidad y la sismicidad en una área de estudio.

3. HERRAMIENTAS ANALITICAS DE LA MTN PARA ZONIFICACION GEOTECNICA

A continuación se presentan aquellas herramientas analíticas de la MTN que se utilizan específicamente para las labores de zonificación geotécnica.

En este punto es importante reiterar que, -a diferencia de las metodologías convencionales cualitativas o semi-cuantitativas de zonificación-, la MTN logra resultados cuantitativos con una densidad (por unidad de área) de cubrimiento muy superior a la de cualquiera de las metodologías convencionales, y con unos

plazos de ejecución y costos significativamente inferiores a los de dichas metodologías.

3.1 Sistemas de Medición de Taludes Naturales.

A nivel de familia, las mediciones de taludes naturales desembocan en resultados constituidos por tres tipos de funciones de correlación (figuras 1 y 2), - todos con

coeficientes de correlación sensiblemente idénticos y que pueden considerarse como "casi perfectos" -, y por otros parámetros estadísticos y de caracterización. Los más importantes de estos últimos parámetros están constituidos por la altura límite superior de la familia (H_{LD}); de la población (H_{LP} - Figura 5) o del universo (H_{LU} - Figuras 26 y 27).

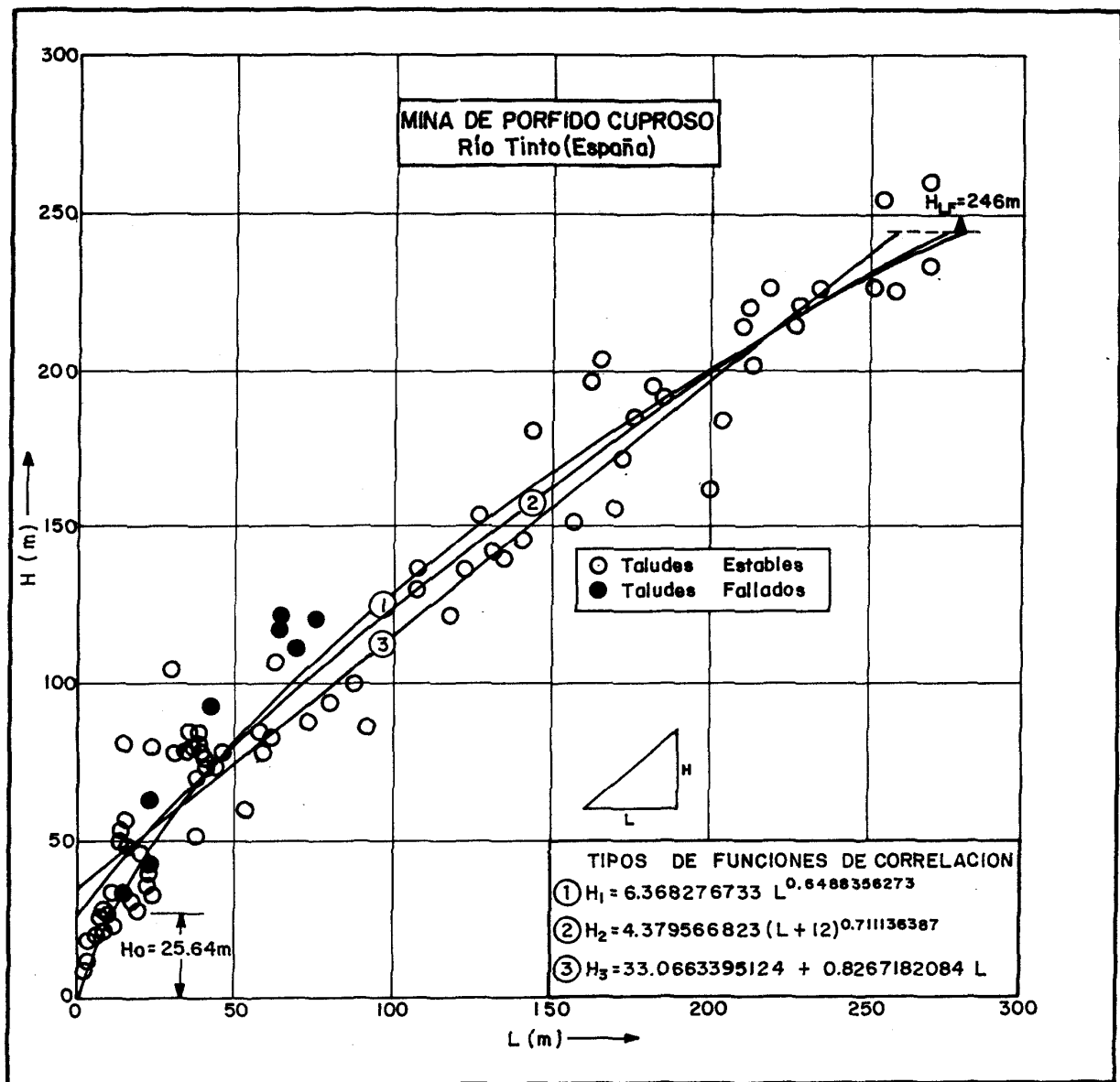


Figura 1 - Tipos de Funciones de Correlación-Pórfido Cuproso, Río Tinto, España. (Mediciones de Hoek y Bray, 1977; p. 171)

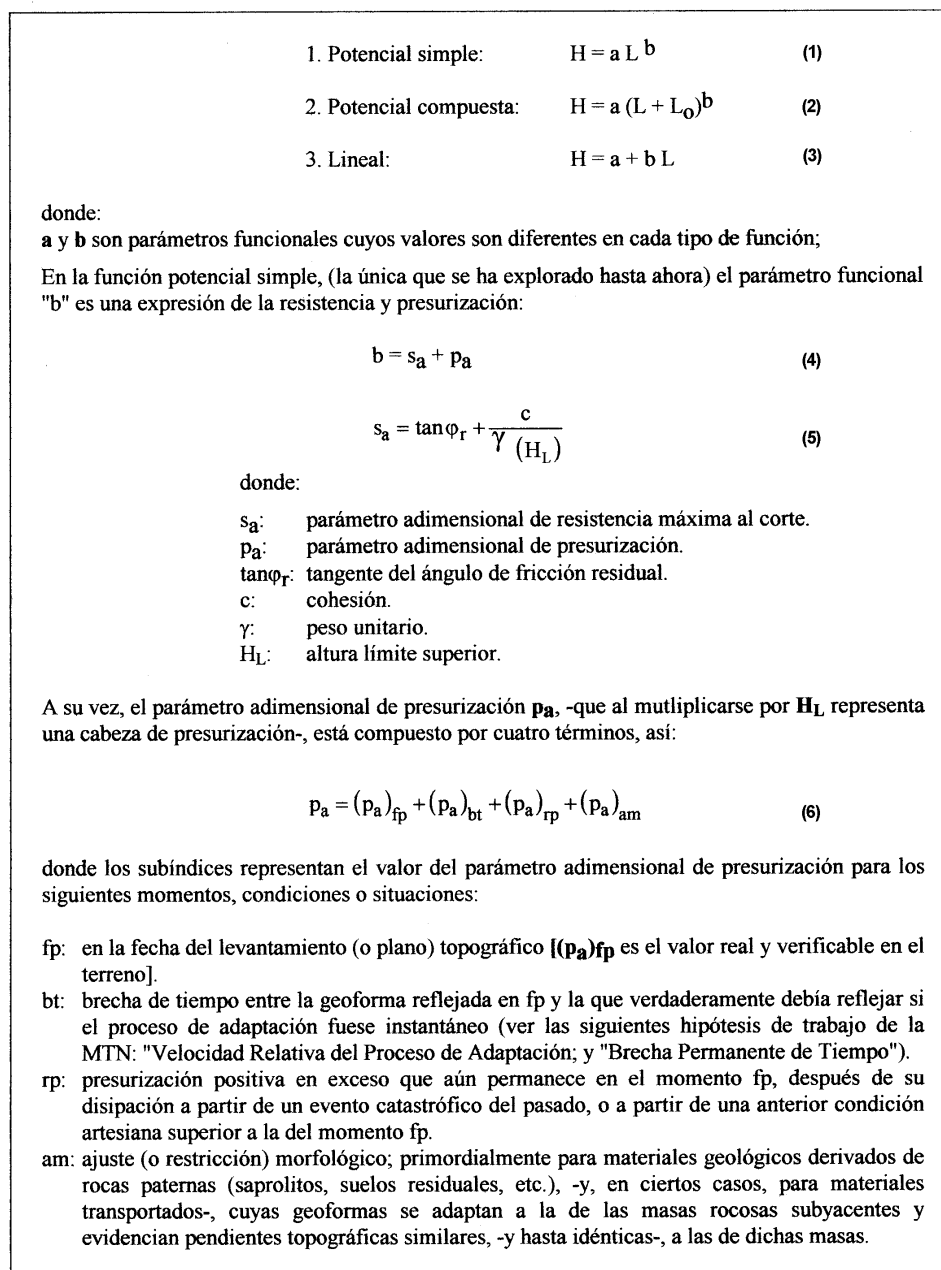


Figura 2 - Funciones de Correlación L vs. H y las Expresiones Matemáticas de sus Factores Geomecánicos Causales (Tomado de: Shuk, 1995b)

De esta tres funciones solo se ha analizado y utilizado la primera (Ecuación 1) para todo el desarrollo de la MTN; y esto impone ciertas restricciones, -por cuanto esta función arranca a partir del origen (0,0) de la relación L vs. H-, una de las cuales se ejemplifica por medio de la Figura 16.

Debido a que la Ecuación 2 presenta un intercepto (O,c) sobre el eje origen de las abscisas, -lo cual constituye un reflejo de la cohesión (c) de la masa-, en el futuro esta expresión potencial compuesta debería constituirse en la función básica de la MTN.

Esto implicaría la necesidad de repetir todo el desarrollo investigativo ya efectuado con base en la función potencial simple (Ecuación 1) y eliminaría las restricciones antes mencionadas.

Los tres primeros sistemas de medición que se describen a continuación: Taludes Enteros (TE), Facetas de Taludes (FT) y Taludes Enteros de Pendientes Máximas (TEPX), se refieren a aquellos utilizados por otros autores, o por el autor del presente trabajo, antes del desarrollo del sistema de medición SCICN, el cual se describe de

último (subnumeral 3.1.4). Estos sistemas siempre se aplicaron para taludes individuales, con el fin de delinear la gráfica de estabilidad de una formación geológica, o para establecer su función de correlación L vs. H.

A pesar de que el concepto de "familia de taludes naturales" es muy reciente, - y por lo tanto no fue utilizado en las mediciones de otros autores -, los primeros tres sistemas también pueden aplicarse en todos los niveles de medición de la MTN, incluyendo el nivel de familia.

3.1.1 Taludes Enteros (TE).

En este sistema se mide cada talud desde su pata hasta su cresta, sin incluir zonas de depósitos de materiales foráneos. Por la misma naturaleza del sistema de medición TE, su grado de representatividad de la variabilidad in-situ es errático y depende de las características de los taludes escogidos para su medición. Es decir, depende significativamente de un componente de naturaleza subjetiva inherente a la persona que efectúa las mediciones.

3.1.2 Facetas de Taludes (FT).

Con este sistema, que fue utilizado por el autor en sus primeros trabajos (Shuk, 1968 y 1970), se miden las facetas rectilíneas no cubiertas por materiales foráneos y que abarcan un número de curvas de nivel de pendiente o gradiente topográfica similar; y simula las variaciones entre taludes individuales de diferentes geometrías, localizados en las zonas supuestamente más representativas, sanas y resistentes de una ladera.

3.1.3 Taludes Enteros de Pendientes Máximas (TEPX).

Este fue el sistema de medición utilizado por McMahon (1976) para las formaciones geológicas que analizó, y sus resultados son asimilables a los que se obtienen en la MTN

a nivel de población (o subpoblación) para las tendencias actuales de pendientes máximas del patrón triangular (subnumeral 3.3.4)

3.1.4 Secuencial Cumulativo de Intervalos de Curvas de Nivel (SCICN).

Para la utilización de este sistema de medición, - el cual es aplicable solamente a nivel de familia, y que se ilustra en la Figura 3 -, se parte de la curva de nivel inferior o mínima dentro de la delimitación para una familia dada, y se mide todo el intervalo entre esta y la siguiente curva de nivel superior, buscando solamente dos distancias perpendiculares entre los dos intervalos: la mínima y la máxima. Estas últimas corresponden respectivamente a las pendientes máxima y mínima. Luego se obtiene el promedio aritmético de estas dos, el cual corresponde a la distancia o pendiente promedio. Se registran las tres distancias, que constituyen tres valores de L para este primer intervalo, y que corresponden a un valor único de H.

Como paso siguiente, se parte de la misma curva de nivel inferior o mínima, pero esta vez cubriendo dos intervalos de curvas de nivel, y se anotan los tres valores de L correspondientes a un solo H, cuyo valor para los dos intervalos es el doble del de la primera medición; y así sucesivamente, hasta llegar a cubrir todos los intervalos entre la curva de nivel inferior o mínima, y la última superior dentro de la delimitación de la familia.

El valor de la altura límite superior de la familia (H_{LD}), - que es fundamental para la determinación y el enmarcamiento del Patrón Triangular (numeral 3.3) y el cálculo de los parámetros geomecánicos y de estabilidad de la MTN -, está dado en algunos casos por esa última medición (Figura 3) o, en otros, por la altura resultante de la diferencia entre el punto superior de la delimitación de la familia y la curva de nivel inferior o mínima.

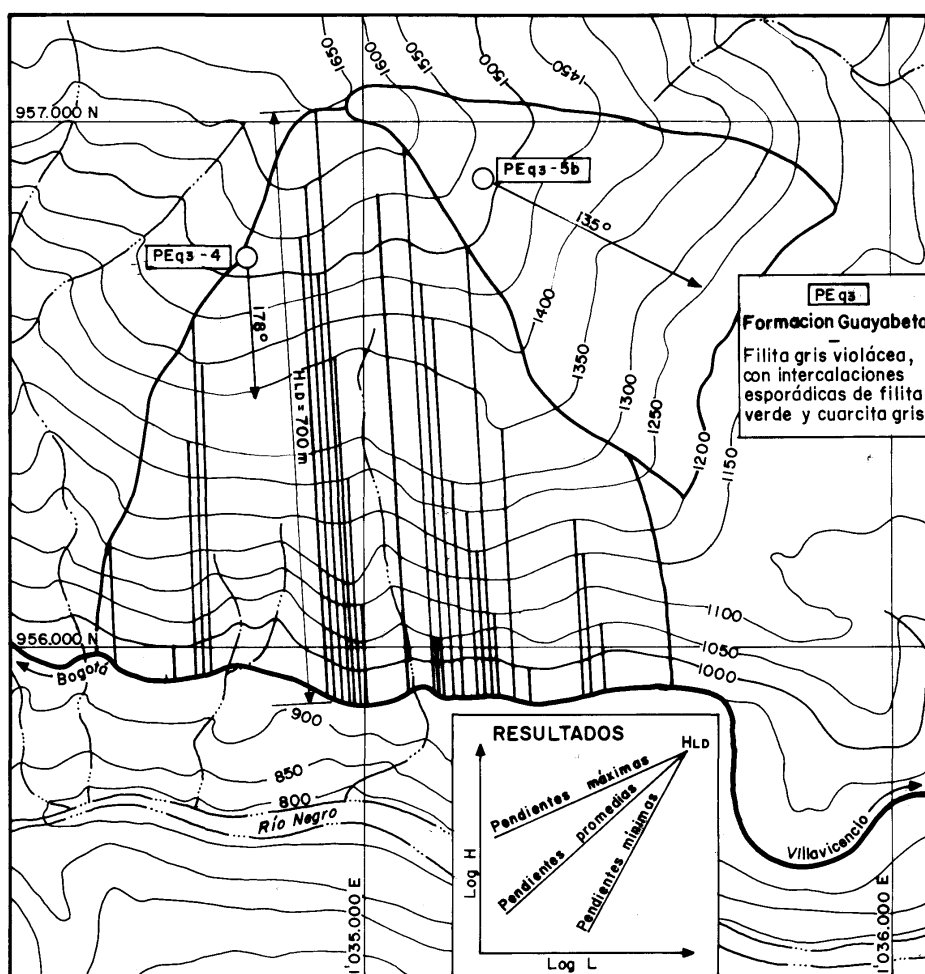


Figura 3 - Sistema SCICN de Medición de Familias de Taludes Naturales.- Formación Guayabetal (Peq-3, Paleozoico); Carretera Bogotá – Villavicencio (Tomado de: Shuk, 1995b)

3.2 Sistema de Medición SCICN en Familias con Delimitación.

Dado que, - en cualquiera de los tres primeros sistemas descritos de medición (subnumerales 3.1.1, 3.1.2 y 3.1.3) -, el número de mediciones dentro de una zona dada depende en un alto grado de factores subjetivos, y que este rasgo no permite establecer áreas representativas de los resultados, se creó y desarrolló el concepto de "familias con delimitación", en conjunto y simultáneamente con el sistema de medición SCICN.

Los siguientes son los rasgos más pertinentes de las "familias con delimitación":

- la delimitación de cada familia de taludes naturales, - efectuada según las nociones introductorias que se presentan en el siguiente subnumeral -, le confiere un

grado adecuado de representatividad de las propiedades geomecánicas y de estabilidad dentro del área comprendida por la delimitación. Esta representatividad permite la preparación de mapas de isovalores aritméticos o residuales de los parámetros geomecánicos y de estabilidad, con cada valor representado en el centroide de su correspondiente área de delimitación;

- el área de la delimitación puede corresponder a toda una ladera natural, - como en el caso de la familia Peq 3-4 de la Figura 3 -, lo cual desemboca en la mejor representatividad posible; o, a zonas que conforman partes de laderas naturales (familia Peq3-5b), en cuyo caso cada una de estas zonas configura una unidad de representatividad de las propiedades geomecánicas y de estabilidad, y que es diferente a la de las otras zonas dentro de una misma ladera natural; y,

- dicha área de delimitación cubre un microcosmos de facetas de taludes, o de taludes individuales enteros o parciales; y, a la vez, cobija un microcosmos de pendientes máximas y pendientes mínimas. Este último rasgo, que se puede apreciar como un patrón triangular en el recuadro inferior derecho de la Figura 3, se repite en forma idéntica en todos los niveles de medición de la MTN y es evidente en toda la amplia gama de los materiales geológicos, desde las rocas más duras, hasta los suelos más blandos.

La Figura 3 no sólo muestra el esquema básico de las mediciones por medio del sistema SCICN, sino que también ilustra algunos conceptos de direccionalidad (azimut) de medición y delimitación de familias de taludes naturales. También aclara el hecho de que las líneas que marcan las dos distancias L medidas para el primero de los intervalos, no tiene que corresponder a la misma localización de las líneas para el siguiente cubrimiento de dos intervalos, y así sucesivamente.

3.2.1 Nociones Introductorias sobre la Delimitación de Familias de Taludes Naturales.

El tema de la delimitación de familias de taludes naturales es de gran importancia por cuanto la calidad, la reproducibilidad, la consistencia y la capacidad discriminante de los parámetros cuantitativos determinados a nivel de familia por medio de la MTN dependen significativamente de que la delimitación se efectúe en una forma apropiada.

Los criterios principales para una área de delimitación adecuada de una familia de taludes naturales, algunos de los cuales se ilustran en la Figura 3, son los siguientes:

- el área comprendida por la delimitación presenta un relativo paralelismo de las curvas de nivel, y su gradiente topográfica no varía bruscamente; la direccionalidad o azimut de las mediciones es perpendicular a la dirección predominante de dicho paralelismo; y

- no incluye accidentes topográficos tales como cuchillas, filos, hondonadas, bajos, prominencias, etc.;

- ni accidentes hidrográficos y geomorfológicos tales como zanjas, cauces o canales pequeños, barrancos, cárcavas, etc.;

- ni tampoco incluye zonas de materiales foráneos a los de la familia delimitada. Esto puede o no comprender material transportado (coluvión, derrumbes, etc.), de acuerdo al material constitutivo de la familia y al propósito de su medición.

Si los accidentes topográficos, geomorfológicos e hidrográficos no están marcados en el plano topográfico, se pueden detectar usualmente por cambios moderados a bruscos de las tendencias de dirección de las curvas de nivel y de las pendientes topográficas; y las zonas de materiales foráneos generalmente se pueden identificar por cambios moderados a bruscos de la pendiente topográfica, y que se desvían del contexto de la forma básica (convexa, cuasi-linear o cóncava) del área de delimitación.

3.2.2 Cubrimiento Total de las Mediciones de Taludes Naturales.

Este aspecto es de importancia para la planeación de las mediciones de las familias de taludes naturales. En algunos casos, tales como: los de estudios regionales; proyectos de localización, trazado o corredores de vías, canales y oleoductos; y túneles y otras obras subterráneas, etc. (o cuando se persigue el mayor conocimiento posible de una o más formaciones geológicas), siempre es aconsejable utilizar todas las familias medibles existentes dentro de una área dada de estudio, obteniendo así un "cubrimiento total de las familias medibles".

Las familias medibles son aquellas que están constituidas por los materiales geológicos objeto de un estudio y cuyo número de curvas de nivel, - entre su cota inferior y su punto de máxima altura (H_{LD}) se ajusta a lo estipulado en la Regla General (subnumeral 2.8.1).

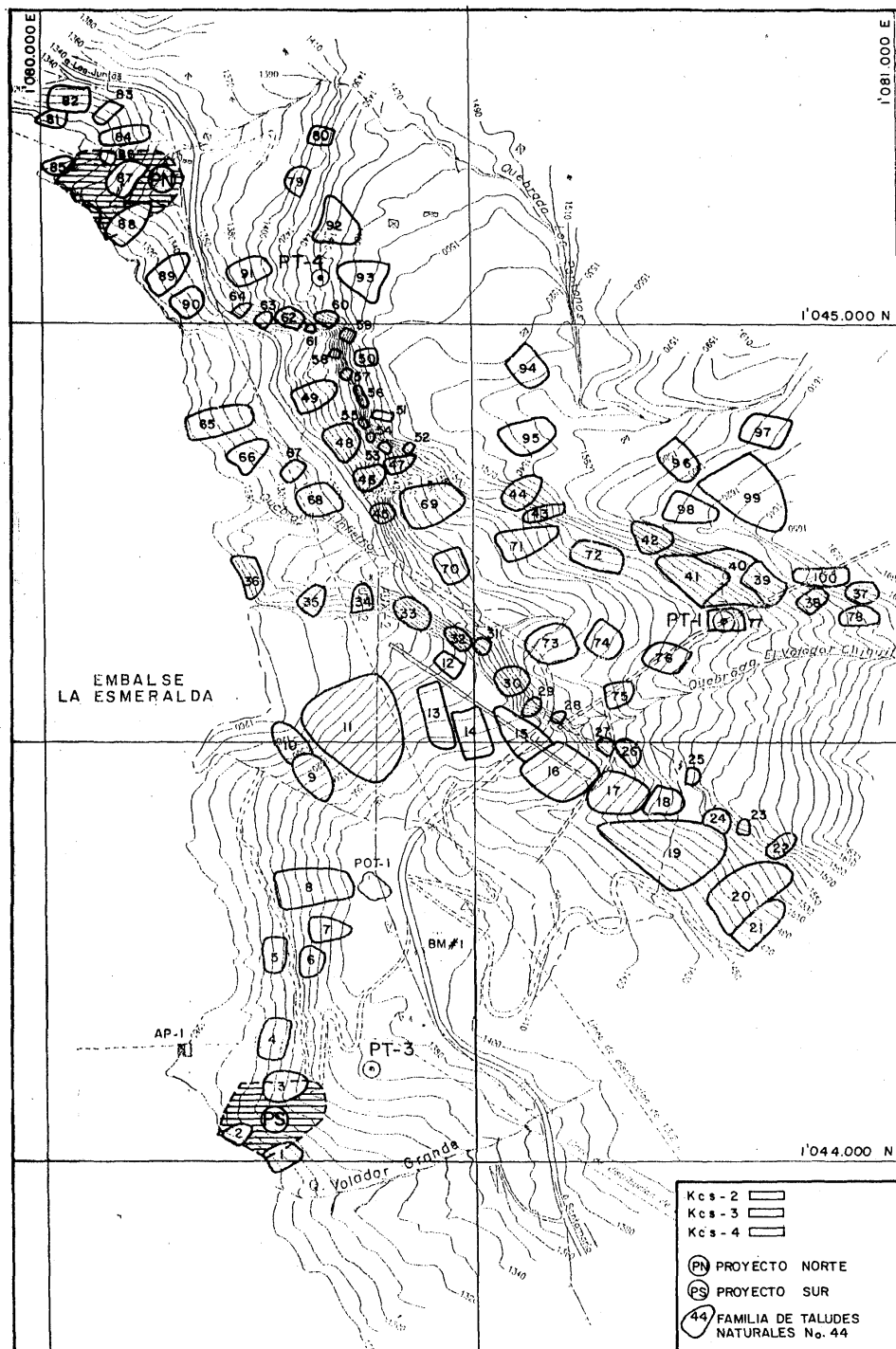


Figura 4 - Cubrimiento Total de las Mediciones de Familias. Alternativas para una Casa de Máquinas, Proyecto Hidroeléctrico del Río Tunjita; Garagoa y Macanal, Boyacá (Tomado de: Shuk, 1995b)

En la Figura 4 se ilustra el "cubrimiento total" del área para las dos alternativas de ubicación de una casa de máquinas del Proyecto Hidroeléctrico del Río Tunjita. Los espacios en blanco que se pueden observar en esta figura corresponden a zonas en donde no se encuentran "familias

medibles", bien porque no se pueden cumplir los criterios para una adecuada delimitación de las familias (subnumeral 3.2.1), o no corresponden a rocas (los objetivos no contemplaban la medición de suelos); o, - por no disponer de suficientes curvas de nivel entre su base y su tope - no se ajustan a las

exigencias de la MTN en cuanto a escalas e intervalos entre curvas de nivel (subnumeral 2.8.1).

En otros casos, y generalmente debido a limitaciones de tiempo y recursos, es necesario efectuar un muestreo de los taludes naturales a medirse.

3.2.3 Muestreo Sesgado de las Familias de Taludes Naturales a Medirse.

Aunque, presumiblemente, en algunos casos de estudios regionales se podrían aplicar estrictamente las técnicas estadísticas de tipo aleatorio para la escogencia o muestreo de las familias a medirse dentro de cada subpoblación, población, o universo, en general, y en todos los tipos de proyectos que se ejecutan con muestreo, dicho muestreo depende de los objetivos del estudio y del número de familias medibles; y, en consecuencia, se constituye en un "muestreo sesgado". Por lo tanto, y dentro del contexto del cubrimiento de mediciones de taludes naturales de la MTN, el término "muestreo" generalmente no tiene ninguna relación con la connotación derivada de las metodologías estadísticas.

En otro escrito (Shuk y González, 1993) se ilustran los muestreos sesgados para el caso de la carretera Bogotá-Villavicencio y del Area de Desastre de Utica. En el caso de la Carretera Bogotá - Villavicencio solo se midieron las familias a lado y lado de la vía, y sin tratar de definir las poblaciones a las cuales pertenecen.

Para el estudio del Area de Desastre de Utica, - cuyo plano de localización de familias se presenta más adelante (Figura 21) -, el énfasis de las mediciones se concentró en las familias constituidas por coluviones que podrían causar una repetición de la avalancha que afectó el casco urbano de esta población, y en las mediciones estrictamente necesarias para definir aproximadamente las características geomecánicas de las poblaciones de roca subyacentes al área de interés.

3.2.4 Ventajas de la Combinación "Familias con Delimitación & Sistema SCICN".

Además de la ventaja de la representatividad expuesta anteriormente, los siguientes aspectos cualitativos permiten concluir que, - al nivel de familia de taludes naturales -, la "familia con delimitación", en combinación con el sistema de medición SCICN, tiene características superiores a las de los otros tres sistemas de medición antes mencionados (subnumerales 3.1.1, 3.1.2 y 3.1.3).

- La "familia con delimitación", ligada al sistema de medición SCICN de la MTN, representa un nivel novedoso de conceptualización, y que, - entre otros -, permite:

- obtener un mejor agrupamiento, clasificación y categorización de los resultados geomecánicos y de estabilidad de taludes naturales;

- lograr una mejor conceptualización de la variabilidad in-situ de los materiales geológicos. Los resultados de las mediciones de las pendientes máximas y mínimas en cada familia (recuadro inferior derecho de la Figura 3) enmarcan la variabilidad real (subnumerales 3.3.9 y 4.6.2) de los agrupamientos de taludes naturales en cualquier nivel de medición de la MTN.

- eludir o trascender la necesidad de considerar la condición de "equilibrio límite", que en el pasado se constituyó en la más frecuente, válida y contundente crítica contra los análisis y metodologías de estabilidad basados en taludes naturales individuales. En el contexto de una familia de taludes naturales, uno o más de los taludes individuales que la componen pueden estar en la condición de "equilibrio límite", sin que esto afecte los resultados, análisis y las aplicaciones prácticas de la MTN (subnumeral 2.4.1).

- conseguir una mejoría notable (con respecto al de los otros sistemas de medición) en el grado de ajuste de la distribución marginal de probabilidades de las variables L y H con una distribución teórica de probabilidades lognormales; y, para finalizar,

- obtener, a nivel de familia, coeficientes de correlación promedios del

orden de 0.997, los cuales se pueden considerar como "casi perfectos"; y que necesariamente implican la existencia de una relación de causalidad físico-geomecánica para explicar la interrelación entre los parámetros geométricos L y H.

- El sistema SCICN contiene menos componentes de naturaleza subjetiva que cualquiera de los otros tres sistemas de medición ya descritos (subnumerales 3.1.1, 3.1.2 y 3.1.3), y por lo que se vislumbra con respecto a estos componentes subjetivos que aún subsisten en el momento presente, todos se podrían convertir en componentes de tipo objetivo. Por lo tanto, el sistema de medición SCICN es el más indicado para una eventual automatización por medio de programas computarizados de algún algoritmo para sistemas de información geográfica (SIG).

Por todas estas razones, y exceptuando un número pequeño de situaciones particulares, -entre otras, las que se originan por la necesidad de complementar los resultados de alguna tendencia de pendientes (máxima, mínima o promedia) -, el sistema de medición SCICN (con base en la "familia con delimitación") es casi el único utilizado en la actualidad para lograr los resultados de la MTN al nivel de familia de taludes naturales.

3.3 Patrón Triangular.

Según se puede apreciar en la Figura 3 (recuadro inferior derecho) los resultados del sistema de medición SCICN desembocan en tres tipos de tendencias de pendientes, y las dos extremas (superior e inferior) delimitan lo que se denomina como "Patrón Triangular". Este patrón también se evidencia en los niveles de medición superiores al de familia (subpoblación, población y universo); y además, este Patrón Triangular delimita en forma adecuada la variabilidad real de los agrupamientos de taludes naturales en cualquier nivel de medición, cuya

tendencia, -comprobable en la Naturaleza-, es la de la disminución de la variabilidad a medida que aumenta la magnitud de L o H (subnumeral 4.6.2).

Para el cálculo de los parámetros geomecánicos y de estabilidad se utiliza únicamente la función de correlación correspondiente a la tendencia de pendientes promedias (logarítmicas), pero para los análisis que requieran métodos probabilísticos se toman en cuenta los límites de variabilidad por medio de las dos funciones extremas que configuran un Patrón Triangular (solamente en papel logarítmico), y que corresponden a las tendencias de pendientes máximas y mínimas.

El Patrón Triangular se presenta en todas las posibilidades de la amplia gama de composiciones litológicas, edades, orígenes y texturas de los materiales geológicos, desde las rocas duras y resistentes, hasta los suelos más blandos tales como las arcillas marinas. Esta forma triangular solo se aprecia si los resultados de dichas mediciones se grafican en escala log-log (papel logarítmico).

3.3.1 Factores Causales del Patrón Triangular.

En la Figura 5 se ilustran varios rasgos de este patrón, entre ellos los límites superior e inferior del Patrón Triangular Actual (al momento del levantamiento topográfico), que, - en cualquier nivel operacional, analítico y de medición de la MTN -, corresponden respectivamente a la actual tendencia de pendientes máximas, y a la tendencia de pendientes mínimas.

El Patrón Triangular conformado de esta manera corresponde a un modelo determinístico dado por unas relaciones de causalidad físico - geomecánicas, y gobernadas por las siguientes propiedades físicas de la masa de materiales rocosos, algunas de las cuales se ilustran en la misma Figura 5:

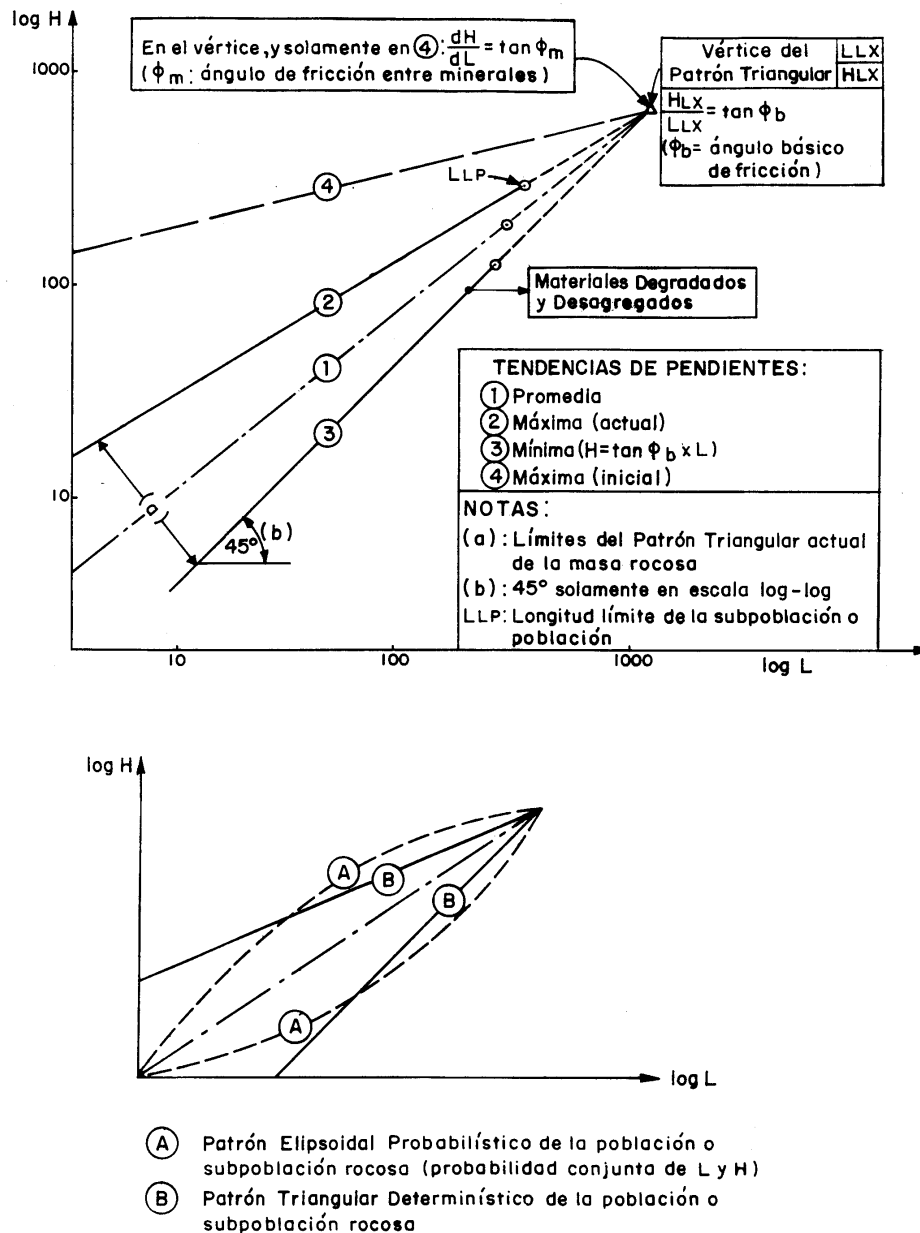


Figura 5- Rasgos del Patrón Triangular (Determinístico) y de su Coexistencia Simultánea con el Patrón Elipsoidal (Probabilístico) (Tomado de: Shuk, 1995b)

- el ángulo de fricción entre los minerales (ϕ_m) determinantes de dicha masa, y que gobierna la disposición de la tendencia de pendientes máximas del Patrón Triangular Inicial (o de origen) de la Figura 5; y la derivada (dH/dL) de su intersección (extrapolada) con el vértice del Patrón Triangular;

- el ángulo básico de fricción (ϕ_b), cuyo símil empírico corresponde al que actúa sobre las dos caras opuestas de las diaclasas de una masa rocosa, y cuyo valor es siempre el mismo para cualquiera de las muchas posibles tendencias de pendientes del Patrón

Triangular, -incluyendo la máxima (inicial y actual), promedia y mínima-, y que es igual al ángulo de fricción residual efectivo (para la condición de la masa).

En rocas, ϕ_b evidencia un rango de variación entre 25° (lutitas) y 37° (granitos, areniscas duras). A su vez, - y dentro del rango de presurización positiva -, dicho valor puede ser un poco superior o inferior (3 a 5%) al del ángulo de fricción residual que se puede determinar por medio de ensayos de corte directo tipo Hoek y Bray (1977).

El ángulo básico de fricción, determina la ubicación del límite inferior del Patrón

Triangular; y su intersección con las tendencias inicial y/o actual de pendientes máximas determina las coordenadas (L_{LX} , H_{LX}) de su vértice;

- la cohesión y su variabilidad, tanto inherente a la roca constitutiva de la masa en sí y a las condiciones y características de su cementante, como inducida (principalmente por fenómenos de origen tectónico), todo lo cual se refleja, entre otros, en su alto grado de anisotropía direccional y se plasma en una menor o mayor amplitud del Patrón Triangular; y, finalmente,

- unos factores compuestos relacionados con la edad y la evolución de una masa rocosa, tales como los grados actualmente evidenciados de degradación, desagregación y variabilidad que evidencia dicha masa. Estos factores determinan la posición relativa del Patrón Triangular Actual con relación al espacio total entre la tendencia de pendientes máximas inicial (o de origen) y su límite inferior.

Pero el modelo determinístico descrito, causal del Patrón Triangular, coexiste simultáneamente con un patrón elipsoidal de origen probabilístico gobernado por la probabilidad conjunta de las dos variables geométricas L y H .

Esta coexistencia simultánea, también ilustrada en la misma Figura 5 (gráfica inferior), - que determina la disposición y distribución de los resultados de las mediciones de L y H -, no es exclusiva del campo de los taludes naturales, puesto que también se presenta en otros tipos de fenómenos físicos tales como el Movimiento Browniano de los gases, para los cuales, - y a partir del comportamiento probabilístico de las colisiones entre sus partículas -, se derivó una ley determinística.

3.3.2 Angulo Básico de Fricción (ϕ_b).

El valor de este ángulo, - que define el límite inferior del Patrón Triangular -, se estima con base en la convergencia de un proceso de iteración cuya resultante es la Envoluta Hipotética (subnumeral 3.4.2) OP, y su

expresión matemática es de tipo potencial simple, así:

$$H = (a)_{op} \left(L^{\tan \phi_b} \right) \quad (7)$$

y su representación paramétrica es la siguiente:

$$(L_{LF})_{op} = L_{LP} \quad (8)$$

$$(a)_{op} = \frac{(H_{LF})_{op}}{(L_{LP})^{\tan \phi_b}} \quad (9)$$

$$(pa)_{op} = \tan \phi_b - (sa)_{op} = 0 \quad (10)$$

$$\tan \phi_b = (sa)_{op} \quad (11)$$

donde:

L_{LF} ,: longitud y altura límite (superior) para H_{LF} una función potencial simple dada, que relaciona L y H .

L_{LP} : longitud límite (superior) de la subpoblación o población objeto del Patrón Triangular; y, en muchos casos (pero no en todos), corresponde al punto de máxima altura (H_{LP}) dentro de ese patrón.

pa : parámetro adimensional de presurización (Figura 1).

sa : parámetro adimensional de resistencia máxima al corte (Figura 1), cuya expresión matemática para este caso se presenta al final de este subnumeral.

El objeto de la iteración no solo es el de estimar el valor de $\tan \phi_b$, sino también el de lograr que su función potencial simple, - como una función de expresión similar a la de cualquier tendencia de pendientes del Patrón Triangular -, también interseque su vértice. Los pasos de esta iteración son los siguientes:

1. Iniciar con un valor supuesto para $\tan \phi_b$. Dado su rango posible de valores (0.48 a 0.70), se puede utilizar, por ejemplo, un valor de $\tan \phi_b = 0.6$;

1. Para cualquier ciclo de iteración ($n = 1, 2, \dots$), y con base en los parámetros funcionales a y b de cualquier tendencia de pendientes determinada por medio de una correlación (generalmente se utiliza la de las pendientes máximas actuales), se estiman los parámetros $(L_{LX})_n$ y $(H_{LX})_n$ del vértice, así:

$$(L_{LX})_n = \left[\frac{a}{\tan \phi_b} \right] \left[\frac{1}{1-b} \right] \quad (12)$$

$$(H_{LX})_n = a(L_{LX})_n^b \quad (13)$$

3. A partir de este punto, se desarrollan los siguientes cálculos para el resto de un ciclo dado (n) de iteración:

$$(\tan \phi_b)_n = \frac{(H_{LX})_n}{(L_{LX})_n} \quad (14)$$

$$(b)_n = (\tan \phi_b)_n \quad (15)$$

$$(a)_n = \frac{(H_{LX})_n}{(L_{LX})_n^{(\tan \phi_b)_n}} \quad (16)$$

$$(L_{LF})_n = (L_{LP}) \quad (17)$$

$$(H_{LF})_n = (a)_n (L_{LP})^{(b)_n} \quad (18)$$

$$(\tan \beta_{LF})_n = \frac{(H_{LF})_n}{(L_{LF})_n} \quad (19)$$

y si $(\tan \beta_{LF})_n^{(b)_n}$ se representa por "T", entonces:

$$(s_a)_n = \left(T^{(1-T+((b)_n T))} \right) \left(b_n^{2b_n - b_n^2} \right) \quad (20)$$

y si: $(s_a)_n \neq (\tan \phi_b)_n$, se procede al siguiente ciclo de iteración ($n+1$), utilizando la $(\tan \phi_b)_n$ obtenida; y así sucesivamente.

3.3.3 Angulo de Fricción entre Minerales (ϕ_m).

La tangente de este ángulo, - en combinación con el valor de $\tan \phi_b$ -, define el parámetro funcional b de la tendencia de pendientes máximas inicial (o de origen); y también se obtiene por un proceso que desemboca en la Envoluta Hipotética (subnumeral 3.4.2) OF y cuya función para cada ciclo (n) de iteración es la siguiente:

$$p_a = b - \left(T^{(1-T+(bT))} \right) \left(b^{(2b-b^2)} \right), \text{ con:} \quad (21)$$

$$T = (\tan \beta_{LF})^b \quad (22)$$

$$b = \left(\frac{\tan \phi_b + 1}{2} \right) \quad (23)$$

y el resultado que se busca es:

$p_a = (p_a)_x$, en cuyo caso:
 $\tan \phi_m = \tan \beta_{LF}$ resultante, y

donde:

$(p_a)_x$: valor máximo del parámetro adimensional de presurización para cualquier envoluta potencial simple de la MTN = $(b+1)/(b+2)$

Para el primer ciclo de iteración ($n = 1$), se puede suponer un valor de $\tan \phi_m = 0.1$; o se puede utilizar el resultado para $\tan \phi_m$ indicado por la función de correlación de la Figura 6 con base en una $\tan \phi_b$ ya calculada.

En esta figura se ilustra la relación entre $\tan \phi_m$ y $\tan \phi_b$ con base en las anteriores iteraciones para 28 poblaciones de diversas regiones del país ubicadas en las cordilleras Central y Oriental de nuestra Zona Andina, y otras en Europa y Estados Unidos.

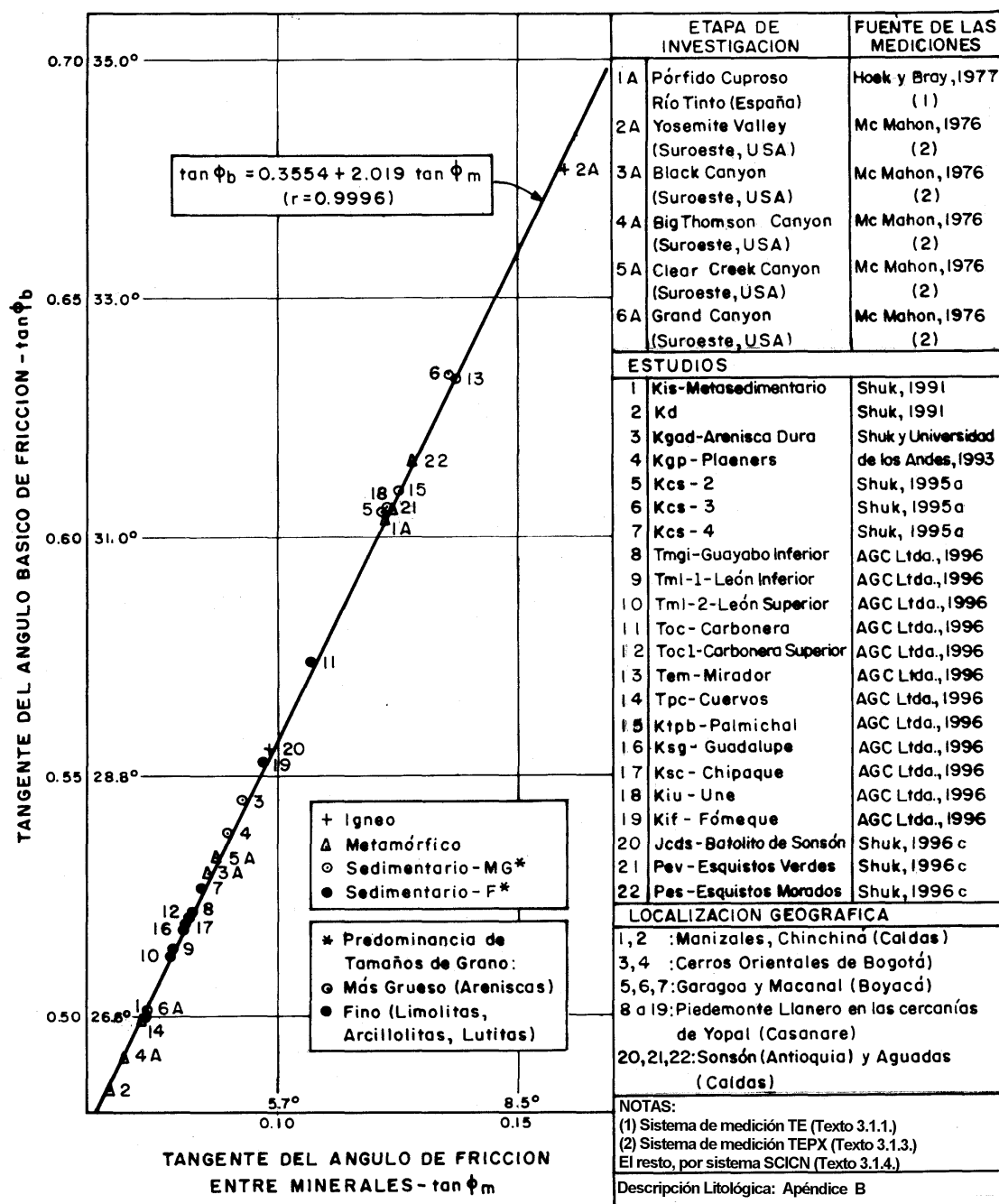


Figura 6 - Relación entre la Tangente del Angulo de Fricción entre Minerales ($\tan \phi_m$) y la Tangente de Angulo Básico de Fricción ($\tan \phi_b$) (Tomado de: Shuk, 1996b)

Tal como se puede apreciar en esta figura, dicha relación es única y funciona para cualquier tipo de roca independientemente de su litología, edad, origen, textura, o su localización geográfica; y además evidencia un grado de correlación (r) "casi perfecto"

Sin embargo, debe advertirse que es posible que la respectiva función de correlación no represente correctamente la realidad física de la relación entre $\tan \phi_m$ y

$\tan \phi_b$ y, por ahora, solo se debe usar para el rango de valores de los resultados de la Figura 6.

La unicidad del grado de determinación de $\tan \phi_b$ por parte de $\tan \phi_m$ ya ha sido sugerida por otros investigadores como Jaeger, Byerlee y otros (citados en: McMahon, 1976), y se constata por medio de los resultados de esta Figura 6;

Además, el mismo McMahon (1976) observó que la intersección de las funciones

potenciales simples (extrapoladas) de agrupamientos de las tendencias de pendientes máximas de diferentes tipos de rocas (desde granitos masivos hasta lutitas expansivas), ocurre en un punto cuya tangente (H/L) tiene un valor algo superior a (tal como se muestra en la Figura 7), que se

ubica dentro del rango de valores de $\tan \phi_m$ comprobados experimentalmente -, y enunció la posibilidad de una relación entre esas tendencias y dicho ángulo de fricción entre minerales.

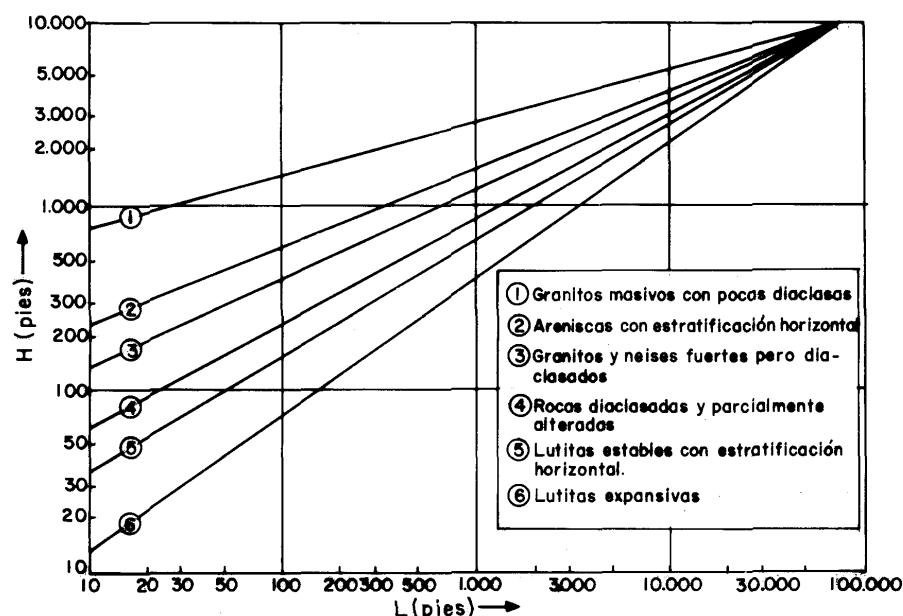


Figura 7 - Extrapolación de los Límites Superiores para Varios Agrupamientos de Taludes Naturales Constituidos por Diferentes Clases de Roca (Tomado de: McMahon, 1976)

También es destacable el hecho que se aprecia en esta Figura 6 referente a los tamaños de grano de las rocas: en términos generales, y a medida que este tamaño es mayor, los dos ángulos de fricción (básico y entre minerales) también son mayores.

3.3.4 Límite Superior Actual e Inicial del Patrón Triangular.

Este límite superior está dado por los siguientes resultados para los dos tipos de tendencias de pendientes máximas de la Figura 5:

- Tendencia Actual de Pendientes Máximas: en el caso de una familia de taludes naturales, su función potencial simple resulta de la correlación entre los puntos (L,H) de las pendientes máximas medidos por el sistema SCICN (subnumeral 3.1.4); y en el nivel de subpoblación, población o universo, su función potencial simple se obtiene por medio de la correlación entre los

puntos de mayor valor de H_{LD} y que, a la vez, reflejen los mayores valores de $\tan \beta_{LD}$, - obtenidos a partir de las parejas L_{LD} & H_{LD} de cada familia que compone un nivel dado de análisis -, y que evidencien un valor muy alto de su coeficiente de correlación.

Usualmente, se escoge un número muy pequeño de estos puntos (pero no menos de tres) con el fin de que dicho coeficiente resulte lo más alto posible; y su expresión potencial simple es:

$$H = a_a \left(L^{b_a} \right) \text{ donde:} \quad (24a)$$

$$b_a : 0.5 - 0.9, \text{ y } a_a : > 1.0$$

- Tendencia Inicial (o de origen) de Pendientes Máximas: este tipo de tendencia sólo se utiliza a nivel de subpoblación o población y su importancia radica en que los Parámetros de Caracterización de la Masa (subnumeral 3.3.9), - cuyos estimativos

parten de esta tendencia inicial (o de origen) de las pendientes máximas -, solo se pueden estimar con base en sus resultados. La expresión matemática que representa esta tendencia de pendientes es la siguiente:

$$H = a_x (L^{b_x}), \text{ y:} \quad (24b)$$

$$b_x < 0.5 \text{ (usualmente)} = \frac{\tan \phi_m}{\tan \phi_b}, \text{ y:}$$

$$a_x = \frac{H_{LX}}{L_{LX}^{b_x}} \text{ (significativamente } > 1.0 \text{)}$$

3.3.5 Límite Inferior del Patrón Triangular.

En el caso de rocas, este límite, que corresponde a la tendencia de pendientes mínimas en los niveles de subpoblación y población, casi siempre está representada por una recta de 45° en escala log-log (papel logarítmico); y su expresión matemática está determinada por:

$$H = (\tan \phi_b)(L) \quad (25)$$

Las excepciones a la representación de este límite con base en $\tan \phi_b$ están constituidas por casos tales como los granitos de Yosemite Valley, los neises de Black Canyon, Big Thompson Canyon y de Clear Creek Canyon (todos en U.S.A.) y el Pórfido Cuproso de Río Tinto y cuyos estados evolutivos actuales, junto con el del Miembro Geológico Kcs-3 (ilustrado en la Figura 9), abarcan las gráficas A, B y C de la Figura 8, en los que los puntos (L_{LD}, H_{LD}) no se extienden hasta la recta representativa de $\tan \phi_b$.

Si el muestreo de los taludes fue del tipo de "cubrimiento total" (subnumeral 3.2.2), la función potencial simple del límite inferior y sus parámetros funcionales (a_m, b_m) se obtienen por medio de la correlación de aquellos de sus puntos que están ubicados más hacia la derecha del promedio, con la condición de que la función así determinada también debe intersectar el vértice del Patrón Triangular respectivo.

En el caso del nivel de universo, dicho límite inferior corresponde a una recta (solo en papel logarítmico) que representa una función potencial simple y que pasa por el último (o últimos) puntos en el extremo derecho de los resultados (L_{LD}, H_{LD}); y esta recta tiene que intersectar el vértice del Patrón Triangular para la parte de roca. Con estas dos condiciones, y solamente si hay una presencia significativa de materiales degradados y desagregados (figuras 26 y 27), se puede determinar la ecuación para dicha función, que presenta la siguiente forma:

$$H = a_i L^{b_i} \quad (26)$$

$$a_i < 1.0, \text{ y } b_i > 1.0$$

Cabe anotar en este punto, que es solamente a lo largo del límite inferior (determinado por medio de $\tan \phi_b$) del Patrón Triangular de una roca (nivel subpoblación o población) que se cumple la siguiente identidad:

$$\tan' \phi_{rm} = \tan \phi_b$$

donde:

ϕ'_{rm} : ángulo de fricción residual efectivo de la masa.

En una subpoblación o población que agrupa una masa rocosa dada, y cuyo estado evolutivo está representado por los gráficos D y E de la Figura 8, la importancia de este límite inferior radica en que separa la roca de los materiales degradados y desagregados, - caracterizados por una cohesión baja a insignificante -, y cuya naturaleza se describe someramente en el subnumeral siguiente. A nivel de familia, los materiales desagregados se pueden identificar por medio del parámetro X_{LH} , así:

$$X_{LH} = a^{\frac{1}{1-b}} < 1.0 \quad (27)$$

Esta función, que corresponde realmente a la envoluta hipotética HEA de la Figura 13 representa la intersección de una recta ($L =$

H) de 45° con la tendencia potencial simple de las pendientes promedias de una familia.

A nivel de una subpoblación o población realmente constituida por rocas, el valor de X_{LH} siempre es mayor que 1.0. Pero, en ciertos casos, puede ocurrir que una o varias familias, - ubicadas dentro del Patrón Triangular de una roca dada -, evidencian un valor de X_{LH} menor de 1.0, lo cual se debe al control morfológico ejercido por la roca subyacente al material desagregado y lo hace adoptar la misma geoforma de ésta.

Este tipo de material se califica simplemente como desagregado, mientras que las familias cuyos puntos (L_{LD}, H_{LD}) están ubicados a la derecha del límite inferior del Patrón Triangular (figuras 5 y 8) se agrupan bajo el calificativo de materiales degradados y desagregados; y estos se tratan en seguida.

3.3.6 Materiales Degradados y Desagregados.

Estos materiales pueden ser rocas de más a muy fracturadas, - como puede ocurrir preferencialmente en uno de los dos bloques opuestos de una falla geológica, y con lo cual se puede determinar cual de los dos bloques estuvo sujeto a los procesos de mayor intensidad geodinámica -, o estar constituidos por materiales conglomeráticos y mezclas de fragmentos de roca y suelo, por secuencias de materiales derivados de una misma roca paterna (transiciones roca - suelo, saprolitos, residuales maduros, coluviones), o por materiales transportados y foráneos a la población analizada.

3.3.7 Vértice del Patrón Triangular.

Es el punto de intersección de los límites superior e inferior del Patrón Triangular. Si, a nivel de población o subpoblación de la MTN, la delimitación del Patrón Triangular ha sido efectuada en una forma apropiada, y si la conformación y la delimitación (contactos) de una formación geológica dada se han establecido correctamente, entonces el parámetro que define la altura del vértice de su Patrón Triangular " H_{LX} " en la Figura 5

generalmente corresponde al espesor estratigráfico de esa formación.

Este rasgo del Patrón Triangular tiene un significado importante en la exploración geológica para varios tipos de propósitos prácticos, por cuanto la rapidez con que se puede determinar el espesor estratigráfico por medio de la MTN en la oficina, excede ampliamente la de los levantamientos geológicos convencionales en el campo requeridos para su medición; y, además, este espesor se puede particularizar para cualquier área dada de estudio.

3.3.8 Tendencia de Pendientes Promedias.

Esta es la tendencia de pendientes más importante del Patrón Triangular para los estimativos de los parámetros geomecánicos y de estabilidad, por cuanto todos estos estimativos parten de ella; y para su definición, - en el nivel de subpoblación o población de rocas -, se presentan dos tipos de casos diferentes:

- en el caso de un cubrimiento total de las familias medibles (subnumeral 3.2.2), la correspondiente función potencial simple debe intersectar el vértice (L_{LX}, H_{LX}) del Patrón Triangular (figuras 4 y 7) y pasar por el punto $\bar{L}_{LD}, \bar{H}_{LD}$ que representa el promedio (logarítmico) para todas las familias que pertenecen a ese nivel, pero solamente para las de la parte del Patrón Triangular que corresponde a la roca; y

- en el caso de un muestreo sesgado (subnumeral 3.2.3) de las familias medibles, los parámetros funcionales de la tendencia de pendientes promedias (a_p, b_p) están representados por las siguientes expresiones:

$$a_p = \log^{-1} \frac{(\log a_x) + (\log \tan \phi_b)}{2} \quad (28)$$

$$b_p = \frac{(b_x + 1)}{2} \quad (29)$$

En el nivel de universo, -e independientemente de su tipo de cubrimiento-, es preferible utilizar siempre esta última forma de definir la función

potencial simple para la tendencia de pendientes promedias en la parte del Patrón Triangular correspondiente a las rocas.

Pero para obtener la función promedio que sirve de base para el estimativo del Factor de Seguridad Relativo (Fsr, numeral 4.3), las expresiones son:

$$a_p = \log^{-1} \frac{(\log a_i) + (\log a_a)}{2} \quad (30)$$

$$b_p = \frac{(b_i + b_a)}{2} \quad (31)$$

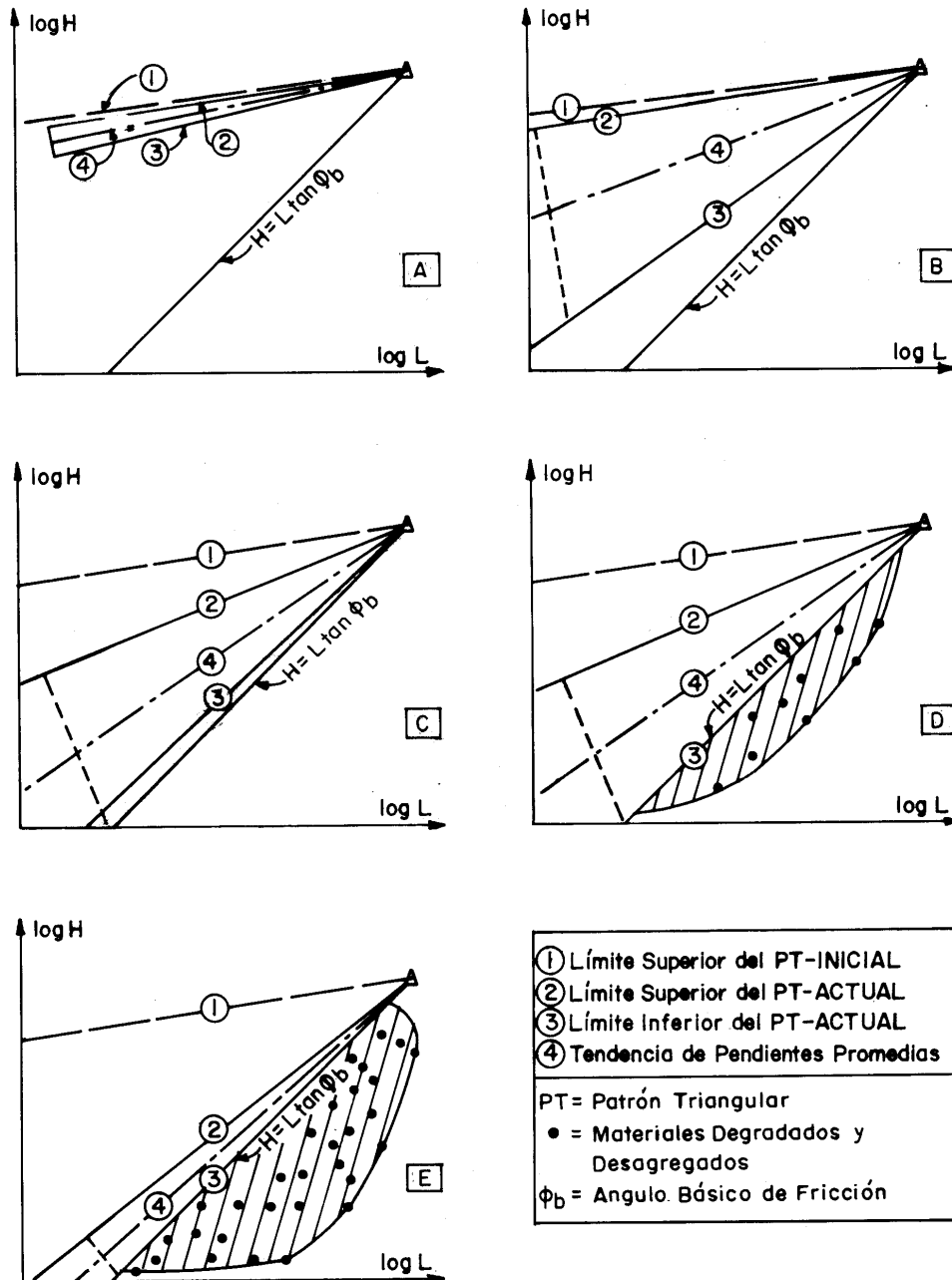


Figura 8 - Evolución del Patrón Triangular de una Subpoblación o Población – Características de Degradación, Desagregación y Variabilidad (Tomado de: Shuk, 1996b)

3.3.9 Parámetros de Caracterización de la Masa Rocosa: Degradación, Desagregación y Variabilidad.

Para los materiales geológicos analizados a niveles superiores al de la familia

(subpoblación, población o universo), - y según lo antes mencionado (subnumeral 3.3.1) -, estos tres factores causales de naturaleza compuesta y relacionados con su edad, con los procesos evolutivos a los que han estado sujetos y con su variabilidad, determinan la posición relativa y la amplitud de su Patrón Triangular Actual, con respecto al espacio total de su Patrón Triangular Inicial (o de origen).

Para ilustrar estos conceptos, en la Figura 8 se traza esquemáticamente la evolución del Patrón Triangular, - desde su estado de roca masiva, hasta el de una roca casi totalmente degradada y desagregada -, pasando por varias etapas intermedias de diferentes características de degradación, desagregación y variabilidad.

La primera gráfica (8A) de esta figura corresponde a masas rocosas en las que la tendencia actual de pendientes máximas ha girado hacia abajo en una forma mínima con respecto a su tendencia inicial (o de origen) de pendientes máximas; y representa una masa rocosa de un grado casi insignificante de degradación y de variabilidad, y con una

desagregación nula. Los rasgos mostrados en esta gráfica pueden corresponder a casos reales de rocas duras, cristalinas y masivas, tales como el granito de Yosemite Valley (mediciones por medio del Sistema TEPX en: McMahon, 1976), ubicado en la zona suroeste de los Estados Unidos.

La gráfica 8B, - que representa un giro mínimo, similar al de la gráfica 8^a -, corresponde a una roca de un grado relativamente bajo de degradación y con un grado nulo de desagregación, pero con una variabilidad mayor a mucho mayor que la de la gráfica 8A.

En las tres últimas gráficas (C, D y E) de la Figura 8, se ilustran unos casos en los que la tendencia actual de pendientes máximas se aleja de la tendencia de pendientes máxima inicial, situación que marca el grado de degradación de una masa rocosa, dependiendo de la lejanía de la actual tendencia máxima de pendientes con respecto a la inicial. Estos tipos de casos son los de mayor prevalencia en la Zona Andina de Colombia.

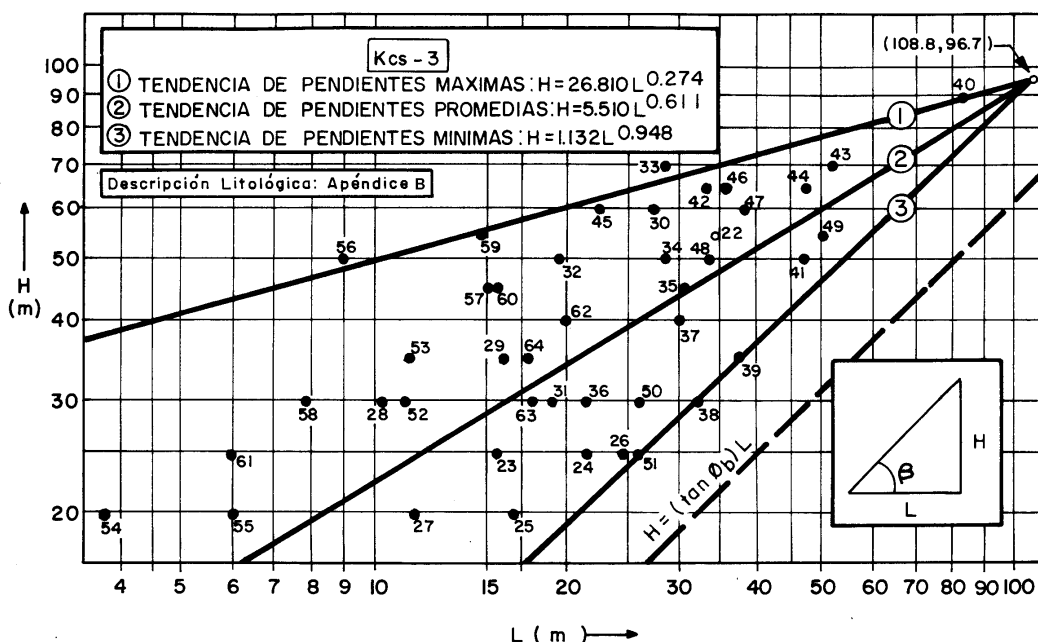


Figura 9 - Patrón Triangular del Miembro Geológico Kcs-3 de la Formación Cáqueza Superior; Proyecto Hidroeléctrico del Río Tunjita; Garagoa y Macanal, Boyacá (Tomado de: Shuk, 1995b)

El caso ilustrado por la gráfica 8C corresponde a masas rocosas de un grado de degradación bajo a medio y con una desagregación nula; y corresponde a las

características del pórfido cuproso de Río Tinto, España (mediciones por medio del Sistema TE en: Hoek y Bray, 1977), o a las del Miembro Geológico Kcs-3 ilustradas por

medio del Patrón Triangular de la Figura 9, cuyos taludes naturales se midieron en una área que rodea el portal de salida del túnel de trasvase del Proyecto Hidroeléctrico del Río Tunjita (Shuk, 1995a), y su descripción litológica se presenta en el Apéndice B.

En la gráfica 8D, donde la tendencia actual de pendientes máximas del Patrón Triangular se aleja más de la inicial (o de origen) que en la gráfica 8C, - indicando así un mayor grado de degradación -, ya se comienzan a evidenciar resultados de las mediciones ubicados a la derecha del límite inferior del Patrón Triangular, los cuales representan materiales degradados y desagregados.

La última gráfica (E) de la Figura 8 ilustra un grado alto a muy alto de degradación y un grado de desagregación mayor que el de la gráfica anterior (8D). Estas características corresponden a las del Miembro Superior de la Formación Carbonera (Toc 1), de la Figura 10.

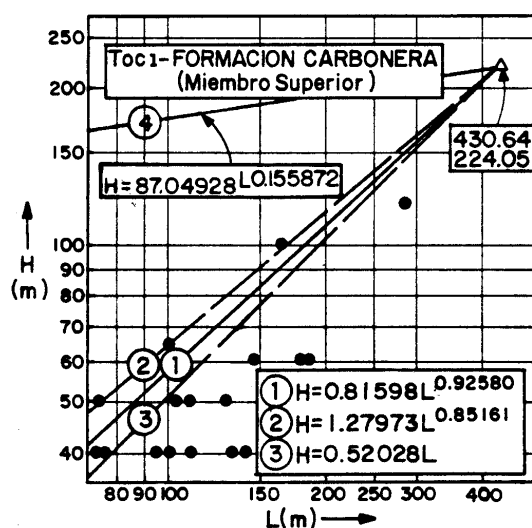


Figura 10 - Patrón Triangular del Miembro Superior Toc-1 de la Formación Carbonera; Bloque DELE-1; Yopal, Casanare (Tomado de: Shuk, 1996b)

Los resultados de este miembro geológico, - que se midió en una área de estudio para una primera etapa de zonificación de amenaza geotécnica en el así denominado Bloque DELE - 1, ubicada en el Piedemonte Llanero de la Cordillera Oriental de Colombia, y en las cercanías de Yopal -,

ejemplifican un grado casi total de degradación y desagregación, y una variabilidad mínima. (Análisis Geotécnicos Colombianos Ltda., 1996).

Con respecto a las características de variabilidad, representadas por la amplitud del Patrón Triangular Actual de la roca, resulta obvio que, - en el caso de las rocas sedimentarias -, aquellas que presentan litologías mezcladas o interestratificadas y de diversos tamaños de grano constitutivos, como en el caso del miembro Kcs-3 (Figura 9), evidencian una mayor variabilidad que las que están compuestas predominantemente por un solo tipo de tamaño de grano (fino), tales como el Toc 1 (Figura 10).

Las tres características (degradación, desagregación y variabilidad) tratadas bajo este encabezamiento, se pueden cuantificar por medio del Patrón Priangular de la MTN y, en efecto, ellas constituyen los Parámetros de Caracterización de la Masa.

Un ejemplo de este tipo de cuantificación se presenta en el Cuadro 3 para las trece unidades litoestratigráficas de la ya citada área de estudio del Bloque DELE - 1 en el Piedemonte Llanero; y en las notas de este cuadro se explican las formas de su cuantificación.

Dentro de dicha área de estudio, de una caracterización geotectónica compleja, y a la luz de la discriminación de la predominancia de uno u otro tipo de tamaño de grano (fino, o más grueso) que se muestra más adelante en la Figura 27, - inferida con base solamente en la información geológica disponible y sin verificación de campo -, en términos generales se puede apreciar que los valores de los parámetros de degradación y de desagregación son mayores en las unidades litoestratigráficas en que priman los tamaños de grano fino (y sus resultados de variabilidad son menores), que en aquellas unidades en las que predominan los tamaños de grano más gruesos.

El culmen de este tipo de tendencias está representado por los resultados de la Figura 10 para el Miembro Superior de la Formación Carbonera (Toc 1) que, sin duda, es la unidad litoestratigráfica de mayor predominancia de tamaños de grano fino en

esta área de estudio; y que evidencia los mayores valores para los parámetros de degradación y desagregación, y los menores

valores para los dos tipos de parámetros de variabilidad del Cuadro No. 3.

CUADRO 3

PARAMETROS DE CARACTERIZACION GEOMECANICA DE LA MASA ROCOSA - BLOQUE DELE-1

POBLACION		PARAMETRO GEOMECANICO DE:				
Código	Formación - Miembro	Degradación	Desagregación	Variabilidad		
		Pdg (%) (1)	Pds (%) (2)	Vm(%) (3)	Vmr (4)	Vms (5)
Tmgi	Guayabo - Inferior (A)	62.6	73.9	37.4	2.1	1.9
Tml	León (A)	(6)	80.0	(6)	(6)	(6)
Tml 1	León - Inferior (A)	32.9	74.0	67.1	3.8	2.4
Tml 2	León - Superior (A)	38.5	40.0	61.5	3.5	2.9
Toc	Carbonera (A)	63.1	80.8	36.9	2.1	2.2
Toc 1	Carbonera - Superior (A)	82.5	83.3	17.5	1.0	1.0
Tem	Mirador (B)	52.0	18.9	48.0	2.7	4.3
Tpc	Cuervos (A)	31.5	40.5	68.4	3.9	3.4
Ktpb	Palmichal (B)	43.2	7.8	56.8	3.2	4.7
Ksg	Guadalupe (B)	26.0	22.5	74.0	4.2	3.6
Ksc	Chipaqué (A)	65.5	65.9	34.5	2.0	2.3
Kiu	Une (B)	35.8	21.0	64.2	3.7	4.6
Kif	Fómeque (A)	65.5	65.5	40.7	2.3	3.0

NOTAS:

(A) :Predominancia* de tamaños de grano fino (limolitas, arcillolitas, lutitas).

(B) :Predominancia* de tamaños de grano más gruesos (areniscas, litologías conglomeráticas).según las descripciones litológicas de la información geológica disponible descrita en el Capítulo 2 (numeral 2.7).

(1)Pdg: grado de alteración (física, química, etc.) o de deterioro de una masa rocosa con respecto a su condición de origen, dado por el porcentaje recorrido por la tendencia de pendientes máximas de una población o subpoblación de rocas, con respecto a la distancia máxima requerida (a partir de la tendencia inicial de pendientes máximas) para convertirse totalmente en un material desagregado (roca fragmentada sin cementación, fragmentos de roca en matriz de suelo, transición roca - suelo, materiales derivados de una misma roca paterna, coluviones derivados o transportados, materiales foráneos, y otros).

(2)Pds :porcentaje de familias de materiales desagregados, con respecto al número total de las familias de una población o subpoblación de rocas.

(3)Vm :variabilidad de una población o subpoblación de rocas, como porcentaje del máximo que podría desplegar dentro de su patrón triangular inicial.

(4)Vmr:variabilidad relativa, como múltiplo de la población menos variable de la columna anterior.

(5)Vms:variabilidad relativa, como múltiplo de la población de menor desviación estándar.

(6)El pequeño número de familias medibles de la Formación León dentro del área de estudio solo permite cuantificar el parámetro Pds.

(Tomado de: Análisis Geotécnicos Colombianos (AGC) Ltda., 1996)

3.3.10 Patrón Triangular de los Materiales Degradados y Desagregados.

Hasta este punto solo se ha tratado el Patrón Triangular de una roca. Pero en la zona correspondiente a los materiales degradados y desagregados, - a la derecha del límite inferior del Patrón Triangular de una subpoblación o población de rocas (subnumeral 3.3.5) -, y si se efectúan mediciones de taludes en agrupamientos correctamente delimitados de este tipo de materiales, o particularizadas en coluviones,

terrazas y otros, (que bien pueden denominarse como suelos), sus resultados también encuadran en un Patrón Triangular.

La ejemplificación más diciente del hecho de que para los suelos también se configura el Patrón Triangular, - lo cual implica que este es una característica inherente y universal de todos los materiales geológicos que evidencian taludes naturales - , está constituida por los resultados de las mediciones de taludes naturales en dos depósitos de origen marino de la Arcilla Leda, ubicados en dos lugares diferentes de

la Provincia de Ontario (Canadá), y cuyos patrones triangulares se muestran en la

Figura 11.

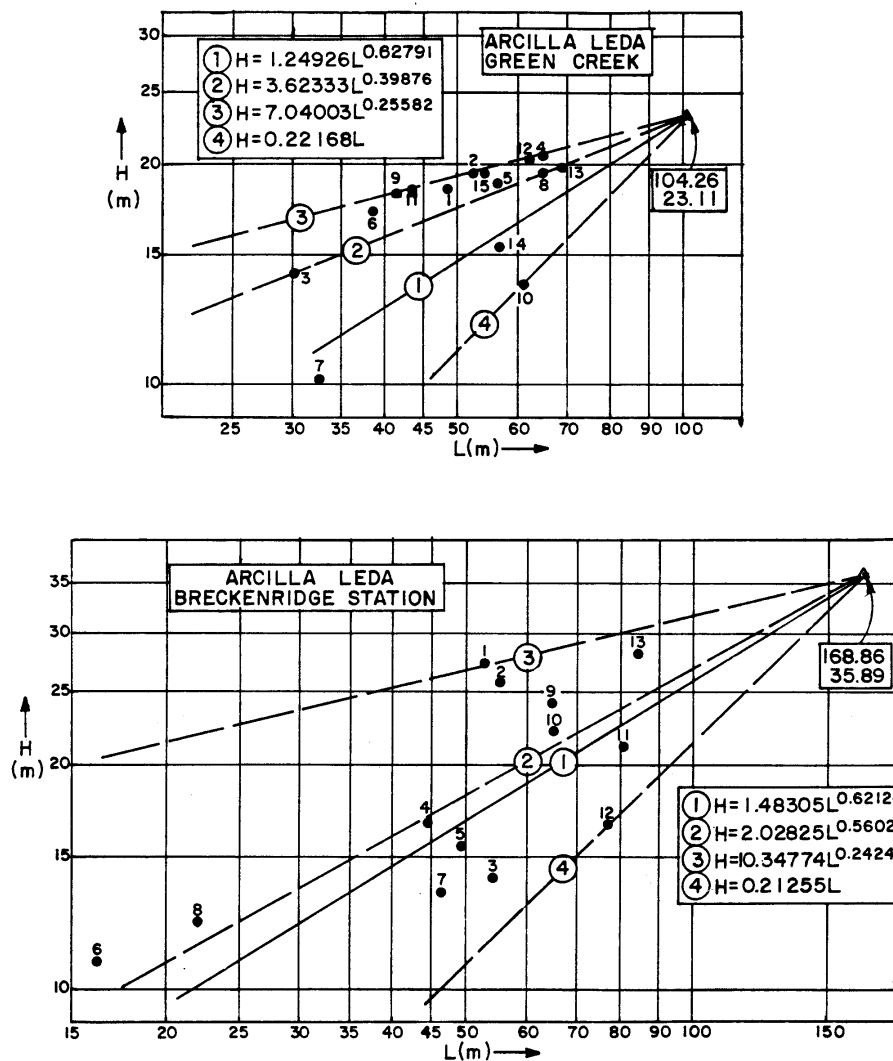


Figura 11 - Patrón Triangular de la Arcilla Leda; Green Creek y Breckenridge Station, Provincia de Ontario, Canadá (Mediciones de: Crawford y Eden, 1967)

3.3.11 Disposición y Distribución Geográfica de los Materiales Degradados y Desagregados.

Las tendencias de la disposición y distribución geográfica (en planta) de los materiales degradados y desagregados se pueden observar en cualquier nivel operacional, analítico y de medición de la MTN superior al de familia. Pero, en una área dada de estudio, la mejor forma de apreciarlas es a nivel de universo.

Estas tendencias, que permiten la detección de rasgos geoestructurales de cierta importancia y que, a veces, no se pueden identificar por medio de los métodos

exploratorios convencionales de la Geología, ya se analizaron con alguna amplitud en un escrito reciente (Shuk, 1996a); y también se ilustran más adelante por medio de la Figura 30.

3.4 Parámetros Geomecánicos de la MTN

En términos generales, -y a una escala macro-, los resultados obtenidos hasta ahora por medio de la MTN apuntan hacia que las relaciones de causalidad físico - geomecánicas que subyacen el grado "casi perfecto" de correlación entre L y H implican que todos los agentes exógenos y endógenos, - tanto destructivos, como constructivos, y que interactúan permanente y masivamente

en la naturaleza -, originan en las masas de materiales geológicos un número indeterminado de respuestas de tipo heterogéneo que se pueden englobar bajo la denominación única de “proceso de adaptación”.

A su vez, este proceso de adaptación se refleja en las características y propiedades de presurización, densidad & fase, resistencia y deformabilidad de las familias (o subpoblaciones, o poblaciones) de taludes naturales localizadas dentro de esa masa; y estas características y propiedades agrupan respectivamente los cuatro grupos de los parámetros geomecánicos que se pueden estimar por medio del Sistema Analítico de la MTN (SAMTN), el cual está constituido por dos herramientas principales: la Envoluta Transformada de Esfuerzos de Corte (ETEC), y el conjunto sistémico de las envolutas hipotéticas.

3.4.1 Envoluta Transformada de Esfuerzos de Corte (ETEC).

Tal como se mencionó previamente (numeral 3.1), de las tres funciones matemáticas obtenibles a nivel de familia (Figura 2) para las tendencias de pendientes promedias por medio de las correlaciones de los resultados de las mediciones de taludes naturales, la única que se ha investigado hasta el momento es la función potencial simple de esta tendencia promedia; y para el cálculo de los parámetros geomecánicos, se parte de esta función.

En los niveles de subpoblación y población los estimativos de estos parámetros también parten de la tendencia de pendientes promedias, pero determinada según lo expuesto antes en lo relativo al Patrón Triangular (subnumeral 3.3.8); y aunque a nivel de universo generalmente no se calculan los parámetros geomecánicos, su tendencia de pendientes promedias constituye la base de referencia (como denominador) de la relación que sirve para estimar el Factor de Seguridad Relativo (Fsr) que se trata más adelante (numeral 4.3).

La transformación de la función No. 1 (Figura 2) a una función potencial simple de

esfuerzo vertical vs. esfuerzo de corte, - y con los mismos parámetros funcionales "a" y "b" -, se logra por medio de un factor dimensional (Fd) cuyo valor siempre es 1.0 (en el sistema MKS), y esta transformada se denomina como Envoluta Transformada de Esfuerzos de Corte (ETEC); y su expresión matemática es:

$$F_d = (\gamma_b)^{1-b} (b^b) \quad (32)$$

de expresión dimensional: $[M^{1-b} L^{3b-3}]$

donde:

γ_b : peso unitario, subíndice b

b^b : expresión doble potencial de b

3.4.2 Envolutas Hipotéticas.

La ETEC y su sistema satélite de envolutas hipotéticas, surgen todas de manipulaciones matemáticas predeterminadas y sistemáticas a partir de algunos parámetros de la ETEC, especialmente de aquellos relacionados con la presurización, los pesos unitarios, y la resistencia.

Casi todas estas envolutas hipotéticas corresponden a una expresión potencial simple generalizada, así:

$$H_n = a_n L_n^{b_n} \quad (32)$$

pero unas pocas son lineales, tales como la denominada HEA (Figura 13) y conforman tres agrupamientos:

1. Las envolutas hipotéticas que permiten cuantificar ciertos parámetros obtenibles directamente del Patrón Triangular, especialmente los de resistencia y variabilidad. Entre estas están los de la resistencia a la tracción y la cohesión (iniciales o de origen), y los estimativos del ángulo básico de fricción (subnumeral 3.3.2) y del de fricción entre minerales (subnumeral 3.3.3).

2. Las envolutas hipotéticas que permiten cuantificar las propiedades de los materiales geológicos por medio del Algoritmo para el Cálculo de los Parámetros

Geomecánicos de la MTN, y que conforman un sistema matricial que se presenta en la Figura 12, y en su complemento, el Cuadro 4, que muestra los cálculos requeridos para las

envolutas hipotéticas de la fila inicial del arreglo matricial.

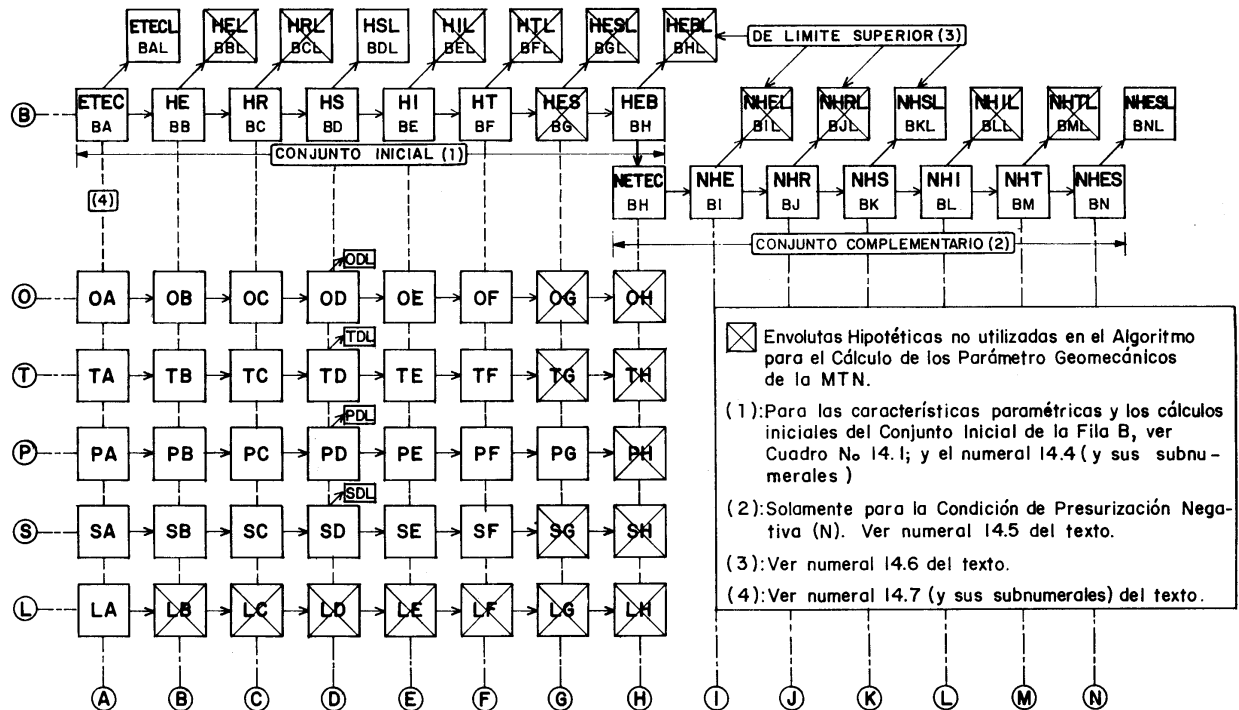


Figura 12 - Arreglo Matricial de las Envolutas ETEC e Hipotéticas del SAMTN (Tomado de: Shuk, 1999)

La Figura 13 ilustra la disposición de unas pocas envolutas hipotéticas con respecto a la ETEC. Además, las dos gráficas siguientes (figuras 14 y 15) que se presentan más adelante (subnumeral 3.4.5) permiten también visualizar la utilización de algunas Envolutas Hipotéticas.

Estas cinco ilustraciones extractadas del manuscrito básico de la MTN (Shuk, 1999), y cuyas referencias textuales corresponden a dicho manuscrito, se presentan con fines meramente indicativos

porque su desarrollo analítico y matemático es excesivamente largo y rebasaría significativamente el límite contextual del presente trabajo.

Unas envolutas hipotéticas complementarias, entre ellas la que corresponde a la compresión inconfinada (el único parámetro geomecánico que no emana de las envolutas hipotéticas del arreglo matricial), y que se utilizan primordialmente para propósitos de investigación y otros.

CUADRO 4

CARACTERISTICAS PARAMETRICAS Y CALCULOS INICIALES DE LAS ENVOLUTAS HIPOTETICAS
DE LA PRIMERA FILA (CONJUNTO INICIAL) DEL ARREGLO MATRICIAL DEL SAMTN

SUBINDICE ⁽²⁾	DESIGNACION	PARAMETRO ⁽¹⁾ BASICOS	CALCULOS INICIALES ⁽³⁾
BA ⁽¹⁾	ETEC ⁽²⁾ (Capítulo 13) ⁽³⁾	a, b ⁽¹⁾	L _{LF} , H _{LF} ⁽¹⁾
BB ⁽¹⁾	HE ⁽²⁾ De Equilibrio por Aproximación Gradual de b y s _a (14.4.1*)	(b) _{BB} = (s _a) _{BB} (p _a) _{BB} = 0 ⁽¹⁾	(L _{LF}) _{BB} = L _{LF} (H _{LF}) _{BB} = H _{LF}
BC ⁽¹⁾	HR ⁽²⁾ De Referencia (14.4.2*) ⁽³⁾	(b) _{BC} = p _a ⁽¹⁾	(L _{LF}) _{BC} = L _{LF} (H _{LF}) _{BC} = H _{LF}
BD ⁽¹⁾	HS ⁽²⁾ Con Base en s _a (14.4.3*) ⁽³⁾	(b) _{BD} = s _a ⁽¹⁾	(L _{LF}) _{BD} = L _{LF} (H _{LF}) _{BD} = H _{LF}
BE ⁽¹⁾	HI ⁽²⁾ De igualdad de Pesos Unitarios (14.4.4*)	(γ _a) _{BE} = (γ _b) _{BE} ⁽¹⁾	(L _{LF}) _{BE} = L _{LF} (H _{LF}) _{BE} = H _{LF}
BF ⁽¹⁾	HT ⁽²⁾ Con Base en tanβ _{LF} (14.4.5*)	(b) _{BF} = tanβ _{LF} ⁽¹⁾	(L _{LF}) _{BF} = L _{LF} (H _{LF}) _{BF} = H _{LF}
BG ⁽¹⁾	HES ⁽²⁾ De Equilibrio por Aproximación Gradual de b y s _a (14.4.6*)	(b) _{BG} = (s _a) _{BG} (p _a) _{BG} = 0 ⁽¹⁾	(L _{LF}) _{BG} = σ _{VL} (H _{LF}) _{BG} = τ _L
BH ⁽¹⁾	HEB ⁽²⁾ De equilibrio en b ⁽¹⁾ (14.4.7*) ⁽³⁾	(b) _{BH} = (s _a) _{BH} = b ⁽¹⁾ (p _a) _{BH} = 0 ⁽¹⁾	(L _{LF}) _{BH} = L _{LF} (H _{LF}) _{BH} ≠ H _{LF}

(1) : Ver Figura 14.1.

(2) : Ver numeral 14.3.

(3) : A partir de los valores conocidos de (a)_n, (b)_n, (L_{LF})_n, (H_{LF})_n, se pueden estimar todos los parámetros de cualquier envoluta hipotética (Ecuaciones números 13.1 a 13.17, numeral 13.3). Los parámetros de la mayoría de estas envolutas no se pueden determinar para la Condición de Presurización Negativa (ver: numeral 14.5).

* : Numeral del texto.

{Las referencias textuales corresponden al manuscrito básico de la MTN (Shuk, 1999)}

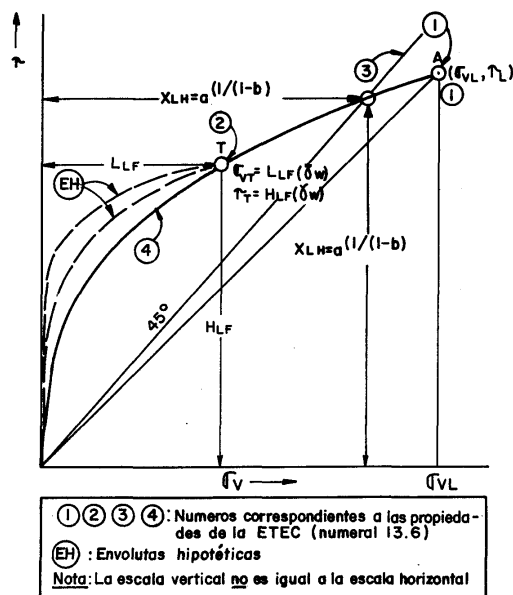


Figura 13 - Envoluta ETEC y unas Envolutas Hipotéticas del SAMTN (Tomado de: Shuk, 1999)

3.4.3 Algoritmo para el Cálculo de los Parámetros Geomecánicos de la MTN.

Este algoritmo, que emana de las anteriores herramientas, está diseñado y estructurado para los niveles operacionales de familia y población (o subpoblación).

Aunque más adelante (subnumeral 3.4.5), -y para propósitos meramente ilustrativos-, se presentan algunos de los pasos intermedios del desarrollo computacional de dicho algoritmo, y debido a su gran extensión su desarrollo completo y la presentación de sus resultados requiere de siete capítulos del ya mencionado manuscrito básico de la MTN (Shuk, 1999); y, por esta razón, no se incluye en el presente escrito.

Con base en dicho algoritmo, es posible por medio de la MTN, - y sin efectuar trabajos de campo, sondeos, ni ensayos de laboratorio -, determinar un gran número de parámetros geomecánicos cuantitativos, tanto en rocas como en suelos.

Todos los cálculos de los parámetros geomecánicos se efectúan por medio del ya mencionado algoritmo computarizado. Este rasgo factibiliza en el futuro la inclusión de la MTN dentro de algún Sistema de Información Geográfica (SIG), lo cual, a su vez, permitiría concretar la aplicación eficiente y rápida de la capacidad masiva de cuantificación de la MTN.

3.4.4 Enumeración de los Parámetros Geomecánicos de la MTN.

En la actualidad se pueden calcular 118 parámetros geomecánicos de los siguientes cuatro grupos:

- Parámetros de Presurización: una gran variedad de relaciones y cabezas de presurización para condiciones del pasado y más recientes. En total son 28 parámetros.

- Parámetros de Densidad & Fase: peso específico, peso unitario total y seco, contenido de humedad, grado de saturación (todo lo anterior tanto para el elemento constitutivo, como para la masa), y porosidad primaria y secundaria. En total son 31 parámetros.

Algunos de estos se pueden determinar para condiciones con y sin mineralización de fracturas (o diaclasas); y, además, no solo para una masa rocosa en sí, sino también, - y en virtud de la Hipótesis de Trabajo del Código Genético (subnumeral 2.4.5) -, para los materiales que eventualmente se derivarían de ella en forma de suelos residuales o coluviales.

Al nivel operacional de familia también pertenecen a este grupo los tres Parámetros de Caracterización de la Familia (Degradación, Desagregación y Variabilidad) cuyas bases conceptuales son similares a las del Patrón Triangular, tratados anteriormente (subnumeral 3.3.9).

- Parámetros de Resistencia: una variedad de parámetros de fricción, cohesión y de otros tipos de resistencia, discriminados en sentido vertical según los criterios de resistencia total y efectiva y, en un sentido horizontal, por la Condición de la Masa y la Condición de Laboratorio. En total son 55 parámetros.

- Parámetros de Deformabilidad: Módulo de Deformación y Relación de Poisson (si se efectúan mediciones en direcciones diferentes), para las condiciones de masa y laboratorio. En total son 4 parámetros.

3.4.5 Ejemplos de algunos de los Procesos Intermedios para Estimar los Parámetros Geomecánicos de la MTN

Con la excepción de las pocas envolutas hipotéticas rectilíneas, en cada una de las del gran número restante de expresión potencial simple del SAMTN se pueden calcular 16 parámetros, entre ellos los funcionales (a, b), y los pertinentes a la presurización (p_a) y a los pesos unitarios (γ_a, γ_b).

Con el propósito de mostrar someramente el proceso algorítmico para el cálculo de los parámetros geomecánicos de la MTN, se presentan bajo este subnumeral cuatro figuras que ilustran los pasos intermedios que se efectúan para obtener algunos de los parámetros de presurización, de densidad & fase, y de resistencia,

partiendo de unas envolutas del SAMTN.

Las referencias textuales de las tres primeras de estas figuras corresponden al manuscrito básico de la MTN (Shuk, 1999) y, por lo tanto, no deben tomarse en cuenta.

Las seis condiciones de presurización del modelo CPSA (Cabezas de Presurización con base en el SAMTN) se ilustran

esquemáticamente en la Figura 14, que permite apreciar los cambios de ubicación y disposición de las envolutas hipotéticas del conjunto inicial de la Fila B (Figura 12), de las cuales es especialmente determinante y caracterizante la No.2 (Envoluta HR), cuya expresión paramétrica se indica en el Cuadro 4.

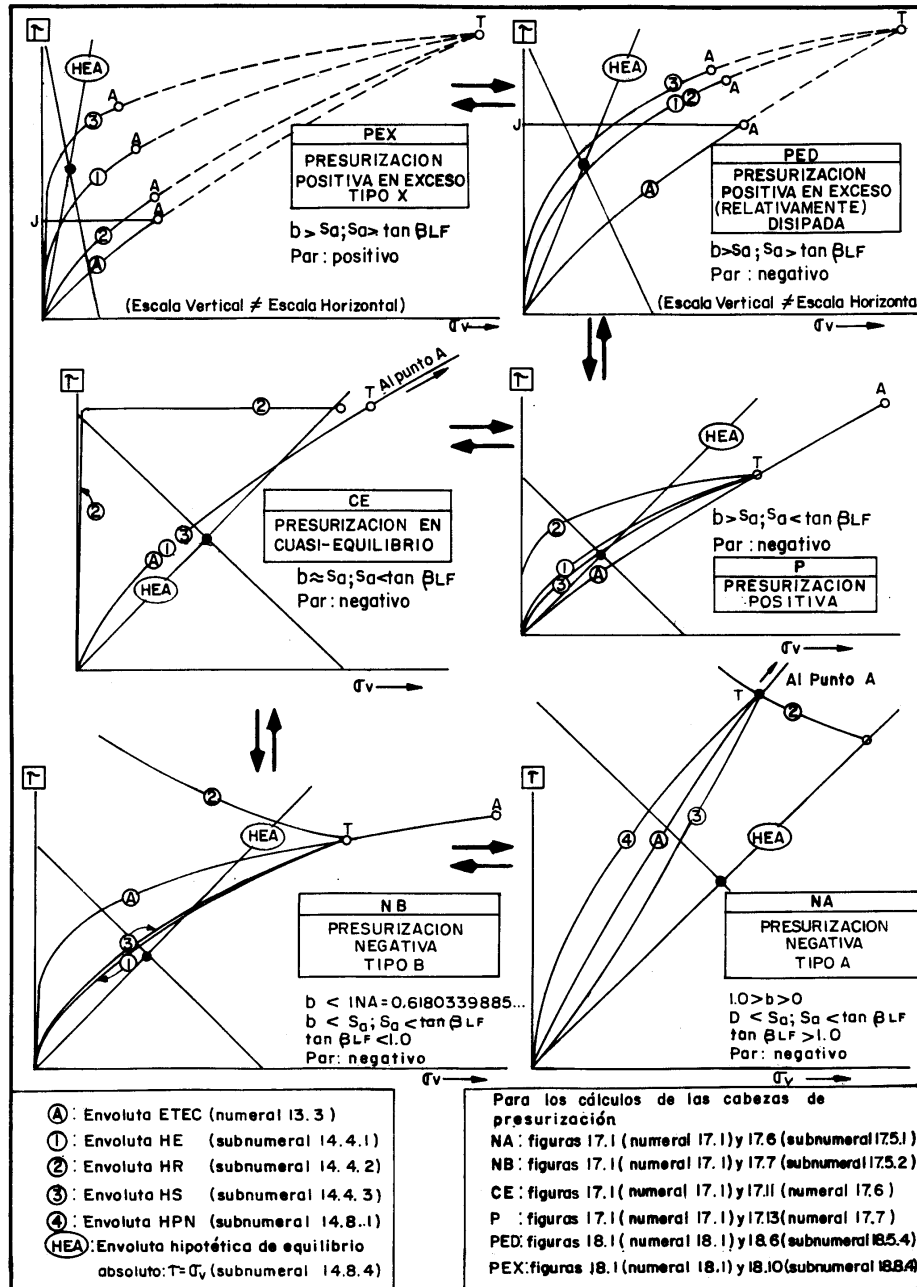


Figura 14 - Condiciones de Presurización-Modelo CPSA (Tomado de: Shuk, 1999)

Partiendo de estas condiciones de presurización, se pueden calcular un número de cabezas correspondientes no solo a la morfología del terreno en el momento del levantamiento topográfico (que sirve de base

al plano en el que se efectúan la mediciones de taludes naturales), sino también, -y en concordancia con el enunciado de la Hipótesis del Ecosistema de Memoria (subnumeral 2.4.4)-, al del último Evento

Catastrófico del Pasado (ECP) que solo se evidencia en las dos condiciones de presurización en exceso (PED y PEX).

La forma de estimar los pesos unitarios aparentes total y seco (γ_{ta}, γ_{da}) de una familia se ilustran en la Figura 15. Estos corresponden al valor en la intersección

($p_a=0$) de dos funciones rectas que correlacionan los pesos unitarios (γ_a o γ_b) y el parámetro adimensional de presurización (p_a) calculados para cada una de las envolutas indicadas en la misma figura.

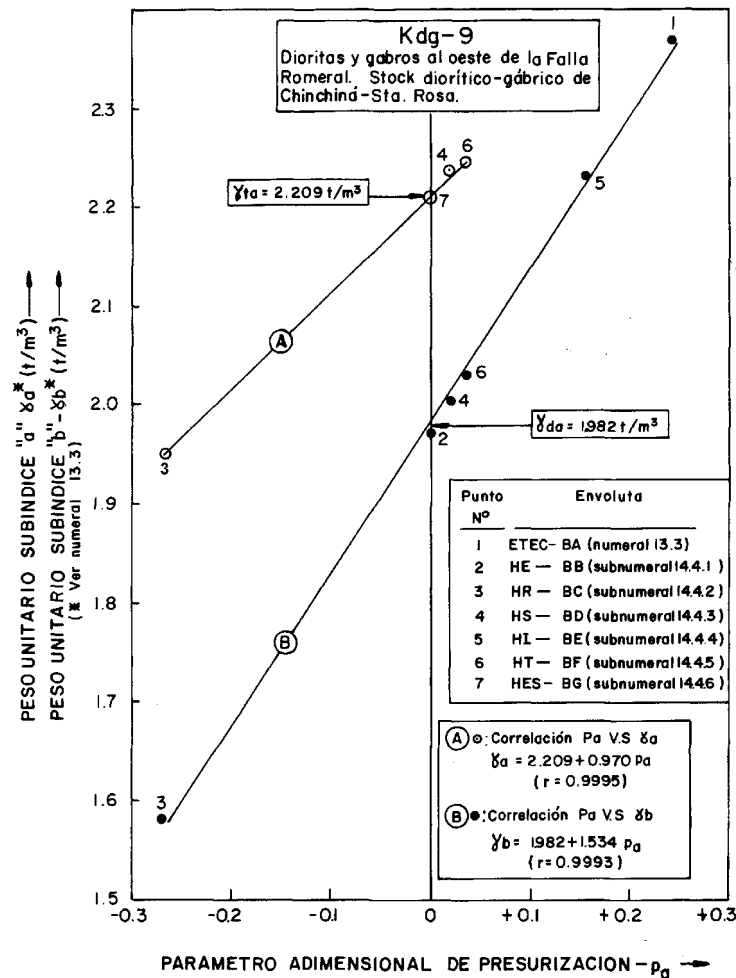


Figura 15 - Relaciones entre los Pesos Unitarios Subíndices a y b y el Parámetro Adimensional de Presurización (Tomado de: Shuk, 1999)

En este paso intermedio se utilizan siete de las ocho envolutas del conjunto inicial de la Fila B (Figura 12); y, tal como se puede apreciar, los coeficientes de correlación de las dos rectas son "casi perfectos".

La Figura 16 muestra los resultados de estos pesos unitarios aparentes para cada una de las familias de la Arenisca Dura (Kgd) medidas en los Cerros Orientales de Bogotá, graficados en función del parámetro adimensional de presurización (p_a) de la Envoluta ETEC.

Tal como se puede apreciar en esta figura en el rango de valores altos de p_a , la relación entre p_a y los dos pesos unitarios aparentes es inversa, -o sea, que a mayor presurización son menores dichos pesos unitarios-, y:

$$\frac{d\gamma_{ta}}{dp_a} = \frac{d\gamma_{da}}{dp_a} = -1$$

lo cual concuerda con los postulados de la Microgeotecnia acerca de las relaciones entre los pesos unitarios y la presurización.

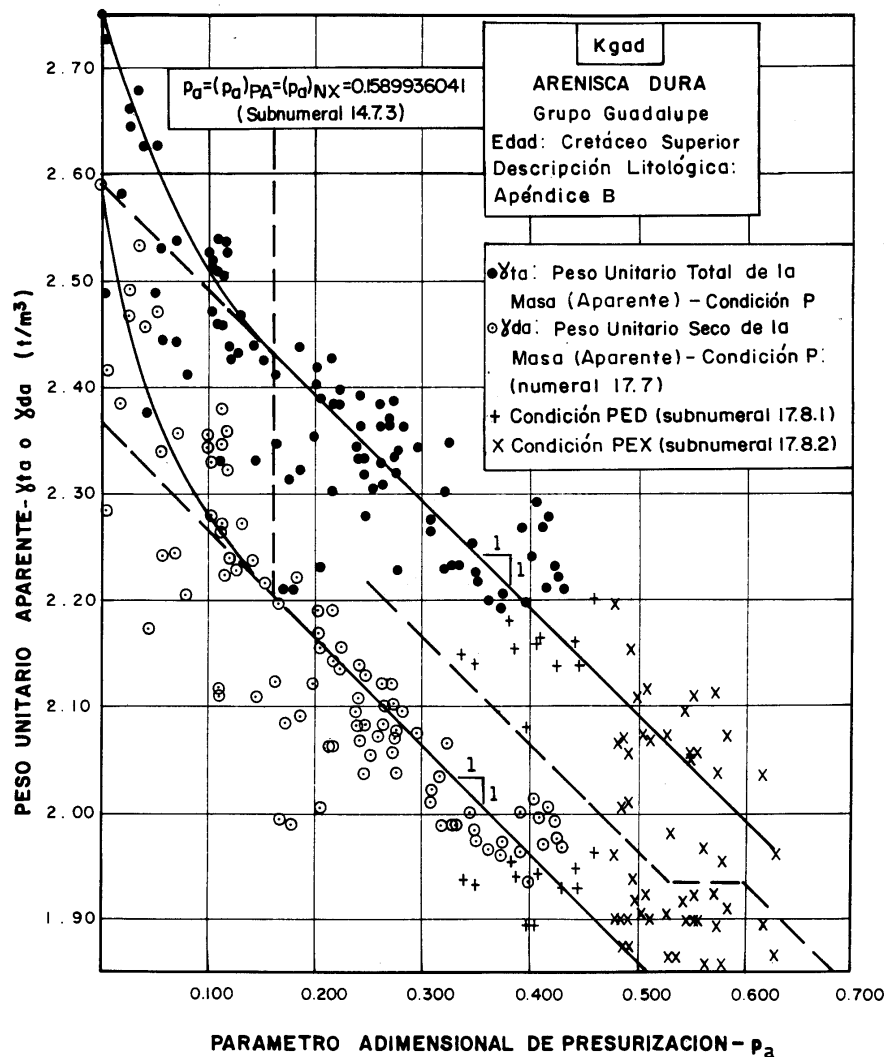


Figura 16 - Relación entre los Pesos Unitarios Aparentes y el Parámetro Adimensional de Presurización (Tomado de: Shuk, 1999)

Por debajo de $p_a \approx 0.16$, los valores de pesos unitarios aparentes ya no conservan una relación rectilínea con p_a , sino que presentan una forma curvilínea hacia arriba a medida que p_a se aproxima a un valor de cero.

La anterior desviación es un ejemplo de lo previamente tratado (numeral 3.1) sobre las restricciones impuestas por la utilización únicamente de la función potencial simple (Ecuación 1, Figura 2) para todo el desarrollo investigativo de la MTN, puesto que este tipo de función necesariamente se inicia en el origen (0,0) de coordenadas.

Por lo tanto, - especialmente en el rango de valores de $p_a < 0.16$ -, se deben aplicar unos factores de corrección a nivel de

familia para poder llegar a los estimativos definitivos de los pesos unitarios (γ_{tm}, γ_{dm}) de la masa, los cuales forman parte del grupo de los parámetros de densidad & fase de la MTN.

En el mismo nivel de familia, todos los cálculos para los parámetros geomecánicos de resistencia de la MTN pasan durante un proceso intermedio por las relaciones geométricas que se muestran en la Figura 17 dentro de la ETEC, menos los de la resistencia a la compresión inconfiada que emanan de otra envoluta hipotética pero con un ϕ_{pq} determinado dentro de la ETEC.

Estas relaciones permiten establecer los valores de:

ϕ_r : ángulo de fricción residual (m : masa - e : ensayo de laboratorio)
 ϕ_p : ángulo de fricción pico
 ϕ_{pq} : ángulo de fricción pico (q: compresión inconfiada)
 c_t : cohesión traccional
 c_i : cohesión por imbricación estructural
 c_o : cohesión total (solamente en el origen)

La diferenciación entre las condiciones de masa y de laboratorio se efectúa por medio de un traslado del origen de coordenadas (σ_{vo}) con base en las diferencias entre los pesos unitarios del Elemento Constitutivo

(equivalente a una muestra de laboratorio) y los de la masa, entre las presurizaciones de las dos condiciones, y en otras consideraciones.

La Figura 17 representa la situación más común de una masa con presurización positiva, que desemboca en parámetros de resistencia de laboratorio más altos que los de la masa. Cuando la masa está en condiciones de presurización negativa la situación se invierte, y los resultados de resistencia de laboratorio son inferiores a los de la masa.

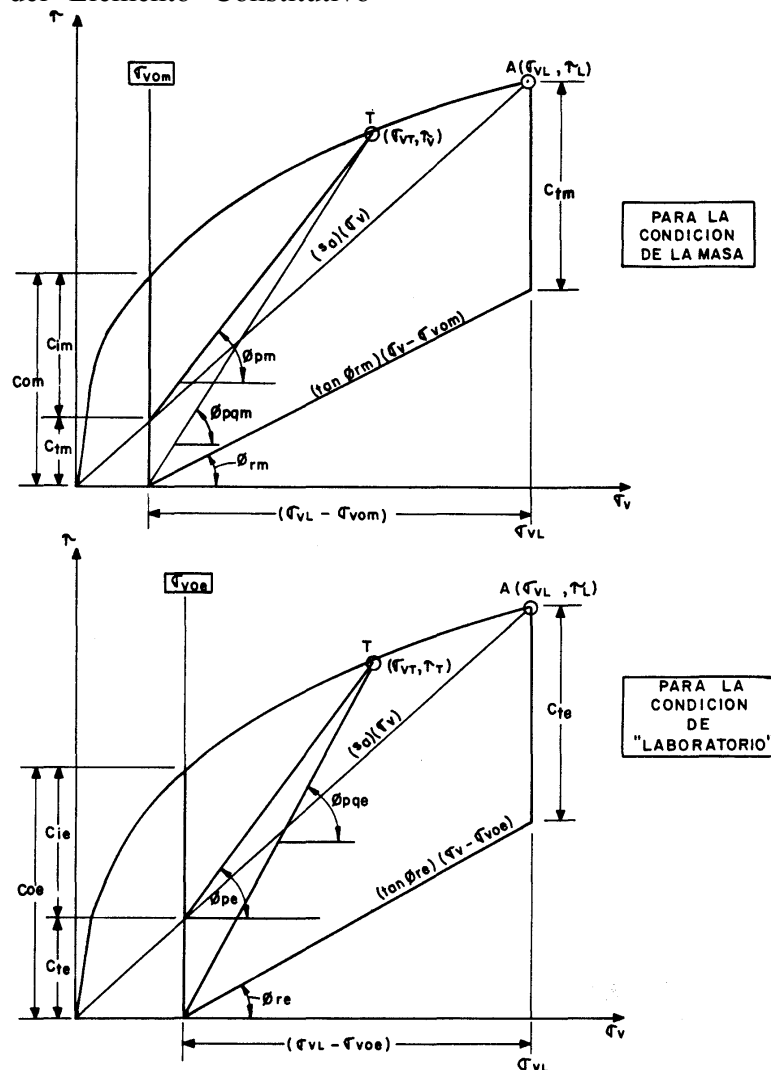


Figura 17 - Relaciones Geométricas entre los Parámetros Geomecánicos de Resistencia-Condición de la Masa y Condición de Laboratorio (Tomado de: Shuk, 1999)

3.4.6 Propiedad y Capacidad de Predicción de los Parámetros Geomecánicos de la MTN.

Según lo mencionado en el subnumeral anterior, los últimos dos tipos de parámetros geomecánicos (resistencia y deformabilidad) pueden ser calculados tanto para la

"Condición de la Masa", como para una así denominada "Condición de Laboratorio". Esta última condición permite la comparación de los resultados de estos dos tipos de parámetros y los de los de densidad & fase (para el elemento constitutivo) obtenidos por medio de la MTN, con los resultados de ensayos de laboratorio convencionales; y, las diferencias entre estos variaron usualmente entre 2% y 8%, llegando en algunos casos hasta el 15% o más (dependiendo del tipo de parámetro); y en otros, las diferencias fueron de 1% o menores.

Algunos de estos resultados comparativos entre la MTN y las metodologías analíticas y empíricas de la Geotecnia convencional ya se han presentado en otros escritos técnicos, (Shuk, 1994a y c).

En el caso de las formaciones rocosas, estos buenos resultados comparativos, basados en los promedios de ensayos de laboratorio de peso específico, pesos unitarios (húmedo y seco), porosidad primaria, resistencia y deformabilidad efectuados sobre muestras de una formación geológica dada, y en los promedios de los resultados de las simulaciones para el mismo tipo de ensayo y la misma formación, hacen parte de las relaciones indirectas de causalidad de la MTN (numeral 2.5) y que apuntan hacia la validez científica y técnica de esta metodología.

Sin embargo, debe tenerse en cuenta que los promedios de los resultados de ensayos de laboratorio de resistencia y deformabilidad son sesgados, por las siguientes razones:

- los ensayos de laboratorio de resistencia y deformabilidad utilizan solamente las muestras (núcleos, corazones) con poca o mínima fragmentación; y, por ejemplo, en suelos conglomeráticos con matriz cohesiva, solamente se ensaya la matriz.

Ambos tipos de situaciones introducen un sesgo obvio en los resultados promedios

de laboratorio, y estos deberían desembocar en valores más altos que los de la MTN en formaciones rocosas degradadas a muy degradadas y, más, si éstas comprenden materiales degradados y desagregados (subnumeral 3.3.6); y más bajos que los de la MTN; en los suelos conglomeráticos.

- según lo que se tratará más adelante en este texto, los resultados de los ensayos de laboratorio sobre muestra obtenidas de sondeos no pueden reflejar adecuadamente la variabilidad real de los materiales geológicos (subnumeral 4.6.1), y, menos, la inherente a los taludes naturales (subnumeral 4.6.2); y,

- por limitaciones de su operación e instrumentación, unos pocos tipos de ensayos de laboratorio no representan adecuadamente la realidad físico-geomecánica.

Un ejemplo de esto se muestra en la Figura 18, la cual ilustra los resultados empíricos de resistencia de la geotecnia convencional que desembocan en envolutas de Mohr rectilíneas, mientras que los resultados de la MTN desembocan en envolutas potenciales compuestas (ecuación 2, Figura 2), que son las realmente aplicables a todos los materiales geológicos, menos a los materiales totalmente friccionales y a las arcillas normalmente consolidadas.

Esta diferencia entre las formas de las envolutas de resistencia desemboca en que la cohesión efectiva en la masa es en realidad mayor que la cohesión bajo condiciones de esfuerzos totales, lo cual es contrario a los resultados y postulados prevalecientes en la geotecnia convencional.

En concordancia con lo anterior, y exceptuando las formaciones rocosas y suelos de tipo homogéneo, solamente los ensayos in-situ de gran tamaño podrían presumiblemente reflejar los promedios reales de resistencia y deformabilidad en estos materiales y, por lo tanto, ser compatibles con los de la MTN.

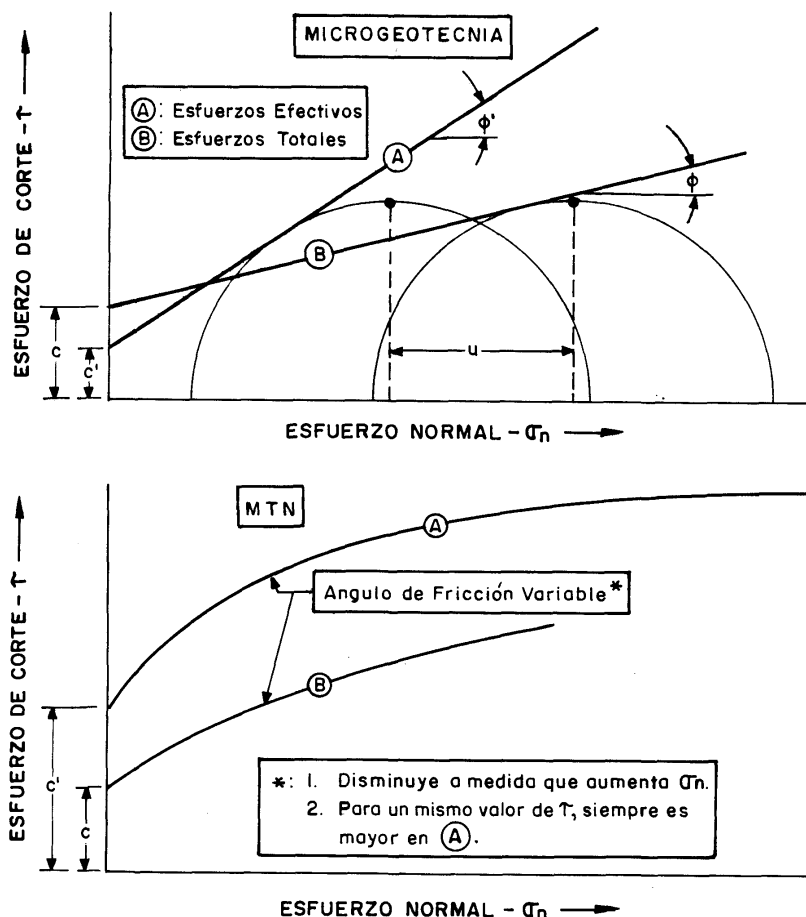


Figura 18 - Esfuerzo Normal vs. Esfuerzos de Corte-Resultados Empíricos de la Geotecnia Convencional vs. Resultados de la MTN (Tomado de: Shuk, 1999)

En cambio, los promedios de los resultados de los ensayos de laboratorio de densidad & fase, particularmente los de peso específico y peso unitario seco, y sus resultados consecuentes (porosidad de rocas, o relación de vacíos de suelos), deberían evidenciar grados de identidad satisfactorios con los de la MTN en todos los materiales geológicos, pero sin reflejar su variabilidad real.

Tomando en consideración todo lo anterior, resulta fehaciente la propiedad de los parámetros geomecánicos obtenidos por medio de la MTN; y esto añadido al hecho de que por razones económicas y de tiempo, con la MTN se puede lograr una densidad de información muy superior a la obtenible por medio de los sondeos convencionales, - información que para las familias de taludes naturales es válida hasta una profundidad equivalente a H_{LD} -, indica que su capacidad de predicción de las características

geomecánicas de las masas de materiales geológicos es satisfactoria, y además excede en muchos casos la de los ensayos de laboratorio convencionales de la Geotecnia.

3.5 Parámetros de Estabilidad de la MTN

Dentro del contexto de la MTN, sus parámetros de estabilidad son solamente aquellos que se pueden estructurar, formular y cuantificar a partir de los parámetros geométricos L y H, y de los parámetros funcionales "a" y "b" (Figura 2) de la función potencial simple (Ecuación 1).

La MTN permite el cálculo directo del factor de seguridad y su correspondiente probabilidad de falla, - tanto en forma puntual, como en forma de distribución -, para cuatro categorías de tiempo: muy corto, corto, mediano y largo plazo.

A su vez, las probabilidades de falla permiten un enlace con análisis de decisión económica, para obtener los costos esperados por fallas de taludes, o por otros tipos de movimientos en masa; y también permiten el cálculo del riesgo de mecanismos más complejos, tales como el de la formación accidental de presas sobre cauces de agua por movimientos en masa, y la ruptura súbita de dichas presas, con su consecuente fenomenología de avalanchas, tal como se efectuó para el Área de Desastre de Utica (Shuk y González, 1993).

La MTN tiene también otra incidencia directa sobre los análisis de decisión económica, por cuanto la función potencial simple L vs. H y sus parámetros funcionales " a " y " b ", en combinación con otros resultados empíricos, parte de los cuales ya han sido publicados (Shuk, 1989), permiten la determinación de la distribución de probabilidades de las magnitudes de falla, para las tres dimensiones (volumen, área y longitud) en que se basan usualmente las prácticas de estimativos de costos; y condicionales a los períodos de tiempo estimados para cada una de las cuatro categorías de tiempo (subnumeral 4.3.1) del Factor de Seguridad.

De esta manera, no sólo se pueden calcular los costos directos esperados de fallas (cuya erogación generalmente corre por cuenta del dueño u operador de una obra), sino que también se pueden estimar los costos indirectos esperados de fallas (que usualmente pagan los usuarios o la comunidad afectada), como los que implica un período de interrupción de una carretera entre dos localidades que no disponen de vías alternas.

Además, para los análisis de estabilidad en sí, la MTN permite otra opción: la utilización de sus resultados para los parámetros geomecánicos pertinentes de presurización, de densidad & fase, y de resistencia, en los cálculos por medio de las metodologías convencionales de estabilidad de la Microgeotecnia.

Los anteriores aspectos de los parámetros de estabilidad de la MTN, y la descripción de sus resultados y aplicaciones

en varios casos prácticos, se tratan bajo el encabezamiento primario de la zonificación geotécnica.

3.6 Otros Parámetros Complementarios de la MTN.

Además de los parámetros geomecánicos en sí, en la actualidad se vislumbran indicios de que, con base en la MTN, en el futuro se podrían diseñar algoritmos con el fin de calcular otros parámetros complementarios útiles, entre otros, para los estudios de zonificación geotécnica.

Hata el presente, las siguientes son las características comunes de los intentos para lograr dichos parámetros:

- se han utilizado diferentes metodologías de cálculo para cada caso que se ha analizado, y que han desembocado en resultados de aceptables a satisfactorios; o que
- solo se han utilizado en un caso y sin una verificación posterior, porque no se han presentado más casos para analizar, o por otros motivos.

3.6.1 Separación, Determinación de los Espesores y Caracterización Geomecánica de los Suelos Suprayacentes a una Roca.

Una de las mayores limitantes para la caracterización geomecánica y de inestabilidad de masas rocosas por medio de la MTN está constituida por el control morfológico de la roca subyacente sobre los suelos que la cubren, y que implica la necesidad del "ajuste (o corrección) morfológico" según lo indicado por el subíndice " am " de la Figura 2.

Un intento bastante exitoso para separar y caracterizar geomecánicamente la secuencia de suelos derivada de una misma masa rocosa paterna se presentó en una publicación anterior (Shuk, 1994a). En ese caso no fue necesario determinar el espesor de dichos suelos por el marco de referencia y objeto del estudio, y el ajuste morfológico, -

así como la caracterización geomecánica -, se efectuaron sobre los promedios de cada uno

de los tipos de suelo de dicha secuencia.

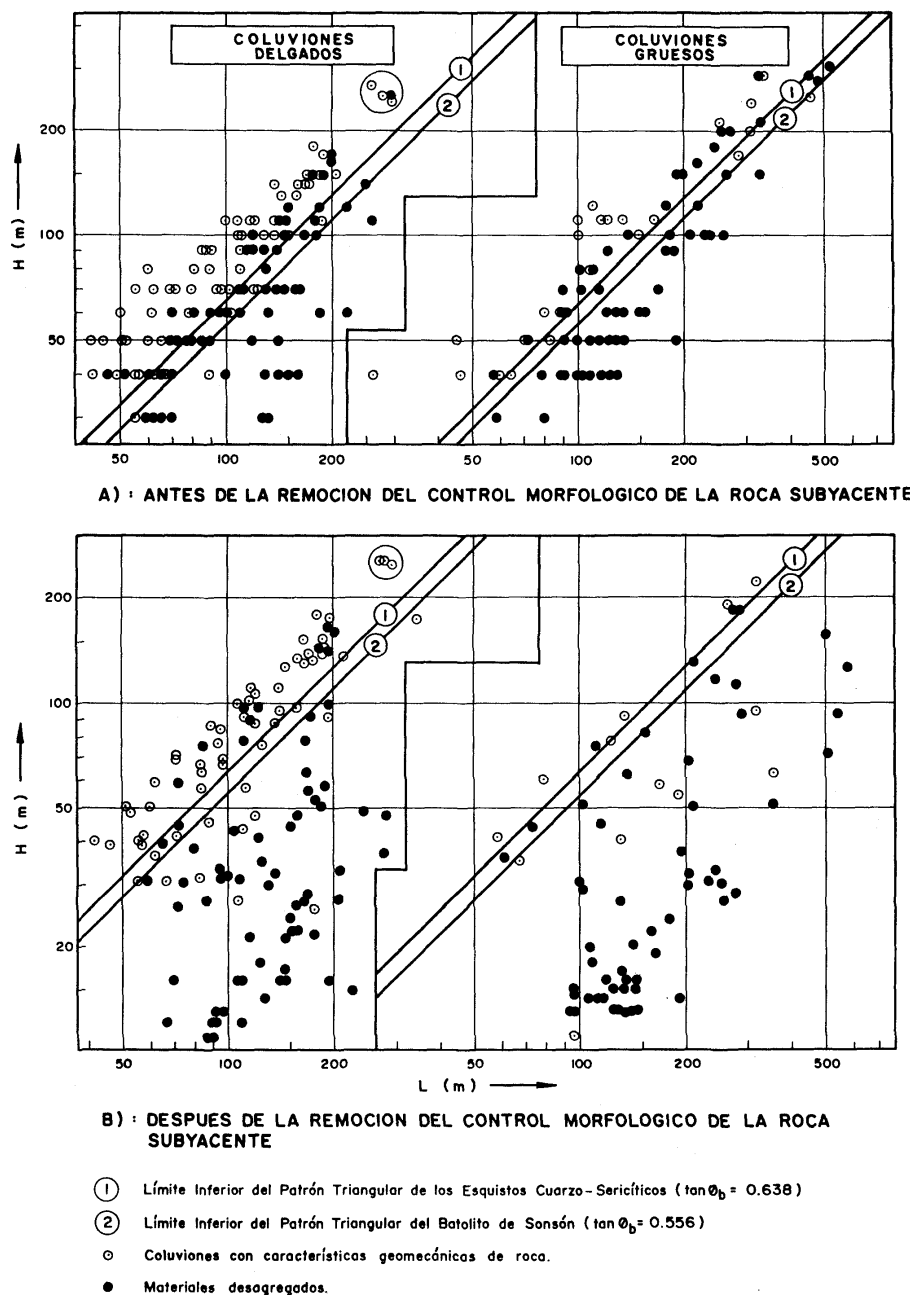


Figura 19 - Análisis de los Coluviones a Nivel de Población, Antes (A) y Despues (B) de la Remoción de los Efectos del Control Morfológico; Desarrollo Hidroeléctrico del Río Arma (Tomado de: Shuk, 1996c)

En cambio, para el estudio de riesgo geotécnico por las posibles avalanchas de coluviones en al área del Desarrollo Hidroeléctrico del Río Arma (Shuk, 1996c), la necesidad de determinar el espesor promedio de cada familia de coluviones (previamente delimitados por trabajos geológicos de campo y oficina) implicó la separación de suelos y rocas en cada una y,

luego, su caracterización geomecánica por medio del algoritmo de la MTN.

En esta área de estudio se presentan dos tipos de coluviones (delgados y gruesos) cuya diferenciación se basó en criterios fotogeológicos y no en la medición de su espesor. La Figura 19 muestra la localización de todos los puntos L_{LD} y H_{LD} de las familias de taludes naturales en coluviones con respecto al máximo y mínimo de los valores

de la $\tan \phi_b$, así: Esquistos Cuarzosericíticos (0.638) y Batolito de Sonsón (0.556); y en la parte A de dicha figura se puede apreciar que un gran número de éstas se localizan a la izquierda del límite superior del Patrón Triangular de la roca; o sea que, - por el control morfológico de la roca subyacente -, estas familias, supuestamente de suelos, evidencian propiedades geomecánicas de roca.

Además, en la mayoría de los casos el valor del parámetro X_{LH} (ecuación 27, subnumeral 3.3.5) resultó ser inferior a 1.0.

La parte B de la Figura 19 muestra el resultado final del mejor intento para la corrección morfológica de estos coluviones con características de roca, y en ella se puede apreciar que dicho intento logró su propósito en buena parte, y casi completamente en los coluviones gruesos, si se utiliza como referencia el límite inferior del Patrón Triangular de los Esquistos Cuarzosericíticos ($\tan \phi_b = 0.638$).

Sin embargo, en la gráfica inferior B de esta figura se pueden apreciar las pérdidas de altura de la mayoría de los puntos, y su desplazamiento hacia abajo y a la derecha con respecto a los puntos de la gráfica A, convirtiéndose así en verdaderos suelos.

Aparte de los posibles errores fotogeológicos en la identificación y delimitación de los dos tipos de coluviones y en su discriminación con respecto a las rocas (errores que pueden ser más factibles en el caso de los coluviones delgados), en esta área específica de estudio el remanente de los puntos L_{LD} y H_{LD} correspondientes a suelos, pero con características geomecánicas de rocas, puede tener su causa en una fuerte cementación originada por un proceso de mineralización diagenética proveniente de las rocas ígneas y metamórficas subyacentes, o en la permeación de los coluviones por las cenizas volcánicas.

Aparentemente, esta cementación agudizó los efectos del control morfológico ejercido por las rocas subyacentes, y confirió a los coluviones una alta resistencia real, pero cuya duración es dudosa y de poca confiabilidad.

En un caso más reciente de cuatro áreas de inestabilidad en un sector de la carretera Cali-Medellín, en donde se efectuaron sondeos geofísicos para determinar los espesores de los suelos suprayacentes a las rocas, los resultados de los espesores promedios de la MTN correspondieron a los de los sondeos en dos casos que evidenciaron una sola capa de suelo encima de la roca; y en los dos casos restantes, en los que se presentó más de una capa de suelo encima de la roca, los espesores de la MTN fueron similares a los de la primera capa.

De todas maneras, los resultados de los anteriores ejercicios apuntan hacia la factibilidad de desarrollar una metodología única e integral de cálculo por medio de la MTN para lograr la separación y la determinación de los espesores de los suelos suprayacentes a una roca dada. Una vez logrado lo anterior, su caracterización geomecánica es sencilla y se efectuaría por medio del algoritmo de la MTN (subnumeral 3.4.3).

3.6.2 Durabilidad Esperada de los Taludes Naturales.

Si se conoce la edad de cada familia de taludes naturales en una área de estudio dada, es posible determinar su vida (futura) esperada (probabilística) por medio de una distribución de probabilidades de tipo Weibull, la cual se utiliza para determinar la vida útil de los bombillos y otros artículos sujetos a desgaste por su operación. Dado que esta distribución se tiene que establecer por medio de varios resultados de edades, no es posible emplearla para cada una de las familias, pero sí para grupos de familias dentro de cada zona de interés específico en una área de estudio.

Posterior a la terminación del estudio para el Desarrollo Hidroeléctrico del Río Arma (Shuk, 1996c) se efectuaron unos estimativos de la edades de los taludes naturales en las rocas del Paleozoico y del Jurásico y en los ya mencionados coluviones, pero sin la corrección por el control morfológico de la roca subyacente (González, 1999).

En parte, estos estimativos se efectúan por medio de un proceso inverso al de determinar los períodos de retorno obtenidos con base en la probabilidad total de falla (subnumeral 4.6.7).

Los resultados son sorprendentemente buenos ya que ninguna familia de taludes en formaciones rocosas excedió su edad asignada por criterios geológicos; y aunque una o dos de las familias se acercaron al límite superior de la edad geológica, la gran mayoría se concentraron en su parte intermedia e inferior.

En el caso de los coluviones, la gran mayoría de los resultados más altos (del orden de 10000 o más años) correspondieron a los ya descritos coluviones con características geomecánicas de rocas.

4. APLICACION DE LA MTN PARA ZONIFICACION GEOTECNICA CUANTITATIVA

Bajo este encabezamiento primario se describen en forma somera las principales actividades y análisis que se consideran pertinentes para trabajos de zonificación geotécnica por medio de la MTN, y algunos de los resultados que se logran. El compendio resumido de estos elementos y sus interrelaciones se ilustran por medio de la Figura 20 y, - en términos generales -, el desarrollo de este encabezamiento sigue sus lineamientos

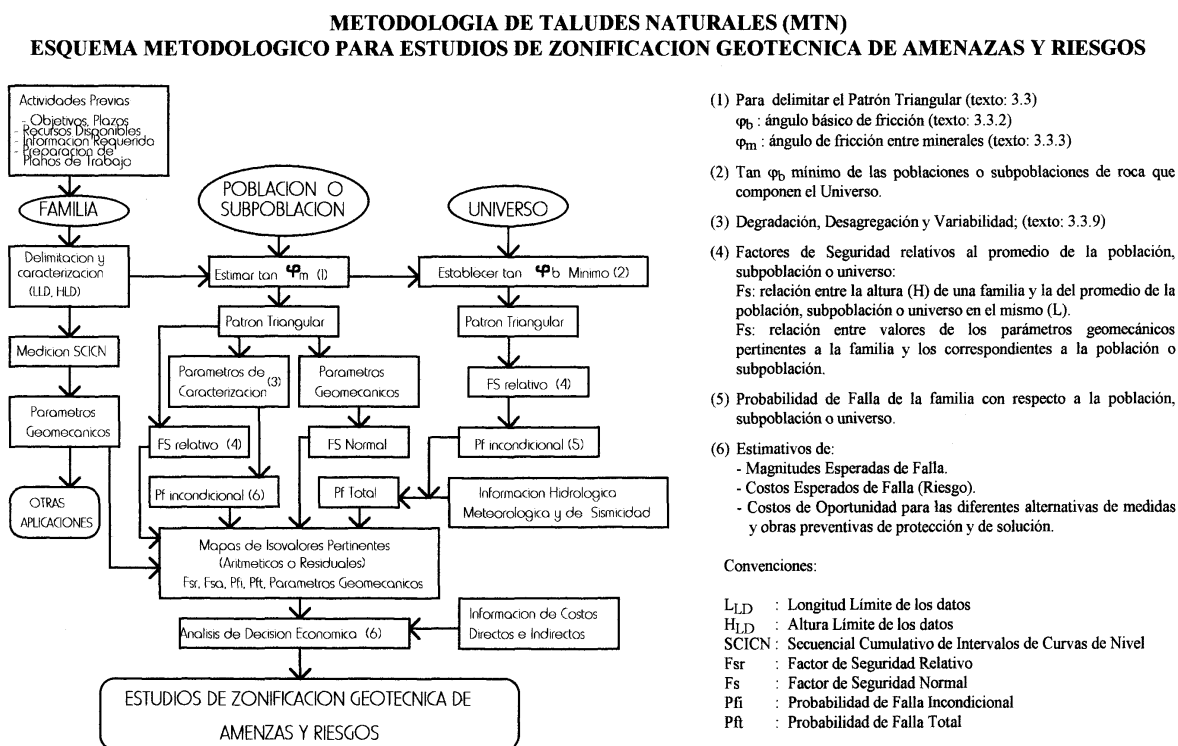


Figura 20 - Metodología de Taludes Naturales (MTN) - Esquema Metodológico para Estudios de Zonificación Geotécnica (Tomado de: Shuk, 1996b)

El significado operacional de los términos "amenaza", "riesgo" y "costo esperado" utilizado en este escrito es el de su acepción general dentro del campo (González, 1992a y b; Shuk, 1970).

4.1 Actividades Previas

Antes de iniciar las actividades pertinentes a

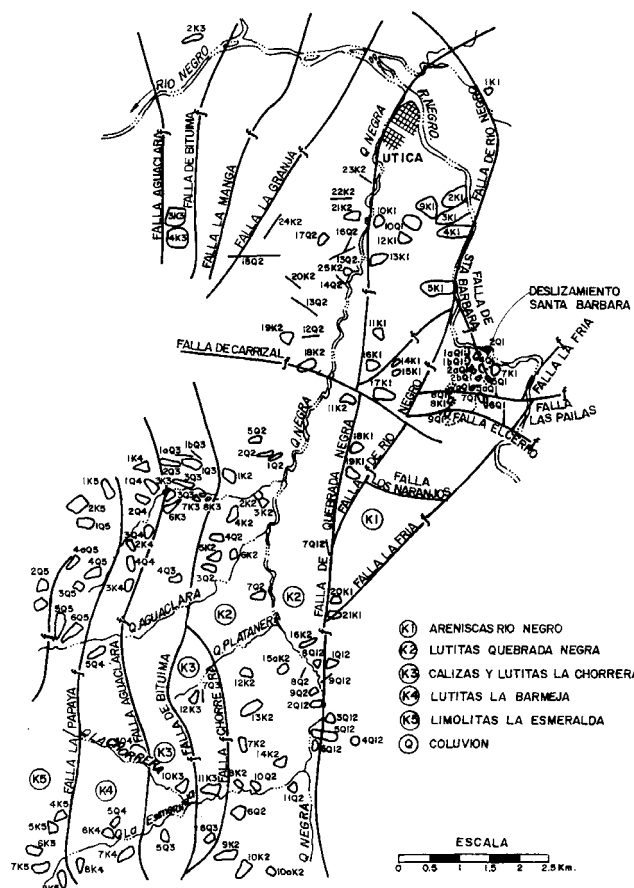
la zonificación geotécnica utilizando la MTN, es necesario adelantar algunas actividades previas; y a continuación se describen las más pertinentes y relevantes.

4.1.1 Determinación de los Objetivos y Alcances.

En el caso de la MTN, los requerimientos de los planos de trabajo (escalas e intervalos

cubrimiento requerido para las mediciones de taludes en una área dada, así:

Los objetivos de un estudio de esta naturaleza pueden ser de tipo específico o de tipo general; y el primer aspecto que determinan es el muestreo y grado de



La Figura 21 muestra la localización de las familias medidas para el caso de Utica, -con más énfasis en coluviones que en rocas-,

y otros rasgos de interés de esta área de estudio, cuyo objetivo específico era el determinar los riesgos de que los

movimientos en masa originados en coluviones, y provenientes de los cauces tributarios del Río Negro y Quebrada Negra, ocasionaran represamientos accidentales sobre estas vías de agua principales; y los que, - a su vez -, podrían originar avalanchas tales como las que ya habían afectado a Utica y motivado el estudio descrito (González, 1992a; Shuk y González, 1993).

Además del caso anterior, - y con mayor o menor grado de utilización de la MTN -, se han llevado a cabo estudios de zonificación geotécnica para desarrollos urbanos, barrios o sectores específicos de ciudades (Entre otros: Shuk y Hernández, 1996; González y Millán, 1999a y b), oleoductos, y para proyectos hidroeléctricos (Shuk, 1996c).

• objetivos de tipo general y alcances limitados: los propósitos de estudios de

zonificación geotécnica pueden estar enmarcados dentro de un deseo simplemente de ubicar las zonas problemáticas dentro de una área dada de estudio. En este caso puede no ser necesario llegar al análisis de riesgo, y se puede limitar la cuantificación de las inestabilidades por medio de la MTN solamente al nivel de universo (subnumeral 4.2.3).

Tal es el caso de la primera etapa del estudio geotécnico de inestabilidad y amenazas de la ya mencionada área denominada Bloque DELE-1 de aproximadamente 58 km², en el Piedemonte Llanero de la Cordillera Oriental, en las cercanías de Yopal - Casanare (Análisis Geotécnicos Colombianos Ltda., 1996) (Figura 22).

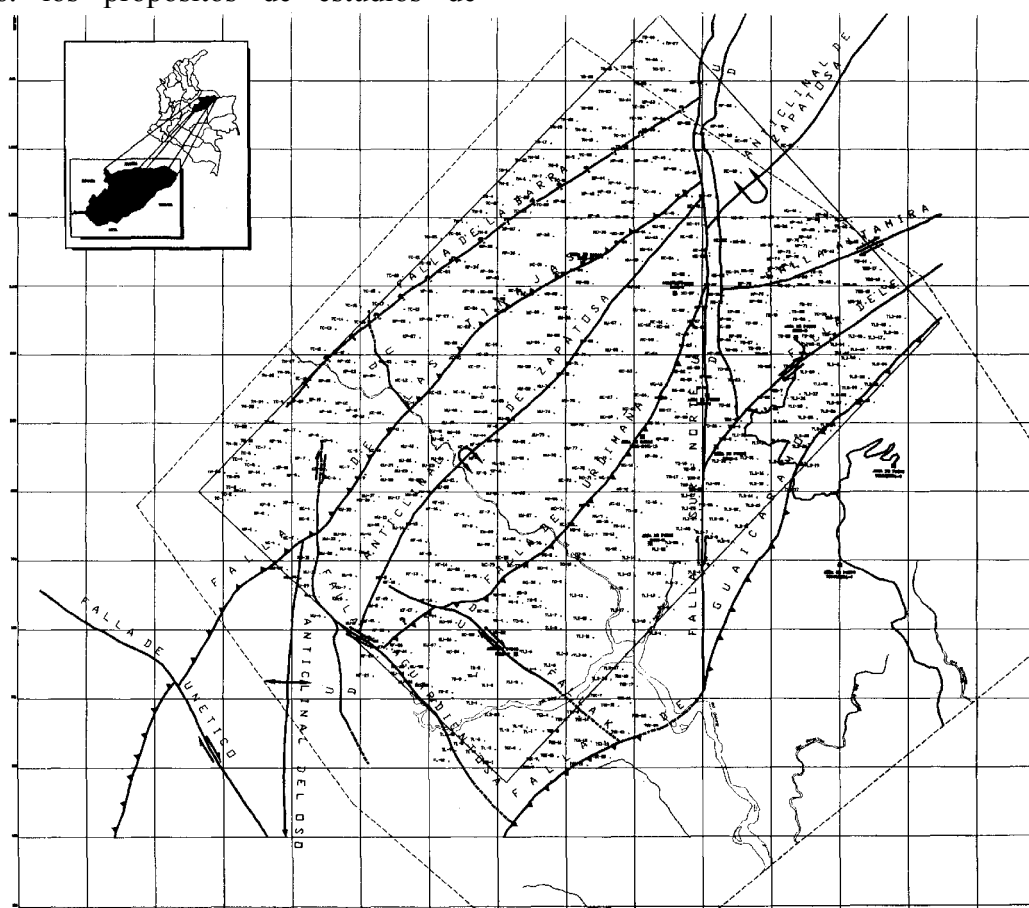


Figura 22 - Localización de Familias de Taludes Naturales; Bloque DELE-1; Yopal, Casanare (Tomado de: Shuk, 1996b)

En este tipo de casos, muchas veces, - y generalmente por razones de las disponibilidades de tiempo y recursos -, no es

factible efectuar un cubrimiento total de las familias de taludes naturales presentes en una área dada, tal como ocurrió en dicho Bloque

DELE-1; y el único logro propuesto para el cubrimiento de las mediciones, fue el de obtener la mayor densidad posible de información por unidad de área, y tratando de conseguir, - en lo posible -, una distribución uniforme de las áreas de representatividad dadas por los centroides (subnumeral 3.2) de las delimitaciones de las familias de taludes naturales.

El resultado de estos propósitos se muestra en la Figura 22, por medio de los puntos que corresponden a los centroides de las 615 familias medidas, lo cual resulta en una densidad de cubrimiento de algo más de 10 familias por km². Otros espacios en blanco por ausencia de mediciones, -y mayores que los que se presentan normalmente entre las familias-, corresponden a la carencia de "familias medibles" (subnumeral 3.2.2).

La ventaja de abocar este tipo de estudios radica en que los resultados de una primera etapa basada en objetivos generales, no solo permiten identificar las zonas problemáticas, sino que también permiten visualizar los objetivos específicos, alcances y otros aspectos para una posible segunda etapa de un estudio de zonificación geotécnica que podría llegar inclusive hasta la cuantificación de los riesgos y costos esperados en todo el área estudiada en la primera etapa, o en alguna o algunas zonas escogidas dentro de su extensión, y según las necesidades y aspiraciones del destinatario (o cliente) de los resultados.

Además del aspecto aquí tratado del muestreo y cubrimiento de las mediciones de taludes naturales, otro de los aspectos mencionados al comienzo de este subnumeral y que está determinado por los objetivos y alcances de un estudio dado, - el de la información requerida -, también amerita unas consideraciones como las que siguen a continuación.

4.1.2 Información Requerida.

Según lo tratado en un punto previo de este texto (numeral 2.8), para todos los trabajos utilizando la MTN, se requieren (como mínimo) unos ítems de información topográfica y geológica cuyos requisitos se

señalaron en dicho numeral, así como los ítems de información complementaria que pueden resultar útiles para el desarrollo satisfactorio de una zonificación geotécnica.

En términos generales, y para el desarrollo en sí de un estudio con objetivos de tipo general, solo se necesitan los ítems de la información mínima requerida. Pero, en ciertos casos, - especialmente durante la etapa de análisis de los resultados de la MTN -, alguno o algunos de los ítems de información complementaria (en particular los de naturaleza geológica) pueden resultar muy útiles para arrojar luces sobre la casuística de las disposiciones, tendencias y patrones de los resultados encontrados por medio de la MTN en una área dada.

En cambio, para trabajos de zonificación geotécnica con objetivos específicos, se requieren aquellos ítems de la información complementaria que sean pertinentes a los objetivos y alcances acordados, tanto para la planeación y desarrollo de los trabajos, como para su etapa de análisis.

Como un ejemplo resumido de lo anterior, a continuación se enumeran los ítems requeridos de información complementaria según las siguientes etapas y tipos de alcances para un estudio de zonificación geotécnica por medio de la MTN:

- hasta estudios de amenazas (incluyendo probabilidades totales): información meteorológica, hidrológica y de sismicidad, pertinentes al área de estudio.

- hasta estudios de vulnerabilidad y riesgo: además de los anteriores tipos de información, se debería disponer de todos aquellos pertinentes a los estimativos de vulnerabilidad dentro de las zonas susceptibles a los movimientos en masa tales como los levantamientos de asentamientos humanos y su infraestructura, de edificaciones, instalaciones y tuberías o conducciones externas, y la evaluación de la resistencia de sus componentes.

- hasta estudios de decisión económica: además de los anteriores ítems de información, se requieren aquellos que

permitan los análisis de decisión económica, entre otros, los siguientes:

- valor de las viviendas, edificaciones, estructuras y obras de infraestructura (incluyendo los costos de mantenimiento por unidad de tiempo) y de áreas de producción fabril, agrícola, ganadera, minera, etc.;

- costos de reparación y/o reposición de las viviendas, obras y áreas afectadas; y de su traslado a áreas de menor riesgo y, finalmente,

- indicadores y costos de tipo socioeconómico a nivel regional y también específicos para el área de estudio, tales como los factores de producción pertinentes, y el producto bruto y su tasa de crecimiento anual, con el fin de estimar los costos esperados indirectos (subnumeral 4.8.3) durante el período de tiempo necesario para el retorno a la normalidad después de un evento catastrófico.

4.1.3 Preparación de los Planos Topográficos de Trabajo.

Antes de proceder a las tareas de delimitación y medición de las familias de taludes naturales sobre planos topográficos, es necesario efectuar unas labores para su preparación.

Por ejemplo, la información geológica mínima requerida (subnumeral 2.8.2) usualmente está disponible en mapas geológicos, y los contactos entre las unidades litoestratigráficas (formaciones o miembros geológicos) se deben trasladar a los planos topográficos de trabajo, para luego proceder a la delimitación de las familias.

Otros preparativos menores, - que pueden variar en cada caso -, se efectúan

generalmente para facilitar el manejo del plano topográfico de trabajo y la tarea de delimitación y medición en sí, y dependen del tamaño del plano y de su grado de claridad y nitidez.

4.2 Análisis de Estabilidad - Factor de Seguridad

Más adelante en el texto (Figura 28), se ilustran los esquemas básicos para los estimativos del factor de seguridad con base exclusivamente en los métodos de análisis de estabilidad propios de la MTN. Estos se pueden calcular en dos modalidades: para taludes de diseño, con dimensiones y geometrías preestablecidas, tal como los resultados de estabilidad de la MTN que se ilustran en la Figura 23 para el corte máximo de la casa de máquinas del Proyecto Multipropósito Urrá-1, y cuya comparación con los resultados de análisis convencionales de estabilidad fue muy satisfactoria (Shuk, 1994a); o, como la segunda modalidad de estudios de zonificación geotécnica.

En este punto vale la pena poner de relieve la similitud entre las formas de las curvas reales de factor de seguridad de la Figura 23 y las teóricas delineadas por McMahon (1976) con base en el criterio de equilibrio límite y en el trabajo analítico de Sokolovskii (1965) sobre materiales homogéneos e isotrópicos, que se presentan en la Figura 24.

El tratamiento de este encabezamiento de primer orden se limita a los temas relativos a la zonificación geotécnica.

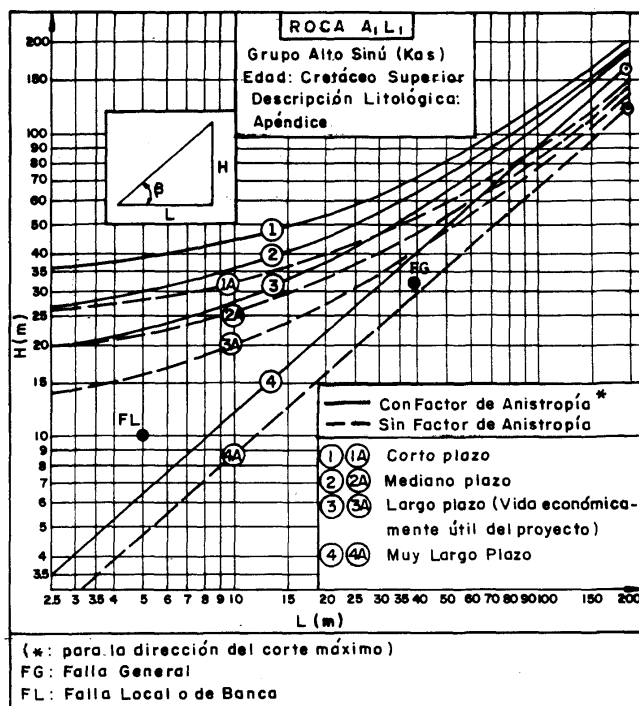


Figura 23 - Curvas de Estabilidad del Corte Máximo para la Casa de Máquinas del Proyecto Multipropósito Urrá-1; Lado Derecho del Río Sinú, Tierralta, Córdoba (Tomado de: Shuk, 1994a)

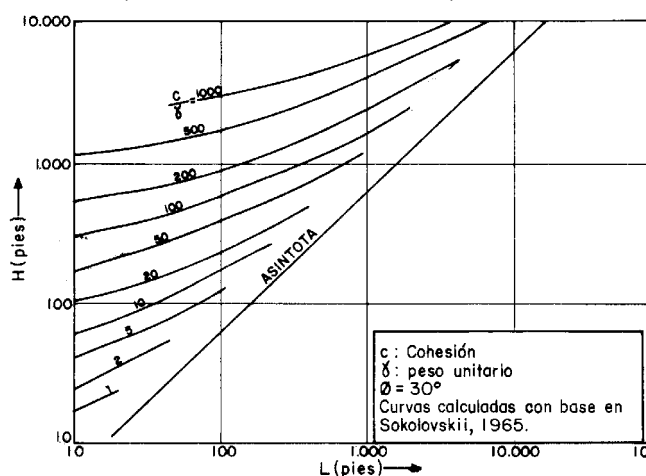


Figura 24 - Curvas Teóricas de $F_s = 1.0$ para Taludes en Equilibrio Límite (Tomado de: McMahon, 1976)

14.2.1 Nivel de Familia.

Todos los análisis de estabilidad de la MTN necesariamente parten de este nivel y, a su vez, posteriormente retornan a él, puesto que el centroide de cada delimitación de familia constituye su punto de representatividad y de análisis básico de los parámetros geomecánicos y de estabilidad de la MTN.

Una vez que se completan las actividades previas antes descritas (numeral 4.1), se procede a la delimitación de las familias de taludes naturales y a su medición.

El nivel de familia se utiliza para el estimativo de los parámetros geomecánicos de cada familia, en cuyo caso se aplica el sistema SCICN ya descrito bajo un encabezamiento previo (subnumeral 3.1.4), el cual generalmente (aunque no necesariamente en todos los casos) se aplica en los estudios de zonificación geotécnica con objetivos de tipo específico.

Este tipo de medición es el único que permite determinar la función de correlación potencial simple de cada familia, de donde parten las operaciones que se efectúan por medio del Algoritmo para el Cálculo de los Parámetros Geomecánicos de la MTN, llegando a los promedios de sus resultados a nivel de subpoblación y población; y a las magnitudes de falla para las tres bases dimensionales de costos (subnumeral 4.8.4);

4.2.2 Nivel de Subpoblación o Población.

Su conformación siempre parte de los resultados (L_{LD}, H_{LD}) de todas las familias que lo componen. Con estos resultados, se establece su Patrón Triangular (numeral 3.3) y su Tendencia de Pendientes Promedias (subnumeral 3.3.8), de cuya función potencial simple parten todos los cálculos para los parámetros geomecánicos y de estabilidad de estos dos niveles.

Para el estimativo de los parámetros geomecánicos a nivel de subpoblación o población, o para el cálculo de los factores de seguridad relativos (F_{sr}) en estos niveles, (o en el nivel de universo), solamente se requiere medir dentro de cada delimitación de familia las dimensiones L_{LD}, H_{LD} (Figura 3) con las cuales, - y una vez que se miden todas las familias pertenecientes al nivel de análisis -, se puede establecer el Patrón Triangular de una subpoblación, población o universo.

4.2.3 Nivel de Universo.

Para el cálculo de los factores de seguridad

en los dos anteriores niveles, o al nivel de universo se presentan dos modalidades distintas:

- Factor de Seguridad Relativo (Fsr): esta modalidad se refiere a la determinación de dicho factor únicamente por medio de la MTN, y el término "relativo" se refiere al hecho de que su estimativo se efectúa con base en el valor de la relación entre dos parámetros del mismo tipo, uno del nivel de familia, y el otro correspondiente al promedio de un nivel de referencia superior al de familia (subpoblación, población o universo); y sin considerar la geometría de la familia, ni su potencial plano crítico de falla; y el

- Factor de Seguridad Normal (Fs): en esta modalidad se emplea una combinación entre los métodos convencionales de análisis de estabilidad de la Microgeotecnia y algunos pertinentes a la MTN.

Estas dos modalidades se tratan más extensamente en dos numerales posteriores (numerales 4.3 y 4.4).

El nivel de universo es el más adecuado para poder visualizar las calidades comparativas de estabilidad dentro de una área dada de estudio, y determinar sus peores zonas, así como para establecer las categorías (con límites cuantitativos) de estabilidad pertinentes para un estudio de zonificación geotécnica.

Con referencia específica y limitada únicamente a la MTN, dentro de este nivel de universo se puede estimar solamente el Factor de Seguridad Relativo al promedio del universo (Fsr), de idéntica naturaleza al descrito antes para el nivel de subpoblación o población; y su estimativo parte del Patrón Triangular del Universo, que se establece con base en los mismos puntos (L_{LD} , H_{LD}) de todas las familias de taludes naturales de una área dada de estudio, y utilizando los mismos métodos expuestos con respecto al Patrón Triangular (subnumerales 3.3.5 y 3.3.8).

Pero en este nivel no es necesario determinar su tendencia inicial (o de origen) de pendientes máximas y el límite superior de su Patrón Triangular Actual corresponde al de su mejor población y sus puntos L_{LD} y

H_{LD} , mientras que su límite inferior se determina según lo ya indicado anteriormente (subnumeral 3.3.5).

A continuación se presentan dos ejemplos del Patrón Triangular a nivel de universo. El primero corresponde a un estudio de zonificación geotécnica de inestabilidad de una zona del piedemonte de la Cordillera Central que rodea a Yumbo.

La Figura 25, que muestra los números de cada familia en su localización respectiva, representa otro caso en el cual se logró un cubrimiento total de las familias medibles (subnumeral 3.2.2). En esta zona se ubican tres barrios (Las Cruces, Nuevo Horizonte y Bellavista), que en forma repetitiva han estado sujetos a problemas de inestabilidad, los cuales han significado daños y pérdidas significativas para las viviendas afectadas. Las unidades litoestratigráficas que constituyen el universo analizado son las siguientes (Shuk y Hernández, 1996):

Kv : Basalto del Cretáceo, ligeramente meteorizado; por lo común, fracturado y localmente cizallado; roca fácilmente disgregable.

Ter : rocas sedimentarias del Terciario, consistentes de una arenisca cuarzosa de grano medio a grueso, con niveles de un conglomerado de grano medio angular a subangular compuesto de diversas litologías, principalmente de basaltos y liditas (cherts).

Qrt : bloques y fragmentos derivados de las rocas sedimentarias del Terciario, que yacen encima de las rocas y forman depósitos coluviales.

Qpd: depósitos de Piedemonte, constituidos por cantos de arenisca y basalto de tamaños variables, en una matriz limo-arcillosa.

Qre : remanentes de aludes de guijarros, hasta grandes bloques de roca sedimentaria, de tamaños entre algunos centímetros y 6 m³, en matriz limo arcillosa, y que forman depósitos coluviales.

Qa : abanicos menores de materiales limo-arcillosos y localmente arenosos

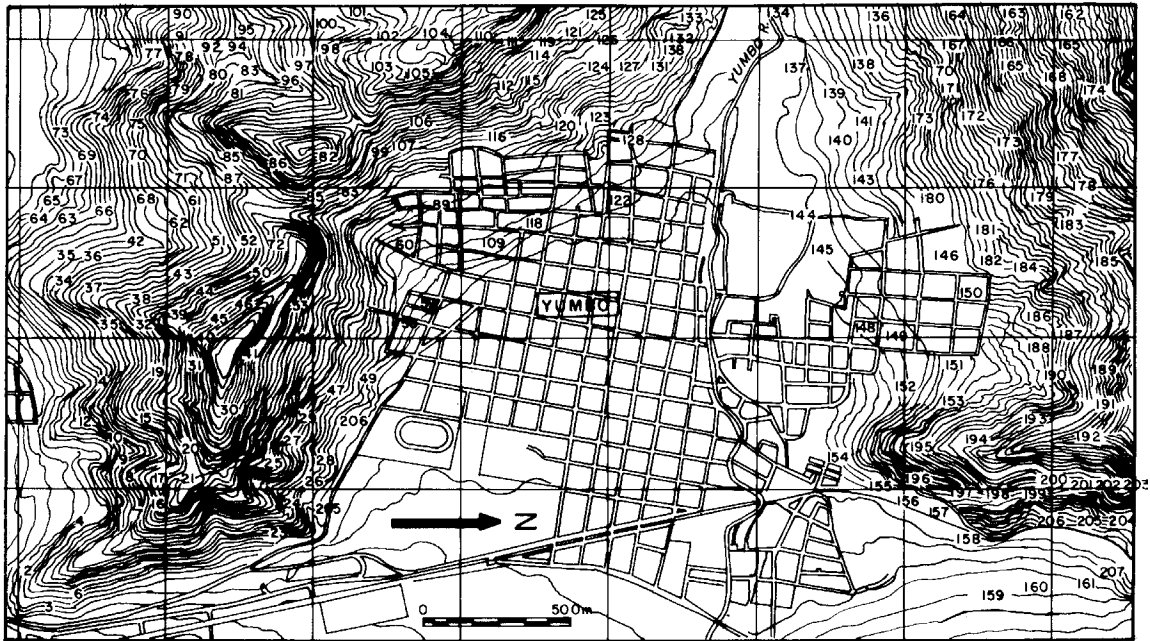


Figura 25 - Localización de Familias de Taludes Naturales; Estudio de Zonificación Geotécnica; Yumbo, Valle del Cauca (Tomado de: Shuk y Hernández, 1996)

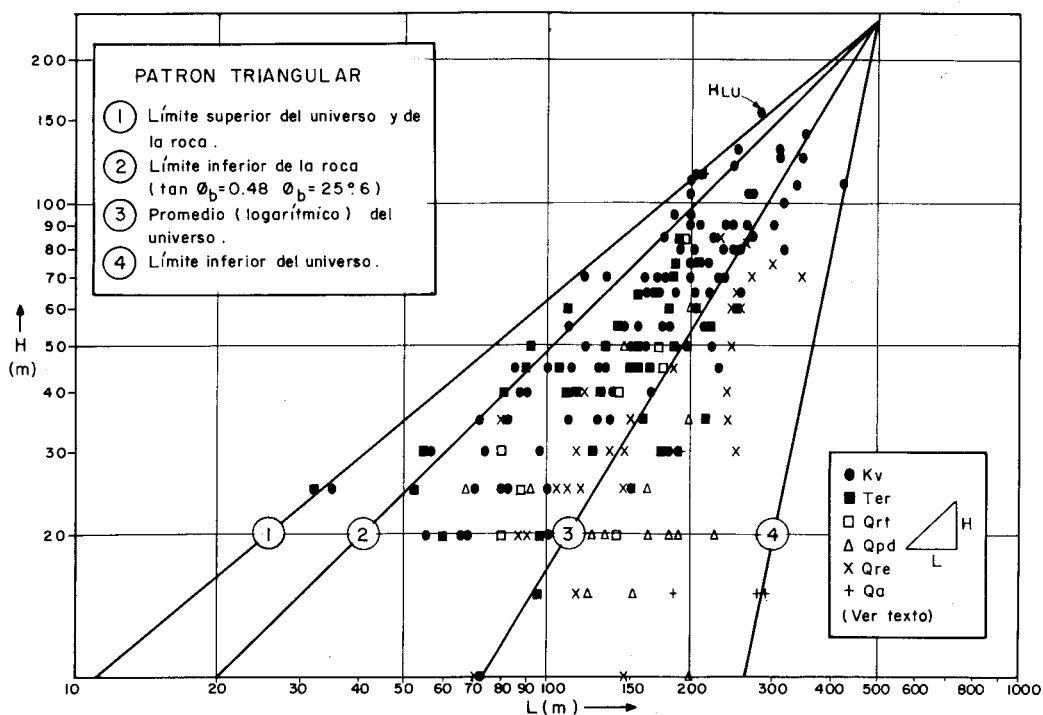


Figura 26 - Patrón Triangular del Universo; Estudio de Zonificación Geotécnica; Yumbo, Valle del Cauca (Tomado de: Shuk y Hernández, 1996)

En el Patrón Triangular del Universo de Yumbo, ilustrado por medio de la Figura 26, resulta relevante e interesante apreciar que:

- la gran mayoría de los puntos (L_{LD}, H_{LD}) corresponden a los materiales descritos como rocas (unidades Kv y Ter), se ubican a la derecha del límite inferior del Patrón Triangular de la roca y, por lo tanto,

corresponden realmente a materiales degradados y desagregados. Adicionalmente, un cierto porcentaje de los puntos ubicados dentro de la zona de roca de este Patrón Triangular corresponden a materiales degradados, según la definición contenida en un encabezamiento anterior de este texto (subnumeral 3.3.5); y,

• todos los puntos correspondientes a las cuatro unidades cuaternarias se ubican dentro de la zona de los materiales degradados y desagregados a la derecha del límite inferior del Patrón Triangular de la

roca y, en términos generales, evidencian una altura inferior y, -por ende-, una cohesión inferior a la de la roca degradada y desagregada.

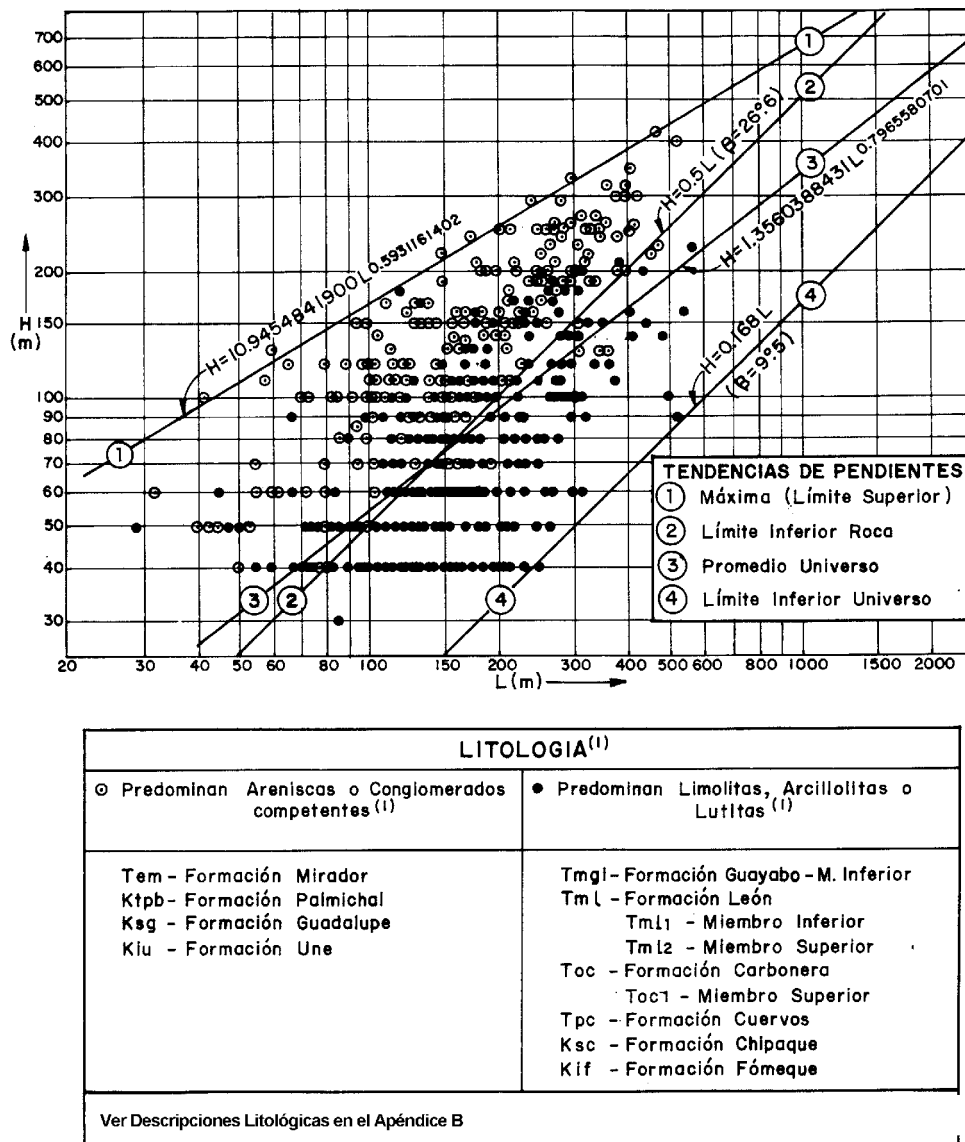


Figura 27 - Patrón Triangular del Universo; Bloque DELE-1; Yopal, Casanare (Tomado de: Shuk, 1996b)

De acuerdo a lo anterior, el universo de Yumbo evidencia una calidad de regular a mala. En cambio, el universo del segundo ejemplo, - el del área de estudio del Bloque DELE-1, ya mencionado varias veces -, y cuyo Patrón Triangular se ilustra en la Figura 27, evidencia una calidad significativamente superior a la del universo de Yumbo; y los tres rasgos de interés que se pueden apreciar en este bloque, son:

• las unidades litoestratigráficas en que, -según las descripciones litológicas de la información geológica disponible-, predominan los tamaños de grano más gruesos (areniscas, etc.), evidencian una mayor altura y, - por tanto -, una mayor cohesión que en aquellas en las que predominan los tamaños de grano fino (limolitas, arcillolitas y/o lutitas); y el hecho de que estas últimas se ubican general y consistentemente a la derecha de los puntos

correspondientes a los de los tamaños de grano más grueso, implica que su ángulo de fricción también es inferior;

- es mínima la presencia de puntos de las unidades litoestratigráficas con predominancia de tamaños de grano más grueso dentro de la zona correspondiente a los materiales degradados y desagregados, en comparación con la presencia abultada, dentro de la misma zona, de las unidades en que predominan los tamaños de grano fino. Esto verifica los anteriores asertos sobre la menor resistencia de estas unidades de grano fino; y también explica su mayor susceptibilidad a la degradación y desagregación, hecho que se puede verificar por medio de los resultados cuantitativos del Cuadro No. 3; y, finalmente,

- la coincidencia, - con la excepción de un pequeño número de puntos (L_{LD}, H_{LD}) -, entre el límite inferior del Patrón Triangular de la roca y la Tendencia de Pendientes Promedias del universo. Este rasgo, posiblemente de naturaleza fortuita, y quizás pertinente únicamente a este universo en particular, permite unos resultados relativos a la distribución geográfica de los materiales degradados y desagregados que se presentan y analizan más adelante (Figura 30).

En este punto es pertinente hacer notar que, aunque en el nivel analítico de universo de la MTN solo es estrictamente apropiado el estimativo del Factor de Seguridad Relativo (Fsr), los resultados de este mismo Fsr o el del Factor de Seguridad Convencional (Fs) obtenido en el nivel de subpoblación o población para cada una de las familias de una área de estudio, sí se pueden trasladar al nivel de universo, para el análisis de su disposición y distribución geográfica dentro de dicha área

4.3 Factor de Seguridad Relativo (Fsr).

Las expresiones matemáticas para el cálculo del Factor de Seguridad Relativo (Fsr) de la MTN se muestran en la Figura 28. Estas expresiones están estructuradas alrededor de una relación entre dos alturas, en la que la del numerador corresponde a la altura del objeto

de análisis (talud de diseño, o una familia dada), y la altura dada por el denominador corresponde a la de la función potencial simple $H = aL^b$, -generalmente correspondiente a la tendencia de pendientes promedias -, del nivel de la MTN (subpoblación, población o universo) de referencia.

En el caso de un talud de diseño, el nivel de referencia puede ser, - según las circunstancias particulares de cada caso -, una familia, una subpoblación o una población. En el caso de los estudios de zonificación geotécnica, en los que el objeto de análisis relativo siempre es una familia, el nivel de referencia siempre es superior al de familia.

A este respecto es importante advertir sobre la necesidad de tomar las precauciones del caso cuando se analiza Fsr a nivel de universo en áreas de efectos antrópicos tales como cortes, canteras o explotaciones a tajo abierto, pues estas ocasionan resultados peligrosamente engañosos, tal como ocurrió en la recientemente terminada zonificación geotécnica de las laderas de Bogotá (encabezamiento primario 5).

Las expresiones matemáticas de la Figura 28 también están dadas en función de las cuatro categorías de tiempo de la MTN, las cuales se tratan a continuación.

4.3.1 Categorías de Tiempo.

En la gráfica A de la Figura 28 se muestra la forma generalizada para determinar en rocas la curva de estabilidad ($Fsr = 1.0$) para cualquier categoría de tiempo diferente a la de Largo Plazo, plazo que siempre está representado por la tendencia promedia de pendientes; y su gráfica B indica la manera de estimar y delinear las curvas de estabilidad ($Fsr = 1.0$) para el caso de un talud de diseño (con una geometría preestablecida), y para las cuatro categorías de tiempo que permite determinar la MTN: Muy Corto Plazo (MCP), Corto Plazo (CP), Mediano Plazo (MP), y Largo Plazo (LP).

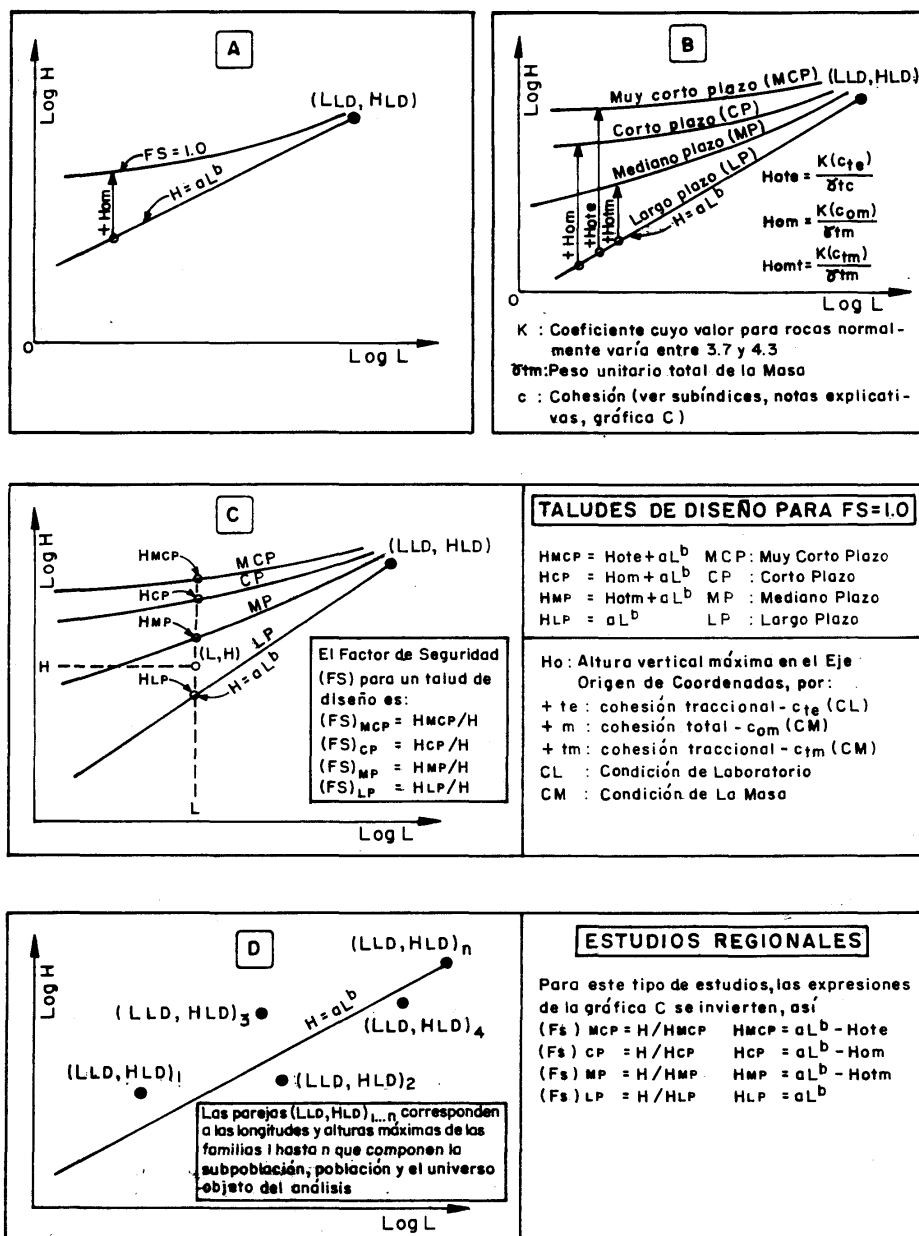


Figura 28 - Factor de Seguridad Relativo (Fsr) - Ilustración Esquemática de su Estimativo para las Cuatro Categorías de Tiempo de la MTN y para Taludes de Diseño o Estudios Regionales de Zonificación Geotécnica (Tomado de: Shuk, 1996b)

Resulta pertinente reiterar en este punto que, - en el caso de los taludes de diseño -, es muy satisfactoria la correspondencia entre los resultados del Fsr de la MTN para el Largo Plazo (LP), y los de los factores de seguridad obtenidos por medio de los análisis convencionales de estabilidad de la Microgeotecnia.

Una comparación de este tipo para el caso del corte máximo de la Casa de Máquinas del Proyecto Multipropósito Urrá-1 se ha presentado en un escrito técnico

previo (Shuk, 1994a), y las comparaciones para otros casos documentados se incluyen en el manuscrito básico de la MTN (Shuk, 1999).

La última categoría de tiempo de Largo Plazo (LP) corresponde, - tanto en el caso de taludes de diseño, como en el de estudios de zonificación geotécnica -, a la función potencial simple que representa la tendencia de pendientes promedias del Patrón Triangular (subnumeral 3.3.8) de un nivel de referencia y análisis superior al de familia.

Pero para determinar las curvas de estabilidad ($F_{sr} = 1.0$) de las tres siguientes categorías de tiempo (MP, CP y MCP), el procedimiento es diferente para los dos objetivos de análisis: taludes de diseño o estudios de zonificación geotécnica.

Mientras que en el caso de los taludes de diseño (gráficas B y C) se le suma a dicha función potencial simple una altura constante, en el caso de los estudios regionales dicha altura se resta de esa función, según lo indicado en la gráfica D de la Figura 28.

La implicación geomecánica de lo anterior para los taludes de diseño (o de corte) es la de que a mayor altura es menor el factor de seguridad, mientras que en el caso de taludes naturales, a mayor altura, es mayor el factor de seguridad y, por ende, mayor es su resistencia.

La altura constante mencionada, - que es diferente para cada una de las tres categorías de tiempo restantes -, corresponde a la altura vertical máxima (o crítica) que, a su vez, está determinada por una cohesión y el peso unitario; y por un factor K (gráfica B), del mismo tipo del que fue derivado en forma teórica por el pionero de la Mecánica de Suelos (Terzaghi, 1956).

Por medio del algoritmo de cálculo de la MTN, y según se indica en la Figura 17 (subnumeral 3.4.5), se pueden calcular dos tipos de cohesión en el Eje Origen de Esfuerzos Verticales ($EOC\sigma$): la cohesión traccional (c_t) y la cohesión por imbricación (o entramamiento) estructural (c_i); y las cuales se ilustran en la Figura 17; y la cohesión total (c_o) es igual a la suma de las dos, o sea:

$$c_o = c_t + c_i \quad (33)$$

De los dos componentes de la cohesión total, - que se pueden cuantificar tanto para la "Condición de la Masa" (subíndice adicional: m), como para una "Condición de Laboratorio" (subíndice adicional: e) -, la que más perdura es la cohesión traccional.

Mientras que la cohesión por imbricación estructural puede desaparecer a partir de condiciones de presurización

positivas (numeral 2.6) de valores medianos, - y casi seguramente se pierde totalmente con valores altos de presurización positiva -, la cohesión traccional, aún bajo las condiciones máximas posibles de presurización positiva, conserva un 10 a 20% de su valor en condiciones de cero presurización.

Estas inferencias con respecto a la cohesión, - con base en un gran número de resultados -, le permiten a la MTN formular las cuatro categorías de tiempo antes nombradas; y este rasgo le concede una ventaja sobre las metodologías convencionales de análisis de estabilidad de la Microgeotecnia que, en la generalidad de los casos, solo contemplan una categoría de tiempo.

Los tres tipos de cohesión que se emplean para definir las tres categorías restantes de tiempo de la MTN, corresponden a la cohesión traccional de la masa (c_{tm}), para la categoría de Mediano Plazo (MP); la cohesión total de la masa (c_{om}), para la categoría de Corto Plazo (CP); y la cohesión traccional de la "Condición de Laboratorio" (c_{te}), para la categoría de tiempo de Muy Corto Plazo (MCP). El material objeto de la "Condición de Laboratorio" es el así llamado "Elemento Constitutivo" (EC), que es sensiblemente equivalente a una muestra para ensayo de laboratorio.

La duración de las tres categorías de tiempo (LP, MP y CP), se puede estimar por medio de un análisis que involucra, - entre otros -, los períodos de retorno de las intensidades de lluvias. Para la última categoría de tiempo (MCP), y bajo las condiciones normales de lluvias y sismos en la Zona Andina, se presume que su duración es del orden o menor de un año hasta, posiblemente, más de un año; y que en zonas de pluviosidad muy alta y de mayor sismicidad, - como la del Piedemonte Llanero de la Cordillera Oriental -, se piensa que no puede perdurar más de un ciclo de tiempo seco. Por lo tanto, la categoría de tiempo MCP solo es aplicable para taludes de excavaciones y cortes temporales de una vida corta a muy corta.

Con base en estimativos, - efectuados según lo mencionado en el párrafo anterior

en dos zonas de la Cordillera Oriental -, en una de alta pluviosidad y sismicidad (último tramo de la Carretera Bogotá - Villavicencio), y en una de baja a mediana pluviosidad y de sismicidad promedia (Area de Desastre de Utica), a continuación se presentan los rangos de las duraciones de las tres primeras categorías de tiempo (Shuk y González, 1993; U. de los Andes, 1992):

Largo Plazo (LP)	: 40 a 50 años
Mediano Plazo (MP)	: 16 a 35 años
Corto Plazo (CP)	: 4 a 8 años

En este punto se debe enfatizar que estas duraciones promedias son muy engañosas porque, - y según lo mencionado antes (subnumeral 3.6.2)-, representan valores promedios de unos datos que, muy posiblemente, se ajustan a una distribución de probabilidades tipo Weibull, cuya base es doble logarítmica. Esta distribución es muy usada en estimativos con base en ensayos de duración de vida, por ejemplo, de artículos de consumo.

Así, en un caso como el del universo del Bloque DELE-1 (Figura 27), mientras que su promedio puede estar representando duraciones similares a las anteriormente indicadas, sus puntos del extremo derecho del Patrón Triangular, - que representan los materiales más degradados y desagregados -, posiblemente corresponden a duraciones de mucho menos a algo menos de una a dos decenas y hasta centenas de años; y los puntos de su extremo izquierdo, - que representan las mejores rocas de ese universo -, posiblemente corresponden a duraciones de vida de millones de años.

4.3.2 Presentación de los Resultados.

En el campo de los estudios regionales para zonificación geotécnica, la forma más apropiada de presentación es la de los mapas de curvas de isovalores de Fsr.

En la Figura 29 se presenta un mapa de este tipo para el caso previamente descrito de Yumbo (figuras 25 y 26); y en esta Figura 29 se puede apreciar que los tres barrios con problemas de estabilidad de taludes

efectivamente están localizados en zonas que evidencian el rango más inferior de valores de Fsr (para el Largo Plazo) de todo el universo de mediciones y resultados.

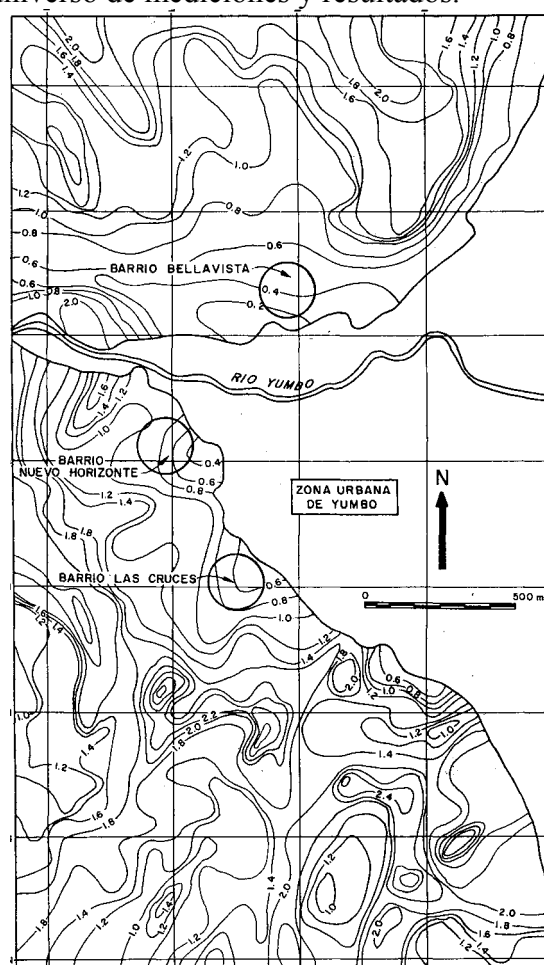


Figura 29 - Curvas de Isovalores del Factor de Seguridad Relativo (Fsr) para Largo Plazo; Yumbo, Valle del Cauca (Shuk y Hernández, 1996)

Los resultados de Fsr para el Largo Plazo del ya mencionado universo del Bloque DELE-1, y cuyo Patrón Triangular se presentó en la Figura 27, se pueden observar en la Figura 30. Debido a la coincidencia, posiblemente fortuita, descrita en el tercer rasgo de interés de este Patrón Triangular (subnumeral 4.2.3), las áreas que evidencian resultados de Fsr menores de 1.0, también coinciden con la ubicación y disposición geográfica de las zonas de sus materiales degradados y desagregados. En este caso particular, y dado que este tipo de materiales usualmente tiene un grado fuerte de asociación con rasgos geoestructurales de origen tectónico, las curvas de isovalores de

Fsr menores de 1.0 también están determinadas por la incidencia de tales rasgos geoestructurales.

Aunque el grado de reducción de este mapa no permite su adecuada apreciación, es pertinente destacar que un tramo de la vía de

acceso a uno de los pozos localizada dentro del área de estudio, - y que estuvo sujeto a un número de problemas por inestabilidad de taludes -, coincide exactamente con una zona de valores de Fsr menores de 1.0.

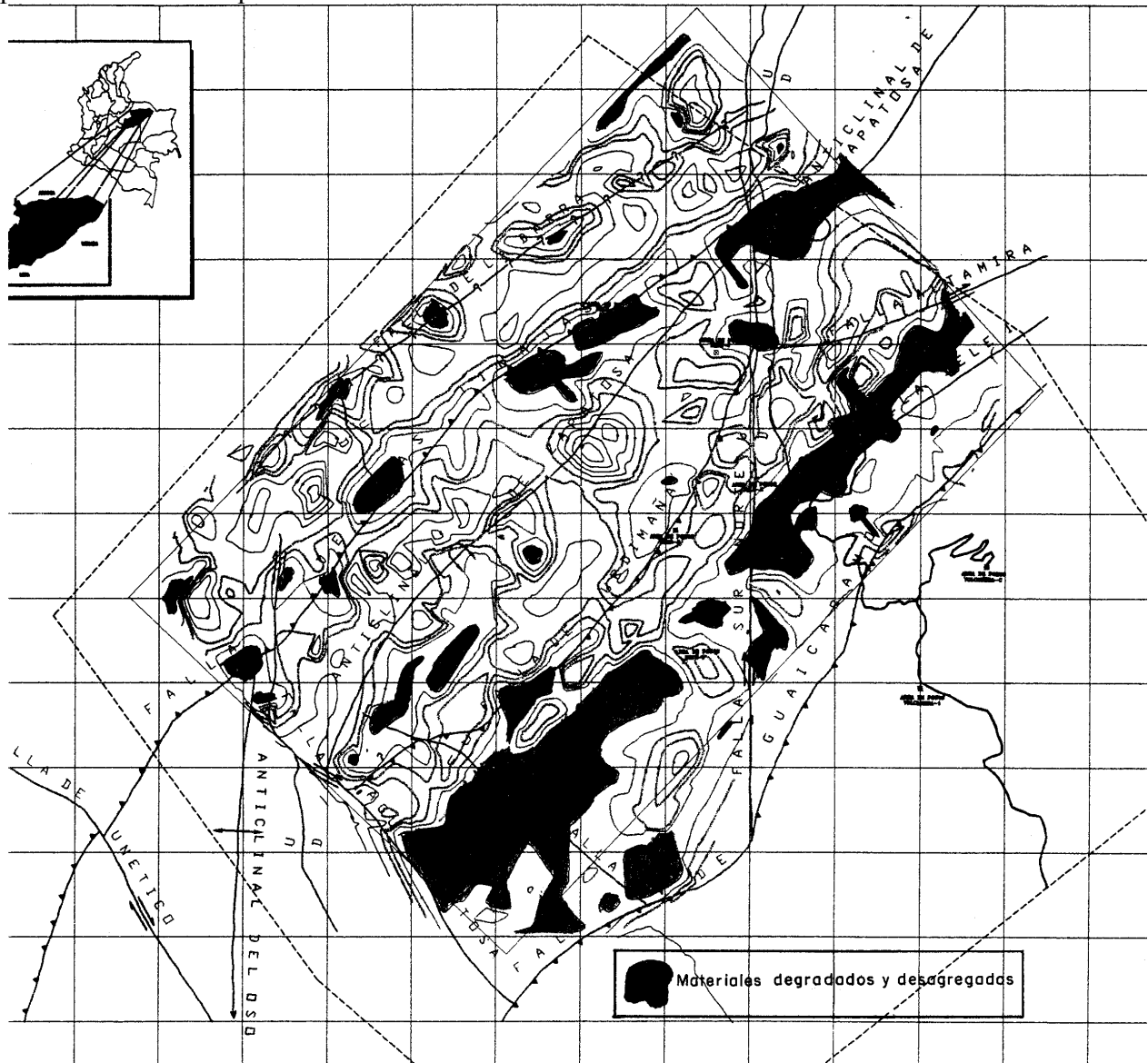


Figura 30 - Mapa de Curvas de Isovalores del Factor de Seguridad Relativo (Fsr) para el Largo Plazo y Zonas de Materiales Degradados y Desagregados; Bloque DELE-1, Yopal, Casanare (Tomado de: Shuk, 1996b)

Finalmente es importante advertir que la validez de los mapas de isovalores del Factor de Seguridad Relativo (Fsr) está fuertemente determinada por el grado de cubrimiento del área, - que, preferiblemente debería ser de tipo total (subnumeral 3.2.2), - y/o por una densidad adecuada de mediciones por unidad de área.

4.3.3 Rango de los Valores del Factor de Seguridad Relativo (Fsr)

Aunque la utilización del Factor de Seguridad Relativo (Fsr) y sus resultados son muy útiles y beneficiosos para una zonificación geotécnica cuantitativa de estabilidad, y que además permite definir en forma rápida y económica las zonas de

condiciones desfavorables en cuanto a estabilidad de taludes, - tal como se puede apreciar por los resultados de los dos ejemplos anteriores -, el rango de valores entre los resultados máximos y mínimos de Fsr no está de acuerdo con los resultados que se obtendrían por medio de los análisis convencionales de estabilidad de la Microgeotecnia; y, presumiblemente, excede significativamente el de la realidad físico - geotécnica.

Así, y mientras que a nivel de población el rango de valores de Fsr puede estar entre 0.4 y 4.0, a nivel de universo puede reflejar valores extremos entre 0.1 y 6.0 (o más); y, desafortunadamente, además de la discordancia con la realidad, los rangos de estas magnitudes también pueden distorsionar los resultados de los análisis probabilísticos y de decisión económica. Por estas razones, especialmente en el caso de los estudios con objetivos específicos (subnumeral 4.1.1), se deben efectuar estimativos para determinar el Factor de Seguridad Convencional (Fs), los cuales se tratan a continuación.

4.4 Factor de Seguridad Convencional (Fs).

Este tipo de factor de seguridad, en cuya determinación el grado de participación de la MTN es preponderante (aunque parcial), se calcula en forma idéntica a la de los análisis convencionales de estabilidad de la Microgeotecnia basados en un equilibrio estático; y, en términos muy simplificados, su valor está dado por la siguiente expresión:

$$F_s = \frac{s}{r} \quad (34)$$

donde:

s: esfuerzo de empuje a lo largo de la superficie de falla.

r: resistencia al empuje (en unidades de esfuerzo) movilizada a lo largo de la superficie de falla.

Para el estimativo de Fs con la participación de la MTN, se utilizan sus parámetros geomecánicos de resistencia ($c, \tan \phi$), de densidad y fase (γ_{tm}) y de presurización pertinentes al análisis de estabilidad convencional, obtenidos a nivel de subpoblación o población por medio del Algoritmo para el Cálculo de los Parámetros Geomecánicos de la MTN (subnumeral 3.4.3).

Estos parámetros se involucran en alguna de las metodologías de cálculo (muchas de ellas disponibles en programas de computador) para encontrar la superficie más crítica de falla, - curva o plana, según el caso -, con base en la geometría de cada familia de taludes naturales y en los resultados de dichos parámetros geomecánicos pertinentes. Así, el factor de seguridad dado por la superficie crítica de falla es, a la vez, el valor de Fs de la familia analizada.

De esta manera se configura un especie de simulación de las metodologías convencionales de estabilidad en sus aspectos empíricos, en las cuales se efectúan ensayos de laboratorio sobre muestras extraídas de la o las unidades geológicas de interés (poblaciones o subpoblaciones), para la aplicación de sus resultados en las diferentes metodologías convencionales de cálculo de la estabilidad en sí.

Nuevamente, la forma más apropiada de presentación de los resultados es por medio de mapas de curvas de isovalores de Fs; y, si así se desea, este Fs se puede determinar para las cuatro categorías de tiempo de la MTN, utilizando los distintos tipos de cohesión (subnumeral 4.3.1) descritos antes para los estimativos del Factor de Seguridad Relativo (Fsr).

4.5 Otras Aplicaciones de los Parámetros Geomecánicos para Zonificación Geotécnica

Además de la aplicación directa de los parámetros geomecánicos pertinentes en los estimativos para el Factor de Seguridad Convencional del numeral anterior, los

resultados en planta de algunos de estos parámetros ofrecen una utilidad y un beneficio valioso de tipo complementario para el análisis de los resultados de una zonificación geotécnica, y de sus patrones y tendencias. Un ejemplo de esto es el presentado con respecto a los materiales degradados y desagregados ilustrados en la Figura 30.

Lo anterior es particularmente válido si la información geológica de referencia disponible solo es de tipo general, y, - por lo tanto -, utilizable para las labores de delimitación de las familias de taludes naturales, pero que no se caracteriza por un nivel de detalle adecuado (especialmente con respecto a los rasgos geoestructurales del área de estudio) para explicar la casuística de la ubicación, disposición, tendencias y patrones (en planta) de los resultados de la respectiva zonificación, en las cuales dichos rasgos evidencian un grado variable de determinación y control.

Por medio de los resultados de varios de estos parámetros (principalmente, pero no siempre, presentados en forma de mapas de curvas de isovalores del respectivo parámetro) es posible detectar los rasgos geoestructurales de una área dada de estudio. Esta aplicación de la MTN motivó un escrito técnico de cierta amplitud (Shuk, 1996a).

4.6 Amenaza (Probabilidades de Falla)

Los parámetros L y H de las mediciones de taludes naturales y que conforman el Patrón Triangular en cualquiera de los niveles de la MTN, - y tal como se mencionó antes en lo relativo al Patrón Elipsoidal (subnumeral 3.3.1) -, son variables aleatorias y, por lo tanto, son analizables por medio de métodos probabilísticos.

La importancia de los análisis probabilísticos radica no sólo en la posibilidad de cuantificar las amenazas y riesgos geotécnicos, sino también en que estos constituyen el único puente para llegar a los costos esperados y a otros parámetros económicos de naturaleza probabilística para los Análisis de Decisión Económica.

La posibilidad de efectuar análisis probabilísticos en estudios de zonificación geotécnica de amenazas parte de la variabilidad desplegada dentro del Patrón Triangular (subnumeral 3.3.9) por los resultados de taludes naturales, y que ya se trató anteriormente. Dicha variabilidad está determinada por los resultados del proceso de evolución de la masa, - y su consecuente grado de degradación y desagregación -, y por la variabilidad de su material constitutivo. Esta última se denomina como la variabilidad de los materiales geológicos.

Todas las consideraciones planteadas bajo este encabezamiento y sus subnumerales, parten del Factor de Seguridad Relativo (Fsr) estimado por medio de la MTN (numeral 4.3 y sus subnumerales), y algunos de sus otros resultados pertinentes; y del hecho de que todos los resultados relativos a los taludes naturales, incluyendo la casi totalidad de los parámetros (geomecánicos y otros) que de ellos emanan, evidencian grados de ajuste más que adecuados con distribuciones de probabilidades de tipo lognormal.

A pesar de que las aplicaciones del análisis probabilístico para la estabilidad de taludes son conocidas desde hace más de 30 años (ej.: Shuk, 1968 y 1970), y del interés que pueden suscitar en los medios académicos, estos no han tenido hasta ahora una acogida masiva en la práctica profesional.

4.6.1 Variabilidad de los Materiales Geológicos.

En las formaciones geológicas sedimentarias compuestas por interestratificaciones de facies sedimentológicas de diferentes tipos de tamaños de grano, y en un grado algo menor en las rocas metamórficas que se originan de las anteriores, las variabilidades son significativamente mayores que en las de las formaciones geológicas de litologías más homogéneas; y esta variabilidad cambia tanto en el sentido vertical, como en el sentido horizontal. Lo mismo ocurre en suelos no homogéneos, entre otros, tales como los

depósitos de terrazas estratificadas, de morrenas y de suelos conglomeráticos.

De lo anterior surgen las variaciones de casi todas las propiedades geomecánicas de una masa rocosa en ambos sentidos (vertical y horizontal); y, en el caso específico de la cohesión de las rocas, que es significativamente anisotrópica, dicha variabilidad también se refleja en la dirección de su determinación y análisis.

Los ensayos de laboratorio no pueden determinar los dos anteriores tipos de variabilidad, en parte por su sesgo fehaciente (subnumeral 3.4.6), y porque la ubicación y disposición de las perforaciones, de donde se extraen las muestras para ensayos, - aún en los proyectos más grandes y con un mayor número de perforaciones -, no pueden cubrir ni siquiera una parte de la variabilidad in-situ real de los materiales geológicos en una área dada, excepto, quizás, en las formaciones rocosas uniformes y en suelos homogéneos.

Además, los resultados de los ensayos de laboratorio siempre desembocan en varianzas de tipo "homogéneo", lo cual es contrario a lo que realmente ocurre tanto en los materiales geológicos, como en los taludes naturales, en los cuales la varianza es de tipo "no homogéneo".

Por todo lo anterior, en los análisis de taludes naturales no es conveniente, ni cabe utilizar el concepto de "variabilidad de los materiales geológicos", - especialmente si se emplea dentro del contexto convencional implícito que parte de los resultados de ensayos de laboratorio -, sino, más bien, pasar directamente al concepto de "la variabilidad de los taludes naturales".

4.6.2 Variabilidad de los Taludes Naturales.

A diferencia de lo que ocurre en el caso de los análisis probabilísticos aplicados a las metodologías convencionales de estabilidad basados en resultados de ensayos de laboratorio, los resultados de la MTN sí

representan la variabilidad real de los taludes naturales, tanto a nivel de subpoblación y población, como a nivel de universo; y tanto en rocas como en suelos.

Esto se debe a que la MTN logra una alta densidad de cubrimiento de la información, - que es significativamente mayor que la de los métodos exploratorios de la Microgeotecnia convencional -, y a la posibilidad de delimitar en forma relativamente precisa el Patrón Triangular del nivel analítico de referencia; y según se puede apreciar por los resultados de la Figura 31, dicha variabilidad no es homogénea, sino que disminuye a medida que aumentan los valores de los parámetros L y H.

Este rasgo de la variabilidad no homogénea se pone de relieve en la gráfica inferior de la Figura 31, que por medio de una perspectiva muestra las densidades de probabilidades normales (campanas de Gauss) en tres ubicaciones del Patrón Triangular y graficadas en escala logarítmica; y la amplitud y altura de estas campanas disminuyen a medida que se acercan a su vértice.

Lo anterior implica que la variabilidad de los taludes naturales pequeños puede llegar a ser significativamente superior a la variabilidad de los taludes naturales grandes.

Este rasgo o tendencia es fácilmente verificable por el hecho de que en la Naturaleza se presenta un número mucho más grande de fallas de taludes naturales pequeños (o fallas de pequeña magnitud dentro de taludes naturales grandes) que de taludes naturales grandes. Si la varianza o variabilidad de los taludes naturales fuese de tipo homogéneo, - donde la variabilidad o varianza es idéntica para cualquier valor de L o H -, y descontando otros factores de cierta pero desconocida incidencia, la frecuencia de la ocurrencia de fallas de taludes naturales sería sensiblemente independiente de sus tamaños.

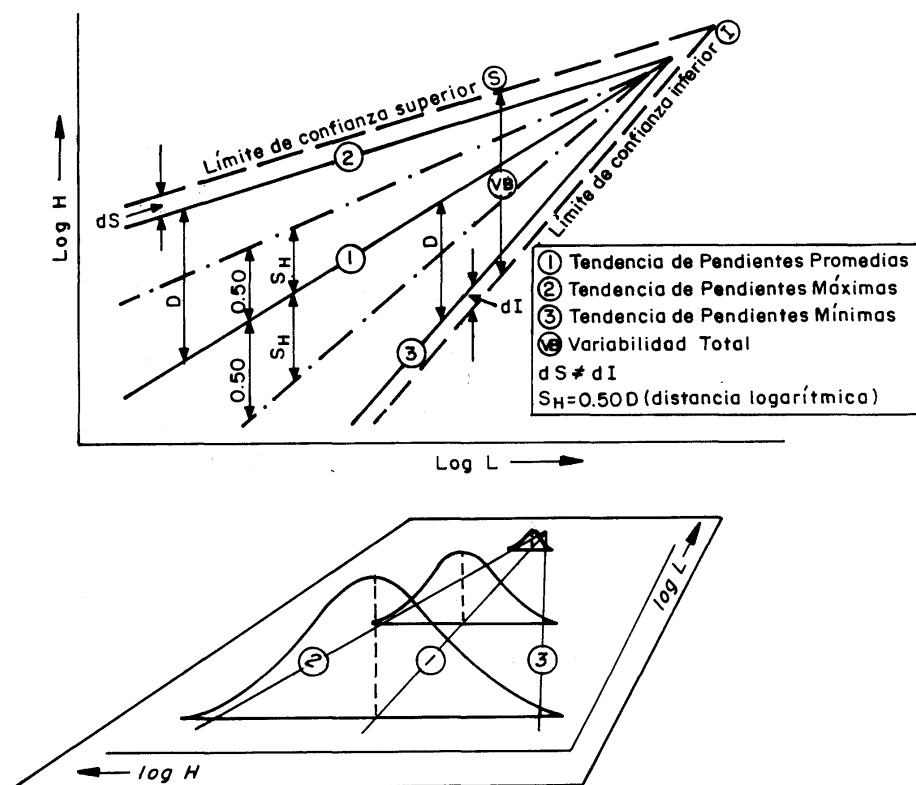


Figura 31 - Variabilidad del Patrón Triangular (Tomado de: Shuk, 1996b)

4.6.3 Desviación Estándar del Patrón Triangular (s_H).

El estimativo de este parámetro estadístico, no solo cuantifica la varianza (o variabilidad) del Patrón Triangular, sino que también permite la determinación de la probabilidad de falla.

Existen métodos de correlación estadística para conjuntos de datos con varianza "no homogénea", como es el caso del Patrón Triangular; y que se pueden aplicar aún en casos de tanta dispersión de los datos como la que se puede apreciar en los resultados de la Figura 9 para el Miembro Geológico Kcs-3.

Debido al requisito de que todas las tendencias de pendientes del Patrón Triangular tienen que pasar por su vértice (subnumeral 3.3.7) y por consideraciones de simetría, las dos rectas que en la Figura 31 representan una distancia de $1.0 s_H$ a partir de su tendencia de pendientes promedias, también deben intersectar dicho vértice. Desafortunadamente, esta intersección no se puede lograr por medio de los métodos de correlación estadística antes citados.

Por esta razón, y por otras consideraciones, la MTN utiliza una forma simplificada y aproximada de estimar la desviación estándar (s_H), cuya expresión es la siguiente:

$$s_H = 0.5 D \quad (35)$$

para cualquier valor de L , y donde D es la distancia logarítmica señalada en la Figura 31.

En consecuencia, las expresiones matemáticas para la recta (en escala log-log) correspondiente a una desviación estándar ($1.0 s_H$) son las siguientes:

• hacia arriba de la tendencia de pendientes promedias:

$$s_H = \log \left(\frac{a_{ss}}{a} \right) \left(L^{(b_{ss}-b)} \right) \quad (36)$$

con $a < a_{ss}$ y $b_{ss} < b$, y

donde:

a, b : parámetros funcionales de la función potencial simple que representa la tendencia de pendientes promedias (subnumeral 3.3.8); y:

$$a_{ss} = \log^{-1} \left(\frac{\log a_a + \log a}{2} \right), \text{ y} \quad (37)$$

$$b_{ss} = \frac{b_a + b}{2} \quad (38)$$

donde:

a_a, b_a : parámetros funcionales de la función potencial simple que representa la tendencia actual de pendientes máximas del Patrón Triangular (subnumeral 3.3.4); y:

• hacia abajo de la tendencia de pendientes promedias:

$$s_H = \log \left(\frac{a}{a_{si}} \right) \left(L^{(b-b_{si})} \right) \quad (39)$$

con $a_{si} < a$ y $b < b_{si}$,

y con el límite inferior del Patrón Triangular determinado por $\tan \phi_b$:

$$a_{si} = \log^{-1} \left(\frac{\log a + \log \tan \phi_b}{2} \right), \text{ y} \quad (40)$$

$$b_{si} = \frac{(b+1)}{2} \quad (41)$$

o con el Límite Inferior del Patrón Triangular no determinado por $\tan \phi_b$:

$$a_{si} = \log^{-1} \left(\frac{\log a + \log \tan a_m}{2} \right) \quad (42)$$

$$b_{si} = \frac{(b+b_m)}{2} \quad (43)$$

donde:

a_m, b_m : parámetros funcionales de la función potencial simple que representa la

tendencia de pendientes mínimas del Patrón Triangular (subnumeral 3.3.5), cuando no se determina por medio de $\tan \phi_b$.

Las expresiones aquí presentadas para s_H en función de L , están de acuerdo con la tendencia de disminución de la variabilidad, - cuantificada por medio de la desviación estándar -, a medida que aumenta el valor de L ; y ponen de relieve que s_H , - lo mismo que los límites de confianza indicados en la Figura 31 -, pueden no ser iguales en las dos direcciones analizadas.

4.6.4 Distribución de la Probabilidad de Falla (Pf).

La probabilidad de falla (Pf) de un talud se define como la probabilidad (P) de que su Factor de Seguridad (Fs, o Fsr) tenga un valor menor de 1.0 (Shuk, 1970); y en el caso de los análisis probabilísticos de la MTN:

$$Pf = P (Fsr < 1.0) \quad (44)$$

$$Pf = P (Fs < 1.0) \quad (45)$$

El contexto operacional de esta definición es el de la frecuencia relativa de un evento de análisis, y en el caso de los taludes naturales dicha probabilidad de falla, - que usualmente se cuantifica en forma de un porcentaje -, equivale al porcentaje dado por el número de taludes que fallarían dentro de un número de taludes hipotéticos de referencia, todos de características y condiciones geométricas y geotécnicas exactamente iguales.

Como punto básico de partida, está establecido que un Factor de Seguridad (Fs o Fsr) de 1.0 equivale a una probabilidad de falla (Pf) del 50%. En este punto de partida, y para un talud específico de análisis, el contexto operacional descrito en el párrafo anterior significa que fallarían 50 de 100 taludes de características y condiciones exactamente iguales, entre los cuales puede o no estar el talud específico de análisis.

Así, y extendiendo lo anterior, un valor muy alto de la probabilidad de falla para un talud dado no necesariamente implica la falla

de ese talud; y, conversamente, un resultado muy bajo de dicha probabilidad de falla no necesariamente garantiza que el talud no falle.

Aunque la característica de relatividad que subyace el significado operacional (con base en la frecuencia relativa) de la probabilidad de falla no aconseja su acepción en términos absolutos, si le confiere una utilidad fehaciente en análisis de tipo comparativo; y, además, tampoco demerita en lo más mínimo el beneficio que ofrece su empleo para análisis de decisión económica, que constituye el campo de su más útil y confiable aplicación.

En la modalidad de los estudios de zonificación geotécnica de amenazas por medio de la MTN, la probabilidad de falla (Pf) se estima por medio del parámetro estadístico adimensional "z" de la densidad normal de probabilidades, y en función del Factor de Seguridad (Fsr), así:

$$z = \frac{\log Fsr}{s_H} \quad (46)$$

Luego, con el resultado de "z" se puede calcular el área "Az" bajo la curva unitaria de la densidad normal de probabilidades, y cuya tabla de valores en función de "z" se puede encontrar en libros de Estadística. Con el resultado de Az se estima Pf en términos adimensionales, así:

$$Pf = 0.5 + Az, \text{ para } Pf > 0.5, \text{ y:} \quad (47)$$

$$Pf = 0.5 - Az, \text{ para } Pf < 0.5. \quad (48)$$

Con el procedimiento hasta aquí señalado, sólo es posible estimar Pf para la categoría de tiempo de Largo Plazo (LP) representada por la tendencia promedia de pendientes (subnumeral 4.3.1). Las expresiones matemáticas de s_H para estimar la probabilidad de falla en las tres restantes categorías de tiempo involucran unas consideraciones y operaciones cuya relativa complejidad y extensión no permiten su inclusión en este escrito.

Pero por medio de la siguiente expresión simplificada y de resultados

aproximados, - con base en el s_H dado con referencia a la tendencia de pendientes promedias (que representa al Largo Plazo) -, es posible determinar en forma aproximada, - y presumiblemente con un porcentaje tolerable de error -, la desviación estándar de cualquiera de estas categorías de tiempo, así:

$$(s_H)_T = s_H \sqrt{1 + \log \left(\frac{H}{H - H_T} \right)^2} \quad (49)$$

donde el subíndice T corresponde a cualquiera de las tres categorías restantes de tiempo (MP, CP y MCP), y:

H : altura correspondiente (a un L dado) en la tendencia de pendientes promedias; y

H_T : altura vertical máxima (o crítica) para cualquiera de esas tres categorías de tiempo (subnumeral 4.3.1)

Esta expresión simplificada y aproximativa indica que a medida que se desciende por las categorías de tiempo hasta llegar a la de menor duración de vida futura (MCP), se va aumentando el valor de la desviación estándar y de la varianza; y, por ende, también se incrementa el valor de la probabilidad de falla, a pesar de que el valor del Factor de Seguridad simultáneamente también se está incrementando.

Esto concuerda con el hecho físico de que la confiabilidad de las cohesiones que se utilizan para estimar el Fsr de cada categoría de tiempo del subnumeral 4.3.1 (valores de cohesión y que aumentan a medida que disminuye la duración de una categoría dada de tiempo), también disminuye a medida que la duración de vida futura de una categoría de tiempo es menor.

Con base en los procedimientos para estimar las probabilidades de falla en función del Factor de Seguridad, y los resultados de un número de puntos (L_{LD}, H_{LD}) del Patrón Triangular, es posible establecer la distribución de probabilidades del Factor de Seguridad. En la Figura 32 se ilustran los resultados de un ejercicio de este tipo para la categoría de tiempo de Largo Plazo (LP) y

para tres valores de alturas (H) de taludes naturales en dos miembros de la Formación Cáqueza del Cretáceo Superior: el Kcs-3,

cuyo Patrón Triangular se presentó en la Figura 9; y el Kcs-2, de una variabilidad bastante inferior a la del miembro Kcs-3.

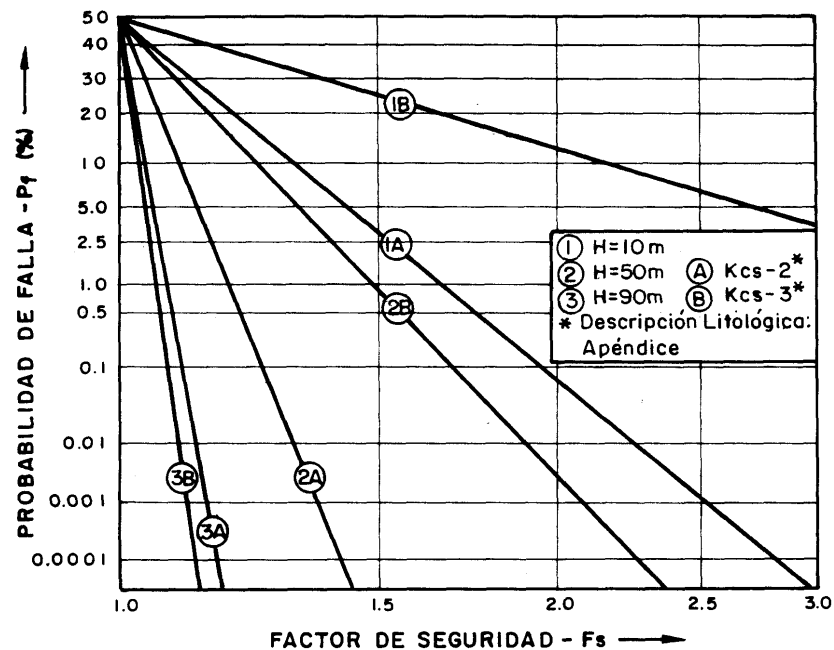


Figura 32 - Distribución Lognormal de Probabilidades del Factor de Seguridad Relativo (Fsr) para el Largo Plazo y para Diferentes Alturas de Talud; Miembros Geológicos Kcs-2 y Kcs-3 de la Formación Cáqueza Superior; Proyecto Hidroeléctrico del Río Tunjita; Garagoa y Macanal, Boyacá (Tomado de: Shuk, 1996b)

Todas las distribuciones de probabilidades del Factor de Seguridad Relativo (Fsr) de los taludes naturales de estos dos miembros geológicos, - lo mismo que en los casos de todos los taludes naturales en cualquier material geológico, y de los resultados de la casi totalidad de los parámetros geomecánicos -, evidencian un grado de ajuste estadístico más que significativo con distribuciones de probabilidades de tipo lognormal; y la disposición de estas distribuciones resaltan las diferencias de valores de P_f con un mismo valor para H y F_s , originadas por las distintas variabilidades de las dos poblaciones.

Sin embargo, es de destacar que para el H más alto (90m), -y al contrario de lo evidenciado para los dos valores de H más pequeños-, a pesar de la mayor variabilidad litológica del miembro Kcs-3, este miembro

presenta una variabilidad menor de su distribución de probabilidades de Fsr que la del miembro Kcs-2.

Otros aspectos interesantes dentro del contexto de la distribución de probabilidad de falla se ilustran por medio de los resultados de la Figura 33. Utilizando la expresión simplificada para determinar la desviación estándar de las tres categorías de tiempo diferentes a la de Largo Plazo (ecuación 49), se estimó la probabilidad de falla de un Factor de Seguridad Relativo (Fsr) de 1.5 para el Mediano Plazo (MP) de la población Kcs-3, con lo cual se determinaron las dos curvas de isoprobabilidad de falla (1% y 5%) de la Figura 33, la cual también ilustra la disposición relativa a las curvas de estabilidad ($F_{sr} = 1.0$) para el largo y mediano plazo.

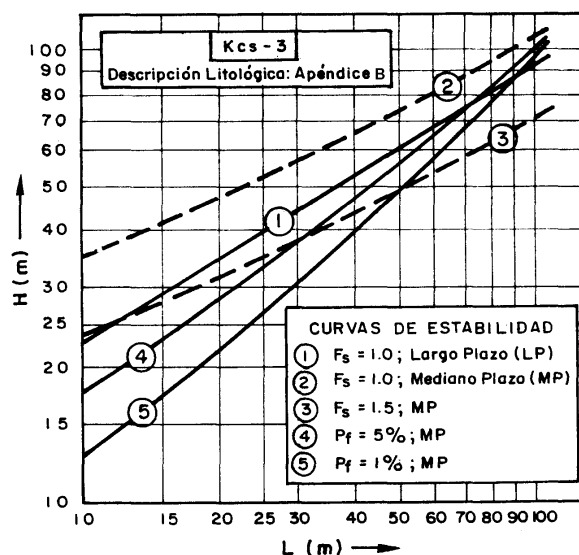


Figura 33 - Curvas de Igual Probabilidad de Falla para un Factor de Seguridad Relativo de 1.5 ($F_{sr} = 1.5$) en el Mediano Plazo; Miembro Geológico Kcs-3 de la Formación Cáqueza Superior; Proyecto Hidroeléctrico del Río Tunjita; Garagoa y Macanal, Boyacá (Tomado de: Shuk, 1996b)

Las curvas de probabilidad de falla para $F_{sr} = 1.5$ de la Figura 33 corresponden a valores que generalmente se consideran como referentes para una confiable condición de estabilidad de taludes; y su trazo con respecto a la curva de estabilidad de $F_{sr} = 1.5$ para el Mediano Plazo (MP), indica que para los valores altos de L (o H) se podrían utilizar factores de seguridad inferiores a 1.5, mientras que para los taludes bajos (o pequeños) se tendrían que utilizar factores de seguridad más altos, inclusive llegando hasta valores del orden de 2.8 ($F_{sr} \approx 2.8$) para una probabilidad de falla del 1% en el Mediano Plazo.

4.6.5 Probabilidad de Falla Incondicional (P_{fi}).

En un sentido estricto, la probabilidad de falla tratada hasta este punto, y fundamentada en los resultados de F_{sr} , es condicional a dos factores: el valor del parámetro L y la categoría de tiempo del análisis respectivo.

Pero con el fin de resaltar solamente aquellas condiciones que se originan en fenómenos físicos, y por un acuerdo consensual, se considera que esta probabilidad de falla es incondicional (P_{fi}) y, por lo tanto:

$$P_{fi} = P_f$$

En concordancia con lo anterior, se plantea a continuación lo relativo a la probabilidad de falla condicional y a la probabilidad de falla total.

4.6.6 Probabilidad de Falla Condicional (P_{fc}).

Dentro del contexto del análisis probabilístico para la incidencia de los factores detonantes en la inestabilidad de taludes (o en movimientos en masa), la probabilidad de falla es condicional a la ocurrencia de uno o de la combinación de varios de estos tipos de eventos.

Los procesos que originan los eventos de falla de taludes y de movimientos en masa son de dos tipos:

- **puntuales o relativamente puntuales:** tales como los sismos, los aguaceros de gran intensidad, los deshielos súbitos y las riadas o avenidas intempestivas, ciertas y determinadas acciones humanas, - especialmente en obras de construcción -, y otros.

- **graduales o relativamente graduales:** pérdida de resistencia de la masa, reptación y soliflucción, socavación de la pata, erosión y meteorización; modificación desfavorable

continuada del régimen freático, la fenomenología del "bloqueo del alivio de la presurización" inducida por causas naturales o por actividades humanas, las acciones del hombre y sus asentamientos poblacionales, combinaciones de procesos graduales y puntuales que desembocan en eventos tales como avalanchas de nieve y flujos de lodo, y otros.

El manejo del análisis probabilístico de los procesos puntuales de sismos y aguaceros de gran intensidad es, -por ahora-, el único que presenta alguna factibilidad, por cuanto estos dos procesos se pueden considerar como mutuamente excluyentes e independientes. Dicha factibilidad es una función directa de la disponibilidad de un buena base de datos sísmica, hidrológica y meteorológica en una área dada de estudio.

En cambio el análisis probabilístico de los procesos graduales o relativamente graduales no es factible por el momento, porque, entre otros, generalmente no son mutuamente excluyentes, ni necesariamente independientes, y sus obstáculos se exploran con alguna amplitud en otro escrito técnico (Shuk, 1989)

4.6.7 Probabilidad de Falla Total (Pft).

Las probabilidades de falla incondicionales y condicionales descritas en los dos subnumerales previos se utilizan para determinar la probabilidad de falla total para la combinación probabilística de los dos eventos detonantes analizables en la actualidad: sismos y lluvias. Esta determinación se efectúa con base en el Teorema de la Probabilidad Total, cuya expresión, -con base en los dos tipos de eventos detonantes antes mencionados-, es la siguiente:

$$P_{ft} = P(f|\bar{a}, \bar{s}) \times P(\bar{a}, \bar{s}) + P(f|a, \bar{s}) \times P(a, \bar{s}) \\ + P(f|\bar{a}, s) \times P(\bar{a}, s) + P(f|a, s) \times P(a, s) \quad (50)$$

donde:

a : evento de un aguacero con una intensidad superior a la del umbral requerido para la falla de un talud.

s : evento de un sismo con una intensidad superior a la del umbral requerido para la falla de un talud.

$\bar{a}$ o $\bar{s}$: no ocurrencia de los dos anteriores tipos de eventos.

$P(f|\bar{a}, \bar{s})$: probabilidad de falla condicional a la no ocurrencia conjunta de los dos tipos de eventos = probabilidad de falla incondicional (subnumeral 4.6.5)

$P(\bar{a}, \bar{s})$: probabilidad de la no ocurrencia conjunta de los dos tipos de eventos (y así sucesivamente).

Las intensidades de lluvias y sismos y su período de retorno, - lo mismo que las probabilidades conjuntas de la ocurrencia y/o no ocurrencia de los dos tipos de eventos $[P(\bar{a}, \bar{s}), P(a, \bar{s}), P(\bar{a}, s), P(a, s)]$ -, se estiman con base en el análisis de la base de datos sísmica, hidrológica y meteorológica.

Los métodos, procedimientos y el manejo de las variables que intervinieron en la determinación de las probabilidades condicionales de falla y de la probabilidad de falla total, se describen con detalle en un informe técnico (ej.: Universidad de Los Andes, 1992), y en forma somera en otros trabajos publicados (ej.: González, 1992a; Shuk y González, 1993).

4.6.8 Modelos Probabilísticos más Complejos.

Las secuencias e interrelaciones de aquellos procesos de naturaleza probabilística que pueden desembocar en movimientos en masa tales como avalanchas, generalmente son más complejos que los descritos hasta este punto; y en cada estudio, donde se debe considerar este tipo de fenómenos, se tienen que establecer y construir modelos probabilísticos de cierta complejidad, con el fin de establecer la probabilidad (o la distribución de probabilidades) de la ocurrencia del evento catastrófico final objeto de dicha consideración.

Un ejemplo de este tipo de modelos es el que ilustra la Figura 34 para las secuencias e interrelaciones de los procesos detonantes que pueden desembocar en avalanchas que afecten el casco urbano de Utica. Tal como se puede apreciar en esta figura, algunos de

estos procesos convergen en los eventos de represamiento accidental de las vías acuáticas (y de la subsecuente falla de estas presas) los cuales, - a su turno -, pueden desembocar en las citadas avalanchas.

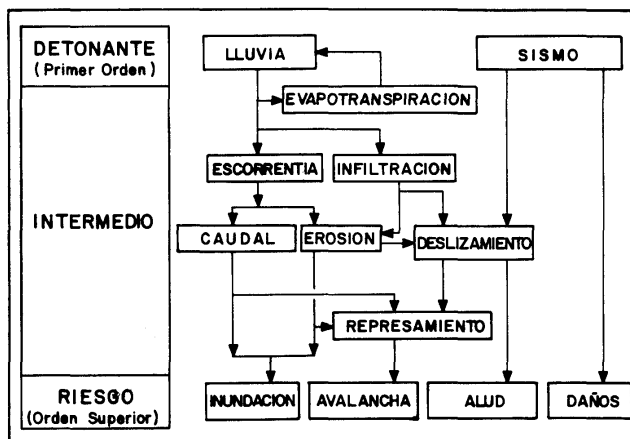


Figura 34 - Diagrama de Interrelaciones y Secuencias de Procesos Detonantes para Movimientos en Masa; Estudio del Area de Desastre de Utica; Utica, Cundinamarca (Tomado de: González, 1992a)

Como es obvio, las posibilidades de éxito en la construcción de un modelo de este tipo, y de su cuantificación, están íntimamente ligadas con la disponibilidad de una base de datos adecuada para estos propósitos, y de las herramientas analíticas interdisciplinarias requeridas, entre las cuales las de la MTN pueden desempeñar un papel esencial.

4.7 Vulnerabilidad y Riesgo

Una vez determinada la amenaza (A) como equivalente a la probabilidad de falla, por medio de la vulnerabilidad (V) se puede estimar el riesgo (R) de los diversos elementos productivos (edificios, estructuras, vías, canales, tuberías, tierras, etc.) vulnerables a los daños que podrían causar los movimientos en masa. El riesgo (R) se expresa así:

$$R = A \times V \quad (\text{González, 1992 a y b}) \quad (51)$$

Bajo la suposición de que los moviminetos en masa bajo análisis llegan hasta dichos elementos productivos y los afectan total o

parcialmente, la vulnerabilidad es una expresión de su resistencia estructural y, dependiendo de sus circunstancias particulares, de algunos otros de sus factores complementarios. Por lo anterior, la única intervención de la Geotecnia en los análisis de vulnerabilidad consiste precisamente en determinar la validez de la suposición inicial de este párrafo.

Por medio de la MTN de han efectuado dos ejercicios de este tipo, ambos para avalanchas, donde se calcularon las amenazas de deslizamientos de coluviones, las probabilidades de un número de alternativas de alturas de los represamientos accidentales (por los coluviones) sobre las vías de agua y, finalmente, los límites finales de reposo de las avalanchas ocasionadas por las fallas de dichas alternativas de represamientos, y el grado de su cubrimiento y afectación de las viviendas y edificaciones del casco urbano de Utica (Shuk y González, 1993), y de las estructuras de superficie del proyecto hidroeléctrico del Río Arma (Shuk, 1996c).

Por su extensión, las hipótesis y suposiciones, las metodologías y estructuración de los cálculos, y las otras consideraciones requeridas para este tipo de

ejercicios no se pueden consignar en este escrito.

4.8 Análisis de Decisión Económica: Costos Esperados

Bajo este encabezamiento y sus subnumerales se tratan en forma somera los factores principales que intervienen en la función de costos totales esperados, y otros aspectos del Análisis de Decisión Económica aplicables para estudios de zonificación geotécnica, y que se pueden determinar cuantitativamente por medio de la MTN.

Esta aplicabilidad no es tan clara en el caso de los trabajos de zonificación efectuados por medio de las metodologías convencionales de zonificación, puesto que en estos se emplean criterios de zonificación cualitativos, o semi-cuantitativos, pero con base en factores de tipo subjetivo.

Debido a la complejidad del tema, las consideraciones aquí expuestas también excluyen el tratamiento de tipo económico de las pérdidas de vidas humanas.

El análisis de decisión económica puede comenzar a partir de los resultados para la amenaza, en cuyo caso el costo esperado resultante implica una vulnerabilidad máxima ($V = 1.0$) o, preferiblemente, de los resultados para el riesgo (R).

4.8.1 Estructuración de los Costos Esperados.

Una función de costos $F(C) = C_1, C_2, C_n \dots C_N$, asociada directa y simultáneamente a una distribución de probabilidades $F(P) = P_1, P_2, P_n \dots P_N$ de ocurrencia de ese costo, desemboca en su valor esperado $E(C)$, así:

$$E(C_n) = (C_n) (P_n) \quad (52)$$

Por ejemplo, si la probabilidad de falla de un talud (o una familia) " n " [$(P_f)_n$] es de 0.17 (17%), y el costo imputable a dicha falla $(C_f)_n$ es de \$20.000.000, el valor del costo esperado es de \$3.400.000.

Los costos esperados son de dos clases, las cuales se tratan a continuación.

4.8.2 Costos Esperados Directos.

Estos comprenden todos los costos directos imputables a los daños que ocasionan las fallas de taludes en edificaciones, obras e instalaciones, áreas productivas, etc.; a su reparación y/o reposición; a la infraestructura y los gastos directos requeridos para los gastos médicos y hospitalarios y la reubicación de los afectados; a la implantación de medidas preventivas hacia el futuro; a la construcción de obras de protección y/o de solución para las fuentes de los problemas de inestabilidad de taludes; y a otros factores de costos directos.

Por ejemplo, en el caso de una obra civil, con un número K de taludes (o familias de taludes) que pueden afectarla, la expresión generalizada para el total (C_{TD}) de los costos esperados directos para esa obra es la siguiente:

$$\begin{aligned} C_{TD} &= C_o + C_m + \sum_{k=1}^{k=K} (C_f)_k (P_f)_k \\ &= C_o + C_m + E(C_k) \end{aligned} \quad (53)$$

donde:

C_o : costo inicial (costos de los estudios, financieros, de la construcción en sí, y otros) de la obra civil.

C_m : costo de mantenimiento de la obra durante el período de análisis correspondiente a la categoría de tiempo (subnumeral 4.3.1) bajo consideración; y capitalizado a su valor presente en la fecha de su estimativo.

C_f : costo directo (reparación y reposición) de la falla del talud (o familia) " k " ($= 1, 2, 3 \dots K$)

Así, y para un número N de obras civiles ubicadas dentro de una área dada de estudio para zonificación geotécnica, cada una con un número K de taludes (o familias de

taludes) que pueden afectarlas, dicha función está expresada por:

$$C_{TD} = \sum_{n=1}^{n=N} ((C_o)_n + (C_m)_n + E(C_k)_n) \quad (54)$$

Los otros ítems de costos directos se estructuran de manera similar y bajo la forma de funciones de costos esperados, pero teniendo en cuenta la aplicabilidad de los dos primeros términos (en especial, la del segundo término) no probabilísticos de la anterior expresión, y que algunos de estos costos, - tales como por ejemplo los gastos directos requeridos para los gastos médicos y hospitalarios y la reubicación de los afectados, y para la reparación y/o reposición de las viviendas -, dependen también del número de afectados por el cubrimiento (en área) de los movimientos en masa, el cual se puede estimar según lo descrito en el anterior encabezamiento secundario (numeral 4.7) o, en ciertos casos, a partir de las magnitudes esperadas de falla (subnumeral 4.8.4).

En proyectos específicos de obras civiles tales como vías, oleoductos, hidroeléctricas, edificaciones de todo tipo, etc., se supone que en el caso de que realmente ocurran los eventos catastróficos

previstos por el análisis, este tipo de costos serían pagados por el dueño, operador o concesionario del proyecto; o, en su defecto, por el amparo de pólizas de seguros; y todo esto resulta en un factor distintivo con respecto al de la otra clase: la de los costos esperados indirectos.

En los estudios de zonificación geotécnica cuantitativa, el anterior factor distintivo puede desdibujarse y/o diluirse, debido a que por razones políticas o sociales una parte indeterminada (y hasta la totalidad) de estos costos directos podrían correr por cuenta de agentes diferentes de los nombrados en el párrafo anterior, tales como el gobierno (en cualquiera de sus niveles), organizaciones tipo ONG o creadas específicamente a raíz del evento catastrófico, y otros.

Un ejemplo de los resultados que se pueden obtener con base en los costos esperados se ilustra en la Figura 35, que muestra la evolución (con el tiempo) del riesgo monetario (costo esperado) máximo debido a avalanchas provenientes de la Quebrada Negra y del Río Negro, en el caso del Area de Desastre de Utica (González, 1992a; Shuk y González 1993) cuya ubicación se muestra en la Figura 21.

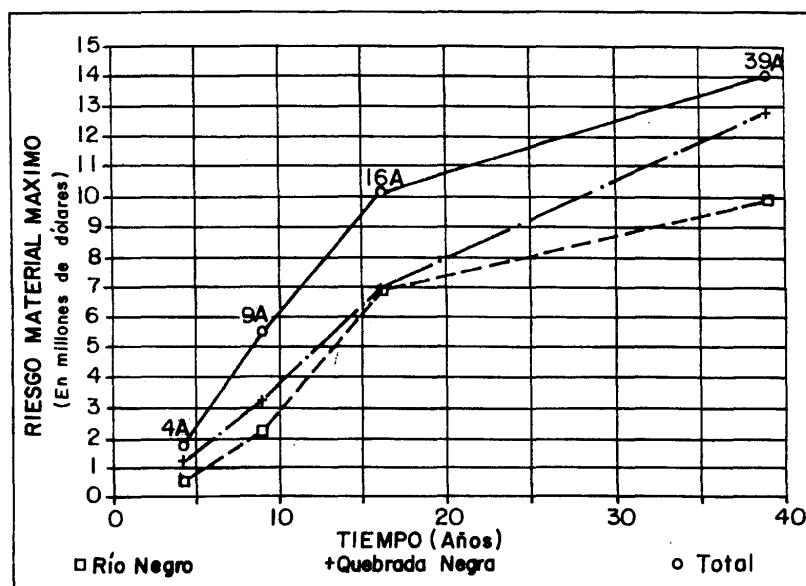


Figura 35 - Evolución con el Tiempo del Riesgo Material de Avalanchas; Estudio del Area de Desastre de Utica, Cundinamarca (Tomado de: González, 1992a)

El análisis para esta figura se efectuó con base en la estimación de los factores incidentes, sus probabilidades y sus interrelaciones según el diagrama de la Figura 34; e incluyó, entre otros, el análisis probabilístico de la altura esperada de las presas accidentales (y temporales) que pudieran formarse sobre la Quebrada Negra, y/o sobre uno o más de sus tributarios, y/o sobre el Río Negro, de la probabilidad de su falla repentina, y del área esperada que estos flujos podrían cubrir dentro del casco urbano de Utica.

Los resultados de esta Figura 35 indicaban que, - para una categoría de tiempo de Largo Plazo (39 años) -, el límite superior de la inversión justificable para las estructuras y obras correctivas, protectivas y preventivas, y para las consecuentes instalaciones y medidas de diversos tipos, tenían un valor de aproximadamente US\$ 14.000.000 en el momento de estudio.

4.8.3 Costos Esperados Indirectos:

Estos costos son equivalentes a los costos socioeconómicos esperados y asociados con el tiempo de incapacidad y/o improductividad de los afectados, por las posibles interrupciones o suspensiones de obras (o servicios); y son generalmente sufragados por individuos, grupos, comunidades o los usuarios afectados.

Los costo esperados indirectos solo se estiman en áreas de menor desarrollo, donde no existen alternativas de obras (o servicios) para reemplazar rápidamente las interrumpidas o suspendidas.

La estructuración de la función de costos esperados indirectos (C_{TI}) es compleja y diferente para cada caso. Sinembargo, - y como una primera aproximación muy general y simplificada -, se puede sintetizar por medio de la siguiente expresión:

$$C_{TI} = \left(\sum_{j=1}^{j=J} (V_{fp})_j + \sum_{m=1}^{m=M} (V_{sc})_m \right) E(ti) \quad (55)$$

donde:

V_{fp} : valor de un sujeto o factor productivo "j" (= 1, 2, 3...J) por unidad de tiempo.

V_{sc} : valor del sobre costo (para todos los usuarios) de una obra o un servicio "m" (= 1, 2, 3...M) interrumpido (o suspendido) por unidad de tiempo.

$E(ti)$: tiempo esperado (probabilístico) por las interrupciones (o suspensiones) debidas a movimientos en masa y la remoción de sus efectos, durante el período correspondiente a la categoría de tiempo (subnumeral 4.3.1) bajo consideración.

Este último término se estima con base en las magnitudes esperadas de falla del siguiente encabezamiento secundario (subnumeral 4.8.4), y el tiempo requerido para la remoción y reparación de sus efectos y la recuperación de las zonas afectadas, en función de los equipos, maquinarias y recursos (físicos, humanos, financieros, técnicos, etc.) potencialmente y/o prácticamente disponibles en el área de estudio.

El supuesto principal que subyace la anterior expresión, - y que se utiliza solamente por la prevalente imposibilidad práctica de cuantificar las pérdidas por el tiempo de interrupción o suspensión en forma individual para cada sujeto o factor productivo -, es que el tiempo de incapacidad y/o improductividad del sujeto o factor productivo, y la duración del sobre costo por servicios interrumpidos, son exactamente iguales a las duraciones de las interrupciones (o suspensiones) por movimientos en masa y la remoción y reparación de sus efectos.

Dicho supuesto no se ajusta a la realidad, - ya que, según las circunstancias de cada caso -, los primeros pueden ser inferiores, similares o superiores a las duraciones de dichas interrupciones o suspensiones; y esto se deberá tomar en cuenta en una forma analítica pertinente que, en buena parte, depende de los objetivos y alcances de un estudio dado, y el grado de precisión que estos impongan.

Por ejemplo, la suspensión total del tráfico vehicular por unas horas, o inclusive

hasta por unos pocos días, no necesariamente afecta a alguno de los dos sumandos de C_{TI} . Por el contrario, poner nuevamente en marcha una instalación de generación eléctrica, puede tomar más tiempo que el de la remoción y reparación de los efectos de un movimiento en masa, afectando así la duración de V_{sc} .

El pago de estos costos indirectos puede producirse en forma encubierta (u oculta), por medio de los desahorros y las pérdidas económicas y de productividad de los afectados; o en forma abierta y visible, por medio de los desembolsos para las inversiones y los sobre costos (que excedan los desembolsos para el servicio previamente disponible) para los servicios, obras, equipos e instalaciones requeridos para suplir las interrupciones o suspensiones; o pueden ser cubiertos en forma parcial o total por los mismos agentes mencionados en el último párrafo del subnumeral anterior, por medio de indemnizaciones, ayudas, subsidios directos o indirectos, y otros.

Donde se dispone de obras, instalaciones o servicios alternos de calidades similares o iguales a los interrumpidos o suspendidos, como generalmente ocurre en los países industrializados, los costos indirectos esperados asociados con la suspensión de obras y servicios son mínimos, y se pueden desestimar.

Pero donde no se dispone de dichas obras, instalaciones o servicios alternos, los costos indirectos esperados por fallas de taludes o movimientos en masa en algunos casos pueden exceder significativamente (a veces, en más de un orden de magnitud) los costos directos esperados; y, - especialmente para propósitos de planeación a nivel nacional o regional -, en este tipo de situaciones los costos indirectos esperados definitivamente se deben incluir en los análisis comparativos de las distintas alternativas para un proyecto o desarrollo dado.

La significativa incidencia de los costos indirectos esperados en el total de los costos esperados de una obra dada está ejemplificada por los resultados pertinentes obtenidos en la Carretera Bogotá -

Villavicencio (Universidad de los Andes, 1992; Shuk y González, 1993).

En este caso, - para al final de un período de planeación de 40 años, y con la alternativa de decisión de no hacer nada con la carretera existente en el momento del estudio -, mientras que el costo esperado indirecto por kilómetro de vía resultó de US\$ 9.200.000, el costo esperado directo solo sumó US\$ 306.000 por kilómetro lineal de vía; o sea que, - en este caso en particular -, los costos esperados indirectos fueron casi exactamente treinta veces superiores a los costos esperados directos, y representaron el 97% del total de los costos esperados.

4.8.4. Magnitudes Esperadas de Falla.

Estas magnitudes, que se pueden estimar directamente por medio de los parámetros funcionales (a,b) y de caracterización (L_{LD} , H_{LD}) de la MTN, tienen como propósito el determinar las magnitudes de las tres bases dimensionales de los costos, tanto directos, como indirectos, que están asociados con fallas de taludes.

Por ejemplo, en la medida en que aumenta la longitud de una vía afectada por fallas de taludes, y el volumen del material caído sobre la vía a removerse, mayores serán los costos directos por longitud de falla (pavimentos, drenajes, etc.), y por volumen de falla (movimiento de tierras), así como mayores serán los costos indirectos, por cuanto también se incrementa el tiempo de interrupción de esa vía.

A continuación se presentan las expresiones para las tres clases de magnitudes de falla que se pueden estimar por medio de los parámetros de la MTN antes señalados:

- Longitud de Afectación: para una familia de taludes adyacente a una estructura u obra (especialmente de tipo lineal); y para los costos unitarios asociados con la longitud afectada por movimientos en masa:

$$L_f = 2a \left(L_{LD}^b \right) \quad (56)$$

- **Area de Afectación:** para una familia de taludes y los costos unitarios directos de su protección; y otros ítems de costos directos en función de unidades de área; o, en los casos de costos indirectos, para el estimativo del valor de las pérdidas en áreas productivas sobre laderas, etc.:

$$Af = \left(\frac{2a}{b+1} \right) (L_{LD}^{b+1}) \quad (57)$$

- **Volumen de Falla:** para una familia de taludes y los costos unitarios directos asociados con su falla y estructurados en función del volumen, tales como los movimientos de tierra requeridos; y, a su vez, estos volúmenes inciden sobre los tiempos que se requieren para ejecutar esas labores y, por ende, sobre los costos indirectos esperados:

$$Vf = \left(\frac{2a^2}{(b+1)(b+2)} \right) (L_{LD}^{(2b+2)}) \quad (58)$$

La derivación de Vf por medio de la integración exacta (de una forma de cuchara) desemboca en una expresión excesivamente larga, por lo cual la Ecuación 58 es una simplificación y sus resultados serían muy aproximados.

Las comparaciones con casos reales resultaron relativamente adecuadas para las necesidades en las dos primeras magnitudes (Lf y Af). Hasta ahora no se ha podido cotejar el volumen de falla (Vf), por cuanto los casos disponibles no registran volúmenes de falla confiables

Por ahora, los resultados obtenibles por medio de las tres expresiones para las magnitudes de falla se deben considerar como de naturaleza aproximada (Lf y Af), o muy aproximada (Vf). Sinembargo, dichos grados de aproximación no les restan utilidad en su aplicación para análisis de decisión económica, por cuanto los resultados de estos tipos de análisis en estudios de zonificación geotécnica generalmente se utilizan en términos de comparaciones de alternativas.

En un sentido estricto, el evento de una magnitud de falla dada (Em), - en donde esta magnitud es una variable aleatoria -, también tiene una probabilidad de ocurrencia P(Em) que al igual que la del evento de la falla en sí de una familia de taludes P(Eft), disminuye a medida que aumenta el valor de los parámetros L y H (Figura 31).

Dado que la probabilidad de ocurrencia de los dos eventos (Em y Eft) está relacionada con los parámetros L y H, - o sea que ambos eventos son dependientes entre sí -, la magnitud esperada de falla P(mf) está dada por la siguiente expresión de probabilidad conjunta:

$$P(mf) = P(Eft)(P(Em)|P(Eft)) \quad (59)$$

La distribución de probabilidades de P(mf) es de tipo exponencial, - tal como ya se presumía en un escrito anterior (Shuk, 1989) -, y es del mismo tipo que la de la intensidad o magnitud de los sismos.

Sinembargo, - y por ahora -, no es factible la estructuración de la magnitud esperada con base en la anterior probabilidad conjunta, por la ausencia total de la base de datos pertinente requerida para P(Em). En consecuencia, - y como una simplificación (cuyo grado de aproximación a la realidad es desconocido), pero útil para los propósitos prácticos de las necesidades actuales -, se supone que la magnitud esperada de falla es simplemente el producto de esa magnitud, estimada por medio de una de las anteriores expresiones dimensionales (Lf, Af, o Vf), y la probabilidad de falla P(Eft).

4.8.5 Otros Tipos de Análisis de Decisión Económica.

Hasta este punto, el tratamiento del tema del análisis de decisión económica se ha limitado al estimativo de los costos esperados por inestabilidad de taludes o movimientos en masa.

Sinembargo, existen otros tipos de Análisis de Decisión Económica basados en métodos probabilísticos, cuya utilización puede resultar provechosa para una

zonificación geotécnica cuantitativa. De estos otros tipos, se presentan en forma somera únicamente los dos siguientes:

- **Costos de Oportunidad Esperados:** el empleo de este tipo de análisis es útil en aquellos casos en que se requieran evaluaciones comparativas de diferentes alternativas, - todas las cuales involucran factores de incertidumbre cuantificados por medio de análisis probabilísticos -, para la toma de decisiones lo más "objetivamente óptimas" posibles en cada caso.

En términos sencillos, el costo de oportunidad está representado por la diferencia entre el costo realmente incurrido, y un costo más bajo en que se hubiera podido tener la oportunidad de incurrir; o entre la utilidad realmente obtenida y una mayor utilidad que se hubiera tenido la oportunidad de lograr. Estos costos de oportunidad emanan de la imperfección y grado de incertidumbre de la información disponible. Así, y en cualquiera de los dos sentidos (ganancia positiva o negativa), siempre se utiliza el término "costos (o pérdidas) de oportunidad".

La aplicación del análisis de costos de oportunidad en estudios de inestabilidad de taludes se ejemplifica por medio de algunos resultados del Área de Desastre de Utica (González, 1992a; Shuk y González, 1993). Para este caso se llevó a cabo un análisis de este tipo para cada uno de las muchas alternativas de esquemas combinados (de estructuras, obras, instalaciones y otras medidas de prevención y protección) contempladas durante el desarrollo del estudio para la protección contra una repetición del desastre ocurrido.

De estas alternativas de esquemas, solamente se recomendaron para su implementación aquellos que resultaron en unos costos de oportunidad de ganancia positiva; y el costo total del mejor esquema, aproximadamente de US\$ 7.000.000, resultó ser significativamente inferior al costo de la relocalización del casco urbano de Utica y sus habitantes (del orden de :US\$ 20.000.000); y aproximadamente la mitad del límite superior de la inversión justificable de US\$ 14.000.000 para el período de

planeación de largo plazo (39 años), que se ilustró por medio del gráfico de la evolución del riesgo material con el tiempo de la Figura 35.

- **Valor de la Información:** con base en los parámetros estadísticos μ (promedio) y σ (desviación estándar), es posible efectuar análisis relativos al valor de la información. El beneficio o la ganancia por un mayor valor de la información emana de la diferencia entre los costos de las decisiones que parten de un conjunto de valores μ , σ de menor confiabilidad, y los costos de las que se podrían tomar con base en valores de μ , σ de una mayor confiabilidad.

Dentro del contexto de los estudios de zonificación geotécnica que se efectúan por etapas, al efectuar la planeación para cualquiera de estas etapas puede ser factible analizar las diferentes alternativas de obtención de la información, - especialmente la de campo -, y de su análisis y producido final, con base en la relación beneficio - costo de la información a obtenerse.

Como es obvio, el costo de cada alternativa contemplada constituye el denominador de esta relación beneficio - costo. Para su numerador, el beneficio se puede estructurar para cada alternativa con base en el aumento obtenible de la confiabilidad estadística; o en las reducciones que lograrían las diferentes alternativas contempladas en los costos de la etapa siguiente o de otras etapas posteriores de estudio; o, en cualquier factor objetivo, - ya sea de tipo estadístico o de costos -, que sea susceptible de cuantificación, así esta sea de naturaleza aproximada, pero cuyos resultados comparativos para las diferentes alternativas planteadas evidencien un grado aceptable de consistencia.

Para lograr un aumento sustancial de la aplicabilidad de estos últimos dos tipos de análisis de decisión económica, - cuya utilidad es evidente en varios aspectos de los estudios de zonificación geotécnica-, se requiere de un esfuerzo decidido y persistente en el sentido de lograr una ampliación significativa de la base de datos, de historias

de casos (casuística) y de conocimientos concernientes a estas técnicas analíticas.

5. CONFRONTACION DE LAS METODOLOGIAS CONVENCIONALES CON LA MTN

A lo largo de este texto se han presentado los aspectos más destacables de tres grandes zonificaciones geotécnicas cuantitativas efectuadas en Colombia utilizando la MTN: Area de Desastre de Utica (Shuk y González, 1993), casco urbano de Yumbo (Shuk y Hernández, 1996), y Bloque DELE-1 (Análisis Geotécnicos Colombianos, 1996). Además de las antes nombradas, está la zonificación geotécnica recientemente terminada en los cerros que tutelan la ciudad de Bogotá y sus laderas.

Esta última, que requirió de medición de 2620 familias de taludes naturales (casi la mitad del número total en la base de datos de la MTN) en 27 poblaciones de edades que incluyen rocas del Cretáceo Superior y del Terciario y muchos tipos de depósitos de suelos del Cuaternario y Reciente, cubrió un área de aproximadamente 180 km². Tanto sus procedimientos, como sus resultados están descritos en forma somera por medio de dos trabajos presentados a este congreso (González y Millán, 1999a y b).

La comparación entre los resultados de las zonificaciones geotécnicas convencionales (semi-cuantitativas) y las de la MTN (cuantitativas) se efectuó en dos de estos trabajos: el de Utica y el de Bogotá.

En el caso de Utica los dos tipos de metodología desembocaron en resultados similares, excepto en una pequeña área a unos 4 kilómetros al sur de Utica, donde los resultados de la MTN, -al contrario de los de la metodología convencional-, señalaban una zona de amenaza alta. Posteriormente se encontró que en dicha área se presenta la intersección de dos sistemas de fallamiento casi perpendiculares (Falla de Quebrada Negra y Falla de Carrizal) y, en diagonal, de una falla innominada; y, en concordancia, la categorización de amenaza alta de la MTN era la más adecuada para esta zona

(González, 1999). Las tres fallas mencionadas se pueden apreciar en la Figura 21.

En el trabajo de Bogotá, en términos generales se encontró un grado aceptable de coincidencia entre los resultados de la zonificación geotécnica SES (Evaluación Semicuantitativa de Estabilidad) y los de la MTN (especialmente en depósitos cuaternarios). Sin embargo, en las zonas de pendientes extremas (muy altas, o muy bajas) en rocas, los resultados de las dos metodologías fueron contradictorios.

Las zonas de pendientes muy altas correspondieron a áreas de remanentes de efectos antrópicos (canteras o explotaciones abandonadas). Por las condiciones del análisis de estabilidad de la MTN para estudios regionales (Gráfica D, Figura 28), -especialmente en el nivel de universo-, las zonas de muy altas pendientes corresponden a factores de seguridad también muy altos; y en el caso de los remanentes de efectos antrópicos, estos valores muy altos son engañosos y originan expectativas peligrosas.

Por otra parte, -y también en el nivel analítico de universo-, en las zonas de rocas de pendientes muy bajas los valores de los factores de seguridad de la MTN resultan muy bajos, situación que también es engañosa.

Aunque ambos tipos de situaciones se hubieran podido discriminar y tratar en una forma coherente, sistemática e integral, pero por la premura impuesta para la ejecución de esta zonificación geotécnica tan grande, -que en el caso de la MTN restringió el análisis únicamente al nivel analítico de universo-, solo fue posible dirimir parcialmente las dos contradicciones con los resultados del SES.

6. LIMITANTES ACTUALES DE LA MTN

Las dos únicas limitantes operacionales actuales para una aplicación más frecuente en Colombia de la MTN en trabajos de zonificación geotécnica son:

- la carencia de un proceso de transferencia de tecnología para la

capacitación en las labores manuales de delimitación y medición de familias de taludes naturales sobre planos topográficos; y

- la carencia, -en ciertos casos y algunas regiones-, de planos topográficos de escala e intervalos entre curvas de nivel acordes con los requerimientos técnicos de la MTN (subnumeral 2.8.1).

Entre otras, las limitantes conceptuales de la MTN son las siguientes:

- 1.) las características de inarmonía y falta de homogeneidad del desarrollo investigativo y práctico del gran número de diferentes aspectos de la MTN: mientras que algunos (tales como los aspectos relacionados con el Patrón Triangular) tienen un grado de avance significativo, otros (tales como la separación y caracterización de los suelos suprayacentes a las rocas) están en un estado incipiente;

- 2.) la imposibilidad actual de cotejar muchos de los resultados conceptuales y empíricos de la MTN con sus correspondientes de la Microgeotecnia, porque su abundante literatura técnica solamente en muy contados casos incluye información sobre taludes naturales; o porque hasta ahora la Microgeotecnia no ha tenido que considerar la gran mayoría de los aspectos que han surgido de la MTN; o, finalmente, porque la Microgeotecnia no ha tenido hasta ahora la necesidad de desarrollar los equipos (de laboratorio y/o de campo) requeridos para comprobar algunos de los resultados de la MTN. Un ejemplo de esta carencia se trata en el subnumeral 3.4.6 y se ilustra en la Figura 18.

- 3.) la falta de comprensión sobre el trasfondo físico, geomecánico y matemático de algunos de los conceptos, procedimientos y expresiones presentados en este trabajo. Aunque estos funcionan bien y desembocan en resultados satisfactorios, -muchas veces gracias a la introducción de factores de corrección-, su mayor comprensión podría permitir su mejor estructuración y su más amplia difusión. Entre estos están los siguientes:

- las restricciones impuestas por la utilización de la función potencial simple

(Ecuación 1, Figura 2) como el punto de partida actual de todos los resultados de la MTN, y uno de cuyos efectos se ejemplifica en la Figura 16;

- las relaciones físico-geomecánicas entre las envolutas pertinentes del SAMTN de cuyas correlaciones (Figura 15) emanan algunos de los resultados geomecánicos de la MTN; y su mejor comprensión en algunos casos podría permitir su reemplazo por funciones exactas de tipo cerrado; y

- las hipótesis de trabajo, particularmente las del Ecosistema de Memoria (subnumeral 2.4.4) y la del Código Genético (subnumeral 2.4.5); y,

- 4.) la carencia total de desarrollo e involucramiento de la función potencial compuesta (Ecuación 2, Figura 2) en los resultados de la MTN. Esta función, que en el futuro presumiblemente será la función básica de la MTN, es la que refleja mejor la realidad geomecánica y eliminaría las restricciones impuestas por la utilización de la función potencial simple.

Otras limitantes, - no aducibles solamente a la MTN en sí, y compartidas igualmente por las metodologías geotécnicas convencionales de zonificación -, son las relativas a la carencia de una base de datos, de historias documentadas de casos prácticos (casuística), y, en general, de conocimientos relativos a algunos aspectos analíticos de las amenazas (probabilidades de falla), riesgos y costos esperados, y a algunas técnicas complementarias de decisión económica, como las de los costos de oportunidad y del valor de la información.

Entre estas limitantes compartidas con la Microgeotecnia también está la muy importante del desconocimiento casi total de la naturaleza intrínseca de la cohesión y la manera de conservarla a través del tiempo. Desafortunadamente, la literatura técnica de la Microgeotecnia relativa a la resistencia está casi totalmente concentrada en temas concernientes a la fricción, y aunque en los suelos puede ser apropiada la consideración de desestimar la cohesión, en las masas rocosas la cohesión es de vital importancia. Un ejemplo de esto, es su incidencia en la

definición de las categorías de tiempo del análisis de estabilidad (subnumeral 4.3.1)

7. CONCLUSIONES

Para valorar este trabajo se debe tener en cuenta que el tratamiento de los diversos aspectos de la MTN en ningún momento pretende ser de tipo exhaustivo, ni presentar caminos plenamente comprobados y/o únicos. Sino, más bien, su propósito es el de plasmar algunos aspectos ya validados de ciertos puntos básicos o, en algunos casos, unas posibilidades y/o primeras aproximaciones útiles para el futuro desarrollo conceptual y práctico de la zonificación geotécnica cuantitativa. Pero sobre todo, el de abrir nuevas fronteras y horizontes, y mostrar explícita e implícitamente el vasto campo de investigación y aplicación práctica que ofrece la MTN.

A pesar de las limitantes de la MTN del anterior encabezamiento primario, los resultados obtenidos hasta ahora, permiten concluir que la Metodología de Taludes Naturales (MTN) es aplicable hasta los niveles más detallados de estudios de zonificación geotécnica cuantitativa, o como una metodología única, o como una herramienta adicional o complementaria, y equiparable a las de las metodologías convencionales de zonificación geotécnica existentes en la actualidad.

Bajo situaciones y condiciones exactamente iguales para ambas clases de metodologías, - las convencionales y la MTN -, las ventajas comparativas de esta última son, entre otras, las siguientes: 1. su no dependencia de los trabajos de campo, sondeos o ensayos de laboratorio; 2. su rapidez de ejecución de los trabajos; 3. su mayor densidad de cubrimiento de una área dada de estudio, lo cual le otorga una mayor confiabilidad a sus determinaciones de las características geomecánicas, de sus promedios y de su variabilidad in-situ; 4. sus posibilidades en cuanto a la cuantificación masiva de la información obtenida; y finalmente, 5. su significativa economía de

costos con respecto a las metodologías convencionales bajo idénticas condiciones de densidad de cubrimiento.

Estas ventajas comparativas y la propiedad de los resultados de la MTN están apuntaladas por sólidas relaciones de causalidad físico - geomecánicas, tanto directas (subnumeral 3.3.1), como indirectas (numeral 2.5).

Pero, en países o zonas montañosas susceptibles a inestabilidades de taludes y/o movimientos en masa, las ventajas de la aplicación de la MTN no solo se limitan a la zonificación geotécnica cuantitativa en sí, sino también a las labores de planificación a varios niveles: municipal, zonal, departamental, regional o nacional, y que son los beneficiarios naturales de dichas zonificaciones; y, con las herramientas analíticas actualmente disponibles (incluyendo las de análisis probabilísticos y de decisión económica), la MTN ya posibilita los siguientes tipos de actos:

- la toma de decisiones con bases más objetivas para la planeación y control de los asentamientos humanos y explotaciones, y para a situaciones tales como el traslado o la reubicación de asentamientos humanos;

- el oportuno ordenamiento presupuestal, en cualquiera de los niveles de planeación antes nombrados, en lo concerniente a la previsión de los rubros de prevención y atención de desastres; y,

- el acopio oportuno de los recursos físicos y económicos, y la capacitación de los recursos humanos requeridos en previsión de eventos catastróficos.

A su vez, estos actos permiten la reducción (a veces sustancialmente) de las pérdidas económicas y de vidas humanas.

Finalmente, resulta obvia la necesidad de implementar programas de investigación, no solo para reducir las limitantes actuales de la MTN, sino también para una fundamentación más sólida de algunas de sus partes teóricas, analíticas y empíricas; y para armonizar y homogeneizar el desarrollo de todos sus aspectos.

AGRADECIMIENTOS

El autor agradece a las siguientes entidades públicas y privadas por su apoyo y colaboración durante la ejecución de los trabajos de aplicación de la MTN que se enumeran a continuación, y su autorización para publicar los resultados presentados en este trabajo:

Area de Desastre de Utica:
Análisis Geotécnicos Colombianos (AGC) Ltda.
Gobernación de Cundinamarca
Comité Regional de Emergencias
INGEOMINAS

Carretera Bogotá - Villavicencio:
Universidad de los Andes - CIFI
FONADE

Desarrollo Hidroeléctrico del Río Arma:
Ingeniería e Hidrosistemas (IEH) Ltda.
ISAGEN S. A.
Centrales Hidroeléctricas de Caldas (CHEC)
Empresas Antioqueñas de Energía (EADE)
Empresas Públicas de Medellín (EPPM)

Hidroeléctrica del Río Tunjita:
Estudios Técnicos S. A.
ISAGEN S. A.

Proyecto Hidroeléctrico Urrá-1:
Gómez, Cajiao y Asociados, Cia. Ltda.
Urrá S. A.

Túnel "Los Rosales":
Fondo FEN Colombia
Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB)
Universidad de los Andes - Depto. de Ingeniería Civil

Zonificación Geotécnica Bloque DELE - 1:
Análisis Geotécnicos Colombianos (AGC) Ltda.
BP Exploration Company (Colombia) Ltd.

Zonificación Geotécnica de Yumbo:
Universidad Nacional de Colombia (Bogotá)

Zonificación Geotécnica de Bogotá:
Ingeocim Ltda.
Unidad de Prevención y Atención de Emergencias (UPES)

y también manifiesta su reconocimiento y gratitud por el apoyo, la colaboración y las luces recibidas durante el largo proceso de desarrollo de la MTN, a los siguiente profesionales:

Ing. Alvaro J. González G.
Ing. Clara Inés Bernal
Geol. Mario Monroy A.
Ing. Zsolt Gácsi
Ing. Jaime Solano
Ing. Claudia Helena Zapata

REFERENCIAS

- Análisis Geotécnicos Colombianos (AGC) Ltda. (1996) - "*Bloque DELE-1, Cálculo de los Parámetros Geomecánicos y Determinación de Riesgo por el Sistema de la Metodología de Taludes Naturales (MTN), Yopal (Casanare)*". Informe para BP Exploration Company (Colombia) Ltd., Bogotá, Marzo.
- Crawford, C. B.; Eden, W. (1967) - "Stability of Natural Slopes in Sensitive Clay". *Memorias de la Conferencia sobre Estabilidad y Desempeño de Terraplenes*. ASCE Soil Mechanics and Foundation Division, pp. 453 - 477. Berkeley, Agosto.
- González, A. J. (1992a) - "Avalanche Risk Evaluation at Utica - Colombia". *Memorias del Primer Simposio Internacional de Sensores Remotos y Sistemas de Información Geográfica (SIG)*. Volumen único, pp. 356 - 378. Instituto Geográfico "Agustín Codazzi". Bogotá, Abril.
- González, A. J. (1992b) - "Análisis de Riesgo en Geotecnia" (Inédito). Cuarta Conferencia "Gustavo Maldonado", *Séptimas Jornadas Geotécnicas de la Sociedad Colombiana de Ingenieros*, Bogotá, Octubre.
- González, A. J. (1999) – Comunicaciones personales desde 1987 hasta el presente.
- González, A. J.; Millán, J. (1999a) – Procedimiento para la Evaluación de la Amenaza por Fenómenos de Remoción en Masa en Santa Fé de Bogotá - Colombia. *XI Congreso Panamericano de Mecánica*

- de Suelos e Ingeniería Geotécnica*, Vol.2, pp. 701 - 708 Foz de Iguassú, Brasil, Agosto.
- González, A. J.; Millán, J. (1999b) – Resultados de la Evaluación de la Amenaza por Fenómenos de Remoción en Masa en Santafé de Bogotá - Colombia. *XI Congreso Panamericano de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica*, Vol.2, pp. 716 - 723. Foz de Iguassú, Brasil, Agosto.
- Hoek, E.; Bray, J.W. (1977) - "*Rock Slope Engineering*". The Institution of Mining and Metallurgy, Londres. Segunda Edición revisada.
- McMahon, B.K. (1976) - "*Estimation of Upper Bounds to Rock Slopes by Analysis of Existing Slope Data*". CANMET, Informe Técnico No. 76-14, pp. 1 - 44. Ottawa.
- Shuk, T. (1968) - "Un Método Sencillo de Diseño para Minimizar el Costo de Taludes en Roca". *Compilación de Trabajos del Primer Simposio de Ingeniería Geológica* - Ministerio de Obras Públicas y Transporte. Bogotá.
- Shuk, T. (1970) - "Optimization of Slopes in Rock". *Memorias del Segundo Congreso de la Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas*, Vol. 3, N° 7-2. Belgrado.
- Shuk, T. (1989) - "Aproximación a Dos Aspectos del Costo de Falla de Taludes: Magnitud y Tiempo". *Memorias del Primer Simposio Suramericano de Deslizamientos*. Vol. 1, pp. 726 -743. Paipa, Agosto.
- Shuk, T. (1990) - "Implicaciones de las Diferencias entre Microgeotecnia y Macrotecnia en la Enseñanza de la Geotecnia". *Memorias de las Sextas Jornadas Geotécnicas de la Sociedad Colombiana de Ingenieros (SCI)*, Vol. I, pp. 95 - 103. Bogotá, Octubre.
- Shuk, T. (1994a) - "Quantitative Geomechanical Differentiation and Characterization of Geological Materials Derived from a Single Parental Rock by Means of the Natural Slope Methodology". *Memorias del Cuarto Congreso Suramericano de Mecánica de Rocas*, Vol. I, pp. 243 - 254. Santiago de Chile, Mayo.
- Shuk, T. (1994b) - "Key Elements and Applications of the Natural Slope Methodology (NSM) with some Emphasis on Slope Stability Aspects". *Memorias del Cuarto Congreso Suramericano de Mecánica de Rocas*, Vol. I, pp. 255 - 266. Santiago de Chile, Mayo.
- Shuk, T. (1994c) - "Applications of the Natural Slope Methodology (NSM) for the Planning, Exploration and Design of Underground Works". *Memorias del Cuarto Congreso Suramericano de Mecánica de Rocas*, Vol. I, pp. 267 - 278. Santiago de Chile, Mayo.
- Shuk, T. (1995a) - "*Proyecto Hidroeléctrico del Río Tunjita- Area del Portal de Salida, Túnel de Tránsito del Río Tunjita: Estudio Geotécnico utilizando la Metodología de Taludes Naturales (MTN)*". Informe para Estudios Técnicos S.A.. Bogotá, Marzo.
- Shuk, T. (1995b) - "Compendio Descriptivo de la Metodología de Taludes Naturales (MTN) y sus Aplicaciones". *Memorias del Primer Ciclo de Conferencias Internacionales "Leonardo Zeevaert"*, pp. 204 - 224. Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos. Ciudad de México, Noviembre.
- Shuk, T. (1996a) - "Aplicabilidad de la Metodología de Taludes Naturales (MTN) para la Detección de Rasgos Geoestructurales". *Compilación de Trabajos de la Conferencia Internacional sobre Sismología para Ingeniería*, pp. 1 - 38. Universidad Javeriana y Escuela Colombiana de Ingeniería. Bogotá, Junio.
- Shuk, T.: (1996b) - "Aplicabilidad de la Metodología de Taludes Naturales (MTN) para Estudios Regionales de Zonificación Geotécnica de Inestabilidad de Taludes, Amenaza y Riesgo". *Compilación de los Trabajos del Seminario-Taller sobre "Metodología de Zonificación en Geociencias"*, Subdirección de Ingeniería Geoambiental de INGEOMINAS. Villa de Leiva, Agosto.
- Shuk, T. (1996c) - "*Desarrollo Hidroeléctrico del Río Arma - Estudio de Riesgo Geotécnico por medio de la MTN*".

- Informe para Ingeniería e Hidrosistemas (IEH) Ltda. Bogotá, Noviembre.
- Shuk, T.: (1998) - "Site Characterization by Means of the Natural Slope Methodology (NSM)". *Memorias de la Primera Conferencia Internacional sobre Caracterización Geotécnica de Sitios*, pp. 315 - 320. Atlanta, Georgia (USA), Abril.
- Shuk, T. (1999) - "Metodología de Taludes Naturales (MTN) - Principios y Aplicaciones". Manuscrito en proceso para la. Sociedad Colombiana de Geotecnia, Bogotá.
- Shuk, T.; González, A. (1993) - "Quantification of Slope Instability Risk and Cost Parameters for Geotechnical Applications in a Highway Project and in a Regional Study." *Memorias de ICOSSAR'93 (Sexta Conferencia Internacional sobre Seguridad y Confiabilidad Estructural)*, Vol. 3, p. 2025 - 2032. Innsbruck, Agosto. A.A. Balkema, Rotterdam (1994).
- Shuk, T.; Hernández, E. E. (1996) - "Quantitative Safety Factor Mapping by means of the Natural Slope Methodology (NSM)". *Memorias del Séptimo Simposio Internacional de Deslizamientos*. Trondheim (Noruega), Junio.
- Shuk, T.; Universidad de los Andes (1993) - "Comprobación Experimental y Observacional de la Metodología de Taludes Naturales (MTN) - Túnel Los Rosales, Bogotá. Dos Volúmenes. Informe de la Investigación para el Fondo para la Protección del Medio Ambiente "José Celestino Mutis" (Fondo FEN Colombia). Bogotá, Diciembre.
- Sokolovskii, V. V. (1965) - "Statics of Granular Media". Pergamon Press, Nueva York (citado en: McMahon, 1976).
- Terzaghi, K. (1956) - "Theoretical Soil Mechanics". John Wiley and Sons, 8a. Edición. Nueva York.
- Universidad de los Andes (1992) - "Estudio Preliminar de la Confiabilidad de la Vía Bogotá - Villavicencio". Dos Volúmenes. Informe para el Fondo Financiero de Proyectos de Desarrollo (FONADE). Centro de Estudios e Investigación de la Facultad de Ingeniería Civil (CIFI). Bogotá, Noviembre.

APENDICE A

NOMENCLATURA Y SIMBOLOS MATEMATICOS

- A : Amenaza (Ecuación 51, 4.7).
- Af : Area de afectación por un deslizamiento (Ecuación 57, 4.8.4).
- a,b : Parámetros funcionales de la relación L vs. H.
- a_n,b_n : Parámetros funcionales de cualquier envoluta "n" potencial simple.
- β_n : Angulo cuya tangente es H_n/L_n.
- Cf : Costo imputable a la falla de un talud (4.8.1).
- Cm : Costo de mantenimiento de una obra (Ecuación 53, 4.8.2).
- Co : Costo inicial de una obra (Ecuación 53, 4.8.2).
- CP : Corto Plazo (4.3.1).
- C_{TD} : Costo total esperado directo (Ecuación 53, 4.8.2).
- C_{TI} : Costo total esperado indirecto (Ecuación 55, 4.8.3).
- c : Cohesión (símbolo generalizado); o cohesión de suelos.
- c_i : Cohesión por imbricación (o entramamiento) estructural de rocas en el EOσ_v (4.3.1 y Figura 17).
- c_o : Cohesión total de rocas en el EOσ_v (4.3.1 y Figura 17).
- c_t : Cohesión traccional de rocas (4.3.1 y Figura 17).
- E(C_k) : Costo esperado directo de la falla de k taludes (Ecuación 53, 4.8.2).
- EOσ_v : Eje origen de los esfuerzos verticales.

E(ti)	: Tiempo esperado por las interrupciones de una obra o servicio (Ecuación 55, 4.8.3).
e	: Subíndice para la "Condición de (Ensayos) de Laboratorio".
Fd	: Factor dimensional; $F_d = 1.0$, en el sistema MKS (Ecuación 32, 3.4).
Fs	: Factor de seguridad convencional (4.4).
Fsr	: Factor de seguridad relativo (4.3).
FT	: Sistema de medición: Facetas de Taludes (3.1.2).
ϕ	: Angulo de fricción (símbolo generalizado).
ϕ_b	: Angulo básico de fricción (3.3.2).
ϕ_m	: Angulo de fricción entre minerales (3.3.3).
ϕ_p	: Angulo de fricción pico (Figura 17, 3.4.5).
ϕ_{pq}	: Angulo de fricción pico para compresión inconfiada (Figura 17, 3.4.5).
ϕ_r	: Angulo de fricción residual (Figura 17).
γ	: Peso unitario (símbolo generalizado).
γ_a, γ_b	: Pesos unitarios, subíndices "a" y "b" (Figura 15, 3.4.5).
γ_d, γ_t	: Pesos unitarios: seco y total (símbolos generalizados).
γ_{da}, γ_{ta}	: Pesos unitarios aparentes: seco y total (Figura 16, 3.4.5).
γ_{dm}, γ_{tm}	: Pesos unitarios de la masa: seco y total.
H_T	: Altura vertical máxima o crítica para una categoría de tiempo T (Ecuación 49, 4.6.4).
K	: $K = H_T \gamma_t / c$ (Figura 28, 4.3).
L, H	: Parámetros de caracterización de la función $H = a L^b$
L_f	: Longitud de afectación de una obra lineal por un deslizamiento (Ecuación 56, 4.8.4).
L_{LD}, H_{LD}	: Longitud y altura límite superior; nivel de familia (ej: Figura 3).
L_{LF}, H_{LF}	: Longitud y altura de la función $H = a L^b$
L_{LP}, H_{LP}	: Longitud y altura límite superior; nivel de población (ej: Figura 5).
L_{LU}, H_{LU}	: Longitud y altura límite superior; nivel de universo (ej: Figura 26).
L_{LX}, H_{LX}	: Coordenadas del Vértice del Patrón Triangular (Figura 5 y 3.3.7).
LP	: Largo Plazo (4.3.1).
MCP	: Muy Corto Plazo (4.3.1).
Md	: Módulo de deformabilidad (símbolo generalizado).
MTN	: Metodología de Taludes Naturales.
m	: Subíndice para la "Condición de la Masa".
P(Eft)	: Probabilidad del evento de falla de una familia en sí (Ecuación 59, 4.8.4).
P(Em)	: Probabilidad de una magnitud de falla dada (Ecuación 59, 4.8.4).
Pdg	: Parámetro de degradación de la masa (Cuadro 3 y 3.3.9).
Pds	: Parámetro de desagregación de la masa (Cuadro 3 y 3.3.9).
Pf	: Probabilidad de falla (símbolo generalizado).
Pfi	: Probabilidad de falla incondicional (4.6.5).
Pfc	: Probabilidad de falla condicional (4.6.6).
Pft	: Probabilidad de falla total (4.6.7).
P(mf)	: Probabilidad de ocurrencia de una magnitud de falla dada (Ecuación 59, 4.8.4).
p_a	: Parámetro adimensional de presurización (símbolo generalizado) [Subíndices am, bt, fp, rp (Ecuación 6, Figura 2)].
$(p_a)_x$	: Valor máximo teórico de p_a en cualquier envoluta del SAMTN (3.3.3).
R	: Riesgo (Ecuación 51, 4.7).
r	: Resistencia a "s" movilizada a lo largo de la superficie de falla (Ecuación 34, 4.4).
s	: Esfuerzo de empuje a lo largo de la superficie de falla (Ecuación 34, 4.4).
SCICN	: Sistema de medición: Secuencial Cumulativo de Intervalos de Curvas de Nivel (Figura 3, 3.1.4).
SIG	: Sistemas de Información Geográfica.
s_a	: Parámetro adimensional de resistencia máxima al corte (Ecuación 4, Figura 2).

s_H	: Desviación estándar de H (Figura 31, 4.6.3).
$(s_H)_T$	: s_H para cualquier categoría de tiempo (Ecuación 49, 4.6.3).
TE	: Sistema de medición: taludes enteros (3.1.1).
TEPX	: Sistema de medición: taludes enteros de pendientes máximas (3.1.3).
u	: Presurización (Símbolo generalizado).
V	: Vulnerabilidad (Ecuación 51, 4.7).
Vf	: Volumen de falla por un deslizamiento (Ecuación 58, 4.8.4).
Vfp	: Valor de un sujeto o factor productivo por unidad de tiempo (Ecuación 55, 4.8.3).
Vm	: Variabilidad de la masa (Cuadro 3 y 4.6.2).
Vsc	: Valor del sobrecosto de una obra (o servicio) interrumpida, por unidad de tiempo.
X_{LH}	: Parámetro que presenta una igual distancia desde el origen de coordenadas (0,0) hasta la intersección de una línea de 45° con la ETEC (Ecuación 27, 3.3.5).

APENDICE B

DESCRIPCIONES LITOLÓGICAS

A₁L₁: Formación Arenisca y Lutita. Grupo Alto Sinú. Cretáceo Superior. Margen Derecha, Angostura del Río Sinú, Tierralta, Córdoba. Alternancia de estratos de arenisca y lutita, de espesores variables. La Arenisca (grauvaca) es gris clara a verdosa, de grano fino, bien cementada y contiene pequeños nódulos calcáreos; la Lutita es gris oscura a negra, maciza, y con algunos niveles laminados.

Big Thomson Canyon*: Precámbrico. Colorado, USA. Neis, resistente, algo diaclasado, con fracturas de foliación de un rumbo aproximadamente perpendicular a la dirección del cañón (McMahon, 1976).

Black Canyon*: Colorado, USA. Neis, resistente, con mayor frecuencia de diaclasas, y con fracturas de foliación de un rumbo aproximadamente perpendicular a la dirección del cañón (McMahon, 1976).

Clear Creek Canyon*: Precámbrico. Colorado, USA. Neis, resistente, algo diaclasado, con fracturas de foliación de un rumbo aproximadamente perpendicular a la dirección del cañón (McMahon, 1976).

Grand Canyon*: Río Colorado, Arizona, USA. Capas horizontales de Areniscas de gran espesor y Lutitas estables (McMahon, 1976).

Jcds: Batolito de Sonsón. Jurásico. Río Arma, Sonsón (Antioquia) y Aguadas (Caldas). Constituido principalmente por Tonalitas (más del 90%), aplitas, y cuarzodioritas félsicas; y con escasos afloramientos de gabro y dioritas.

Kcs-2: Miembro de la Formación Cáqueza Superior (Formación Arenisca Las Juntas). Cretáceo Superior. Garagoa y Macanal, Boyacá. Alternancia de Lutitas negras, silíceas, micáceas, y con presencia de restos vegetales; con Areniscas de grano fino; y con Limolitas cuarcíticas, oscuras y micáceas que, a veces, se acúñan.

Kcs-3: Miembro de la Formación Cáqueza Superior (Formación Arenisca Las Juntas). Cretáceo Superior. Garagoa y Macanal, Boyacá. Constituido esencialmente por Arenisca cuarcíticas de color gris claro, con cemento silíceo, duras y bien consolidadas, de grano fino, con presencia de micas masivas con espesores hasta de 50 cm.; e intercaladas con Lutitas negras, carbonosas, micáceas y laminares. En la parte media y superior predominan las areniscas cuarcíticas (80%). En su base, la proporción de areniscas y lutitas es del 50% aproximadamente.

Kcs-4: Miembro de la Formación Cáqueza Superior (Formación Arenisca Las Juntas). Cretáceo Superior. Garagoa y Macanal, Boyacá. En general consta de intercalaciones de Areniscas cuarcíticas grises, silíceas y bien consolidadas, con Lutitas oscuras, laminadas, micáceas y carbonosas, y que presentan restos vegetales.

Kd: Triángulo Vial de Manizales (Manizales, Chinchiná, Villa María y Palestina), Caldas, al Oriente de la Falla Romeral. Flujos interestratificados de Lava Submarina de composición básica a intermedia, que ocasionalmente cortan los metasedimentos Kis; se presentan alterados y, en general, deformados dinámicamente.

Kgad: Formación Arenisca Dura. Grupo Guadalupe (Ksg). Cretáceo Superior. Cerros Orientales de Bogotá. Comprende estratos de Arenisca: grano fino a muy fino, muy dura a moderadamente dura, con cementación silícea a arcillosa, compacta, y con estratificación maciza a laminar; Limolita: generalmente silícea, firme y de estratificación media a gruesa; Arcillolita y Lutita: homogéneas, firmes y están dispuestas en estratos gruesos y medios; y Lidita (chert): en ocasiones transgrede a porcelanita, muy dura, firme, frágil a medianamente frágil, y se presenta en estratos gruesos a finos (entre 0.1 y 1.0 m de espesor).

Kgp: Formación Plaeners. Grupo Guadalupe (Ksg). Cretáceo Superior. Cerros Orientales de Bogotá. Comprende estratos de Limolita: silícea y dura, con estratificación media, fina y laminar; de Arcillolita: homogénea, con estratificación delgada a laminar; de Arenisca: dura, bien cementada, de grano fino a muy fino, cuarzosa, y de estratificación gruesa a laminar; y de Lidita (chert): silícea, homogénea, dura, frágil, y su estratificación es maciza a fina.

Kif: Formación Fómeque. Cretáceo Inferior (Barremiano Medio - Albiano Inferior). En cercanías de Yopal, Casanare. Está constituida por Lutitas: grises oscuras a negras, con intercalaciones de margas, lentejones de calizas lumaquéllicas de color gris oscuro, y areniscas cuarzosas grises claras de grano fino, micáceas. En el área de estudio está muy fracturada por constituir el núcleo del Anticlinal de Zapatosa.

Kis: Metasedimentario. Cretáceo Inferior. Triángulo Vial de Manizales (Manizales, Chinchiná, Villa María y Palestina), Caldas, al Oriente de la Falla Romeral. Grauvacas, lutitas negras, areniscas feldespáticas, lentes de liditas (chert) y calizas; afectadas en su conjunto por intenso metamorfismo dinámico, pero conservando en parte sus rasgos sedimentarios.

Kiu: Formación Une. Cretáceo Inferior (Albiano - Cenomaniano). En cercanías de Yopal, Casanare. Se compone de Areniscas: cuarzosas, blancas a grises claras, competentes de grano fino a medio, algunas conglomeráticas y algo micáceas, con estratificación fina a gruesa. Algunas veces presenta estratificación cruzada, calcos de carga y ondulitas; y se presentan intercalaciones delgadas de lutitas negras.

Ksc: Formación Chipaque. Cretáceo Superior (Cenomaniano Superior a Coniaciano). En cercanías de Yopal, Casanare. Está compuesta principalmente de Lutitas negras con restos de flora; en su parte inferior se presentan esporádicas intercalaciones de caliza, así como de arenisca cuarzosa y arcillosa de color gris claro, de grano fino y estratificación gruesa; y en su parte superior se presentan estratos gruesos de areniscas cuarzosas y arcillosas, gris claras, y de grano fino. La presencia de fósiles es frecuente. Sus características litológicas y paleontológicas indican un ambiente de depósito marino, de aguas poco profundas y circulación restringida.

Ksg: Formación Guadalupe. Cretáceo Superior. En cercanías de Yopal, Casanare. En su parte media: predominan las Lutitas oscuras; en su base: Areniscas cuarzosas, blancas, de grano fino, bien sorteadas, con intercalaciones de Lutitas silíceas y Liditas (chert) grises; y en su tope: Areniscas cuarzosas claras, de grano fino a conglomerático, con interestratificación gruesa a masiva.

Ktpb: Formación Palmichal. Cretáceo Superior (Maestrichtiano) - Terciario Inferior (Paleoceno Inferior). Formación Mixta: Formación Guadalupe (Ksg) y Formación Barco (Tpb). En cercanías de Yopal, Casanare. Litología: Formación Guadalupe (ver: Ksg). Formación Barco (Tpb): constituida por Areniscas: cuarzosas de grano fino a medio y friables; y Arcillolitas y Lutitas: gris claras a oscuras. Hacia el techo predominan las areniscas cuarzosas, de grano medio a grueso, y conglomerados finos, con cantos subredondeados de cuarzo hasta de 2 cm. de diámetro. Sus características litológicas y paleontológicas indican un ambiente de depósito marino, de aguas someras, con influencias deltaicas.

Pes: Esquistos Cuarzo - Sericíticos. Paleozoico. Río Arma, Sonsón (Antioquia) y Aguadas (Caldas). Compuestos principalmente por Cuarzo - Sericitas con cantidades menores de clorita, biotita, grafito, plagioclasa (principalmente albita), y accesorios comunes: turmalina, zircón, apatita y minerales opacos.

Por lo general, constituyen rocas finamente laminadas y, en partes, de textura néisica; y presenta una buena caracterización de los diferentes grados de metamorfismo y bandas laminares de 1 a 3 mm de espesor de micas y grafito, separadas por venas de cuarzo lechoso de 0.1 a 10 cm de espesor.

Pev: Esquistos Verdes. Paleozoico. Río Arma, Sonsón (Antioquia) y Aguadas (Caldas). Se presentan en capas de 1 a 2 m de espesor, con una densidad de fracturamiento baja y pliegues locales, y forman escarpes a lado y lado del Río Arma; y localmente aparecen como masivos. En su conjunto, estos esquistos se distinguen por su color verdoso en tonos claros y oscuros. Son rocas macizas con esquistosidad bien definida, que se confunde con los planos de diaclasamiento cuando son ricas en anfíbol - epidota, y se van haciendo finalmente laminadas, con Estructura Filítica, a medida que estos minerales son reemplazados por clorita. Como minerales accesorios se encuentran calcita, esfena, cuarzo, magnetita, pirita y ocasionalmente, mica blanca. Estas rocas se han interpretado como resultado de flujos volcánicos submarinos.

Pórfido Cuproso Río Tinto*: sin descripción adicional (Hoek y Bray, 1977).

Tem: Formación Mirador. Eoceno Superior - Oligoceno. En cercanías de Yopal, Casanare. Está compuesta por Conglomerados: con cantos de cuarzo en una matriz arenosa; Areniscas: cuarzosas, de grano fino a grueso y friables; y Arcillolitas y Lutitas. Sus características litológicas y paleontológicas indican un ambiente deltaico, con influencias lagunares marinas.

Tmgi: Formación Guayabo Inferior. Mioceno Medio. En cercanías de Yopal, Casanare. Su morfología es escarpada y está compuesto de Areniscas: grano fino a medio, con estratificación media a gruesa; y Arcillolitas: de color rojo. Sus características litológicas indican un ambiente de depósito marino somero, con influencias deltaicas.

Tml-1: Miembro Inferior de la Formación León (Tml). Mioceno Inferior. En cercanías de Yopal, Casanare. Está constituido por Lutitas y Arcillolitas: gris verdosas o azuladas, con intercalaciones de Areniscas: sublíticas, gris verdosas, de grano fino y estratificación gruesa. Sus características litológicas y paleontológicas indican un ambiente de depósito marino, con influencias deltaicas.

Tml-2: Miembro Superior de la Formación León (Tml). Mioceno Inferior. En cercanías de Yopal, Casanare. Litología: ver Tml-1.

Toc: Formación Carbonera. Oligoceno - Mioceno Inferior. En cercanías de Yopal, Casanare. Conformada por ciclos de Arcillolitas y Limolitas de color gris, con intercalaciones de areniscas cuarzosas con algunos lentes de carbón. También presenta areniscas de color gris verdoso en bancos de 4 a 6 m de espesor, intercaladas con arcillolitas. Sus características litológicas y paleontológicas indican un ambiente de depósito marino lagunar, con influencias deltaicas.

Toc-1: Miembro Superior de la Formación Carbonera (Toc). Oligoceno - Mioceno Inferior. En cercanías de Yopal, Casanare. Litología: ver Toc.

Tpc: Formación Los Cuervos. Paleoceno. En cercanías de Yopal, Casanare. Está compuesta principalmente de Arcillolitas: grises con tonos verdosos, e intercalaciones de Arenisca: cuarzosa, blanca amarillenta, de grano medio a grueso, con estratificación masiva. El ambiente de depositación parece ser litoral de circulación restringida a lagunar marino.

Yosemite Valley*: California, USA. Granito Monolítico y muy resistente, con pocas diaclasas diferentes a las fracturas de foliación (McMahon, 1976).

*: Las descripciones litológicas de estos trabajos con base en taludes naturales son de tipo escueto (McMahon, 1976), o inexistentes (Hoek y Bray, 1977)