

# **PROPUESTAS METODOLÓGICAS PARA LA REALIZACIÓN DE CARTOGRAFÍA GEOLÓGICA SUBTERRÁNEA EN ROCAS DURAS**

**JORGE IVÁN TOBÓN**

*Departamento de Recursos Minerales , Facultad de Minas. Universidad Nacional de Colombia. Medellín*

**PABLO FERNANDO ESTRADA**

*JFG - Slumberger*

Recibido para revisar 01 Junio 2001; aceptado 13 de Agosto de 2001; versión final recibida 29 Agosto 2001

**RESUMEN.** En este artículo se presentan algunas metodologías para la realización de la cartografía geológica subterránea, trabajo fundamental en la recopilación de datos litológico-estructurales; que luego se procesarán y presentarán para la toma de decisiones en lo correspondiente a direccionamiento, estabilidad, diseño de soportes y aperturas de túneles para la explotación de minerales, proyectos viales o hidroeléctricos. Las metodologías propuestas tienen algunas diferencias importantes como son: en la primera, la utilización de la brújula es indispensable, el plano utilizado para dibujar el mapa es imaginario y las descripciones son esencialmente narrativas manejadas en la libreta de campo. En la segunda, la brújula no se requiere, el plano utilizado para dibujar el mapa es la representación del techo y las paredes abatidas 90° y para las descripciones se usan formatos, mapa de campo y libreta.

**PALABRAS CLAVES.** Cartografía. Cartografía subterránea, túneles.

**ABSTRACT.** This paper presents some methods for underground geological mapping, fundamental for gathering geological and structural data, which are later processed and presented for making decisions regarding directioning, stability, support-design and tunnel-opening for mineral exploitation, road projects or hydroelectric projects. The proposed methods have some important differences like: In the first one, the use of compass is essential, the plane used for drawing the map is imaginary and the descriptions are essentially fieldbook narratives. In the second one, the compass is not required, the plane used for drawing the map is the representation of the roof and the 90° rotates walls, and formal fieldmaps and fieldbooks are used for description.

**KEY WORDS.** Mapping, underground mapping, tunnels.

## **1 INTRODUCCIÓN**

A medida que avanzan las excavaciones durante la construcción de un túnel para desarrollo minero, obras hidroeléctricas, vías, etc., se deben llevar a cabo levantamientos geológicos y registros geotécnicos que permitan obtener información acerca de la litología, mineralizaciones, estructuras geológicas y características geomecánicas en general del macizo rocoso para refinar los diseños (orientación, inclinación, dimensiones, etc), cálculos de estabilidad y estimativos de sistemas de soportes de acuerdo con la vida útil de la obra. Este es un trabajo indispensable y hasta rutinario en los proyectos subterráneos pero que rara vez se publican, lo que ha impedido en alguna medida el desarrollo de métodos sistemáticos para describir e interpretar las rocas con propósitos ingenieriles, es así que cada compañía o el geólogo de turno termina por desarrollar su

propio método de trabajo sin permitir la comparación y el mejoramiento continuo en la adquisición de estos datos, situación esta que no es ideal para la organización metodológica de esta importante actividad.

En los tipos de proyectos mencionados se deben establecer las características geomecánicas de las rocas en las cuales se está trabajando, lo mismo que definir los sistemas de fracturamiento y diaclasamiento que las afectan, mediante la aplicación de sistemas de clasificación de macizos rocosos como el NGI con su índice Q o el CSIR con su índice RMR, todo esto con el fin de obtener una idea clara de la calidad del macizo rocoso, además de los cambios y deformaciones que podría sufrir la roca por la acción de los esfuerzos históricos, actuales y por la redistribución de éstos inducida por la apertura.

Toda la información obtenida a partir de los levantamientos litológico-estructurales que se realizan

dentro de las excavaciones le permite a los ingenieros (geólogos, mineros, civiles, etc.) visualizar las zonas más riesgosas para la estabilidad de la misma, debido, por ejemplo, a la formación de bloques o cuñas potencialmente inestables por la intersección tridimensional de discontinuidades que por sus características geotécnicas pueden tener riesgo de desprendimiento, sectores en donde se debe variar el consumo de explosivos o que permitan optimizar la producción de la mina, modificar el direccionamiento de los túneles como en el caso de fallas que desplazan o interrumpen una veta o cuerpo mineralizado, entre otras.

Estas investigaciones tienden a la preservación de la vida de las personas y equipos, a la recuperación eficiente y segura de los minerales y al conocimiento del comportamiento geomecánico de las rocas del área que sirva de referencia para proyectos futuros.

Dentro de un proyecto minero, este trabajo se puede incluir en la fase de prospección porque permite tener un conocimiento más preciso del depósito en profundidad lo que sirve para precisar el cálculo de reservas y refinar el diseño de las campañas de perforación para proyectar su comportamiento hacia niveles más profundos.

Las metodologías descritas en este documento son el fruto de la recopilación bibliográfica y de la experiencia de los autores principalmente en túneles de proyectos mineros como los de la mina de Caliza El Toro de Cementos El Cairo S.A., mina de caliza de Cementos Votorantín en San Pablo - Brasil, mina de oro de la Frontino Gold Mines en Segovia y mina de carbón La Gualí en Amagá. (Ver referencias)

## 2 GENERALIDADES

Antes de comenzar a hacer el levantamiento cartográfico se deben llevar a cabo algunas acciones previas tales como:

- Limpiar las paredes, frente y techo del tramo de túnel a ser registrado, con agua a presión. Esta actividad es importante ya que durante la construcción del túnel se emplea maquinaria o explosivos para romper la roca, actividad que genera gran cantidad de material particulado que se deposita sobre las superficies del túnel cubriendo los diferentes rasgos litológico-estructurales de la roca.
- Materializar con puntos topográficos en el techo el eje del túnel y abscisar sus paredes. Generalmente este trabajo es realizado por un topógrafo y se hace a medida que se avanza en la construcción del túnel.
- Se debe llevar un mapa del tramo del túnel a estudiar con la información que se desea verificar o

se espera encontrar, para obtener una mejor correlación de las estructuras. Sin dejar de levantar los datos lito-estructurales nuevos.

Se requiere del siguiente equipo básico para la realización del trabajo:

- Base topográfica a escala 1:500 ó 1:200 actualizada y detallada.
- Libreta de campo del respectivo túnel.
- Lámpara de halógeno de buena potencia.
- Lienza metálica lo suficientemente larga.
- Tabla para apoyar con cubierta de plástico para proteger la libreta de la humedad.
- Brújula, martillo, navaja, lupa, ácido clorhídrico, porcelana sin esmaltar.
- Cincel, almadana pequeña, bolsas de plástico, marcador indeleble, cinta de enmascarar y etiquetas en caso de que se vayan a tomar muestras.
- Equipo de protección personal (casco, protector de oídos, gafas, máscara antigases, botas de caucho, chaleco reflectivo, lámpara de minería, etc.).
- Lápices y colores.
- Auxiliar.
- Cámara fotográfica (con rollo ASA 400 o superior y flash para 10m como mínimo en túneles de gran sección) o filmadora.

A continuación se presentan algunas de las metodologías propuestas para realizar los levantamientos cartográficos subterráneos.

## 3 METODOLOGIA 1

En este método las observaciones se hacen en las paredes o hastiales (que deben ser previamente identificadas de ser posible con referencias geográficas) a 1.5m del piso, esto por comodidad, y cualquier estructura que se quiera tomar en el techo, piso o a una altura diferente se debe proyectar al plano de referencia propuesto (Figura 1). En éste, la brújula es un elemento indispensable. En campo se pueden trabajar sobre un mapa de la sección del túnel, sobre una libreta de manera narrativa o en combinación.

La representación gráfica de la información levantada (mapa) corresponde a un plano imaginario a 1.5m del piso y de ancho equivalente al del túnel a escala (Figura 2).

## PROCEDIMIENTO

- Se hace un recorrido rápido del tramo del túnel a cartografiar, tratando de identificar las litologías, mineralizaciones y principales estructuras, esto es habituarse al ambiente.
- Ubicarse en el inicio del tramo a estudiar.

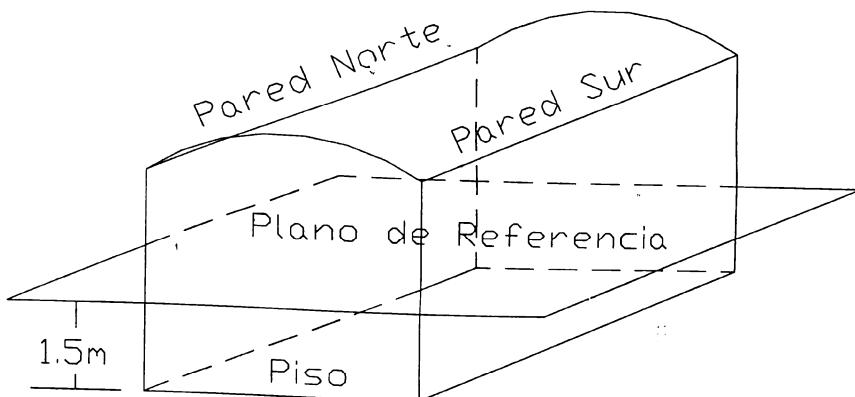


Figura 1. Plano de referencia - Metodología 1

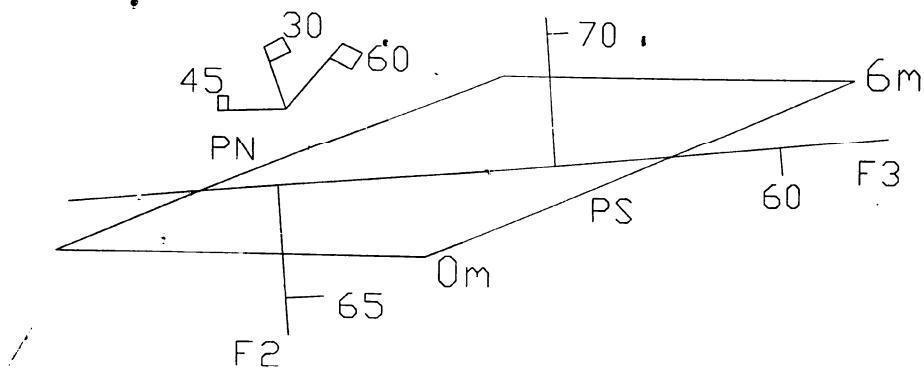


Figura 2. Representación gráfica de los datos levantados - Metodología 1

- Se realiza la descripción litológica, teniendo en cuenta las características petrográficas y minerales, texturales, estructurales y organolépticas de cada uno de los tipos de rocas presentes. Para ubicar espacialmente los diferentes datos estructurales observados y poderlos representar posteriormente en un plano o mapa, mediante proyecciones horizontales, se mide la distancia a la cual se encuentran dichas estructuras desde la abscisa más cercana ya materializada por el topógrafo y a 1.5 m de altura del piso (plano de referencia).
- Al estar dentro de una misma unidad litológica se divide el tramo en secciones según la densidad de diaclasamiento o rasgos geotécnicos preponderantes como zonas de cizalla, intenso goteo, cavernas naturales, etc. Esto es separar la roca en tramos donde se presume que cambiará su clasificación geomecánica.
- Tomar abundantes mediciones de los planos de diaclasamiento en las dos paredes y buscándolas por familias, para luego en la red estereográfica o por cualquier método computacional (Dips, Splot, etc) calcular las tendencias principales y presentarlas en el mapa en forma de roseta.

**El diaclasamiento:** se toman en zonas diferenciadas por la densidad o características como rugosidad, relleno, presencia de agua, etc. Deben definirse zonas de posible conformación y caída de bloques. En la Tabla 1 se presentan algunas definiciones para la roca según la densidad de diaclasamiento, la cual se puede definir por el número de diaclasas por metro lineal, por la distancia entre diaclasas de la misma familia o transformando imaginariamente los bloques generados en esferas de diámetro equivalente, los dos últimos son los que se recomiendan en este método:

Tabla 1. Definición de la roca según su intensidad de diaclasamiento

Aspecto de la roca	Espaciamiento (cm)
Masivo	> 80
Medianamente diaclasado	40 - 80
Diaclasado	20 - 40
Muy diaclasado	< 20

Tabla 2. Categorización de las fallas

Falla	Espesor	Relleno	Goteo	Rugosidad	Respaldos
F1	>50 cm	Arcilla o sin	Lento-rápido	Lisa o plana	Alterados
F2	30-50 cm	Arcilla o material triturado	Lento	Lisa- suavemente ondulada	Medianamente alterados
F3	10-30 cm	Calcita + arcilla	Seco-lento o Humedo	Ondulada	Levemente alterados
F4	0-10 cm	Calcita o cuarzo	Seco	Ondulada	Frescos
F5	Cerrada	sin	Seco	Rugosa	Frescos

Las fracturas o fallas se deben medir de la siguiente manera:

- (i) Tomar la distancia a la que estas discontinuidades cortan las paredes del túnel (derecha e izquierda) a la altura del plano de referencia, lo cual define el rumbo por ser dos puntos contenidos en el plano y a la misma altura, tomar una visual con la brújula desde una pared hacia la otra parado sobre el plano de ruptura y por último se busca una superficie plana para medir la actitud de la discontinuidad directamente con la brújula, así se tienen tres datos del rumbo de la estructura con el fin de compararlos entre si. En caso de diferencias muy grandes se recomienda tomar como más representativos la medición topográfica y la visual debido a que las estructuras geológicas suelen ser alabeadas en el rumbo.
- (ii) Para definir el buzamiento, dado que estas estructuras no son planos perfectos, se prefiere un promedio de varios puntos tomados con la brújula y una visual de la tendencia general de buzamiento de la superficie de ruptura que se toma con la brújula moviéndose perpendicular al rumbo, hacia donde está buzando, y hasta que el plano se convierta en una línea. Se deben observar los planos de falla especialmente en el techo, porque en las paredes por el corte se pueden apreciar buzamientos aparentes.
- (iii) Si es viable, debe establecerse el movimiento relativo de las fallas. Para esto, en el plano de falla se deben medir el *pitch* y *plunge* de las estrías, escalones, pliegues de arrastre o cualquier otra evidencia que indique el sentido del desplazamiento de los bloques.
- (iv) En la medida de lo posible se debe definir en campo la edad relativa de las fallas y la magnitud del desplazamiento (cuál corta a cuál y cuánto la desplaza).

Es recomendable categorizar las fallas para poder

hacer los estudios geomecánicos o geotécnicos, facilitar su entendimiento y disminuir la escritura en los planos. En la Tabla 2 se presenta una propuesta de categorización o clasificación.

Para definir las posibles combinaciones se utilizará el criterio del geólogo. Desde el punto de vista de la estabilidad inicialmente será más preocupante una F1 que una F4.

El espesor es la distancia que hay entre un respaldo y el otro de la falla. El relleno es el tipo de material (arena, limo, arcilla, brecha, etc) que hay entre los respaldos: una falla cerrada no puede tener relleno. Los rellenos son desventajosos desde el punto de vista de la estabilidad cuando actúan como lubricantes, son fácilmente lavables o no existentes en fallas abiertas. Los rellenos insolubles, caso del cuarzo, son ventajosos porque actúan como ligantes de los respaldos. El goteo siempre será desfavorable porque lubrica las paredes de la falla facilitando el movimiento relativo de los bloques, entre más agua pase por la falla peor desde el punto de vista de la cinemática de los bloques potencialmente inestables, pero abundante paso de agua podría indicar que no se presentan sobre presiones alrededor del túnel (situación favorable). La rugosidad se define en la superficie de los respaldos entre más rugosos menos factibilidad de movimiento.

También se debe definir la favorabilidad o desfavorabilidad de una falla según su tránsito en el túnel. La Tabla 3 muestra las diferentes categorías:

Tabla 3. Favorabilidad de las fallas de acuerdo con su tránsito en el túnel

Relación	Tránsito	Favorabilidad
Sub-perpendicular	Rápido	Favorable
Oblicuo	Lento	Desfavorable
Sub-Paralela	Muy lento	Muy desfavorable

•El tránsito está definido por la relación angular entre el rumbo de la discontinuidad y la dirección del

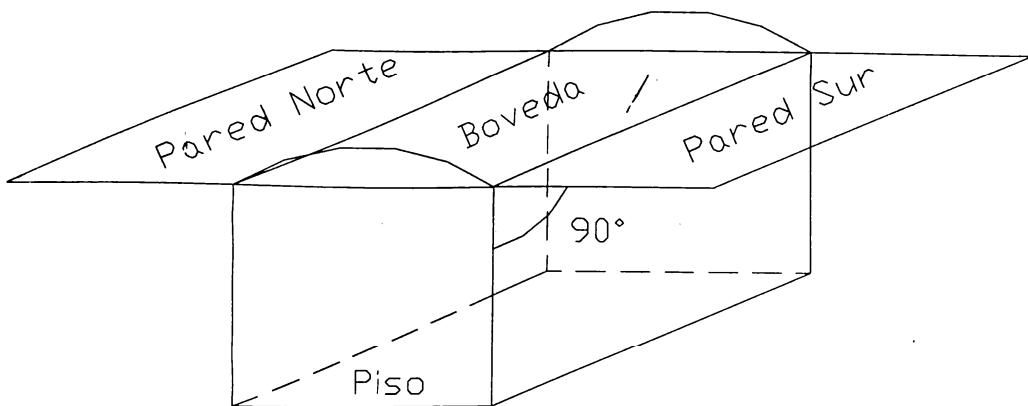


Figura 3. Abatimiento de paredes - Metodología 2

eje del túnel, éste tiene que ver con la persistencia que la estructura tenga al atravesar el túnel. A mayor lentitud en el tránsito de una falla en un túnel mayor será la inestabilidad creada y más altos serán los costos por refuerzos o ademés.

**Contactos:** Se debe establecer el tipo de contacto: normal o neto, fallado o transicional, y como para las fallas deben amarrarse a los puntos topográficos y se usan las mismas técnicas para definir su actitud. Desde la óptica de la estabilidad, los contactos son superficies de discontinuidad donde los menos graves son los transicionales.

- **Normal:** contacto neto sin fallamiento (sin movimiento relativo entre las diferentes rocas) donde se pasa bruscamente de una roca a otra diferente, se le debe tomar rumbo y buzamiento aunque sea aparente, esto por la dificultad de encontrar planos expuestos para hacer la medición. Cuando se presentan bandas o intercalaciones, el límite minero lo establece la continuidad del cuerpo hasta la primera banda dependiendo del espesor y enriquecimiento de las siguientes que es lo que define la viabilidad económica del material para ser explotado.
- **Fallado:** El contacto está controlado por una falla y se le debe dar el tratamiento de falla hasta llegar a categorizarlo.
- **Transicional:** El contacto no es tajante sino que hay una disminución progresiva de unos componentes hasta pasar a ser otra roca (Ejemplo disminución del carbonato de calcio en el mármol hasta llegar a ser un esquisto calcáreo). Cuando un contacto es transicional, el límite minero lo establece la calidad química de la roca. Otro ejemplo sería el contacto gradacional entre la roca meterizada y fresca.

#### 4 METODOLOGÍA 2

En este método se dibujan las discontinuidades (diaclasas, fallas y contactos entre otras) en el mapa haciendoles un seguimiento visual de su intersección con las paredes y techo del túnel, y estableciendo sus edades relativas directamente en campo. Además, se utiliza un formato donde todas las características de cada una de las discontinuidades se presenta en forma de datos numéricos. La bóveda de la excavación se representa en el mapa por un plano horizontal a la altura del hombro del túnel y las paredes como planos abatidos  $90^{\circ}$  a este nivel. Se entiende por hombro del túnel el punto donde se intercepta la parte superior de las paredes con la bóveda (Figura 3).

Al analizar esta metodología se observa que el uso de la brújula no es indispensable para determinar la actitud de las estructuras ya que en el dibujo se obtienen el rumbo y buzamientos aparentes a partir de los cuales se pueden determinar los reales. Sin embargo, se recomienda el uso de la brújula para confrontar los datos de buzamientos reales tomados en el campo con los obtenidos a partir de los buzamientos aparentes por métodos gráficos, geométricos o matemáticos. La representación gráfica de la información levantada (mapa) corresponde a la bóveda asemejada con un plano, las paredes abatidas y los datos geológico-estructurales dibujados sobre ellas (Figura 4).

#### PROCEDIMIENTO

Al observar una discontinuidad se determinan sus características geomecánicas y se hace el registro de ésta en el formato y en el mapa. Estos mapas o planos muestran la discontinuidad en todo su recorrido a lo largo del túnel al ubicarla exactamente en techo y paredes, que es donde se realizan las observaciones (Figura 4). Siempre las paredes se deben identificar geográficamente, es decir, se debe hablar de pared

norte, sur, este u oeste según sea el caso, cuando se den cambios de dirección que impliquen cambios en la nomenclatura de las paredes, dentro de un mismo levantamiento, éstos deben quedar registrados de manera muy clara en el mapa y en el formato dentro de las observaciones generales.

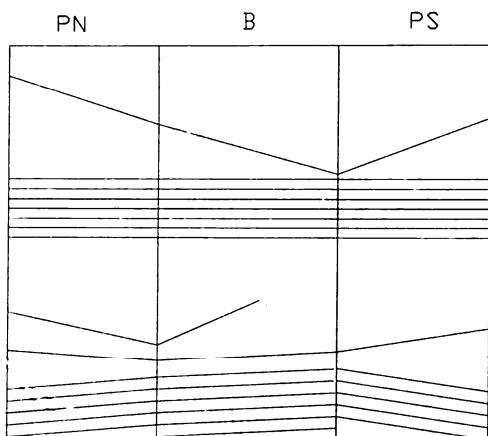


Figura 4. Representación gráfica de los datos-Metodología 2

Con el túnel abscisado, cada dos o cinco metros, se localizan con la lienza los puntos donde las discontinuidades intersecan el hombro y otro punto sobre cada una de las paredes, por ejemplo el piso. El dato así obtenido es el buzamiento aparente de la estructura geológica sobre la pared del túnel, sólo será el real cuando la dirección de la discontinuidad sea perpendicular a la dirección del túnel.

Con la discontinuidad dibujada en las dos paredes al unir dos puntos a la misma altura se obtiene la línea de rumbo, por ejemplo al unir la intersección de la discontinuidad con el hombro en la pared norte y sur. Para calcular la dirección se debe tener establecido en el plano la línea de norte geográfico y se mide el ángulo entre estas dos líneas, o conociendo la dirección del túnel se mide el ángulo entre una de las paredes y la línea de rumbo de la discontinuidad.

Para calcular el buzamiento real se puede usar por ejemplo la fórmula de buzamientos aparentes en cortes de Ragan (1987) así:

$$\tan \mu = \tan \Phi * \operatorname{sen} \beta$$

donde:

$\mu$  = buzamiento aparente en el corte (pared)

$\Phi$  = buzamiento real de la discontinuidad

$\beta$  = ángulo agudo entre la dirección del corte (túnel) y el rumbo del plano.

$$\text{Entonces: } \Phi = \arctan(\tan \mu / \operatorname{sen} \beta)$$

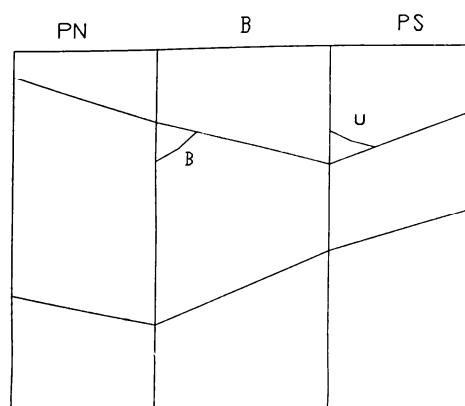


Figura 5. Medición de ángulos para el cálculo del buzamiento real

El primer paso en la fase de toma de datos es la definición de las características geomecánicas relevantes en las discontinuidades que se cuantifican en el registro. Estas son:

**Tipo de discontinuidad (T):** Las discontinuidades más comunes son las fallas (F), diaclasas (D), zonas de cizalla (ZC), esquistosidades (E), bandeadimientos (B), contactos (C), etc. y a todas se les puede dar el mismo tratamiento en la definición de las características más relevantes.

**Situación geográfica:** Es determinar la posición espacial de las discontinuidades con el abscisado, una cota inicial y la pendiente de los túneles. Se representa en el mapa de acuerdo con las distancias horizontales. En el formato se propone tomar la abcisa de la discontinuidad en la pared norte y sur, o según sea el caso, donde ésta intercepta el hombro y el piso respectivamente.

**Actitud:** Queda definida con el rumbo (Rum) y buzamiento (Bza) del plano de discontinuidad. En este método estos dos datos normalmente no se miden en campo sino que se calculan en la oficina.

**Continuidad (C):** Llamada también extensión o persistencia; se refiere a la longitud observada de la discontinuidad tanto en las paredes como en la bóveda del túnel. Las discontinuidades se clasifican según su continuidad en:

- |                      |         |
|----------------------|---------|
| 1. Discontinua       | < 2m    |
| 2. Poco continua     | 2 - 5m  |
| 3. Continuidad Media | 5 - 10m |
| 4. Continua          | > 10m   |

Existe el índice de continuidad de Louis:

$C = \text{Longitud de la discontinuidad} / \text{Longitud si la discontinuidad cruzara todo el túnel}$

$C$  es muy útil porque no depende de las dimensiones de la excavación.

**Espaciamiento (E):** Suele expresarse como densidad de diaclasamiento; básicamente es la distancia que hay entre una y otra diaclasa de la misma familia, medida perpendicularmente a la actitud del plano. Otra forma de medir el espaciamiento es según el módulo de diaclasamiento K.

$$K = n/L$$

donde

n = Número de diaclasas.

L = Longitud de la línea de observación.

K se presenta en diaclasas por metro.

El espaciamiento de las diaclasas se puede clasificar así:

1. Muy juntas	< 5cm
2. Juntas	5 – 30cm
3. Próximas	30 – 100cm
4. Separadas	1 – 3m
5. Muy separadas	> 3m

**Forma (F):** Es la variación en el espacio de la actitud (rumbo y buzamiento) de la discontinuidad. Así, una discontinuidad es plana cuando su actitud no varía o tiene una variación imperceptible. Se pueden definir las siguientes formas:

1. Plana
2. Ondulada o alabeada
3. Muy ondulada
4. Escalonada

**Abertura (A):** La abertura de una diaclasa depende de su origen, de la intensidad de los esfuerzos que la generaron y del grado de relajamiento de la roca. Es un factor de gran importancia geomecánica, pues está relacionado con la permeabilidad secundaria de la roca y por consiguiente del flujo de aguas subterráneas. Además, ayuda a determinar el estado de relajamiento o soltura del macizo. Según la abertura, las discontinuidades se pueden clasificar como:

1. Cerrada	
2. Ligeramente cerrada	< 0.5cm
3. Abierta	0.5 – 2cm
4. Muy abierta	2 – 5cm
5. Extremadamente abierta	> 5cm

En el caso de discontinuidades con relleno se habla de abertura efectiva que es el espacio vacío que en definitiva se puede dar después de considerar las características del relleno (solubilidad, movilidad, etc.).

**Relleno (R):** Las fallas y diaclasas abiertas generalmente presentan rellenos de minerales de disolución, granos sueltos o roca meteorizada. Los diferentes rellenos de las discontinuidades pueden ser:

0. No existe
1. Arcilla

2. Arena
3. Roca triturada
4. Oxidos de hierro
5. Cuarzo
6. Calcita
7. Otros

Otra forma de identificar los tipos de relleno podría ser:

1. Solubles
2. Insolubles
3. No transportables
4. Transportables

Los rellenos cuando son solubles, como el caso de la calcita, son desfavorables geomecánicamente y cuando son transportables o erodibles fácilmente, como el caso de la arena y la roca triturada, son desfavorables geo-hidráulicamente.

**Consistencia del relleno (CR):** Se refiere al modo de presentarse el relleno, de acuerdo con su grado de compactación y puede clasificarse como:

1. Duro
2. Dureza media
3. Blando

**Rugosidad (Rg):** Esta característica es propia de las paredes de las discontinuidades y tiene una influencia determinante en la estabilidad por la fricción que se genera en ambas paredes cuando hay movimiento relativo entre ellas. Las paredes según su rugosidad se clasifican como:

1. Lisa
2. Rugosa
3. Muy rugosa
4. Estrías por fricción

**Agua (Ag):** Se refiere a las condiciones de flujo de agua entre las discontinuidades. Geomecánicamente este factor es de gran importancia por las dificultades que presentan las discontinuidades con altos flujos de agua, en una obra subterránea, para su estabilidad. Estas condiciones se diferencian en:

1. Seca
2. Húmeda al tacto
3. Goteo discontinuo
4. Goteo continuo
5. Filtración
6. Flujo

**Respaldos (Res):** Está relacionada con el estado de la alteración (meteorización) de la roca a ambos lados de la discontinuidad. Geomecánicamente es más ventajoso que los respaldos estén inalterados pensando en

Figura 6. Formato de registro de discontinuidades.

la estabilidad de la obra. Se hace la siguiente distinción:

1. Inalterados
  2. Manchados
  3. Ligeramente meteorizados
  4. Medianamente meteorizados
  5. Totalmente meteorizados

La Figura 6 muestra el formato utilizado para transcribir los datos que se acaban de describir.

En cada casilla se escribe el número que identifica la característica descrita. El formato anterior contiene la descripción de una diaclasa ubicada en la pared norte a 10m en el hombro y 10.5m en el piso y en la pared sur a 11m en el hombro y 11.5m en el piso medidos según el abcisado, longitud observada entre 5 y 10 m, espaciamiento entre 5 y 30 cm, forma plana, apertura entre 0.5 y 2 cm, rellena con óxidos de hierro de consistencia dura, con estrías por fricción en las paredes de la discontinuidad (rugosidad), goteo lento y respaldos medianamente meteorizados.

Este método aunque muy completo en cuanto a información puede presentar una sobresaturación de líneas al llevar los datos recopilados en campo al plano, dependiendo de la escala, debido a que demanda el levantamiento de diaclasa por diaclasa y en rocas como las de la Cordillera Central que han sufrido varios eventos metamórficos regionales y dinamotérmicos que generaron este tipo de estructuras de rompimiento en tramos muy cortos se pueden tener gran cantidad de datos.

## 5 OTROS MÉTODOS

Para la cartografía de túneles se han desarrollado otros métodos como:

El propuesto por el profesor Alejandro Chica (1983) en su artículo "Utilización de Diapositivas Orientadas en la Lectura Geológica de Taludes y Túneles" el cual consiste en la toma de fotografías orientadas de las paredes de túnel con un traslape apropiado para luego proyectarlas sobre un modelo a escala donde se calcarán los rasgos geológicos observados después de hacer las correcciones correspondientes por las distorsiones fotográficas. Esto para mejorar la precisión y el número de rasgos geológicos al hacer levantamientos litológicos y estructurales de estas obras por los métodos de campo tradicionales. Este método también tiene mucha aplicación para la cartografía de grandes obras subterráneas donde la altura de las paredes dificulta el acceso y la observación completa de éstas y además disminuye los riesgos de exposición a la caída de rocas de los techos.

El propuesto en el libro “Tunnels: Planing, design, construction” (*Megaw and Bartlett*, 1982) en el cual la cartografía se realiza en el frente de avance del túnel por lo general cada 3m. Para túneles semicirculares ellos recomiendan dividir la periferia en grados de 0 a 90, donde cero es el piso y 90° coincide con el eje del túnel, y en el piso medir del eje hacia la periferia en metros para la ubicación de los rasgos geológicos, lo que se hará en un plano a la mayor escala posible con sus respectivas convenciones, un formato para

la captura de datos y una libreta para las descripciones complementarias. Este método permite una visualización tridimensional de las estructuras geológicas de una manera rápida al poderse colocar a escala y sobre una maqueta acetatos con la información cartografiada en los frentes cada 3m.

## REFERENCIAS

- Bieniawski, z. T. *Rock mechanics design in minning and tunneling*. 1ra ed, Rotterdam, Netherlands, A. A. Balkema, 1984.272p.
- Cementos El Cairo,S.A. *Procedimientos: Cartografía subterránea*. Departamento de Geología, 1999. Informe interno.
- Chica , A. *Utilización de diapositivas orientadas en la lectura geológica de taludes y túneles*. En: Revista SAI. Vol. 1 No 3. Medellín, 1983
- De La Cruz, H. *Guías para un curso de estructuras subterráneas*. Medellín, Universidad Nacional de Colombia, 1988. 131p.
- INTERNATIONAL SOCIETY FOR ROCKS MECHANICS COMMISSION ON STANDARDIZATION OF LABORATORY AND FIELD TEST. *Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rocks masses*. Great Britain: Pergamon, 1978.
- Knill, J. and Jones, K., *The recording and interpretation of geological condition in the foundations of the Roseires, Kariba and Latiyan dams*. 1965.
- Lopez, J. y Escorce, E., *Investigaciones geológicas y geotécnicas en los túneles de Calima III*. En: IV Jornadas geotécnicas. Bogotá, 1986. p17.
- Megaw, T. and Bartlett, J. V. *Tunnels: Planning, design, construction*. England: Ellis Horwood limited, 1982. Vol 2, 321p.
- Montoya , J. *Análisis de las respuestas geomecánicas de un macizo rocoso ante la redistribución de esfuerzos debido a una apertura múltiple*. Mina de Caliza El Toro Cementos El Cairo S.A. Medellín, 1998. Trabajo Dirigido de Grado, ingeniería geológica, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia.
- Nieto, A. *Some geological factors in the location design and construction of large underground chambers in rocks*. Department of geology, University of Illinois, Urbana - Champaign, 1986.
- Ragan, D., *Geología estructural: Introducción a las técnicas geométricas*. 1ra ed. Barcelona: Omega, 1987. 202p.