

## REVISIÓN DE MODELOS DE FRACTURAMIENTO Y CONTROLES ESTRUCTURALES COMO GUIAS DE EXPLORACIÓN DE FILONES AURÍFEROS EN EL DISTRITO MINERO SEGOVIA REMEDIOS

---

---

*Luís Hernán Sánchez A.<sup>1</sup>, Oswaldo Ordóñez C.<sup>2</sup>, Luís Carlos Castaño G.<sup>3</sup> & Antonio Romero H.<sup>4</sup>*

*1. Ing. Geólogo, profesor Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia-Medellín*

*2. Geólogo, profesor Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia-Medellín*

*3. Ing. Geólogo, Frontino Gold Mines, La Salada, Segovia, Colombia*

*4. Ing. Minas, profesor Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia-Medellín*

*lhsanche@unalmed.edu.co.*

Recibido para evaluación: 24 de Enero de 2007 / Aceptación: 09 de Noviembre de 2007 / Recibida versión final: 18 de Noviembre de 2007

### RESUMEN

El análisis de la fracturación del Distrito Minero Segovia-Remedios (DMSR) encierra tres conjuntos distintos de fracturas, dos de las cuales a saber: “Silencio y Marmajito”, forman un modelo de intersección aguda que sugiere que ellas han sido producidas por las mismas condiciones de esfuerzos. Estas son las más importantes económicamente. De estos dos sistemas, el conjunto “Silencio” es el más desarrollado y como tal, probablemente sirvió para liberar los esfuerzos iniciales, que en forma relativamente contemporánea dieron origen al sistema Marmajito. La tercera fractura la “Serie Vertical”, consiste de una sola cizalladura con dirección noroeste, que forma debido a su posición, un límite suroeste al área de fracturación conocida. Los principales controles como guías de exploración para encontrar zonas enriquecidas, son los empalmes en “L” y las estructuras en eslabón.

**PALABRAS CLAVES:** Teoría de Fracturamiento, Filones Auríferos, Segovia, El Silencio.

### ABSTRACT

Result about breaking analysis on Mining District of Segovia Remedios (MDSR) indicates that there are three different trend and styles of breakage, two of them called El Silencio and Marmajito show an interception model at low angle that suggest that these trend obey to a similar strength condition, which also are the better for economics. El Silencio suite is more evolved and helps to develop the Marmajito suite. The thirist one structure called, Vertical suite, is develops as a single shear NW strike creating a SW limit to the previous suite. The main control for exploration guides, looking for enrichment zones are the L-shape interception and echelon style.

**KEY WORDS:** Breaking Theory, Lodes Gold, Segovia, El Silencio.

## 1. INTRODUCCIÓN

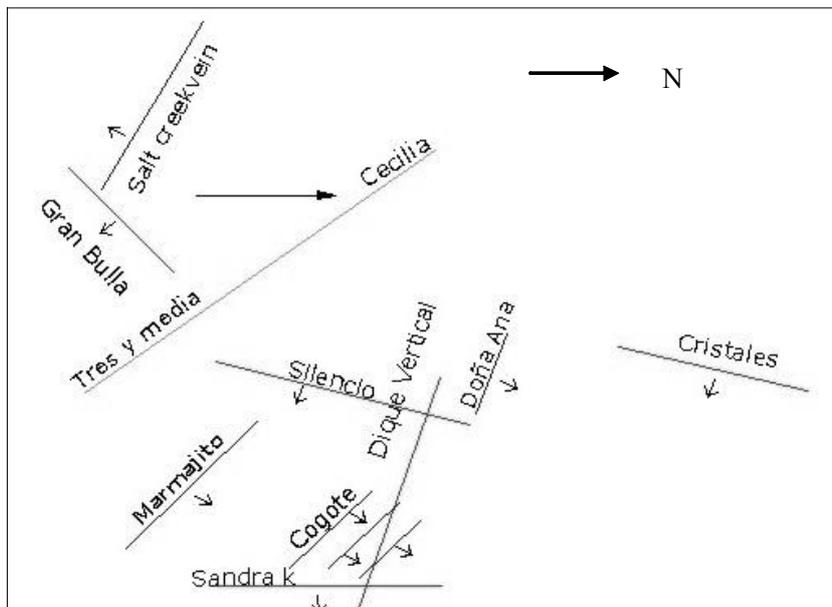
El Distrito Minero Segovia-Remedios (DMSR), está situado a unos 200 km al nordeste de la ciudad de Medellín, en el departamento de Antioquia, Colombia, Suramérica. En el 2002 la Compañía Frontino Gold Mines LTD. (FGM) celebró sus 150 años de estar operando en el área y la mayoría de los habitantes de los municipios de Segovia y Remedios, han estado directa o indirectamente dependiendo de las operaciones de esta empresa. Del gran número de minas prospectadas que han sido trabajadas interrumpidamente durante estos últimos 150 años, la mayoría fueron de naturaleza muy pequeña y están cerradas ahora. Actualmente la FGM tiene abiertas tres (3) minas; El Silencio (la mas tradicional y grande), la cual produce el 20% del mineral, la mina Providencia produce el 80% y la mina Sandra K, la cual es considera un prospecto en desarrollo. Debido a la inaccesibilidad de los trabajos de las operaciones abandonadas en el pasado, las siguientes deducciones e interpretaciones, están derivadas principalmente de observaciones hechas en la Mina Silencio.

## 2. MODELO DE FRACTURAMIENTO DEL ÁREA

Según Russell (1959), el modelo de fisuramiento, resulta de tres sistemas de fracturas mayores, las cuales se describen seguidamente en el orden de su ocurrencia cronológica (Fig. 1). Para determinar la relación entre las fracturas se utilizó su relación geométrica. Aunque inaccesibles, las posiciones y actitudes de las vetas de operaciones antiguas, según se muestra en planos antiguos; se ve que encajan dentro del modelo teórico aplicado a la fracturación del área, de esta manera los problemas estructurales relativos a los conjuntos de fracturas individuales se simplifican.

### 2.1. Serie Silencio o Fracturas de Dique

Algunas de las fisuras desarrolladas a partir de estas fracturas fueron rellenadas con material de dique. Ellas consisten de dos series de fracturas conjugadas: N 10-40° E/30° SE (Silencio, Cristales, Sandra K, Gran Bulla, Etc.) y de la serie vertical N 60-75° W delineada por diques verticales (observables en el extremo norte del silencio). Estas son fracturas de cizalla causadas por compresión a profundidad, están orientadas en planos perpendiculares intersectantes o en planos con un ligero ángulo obtuso, el cual es bisectado por el vector de fuerza máxima. Se considera que estas son fracturas conjugadas. Su relación contemporánea es sugerida por el relleno de material de dique de fisura que no es hallado en las fracturas más jóvenes (Figura 1).



**Figura 1.** Esquema de fisuramiento del DMSR (Según Russell, 1959).

## 2.2. Serie Marmajito o Fracturas Limpias

Esta serie de fracturas se desarrolló dentro de fisuras que no contenían ningún dique como material de veta. Su disposición es N 50-90° W/25-30 NE (Marmajito, Cogote, Doña Ana, etc.). Estas son fracturas mas de cizalla formadas en profundidad, que ocurrieron en la masa de roca que ya no era homogénea debido a la existencia de las fracturas de dique y por consiguiente no se formaron fracturas conjugadas. El esfuerzo remanente fue descargado por el ensanchamiento de las fracturas ya existentes de dique del Silencio orientadas N-S (por esto el mayor ancho de Veta Manto). Las fisuras N-S fueron preferidas para esta descarga sobre las también existentes estructuras verticales E-W, debido a que su disposición se aproximaba más estrictamente a las fracturas teóricas conjugadas que a las fracturas limpias entonces en formación. Una posible imagen de esfuerzo de las fracturas limpias existe en el área de La Gran Bulla. Allí la veta “Salt Creek” tiene una dirección NW y buza 30° hacia el SW. Es concebible que la misma fuerza sea responsable de ambas series de cizalladura, ya que esta fuerza oscilaba en un plano NE vertical a medida que emergía el Batolito de Segovia.

## 2.3. Serie Vertical

Una zona de fracturas verticales N35-40W constituyen este sistema de fracturas. La fuerza responsable de las fracturas limpias se convirtió eventualmente en la fuerza que produjo la tercera y última de las cizalladuras importantes en el área del DMSR: Las fracturas verticales de Cecilia y Tres y Media (Figuras 1 y 2); pero son pequeñas cuando se comparan a las del conjunto Silencio-Marmajito. Esta fuerza estuvo orientada en la misma dirección y plano que la fuerza necesaria para producir las fracturas que llegaron a ser las fisuras limpias. Esta serie se ha comprobado por explotación minera y perforación con taladro de diamante, que se extiende por lo menos 3 km y su probable continuación más allá del límite norte conocido, está reflejada por un largo valle escarpado coincidente con la dirección.

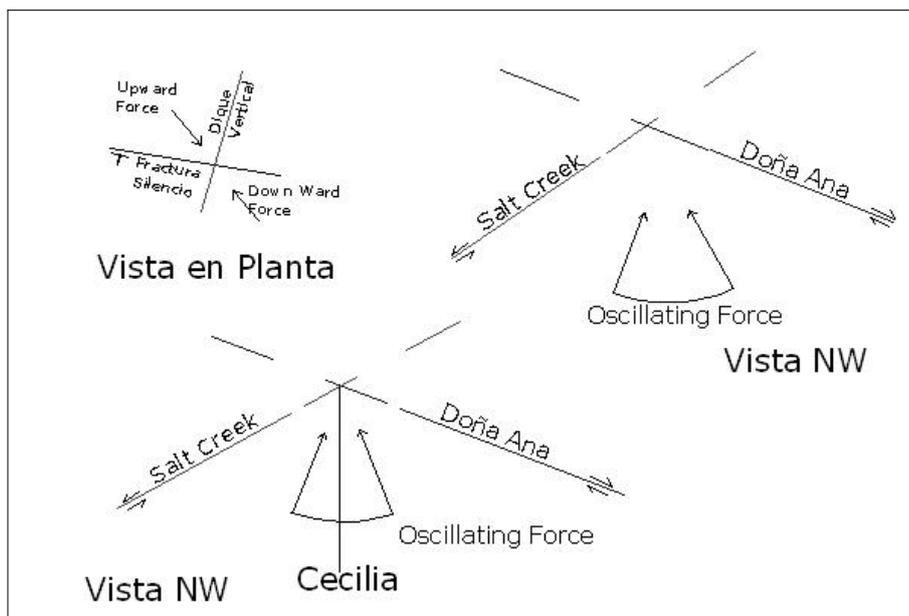
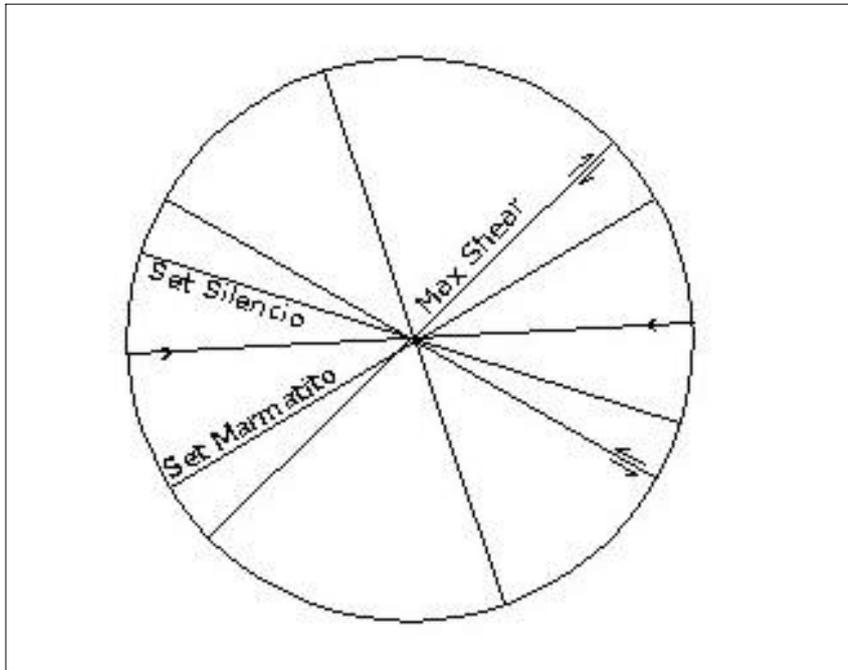


Figura 2. Génesis de fisuramiento propuesto en el DMSR por Russell (1959).

Considerando el modelo de fracturamiento planteado por Tremlett (1955), a medida que las fracturas se desarrollaban, el cuarzo hidrotermal que contenía sulfuros, rellenaba las cavidades generadas dentro del Batolito. Esfuerzos continuos y variados fueron descargados por la apertura de las fisuras que fueron nuevamente rellenas con soluciones. Como todas las fisuras no fueron abiertas o reabiertas al mismo tiempo, las vetas de cuarzo actualmente conocidas en el

DMSR no fueron depositadas al mismo tiempo, sino en etapas determinadas por la tectónica. En teoría, cuando la cizalladura se aplica al promedio de las direcciones, muestra que el ángulo entre los cizallados conjugados es de aproximadamente  $61^\circ$  o  $30^\circ$  entre la dirección del máximo esfuerzo y el cizallado inducido. La bisección del ángulo agudo entre las cizalladuras coloca la dirección del esfuerzo normal máximo (compresión) como N  $11^\circ$  W y la del mínimo esfuerzo, que puede presentar tensión activa como N  $79^\circ$  E (Figura 3).



**Figura 3.** Diagrama de patrones de fracturas del DMSR (Tremlett, 1955)

Las fuerzas que inician el movimiento evidentemente tomaron ventaja de un plano de debilidad preexistente, que se presentó por medio del dique básico angosto de grano fino, reemplazado ahora por el cuarzo de las vetas del Silencio. En el extremo norte de la mina Silencio, el dique se vuelve menos evidente en el canal de la veta y aparentemente termina, pero la fractura rellenada con cuarzo continúa. Esta a su vez se vuelve más angosta, la salvanda o jaboncillo del contacto se vuelve insignificante y es seguida por una dispersión general de la estructura. Esto crea una zona de pequeñas vetas y vetillas de dirección y buzamiento erráticos que rápidamente agotan el filón. El conjunto muestra un crudo esquema de cola de caballo. Estas características probablemente indican la disipación de algunos de los esfuerzos que después de haber tenido un paso relativamente fácil a través de la zona de dique, pasaron dentro de la granodiorita, que fue capaz de transmitir los esfuerzos al siguiente plano de debilidad. Esto también ocurre en el área de la mina San Nicolás a unos 1.5 Km. mas al norte y en el extremo norte conocido del conjunto de fracturas del Silencio.

La ocurrencia de la “Serie Vertical” en diorítica neísica cerca al contacto con las rocas metamórficas, junto con otras de las fracturas más distantes, indica la posibilidad de que éstas están localizadas en el estrechamiento de la zona del borde del batolito y relativamente cerca al límite debajo del cual se considera que se forman pocos yacimientos, mientras que las minas más grandes del área están situadas muy por encima del límite y en la sección central más ancha del batolito. Se cree que la tendencia intersectante de la serie Silencio y Marmajito, ha creado aquí un centro de mineralización para el área alrededor de la cual las numerosas fracturas paralelas distantes de ambos conjuntos, forman una serie de pequeños depósitos marginales.

Según Bonolli (1959) la teoría puede simplificarse en la forma siguiente:

- El primer conjunto de fisuras en el Batolito de Segovia fueron rellenadas por diques y las posteriores por cuarzo y sulfuros pobres o estériles.

- La reactivación del magma asentado a profundidad produjo un modelo definido de “zonas de fractura”. Soluciones de enriquecimiento aurífero siguieron estos canales definidos, produciendo cuerpos mineralizados a lo largo de las vetas pre-existentes.
- La extensión de los cuerpos mineralizados fue determinada por la proyección horizontal de las “zonas de fracturas”.
- El ángulo de desplazamiento variable de los cuerpos mineralizados, en la misma o en diferentes vetas, fue producido por diferentes posibilidades ofrecidas por la intersección en los planos de las “zonas de fracturas” y los planos de las vetas pre-existentes.
- Las soluciones que produjeron enriquecimiento en oro en diferentes vetas, no siguieron caminos accidentales, sino canales específicos generados por el esfuerzo durante un proceso incipiente de fallamiento.

### 3. GUÍAS DE EXPLORACIÓN

Son numerosas las ocurrencias de intersecciones de vetas como localizadores de mineral. Se ha visto que el empalme en forma de “L” es un lugar más hospitalario de zonas ricas. Según Tremlett (1955), La depositación a lo largo de estos empalmes parecería deberse a un incremento de la presión creada en el flujo ascendente de la solución hipogenética. La presión para un canal abierto a una profundidad dada, se dice que es aproximadamente la de la cabeza hidrostática, pero esto no es cierto para una solución hipogenética que pasa a través de un conducto que tiene encogimientos. Bajo estas condiciones la presión sería la de la cabeza hidrostática, más la fuerza de empuje requerida para vencer la fricción. Si lo anterior es aceptado, es posible que la intersección en forma de “L” de las fracturas de Veta Principal y Veta Manto (Mina Silencio), crearon dos zonas de aumento de presión; la primera por debajo del empalme lateral, y la segunda en el lado derecho del empalme del buzamiento hacia arriba. Es posible que la precipitación fue inducida por una reducción de presión en la solución después de pasar a través de las contracciones. Una caída parcial en la temperatura de la solución también ocurriría durante estas primeras etapas de flujo que también induciría la precipitación y continuaría hasta que las rocas encajantes se llegaran a calentar hasta la temperatura de la solución. Un razonamiento similar se puede aplicar al empalme de la Veta Principal Norte. Se muestra preferencia por esta fractura con respecto a la de Veta Manto para la depositación, y se cree que el buzamiento mas uniforme y ligeramente mas inclinado, pudo haber sido un factor influyente.

Es un hecho muy notable que a medida que una guía sale de una zona rica, hay caída inmediata y abrupta en los valores y continúa como tal hasta que se encuentre la parte siguiente de la misma o de la siguiente zona de mineral rico. Áreas completamente estériles son relativamente desconocidas, pero se cree que las vetas tienen un contenido de oro a lo largo de todas ellas, aunque estos estén por debajo del tenor de corte y no puedan ser considerados en un cálculo de reservas. Esta característica es particularmente evidente para la Veta Manto, sobre la cual estuvieron concentradas por muchos años las operaciones de la FGM.

El trazado de ciertas características geológicas, cuando se comparan con los planos de los ensayos, muestran una coincidencia de estructuras de vetas menores con los límites de las zonas ricas de mineral, definidos a partir de los análisis de los valores de oro. Estas coincidencias son esencialmente:

- Cuando la veta se contrae rápidamente, particularmente coincidente con el giro desfavorable para el rumbo y el buzamiento.
- Secciones aproximadas de curvatura abrupta hacia el este (cuando se mira hacia el norte), ya sea acompañadas por adelgazamientos característicos o no.

Un estudio más concienzudo de estas características (Tremlett, 1955), mostró que ellas coinciden en muchos casos con los límites de la zona de mineral rico, y consecuentemente parece tener algún valor de interpretación que podría ser utilizada. Para los trabajos abandonados e inaccesibles donde no es posible el mapeo geológico, se aplica un principio similar notando en los mapas viejos las ocurrencias de giros bien definidos en las guías, mostradas por la mensura y las

inclinaciones de la veta, según lo indicado por las secciones de las muestras. Obviamente estas condiciones no ocurren en cada uno y en todos los casos, pero se considera que ellas se presentan con suficiente frecuencia para posibilitar que las proyecciones de las zonas de enriquecimiento de mineral se hagan con razonable confianza y el desarrollo de éstas, se planee en conformidad. El subsiguiente desarrollo minero de estas áreas, a menudo muestra resultados que en la mayoría de los casos son satisfactorios.

Los controles estructurales indicados de localización de mineral en la mina Silencio, se resumen en los siguientes puntos. Knapp (1982) reporta algunos ejemplos clásicos (Figura 4).

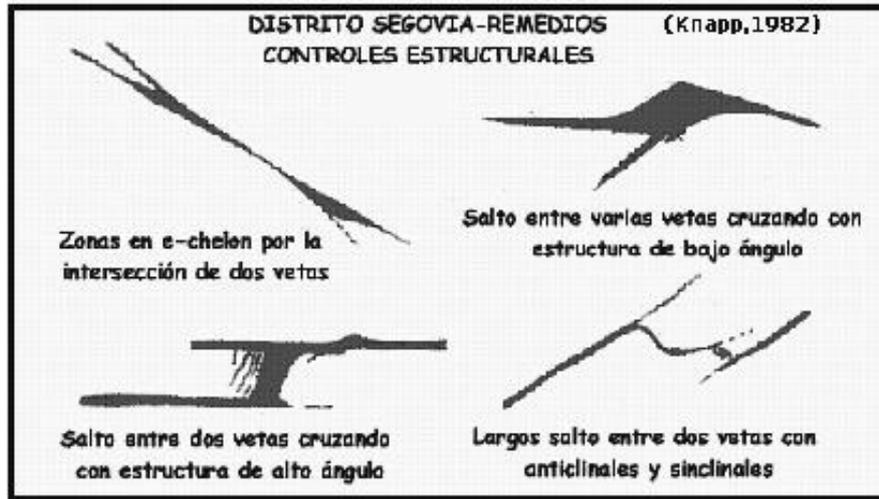


Figura 4. Controles estructurales (Tomado de Knapp, 1982).

### 3.1. Controles mayores – Intersección de vetas

- El empalme en forma de “L” de Veta Manto con Veta Principal, en cual la Veta Manto es el lugar más favorable.
- El empalme de Veta Manto en Veta Principal Norte, donde la Veta Principal Norte es la fractura preferida.
- Las vetas de eslabón entre las secciones en escalón y aquellas que conectan la Veta Manto con las vetas subsidiarias. Estas son de mucho menor significado, pero reflejan la importancia de las intersecciones por muy pequeñas que sean.

### 3.2. Controles menores

- Fallamiento de premineralización localizado en una zona de mineral rico “encerrada”.
- Estrechamiento de la fractura en el rumbo, debido a giros hacia la dirección desfavorable.
- Estrechamiento de la fractura, debido al empinamiento del buzamiento. Este es menos obvio, debido a que el mapeo de las guías es mucho mayor que el mapeo de tambores.

### 3.3. Estructuras escalonadas (ECHELON) y vetas en eslabón

La tendencia general que muestran los filones del DMSR es la de adoptar comportamientos de fracturas sinuosas y relativamente no deformadas. En la mina Silencio, la veta Principal Norte comprueba ser la excepción y adopta un fuerte modelo en escalón que está particularmente bien definido en vista de planta (Figura 5), pero que desaparece a

profundidad a medida que las distancias del salto decrecen. Como estas secciones de vetas no alcanzan el fondo como secciones individuales, el modelo se considera mejor como “pseudo” en escalón. La estructura producida puede visualizarse fácilmente considerando la fractura como una hoja de papel, que ha sido rasgada a intervalos desde el borde superior parcialmente hacia abajo de la página y las rasgaduras pasan a la parte inferior no rasgada. El despliegue en forma de abanico de los intervalos de los escalones siguiendo el buzamiento hacia arriba, crea una condición en el extremo sur de cada sección de escalón, por lo cual se puede comenzar un tambor en la veta únicamente para hacerlo salir de la veta y entrar en la roca encajante. Un rasgo interesante y útil característico de esta estructura, es la conexión de los escalones por medio de fracturas de veta escalonada. Estas tienen un rumbo de aproximadamente N 50° E y un buzamiento de 35°-40° al SE. El extremo de una sección en escalón es indicado usualmente por un rápido adelgazamiento o rozamiento de la veta seguido casi inmediatamente por el escalón de conexión. Esto puede estar representado por una veta de salvanda delgada, únicamente hasta una veta bien definida de cuarzo de varios centímetros. Ocasionalmente algunos de los eslabones son de tenor suficientemente alto para garantizar la extracción y el área cerca del empalme de una sección escalonada y la Veta Principal, a menudo comprueba ser particularmente buena.

Ocurre un segundo conjunto de vetas de eslabón que conecta la Veta Manto y las vetas subsidiarias y estas en vista de planta, forman una estructura en “A” recostada que apunta hacia el sur. Estas tienen un rumbo aproximado de N 40° W y tal como ocurre en los eslabones en escalón, ocasionalmente se pueden localizar pequeños zonas ricas.

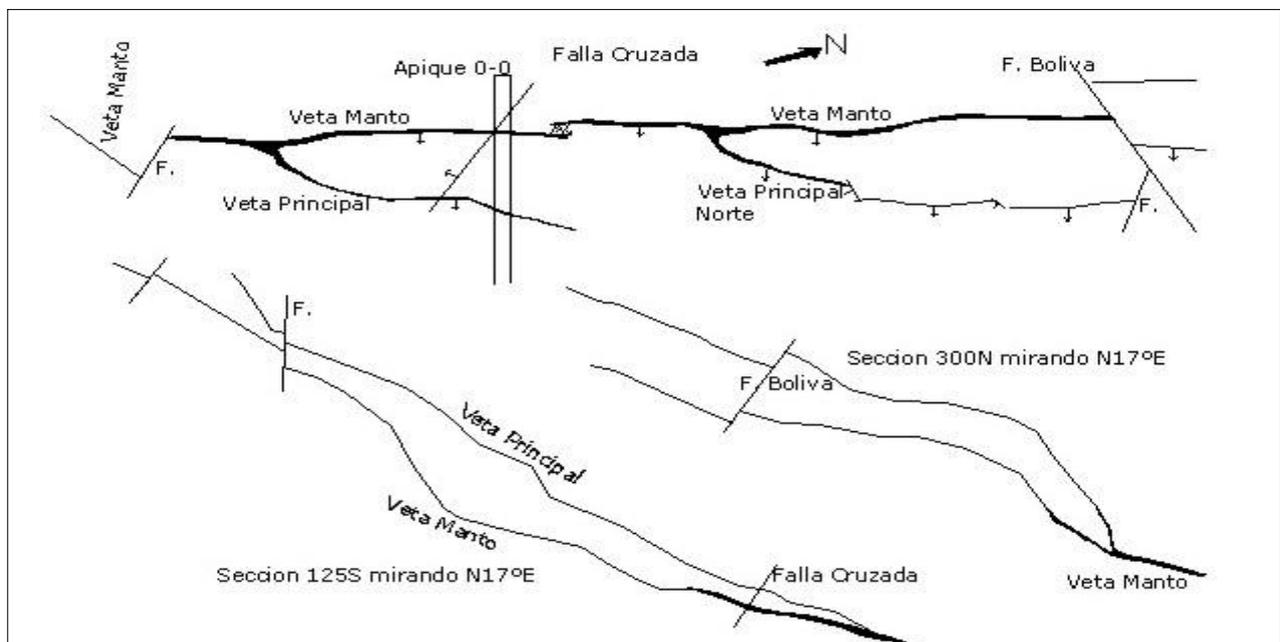


Figura 5. Secciones longitudinales y transversales en la Mina Silencio.

### 3.4. Estructuras de veta sigmoide y movimiento de las paredes

Un entendimiento de la dirección del movimiento de los respaldos y sus probables efectos sobre la fractura de vetas, es de importancia como guía de exploración en los trabajos de desarrollo. Esto es debido a que el sistema de vetas está situado sobre una masa uniforme de roca y en consecuencia no hay ningún horizonte “marcador” convenientemente disponible para estimar el movimiento relativo de las paredes, Tremlett (1955) reporta algunos parámetros que pueden resultar claves, los cuales son el resultado de observaciones hechas durante la cartografía subterránea:

- Superficies de deslizamiento muy bien definidas y profundamente rayadas con rumbo NNW, sobre las superficies de separación de las secciones de estructura de cinta de la veta.

- Desplazamiento de segmentación de pre veta, diques bastante inclinados y oblicuos al canal de la veta.
- Aberturas rellenas de cuarzo localizadas por cambios en la deflexión de la fractura.
- Incipiente desarrollo de clivaje de fractura en el cuarzo de la veta.
- Pequeños filones como cuñas en la masa del dique y granodiorita en el canal de la veta.
- Desarrollo ocasional de clivaje de fractura en las losas de dique no reemplazado entre la veta y el contacto de granodiorita.
- Superficie de deslizamiento sobre laminaciones del dique y la salvanda del contacto.

De éstas, las primeras tres son consideradas de mayor importancia y se puede decir que son suplementadas por el resto. El estudio y la aplicación de éstas, sugiere que el respaldo se ha movido hacia arriba, en una dirección noroeste y los efectos de los componentes horizontales y verticales están reflejados en el canal de la veta tanto en la dirección del rumbo como en la dirección del buzamiento. Las irregularidades de la superficie de la fractura hacen que ciertas partes se froten entre si y otras se rompan por tracción durante el movimiento. Las evidencias de la dirección del movimiento, indicadas en las componentes horizontal-vertical y sus efectos sobre secciones irregulares de la fractura, a menudo se ve que son más pronunciadas.

Por ejemplo, en la mina Silencio, si un observador fuera a mirar a lo largo del rumbo promedio (Aproximadamente N 20° E) y asumiendo una componente horizontal razonable fuerte, se encontraría que el respaldo del lado derecho se ha movida aparentemente hacia delante; lo contrario también es verdadero cuando se mira hacia el sur. Por lo tanto, cualquier giro al este producirá un cierre de la fractura (Figura 6), se puede decir entonces, que los giros de la fractura hacia el oeste son favorables a la abertura y se puede esperar que la veta se ensanche y los giros hacia el este desfavorables y se puede esperar que la veta se angoste.

Los efectos de la componente vertical sobre el buzamiento son similares en el sentido de que el achatamiento tiende a crear aberturas con el consecuente ensanchamiento de la veta y al empinarse una veta, produce angostamiento. El achatamiento es considerado como favorable y el empinamiento como desfavorable. Los filones del DMSR pueden mostrar una estructura sigmoide cerrada la cual aumenta la mineralización al ensancharse la veta, recíprocamente la estructura sigmoide abierta, limita la mineralización adelgazando el filón y aún terminándolo a lo largo del buzamiento o del rumbo.

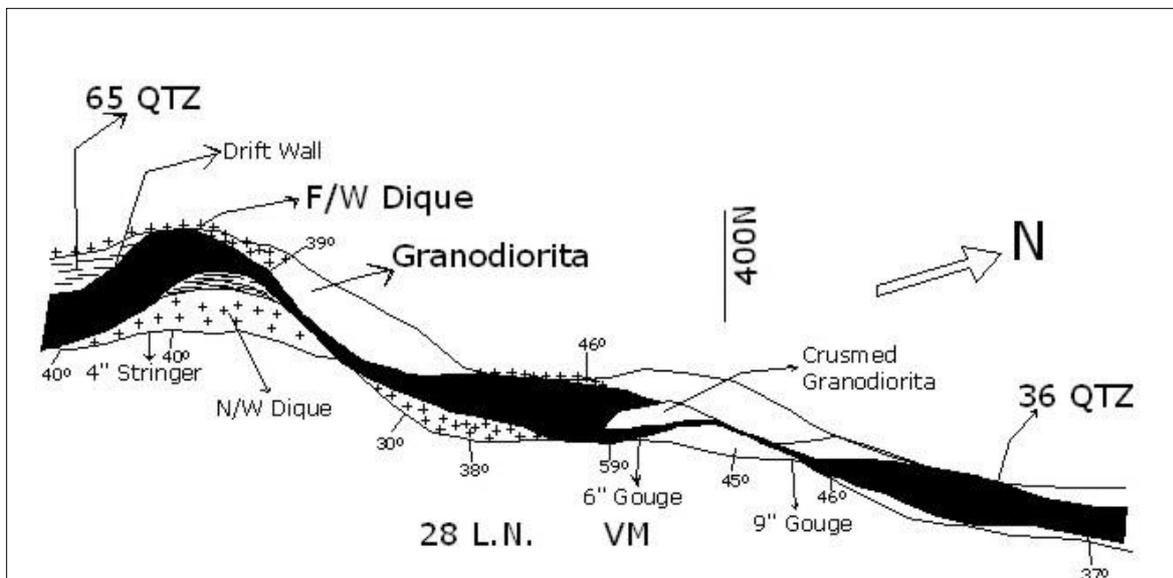
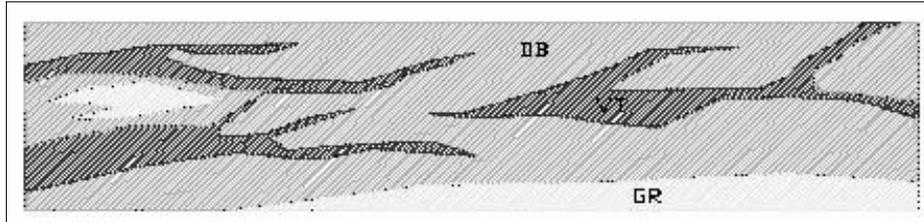


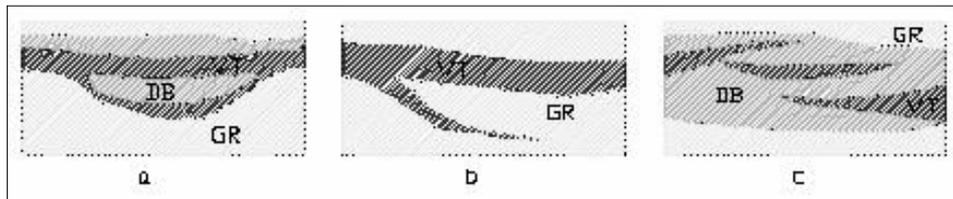
Figura 6. Controles Estructurales Distrito Minero Segovia (DMSR)

En la mina Providencia, el plano que actualmente define la Veta Manga, fue sometido a grandes esfuerzos, generándose un alto fracturamiento y nuevos planos de debilidad, dando origen a múltiples combinaciones entre la roca, resultando en algunos casos tan complejas, que se pueden denominar como del tipo stockwork, que en ocasiones dilatan los avances de exploración, principalmente de las guías (Figura 7).

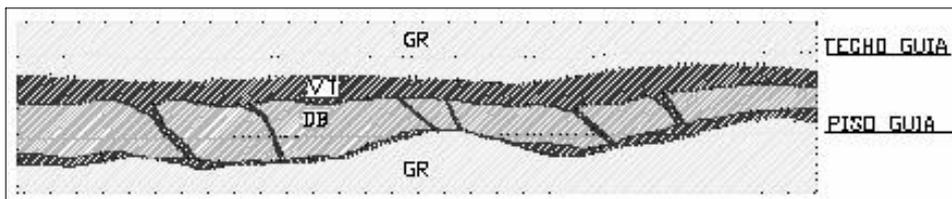


**Figura 7.** Stockworks comunes en la mina Providencia. DB = Dique Básico, GR = Granodiorita

Las estructuras sigmoidales abiertas han sido denominadas en esta mina como despegues, donde la mayoría de estos regresan a la estructura principal en cortos tramos, conformando como lentes (Figura 8a, sigmoide abierta) que se adelgazan paulatinamente al alejarse (Figura 8b). Igualmente es muy común el pinchamiento total de la veta, la cual se define nuevamente al piso o al techo comenzando por veta delgada (Figura 8c). También es característica la presencia de estos despegues como cintas comunicadoras entre estructuras cymoidales abiertas definidas a escala mayor (Figura 9).



**Figura 8.** Características más comunes de los despegues. DB = Dique Básico, GR=Granodiorita



**Figura 9.** Cintas intercomunicando una estructura sigmoide abierta. DB = Dique Básico, GR=Granodiorita

#### 4. CONCLUSIONES

De acuerdo con las observaciones descritas sobre los controles estructurales en la mina Silencio, se puede concluir que:

- El modelo de fisuramiento, resulta de tres sistemas de fracturas mayores: Fracturas de dique, fracturas limpias y serie vertical, resultando de mayor importancia económica las fracturas de dique.
- Las soluciones que produjeron enriquecimiento en oro, no siguieron caminos accidentales, sino canales específicos producidos por el esfuerzo durante un proceso incipiente de fallamiento.
- Los principales controles como guías de exploración para encontrar zonas enriquecidas, son los empalmes en “L” y las estructuras en eslabón.

## AGRADECIMIENTOS

Esta es una contribución al proyecto Paragénesis mineral del Distrito Minero Segovia-Remedios, financiado por la DIME, la Secretaría de Productividad y Competitividad de la Gobernación de Antioquia. Igualmente, es parte del proyecto Metalogenia y Evolución Tectono-Magmática del sector nororiental de la Cordillera Central y la parte sur de la Serranía de San Lucas en los departamentos de Antioquia y Bolívar, financiado por DINAIN. La Frontino Gold Mines puso a su disposición ayuda logística, información privada y acompañamiento de campo con personal técnico.

## BIBLIOGRAFÍA

- Bonolli, F., 1959. Fracture zones theory of gold enrichment in the Frontino Gold Mine Area. Informe interno Frontino Gold mines, Segovia, 2 P.
- Knapp R., 1982. Planeamiento y Control de Tenores para cortes mina Silencio : Reporte Técnico Frontino Gold Mines, Segovia, 3 P.
- Oliver, N.H.S., 2001. Linking of regional and local systems hydrothermal in the mid-crust by shear and faulting. Tectonophysics, Vol. 335, pp. 147-161.
- Rusell, 1959. Secuence of Fissures-Frontino Area. Informe interno Frontino Gold mines, Segovia, 2 P.
- Tremlett, 1955. The Fracture Pattern and Structural controls of ore localization at Frantino Gold Mines. Informe interno Frontino Gold mines, Segovia, 15 P.