

Bogotá, Octubre 21 a 23, 1998

## Los Derrumbes Ocurridos Durante 1997 en Túneles del Acueducto de Chingaza

Por Alberto Lobo-Guerrero Uscátegui, Geólogo, M.Sc.  
Lobo-Guerrero Geología Ltda.

Cll. 127A No. 53A-28, of. 309, Bogotá, Colombia, algu@logemin.com

### RESUMEN:

Durante el año de 1997 ocurrieron dos derrumbes en los túneles del Acueducto de Chingaza: K 11 + 892 a K11 + 915 del tramo Chuza-Ventana y K25 + 101 a K25 +177 del tramo Pozo 4-Simaya.

En el K11 + 900 hay una alternancia de areniscas cuarzosas, calizas lumaquéticas y lutitas negras, finamente laminadas, en el flanco NE de un sinclinal apretado, buzando 65° aguas abajo, de la Fm. Une, a 700 m de profundidad bajo la divisoria de aguas Guatiquía - Guayuriba. Las rocas son acuíferos con un nivel potenciométrico alto. La caverna del derrumbe mayor tenía 19 m de largo por 30 m de altura, con un volumen de 4,000 m<sup>3</sup> de rezaga. Se proponen como causas probables el debilitamiento lento por meteorización física y reacciones químicas en las lutitas, flujo de agua subterránea hacia el túnel que va erosionando el relleno de las discontinuidades, y empujes que van agrietando el revestimiento, combinados con el súbito cambio de presión hidráulica al cerrar la válvula Howell-Bunger.

En el K 25 + 118.5 hay una zona de falla de 4.50 m de espesor con material intensamente fracturado y entre el K 25 + 158 y el K 25 + 177 lutitas silíceas, grises oscuras, finamente laminadas, y lutitas arcillosas, blandas, con abundantes superficies de fricción. Estas rocas hacen parte del Conjunto Areniscas de Los Quemados, de la Formación Chipaque, a 370 m de profundidad, en un monoclinal N45°E, buzante 75°W, aledaño a una falla de rumbo sinistral N70°W, de 7,700 m de longitud, buzante 65°W. Las dos cavernas produjeron 6,300 m<sup>3</sup> de rezaga. Se proponen como causas probables la circulación de agua subterránea hacia el túnel lavando los rellenos de la zona de falla y las discontinuidades, la meteorización física de las lutitas y el agrietamiento del concreto neumático, con la alta recarga por precipitación en el segundo semestre de 1996 como posible detonante.

Los derrumbes ocurrieron en tramos de rocas donde el túnel tenía como revestimiento solamente concreto neumático y ocasionales pernos o malla. Aún hay tramos del Acueducto de Chingaza semejantes a éstos donde no hay un revestimiento definitivo adecuado. El túnel a presión Chuza - Ventana no tiene un revestimiento impermeable adecuado, el cual le permita soportar las presiones dinámicas del golpe de ariete cuando opera la válvula en Ventana. Un conducto vital como es un túnel de acueducto debe ser construido de tal forma que soporte las presiones naturales del terreno y de su operación, sin necesidad de reparaciones mayores a lo largo de su vida útil. La decisión de no colocar revestimiento definitivo a lo largo de todos los túneles y hacerles mantenimiento ocasional ha sido un error. Es necesario colocar revestimiento con concreto convencional a todo el largo de los túneles a la mayor brevedad.

**Palabras-clave:** Acueducto Chingaza, agua subterránea, Andes, arcillolita, Bogotá, Clasificación Geomecánica de Bieniawski, Colombia, Cordillera Oriental, Cretácico, derrumbe, erosión subterránea, esfuerzos, estratigrafía, estudio de caso, falla, formación Une, formación Chipaque, geología, geología estructural, geología forense, geología para ingeniería, geotecnia, hidrogeología, lodolita negra, meteorización física, presión hidrostática, revestimiento, rocas sedimentarias, subsuelo, túnel, túnel Chuza-Ventana, túnel Pozo 4-Simaya.

**ABSTRACT:**

## **Rockfalls That Occurred During 1997 in Tunnels of the Chingaza Aqueduct**

Two major rockfalls occurred during 1997 in the tunnels of the Chingaza Aqueduct: K 11 + 892 to K11 + 915 of the Chuza-Ventana tract, and K25 + 101 to K25 + 177 of the Pozo 4-Simaya tract.

There is an alternation of Une Formation quartzose sandstones, lumachellic limestones and finely laminated black shales along K11 + 900, in the NE flank of a tight syncline, that dips 65°, that lies 700 m below surface beneath the Guatiquía-Guayuriba water divide. These rocks are aquifers with a high potentiometric level. The cavern of the main rockfall measured 19 meters long by 30 m high, with a volume of 4,000 m<sup>3</sup> of fallen rock. Proposed probable causes are slow weakening of the rock mass by physical weathering and chemical reactions in the shales, groundwater flow towards the tunnel that eroded the filling of discontinuities, and pressure that fractured the tunnel lining, combined with sudden hydraulic pressure change when the Howell-Bunger valve was closed.

There is a 4.50 m-wide fault zone on K 25 + 118.5, with intensely fractured material, and finely-laminated, dark gray siliceous mudstones and soft shales with abundant friction surfaces between K 25 + 158 and K 25 + 177. These rocks are part of the Los Quemados Sandstone Member, of the Chipaque Formation, that lie 370 m below surface, along a N45°E-trending monocline that dips 75°W, along a 7,700 m-long N70°W sinistral strike-slip fault that dips 65°W. The two caverns produced 6,300 m<sup>3</sup> of fallen rock. Proposed probable causes are groundwater flow towards the tunnel that washed gauge along the fault zone and discontinuities, physical weathering of the mudstones, and cracking of shotcrete, with the possible detonator being the high groundwater recharge due to precipitation during the second semester of 1996.

The rockfalls took place in stretches of rock where the tunnel was only lined by shotcrete and occasional bolts or mesh. Several tracts of the Chingaza Aqueduct still remain with similar protection, where no definitive adequate lining has been placed. The pressure tunnel Chuza-Ventana does not have a proper impermeable lining that allows it to withstand the dynamic pressure shock produced when the valve operates at the Ventana site. A vital conduit such as an aqueduct tunnel must be built in such a way to withstand natural pressure of the rock massif and operation of the aqueduct, without requiring any mayor repairs during its life. The decision of not placing a definitive lining along all the tunnels of the aqueduct system and carrying out occasional maintenance has been a mistake. As soon as possible, it is necessary to place conventional concrete lining along all tunnels of the aqueduct.

**Key-words:** Andes, Bienawski Geomechanical Classification, black shale, Bogota, case study, Chingaza Aqueduct, Chipaque Formation, Chuza-Ventana tunnel, Colombia, Cretaceous, Eastern Cordillera, engineering geology, fault, forensic geology, geology, geotechnics, ground water, hydrogeology, hydrostatic pressure, lining, mudstone, physical weathering, Pozo 4-Simaya tunnel, rockfall, sedimentary rocks, strain, stratigraphy, structural geology, subsurface, tunnel, underground erosion, Une Formation.

## INDICE

### Resumen

### Abstract

### 1. Introducción

### 2. Túnel Chuza-Ventana

#### 2.1. Geología Regional

Formación Cáqueza

Formación Fόμεque

Formación Une

Formación Chipaque

Formación Guadalupe

Formación Guaduas

Depósitos Fluvioglaciares

#### 2.2. Geología Local

#### 2.3. Geotecnia

#### 2.4. Los Derrumbes

#### 2.5. Causas Probables

#### 2.6. Comentarios

### 3. Túnel Pozo 4 – Simaya

#### 3.1. Geología Regional

Formación Chipaque

Lodolitas de La Marmaja

Calizas de La Esperanza

Areniscas de Los Quemados

Formación Guadalupe

Miembro Arenisca Dura

Miembro Plaeners

#### 3.2. Geología Local

#### 3.3. Geotecnia

#### 3.4. Los Derrumbes

#### 3.5. Causas Probables

#### 3.6. Comentarios

### 4. Conclusiones

### 5. Agradecimientos

### 6. Referencias

## 1. INTRODUCCIÓN

Durante el año de 1997 ocurrieron dos derrumbes en el Acueducto de Chingaza, de la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB): el primero, detectado el 24 de enero, afectó el tramo del Túnel Pozo 4-Simaya, entre las abscisas K 25 + 101 y K 25 + 177. Las reparaciones del mismo duraron tres meses. El segundo derrumbe ocurrió el 28 de abril, cuando el acueducto estaba siendo puesto nuevamente en operación, afectando el tramo del Túnel Chuza-Ventana, entre las abscisas K 11 + 892 y K 11 + 915. Las reparaciones del segundo duraron seis meses.

El autor formó parte de una comisión de la Sociedad Colombiana de Ingenieros y de Sociedad Colombiana de Geotecnia la cual llevó a cabo una veeduría técnica de las obras que la EAAB ejecutó para la reparación del acueducto. A continuación se examinan las principales características geológicas y geotécnicas de los derrumbes, se plantean las causas que los originaron, y se dan unas conclusiones, como una contribución al mejoramiento del Acueducto de Chingaza, el cual es de vital importancia para la capital de la república.

## 2. TÚNEL CHUZA-VENTANA

El Túnel entre el Embalse de Chuza y la Ventana del Río Blanco tiene una longitud de 18,370 m de longitud, orientación N 53°31'27" W, pendiente de 0.17%, y sección en herradura o circular de 3.20 m a 2.66 m. Conduce un flujo de 30 m<sup>3</sup>/s a presión con una cabeza hidráulica de 90 m. En la Ventana del Río Blanco hay una válvula Howell-Bunger para control del flujo. El túnel fue construido entre 1972 y 1974 por la firma KONSTRUCTOR y luego entre 1976 y 1983 por la firma ICA, con el diseño y la interventoría de INGETEC S.A. Luego de reparaciones duran-

te 1984 y 1985 el sistema fue puesto en operación en diciembre de 1985.

El Túnel Chuza-Ventana comienza en la hoya alta del Río Chuza, un afluente del Río Guatiquía, en la vertiente oriental de la Cordillera Oriental, y llega hasta la hoya alta del Río Blanco, un afluente del Río Guayuriba. A lo largo de la línea del túnel la topografía asciende desde 2,900 msnm en Chuza hasta 3,650 m en la divisoria de aguas entre el Guatiquía y el Guayuriba, en la abscisa K 11 + 500, pasando por las quebradas Girondas (K 1 + 500), Babilonia y Los Chorros (K 3), Las Ciervas (K 4 + 800), El Bolsillo (K 7 + 100) y Carare (K 9 + 200). En la abscisa K 5 + 500 se llega al Cerro El Diamante (cota 3,400 m). A partir de K 11 + 500 la topografía desciende suavemente hasta la cota 3,260 m en la quebrada de Calostro (K 13 + 300), sube levemente hasta la cota 3,450 m en la abscisa K 15 + 000 y luego baja bruscamente hasta el sitio de la Ventana del Río Blanco, a la cota 2,900 m en la abscisa K 18 + 370.

### 2.1. Geología Regional

Como se aprecia en el Mapa Geológico de la Figura 1 el túnel atraviesa de oriente a occidente las Formaciones Cáqueza, Fόμεque, Une, Chipaque, Guadalupe y Guaduas (INGETEC, 1976; 1984), subiendo en la columna estratigráfica entre el Hauteriviano (Cretáceo Inferior) y el Paleoceno (Terciario Inferior):

La **Formación Cáqueza** (Hauteriviano) está compuesta por lutitas negras, como material predominante, con ocasionales capas de arenisca y caliza, y un espesor total de 1,000 m.

La **Formación Fόμεque** (Barremiano-Aptiano) está compuesta por lutitas grises oscuras, calcáreas, con intercalaciones delgadas de calizas y areniscas, y un espesor total de 2,000 m.

La **Formación Une** (Albiano-Cenomaniano) consta de areniscas cuarzosas blancas con muy delgadas intercalaciones de lutitas negras, ocasionales delgadas capas y mantos de carbón, y bancos gruesos de caliza en la parte superior, con un espesor total de 3,400 m.

La **Formación Chipaque** (Turoniano-Santoniano) está compuesta por lutitas grises oscuras con intercalaciones de areniscas y calizas, y un espesor total de 1,400 m. Comprende lo que anteriormente se denominaba Guadalupe Inferior.

La **Formación Guadalupe** (Campaniano-Maastrichtiano) consta de areniscas en bancos gruesos, lutitas, limolitas y liditas, con un espesor total de 1,150 m.

La **Formación Guaduas** (Maastrichtiano-Paleoceno) está compuesta por arcillolitas rojas, grises y verdes, limolitas grises oscuras, areniscas, y cintas y lentes de carbón, con un espesor total de 400 m.

Localmente hay **Depósitos Fluvioglaciares** del Pleistoceno (Cuaternario) con cantos, bloques y gravas de arenisca y caliza en matriz arcillosa.

Las rocas sedimentarias están suavemente plegadas en una sucesión de anticlinales y sinclinales, con rumbo general NE-SW, aproximadamente perpendiculares al alineamiento del túnel. Las formaciones se van hundiendo progresivamente de oriente a occidente, hasta llegar a una importante falla normal en la abscisa K 18 + 050, el límite oriental de la Fosa del Río Blanco, donde aparece la Formación Guaduas, con buzamiento moderado hacia el occidente (INGETEC, 1976).

En general se considera que las Formaciones Cáqueza, Fómeque, Chipaque y Guaduas son de baja permeabilidad y se clasifican como acucierres. Las Formaciones Une y Guadalupe tienen permeabilidad secundaria, por fracturación, y se clasifican como acuíferos (Lobo-Guerrero y Gómez, 1983).

## 2.2. Geología Local

El sitio donde ocurrió el derrumbe se encuentra a 700 m de profundidad y a 500 m al occidente de la divisoria de aguas. Está en el Conjunto Superior de la **Formación Une** (Kiu) (Figuras 2 y 3). La litología del tramo K 11 + 890 a K 11 + 920 está descrita como "**arenisca** gris oscura, grano fino a medio, ligeramente calcárea, micácea, fresca, dura, estratificación media a gruesa; intercalaciones de **limolita** negra, silícea, fresca, dura, estratificación media, y **lutita** negra, silícea, fresca. La estratificación buza 65°SW (aguas abajo), perpendicular al eje del túnel, las diaclasas buzando 60° a 40°NE (aguas arriba),

perpendiculares al eje, están separadas 0.50 a 1.00 m, continuas, cerradas, inalteradas, con paredes rugosas." Condición de fracturación de la roca RQD: 70-80%; infiltraciones: seco a ligeramente húmedo (INGETEC, Ref. 367-2242A).

De acuerdo con el corte geológico el sitio del derrumbe corresponde al flanco NE de un sinclinal apretado, 100 m al oriente del eje (Figura 3).

La Formación Une aflora extensamente en el Páramo de Chingaza en las cabeceras del Río Chuza, donde hay en promedio una precipitación anual de 2,012.87 mm (Estación Chuza-Monterredondo, registros 1967 a 1997, EAAB). 1996 fue un año húmedo, con una precipitación de 2,399.60 mm, y en el mes de Abril de 1997 se tuvo una precipitación de 243.00 mm, bastante más alta que el promedio de 219.72 mm. Es de suponer que el nivel potenciométrico del agua subterránea en el acuífero de la Formación Une haya estado en una cota alta como se ilustra en la Figura 3. El flujo en el túnel era de 350 lps, aun después de cerradas las compuertas del Embalse de Chuza.

## 2.3. Geotecnia

Con base en la descripción de la roca que se registró en el punto 2.2 y un ensayo de resistencia a la compresión confinada a una lutita micácea carbonosa de la Formación Une (EAAB, 1985), se hace el intento de clasificar el material en la Clasificación Geomecánica de Bieniawski (1989): Resistencia a la Compresión Uniaxial 11.5 MPa, inmerso en agua (2 puntos); RQD 70 a 80% (15 puntos); Espaciamiento de Discontinuidades: 500 a 1000 mm (13 puntos); Condición de las Discontinuidades: continuas, cerradas, inalteradas, rugosas (24 puntos); Agua Subterránea: seco a ligeramente húmedo (12 puntos). Puntaje Total: 66. Ajuste por la orientación de las discontinuidades: Rumbo perpendicular al eje, avance hacia el SE, diaclasas buzando muy favorablemente y planos de estratificación buzando moderadamente (-5 puntos). Puntaje total: 66 = Roca Buena. Los materiales se pueden caracterizar como rocas moderadamente diaclasadas de mediana resistencia intercaladas con rocas débiles y muy débiles.

El estado de esfuerzos en el sitio del derrumbe puede estimarse, por ejemplo con las fórmulas de Haimson (1978):

$$\tilde{\sigma}_h = 4 + 0.0215 H ; \tilde{\sigma}_v = 0.0226 H .$$

Como  $H = 700$  m,

$$\tilde{\sigma}_h = 19.05 \text{ Mpa} \quad \tilde{\sigma}_v = 15.82 \text{ Mpa}$$

De acuerdo con los estudios de Mojica (1985) los

esfuerzos horizontales en este sector de la Cordillera Oriental son de compresión y orientados NW-SE.

El revestimiento definitivo del túnel en este sitio era de entre 4.0 y 16.0 cm de concreto neumático en la clave, 13.0 a 20.0 cm de concreto neumático en el hastial izquierdo y entre 13.0 y 19.0 cm de concreto neumático en el hastial derecho. Se instalaron anillos de 9 pernos de 2 m de longitud, diámetro 1", separados 1.50 m y una solera plana de concreto simple de 20 cm de espesor.

#### 2.4. Los Derrumbes

Se encontraron tres derrumbes: uno pequeño en la abscisa K 11 + 915, uno grande entre las abscisas K 11 + 892 y K 11 + 919, y otro pequeño en la abscisa K 11 + 818.

El primer derrumbe tenía 2 m de largo, 2 de ancho y 2 de altura sobre la clave. Estaba centrado sobre una lutita silíceas de 0.15 de espesor con estratificación 280°/60°; encima se halla una limolita fresca, dura, laminada, con vetas de calcita; debajo se encuentra una arenisca algo calcárea, gris, fresca, dura, en estratos de 0.30 a 0.50 m. Los planos de diaclasa 70°/20°, perpendiculares a la estratificación, son ondulados, limpios y rugosos. El derrumbe está limitado por los planos de estratificación y las diaclasas. El contacto entre la limolita y la lutita está alterado a una arcilla blanda, con superficies de fricción, donde se observaba goteo rápido (Valencia, julio 23, 1997).

El segundo derrumbe tenía 19 m de largo, 7 m de ancho recargado hacia la pared hidráulica derecha, y una altura variable estimada en 30 m. Estaba centrado en una caliza gris oscura, de 3 m de espesor, fosilífera, fresca, dura, en parte laminada, con estratos de 0.30 a 0.80 m; encima hay lutitas silíceas, en parte arcillosas, calcáreas, en capas de 0.10 a 0.30 m, blandas, con goteo rápido; debajo se encuentran areniscas grises a grises oscuras, cuarzosas, calcáreas y no calcáreas, de grano fino, muy duras, poco fracturadas. Delimitan la caverna planos de estratificación con orientación 280° a 290°/60°, con estrías de fricción; y tres juegos de diaclasas: 160°/80°, rugosos, espaciado 0.80 m, poco continuos; 195°/80°, espaciados 0.80 m, discontinuos, y 40°/40°, ondulados, rugosos. La rezaga estaba compuesta en un 40% por bloques de caliza y arenisca calcárea entre 2 m y 0.6 m de diámetro; un 50% por bloques y trozos de caliza y arenisca entre 0.60 m y 0.05 m; y un 10% de fragmentos menores de 0.05 m de lutita silíceas, limollita calcárea, y limos arcillosos (Valencia, julio 23/97 y septiembre 5/97).

Aguas arriba, a lo largo de 18 m, entre K 11 + 874 y K 11 + 892, la clave y las paredes presentaban

numerosas grietas con descascaramiento y desprendimiento del concreto, dejando la malla al descubierto. Las grietas abiertas hasta 1 cm presentaban estalagmitas en forma de ramillete colgante, de hasta 10 cm de longitud, con arena fina color café (Valencia, septiembre 5/97).

En el K 11 + 818 se observó un desprendimiento del concreto neumático de 3.00 m de longitud y 1.50 m de ancho, con una altura de 0.60 m. Afloraban lutitas silíceas, algo arcillosas, poco fracturadas, en capas de 0.10 m a 0.30 m, orientadas 290°/45°, con diaclasas 250°/90°, lisas, planas, oxidadas, espaciadas 0.60 m. La roca era seca (Valencia, septiembre 5/97).

#### 2.5. Causas Probables

A raíz de los derrumbes que ocurrieron en este mismo túnel durante el primer llenado entre agosto de 1983 y enero de 1984 y en abril de 1997, las firmas consultoras, interventoras, constructoras y varios expertos extranjeros y colombianos, entre otros, J.B. Cooke, E. Broch, J. Golser, A.H. Merrit, G. Fernández, A. Brezzi, R.P. Benson y A.J. González, fueron consultados sobre las causas de los mismos. A continuación se resumen las causas probables (EAAB, 1985; SCI-EAAB, 1998).

Durante la construcción hubo movimientos en terrenos de empuje en muchos sectores, señalados por las medidas de convergencia, como respuesta normal de rocas de baja resistencia (lutitas) a los altos esfuerzos de la sobrecarga. Se colocó el revestimiento de concreto neumático y pernos y en algunos tramos concreto convencional. La mayoría de los tramos con terrenos de empuje continuaba mostrando movimientos hasta el momento en que se colocó el revestimiento a mediados de 1982.

Los derrumbes de 1993-1994 ocurrieron en rocas lutíticas, principalmente en la Formación Fómeque. Se hicieron análisis petrográficos y mineralógicos en varias de las formaciones, los cuales indicaron que las rocas caídas estaban compuestas principalmente por lutitas micáceas, carbonáceas y calcáreas, con un alto porcentaje de pirita. Los análisis de laboratorio también indicaron que muchas de las muestras de lutitas eran expansivas.

El revestimiento de concreto neumático no es impermeable y al llenarse el túnel se saturaron de agua las discontinuidades de las rocas en las vecindades del mismo. Al expandirse las lutitas en presencia de agua estas agrietaron el concreto neumático. Bajo la carga del embalse aumentó la presión del agua en las discontinuidades de las rocas impermeables. La pirita diseminada en contacto con la calcita y en presencia de agua reacciona formando ácido sulfúrico y yeso con un fuerte aumento de

volumen. Los esfuerzos de expansión del yeso y de las lutitas rompieron la clave del túnel y los derrumbes se propagaron hacia arriba dentro de los estratos lutíticos.

Se observó que los tramos revestidos en concreto convencional no habían sufrido daños. Se rellenaron las cavernas y se revistió con concreto convencional un total adicional de 1,766 m entre las absicas K2 + 186 y K4 + 360.

En diciembre de 1985 se presurizó de nuevo el túnel y este operó en forma normal durante doce años, hasta enero de 1997, cuando ocurrió el derrumbe del K 25 + 107 a K 25 + 177. Para reparar este tramo hubo que cerrar la válvula Howell-Bunger durante tres meses. Se abrió durante 49 1/2 horas, luego de las cuales hubo que cerrarla de nuevo a raíz de los derrumbes ya anotados. Las compuertas del embalse de Chuza se cerraron el 1o de mayo y el vaciado del túnel se llevó a cabo gradualmente entre el 1o y el 9 de mayo.

El Túnel Chuza-Ventana tuvo un aumento en las presiones estáticas del agua en la masa rocosa bajo la carga total (90 m) del embalse durante los tres meses de las reparaciones en el de Ventana-Simaya. Además sufrió las presiones dinámicas del golpe de ariete durante el cierre y la apertura de la válvula.

En el sector derrumbado, la Formación Une que es un acuífero regional, tiene el nivel potenciométrico muy por encima del nivel del túnel, y probablemente por encima de la cota máxima del embalse. Por esta razón, hay un flujo de agua subterránea hacia el túnel desde el macizo rocoso. Dicho flujo ocurre a través de los planos de estratificación y de las diaclasas.

Es concebible que a lo largo de los doce años de operación del túnel los canales de flujo en el sector del derrumbe, donde hay calizas, areniscas calcáreas y venas de calcita, hayan sido ensanchados por el paso del agua subterránea, de carácter ácido por la presencia de la pirita. La existencia de estalagmitas y manchas blancas en las paredes de los derrumbes demuestran el flujo y la erosión kárstica incipiente.

Por otra parte, también puede darse la expansión de las lutitas en el contacto lutita-arenisca o lutita-caliza y el fenómeno de la expansión del yeso por la reacción pirita-calcita-agua, en el tramo considerado, donde alternan las calizas, con lutitas, limolitas y areniscas, en capas delgadas.

Los planos de estratificación entre las diversas litologías están estriados por el replegamiento regional, como se observó en las cavernas. Por la circula-

ción del agua subterránea a lo largo de dichos planos se facilita la meteorización física y el ablandamiento de los estratos lutíticos y su posterior erosión con la remoción de las partículas finas. Los bloques de arenisca y caliza, limitados por diaclasas, quedan así libres para deslizarse o derrumbarse.

En este sector del túnel el macizo tiene altos esfuerzos verticales y horizontales, los cuales siguen actuando sobre el revestimiento.

Si a todo lo anterior se agregan las súbitas cargas hidráulicas dinámicas generadas por los movimientos en la válvula Howell-Bunger, resultan explicables los colapsos. La rocas inmediatamente encima de la clave se van debilitando lentamente por la meteorización física y las reacciones químicas en las lutitas, hay flujo de agua hacia el túnel el cual va erosionando el relleno de las discontinuidades, los empujes van agrietando el revestimiento de concreto neumático y finalmente las presiones dinámicas del golpe de ariete hacen de detonante, con lo cual se derrumban las masas inestabilizadas.

## 2.6. Comentarios

La inmensa mayoría de los túneles a presión que se construyen en el mundo tiene un revestimiento definitivo impermeable. Durante la operación del túnel debe asegurarse la estabilidad de las paredes del túnel y de la masa rocosa y evitarse la fuga de agua por las siguientes razones: la roca no debe erosionarse por la acción del agua a presión circulando por el conducto; esto también es válido para el relleno de diaclasas o de zonas de falla. Adicionalmente, la presión del agua en el túnel no debe exceder el esfuerzo mínimo en el perímetro del túnel y de la masa rocosa cerca del mismo. De lo contrario las diaclasas preexistentes que están cerradas antes de recibir la presión del agua se abrirán, reduciendo severamente la estabilidad de la obra. Por último, como el objeto de la obra es conducir el agua de un lugar específico a otro, no debe haber pérdidas de la misma a lo largo del trayecto.

Cuando es necesario vaciar un túnel que está a presión, las altas presiones del flujo del agua de diaclasas no deben desestabilizar el conducto: la presión del agua en las grietas pequeñas, los rellenos de baja permeabilidad en las discontinuidades (limo, arcilla, milonita); y las presiones de poros en las rocas casi impermeables tales como limolitas y arcillolitas. Al desaguar un túnel estas presiones no se pueden disipar rápidamente y generan esfuerzos efectivos con lo cual pueden desestabilizar las paredes y la clave. La velocidad del vaciado puede graduarse con relativa facilidad, pero los cambios de presión ocasionados por los golpes de ariete ocurren rápidamente y son muy difíciles de controlar.

Los derrumbes ocurridos en el Túnel Chuza-Ventana

desde su construcción demuestran que únicamente los sectores revestidos adecuadamente con concreto convencional han resistido la operación del sistema. El concreto neumático y los pernos han servido como revestimiento provisional, pero no como el revestimiento permanente de un túnel a presión. De todo lo anterior se deduce que fue un error el no haberlo revestido adecuadamente desde un comienzo.

### 3. TÚNEL POZO 4 - SIMAYA

El Túnel entre el Pozo 4 en la Quebrada de La Horqueta y el Portal de Simaya tiene una longitud de 6,087 m, orientación S 83°31'40" W, pendiente 0.421%, y sección en herradura de 3.70 m. Conduce un caudal de 30 m<sup>3</sup>/s a flujo libre.

Entre Ventana y el Pozo 4 el Acueducto de Chingaza capta las aguas de la hoya alta del Río Blanco por medio de los Pozos 1, 2, 3 y 4, en las Quebradas de Palacio, Buitrago, el Río Blanco y La Horqueta. A lo largo de la línea del túnel la topografía asciende abruptamente desde 2,925 en la Quebrada La Horqueta (K 22 + 450) hasta la divisoria de aguas entre el Río Guayuriba (Río Blanco) y el Río Bogotá (Río Siecha) en la cumbre de la Cordillera Oriental a 3,525 m (K 23 + 930). Luego la topografía va descendiendo suavemente por el flanco oriental de la Loma de Mataderos, pasando por dos arroyos tributarios del Río Siecha (K 24 + 940 y 25 + 050), por las cabeceras de la Quebrada Llano Grande (K 26 + 560) y la Cuchilla Careperro a la cota 3,130 m (K 26 + 850), para llegar a la Quebrada Simaya, afluente del Río Teusacá, a la cota 2,880 m en la abscisa K 28 + 528.

#### 3.1. Geología Regional

El túnel atraviesa las Formaciones Chipaque, Guadalupe, Guaduas, Cacho, Bogotá y Regadera (Cretáceo Superior a Terciario Inferior). En superficie hay algunas áreas con depósitos Glaciares o Fluvioglaciares (Cuaternario) (INGETEC, 1976 y 1985). La Figura 4 es un mapa geológico a escala 1:25,000 del sector, preparado con base en fotogeología y una reducida cuantificación de campo. Para el caso del derrumbe es conveniente describir la Formación Chipaque y los Miembros Arenisca Dura y Plaeners de la Formación Guadalupe.

La **Formación Chipaque** (Turoniano-Santoniano, Kc), fue estudiada por Buitrago y Gómez (1989) entre el Cerro de Los Quemados y el Río Blanco, unos 2 km al sur del túnel. Allí fue subdividida en tres conjuntos informales, denominados de base a techo: Lodolitas de La Marmaja, Calizas de La Esperanza y Areniscas de Los Quemados.

Las **Lodolitas de La Marmaja** constan de lodolitas laminadas de color gris oscuro con ocasionales intercalaciones de areniscas y delgadas capas de caliza hacia el tope. Su localidad tipo es la Quebrada La Marmaja al oriente de la Fábrica de Cemento La Esperanza, tienen un espesor de 104 m y suprayacen areniscas cuarzosas limpias de la Formación Une.

Las **Calizas de La Esperanza** son calizas macizas del tipo bioruditas (fósiles, espanta, micrita y lodo no calcáreo) interestratificadas con lodolitas negras laminadas. Su localidad tipo es la Mina de Caliza de La Esperanza, con un espesor de 364.5 m.

Las **Areniscas de Los Quemados** están constituidas por una alternancia rítmica de areniscas bioturbadas y lodolitas grises. Las areniscas son cuarzosas, de grano fino a medio y colores blanco, amarillo y gris claro hasta gris oscuro. Se presentan en capas menores de 4 m de espesor y ocasionalmente son lenticulares. Se encuentran interestratificadas con lodolitas arcillosas de color gris claro, gris oscuro y negro, con estratificación ondulada paralela, en capas de 5 a 10 m de espesor. Tienen un espesor de 239.5 m en la localidad tipo al occidente de la Mina de La Esperanza. El conjunto "Areniscas de Los Quemados" yace bajo el Miembro Arenisca Dura de la Formación Guadalupe. En la antigua nomenclatura estratigráfica oficial esta unidad se denominaba Guadalupe Inferior. A partir del trabajo de Renzoni (1962), el Guadalupe Inferior se incluyó dentro de la Formación Chipaque. Los informes y figuras de INGETEC (1976 y 1985) conservaron el nombre de Guadalupe Inferior.

La **Formación Guadalupe** (Campaniano-Maastrichtiano Kg) está compuesta por cuatro miembros: la Arenisca Dura en la base, los Plaeners, la Arenisca de Labor y la Arenisca Tierna, en el techo.

El **Miembro Arenisca Dura** está compuesto por bancos medianos hasta gruesos de areniscas ortocuarcíticas de color blanco-amarillento hasta gris-negro, de grano muy fino hasta medio, granos subredondeados con esfericidad media a alta, bien calibradas, con estratificación desde muy delgada hasta muy gruesa. Las areniscas en general son duras, compactas, cementadas por sílice u ópalo; ocasionalmente son friables, deleznales, y pobremente cementadas por arcillas o micas. Tiene esporádicas intercalaciones de limolitas silíceas grises claras en capas de 3 a 10 cm y arcillolitas negras hasta grises claras, finamente laminadas en bancos hasta de 5 "m de espesor. Aunque el contraste geomorfológico entre la Formación Chipaque y la Formación Guadalupe en el borde de la Sabana de Bogotá es neto, por la mayor resistencia a la erosión de la segunda, el contacto litológico en el campo y en el subsuelo es difícil de identificar, ya que hay

arcillolitas negras en ambas unidades. Normalmente se coloca la base del miembro en el primer banco muy grueso de arenisca. El espesor de la Arenisca Dura en la parte oriental de la Sabana es de 460 m (Caro, García y otros, 1988).

El **Miembro Plaeners** está compuesto por arcillolitas laminadas, de dureza baja y resistencia débil, en capas delgadas, limolitas silíceas laminadas o liditas, en capas de 2 a 10 cm, compactas, con fractura concóidea, en estratos entre 5 y 20 m; y por areniscas ortocuarcíticas de grano fino a muy fino, granos subredondeados con esfericidad media a alta, bien calibradas, compactas, con estratificación gruesa a muy gruesa. Las rocas son de colores blanco, gris claro, gris verdoso, gris oscuro y negro. El espesor total oscila entre 85 y 200 m (Pérez y Salazar, 1978; Caro, García y otros, 1988).

La Quebrada La Horqueta y el Río Blanco siguen el trazo de la Falla Río Blanco, una falla inversa con rumbo general N-S. Entre el Río Blanco y la Quebrada Simaya las rocas sedimentarias del Cretáceo y del Terciario Inferior forman un monoclinial con rumbo general N 45°E buzante al NW. Dicho monoclinial está cortado por varias fallas de rumbo, orientadas N 70° W, separadas entre 1 y 0.5 km. La Quebrada Simaya sigue el eje del Sinclinal de Simaya, una estructura de rumbo N 45° E cuyo flanco oriental está invertido. Al occidente del Sinclinal de Simaya aparece la Falla Pericos, una importante falla inversa con rumbo N 45° E, buzamiento de 45°NW, y un salto estratigráfico de 3,600 m. Las fallas de rumbo enlazan la Falla Pericos con la Falla Río Blanco (Figura 4). Estas fallas son de la Orogenia Andina (Plioceno) y actualmente son inactivas.

Los mapas y cortes geológicos de INGETEC (1976 y 1985) no presentan ninguna falla geológica en este sector del Túnel Palacio-Rioblanco. Interpretan un anticlinal paralelo al Río Blanco y un monoclinial hacia el occidente, con inversiones en las Formaciones Guaduas, Cacho, Bogotá y Regadera.

El Túnel Pozo 4 - Simaya con una orientación S 83°31'40" W atraviesa diagonalmente las siguientes estructuras: la Falla Río Blanco, una primera falla de rumbo, una falla normal, una segunda falla de rumbo, la discordancia Guaduas-Guadalupe, una tercera falla de rumbo, la discordancia Cacho-Guaduas y la discordancia Regadera-Bogotá. Los estratos tienen un rumbo general N 45° E en las Formaciones Chipaque, Guadalupe y Guaduas, con buzamiento monoclinial suave a moderado hacia el NW en superficie, tendiendo a buzamientos fuertes hasta invertidas al nivel del túnel. En las Formaciones Cacho, Bogotá y Regadera el buzamiento es invertido hacia el SE en superficie y tiende a verticalizarse al nivel del túnel (Figura 5).

### 3.2. Geología Local

Entre las abscisas K 24 + 970 y K 25 + 200 el túnel atraviesa los siguientes materiales (INGETEC, 1979):

- hasta la abscisa K 24 + 987: **areniscas** en bancos gruesos, buzamiento 70°NW, goteo rápido y chorros hasta 2 lps.

- K 24 + 987 a K 25 + 114.0: **lutita**, gris oscura, silícea, fresca, dura, estratificación delgada, fracturada en pequeños rombos; intercalaciones de **arenisca** gris, oscura, fresca, dura, estratificación delgada, fracturada. Posición: N 45°E/60°W; N 50°E/80°W; N 45°E/70°W. Diaclasas: horizontales; N80°E/70°N; S10°E/90°; N17°W/45°E continua, con relleno de lutita fracturada, paredes lisas; N48°W/90°; N02°E/45°E; N03°W/44°E. RQD: K 25 + 050 a 082.6: 70-75%; K 25 + 082.6 a 114.0: 70%. Infiltraciones: chorros de 1/8 lps y goteos rápidos; goteo lento. Desprendimientos de roca : K 28 + 082.6 a 114.0: 15 m<sup>3</sup> en 5 días.

- K 25 + 114.0 a K 25 + 118.5: **Zona de Esfuerzo** fracturamiento intenso. RQD: 20-70%. Infiltraciones: goteo lento esporádico.

-K25+ 118.5aK25 + 187.5: **lutita**, gris oscura, silícea, fresca, dura, estratificación delgada; estratos separados por **lutita** gris oscura, blanda, estratificación laminada, con abundantes superficies de fricción; intercalaciones de **areniscas** grises, en delgados bancos, ocasionalmente fracturados. Posición: N50°/75°W. Diaclasas: N80°E/90°; horizontales. RQD: K 25 + 118.5 a 121.6: 30%; K 25 + 121.6 a 150.0: 60-70%. Infiltraciones: K 25 + 118.5 a 155.3: goteo lento esporádico; K 25 + 155.3 a 166.2: chorros pequeños; K 25 + 166.2 a 187.5: chorros de 1/6 lps en la clave. Desprendimientos de roca. K 25 + 169 a 170: 5 m<sup>3</sup> en un día.

K 25 + 187.5 a K 25 + 207: **areniscas** en bancos gruesos; buzamiento 75°W; RQD: 90%; chorros de 10 lps. (Figura 6).

Según INGETEC, estas rocas son parte de la Formación Guadalupe Superior, Nivel de Plaeners. De acuerdo con el Mapa Geológico de la Figura 4, el Corte Geológico de la Figura 5 y las descripciones litológicas transcritas anteriormente, estas rocas hacen parte de la **Formación Chipaque**, probablemente del conjunto de **Areniscas de Los Quemados**.

Por otra parte, el tramo de 4.50 m entre K 25 + 114.0 y K 25 + 118.5, en mi opinión es una **falla**, la cual buza unos 70°W. Se correlaciona bien con la segunda falla de rumbo mencionada en el capítulo 3.1. Dicha falla se extiende entre la Falla Río Blanco y la Falla Pericos, por Los Caques, El Triunfo y la Quebrada La Gubia, por una distancia de 7,700 m, con un rumbo N 70°W y un buzamiento de 65°W. Es

una falla de rumbo sinistral, con un componente normal hacia el suroeste. La zona de falla tiene 4.50 m de espesor, con un material intensamente fracturado cuyo RQD se estimó entre un 20% y un 70%. El bloque SW (encima) tiene estratos lutíticos laminados, blandos, con abundantes superficies de fricción, un RQD del 30% cerca de la falla y un RQD entre 60% y 70% a mayor distancia. Tuvo un desprendimiento de 5 m<sup>3</sup> en una ocasión. Debajo de la falla también hay lutitas, fracturadas en pequeños rombos, con un RQD del 70% en un tramo de 30 m, donde hubo desprendimientos de 3 m<sup>3</sup>/d durante 5 días.

Tanto el Conjunto de Areniscas de Los Quemados como la Formación Guadalupe son acuíferos regionales con permeabilidad secundaria por fracturación (Avendaño y Palomino, 1990). Ya se mencionó en el capítulo 2.2 que el año de 1996 fue un año húmedo. Durante el segundo semestre de este año la precipitación fue bastante mayor que la media histórica, por lo cual se deduce que hubo una alta recarga. La posición aproximada del nivel potenciométrico regional se ilustra en el Corte Geológico de la Figura 5.

### 3.3. Geotecnia

El tramo entre K 25 + 092 y K 25 + 114 puede clasificarse como Roca Pobre en la Clasificación Geomecánica de Bieniawski (1989); el tramo K 25 + 114 a K 25 + 121.6 como Roca Muy Pobre; y el tramo K 25 + 121.6 a K 25 + 187.5 como Roca Pobre.

El estado de esfuerzos en el sitio del derrumbe puede estimarse, por ejemplo con las fórmulas de Haimson (1976):

$$\bar{\sigma}_h = 4 + 0.0215 H; \quad \bar{\sigma}_v = 0.0226 H$$

Como  $H = 370$  m,

$$\bar{\sigma}_h = 11.96 \text{ MPa} \quad \bar{\sigma}_v = 8.36 \text{ MPa}$$

De acuerdo con los estudios de Mojica (1985) los esfuerzos horizontales en este sector de la Cordillera Oriental son de compresión y orientados NW-SE.

Bajo la falla el túnel estaba revestido con 15 cm de espesor de concreto neumático. En las lutitas laminadas blandas con abundantes superficies de fricción, además de 15 cm de espesor de concreto neumático se colocaron pernos, en dos tramos: K 25 + 133.6 a 138.6 (5m): 16 pernos radiales SN, 4 por anillo en la zona horaria 10 a 1, cada 1.50 m, y K 25 + 155.0 a 182.0 (27 m): 140 pernos radiales tipo SN, 5 a 8 por anillo en la zona horaria 8 a 4, cada 1.50 m.

### 3.4. Los Derrumbes

Se encontraron dos derrumbes grandes: uno entre las abscisas K 25 + 101 y K 25 + 133, y el segundo entre las abscisas K 25 + 158 y K 25 + 177. Fuera de estos había dos cavernas bajas, entre K 25 + 133 y K 25 + 145, y entre K 25 + 152 y K 25 + 158 (SCI - EMB, 1998).

El primer derrumbe grande estaba centrado sobre la falla entre K 25 + 114.0 y 120.0, con una altura de unos 20 m (Figura 6). Los materiales fracturados cayeron al túnel y desestabilizaron los dos bloques a lado y lado, con lo cual la caverna se extendió en las lutitas aguas arriba con baja altura hasta K 25 + 101 y aguas abajo, también con baja altura hasta K 25 + 133.

El segundo derrumbe grande se ubicó sobre las lutitas blandas con abundantes superficies de fricción, con una altura estimada en 15 m, abarcando el tramo donde hubo desprendimientos de roca durante la construcción.

El espesor nominal del revestimiento según los planos de construcción era de 15 cm, pero en algunos tramos de la bóveda el espesor real que se observó era tan sólo entre 2 y 5 cm.

El volumen total de caídos se estimó en 6,300 m<sup>3</sup>.

### 3.5. Causas Probables

El tramo de 76 m donde ocurrieron los derrumbes es un sector de rocas muy pobres y pobres en las vecindades de una falla regional. Hay circulación de agua subterránea a través de las diaclasas y planos de estratificación en los acuíferos del macizo y esta agua penetra al túnel a través de pequeñas o grandes fisuras en el concreto neumático y a través de los huecos de alivio. Lentamente fue lavando los rellenos de la zona de falla y de las discontinuidades. Simultáneamente avanzaba la meteorización física de las lutitas arcillosas y éstas se expandían en presencia del agua. Aumentaron los esfuerzos sobre el concreto neumático en la clave, se agrietó el concreto, y con el deterioro progresivo de la estabilidad de los materiales éstos finalmente cedieron. Un posible detonante de los derrumbes pudo ser la alta recarga de los acuíferos durante el segundo semestre de 1996.

### 3.6. Comentarios

La geología básica del sector del túnel analizado estuvo mal interpretada. Las rocas entre el K 24 + 870 y el K 25 + 187.5 no hacen parte del Nivel de Plaeners de la Formación Guadalupe, sino hacen parte de lo que INGEOMINAS denominaba Guadalupe Inferior en 1969 y que hoy se incluye dentro de la Formación Chipaque. El tramo de roca intensamente

fracturada de 4.50 m de espesor entre el K25 + 114.0 y 118.5 que se denominó "zona de esfuerzo" es una falla geológica, detectable en superficie e identificable en el subsuelo al excavar el túnel, y como tal ha debido clasificarse desde un comienzo, si se hubiera hecho una buena investigación geológica.

El tipo de materiales de la zona de falla se clasifica como **roca muy pobre** en la clasificación geomecánica de Bieniawski y las rocas lutíticas aledañas como **rocas pobres**. Hubo un error de diseño al escoger el revestimiento de este sector, solamente con concreto neumático y con pernos en dos tramos de 5 m y 27 m. La zona de 76 m donde ocurrió el derrumbe ha debido revestirse desde un comienzo con arcos metálicos, malla, pernos y concreto, tal como hubo que hacerlo ahora.

#### 4. CONCLUSIONES

Los derrumbes en el Túnel Chuza - Ventana ocurrieron en tramos de rocas moderadamente diaclasadas con mediana resistencia intercaladas con rocas débiles y muy débiles, bajo una alta sobrecarga, y altas cabezas hidráulicas, sometidas a altos esfuerzos tectónicos horizontales, donde se tenía como revestimiento solamente concreto neumático y ocasionales pernos y malla.

Este túnel a presión no tiene un revestimiento impermeable adecuado, el cual le permita soportar las presiones dinámicas del golpe de ariete cuando opera la válvula en Ventana.

Los derrumbes en el Túnel Pozo 4 - Simaya ocurrieron en una zona de falla y en rocas lutíticas muy pobres, donde el revestimiento era solamente de concreto neumático y algunos tramos con pernos.

Hay muchos tramos del Acueducto de Chingaza que aún no tienen revestimiento definitivo adecuado. En éstos, en cualquier momento, pueden ocurrir derrumbes y nuevas interrupciones en el suministro de agua de la principal fuente de abastecimiento para la ciudad capital.

Un conducto vital como es un túnel de acueducto debe ser construido de tal forma que soporte las presiones naturales del terreno y de su operación, sin necesidad de reparaciones mayores a lo largo de su vida útil.

La decisión de no colocar revestimientos definitivos a lo largo de todos los túneles y hacerles mantenimiento ocasional ha sido un error.

Es necesario colocar un revestimiento con concreto convencional a todo lo largo de los túneles a la

mayor brevedad.

#### 5. AGRADECIMIENTOS

El autor expresa su agradecimiento a la Sociedad Colombiana de Ingenieros, a la Sociedad Colombiana de Geotecnia, y a la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá, por la oportunidad de participar en la veeduría de las reparaciones al Acueducto de Chingaza durante 1997, y por haber tenido acceso a la documentación que sirvió de base para este artículo.

#### 6. REFERENCIAS

Avendaño, Z.M. y Palomino, E.E. (1990): Cartografía Geológica Aplicada a la Hidrogeología de la Plancha 228-III-B; Trabajo de Grado No. 274, Departamento de Geociencias, Universidad Nacional de Colombia, Santafé de Bogotá. Inédito.

Bieniawski, Z.T. (1989): Engineering Rock Mass Classifications. 251 p. John Wiley & Sons, New York.

Buitrago, C.A. y Gómez, J.J. (1989): Análisis Estratigráfico de las Calizas de la Mina La Esperanza en La Calera, Cundinamarca; Trabajo de Grado No. 240, Departamento de Geociencias, Universidad Nacional de Colombia, Santafé de Bogotá. Inédito.

Caro, P., García, J.R. y otros (1988): Zonificación Geotécnica en el Distrito Especial de Bogotá.- INGEOMINAS. Informe preparado para el Departamento Administrativo de Planeación Distrital. Inédito.

EAAB (1985): Reparación y Mantenimiento Túnel Palacio - Rioblanco, Sector Chuza - Ventana. 2 volúmenes. Inédito.

Haimson, B.C. (1978): Near-surface and deep hydrofracturing stress measurements in the Waterloo Quartzite; Proc. 19 th US Symp. Rk. Mcs., U. of Nevada, p 345-361, Reno.

INGEOMINAS (1969): Mapa Geológico del Cuadrángulo K-11, Zipaquirá. Escala 1: 100,000. Bogotá D.E.

INGETEC (1976): Túnel Palacio - Rioblanco, Geología General, Planta y Perfil; Inf. Técnico No. 10, Dibujo 3; Ref. 36.1-2373; Proyecto Chingaza; EAAB.

INGETEC (1979): Túnel Palacio - Rioblanco, Registro Geotécnico; Ref. 36.7-2072A y Ref. 36.7-2242A; Proyecto Chingaza; EAAB.

INGETEC (1984): Túnel Palacio - Rioblanco, Perfil Geológico y Revestimiento Permanente; Ref. 36.7-21 OSA, Dibujo 1; Proyecto Chingaza; EAAB.

INGETEC (1985): Túnel Palacio - Rioblanco, Sector Ventana - Simaya, Geología y Revestimiento, Escala 1: 1,000; Manual de Mantenimiento, Figura 6; Proyecto Chingaza; EAAB.

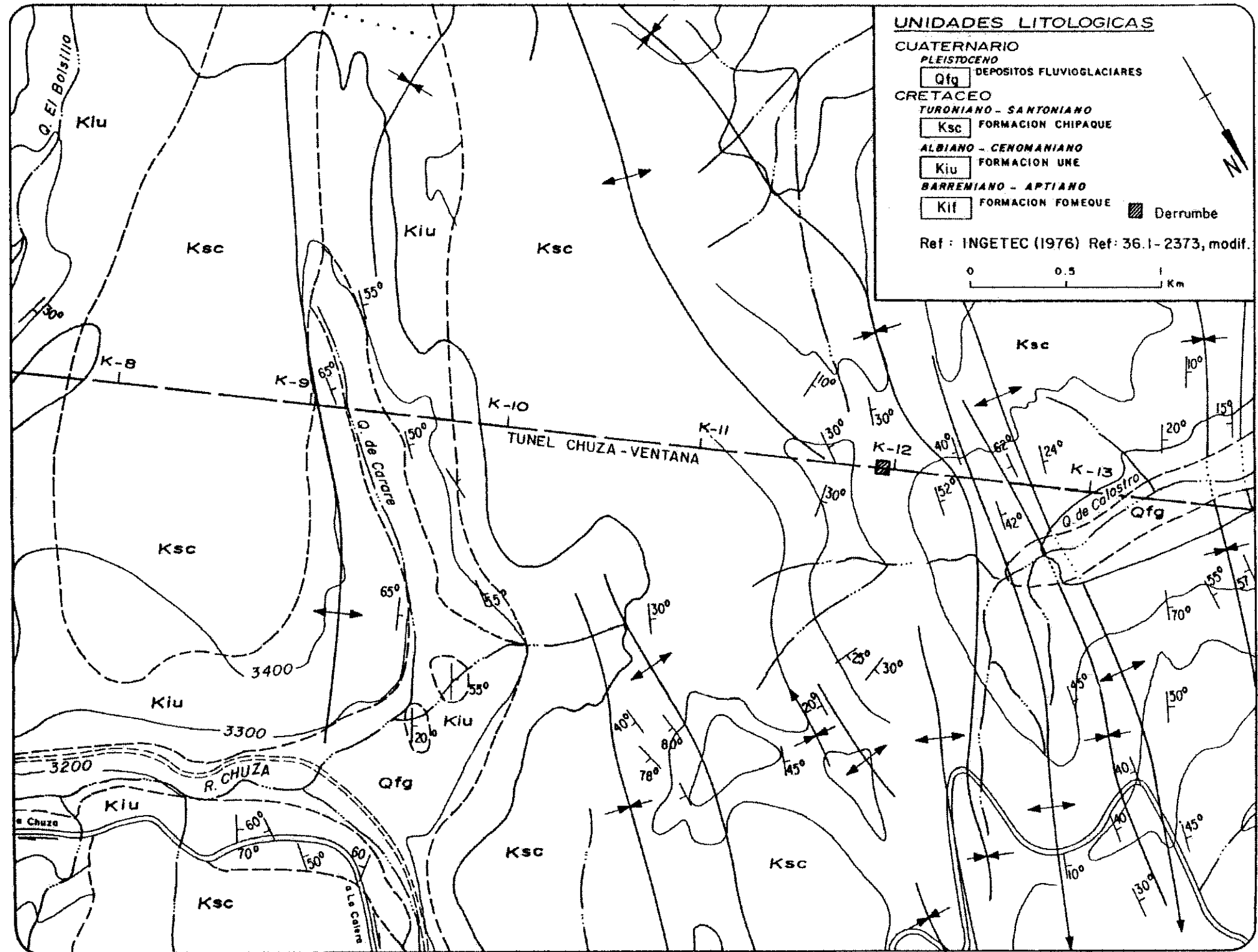
Lobo-Guerrero U., A. y Gómez, H. (1983): Las Aguas Subterráneas en Colombia. Anexo B del Estudio Nacional de Aguas. Preparado para el Departamento Nacional de Planeación. Inédito.

Mojica, J. (1981): Estilolitos horizontales en sedimentitas de la Cordillera Oriental: su significado tectónico. GEOLOGÍA COLOMBIANA, No. 14, p.7-23, Departamento de Geociencias, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, D.E.

Pérez, G. y Salazar, A. (1978): Estratigrafía y Facies del Grupo Guadalupe. GEOLOGÍA COLOMBIANA, No. 10, p 7-85, Departamento de Geociencias, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, D.E.

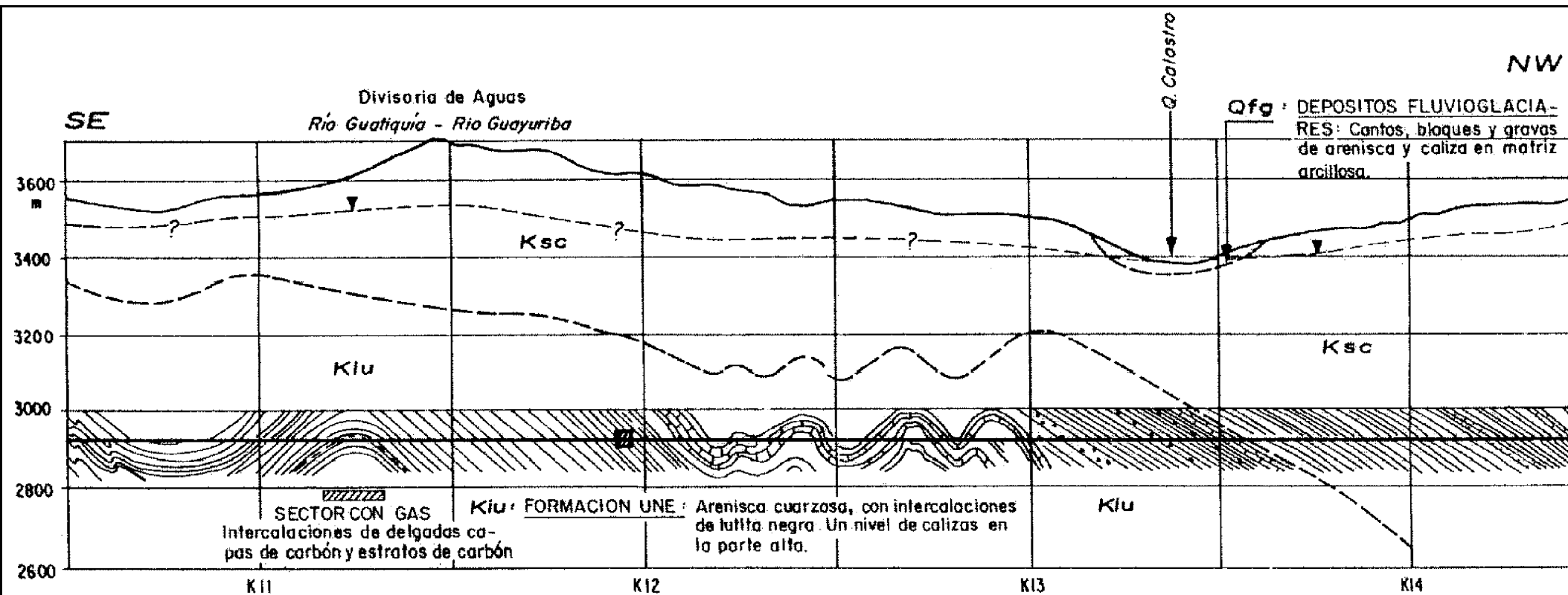
SCI - EAAB (1998): Veeduría Técnica. Obras de Reparación Sistema Chingaza. Convenio 1-07-8100.0203-97. Informe Final. Inédito.

Valencia, G. (1997): Informes geológicos de los Derrumbes en el Túnel Chuza-Ventana: julio 23, agosto 27 y septiembre 5. INGETEC S.A. para EAAB.



TUNEL CHUZA - VENTANA MAPA GEOLOGICO

FIGURA No.1



SECTOR CON GAS  
Intercalaciones de delgadas capas de carbón y estratos de carbón

Kiu: FORMACION UNE: Arenisca cuarzosa, con intercalaciones de lutita negra. Un nivel de calizas en la parte alta.

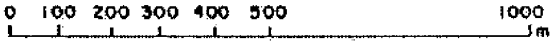
Qfg: DEPOSITOS FLUVIOGLACIA-RES: Cantos, bloques y gravas de arenisca y caliza en matriz arcillosa.

Ksc: FM. CHIPAQUE: Lutita gris oscura con intercalaciones de arenisca y caliza.

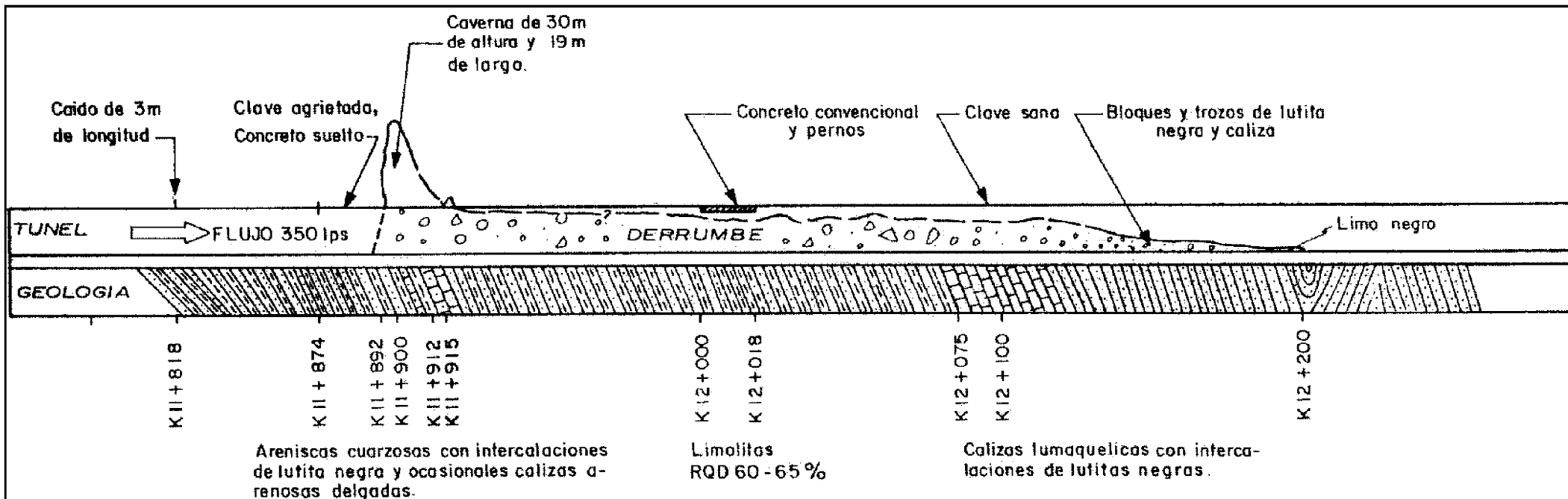
# Túnel Chuza-Ventana, Corte Geológico

## Figura No. 2

- Nivel Potenciométrico Estimado
- Túnel
- Derrumbes



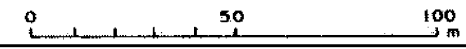
REF: INGETEC (1984) Ref: 367-2103A Dib. 1, modificado

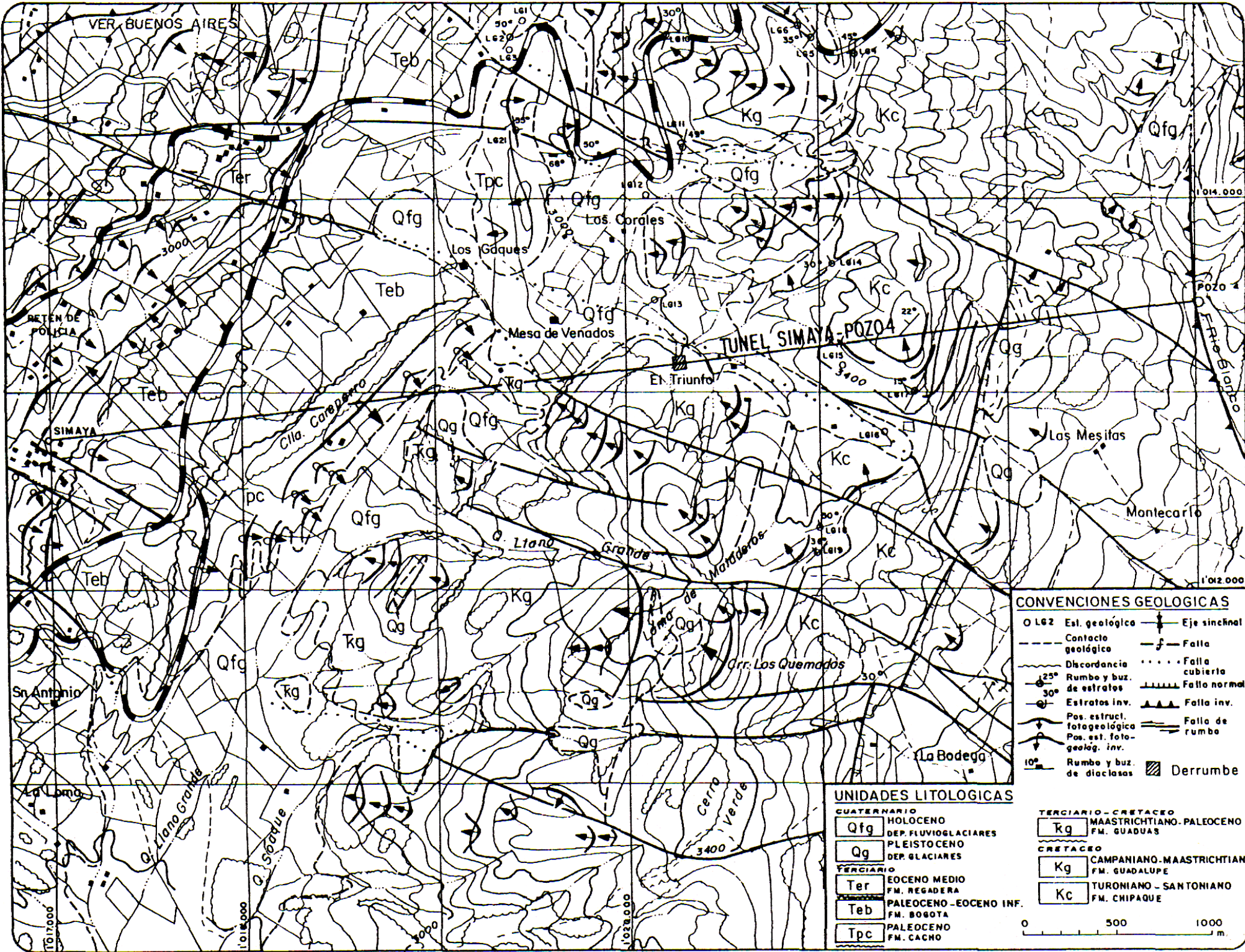


ACUEDUCTO DE CHINGAZA

TUNEL CHUZA-VENTANA  
 DERRUMBE K 11+892 A K 11+915  
 ABRIL 28 DE 1997

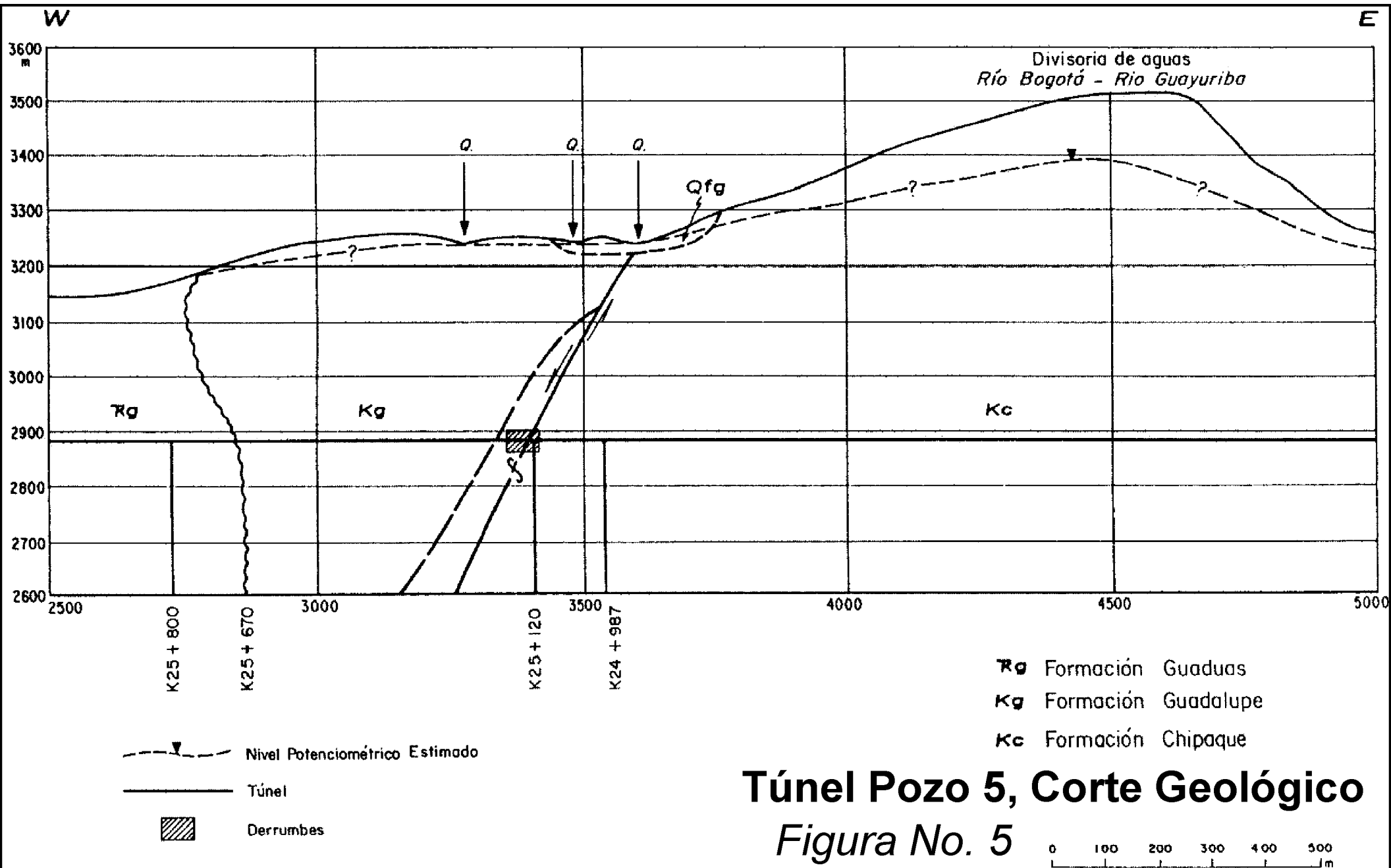
Figura No. 3

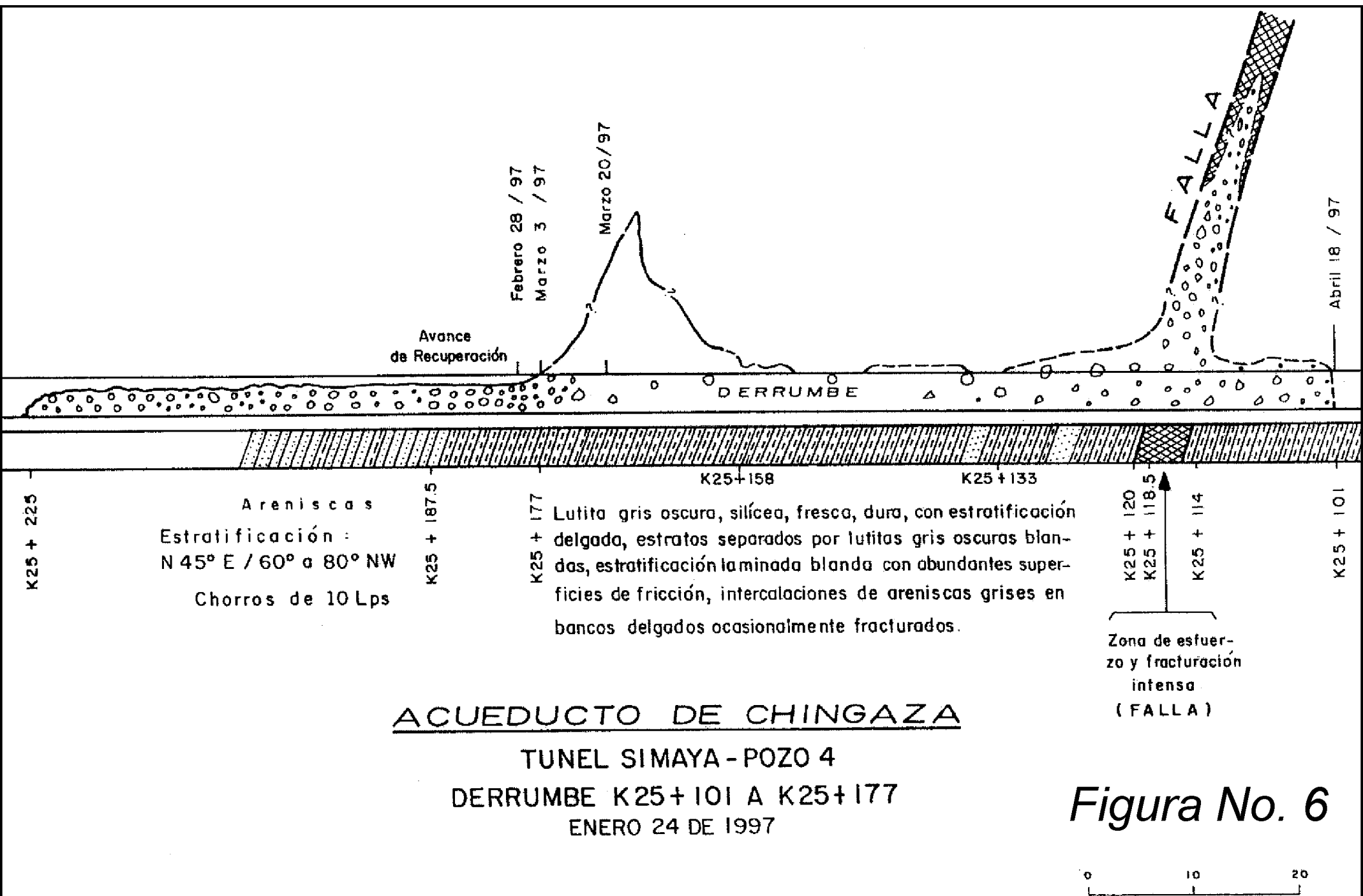




TUNEL POZO 4 - SIMAYA MAPA GEOLOGICO

FIGURA No. 4





*Figura No. 6*