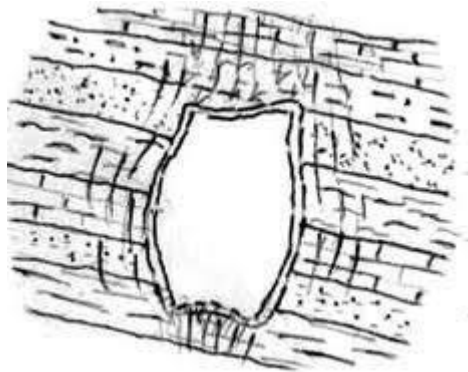


**“ESTUDIO DE FACTIBILIDAD PARA LA RECUPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE LA CUENCA DEL RÍO CHINCHINÁ”**

**Túneles en roca blanda:**

**Diseño y Estudio de cinco conducciones subterráneas para el trasvase de aguas residuales, entre varias subcuencas del Olivares y el Río Chinchiná, en el sector urbano de Manizales- Villamaría y otras microcuencas vecinas.**



**Por: Gonzalo Duque Escobar I. Civil y Eugenio Duque Escobar Geólogo  
Especialistas en Geotecnia**

**AGUAS DE MANIZALES  
Consultoría de  
INGENIERÍA DE SANEAMIENTO AMBIENTAL – INGESAM**

**Manizales, 20 de julio de 2006**

## CONTENIDO

### I- PARTE DESCRIPTIVA

Presentación	Pg 03
Justificación	Pg 04
Geología de Manizales	Pg 04
Aspectos morfológicos y geotécnicos	Pg 13
Definición del problema	Pg 20

### II- PARTE ANALÍTICA

Alcance del estudio	Pg22
Descripción de portales opcionales	Pg 22
Características geomecánicas de las rocas	Pg 34
Análisis fotogeológico estructural	Pg 36
Clasificación de los macizos rocosos	Pg 38

### III- PARTE CONCLUSORIA

Túneles de primera opción	Pg 50
Costos y rendimientos provisionales	Pg 53
Actividades de prospección y recomendaciones	Pg 55
Complementos y estrategias	Pg 57
Agradecimientos	Pg 58

### IV- BIBLIOGRAFÍA

### V- ANEXOS (6 Carpetas)

- 1 Aerofotografías e imágenes del área de estudio
- 2 Columnas estratigráficas para el Túnel Manizales
- 3 Fotografías en zona de portales
- 4 Fotografías de unidades litológicas
- 5 Mapas de la geología de Manizales
- 6 Plano de lineamientos en Manizales
- 7 Planos de plantas y perfiles de túneles

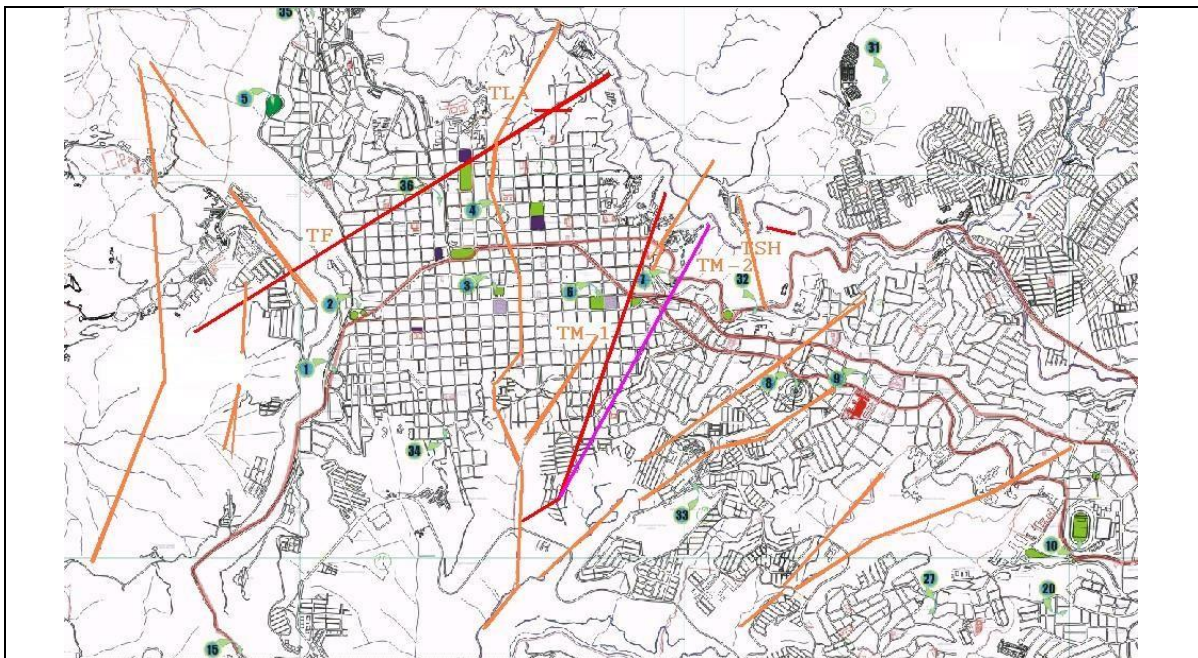
## I- PARTE DESCRIPTIVA

### Presentación

A solicitud del ingeniero Manuel García López, el lunes 12 de junio se le presentó al ingeniero Gustavo Navia Paz, de la empresa Ingeniería de Saneamiento Ambiental, INGESAM, una propuesta para el estudio preliminar de una conducción subterránea, cuyo propósito es llevar las aguas residuales a una o varias plantas de tratamiento en la ciudad de Manizales, donde el área aferente involucra las subcuencas de la Quebrada Olivares por el norte y del río Chinchiná por el sur, además de una microcuenca que merece consideración diferente: la de la quebrada el Arenillo con su afluente la quebrada la Francia, una y otra localizadas en el sector occidental de la Ciudad.

En resumen, se presentan acá cinco conducciones subterráneas, acogiendo las primeras opciones identificadas por el ingeniero Luis Ernesto Sanz, funcionario de INGESAM. Estas se denominarán:

- Túnel Manizales, a la conducción cuyo objeto es integrar las dos subcuencas señaladas;
- Túnel La Francia, a la estructura para conectar a La Francia con Olivares;
- Túnel el Tablazo a aquella para posibilitar la posterior integración de todas las áreas aferentes de Manizales – Villamaría con las de la Francia, Chinchiná y Palestina; y,
- Túneles de Santa Helena y La Avanzada, a dos soluciones subterráneas para viabilizar y empalmar las conducciones con dificultades superficiales en la cuenca de la Quebrada Olivares.



**Figura 1a.** Localización de los túneles considerados (rojo y violeta) y de fallas y lineamientos estructurales (naranja), con respecto a la retícula del área urbana de Manizales, Caldas. El ancho de la imagen cubre cerca de 6 km, en sepia las vías que cruzan la ciudad en dirección E-W y en verde claro los principales parques. Plano fuente, Web de la SMP Manizales.



Esta actividad de INGESAM es para la empresa Aguas de Manizales y hace parte de un proyecto que beneficia a las poblaciones urbanas de Manizales y Villamaría, en Caldas.

### **Justificación**

En la década de los años 20s fueron varios los túneles de los FF CC cafeteros que se construyeron en Colombia. El más significativo de los túneles de esos ferrocarriles fue el de “La Quiebra”, construido en 1929 para empalmar la línea férrea entre Medellín y Puerto Berrío. Para el FF CC de Caldas, fueron construidos varios, cinco de ellos entre Chinchiná y Manizales excavados con sección de herradura desde 1925 hasta 1927. El de la Estación Manizales fue construido en la Formación Casabianca y recubierto en concreto. Esto para señalar la viabilidad técnica de esta empresa. De otro lado son conocidas las experiencias de los mineros de Caldas que laboran construyendo galerías en los coluviones de Supía y en los pórfidos de Marmato, así como la de los que extraen los carbones en las montañas de Quinchía y Riosucio.

De otro lado la Central Hidroeléctrica CHEC posee canales labrados en la Formación Manizales sin revestimiento de concreto, que llevan el agua a las pequeñas plantas de generación, y también ha construido varios túneles para el río San Eugenio muy estables y en conglomerados aluviales, y para el Campo Alegre, en rocas de otra clase y menos competentes.

### **Geología de Manizales**

Los fundamentos que a continuación se presentan, se soportan en los estudios:

Geólogos José Luis Naranjo y Pedro Antonio Ríos quienes escriben la Geología de Manizales y sus alrededores y su influencia en los riesgos geológicos (1989),  
La publicación denominada Modelo de evolución morfotectónica del Sistema de Fallas de Romeral a nivel regional (2005) presentada por el Geólogo José Luis Naranjo,  
El Prediagnóstico de aspectos geológicos (1985) elaborado por los geólogos Michel Hermelín y Andrés Velásquez para el Plan Integral de Desarrollo Urbano de Manizales,  
[Manual de Geología para Ingenieros](#) (1998) de Gonzalo Duque Escobar.

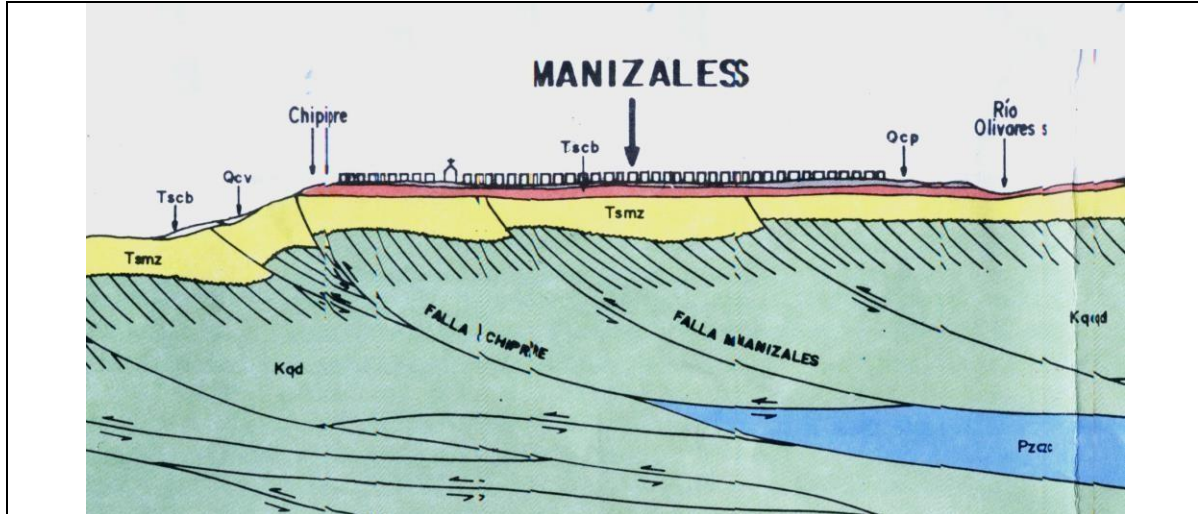
#### Complejo Quebradagrande.

El Complejo Quebradagrande de edad Cretácica incluye rocas volcánicas y sedimentitas, éstas últimas consistentes en areniscas líticas, brechas sedimentarias, conglomerados polimícticos con clastos volcánicos, además cuarzo lechoso, fragmentos de anfibolitas, chert, lutitas, lentes de calizas y grauvacas. Todo el paquete con buzamiento alto salvo excepciones locales. La unidad como tal, según Naranjo, ha pasado de una alta diagénesis a un metamorfismo de baja presión. En Manizales el límite norte es el Complejo Cajamarca, más al oriente de la quebrada el Perro y no sobre ella, como lo sugiere la primera edición de la plancha K8 (INGEOMINAS) en 1978. Cabe destacar que en su litología se da la presencia de rocas carbonosas altamente inestables por su notoria susceptibilidad a la rápida alteración, cuando se les expone a los agentes de la intemperie (meteorización): la inestabilidad de la Quiebra del Billar, la Cárcava del Tablazo y el sector de Java, está absolutamente ligada a este factor en conjunción con el tectónico.

Para Naranjo, la intensa deformación y el fallamiento del Complejo dificultan establecer su techo. Aquí surge entonces un asunto de interés para el tránsito de los túneles: es Manizales una llanura aluvial que recibió depósitos fluviotorrenciales o una fosa tectónica donde un conjunto de bloques, sometidos a fuerzas compresionales recibe aportes fluviotorrenciales y continúa su actividad

cuaternaria generando dislocaciones entre los mismos, en el marco de un escalonamiento de fallas inversas dispuestas en dirección norte sur.

Estructuralmente, con 200 datos de Naranjo y Ríos, la disposición de las discontinuidades de Quebradagrande muestra un rumbo N 5° W.



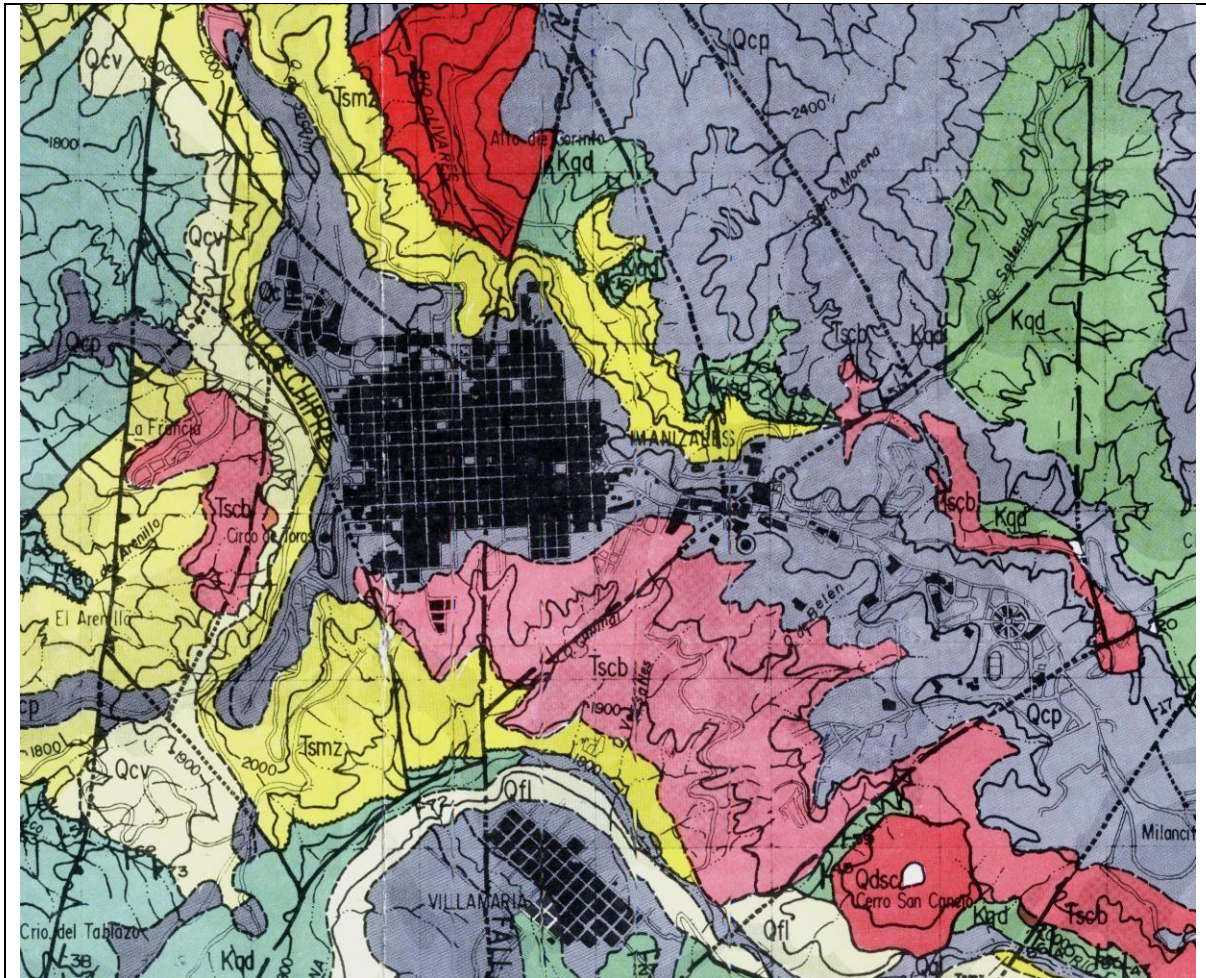
**Figura 1b.** Perfil idealizado de la Geología de Manizales en la zona de estudio. En verde el basamento cretácico C Qg; más arriba, en amarillo la F Mz y en rojo la F Cb que son del Terciario; y por último, en gris, la cobertura de Cenizas Volcánicas más reciente. En azul se anuncia la presencia de una unidad del basamento cristalino de la Cordillera Central, de edad Paleozoica o la incertidumbre del límite de los terrenos geológicos. Las fallas muestran un buzamiento hacia el Este y los espesores no están a escala. Fuente: Naranjo y Ríos. 1989.

#### Formación Manizales.

Para Naranjo y Ríos esta es una Formación depositada en el intervalo temporal de 4 a 8 millones de años, que supra yace el basamento metasedimentario y que es a la vez la unidad inferior del supraterrano volcánoclastico de Manizales. Está constituida por un conjunto de rocas sedimentarias vulcanogénicas con clastos del complejo volcánico Ruiz–Tolima. Los afloramientos de la Formación Manizales según Naranjo y Ríos, aparecen entre otros lugares, al occidente de Manizales, donde la unidad presenta un escarpe de falla de más de treinta metros de altura asociado a la Falla de Romeral, la misma que define el límite entre dos provincias geológicas: una de ambiente continental y otra de ambiente oceánico en los Andes colombianos.

Para Naranjo, en el escarpe Chipre, ésta se muestra con conglomerados bloquesoportados, conglomerados lodosos matriz soportados, areniscas con estratificación cruzada de ángulo bajo, areniscas y conglomerados tobáceos. Los niveles conglomeráticos están mal seleccionados, pobremente sorteados y poseen fragmentos de filitas, pizarras, cuarzodioritas, andesitas basálticas, neiss biotíticos, andesitas y cuarzo lechoso. Esta Formación presenta bloques con tamaños que van desde unos pocos centímetros a 2m y formas desde subangulares a subredondeadas en medio de un limo de color café oscuro, que facilita su identificación. Según el investigador, la potencia de la formación que se exhibe 140 m en Chipre y 80 m en el río Chinchiná, alcanza un promedio de 260 m. Las litofacies que describe el investigador citado, varían desde gravas como las masivas, las clastosoportadas y las matrizsoportadas, hasta gravas cruzadamente estratificadas y gravas estratificadas; incluso, algunos depósitos de arenas, diferentes: guijarrosa, fina a gruesa y limosa. Éstas, dice él, anuncian ambientes predominantemente torrenciales, con ocurrencia de eventos catastróficos intercalados con procesos de acreción y deposición, y de construcción y destrucción del relieve.

Observa Fernando Sánchez (Ingeniero Geólogo, Geotecnista, y Profesor de la Universidad de Caldas), que esta Formación a pesar de sus variaciones, presenta una tendencia a clasto soportarse con mayores diámetros en la base y a matriz soportarse con los menores en el techo; y que la matriz areno-limosa también el profundo drenaje circundante, aunado a las estructuras tectónicas, explican su condición drenada. Adelante se darán algunos valores.



**Figura 1c.** Planta de la geología de Manizales en la zona de estudio y Unidades geológicas así: Complejo Cretácico Quebradagrande en verde (Kqd), Formación Manizales del Terciario superior en amarillo (Tsmz), Formación Quebradagrande del Terciario superior en rosado (Tscb), Cubierta piroclástica del Cuaternarias en gris (Qcp). En negro, además de la retícula urbana de Manizales y Villamaría, curvas de nivel, contornos y drenaje, los lineamientos estructurales ciertos ( ) e inferidos (...). Fuente: Naranjo y Ríos. 1989.

#### Formación Casabianca.

Esta unidad al igual que la anterior y los depósitos piroclásticos, que le sirven de piso y techo, constituyen el supraterrano de Manizales. Espacialmente, reposa sobre la Formación Manizales y el Complejo Quebradagrande.

Según Naranjo los afloramientos de Casabianca “se encuentran en la Vereda La Linda, al oeste de Manizales sobre la vía a Arauca, donde es fácil su reconocimiento debido a la intensa meteorización de sus componentes, lo que ha generado su color rojizo característico.” Para Naranjo y Ríos el espesor promedio de esta secuencia volcanoclástica en el área de Manizales es

de 50m y la misma está compuesta por flujos individuales cuyo espesor varían de 0,5m hasta 15m. Los conglomerados, dicen ellos, aparecen pobremente sorteados y con estructuras internas destruidas por los procesos diagenéticos que le causaron argilización. Litológicamente, los clastos de los flujos de escombros son en un 65 - 80%, de más de 2cm de grueso predominantemente; el 90% de ellos son andesitas y el resto plutones del Stock de Manizales y metamorfitas de Cajamarca. La matriz de Casabianca es arcillo limosa; esto es, una matriz plástica e impermeable donde localmente se han podido formar suelos expansivos y fácilmente identificables, puesto que su color blanco grisáceo contrasta con el amarillo naranja característico del conjunto.

Entre la Fábrica de Helados La Fuente y el Barrio el Paraíso, vecinos a Villa Carmenza y al Portal Panamericana, el afloramiento de Casabianca muestra evidencias de actividad tectónica, y la unidad es del terciario superior.

#### Piroclastos:

Si bien en el área de influencia de Manizales hay evidencias de ignimbritas, también la cobertura del territorio está constituida por dos unidades cuaternarias de piroclastos de ambiente subaéreo, que en conjunto muestran una potencia de 6m que varía en muchos casos, así: la más antigua, una capa de tobas volcánicas afectadas por la última glaciación. Aunque el nivel de consolidación no le da características geomecánicas significativas, en los procesos diagenéticos ha influido sustancialmente el ambiente húmedo para modificar sus rasgos estructurales y texturales. La segunda unidad está caracterizada por tefras, es decir, por piroclastos estratificados no consolidados y de ambiente subaéreo. Las capas de los diferentes eventos son visibles y alternan entre ellas lapilli, arena volcánica y ceniza. Los mayores espesores son de lapilli asociados a las lavas de Cerro Bravo (dacita). Estas capas que alcanzan los decímetros, son estructuras permeables, y con todo el conjunto facilitan la infiltración, encontrando como contraste de permeabilidad la matriz arcillo limosa de Casabianca en el área de Manizales.

Al observar ambas unidades piroclásticas en el área de Manizales, se advierte que la deposición de productos asociados con la actividad volcánica explosiva y de magnitud, ha sido continua hasta el pasado reciente, y que el foco más activo ha sido Cerro Bravo. Lo anterior explica la ausencia de paleosuelos orgánicos intercalados, así como la presencia de un horizonte orgánico de importancia que es el reciente.

La presencia de las tefras le da al relieve de las laderas no intervenidas por modelado antrópico o erosivo una superficie ondulada y suave, la misma que se constituye en poderosa herramienta para la interpretación y diagnóstico de las zonas inestables, y por lo tanto para identificar procesos erosivos, movimientos en masa y actividad neotectónica.

En las tefras cuaternarias se ha encontrado actividad neotectónica: cuando se construía el sector noreste del Centro Comercial Sancancio, vecino al sector universitario de Palogrande, se observó en un talud ubicado a decenas de metros de este lugar, un desplazamiento vertical cercano a los 2m. Ver: *Cerro Bravo, tras trescientos años de calma volcánica.*

#### Tectónica

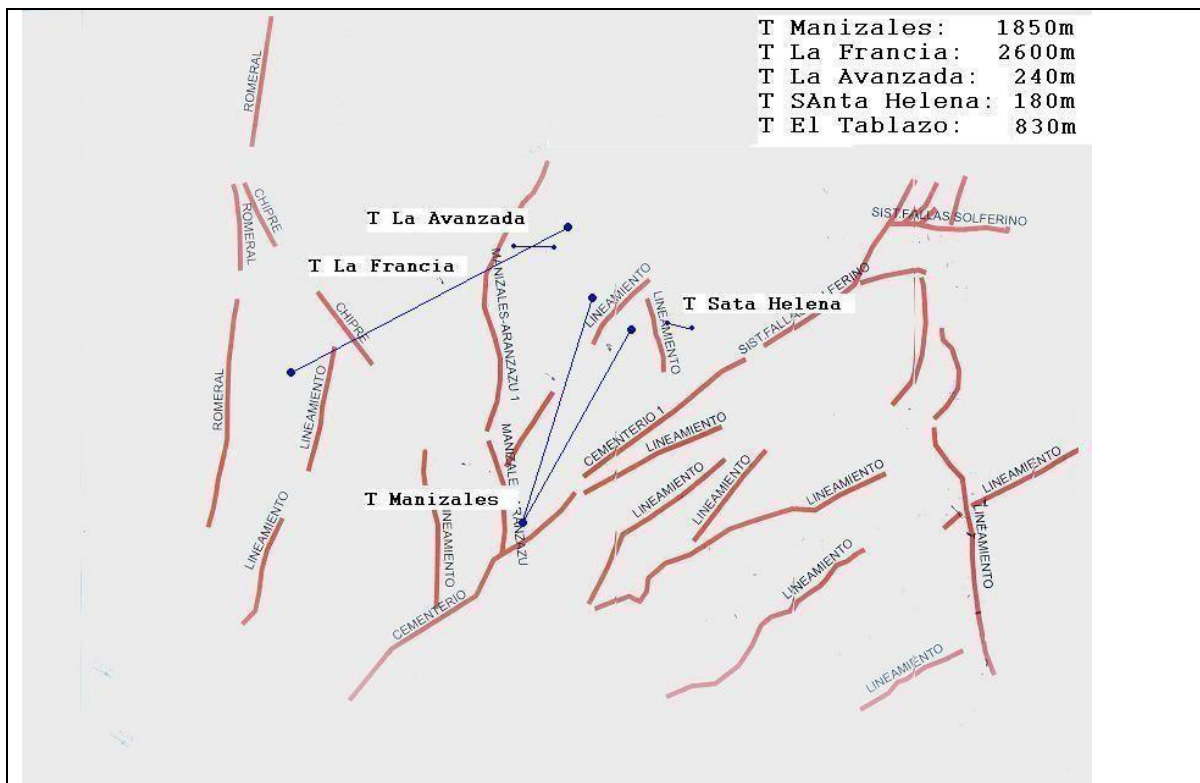
Es evidente el levantamiento que muestra la ciudad en el costado occidental y que se anuncia con el escarpe de Chipre. Los flujos de lodo que afloran en los taludes de San Jorge, La Autónoma, Olivares, La Avanzada, Chipre, La Francia, Santa Sofía, Villa Kempis, Estambul, Marmato y La Panamericana, anuncian el levantamiento de bloques, cuyas fallas con dirección norte-sur, este-oeste y otros rumbos, encuentran su expresión topográfica en quebradas y ríos, pues éstos aprovechan las debilidades del basamento para conformar el drenaje. Es como si Manizales en el pasado hubiera estado a nivel de Morrogacho y Villamaría, sin haber entrado el cuaternario.

Ver: *La historia del Cerro Sancancio.*

Las fallas regionales y el conjunto de fallas locales pertenecen a lo que Naranjo 2005 denomina Falla Fundamental de Romeral (FFR). Según este autor el empuje hacia el este contra el continente desde el terciario medio hasta hoy “hizo deslizar los bloques amalgamados a lo largo de la falla principal dentro del sistema -FFR-, falla que, por su curvatura, generó cuencas de tracción (*pull-apart-basins*) separadas por cuencas de compresión”.

Las fallas con actividad reciente, según estudios de neotectónica local y mediciones de radón, parecen ser Villamaría-Termalés del Ruiz, Manizales-Aranzazu, Palogrande y San Esteban. Más adelante se comentará la investigación que adelantaron investigadores del Departamento de Geociencias de la Universidad Nacional, al respecto. Ver: *Fallas y lineamientos ge estructurales de Manizales.-*

En 1985, Velásquez y Hermelín, recogen el inventario de las fallas cartografiadas y examinan nuevos alineamientos con el apoyo fotogeológico y de campo. Más adelante el PADEM profundiza sobre la materia y recoge evidencias de neotectónica, como la que se observa en la parte alta del Barrio Villa Luz al nororiente de la Ciudad; incluso a través del PADEM (Plan de Atención de Desastres y Emergencias de Manizales), se hace un trabajo de carácter preliminar para inferir la actividad de fallas a partir de medidas de emisiones de gas radón. La actividad sísmica observada por la Red Sísmica del Eje Cafetero ha permitido también establecer pequeños eventos que parecen anunciar la actividad en fallas como la de San Esteban. Naranjo y Ríos aportan la existencia de un trazo de falla que sale desde la galería con dirección N50°W, el que de extenderse en dirección contraria afectaría el sector de Fundadores, de interés para este proyecto. La misma no aparece en el trabajo de Naranjo del año 2005, citado en la Bibliografía.



**Figura 1d.** Lineamientos estructurales asociados a grandes fracturas y fallas (en rojo) y disposición de túneles (en azul), para el tratamiento de aguas servidas de la zona urbana de Manizales y Villamaría. No aparece el Túnel del Tablazo, y se muestran dos opciones para el Túnel Manizales, que convergen en el Barrio Panamericana. Los túneles La Francia y La Avanzada se cruzan sin cortarse. Soporte: Información suministrada por Aguas de Manizales.

Manuel García López subraya la forma abanicada del fallamiento, cuya geometría, es un cuadrante de circunferencia con centro en Villamaría, que se desarrolla entre el N30°W y el N60°E, en la zona de estudio.

El resumen de los rasgos estructurales identificados por éstos y otros trabajos está contenido en la cartografía suministrada por Aguas de Manizales para este trabajo, salvo el trazo señalado de Naranjo y Ríos. Se anexan los planos correspondientes y se incluye este rasgo en el análisis.

En el examen morfo-tectónico de las aerofotografías examinadas y del contraste de esta información con los alineamientos y el drenaje cartografiados, se observa una anomalía topográfica entre la zona reticulada del Centro de Manizales y la Francia, entre la primera y el sector de Fundadores, entre Milán y la Florida y entre Milán y el Cerro de Oro. En los anexos se presenta el análisis fotogeológico, que más adelante será comentado.

De otro lado, investigadores del Departamento de Geociencias, Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá, al evaluar los esfuerzos asociados a la actividad geotectónica en el Eje Cafetero, hallaron dos estados de esfuerzo regionales con actividad neotectónica.

El primero asociado a estructuras norte sur del Sistema de Fallas de Romeral –SFR- y cuyos esfuerzos muestran un esfuerzo principal mayor  $\sigma_1$  en dirección NW –SE y un  $\sigma_3$  que presenta una tendencia NE –SW, por lo que los planos de falla para el SFR mantienen una componente de rumbo inversa con un desplazamiento de rumbo izquierdo.

El otro campo de esfuerzos predominante está relacionado con el sistema de fallas transversales al SFR, representados en esta región por el Sistema de Fallas Villamaría-Termale. En estos sistemas se encontró un  $\sigma_1$  en tendencia NNE –SSW, y un  $\sigma_3$  que por lo general indica una tendencia WNW –ESE. Estos sistemas de fallas son normales y no muestran evidencia de desplazamiento lateral. Según los investigadores señalados, “la interacción de estos dos regímenes de esfuerzos, entre latitudes 4,5° N y 5,5° N, indican una clara influencia de dos componentes principales en cuanto al origen de los esfuerzos que activan los procesos tectónicos actuales de este sector de los Andes Septentrionales”.

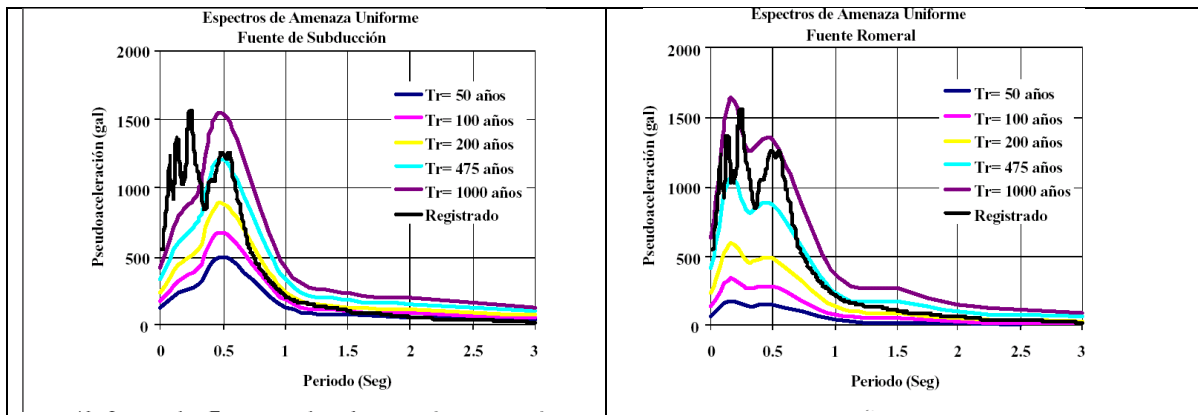
En cuanto a la amenaza sísmica, el Eje Cafetero posee dos fuentes de singular importancia: El Sistema de Fallas Romeral y otras Fallas, todas con sismos superficiales como los del Quindío 99 y Popayán 83, y la Zona de Subducción y Plano de Benioff con sismos profundos como los de 1962, 1979 y 1995. (Duque 1998). Los eventos de una y otra difieren en magnitud e intensidad. Los del sistema Romeral vecino, la fuente cercana y de más relevancia, son de magnitud 6 e intensidades VII a VIII; y los segundos, ya del orden regional y asociados a la interacción de las placas Nazca y Suramericana, son de magnitud 7 e intensidad VI a VII. En virtud de la historia sísmica registrada en el país, en el CCCS, Ley 400 de 1997 y Decreto 33 de 1998 se ha considerado la región en alto riesgo y se le ha asignado una aceleración de 0,25g.

Comparemos lo que ocurre en tres lugares de Manizales a causa del Sismo de Risaralda de 1995: los registros de aceleración máxima para la componente EW, en cm/seg<sup>2</sup> obtenidos en Manizales, a 112 k del foco, en dos suelos de topografía semiplana de un lado, y sobre una roca de la planta de Gallinazo, varían así de 206 y 117, en los dos primeros a 17 en el suelo rocoso de Gallinazo; esto es, la fuerza medida se redujo varias veces. Otro ejemplo; en el sismo del Quindío 1999, veamos lo ocurrido en dos lugares diferentes pero ubicados a similar distancia y dirección: los valores de la aceleración medidos en Armenia a unos 20 km del epicentro, pero en suelos blandos han alcanzado hasta 0,59g en un depósito de 30 m de espesor (20 m de cenizas más 10 m de relleno) y en topografía plana; contrariamente, en un conglomerado de una bocatoma de la misma ciudad la aceleración registrada fue 0,09g, y por lo tanto las fuerzas sísmicas seis veces menores, componente por componente.

Los datos se han obtenido del estudio Microzonificación Sísmica de la Ciudad de Manizales, CIMOC -Alcaldía de Manizales, 2002. Ver: [Amenaza sísmica en el Eje Cafetero.](#)

El sismo de trabajo depende del período de retorno, y éste a su turno se relaciona con la vida útil de las obras, la cual depende también de su naturaleza, función social y nivel de desarrollo económico de la comunidad que la financia. Los investigadores del anterior estudio, entre los que participan reconocidos expertos en la materia como O. D. Cardona, J. E. Hurtado, S. D. Prieto, W.

L. Estrada y J. D. Arango, todos ellos conocedores del medio ecosistémico y del contexto que nos ocupa, con los demás investigadores del equipo CIMOC han sugerido diseñar las obras regulares de la Ciudad para una vida útil de 50 años, y de conformidad con este el período de retorno correspondiente calculado con base en la sismicidad histórica local resulta ser 475 años. Esa base histórica muestra que el 65 % de los eventos son de Romeral, el 28% de Benioff y la Zona de Subducción, y el 7% de otras fallas como la de Palestina, asociada al Complejo Volcánico del Ruiz.



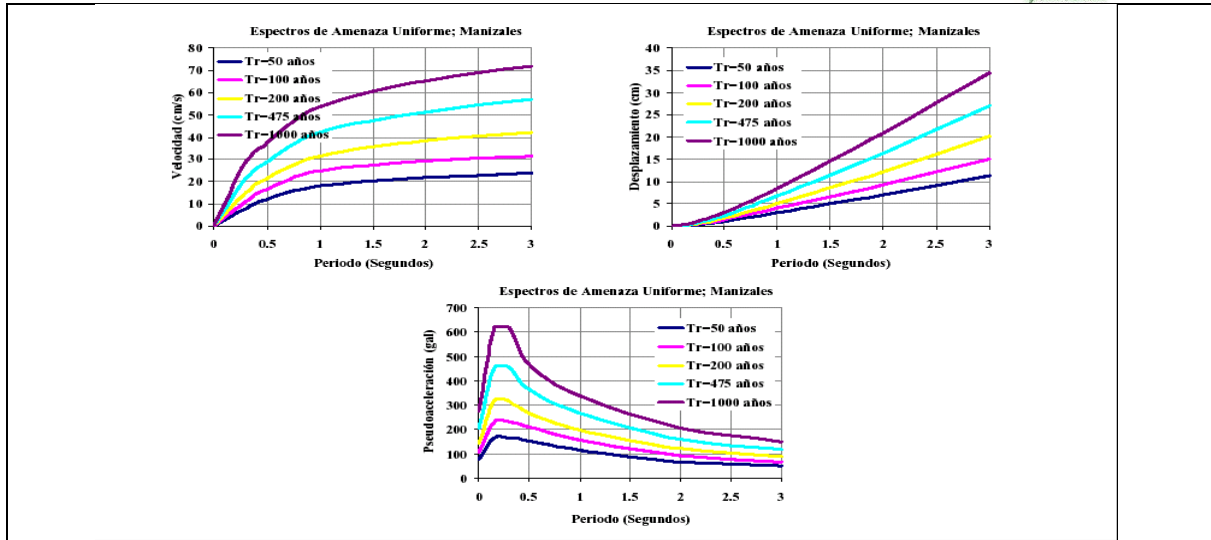
**Figura 1e.** Espectros de peligro uniforme estimados para dos fuentes sísmicas en el sitio de Uniquindio, donde se registró una aceleración de 0,59g con el sismo de 1999. Amenaza asociada a la Fuente de Subducción (Izq) y a la Fuente Romeral (Der). Microzonificación Sísmica de la Ciudad de Manizales, CIMOC -Alcaldía de Manizales, 2002.

Ahora bien: el asunto trae implicaciones donde la amplificación es severa, para prevenir el diseño de estructuras vulnerables o limitar su uso, y en consecuencia esto sobre suelos blandos y en lo alto de las laderas a causa del efecto topográfico.

Con el evento de trabajo que se asume, el de 475 años, la aceleración máxima esperada en un punto del basamento de la ciudad, varía de acuerdo a la fuente que lo produce y su distancia a ella; pero esa fuerza se amplificará, reduciéndose la frecuencia e incrementándose la amplitud de la excitación, según la topografía, geometría y rigidez del suelo depositado o formado sobre el basamento del lugar considerado, quien le transmite las oscilaciones profundas.

El estudio del CIMOC estimó además de la fuerza máxima la duración de la fase intensa de la excitación en el basamento: para la Fuente Romeral, para una distancia de 20k y una magnitud del evento de 6,2 la aceleración máxima dio m 0,18g y la duración de la fase intensa de 15 seg. Para las fuentes regionales, más lejanas y profundas y con sismos de mayor magnitud, el evento esperado alcanza aceleraciones máximas de 0,15g. y una duración de la fase intensa tres veces mayor.

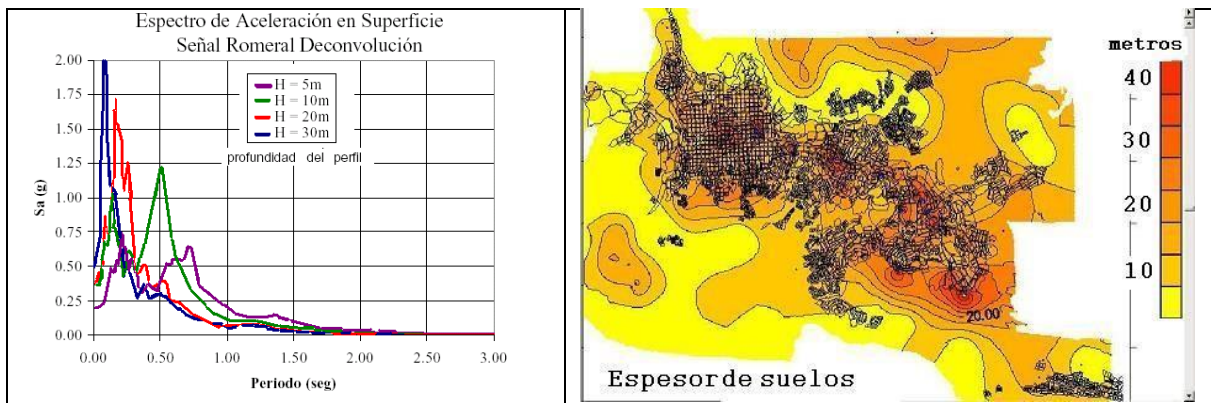
Ahora, el espectro de la roca base es uno y el de los suelos otro, lo que supone ajustar los diseños a las variaciones locales de la amenaza, usando los criterios de la zonificación del CIMOC, previniendo la resonancia entre estructura y suelo, y atendiendo la topografía del lugar. La velocidad de la onda en el basamento,  $V_s$ , se asume de 1500 m/seg, valor que interesa para el módulo de cortante  $G_s = \rho V_s^2$  donde  $\rho$  es la densidad del medio rocoso. Multiplicada esta por la gravedad, se obtiene el peso unitario PU.



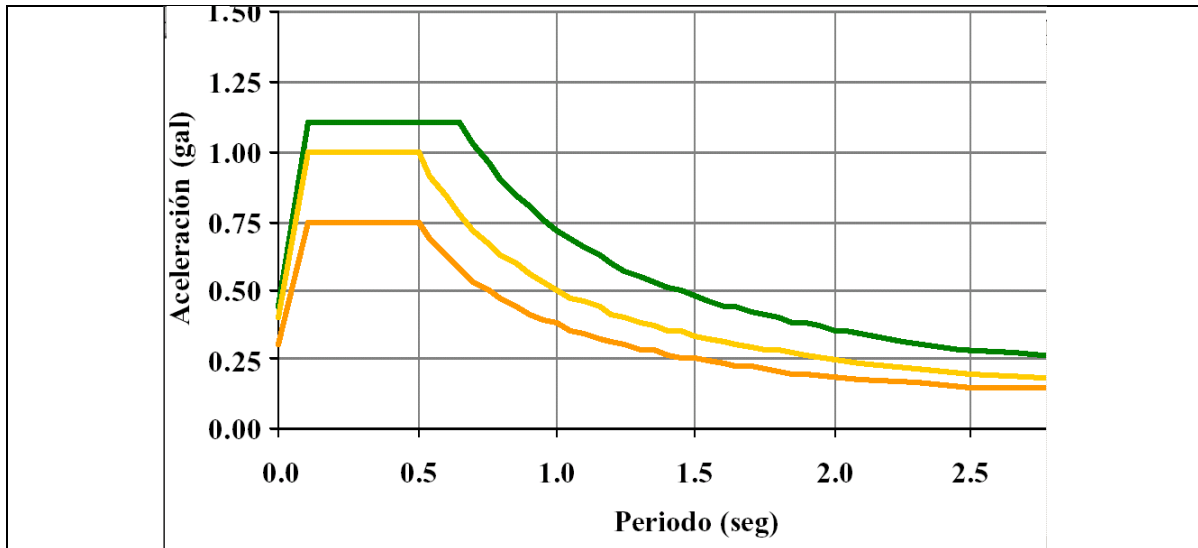
**Figura 1f.** Las velocidades en cm/seg, los desplazamientos en cm y las aceleraciones esperadas expresadas en gales, contra el período de la excitación en segundos, para los eventos sísmicos probables, estimados para períodos de retorno de 50, 100, 200, 475 y 1000 años. De interés, el evento en azul claro con un período de 475 años. Fuente: [Microzonificación de Manizales](#). CIMOC. 2002.

Los PU en  $t/m^3$ , para el CIMOC, varían así: en cenizas 1,3 a 1,9, en la F. Casabianca de 1,5 a 1,9 y en la F. Manizales de 1,8 a 2,2. Entonces, con el  $G_s$  máx obtenido midiendo las velocidades de la onda de corte  $V_s$ , los valores medios de los períodos fundamentales  $T_f$  para las diferentes fuentes sísmicas están entre 0,47 y 0,56 seg. Para suelos arcillosos del módulo  $G_s$  va de la mano con el Índice de Liquidez (relación agua-plástico) en profundidad se da conforme cambia el origen del depósito; aquí los períodos fundamentales obtenidos para el conjunto de fuentes sísmicas, variaron entre 0,47 y 0,6 seg.

También se consideró por CIMOC el espesor del depósito de suelo blando considerando espesores de 5, 10, 20 y 30 m; para estos, los períodos fundamentales promedios, en segundos, con eventos de las fuentes sísmicas, varían así en cada caso para el orden de los espesores dados: 0,11, 0,26, 0,51 y 0,76seg.



**Figura 1g.** Para sismos asociados a la fuente Romeral, se muestra el espectro de la aceleración en superficie, según el espesor H del suelo (Izq). Espesores de suelos en Manizales (Der). Fuente: [Microzonificación de Manizales](#). CIMOC. 2002.



**Figura1h.** Espectros de diseño para las diferentes Zonas de la ciudad de Manizales. Los túneles deben responder a la Zona C. Los tres espectros son: el superior para la Zona A, el intermedio para la B y el inferior para la C. Fuente: [Microzonificación de Manizales](#). CIMOC. 2002.

La microzonificación de la ciudad concluye identificando VI zonas, quedando la F. Manizales como la Zona III, la F. Casabianca como la Zona IV y el C Quebradagrande como la Zona V.; luego por razones prácticas éstas se simplifican y únicamente se definen 3 Zonas, así: Zona A para Cenizas que eran la Zona I; Zona B para llenos que eran la Zona II; y Zona C, la de los túneles, para las Zonas III, IV y V, además de la Zona VI que es la de depósitos competentes aislados. Entonces, las unidades Manizales, Casabianca y Quebradagrande, de nuestro interés, son de la Zona C, y ésta se rige por los espectros NSR-98. Es decir, por los espectros de terreno firme que son las zonas con depósitos de suelos conformados por terrazas aluviales, flujos volcánicos y suelos residuales y coluviales de poco espesor.

Finalmente, como quiera que los espectros anteriores aplican solamente en depósitos y superficies planas y horizontales, cuando el relieve en la tercera dimensión aparece, ellos deben ser corregidos aplicando el factor de amplificación por efectos geométricos y topográficos ( $F_{Top}$ ), factor que procede en las zonas cercanas a los taludes ubicadas a menos de 2 veces el espesor H del depósito de suelo blando, o a menos de 60m de su borde.; esto así:

$$\begin{aligned} &\text{Para } T < T^* \text{ se aplica } F_{Top} = 1,5 T^* \\ &\text{y} \\ &\text{Para } T > T^* \text{ se aplica } F_{Top} = 1 + 0,5 (T^*/T)^{1,5} \\ &\text{Siendo } T^* = 4H/V_s \end{aligned}$$

En las expresiones dadas, H en metros;  $V_s = 250$  m/seg; y T en segundos.

En conclusión, para nuestros túneles, la situación parece ser favorable por dos razones: de un lado, como en cualquier túnel, se busca la base de la montaña para cruzarla, sobre todo cuando su propósito es trasvasar aguas servidas que se recogen en las menores cotas urbanas. Del otro lado, nuestros túneles están en la Zona C de la Microzonificación Sísmica de Manizales, donde la amenaza es menor y en especial cuando se trate de excavaciones, en su orden, a través de la Formación Manizales, del Complejo Quebradagrande, y de la Formación Casabianca.

## Aspectos morfológicos y geotécnicos.

Las Formaciones Manizales y Casabianca asimilables a un Conjunto Conglomerático y en especial la primera de ellas, le imprimen al paisaje de Manizales ciertas características como:

- El Conjunto Conglomerático se extiende como un depósito de gran potencia sobre una gran depresión con características de escalamiento tectónico, a modo de valle localizado donde el drenaje principal modifica su régimen torrencial en fluvial. De ahí que el conjunto sea un abanico aluvial, de similares características a los de Pereira y Armenia, pero tectonizado y levantado, el que, entre San Rafael y La Linda, yendo de oriente a occidente, se ofrece primero como un paisaje con tendencia uniforme, el que gradualmente va cambiando, cada vez más, hacia formas verticalizadas en medio de un drenaje que se estrecha en medio de laderas en V con visibles salientes y cauces más entallados, a medida que se incrementa el potencial gravitacional, puesto que, mientras descienden los cauces del Olivares y Chinchiná, el territorio urbano de Manizales no lo hace y el de Chipre y Villa Kempis se levanta.
- Las cuestas elementales de Manizales pueden quedar ubicadas en laderas de cualquiera de las unidades geológicas señaladas: las localizadas en la Formación Manizales rara vez presentan caída de bloques y en caso de lluvia intensa, deslizamiento traslacional o de tipo planar, mientras las asociadas a la Formación Casabianca los presentan con mayor frecuencia y del tipo rotacional, y en especial cuando aparecen los suelos blancos o cuando se saturan las vaguadas más cóncavas en las dos direcciones.
- Las inestabilidades en el Complejo Quebradagrande surgen por el deterioro de las laderas a partir de afloramientos de naturaleza carbonosa o grafitosa en su base o en niveles inferiores, que aparecen saturados y expuestos; además en las zonas de mayor fracturamiento tectónico en esa unidad litológica, identificable por su color negro, aspecto pizarroso y presencia de azufre.
- Las Cenizas Volcánicas -tefras y tobas de la cobertura-, ofrecen estabilidad a las laderas, salvo cuando su basamento falla o cuando se les expone a factores de erosión por sobrepastoreo, caminos de arriería y entrega deficiente de aguas desde las vías o concentración de escorrentías.
- Estos fragmentos piroclásticos eruptivos que suavizan la topografía al depositarse en capas que siguen las irregularidades y ondulaciones del terreno, y le dan un especial aspecto aterciopelado cuando las laderas son pasturas, con las eventuales irregularidades, escarpes o rizos que muestren, sirven en el diagnóstico de las áreas erosionadas y las zonas inestables.
- La Formación Manizales, especialmente, presenta zonas con distinta capacidad mecánica por tener grado de consolidación variable y en menor grado cantos de diferente naturaleza. La cementación de la matriz, aunque algo incipiente pero suficiente para añadirle propiedades casi impermeables al material, es causada por arcillas y óxidos. Esto unido al tectonismo local, explica las variaciones de estabilidad entre laderas y taludes, como también la presencia de zonas más degradables que otras a escala urbana.

Los productos derivados de la Formación Manizales, resultan ser de difícil transformación en áridos útiles para obras, intentando su machaqueo con mazo o almádena. Tampoco ofrecen posibilidades de labra plana puesto que los cantos no tienen cemento de características similares a los bloques y sobretodo porque mayoritariamente son bloques lávicos de textura masiva, antes que foliada.



**Figura 1i.** El paisaje de Manizales es el de una ciudad de laderas. Las laderas muestran salientes que delimitan las formaciones superficiales y profundas, anunciando la mayor estabilidad de las unidades inferiores, respecto a las otras más recientes que las cubren. Esas son la Formación Manizales en la Ladera NW o de Olivares (Izq), y los Gabros de Chinchiná en la ladera SW o del Chinchiná (Der). La segunda imagen muestra el canal de conducción ubicado en la zona estable del macizo rocoso, y de exitoso desempeño por cerca de 70 años.

- Pueden utilizarse en ocasiones como escolleras aluviales, terraplenes de carretera y pedraplenes a modo de espaldones de presas de materiales sueltos, para adecuar vaguadas en los propios botaderos, sobre todo, porque en la vecindad de los portales falta infraestructura para mejorar la calidad ambiental de comunidades marginadas y pobres. El ambiente torrencial y eventualmente catastrófico de los eventos, explica el buen empaquetamiento y alta densidad de bloques con gran tamaño, y la propensión a conformar un macizo clastosoportado salvo cuando los finos abundan; esto por ser un depósito poligénico con variadas facies, y el que en consecuencia presenta zonas con distinta capacidad portante y drenaje cuasivertical.
- En la Formación Manizales los portales ubicados en el macizo sano, sin fallas de ladera, admiten taludes casi verticales; el macizo tiene diferente resistencia a causa del contraste entre bloques con diferencias de alteración y composición, y entre los cantos y la matriz pobremente cementada; en especial las lavas andesíticas, por su reducido contenido de cuarzo, son consideradas blandas. Los grandes tamaños de los bloques en esta formación, hacen difícil la excavación y conducen a la necesaria utilización de métodos de perforación mecánica con voladuras, a la instalación de vagonetas de plataforma con poco cajón para ubicarlos y sacarlos, y al uso de concreto lanzado en zonas críticas. La calidad del relleno o matriz, igualmente, obliga a la excavación y entibado simultáneos, después de los cuales podrá resolverse el tipo de soporte donde se requiera.
- El Túnel Manizales cruza esta formación rocosa conglomerática cuyas rocas, calificadas de blandas y porosas, aunque algo cementadas, como se verificará más adelante, efectivamente ganan resistencia con la profundidad al cerrarse más los poros y también como consecuencia de la mayor intensidad de los factores diagenéticos. Antes de la excavación su resistencia puede incrementarse más, si previamente se drena el macizo.



**Imagen 1j.** Formación Manizales en la panamericana (Izq) y Formación Casabianca en Santa Helena (Der). Además del fuerte contraste en el grado de meteorización entre ambas, el color de la matriz, café en la primera y naranja o rojizo en la segunda, facilitan su diferenciación.

- De otro lado, la Formación Casabianca, en profundidad presenta bloques aislados y alterados, y por lo tanto es una unidad matriz soportada en un suelo duro y que hacia la superficie se va modificando hasta alcanzar las características de suelo blando y cohesivo, el cual que admite taludes casi verticales de mediana altura o de mayor desarrollo cuando el suelo es más profundo. Como evidencia, en la banca del ferrocarril estos, con 80 años de excavados, llegan hasta los 20 m, e incluso a los 30 m de altura de forma muy ocasional. Además, cuando en esta unidad se han desarrollado suelos blancos, que son expansivos, la falla y la inestabilidad de los taludes son absolutas y generalizadas, conduciendo a una situación como la que se observa en la Avenida Kevin Ángel entre Aguas de Manizales y San Rafael, donde se efectuaron los cortes respectivos. Debe señalarse que el Túnel de La Avanzada transcurre en un macizo de esta unidad, el que posiblemente deberá considerarse como un túnel en suelo residual proveniente de la alteración de una roca blanda de origen conglomerático.
- Los parámetros geotécnicos suministrados por la prestigiosa empresa Aquaterra Ingenieros Consultores SA, correspondientes a muestras de la Formación Casabianca obtenidas en el estudio del Teatro Fundadores, y para el Complejo Quebradagrande, del estudio de la ladera sur de La Sultana, y que son de dos lugares diferentes de la ciudad, se presentan en la Tabla 1a.

<b>Complejo Quebradagrande. Observaciones en La Sultana según Aquaterra.</b>			
Ensayo	Promedio	Mínimo	Máximo
Humedad natural -%	34,13	10,70	176,6
Límite Líquido -%	39,68	17,6	178,1
Límite Plástico -%	27,02	13,9	67,8
Índice Plástico -%	12,65	3,1	110,3
Compresión Inconfinada -t/m <sup>2</sup>	9,94	5,54	18,28
Peso Unitario Húmedo -t/m <sup>3</sup>	1,738	1,06	2,15
Cohesión t/m <sup>2</sup>	0,298	0,03	0,49
Ángulo de Fricción -grados	31,92	28,16	35,67
Fuente: Estudio Geológico, Geotécnico e Hidráulico de la Ladera Sur del Barrio La Sultana,			

Manizales. Aquaterra Ingenieros Consultores SA. Manizales 2004.

**Formación Casabianca. Observaciones en Fundadores según Aquaterra.**

Ensayo	Promedio	Mínimo	Máximo
Humedad natural -%	88,3	51,9	128,9
Límite Líquido -%	86,0	65,2	135,4
Límite Plástico -%	40,9	37,2	45,0
Índice Plástico -%	45,0	19,0	90,4
Índice de Liquidez -%	0,9	0,8	0,9
Peso Unitario Húmedo -t/m <sup>3</sup>	1,715	1,609	1,821
Peso Unitario Seco -t/m <sup>3</sup>	1,036	0,874	1,198
Compresión Inconfinada -t/m <sup>2</sup>	21,22	13,86	28,57
Penetración Estándar -Golpes /pie	17,0	15,0	19,0

Fuente: Estudio de Suelos para la Rehabilitación Estructural del Teatro Fundadores. Aquaterra Ingenieros Consultores SA. Manizales 2003.

**Tabla 1a.** Características Geotécnicas en muestras del Complejo Quebradagrande obtenidas en la Sultana y de Casabianca en Fundadores, por Aquaterra Ingenieros Consultores S.A.

- Los parámetros geotécnicos de los Suelos Residuales de Depósitos Conglomeráticos, en el sector de la comuna 2 de Manizales hoy denominada Olivares - donde se ubica el Túnel de la Avanzada- que son suelos de las Formaciones Casabianca y Manizales-, y también los parámetros de las cenizas volcánicas consolidadas y no consolidadas -que en su orden son las tobas y tefras de la cobertura-, se presentan en la Tabla 1b, y han sido tomados todos ellos de un artículo de Corpocaldas presentado el 2004 en la Revista de los 48 años de la SCIA en Manizales, firmado por la Dirección de la entidad ambiental.

Parámetros geotécnicos para el rango de valores	Cenizas Volcánicas Unidad No Consolidada	Cenizas Volcánicas Unidad Consolidada	Suelos residuales de depósitos conglomeráticos
Peso Unitario Húmedo (t/m <sup>3</sup> )	1,5-1,7	1,33	1,5-1,9
Humedad Natural (%)	25-65	>80	30-80
Pasa 200 (%)	25-50	>70	5->90
Límite líquido (%)	30-70	>100	NP->80
Límite plástico (%)	20-50	>60	NP->50
Índice plástico (%)	5-30	>40	NP->40
SUCS	SM	MH	MH-ML-SM-SP
Cohesión (t/m <sup>2</sup> )	1-3	>4	1->4
Ángulo de fricción interna(°)	30-36	25-30	20-35
Permeabilidad (cm/día)	15-85	2-14	>20

**Tabla 1b.** Tomada de Francisco José Cruz Prada. Relaciones Lluvias Deslizamientos en la Ciudad de Manizales- Revista SCIA 48 años. Manizales 2004.

- El Complejo Quebradagrande está compuesto por dos miembros: el metasedimentario y el volcánico.

- El miembro metasedimentario que presenta propiedades geomorfológicas y geotécnicas de un doble carácter, las afines a las sedimentitas y propias de las metamorfitas de bajo grado. Este complejo es el basamento de Manizales, y en macizos que afloran de tales rocas, es donde se ubican los túneles de Santa Helena y El Tablazo. Por la vía sedimentaria, los estratos de este primer miembro presentan fuerte inclinación, plegamiento y fracturamiento. Los contactos estratigráficos de limolitas, arcillolitas y lutitas, son difícilmente identificables. Esta unidad metasedimentaria presenta capas plásticas como las tres anteriores, que son las predominantes, y otras rígidas como los chert y algunas lutitas de composición silíceas. Además, entre estas capas aparecen otras rápidamente alterables de composición carbonosa, y unas más de características frágiles: las de cuarzo lechoso asociado a magmatismo residual. La permeabilidad de la unidad sedimentaria varía localmente y está condicionada por la porosidad secundaria.
- El otro componente del Complejo Quebradagrande, el miembro de origen volcánico, está constituido por lavas básicas de ambiente oceánico. Estas lavas afloran en el cauce de la Quebrada Olivares y en la vía a Neira, y sus propiedades son las mejores cuando el macizo está sano como en el primer caso; pero en zonas con tectonismo se afecta notablemente tal como se observa en la cantera de la salida a Neira, ubicada pocos km abajo del viejo Puente Olivares.
- Volviendo de nuevo al miembro metasedimentario de Quebradagrande, desde la perspectiva geotécnica el metamorfismo, aunque bajo, le imprime un doble carácter: el de la deformación de la masa rocosa y el de la consecuente alteración mineralógica. Así la roca gana densidad, reduce su porosidad primaria, se folia según la dirección de los esfuerzos y se hace más rígida en una dirección preferencial, la que normalmente se suma a la de los planos de la paleo-estratificación que aún persistan si es que estos coinciden en rumbo y dirección con los primeros. Esto ocurre cuando el metamorfismo ha sido por presión de sepultura y gradiente geotérmico, y no necesariamente por el de las zonas de dislocación tectónica dado que aludimos a rocas vecinas al Sistema de Fallas Romeral. En esta componente del C. Quebradagrande son varias las capas y también las propiedades geotécnicas, dado que entre los factores de plasticidad y rigidez aparece el material parental o protolito. Además, con la profundidad, estas rocas blandas y porosas aumentan su resistencia, si no a causa de la diagénesis, sí por la presión que reduce la porosidad y densifica la masa. También drenar el macizo conduce a un incremento de la resistencia de la roca, parámetro que en las rocas blandas crece en sentido inverso al del contenido de humedad.

- Las geoformas que ofrece el Complejo Quebradagrande, son sustantivas para el escenario del basamento donde se trazan los alineamientos, particularmente en el caso del túnel Manizales, sobre todo, por la incertidumbre de la paleo-topografía, máxime cuando la continuidad del techo de la Formación Manizales presenta dificultades en su correlación horizontal. Se pregunta si en efecto, el escalonamiento del relieve en el perfil longitudinal del túnel, a modo de pilar tectónico es o no la expresión topográfica asociada al basculamiento de bloques, o por el contrario, al no conocerse un trazo de falla bien identificado que lo corte, la unidad conglomerática de los portales del Túnel Manizales no es la misma y entonces, una y otra son eventos diferentes aunque contemporáneos, caso

en el cual el túnel cruza el macizo confinante de la Formación Manizales; es decir, a Quebradagrande, en vecindades de Fundadores, puesto que de la fotointerpretación se infiere que ésta sería la zona más probable en caso de encontrarse interfiriendo el alineamiento de cualquier túnel que cruce a Manizales con dirección N-S por este sector ( Ver: Figura 2c). Los demás túneles entre los cinco estudiados son claros. De pronto sí, en el Túnel de La Avanzada ligeramente cabe la posibilidad de interferir a mitad de camino una unidad diferente y más competente que eventualmente estuviere infrayaciendo a Casabianca.

### Columna estratigráfica en dos sectores de la Formación Manizales

Para conocer las características de esta Formación, dado que la conducción de mayor importancia será el túnel para el trasvase de las aguas del Distrito Olivares al Distrito Chinchiná, se realizó el levantamiento de sendas columnas estratigráficas, en el sector del Barrio Estrada y del Barrio Panamericana, respectivamente (Ver Anexo 2).



**Figura 1k.** Imágenes de las columnas examinadas, de la Formación Manizales, en el Barrio Estrada (Izq) y en el Barrio Panamericana (Der), dos zonas de interés para los portales de entrada y salida del Túnel Manizales. Obsérvese el color café característico de la matriz y la forma isométrica redondeada de los bloques.

*Columna del Barrio Estrada:* Esta columna se abre en una ladera, dadas las dificultades de encontrar un talud disponible para acceder al macizo fresco. La longitud de la columna es de 36,37m no continuos, pues se inició un barrido vertical con un ancho de un metro para continuarlo desplazados cinco metros al occidente, manteniendo la conexión del horizonte final del primer tramo con el inicial del segundo. Lo anterior en virtud de la aparición de un pequeño coluvión que no era objeto de la prospección. El examen de la columna así levantada enseña lo siguiente:

Desde el punto de vista granulométrico los diámetros de la columna vertical contabilizados presentan la siguiente frecuencia por rangos de diez centímetros.

Diámetro (cm)	Nº de bloques	Longitud (m)
10-20	11	2,67
20-30	11	2,54
30-40	8	2,85
40-50	7	2,86
50-60	5	2,86
>1m	4	2,16
Otros	15	7,78
Total	56	23.72

**Tabla 1c.** Frecuencia de bloques para una columna de una ladera del Barrio Estrada.

En términos de la fábrica textural, la longitud de los tramos con bloques que superan los 10cm, fue de 23,72m equivalentes al 65% de toda la columna; y el número de tramos en matriz, del 35%. No se midió la proporción de zonas clasto soportadas.

El estado de meteorización de los bloques es variado afectando especialmente a los menores de 20 cm. La mayoría de los bloques es de naturaleza ígnea andesítica. Además, se observan muy pocos bloques de granodiorita y con tamaños de hasta el decímetro. La forma dominante de los bloques es la isométrica subredondeada.

Las características de la matriz son las siguientes: zonas húmedas ninguna, tampoco afloró el nivel freático, siempre afectada por meteorización y con evidencias de contenido orgánico. Su aspecto es el de un suelo limo arenoso con contenido orgánico y de baja plasticidad.

No se observaron fracturas en el macizo, aunque los bloques embebidos en el mostraban desplazamiento por gravedad con la correspondiente deformación plástica de la matriz de la cual salían con facilidad al excavarlos con un palín.

*Columna del Barrio Panamericana:* Esta columna sobre una longitud de 42,6m metros, y adicionalmente se realizó un claro de forma horizontal en dirección occidente oriente. El levantamiento en esta zona tuvo mejores condiciones que las ofrecidas en el Barrio Estrada, dado que se trabajó sobre un cajón en corte construido para la vía y no en una ladera natural como en el otro caso.

El examen de la columna levantada así, muestra lo siguiente:

Diámetro (cm)	Nº de bloques	Longitud (m)
10-20	8	1,38
20-30	12	3,09
30-40	14	4,69
40-50	8	3,40
>1m	4	4,19
Otros	7	4,69
Total	55	21,44

**Tabla 1d.** Frecuencia de bloques para una columna de un talud en el barrio Panamericana.

Desde el punto de vista granulométrico los diámetros de la columna vertical contabilizados presentan la siguiente frecuencia por rangos de diez centímetros. Para la columna vertical, en la fábrica textural se encuentra que la longitud de los tramos con bloques mayores de 10 cm es del 50% y la correspondiente a la matriz, del 63%. No se midió la proporción de zonas clasto soportadas. El estado de meteorización de los clastos es mínimo afectando particularmente a las gravas. La mayoría de los bloques es de lavas andesíticas; se observaron muy pocos bloques de granodiorita con tamaños de varios decímetros. La forma dominante de los bloques es isométrica y subredondeada.

Las características de la matriz fueron las siguientes: zonas húmedas sobre la base del talud, donde afloró el nivel freático y por capilaridad el agua tuvo un ascenso cercano al medio metro. Además, se observó un núcleo de humedad que contrastaba con el conjunto y cuya naturaleza es posible por un sistema de porosidad secundaria que no responde a una superficie de discontinuidad dada su forma circular. La zona no presentaba caudal visible, pero cerca al lugar hay un aprovechamiento de la zona saturada que produce un gasto del orden de los 4 centímetros cúbicos por segundo, sin presión, sin coloración y sin olor.

La matriz se encontró poco afectada por meteorización, y con buen grado de consolidación y cementación. Los bloques se suspendían fuertemente por el techo, anunciando que el grado de cementación sostenía su peso y exigía golpe de martillo para despegarlo, lo que se hizo con un ejemplar de 40x30x20 cm<sup>3</sup>.

El aspecto de la matriz es la de un suelo limo arenoso con cementación, difícil de desmenuzar, aunque parte con la mano. Los fragmentos arenosos mayores bien visibles son de color blanco y textura pumítica. Se observó una línea de fracturas con tendencia horizontal en cada bloque y también en su conjunto. Es decir, la fractura avanzaba como si fuera una paralela a la vía y por su altura sugería entonces responder a una línea de voladura, pero no a una diaclasa.

En conclusión, la Formación Manizales en la zona del portal de entrada, muestra mayor frecuencia de bloques apareciendo estos con una relación 2 a 1 respecto a la matriz, allí donde la unidad se excava por un nivel inferior respecto a su techo local.

En el portal de salida, aunque la cota es menor, la unidad se excava cerca del su techo y no en su base, y por lo tanto más cerca de la F Casabianca. Ahora, a lo largo de la columna para el portal de salida, ocurre que la proporción de la matriz iguala a la de los bloques. De lo esto y otras observaciones se ha concluido que se puede asumir el RQD para la roca más fresca, del 60%. Los detalles de estos levantamientos aparecen en el Anexo 2.

### **Definición del problema**

Para definir la viabilidad técnica de un sistema de conducción subterránea adecuado, configurado por túneles de diámetros cercanos a dos metros entre las subcuencas y microcuencas del área urbana de Manizales - Villamaría, para unir las mayores y en la del norte las menores, deben considerarse aspectos geológicos y logísticos, así:

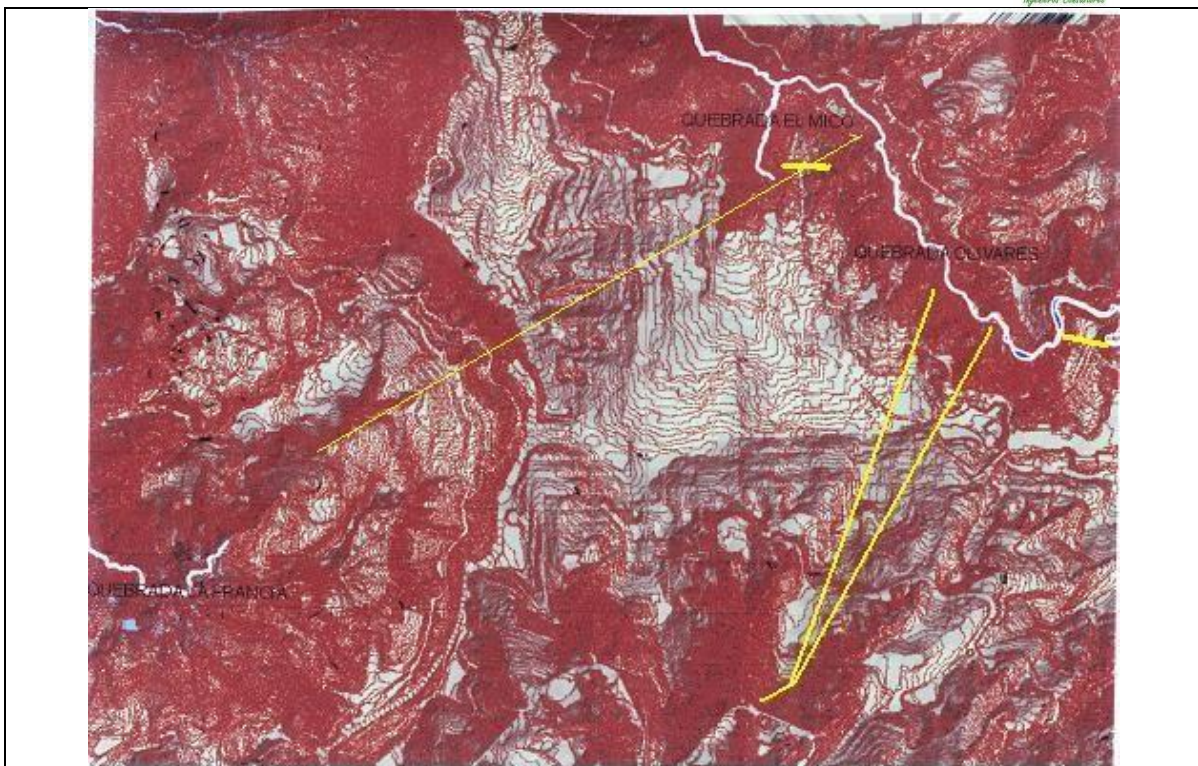
- En lo geológico, la litología y la geología estructural, buscando evitar fallas geológicas en actividad, macizos poco competentes o depósitos de suelos, y encontrar un recorrido profundo para mantener una presión confinante de roca adecuada, que le reste fragilidad al macizo y minimice los efectos hidrogeológicos en superficie, así como las condiciones litológicas que le permitan al macizo rocoso responder de la mejor manera en término de esfuerzos, deformaciones y permeabilidad, habida cuenta de que las rocas en la oferta ambiental del escenario de trabajo son blandas y de tipo conglomerático o metasedimentario.
- Para otros casos, las excavaciones más superficiales y cortas, y posiblemente construidas en menor diámetro, estarán ubicadas sobre macizos rocosos muy alterados y casi calificados en términos de suelos residuales duros, asociados a conglomerados (T. La Avanzada) o bien a metasedimentos (T. Santa Helena), que son las zonas menos profundas a excavar en este proyecto (Ver Figura 1g).

-Logísticamente, la conducción subterránea principal – El Túnel Manizales- que necesariamente tendrá dirección norte – sur, deberá buscar el centro de gravedad del área aferente, logrando con ello menores diámetros en las conducciones de alimentación que recogen las aguas de la ciudad y llegan al túnel de trasvase. Las conducciones ubicadas en el perímetro de dicha área, están sobre las frágiles laderas más pendientes vecinas a las vaguadas del Río Chinchiná y de la Quebrada Olivares.

Dentro de estas dos restricciones, la geológica y la logística, se buscará un túnel corto que facilite el acceso a los portales y que no genere escenarios de potenciales desastres, en especial en los lugares más susceptibles como lo son las zonas periurbanas ambientalmente más deprimidas, y por lo tanto más vulnerables.

De este enfoque igualmente, también depende la viabilidad económica del proyecto, la posibilidad de planear con acierto las obras dándoles un agregado que se traduzca en bienestar para los moradores y en estabilidad antrópica para el proyecto.

Las demás conducciones subterráneas que se proponen mantendrán los anteriores criterios. En efecto dos túneles cortos que se presentan son soluciones que corresponden a propuestas para otorgarle economías al proyecto y a la minimización de sus riesgos; pero ambos se localizan en diferentes escenarios sociales e incluso en medios ecosistémicos con diferentes grados, presiones antrópicas e historial de transformación.



Túneles considerados para la conducción de aguas servidas en el área de Manizales. 2006

**Figura 11l.** Túneles considerados para la conducción de aguas servidas en el área urbana de Manizales (en amarillo). No se dibujan otras opciones, ni el Túnel de El Tablazo. Imagen digital tomada a partir de la información suministrada por Aguas de Manizales.

## II- PARTE ANALÍTICA

### Alcance del estudio

El estudio general comprende varias etapas, así:

- Etapa N° 1. Se investigará y resolverá la geología para una conducción subterránea, estimando la litología y estructuras probables entre los portales y a lo largo del corredor, a partir de información secundaria y del levantamiento de los portales.
- Etapa N° 2. De ser viable la propuesta, se evaluará la etapa de prospección indirecta y directa, por métodos geofísicos y perforaciones exploratorias complementarias. Estas se señalarán, para saber de ellas en caso de que sean necesarias.
- Etapa N° 3. Si resultare viable el proyecto, se estimarán los definitivos costos de esta opción para compararlas con otras, que no son objeto del trabajo, pero que también se abordarán de forma preliminar.

El alcance de este trabajo que está delimitado justamente por lo que se señala en la Etapa N° 1, y al Túnel Manizales, se ha querido extender a cuatro conducciones adicionales que son las de los túneles de la Francia, del Tablazo, el de Santa Helena y el de la Avanzada. También a la calificación de los macizos rocosos y a otras consideraciones posiblemente necesarias.

El trabajo no se ocupa de la evaluación de las conducciones superficiales que llegan a los portales, y cuya metodología es otra, aunque sí se articula a los resultados, definiciones y condiciones que a la fecha se tienen sobre estas.

En Conclusión, con este trabajo se pretende hacer la exploración de campo de unos portales, estimar la geología de varios túneles para conducciones con base en información secundaria, calificar los macizos rocosos, estimar algunos parámetros de diseño y estimar algunos costos básicos para presentar información que facilite comparar opciones, tomar decisiones y señalar entre ellas las prioritarias como alternativas, y las variantes deseadas para estudiar en detalle.

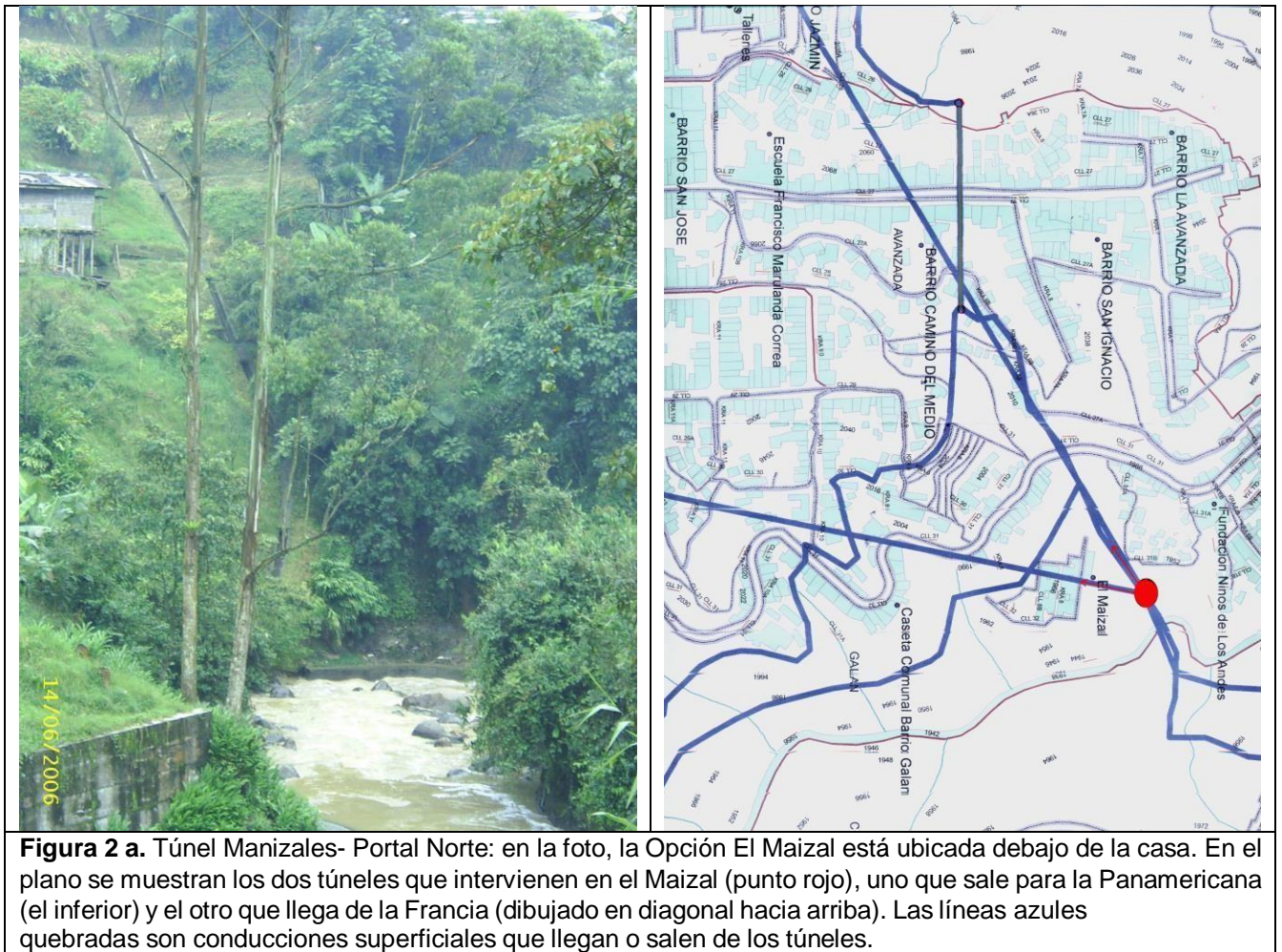
### Descripción de portales opcionales.

#### Túnel Manizales- Portales Norte y Sur

**Túnel Manizales- Portal Norte:** se estudiaron tres opciones para este portal del túnel: la más oriental en el Barrio Sierramorena y la más occidental en el Barrio El Maizal. La tercera, que es intermedia, en el Barrio Estrada. Además, el sector de El Maizal, se consideró al tiempo como Portal para el Túnel de la Francia

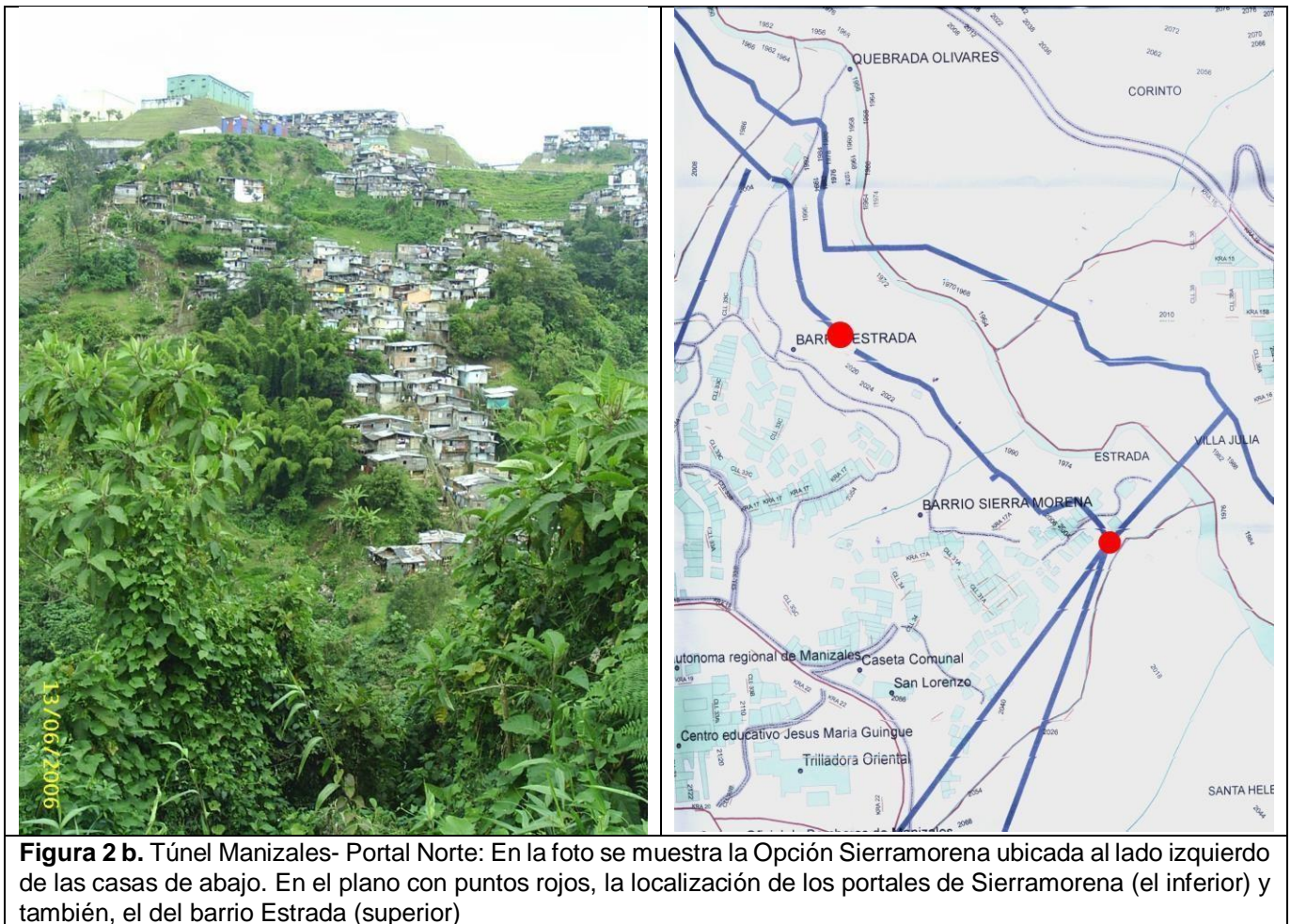
**Geología.** La litología de las tres opciones del portal norte, varía: la del Maizal está sobre una formación metasedimentaria- El Complejo Quebradagrande-, cuyos planos de foliación-estratificación dominantes, aparecen cuasinormales al alineamiento del Túnel de la Francia y cuasiparalelos al del Túnel Manizales. Esta, una arcillolita silícea, se observa en las fotografías PIC 0038, PIC 0043 y PIC 0044, buzando 50°NE. Estructuralmente, aparece una falla N20°E que se insinúa en el control del drenaje en la depresión que separa los barrios Campohermoso y La Avanzada, según se observa y deduce a partir de la cartografía suministrada por Aguas de Manizales (Ver Figura 1a y 1d), donde se muestra que esta estructura corta el alineamiento del túnel de forma favorable, 600 m adentro de dicho portal ( Ver Figura 2a).

Para los portales Sierramorena y Estrada, la litología es un conglomerado con tendencia a ofrecer una textura clastosoportada –asociada a la Formación Manizales. La matriz es de característica limoarenosa y los bloques, poco meteorizados, difícilmente presentan unidades cuarzosas; esto es, se trata de bloques mayoritariamente andesíticos, y esto define sus características en términos de dureza. Sus diámetros son del orden de los decímetros, aunque la gradación progresa hacia tamaños menores y mayores, alcanzando con dificultad en los mayores tamaños la dimensión de los primeros metros. Ambos alineamientos deben marchar hacia el Portal de La Panamericana, y no al de La Fuente ni al de Marmato, porque estos dos, que son los de la salida del túnel, caen en drenajes afectados por fallas que aparecen cartografiadas en la información suministrada por Aguas de Manizales (Ver Figura 1d y Anexo 6). El macizo del portal del Barrio Estrada presenta mejores condiciones morfológicas que el de Sierramorena en virtud de la geometría de las laderas contiguas, y avanza bajo una cobertura de roca que anuncia menos problemas si se le compara con la expresión topográfica del alineamiento partiendo desde Sierramorena. Sierramorena muestra una ladera deprimida al costado oriental del portal, pues el drenaje transcurre paralelo y próximo al túnel durante 220 m. Además, al este del Portal Sierramorena las líneas de drenaje de Sierramorena, La Renault y Castilla, que son las quebradas contiguas, en su base muestran control estructural.



Si bien el Barrio Estrada ofrece un portal franco y con posibilidades de acceso por la vía a Neira frente a Corinto, salvando la Quebrada Olivares, este alineamiento, que pasa por debajo del costado occidental de Fundadores, sugiere eventuales problemas de estabilidad por cruzar en medio de dos trazos cartografiados de lo que puede ser una misma falla sin suficiente expresión morfológica, y quedando la zona de interferencia ubicada a 460 m de este portal (Ver figura 2b). A su vez, el alineamiento que va desde Sierramorena al portal de la Panamericana, el cual cruza profundo por el costado oriental de Fundadores, se muestra libre de cruces con fallas cartografiadas, pero muestra en superficie que su construcción puede enfrentar eventuales problemas asociados a las grandes depresiones del terreno, justo al norte y al sur de Fundadores, que son las que explican el fin del reticulado urbano donde nace la Avenida Santander, la que en su momento fuera llamada El Carretero. (Ver Figura 2c)

Debe subrayarse que el techo de roca en los portales Estrada y Sierramorena alcanzan los 38m y los 24m a los primeros 50 m de recorrido, pues el talud de entrada tiene una pendiente media del 76% y del 70%, respectivamente. La profundidad máxima del túnel llega a unos 150 m y el rumbo es cercano a la dirección S70°W, desde el portal del Barrio Estrada.





**Figura 2 c.** Túnel Manizales: Opción Estrada para el portal del norte (Izq). Y vista de las dos alternativas del túnel en imagen digital, en línea blanca. Obsérvese el relieve en la parte superior, vecina a Fundadores.

**Túnel Manizales- Portal Sur:** se estudiaron tres opciones para este portal del túnel: la más oriental en el Barrio Villa Carmenza y la más occidental en el Barrio Marmato. La tercera, que es intermedia, en el Barrio La Panamericana.

**Geología.** Las tres opciones del portal sur presentan singulares condiciones litológicas: depósitos conglomeráticos con una matriz de características plásticas, que incluso llega a aproximarse en sus características a la formación Casabianca, en la vecindad de la falla del drenaje oriental, como si allí fuera material colapsado proveniente del contacto entre la Formación Manizales y la Formación Casabianca que está más arriba, pues este se observa 20 metros por arriba de la vía Panamericana en la zona del portal. Es de advertir que los bloques del conglomerado muestran mayor grado de meteorización si se comparan con los del Barrio Estrada y también, que los bloques granodioríticos presentes en esta Formación, es algo significativa pero no dominante. Los tamaños medios igualmente son del orden de los decímetros,

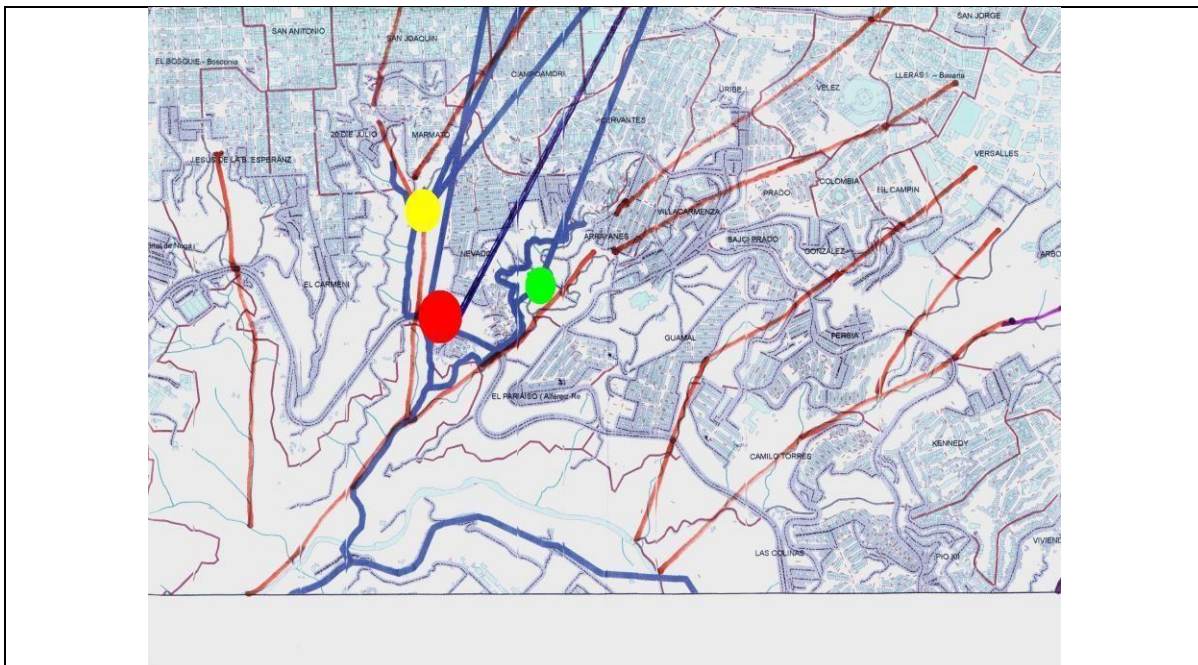
El portal de la Fuente queda ubicado sobre la reconocida Falla San Esteban cartografiada sin nombre en la información de Aguas de Manizales; además la escasa carga litostática que ofrece está representada por un relleno artificial que adelanta la empresa EMAS de la Ciudad, sobre la vaguada de la quebrada que separa los Barrios los Andes y el Paraíso, aguas debajo de los Arrayanes. En este relleno se han construido áreas de recreación que señalan lo que podría hacerse sobre la Q Olivares en el acceso al portal de entrada, para accederlo, ubicar los escombros y llevar beneficios a las comunidades de los Barrios Sierramorena y Estrada.

El portal del Barrio Marmato ofrece un alineamiento de un túnel cuasiparalelo a los dos trazos de una falla alineados y que están cartografiados en la información suministrada por Aguas de Manizales. Logísticamente no tiene las ventajas del Portal Panamericana. Además, el portal del Barrio Marmato presenta un macizo de regular conformación en virtud de la geometría del drenaje circundante, el que avanza desfavorablemente sobre el terreno en los primeros 200m por encima del alineamiento del túnel Manizales.

El Portal Panamericana queda localizado sobre la variante norte de la Ciudad y se ha ubicado a prudente distancia de la Falla San Esteban, la misma que separa los barrios Los Andes y El Paraíso. También el Portal Panamericana está a distancia de la falla que explica el drenaje al sur del Barrio Marmato, falla que está cartografiada en la información de Aguas de Manizales y que se dirige hacia el Puente Olivares.

El macizo rocoso del Portal Panamericana, en caso de túnel recto -pues se sugiere un desvío del túnel cerca de este portal de salida-, tiene una pendiente menos pronunciada que la del Portal Estrada y anuncia movimientos superficiales; su valor medio en los primeros 50m alcanza el 54% y la carga litostática 32m, en esa misma distancia; además en estos metros el estado del macizo aparece deficiente: el nivel freático aflora pocos metros por arriba del nivel de la Panamericana y los deslizamientos en masa son casi planares (Ver Figura 2f y anexo 2). Como el talud frontal está fallado, se sugiere un desvío hacia el occidente, pero sólo al final del alineamiento, para obtener un trazo no recto. O en su defecto un falso túnel hasta los primeros 50 m adentro, estructura que ayudaría para que el túnel alcance el macizo en condiciones más adecuadas, pero no iguales a las del Portal Sierramorena, pues el ambiente tectónico periférico intenso y la litología más superficial de la unidad litológica de esta roca en este portal sur, es más desfavorable que en el del norte.

Es de advertir que no se encontró en el Portal Panamericana la presencia de suelos blancos expansivos, ni siquiera en las vecindades de este lugar; circunstancia relevante cuando se deba abordar el problema de estabilidad en la Formación Casabianca, muy vecina al techo del macizo en la zona del portal. También que el color café de la matriz del macizo para el portal, es propia de la Formación Manizales.



**Figura 2 d.** Túnel Manizales- Plano con las opciones de sitios para el portal de salida en el Sur, para el Túnel Manizales: en amarillo Marmato, en Rojo la Panamericana y en Verde Villa Carmenza. Las rectas azules son posibles alineamientos del Túnel Manizales; la línea azul sinuosa, es la conducción superficial para que el flujo siga hacia la planta de tratamiento. En naranja, las fallas que afectarían los portales laterales.



**Figura 2 e.** Túnel Manizales- Portal Sur: Fotos de la Opción en Marmato, ubicada en el tercio inferior de la foto (Izq) y de la opción en Villa Carmenza que se ubica bajo una escombrera (Der). Las dos opciones coinciden con trazos de fallas geológicas de fuerte expresión morfológica: La Falla Manizales Aranzazu y la Falla San Esteban o Cementerio.



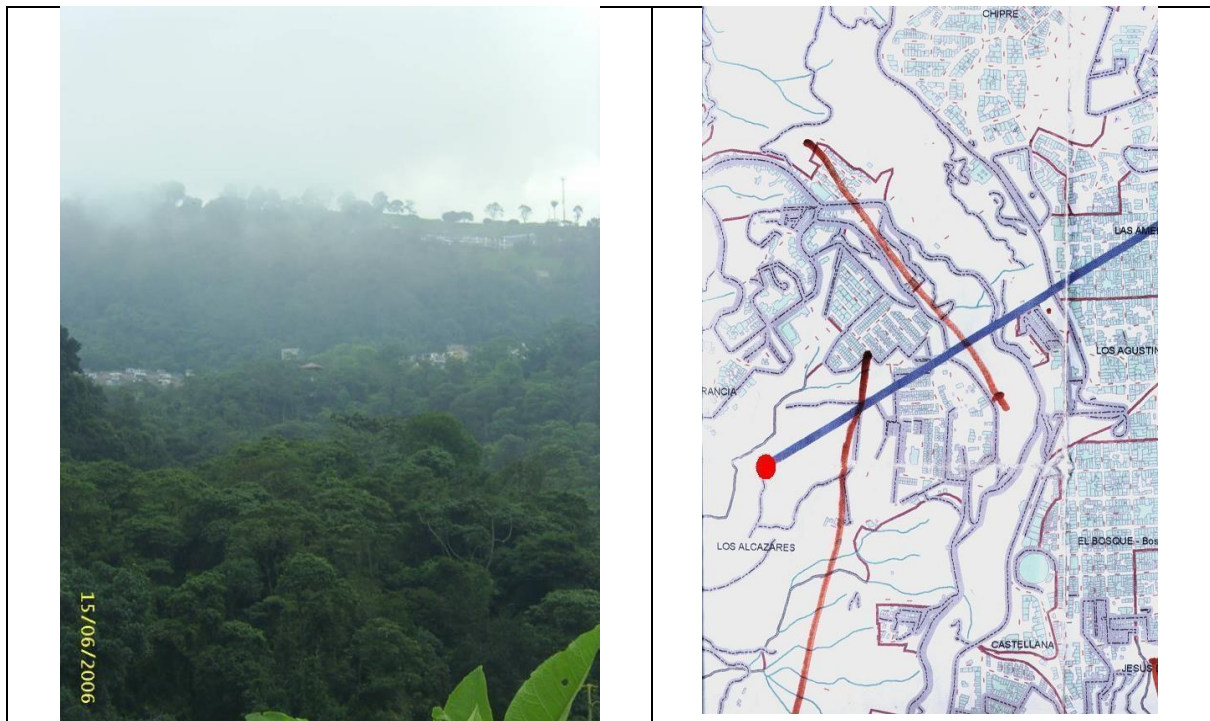
**Figura 2 f.** Túnel Manizales- Portal Sur: Opción Panamericana. El macizo rocoso presenta mejores condiciones para la salida del túnel hacia el costado occidental, por el tercio izquierdo de la foto. Esto supone que el túnel debe quebrar su alineamiento recto, una centena de metros o más, antes de salir.

**Túnel la Francia: portales Los Alcázares y El Maizal:** Se estudió la zona para el portal de cada extremo, manteniendo el alineamiento como única opción y también los portales en este caso. El alineamiento que sale de La Francia con rumbo N30°E y cae unos 40 m al norte del barrio el Maizal, por la cota 1935.

**Geología.** El portal se ubica en el Ecoparque los Alcázares próximo a la Quebrada El Arenillo, y por lo tanto el alineamiento del túnel de la Francia cruza el escarpe tectónico que separa a Chipre de la Francia, aunque de modo cuasinormal y en un tramo de 240m localizado a una distancia que varía desde 260 hasta 600m, medidos desde dicho portal. Entretanto, otra falla hace lo propio a 670 m del portal del Maizal. La litología del portal Los Alcázares es la Formación Manizales, pero la integridad del macizo para éste, queda en duda dado que parte sustancial de la ladera puede ser un verdadero coluvión, o comportarse como tal, de acuerdo a la historia geológica, a la tectónica local, y en parte ala geomorfología y al ambiente del lugar: las posibilidades de fenómenos de reptación a largo plazo, son evidentes, pues en cualquier caso, el macizo estaría profundamente fracturado, en ambiente húmedo y sobre basamento de piso inclinado o escalonado. En la cartografía de Aguas de Manizales se señalan las estructuras tectónicas que delimitan el escarpe tectónico señalado.

Es evidente que el escarpe de Chipre anuncia el levantamiento de Manizales por compresión ya en el cuaternario, y no el hundimiento del bloque de La Francia; de ahí que afloren en lo alto y en los taludes los conglomerados. Siendo así, las fallas son inversas y sus labios deben estar muy fracturados, lo que no ocurriría en el caso de fallas normales. Los sistemas compresionales antes de la ruptura, acumulan más energía que los sometidos a fuerzas de distensión, y por lo tanto se hace más intenso el fallamiento, y éste es el caso de La Francia.

El portal oriental de este túnel, localizado en el Barrio el Maizal, ha sido descrito en una sección anterior, cuando se describieron las opciones del Túnel Manizales. El ambiente tectónico para este túnel en el portal y en sus primeros metros, es desfavorable.



**Figura 2 g.** Túnel la Francia – Portal Occidental: Opción Alcázares. En la foto, se advierte bien el escarpe tectónico que explica el levantamiento de Manizales. El portal estaría casi en el centro de la fotografía. En el plano se muestra el túnel en azul, dos fallas que lo cruzan dibujadas en color anaranjado y el portal con el punto rojo intenso.

**Túnel El Tablazo: Portales La Turbina y El Aventino.** Se estudió la zona para los portales de cada extremo, como únicas opciones para este túnel, cuya finalidad es la integración de todas las aguas de residuales en el área de influencia del proyecto, incluso las de los poblados principales de Chinchiná y Palestina con una planta en el nivel inferior de la Quebrada el Rosario.

**Geología.** La del túnel es también la de los dos portales: se trata de metasedimentos del Complejo Quebradagrande, con planos de estratificación – foliación dispuestos casi perpendiculares al alineamiento del túnel y cuyo buzamiento va hacia el norte. La mayor profundidad del túnel es del orden de los 150m. Mientras el túnel presenta un rumbo N30°W, la disposición del macizo en un afloramiento vecino al portal de salida, dio estos resultados: (N10°W; 58°NE) y (N16°W; 57°NE).

El eje del túnel se dispuso en el labio deprimido de la falla del Tablazo; esto es, al occidente de la silleta de falla. Así que la falla del Tablazo, satélite o trazo del Sistema Romeral, transcurre unos 100m al oriente del túnel y paralelo a él, medidos en el curso vecino del Río Chinchiná donde se advierte el control estructural del drenaje.

La Cárcava del Tablazo queda ubicada en el labio del bloque levantado de la zona de falla, y sobre éste se observa la litología que debe ofrecer igualmente el macizo rocoso del túnel, donde los metasedimentos grafitosos – carbonosos, asociados a depósitos orgánicos en ambientes anóxicos, son las estructuras más vulnerables por su alta susceptibilidad a la meteorización. Estando en un escenario de falla, podría presentarse un material milonitizado. La prospección deberá verificar el estado del labio hundido en la zona del túnel, para prevenir lo considerado en el penúltimo aparte anterior del Túnel de La Francia.

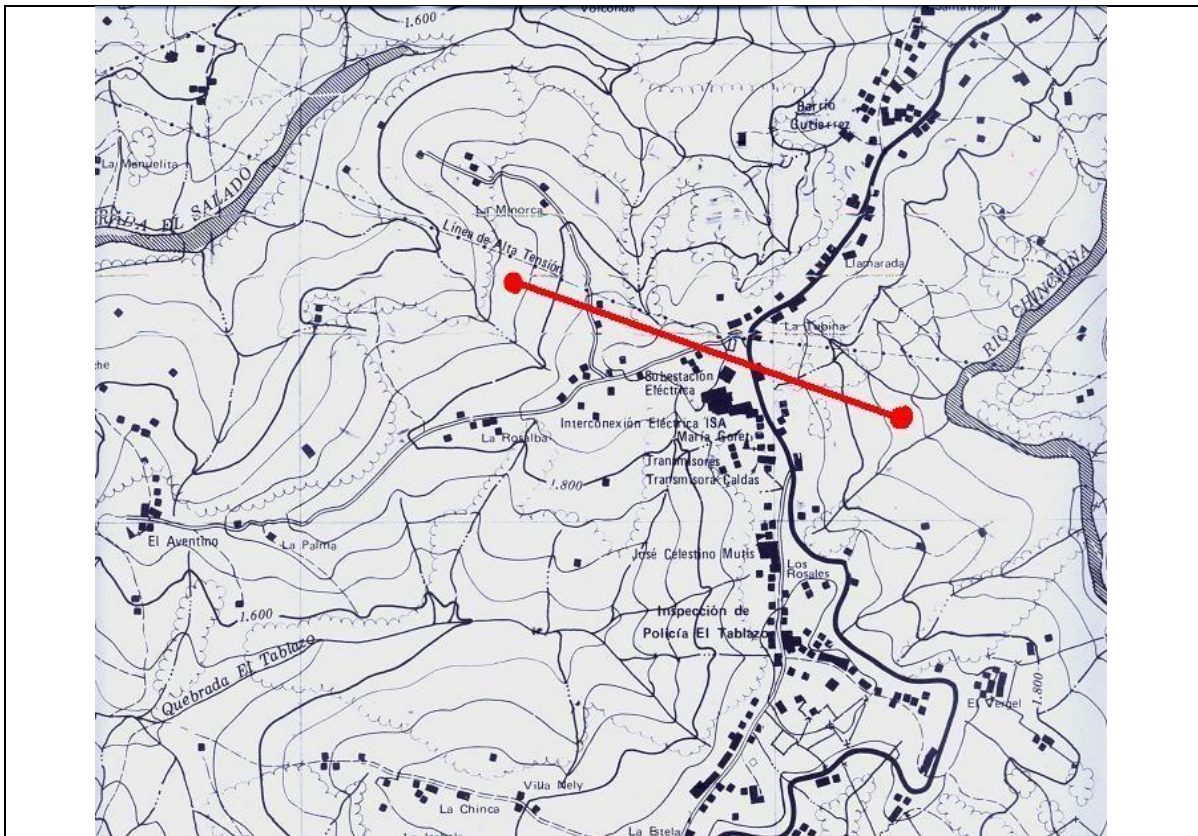
El portal norte, denominado El Aventino, ofrece una topografía con una cabeza hidráulica disponible cercana a los 200m, caída susceptible de ser aprovechada para generación hidroeléctrica con una unidad Pelton ubicada en la base de la Quebrada el Rosario, como beneficio adicional del proyecto.

Así procedería cuando más adelante se logre resolver la inestabilidad de la Cárcava del Tablazo, en virtud de los problemas por los sedimentos aportados a la Quebrada El Rosario, lugar donde continuaría la conducción después de este aprovechamiento.

La potencia a generar en kw está dada por  $P=8QH$ , siendo Q el gasto en  $m^3$  y H la cabeza en m. El 8 es el producto de la gravedad por la eficiencia. El costo kw estaría del orden de 2000 US por kw instalado y la energía comercialmente se valoraría a unos 3 centavos de US kw/hora.

El portal sur ubicado en ladera la Turbina, que es la entrada del túnel, aparece en medio de dos drenajes. Esta ladera requiere prácticas de conservación, pues algunos pequeños entallamientos anuncian la fragilidad de la misma a la acción de las aguas de la vía, en sendos drenajes. Las pendientes de las laderas en las zonas de los portales son: 77% sobre la ladera del Aventino y 45% sobre la de la turbina.

Para construir ambos portales se ofrecen buenas condiciones logísticas, tanto por los accesos que ofrece la vía del Tablazo para alcanzar la parte alta del macizo rocoso, como por los accesos inferiores para llegar a ellos por el río Chinchiná y por la Quebrada el Rosario respectivamente, lo que se deduce al observar vías veredales en la base de los mismos.



**Figura 2 h.** Túnel Tablazo: Portal de entrada, La Turbina y Portal de salida El Aventino. Longitud 830 m, profundidad máxima 150 m. Además permite el aprovechamiento hidroeléctrico para generar cerca de 1200 kw antes de llegar a l sector del Rosario.

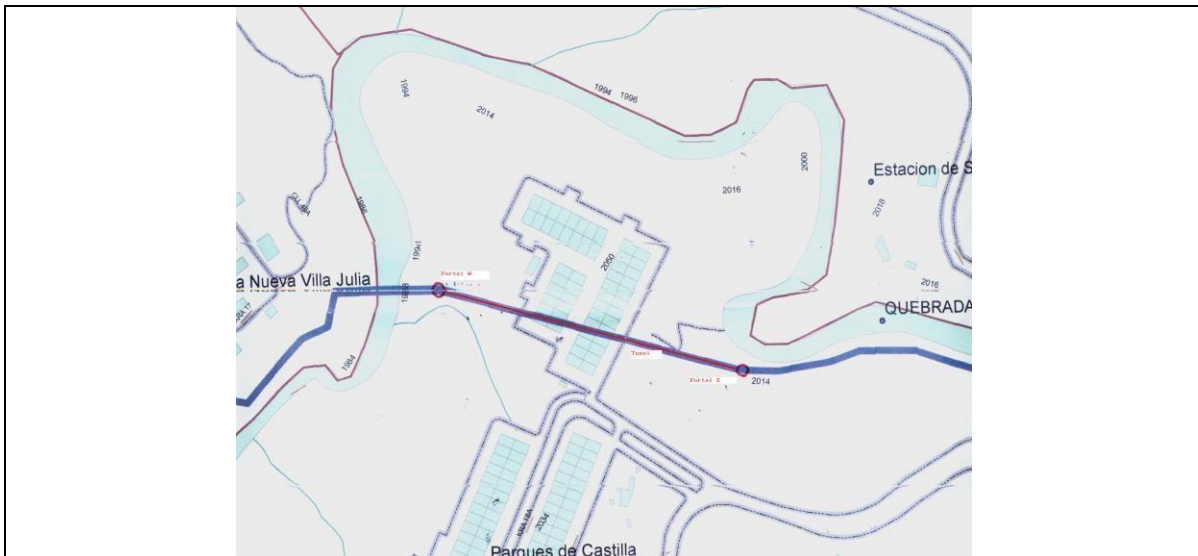


**Figura 2 i.** Macizos rocosos para el Túnel Tablazo: Portal de entrada La Turbina (Izq) y Portal de salida El Aventino ( Der)

### Túnel Santa Helena: Portales Oriental y Occidental.

Este túnel de menor dimensión transcurre por un macizo rocoso con una longitud de 180m, en cuya superficie se ubica una urbanización de estrato 4 y de unos cinco años de construcción que continúa en vía de desarrollo.

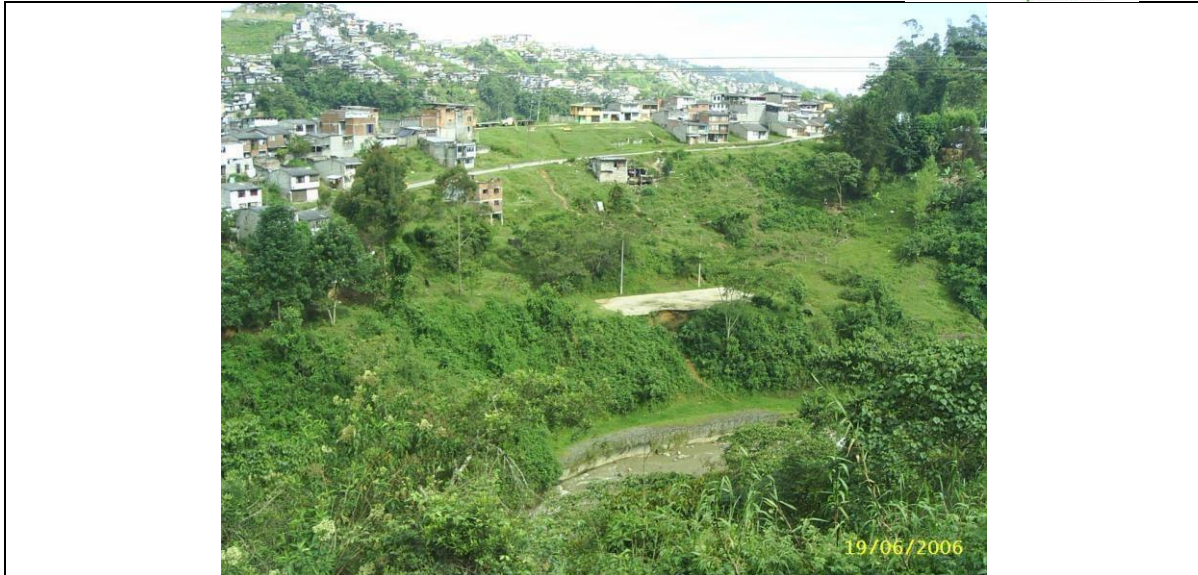
**Geología.** El macizo rocoso pertenece al Complejo Quebradagrande y los planos de estratificación – foliación, se muestran cuasiperpendiculares al eje del túnel, con planos de buzamiento hacia el oriente. La altura del macizo sobre el túnel alcanza los 50m y tiene como cobertura la Formación Casabianca. Mientras el túnel tiene un rumbo N20°W. A su vez, las discontinuidades primarias del macizo, medidas en un afloramiento, en rumbo y buzamiento dieron estos valores: (N50°E; 45°SE); (N47°E; 47°SE); (N47°E; 60SE); (N47°E; 44°SE) y (N24°E; 47°SE), las que se pueden considerar muestran la tendencia general de las estructuras en el macizo.



**Figura 2 j.** Túnel Santa Helena: Longitud 180m. Rocas del Complejo Quebradagrande y profundidad unos 40 m. Se recomienda desviarlo corriendo hacia el sur el portal de salida y prevenir localmente la socavación de la quebrada Olivares. Obsérvese el ángulo de ataque de la quebrada en el portal de entrada, y el fuerte control estructural en los tramos SN y NS de la quebrada, asociados a la litología del basamento y a la tectónica local.

Debe advertirse que la quebrada tiene un frente de ataque en el talud del portal oriental donde resulta repellido gracias a la actitud del macizo rocoso. Las aguas de aquella derivan hacia el norte, salvan el macizo y retoman su curso hacia el oriente, para quedar nuevamente orientadas por un control estructural N-S, 280m más abajo. Es aquí en este último trazo del drenaje, donde se ubica el portal occidental del túnel Santa Helena.

Los portales se ubican en dos zonas de control estructural que son también laderas de la Quebrada Olivares y la inclinación de la ladera oriental es del 80% y de la occidental el 71%. Aunque este túnel no está afectado por fallas, según la cartografía suministrada por Aguas de Manizales aparece un trazo estructural que puede explicar el talud en movimiento del Barrio Villa Julia. Además, la Quebrada Olivares con sus controles estructurales exhibe obras para prevenir la socavación lateral, tanto en Villa Julia como en Santa Helena.



**Figura 2 k.** Túnel Santa Helena: Al frente del portal occidental, se observa el barrio Villa Julia, ubicado sobre una zona inestable. Esta coincide con una pequeña falla geológica, la que se aparece en las Figuras 1a y 1d. Obsérvense las evidencias de la inestabilidad en la morfología, pequeños movimientos de masa y pocas ruinas de casas en lotes, además de las necesarias obras de la quebrada Olivares.

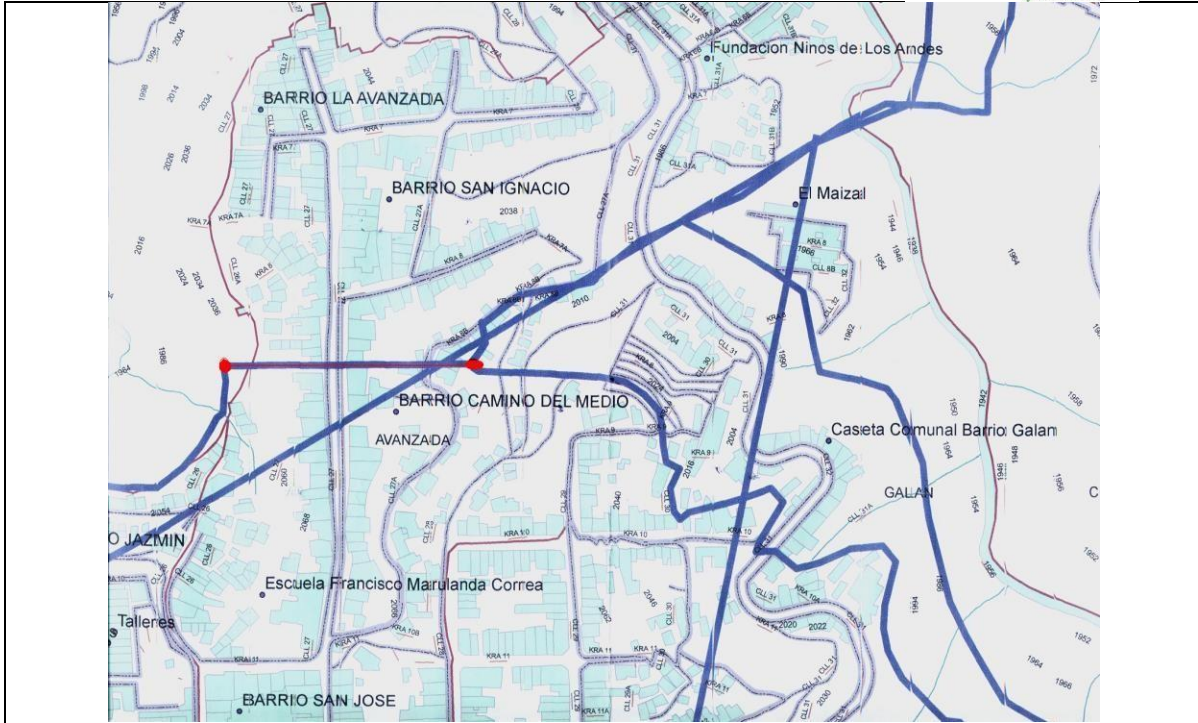
#### **Túnel La Avanzada: Portales oriental y occidental**

Este túnel evita las circunstancias de una conducción a media ladera con un recorrido problemático por la ocupación del suelo con propósitos residenciales en un ambiente no planificado por habitantes de estrato uno. El rumbo del túnel es EW y su mayor profundidad alcanza unos 35m.

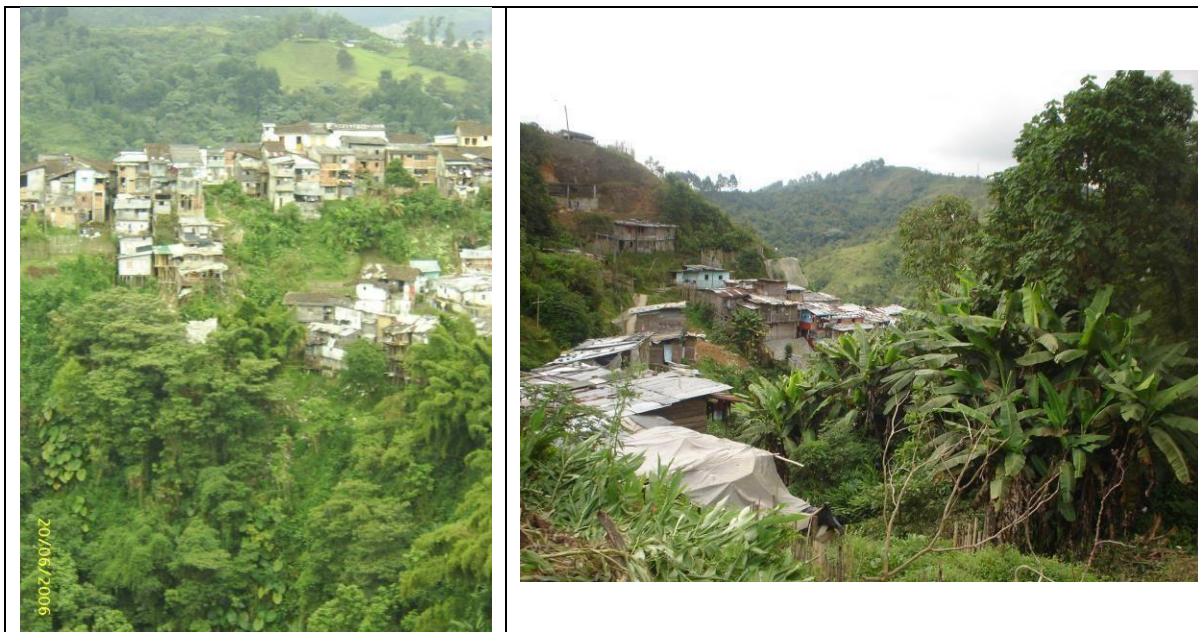
**Geología.** El macizo rocoso del pequeño túnel, es de la Formación Casabianca: un conglomerado saprolitizado en el que eventualmente se encuentran bloques parcialmente descompuestos. La matriz es de características plásticas y, salvo en situación de suelos blancos expansivos – que no se encontraron en el entorno- , su estabilidad y trabajabilidad son importantes. La pendiente de la ladera oriental es del 70%, mientras la de la ladera occidental sube al 135%. Según la cartografía suministrada por Aguas de Manizales, este túnel no está afectado por fallas.

El portal oriental ofrece las mejores características logísticas pero las peores en términos de uso del suelo, pues el lugar presenta viviendas en el entorno del portal y en el lecho de una vaguada, además de taludes tratados por inestabilidades asociadas a factores antrópicos y donde el agua es definitivamente el factor detonante.

El portal occidental de este túnel se propone sobre una ladera más protegida que la anterior, gracias a un cinturón de viviendas que cierra el paso a sus niveles inferiores. Este portal quedaría entonces sobre potreros o solares donde no hay circulación abierta. Se recomienda desplazarlo hacia el sur.



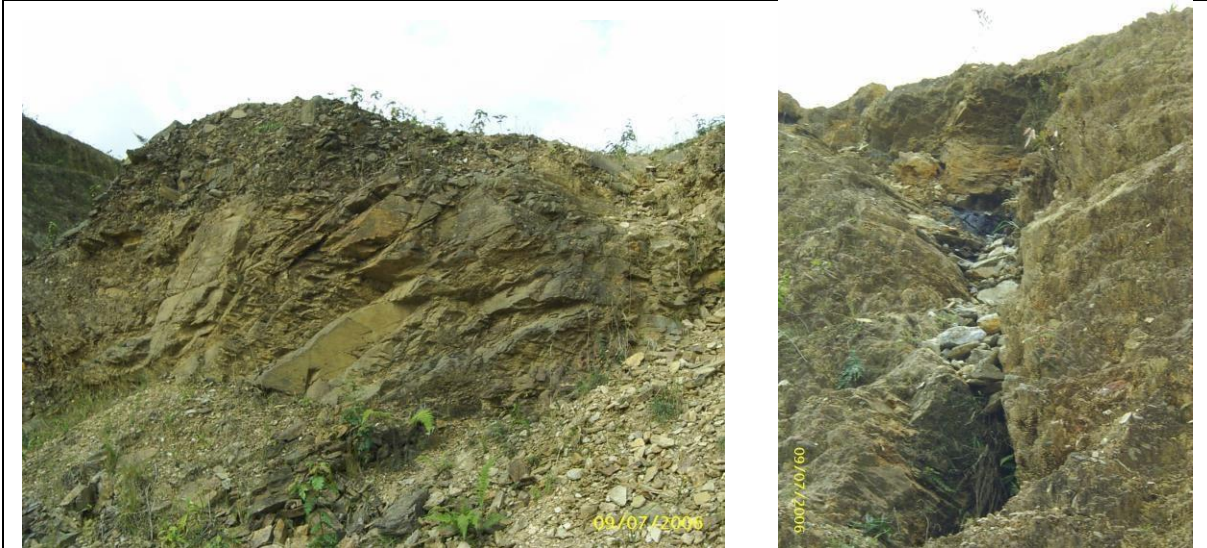
**Figura 2 I.** Túnel La Avanzada: portal de entrada al costado occidental o punto rojo del lado izquierdo; y portal de salida al lado oriental o punto rojo del lado derecho. El macizo superior está conformado en la Formación Casabianca y el túnel resuelve una conducción por el sector norte, bastante problemática. El portal occidental se desplazará un poco hacia el sur, para mejorar las condiciones logísticas de la obra.



**Figura 2 m.** Túnel La Avanzada: Portal occidental o de entrada visto desde Las Vallas (Izq), y vista desde el portal oriental mirando aguas abajo el entorno inmediato (Der).

### Características geomecánicas de las rocas

El tipo de túneles de los cuales nos ocupamos está definido por las siguientes características: se trata de túneles de pequeño diámetro en dos clases de rocas blandas, una de tipo conglomerado (Formación Manizales o Formación Casabianca) y otra y foliada (Complejo Quebradagrande). Ver Figuras 2n, 2ñ y 2o.



**Figura 2n.** Macizos en metasedimentos del Complejo Quebradagrande. Talud de la parte alta al sur de la Sultana. La tendencia a las formas en lámina y la fuerte inclinación sin llegar al volcamiento, están aquí bien representadas, pero no lo están las variaciones litológicas. El intenso fracturamiento es apenas una tendencia de valor local y una evidencia de la baja competencia de la roca.

Las siguientes son las características geotécnicas de los macizos rocosos, cuando éstos interfieren las formaciones Manizales y Casabianca, y al Complejo Metasedimentario.

La Formación Manizales que se desarrolla en facies sedimentarias alternas y variadas, muestra en los puntos de interés para este trabajo, bloques con diámetros del orden de los decímetros y una matriz limoarenosa o arenolimosa, de permeabilidad baja a moderada, según el caso; además los bloques tienen una gradación aceptablemente buena, por lo que la densidad es relativamente alta o media, y estadísticamente el depósito aparece según el caso, con textura casi clastosoportada o matriz soportada, de acuerdo al lugar. En nuestro caso, aludimos al túnel Manizales y las condiciones favorables de la doble alternativa aplican para su portal norte.

Llama la atención que siendo la cota de este portal de entrada en Olivares superior a la del Portal Panamericana que es de salida, en casi cuatro decenas de metros, el macizo rocoso ofrezca al norte la base de la Formación Manizales y al sur su techo. Entonces, ¿por qué no existe alineamiento estructural E-W cortando el eje del túnel? Además, para el túnel Manizales, deberá tenerse en cuenta esto y la mejor calidad del macizo en el portal de entrada que en el de salida.

Sobre la calidad del macizo, aunque por su condición sedimentaria pareciera deficiente, otros hechos como la considerable altura de los taludes en el escarpe de Chipre, la Francia y el de la parte occidental de la Quebrada Olivares, señalan lo contrario. Cuenta en esto su origen torrencial vulcanoclástico, bajo nivel de alteración, el grado de consolidación y la cementación, aunque sea de bajo grado. Sobre el drenaje de la Formación Manizales, la favorecen, además del fallamiento y la profundidad del drenaje mayor, el efecto de capa sello de la Formación Casabianca que losuprayace.



**Figura 2ñ.** Formación Manizales: en la banca del FFCC por Villamaría, (Izq) y en la Panamericana (Der). La proporción matriz contra bloques, el color de la matriz, y los tamaños dominantes como las formas isométricas subredondeadas, están bien representadas.



**Figura 2o.** Formación Casabianca: aunque la clasificación da esta unidad como roca Clase V, realmente debería calificarse Clase VI. Esta imagen muestra un estado más alterado de lo que se espera de esta unidad. A la izquierda, afloramiento en Villa Carmenza Casabianca donde muestra un suelo residual que ilustra bien su origen conglomerático. A la derecha, los suelos blancos expansivos en el sector de San Rafael.

Para las disyunciones, en virtud de la deficiencia en la información el modelo a seguir es el que presenta Belousov en su texto Geología estructural, cuando comenta en los depósitos lávicos, cómo se desarrollan aquellas durante su solidificación a causa los esfuerzos de tensión dependiendo su geometría de las características del material y de los planos de mayor tensión; de similar manera a las de los yacimientos lávicos que son preferentemente de forma hexagonal y con dirección perpendicular a las ondas de enfriamiento, asumiremos se presentan las disyunciones sedimentarias por contracción de la masa durante su consolidación en este caso, aunque éstas tendrían también la tendencia a formar bloques cuando los depósitos resulten de menor potencia. Además, si el yacimiento es de textura entrelazada, es evidente que la rugosidad es elevada y no lisa como sí ocurre en las disyunciones tectónicas, puesto que en nuestro caso los bloques no se cizallan y sí se separan por la tracción generada durante la retracción de la masa, al producirse una fractura intergranular como resultado de la menor resistencia ofrecida por la matriz, en comparación con la de los bloques (Ver Figura 2r). En consecuencia, el número familias de discontinuidades genéticas para estos conglomerados de naturaleza poligénica es de 4, así: 3 en un plano cuasivertical, y 1 más perpendicular a ellas con disposición cuasi-horizontal y que es el de la estratificación.

### **Análisis fotogeológico estructural**

Con el objeto de valorar la información de la cartografía estructural disponible y de buscar una explicación a las preguntas surgidas sobre las características del macizo rocoso del Túnel Manizales, se hizo una valoración fotogeológica de las estructuras del orden regional que alcanzan la zona de estudio, centrando la atención en el sector urbano de Manizales. Existen trazos estructurales no comunes entre las diferentes fuentes consultadas, y eso es lo propio de la ciencia, donde la visión del mundo es diferente para cada observador, pero donde el conocimiento es acumulativo (Ver anexo 6).

El material a contrastar es el de lineamientos estructurales de Manizales suministrado por la Empresa Aguas de Manizales, y los trabajos de Naranjo y Ríos y de Velásquez y Hermelín, citados en la bibliografía, y el material utilizado para esta actividad fue un conjunto de 3 pares fotográficos con las siguientes denominaciones y características.

- Línea de vuelo C-2275 fotos N° 66 y 67 a escala aproximada 1:22500 del año 1987.
- Línea de vuelo C-2277 fotos N° 40, 41, y 42 a escala aproximada 1:3000 del año 1987.

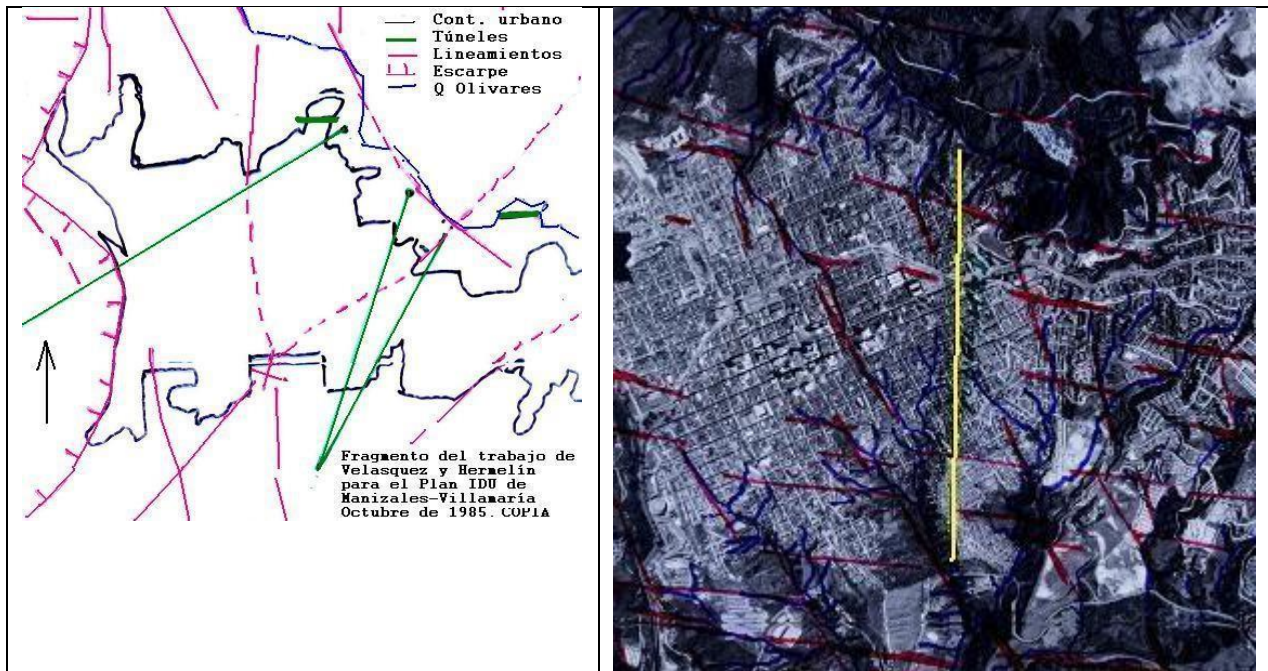
Por razones metodológicas, se usaron estas fotografías de escala regional suficiente, para el fin que se persigue y para cubrir la zona de mayor interés: la del Túnel Manizales.

El resultado del trabajo de fotointerpretación que aquí se presenta, corresponde a un modelo teórico que para el efecto, es el de identificar los lineamientos que respondan a un patrón de fracturamiento bidireccional, para encontrar con este los rasgos morfotectónicos correspondientes y compararlos con los lineamientos considerados en la zona del proyecto.

Los resultados son los siguientes:

Las direcciones del patrón observadas en las fotografías, son para este caso, N - S y N45°E. Este patrón responde a los esfuerzos de un sistema compresional E-W, el mismo que explica el levantamiento de Manizales observado en el escarpe de Chipre, al costado occidental de la ciudad.

Evidentemente los campos generales de esfuerzos producen sistemas de fracturas con tendencias generales, las que, en virtud de la heterogeneidad de las unidades geológicas y de la presencia de otras fuentes de esfuerzos locales, generan variaciones entre las fracturas de un mismo patrón. Las intrusiones ígneas, por ejemplo, pueden generar estos disturbios.



**Figura 2p.** Copia adaptada del plano con lineamientos estructurales según Velásquez y Hermelín ( Izq) y fotografía con los trazos del patrón bidireccional de lineamientos en la zona de estudio dibujados en rojo ( Der). Obsérvese en ambas imágenes la situación del Túnel Manizales, que en el plano aparece en verde sus dos opciones formando una V, y por el centro de la foto como una línea recta amarilla y vertical.

Respecto a la incidencia de los lineamientos identificados con el patrón bidireccional, sobre la zona del proyecto, y cuyo resultado se consigna en los anexos del trabajo, se concluye lo siguiente:

- Hay lineamientos no explicados en el trabajo de Aguas de Manizales, cuya dirección es N30°E y cuyos trazos van paralelos al Túnel Manizales de la alternativa 2. Estos trazos estructurales dejan un claro por el cual transcurre el alineamiento del Túnel Manizales de la primera opción.
- Entran al sistema los lineamientos estructurales con dirección N45°W aportados en este estudio, aunque con carácter propositivo, y los cuales cortan las dos alternativas del Túnel Manizales, en cuatro partes por lo menos. Esto podría explicar la hipótesis ya mencionada de un posible bloque levantado en el sector de Fundadores.
- Con relación al trabajo de Naranjo, este estudio coincide con la identificación de un trazo que responde al patrón con dirección N45°W, el cual corta transversalmente las alternativas del Túnel Manizales en el sector de Fundadores.
- En el trabajo de Velásquez y Hermelín aparece un trazo punteado (inferido) con dirección N45°E que cruza la primera alternativa del Túnel Manizales, el cual sugiere que los dos trazos discontinuos de la información de Aguas de Manizales, podrían tener continuidad. El estudio que aquí se presenta no explica ese lineamiento. Tampoco aparece el mismo rasgo en los trabajos de Aguas de Manizales ni en el de Naranjo.
- Del sistema N – S, donde la Falla Manizales Aranzazu es común para todos, entraría un alineamiento no considerado cruzando el sector de fundadores y por lo tanto a las dos

alternativas del Túnel Manizales. Solo que la expresión topográfica de este rasgo se pierde en la zona urbana vecina a Fundadores por donde cruza el túnel.

- Los túneles pequeños no resultan afectados por ninguno de los alineamientos presentados en el conjunto de los estudios. El Túnel del Tablazo quedó en el margen de la zona detallada y por lo tanto no será comentado. Igualmente, el Túnel de la Francia, presentaría dificultades asociadas a los dos sistemas de fallas y con mayor dificultad en los tercios extremos.

### Clasificación de los macizos

Intentando clasificar los macizos como cuerpos fisurados, para obtener una idea de su competencia estructural, con fundamento en el denominado Índice de Calidad de Túneles NGI, cuyo valor numérico, según Barton Lien y Lunde, está dado por Q, mediante la siguiente expresión:

$$Q = (RQD/J_n) (J_r/J_a) (J_w/SRF)$$

Donde los 6 parámetros para Q, son:

- RQD es el parámetro o Índice de calidad de la roca (Deere) valorado de 0 en las muy malas, hasta 100 en las rocas sanas y excelentes.
- J<sub>n</sub> es el parámetro que califica el número de familias de discontinuidades, valorado entre 0,5 si casi faltan, hasta 20 para multitud de ellas.
- J<sub>r</sub> es el parámetro que califica la rugosidad en las fisuras y varía de 4 si es óptima la rugosidad o discontinua la fisura, hasta 0,5 si es un reliz de falla.
- J<sub>a</sub> es el parámetro que variando de 0 a 12, califica el relleno de las discontinuidades. Éste vale 1 en paredes inalteradas, y 4 en paredes rellenas.
- J<sub>w</sub> es el parámetro que mide la presión de poros y varía desde 0 cuando las fisuras están con flujo continuo a presión, hasta 1 si están casi secas.
- SRF que es el Factor de reducción de esfuerzos. Se valora entre 0 y 20. Vale 20 en rocas muy expansivas y activas. Vale 10 si hay múltiples zonas de debilidad. Vale 1 si la roca es bien competente y el esfuerzo mediano; de ser alto valdría 5 y de ser bajo 2,5.

Simplificando, el Parámetro Q de Barton depende de 3 factores así: el Tamaño de los bloques ((RQD/J<sub>n</sub>), la Resistencia al esfuerzo cortante entre bloques (J<sub>r</sub>/J<sub>a</sub>) y los Esfuerzos activos al interior del macizo (J<sub>w</sub>/SRF)

Parámetro Q de Barton								
Roca de	RQD	J <sub>n</sub>	J <sub>r</sub>	J <sub>a</sub>	J <sub>w</sub>	SRF	Q	Clasificación según Barton
F Mz	60	12	3	2	0.8	7	0,825	Muy mala
F Cb	6	20	1.3	6	0.4	12	0,002	Excepcionalmente mala
C Qg	30	15	0,5	4	0.2	5	0,011	Extremadamente mala

**Tabla 2a.** Valores asignados a los factores para obtener el parámetro Q de Barton, en las rocas de los macizos en estudio.

Para la Formación Manizales, si se hiciera una analogía con un macizo fracturado, para obtener el Índice NGI, el tamaño de los bloques sería de 5, la resistencia al esfuerzo cortante entre bloques, cercano a 1,5 y los esfuerzos activos del orden de 0,11. Así el valor de Q llegaría a 0,825.

La Formación Casabianca se muestra como un conglomerado saprolitizado, en donde el Índice NGI podría ser calculado con tamaños de bloques de 0,3, una resistencia al cortante entre bloque de 0,22, y los esfuerzos activos del orden de 0,03; con esto el valor de Q llegaría a 0,002, una cantidad que anuncia una roca inferior a la anterior en dos órdenes. Además, Casabianca muestra localmente suelos blancos expansivos cuya génesis puede asociarse a limos que son el resultado de la alteración de rocas en un clima húmedo mal drenado, y éste seguramente fue el ambiente de la era glacial.

El Complejo Quebradagrande de naturaleza metasedimentaria muestra variaciones significativas donde se intercalan lavas básicas con espesores de decímetros a metros, chert, limolitas y arcillolitas de similar potencia, y cuyo fracturamiento depende en sumo grado del nivel de disturbio y grado de volcamiento o plegamiento que localmente muestre, los que se acentúan en las proximidades de fallas. El Índice NGI para esta roca puede partir de estimativos como los siguientes: 2,7 para el tamaño de bloques, 0,13 para el cortante entre bloques y 0,04 para los esfuerzos activos; así el valor de Q sería 0,011. Esto es, la roca en general ofrece una calidad inferior en casi un orden a la de la Formación Manizales y superior en un orden a las de Casabianca. No obstante, debe señalarse que los materiales de naturaleza carbonosa o grafitosa presentes en este Complejo, son altamente degradables, por lo que el recubrimiento con concreto lanzado debe proceder en el término de pocas horas.

A partir de estos estimativos, aplicando la teoría de Barton, Lien y Lunde, se podrían tener también un par de parámetros: el **tiempo de sostén** de un claro de la excavación sin ademe y **la carga de roca** en términos del diámetro de la galería sobre su techo, suponiéndola de igual ancho y altura. El primero para efectos constructivos, pues es evidente que la calidad de la roca no ofrece autosoporte, como ocurre con la roca sana y competente, que siempre supera al concreto y casi iguala al acero. El segundo para estimar el soporte requerido en el techo del túnel.

### Estudio de la estabilidad

Para los autores señalados, Barton et al., se tendría lo siguiente:

- La Formación Manizales con.....Q=0,825 es Muy mala,
- La Formación Casabianca con.....Q=0,002 es Excepcionalmente mala y,
- El Complejo Quebradagrande con. Q=0,011 es Extremadamente malo.

Sobre los Factores de Seguridad, FS, en túneles, se puede decir que ellos varían entre 7 y 8 para casas de máquinas y estaciones de metro, hasta 0,9 en las minas si la excavación es provisional. Además, en las minas hay procesos de avance del frente y extracción de materiales: en el primero el factor de seguridad es 3 y en el de extracción varía de 0,7 a 0,9, lo que supone que las características del macizo son malas y se puede utilizar poca voladura obteniendo economías.

Si asociamos el destino o utilidad que habrá de tener un túnel, a un parámetro numérico, surge la Relación de Soporte de Excavación ESR: este nuevo parámetro, análogo al inverso del factor de seguridad del túnel, varía entre 5 para los de poca relevancia o de categoría A, y 0.8 si aquella excavación es tipo E o de carácter vital.

Además: también interesa conocer qué pasa en los macizos de roca blanda, con la profundidad de los túneles, cuando es poca y se acerca a la superficie, o cuando se profundiza y el techo de roca

es muy alto: En general, para el primer caso, por la falta de presión confinante puede ocurrir que falle el macizo, y esto es de interés para los portales. En el segundo caso, cuando la excavación es profunda, debe verificarse el Riesgo de Plastificación del Macizo, y ésta se da si la presión litológica supera la resistencia a la compresión inconfina de la roca. Para nuestros casos las mayores profundidades serán de 150m, valor que multiplicado por el peso unitario promedio de la rocas PU cercano a  $2,1 \text{ t/m}^3$  (con una desviación de  $0,2 \text{ t/m}^3$ ), da presiones del orden de  $315 \text{ t/m}^2$  equivalentes a  $31,5 \text{ kg/cm}^2$  (ambas con más o menos un error del 10 %). Este valor es inferior a lo que se espera en las rocas en la F. Manizales y en el C. Quebradagrande, donde los túneles son profundos. Ahora, para el peor de los macizos, el de la F. Casabianca interesa la presión de roca: a una profundidad de unos 40 m y con el mismo PU ésta vale unos  $8,4 \text{ kg/cm}^2$ , por lo que puede darse la plastificación y habrá que prevenirla. Se recuerda que Casabianca en el interior del macizo puede estar cercano al límite entre roca y suelo, y éste es  $10 \text{ kg/cm}^2$ . Los valores aportados por Aquaterra, Tabla 1a, en resistencia sólo llegan a valores muy inferiores. En la Figura 2s se pueden ver valores para rocas clase E según Deere, y de seguro Casabianca en la roca intacta, difícilmente entra a este rango.

Lo anterior en lo relacionado con la plastificación, únicamente. También debe darse otra condición para túneles profundos. Experimentalmente se sabe que en las excavaciones el límite de la relación entre la presión de carga y el esfuerzo a la ruptura de la roca es 0,2. Esto equivale a aplicar un Factor de Seguridad FS, de 5, por lo que habrá que mantener cuidado con lo que ocurra en el Túnel El Tablazo, hacia la zona de su tercio medio, donde la profundidad se hace mayor. Para el Túnel Manizales, posiblemente se satisfaga con holgura esta condición, la cual se verificará después de las perforaciones exploratorias, puesto que se tendrá que saber sobre cual es la roca y cual su resistencia en la zona profunda de Fundadores. (Manual de Geología para Ingenieros, El Macizo Rocoso. GDE). Aunque se han dado en tablas con valores de la resistencia

Ahora bien, según estos autores la categoría de la excavación que nos ocupa entraría a ser apenas del tipo B; esto significa que el ESR apenas sería cercano y superior a 1,3 de acuerdo a su importancia, pues la utilidad en nuestro caso es asimilable a la de túneles de conducción de agua para obras hidroeléctricas. Así el parámetro denominado Relación de Soporte de Excavación ESR para nuestros túneles tendrá asignado un valor de 1,6. Entonces:

*Nuestros túneles para Barton son Tipo B y su ESR es 1,6*

Además, para estos autores, Barton et all, la calidad de las rocas se califica con el parámetro Q, quedando todas ellas en la categoría de rocas malas de la primera parte, así:

Q	0.001-0.01	0.01-0.1	0.1-1	1-4
Calidad	Excepcionalmente mala	Extremadamente mala	Muy mala	Mala
	<b>F.Cb=0,002</b>	<b>C.Qg=0,011</b>	<b>F.Mz=0,825</b>	

Q	4-10	10-40	40-100	100-400
Calidad	Regular	Buena	Muy Buena	Extremadamente Buena

**Tabla 2b.** Calificación del estado de la roca en el macizo, según el valor Q del Índice de Calidad de Túneles (NGI)

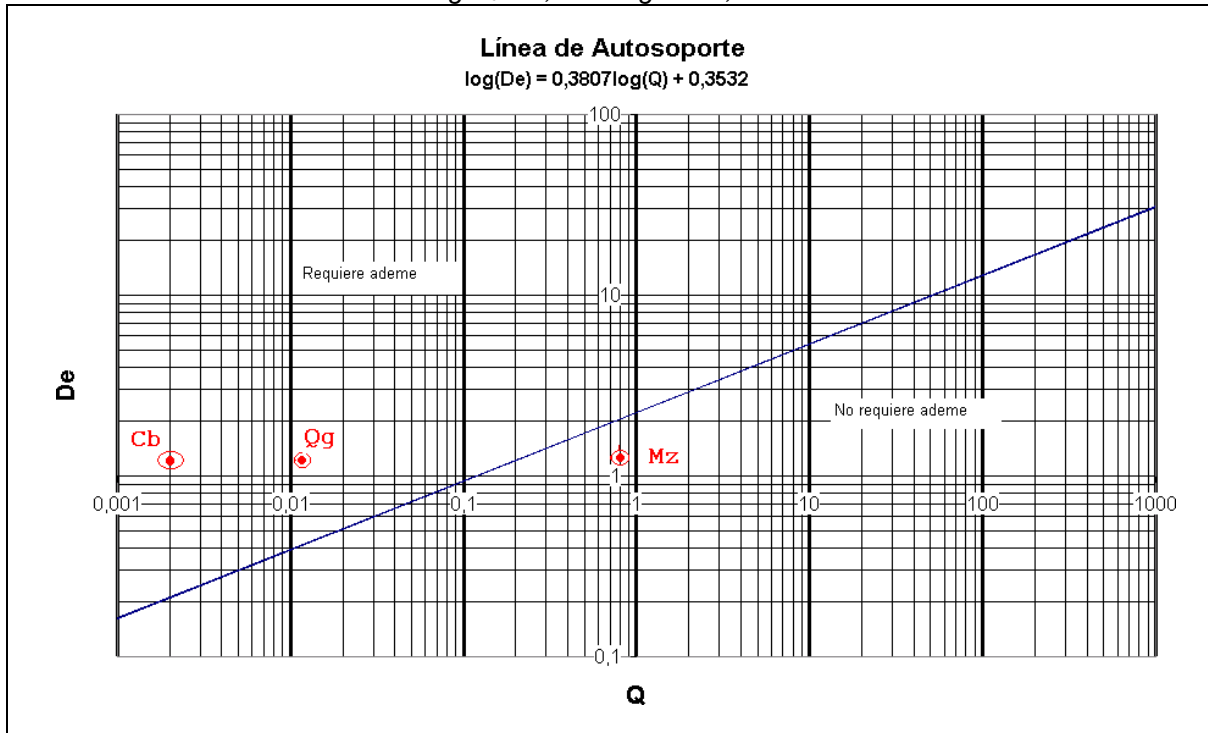
A partir de lo anterior, se puede demostrar el requerimiento del ademe, así: el Diámetro Equivalente  $D_e$  se podrá obtener dividiendo el diámetro  $\phi$  de la excavación expresado en metros, por el ESR. Esto es:

$$D_e = \varphi / ESR$$

Si ésta es de  $\varphi = 2,20\text{m}$ , entonces el diámetro equivalente  $D_e$  vale 1,375. En el ábaco de Hoek and Brown adjunto, donde se entra con los parámetros  $Q$  y  $D_e$  para conocer la posición del túnel, se encuentra que dos de los macizos quedan por el lado problemático de la Línea de Autosoporte, requiriendo de él. Únicamente se salva la F. Manizales.

Para  $D_e = 1,325$  y los valores de  $Q$  de la Tabla 2, se estima el requerimiento o no de ademe, con el siguiente ábaco o con la ecuación:

$$\log D_e = 0,3807 \log Q + 0,3532$$



**Figura 2q.** Línea de Autosoporte  $Q$  contra  $D_e$ , mostrando la situación favorable de la Formación Manizales, la misma que puede explicar el comportamiento exitoso de las conducciones a las plantas menores de la CHEC construidas en las zonas más expuestas del macizo, con tramos significativos y sin recubrimiento, y estables después de unos 60 años de servicio.

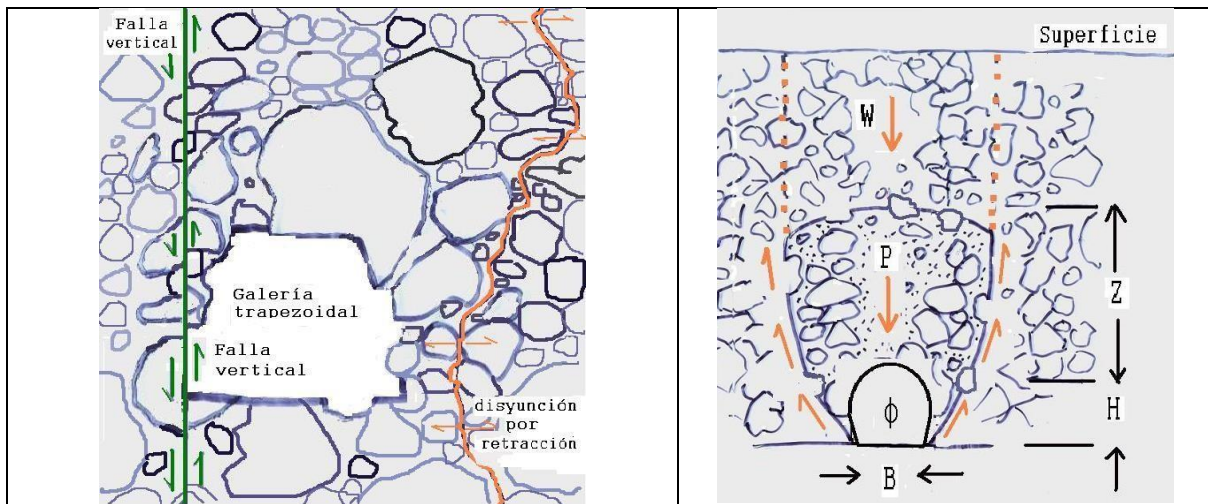
Efectuando el cálculo respectivo, se obtiene:

Unidad	$Q$	$D_e$ demanda	$\log D_e = 0,3807 \log Q + 0,3532$	Valor del $D_e$ en el ábaco	Diagnóstico para saber si requiere o no ademe
F Mz	0,825	1,325	0,32139	2,1	$2,1 > 1,325$ No requiere
F Cb	0,002	1,325	-0,67430	0,21	$0,21 < 1,325$ Si requiere
C Qg	0,011	1,325	-0,39244	0,41	$0,41 < 1,325$ Si requiere

Esto es: la Formación Manizales está por debajo de la curva y no requiere soporte, la Formación Casabianca está por encima y requiere soporte, y el Complejo Quebradagrande también está por encima y lo requiere.

### La Carga de Roca

La Carga de Roca por regla general, se estima hasta donde la galería afecta al macizo rocoso en lo alto del techo, y esto depende de la calidad de la roca y de la geometría de la excavación ( Figura 2r). Si el suelo es sobreconsolidado aparecerán esfuerzos horizontales sobre las paredes; si se da flujo y esfuerzos hidrostáticos en el piso por exceso de presión de poros, este se levanta. Así que la forma abovedada por todos los costados, como lo es la circular, contrarresta esfuerzos en todas las direcciones.



**Figura 2r.** Conceptos sobre forma de las discontinuidades según su naturaleza (Izq) y Carga de Roca P según la altura Z sobre el techo de una galería de diámetro  $\Phi$  dado. La forma trapezoidal con inclinación 1 a 4 de los hastiales con 2m de altura, presenta ventajas estructurales para galerías con soporte en madera, menos durables. La baja calidad de un macizo crítico como el dela F. Cb se resuelve combinando ademas con marcos de acero. Otros en roca mejor como el del C. Qg, con anclajes estándar separados entre 0,9 y 1,5 m. Si la F. Mz está en buen estado, puede excavar en el diámetro señalado de unos 2 m, sin requerir refuerzo o anclaje.

Es difícil saber si los procesos de construcción y destrucción del paleorelieve han generado suelos sobreconsolidados, pero de haber sido así, asumimos que estando en la Formación Manizales, poco aplica, mientras en la Formación Casabianca sí; pero por la poca profundidad de las excavaciones en este particular caso, la magnitud de los esfuerzos no conlleva consideraciones adicionales.

De aquí que en todos los casos, al menos se sugiera una galería de sección en herradura, o de sección trapezoidal, para las siguientes Cargas de Roca, Z, estimadas según Terzaghi (Figura 2r), para H igual a B, en los siguientes valores según el macizo:

Para la Formación Manizales, que es el de características superiores entre las rocas que nos ocupan, dado que el estado de la roca es 5 según Terzaghi:

- $Z = 0,5(B+H)$ , entonces  $Z = 1$  vez la altura de la galería.

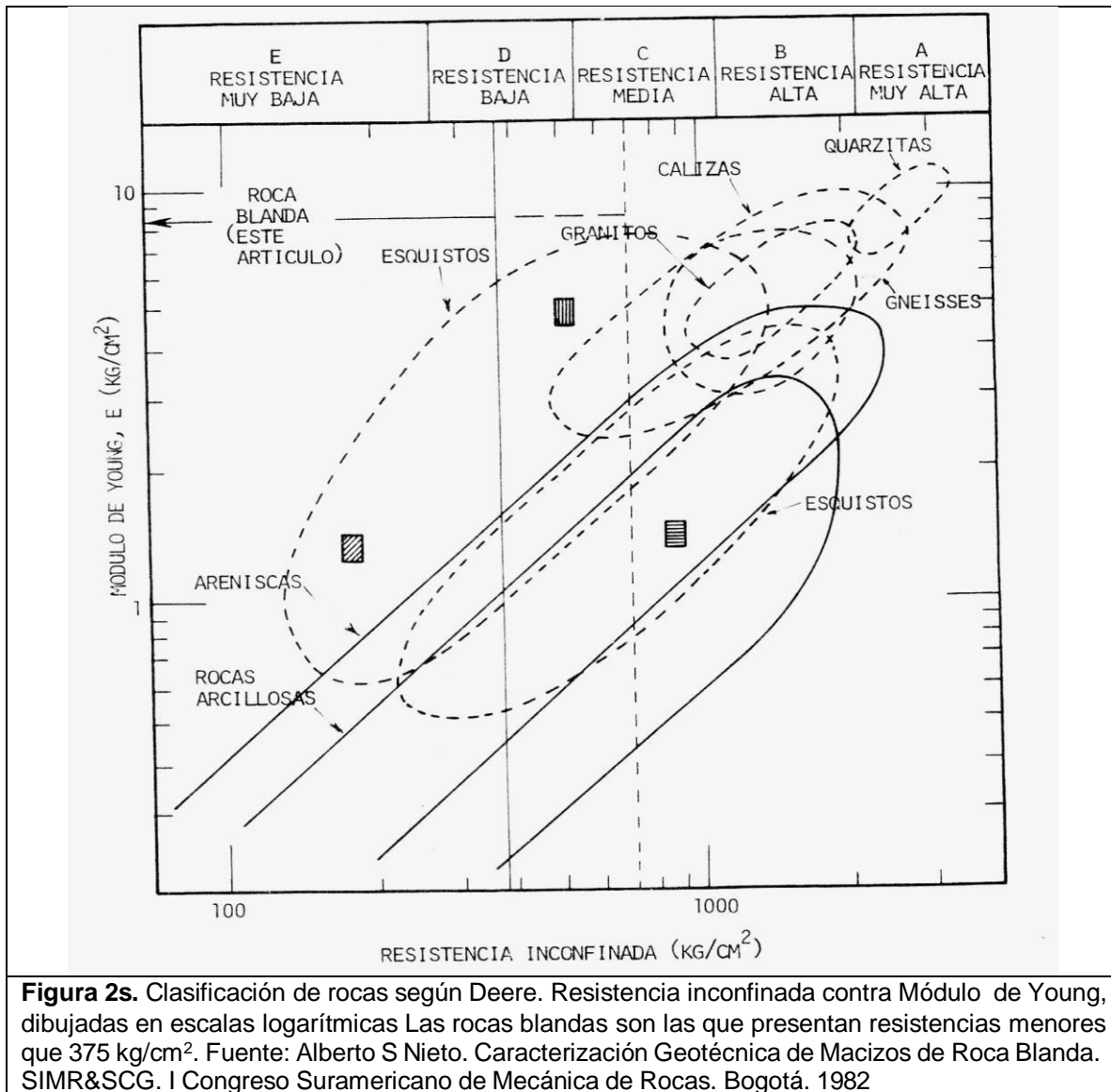
Para la Formación Casabianca, que es el de características más malas entre las de los macizos estudiados, dado que el estado de la roca está entre 7 y 8 según Terzaghi:

- $Z = 2,2(B+H)$ , entonces  $Z = 4,4$  veces la altura de la galería.

Para el Complejo Quebradagrande, que es de características intermedias entre las rocas que se han considerado aquí, dado que el estado de la roca es 6 según Terzaghi:

- $Z = 1,1(B+H)$ , entonces  $Z = 2,2$  veces la altura de la galería.

Es evidente que la teoría de soportes desconoce la actitud del Macizo, pero en los casos que nos ocupa, ésta, la del Complejo Quebradagrande en la zona de los túneles, es la más favorable, puesto que los rumbos de las discontinuidades primarias son casi normales al del túnel y sus buzamientos muy pronunciados. Se espera que en el Túnel de El Tablazo, persista lo observado, pero la situación no es tan confiable ni la muestra tan representativa, como sí lo es en el Túnel Santa Helena. En el Túnel del Tablazo se ha tomado prudente distancia respecto al ramal de la Falla de Romeral, para no quedar en una situación similar a la de la Francia.



En el caso de los cinco túneles se sugieren dos diámetros cercanos a los dos metros. El Túnel Manizales no podrá exceder los tres metros de diámetro para mantener su condición de autosoporte. El mayor para los túneles largos y el menor para los cortos. En los primeros, la demanda de espacio para extracción de aire y ventilación, como para operaciones logísticas, es mayor.

Para el tiempo de autosoporte se utilizará la Clasificación de Bieniawski, o clasificación CSIR para macizos rocosos fisurados, basado en 5 parámetros como son:

- A- *La resistencia de la roca inalterada según Deere y Miller*
- B- *El Índice de calidad de roca RQD según Deere.*
- C- *El espaciamiento de las discontinuidades fisuras*
- D- *El estado de las fisuras (rugosidad, relleno, persistencia)*
- E- *El estado del agua subterránea (presión, caudal).*

El SCIR valora el parámetro A con la resistencia a la compresión confinada entre 0 y 15. Los valores menores de 2 se dan por debajo de 250 kg/cm<sup>2</sup>, 7 entre 500 y 1000 kg/cm<sup>2</sup>, y 15 cuando supera 2000 kg/cm<sup>2</sup>.

Esa resistencia expresada en kg/cm<sup>2</sup>, para limolitas y carbones está entre 250 y 500, y para areniscas pizarras y lutitas entre 500 y 1000. Ahí están nuestras rocas, pero en estado sano; si lo fuera en el alterado, sería inferior en un orden o más. Asignaremos los valores para las Formaciones Manizales y Casabianca y para el Complejo Quebradagrande, en 3, 1 y 2, respectivamente.

El parámetro B se valora con 3 cuando el RQD es inferior al 25%, con 13 cuando está entre el 50 y 75%. El máximo puntaje es 20 si el RQD está entre el 90 y 100%.

Asumamos que nuestras rocas tienen los siguientes Índices de Calidad de Roca QCD: Formación Manizales 60%, F, Casabianca 6% y Complejo Quebradagrande 30%. Valoremos estos en su orden con 11, 1 y 6.

El parámetro C se valora hasta 30, calificando hasta 5 si el espaciamiento es inferior a 5cm, con 13 si está entre 0,3 y 1m y el máximo si supera los 3m.

Para nuestro caso asumamos que nuestras rocas tienen los siguientes valores: Formación Manizales 2m, Formación Casabianca 1m y Complejo Quebradagrande 2cm. Valoremos estos en su orden con 25, 15 y 2.

Para el parámetro D se contemplan puntajes entre 0 y 25 así: Fisuras abiertas o de mal relleno 0; algo rugosas y con separación menor de 1mm, 12; si la pared es rugosa se le da 20 si es dura, o 12 si es suave.

Las rocas de nuestro estudio recibirán la siguiente valoración: Formación Manizales 20, Formación Casabianca 6 y Complejo Quebradagrande 4.

El parámetro E se valora entre 0y10, dependiendo de si hay serios problemas o de si la roca está seca, respectivamente. Con ligera presión de agua el puntaje es 4 y en estado húmedo 7.

Asignemos los siguientes valores: Formación Manizales 8, Formación Casabianca 2 y Complejo Quebradagrande 4.

Este método considera un ajuste de signo negativo por la orientación de las discontinuidades a la sumatoria de las valoraciones anteriores, el que para el caso de túneles varía de 0 a 10. Salvo Quebradagrande cuya actitud es favorable en los túneles, razón por la cual le restaremos<sup>1</sup>, las discontinuidades de tipo vertical de Casabianca y Manizales, sumadas a los planos horizontales de las que limitan las facies, son el argumento para aplicar una corrección de -10 a los cinco parámetros ya valorados.

Valoración de parámetros para la clasificación geomecánica (CSIR)			
Parámetros	F. Manizales	F. Casabianca	C. Quebradagrande
A- Resistencia Inalterada	3	1	2
B- RQD (Deere)	11	1	6
C- Espaciamiento fisuras	25	10	2
D- Estado de las fisuras	20	6	4
E- Agua subterránea	6	2	4
Ajuste	-5	-10	-1
Total	60	10	22

**Tabla 2c.** Valoración de los parámetros de clasificación geomecánica (CSIR), para las rocas de los macizos en estudio.

En resumen, la Formación Manizales a pesar de ser conglomerática alcanza un valor importante y es superior a las demás. Además su calidad se confirma con la historia de las construcciones de la CHEC: los canales de las plantas menores y los túneles de conducción hacia las plantas mayores.

Bieniawski clasifica el macizo rocoso en 5 categorías, dándole a cada una un tiempo medio de sostén y unos parámetros de cohesión y fricción que son los que se muestran en la Tabla 2d siguiente.

Clasificación del CSIR					
Valoración	100-81	80-61	60-41	40-21	20-0
Calificación	I	II	III	IV	V
Descripción Roca	Muy Buena	Buena	Regular	Mala	Muy Mala
Cohesión kg/cm <sup>2</sup> y Fricción	C>300 Φ>45°	200-300 40°-45	150-200 35-40	100-150 30-35	C< 100 Φ<30°
Tiempo medio de sostén para un claro	10 años para 5m	6 meses para 4 m	Una semana para 3 m	5 horas para 1,5 m	10 minutos para 0,5 m

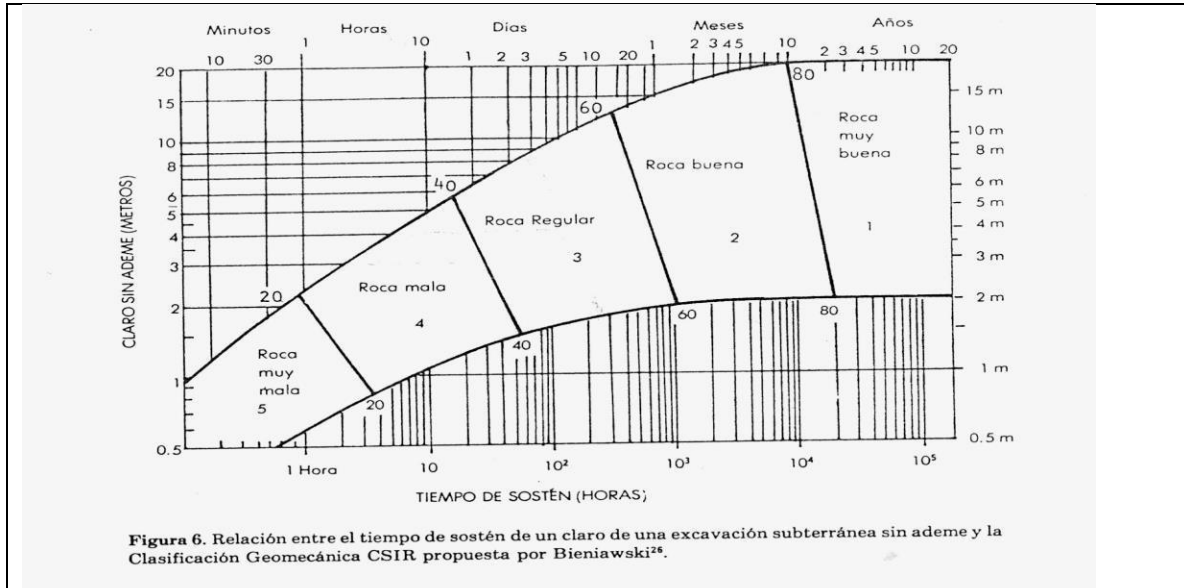
**Tabla 2 d. Denominación para clasificar** las rocas de un macizo, según la valoración de los parámetros de Bieniawski (CSIR).

De conformidad con la Tabla 2d anterior y los puntajes obtenidos en la Tabla 2C, la Formación Manizales está en la frontera entre roca regular y buena, Casabianca aparece en el rango de las rocas muy malas, y Quebradagrande en el rango inferior de las rocas malas.

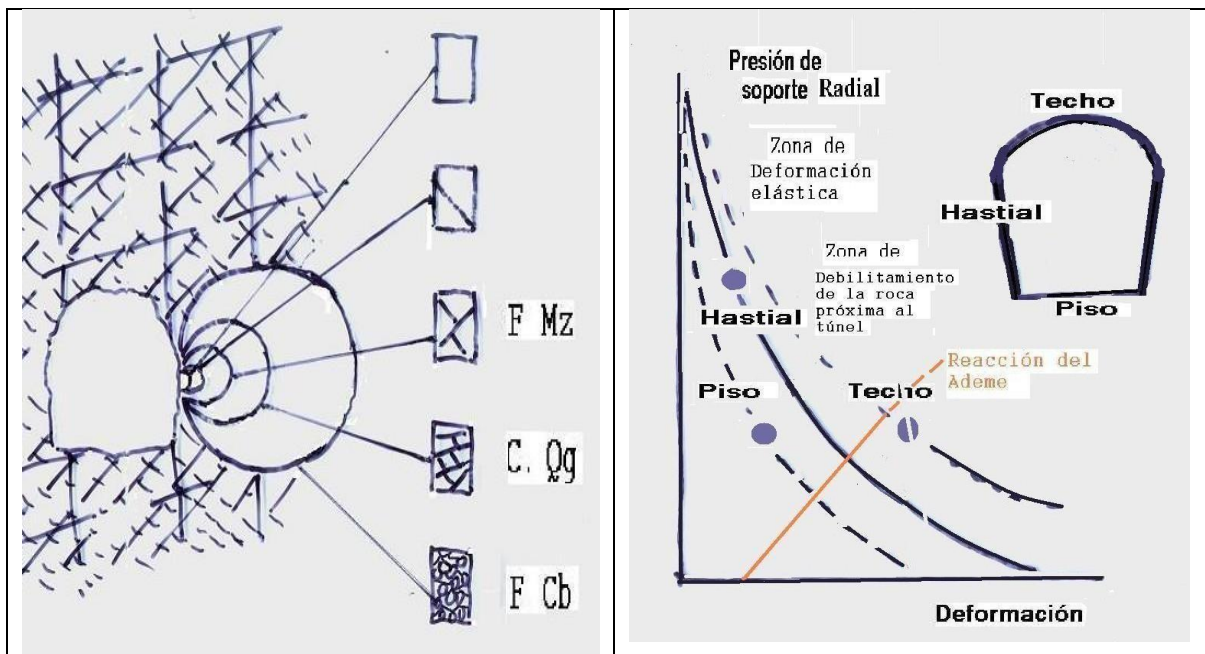
Aplicando el ábaco de la Figura 2t, estos son entonces los tiempos de sostén y claros de nuestros macizos rocosos:

- Formación Manizales: de 2 meses para un claro de 2 m.
- Formación Casabianca: 1 hora para claro de 1 m solamente.

- Complejo Quebradagrande: 2 horas para claro de 2 m.



**Figura 2t.** Tiempo de sostén y claros sin ademe, para las diferentes calidades de roca en el sistema del CSIR según Bieniawski. Fuente: E. Hoek & E.T. Brown. Excavaciones subterráneas en roca. Mc Graw Hill. USA 1980.



Debe considerarse que el estado de la roca cambia por factores tectónicos y de alteración que los esfuerzos también por variaciones de la sobrecarga y por presión de aguas según la altura del NAF, además, que en la vecindad de los portales, siempre existen condiciones desfavorables por una discontinuidad adicional y por falta de confinamiento del macizo.

En resumen, los macizos ya clasificados presentan las siguientes características generales:

<i>Clasificación de de los macizos rocosos de tres de las unidades geológicas de de Manizales</i>				
	RQD estimado	Q de Barton	Valoración de Bieniawski - Categoría	Denominación
F. Manizales	60%	0,825	(60) – III (frontera con II)	De regular a buena
F. Casabianca	6%	0,002	(10) – V	Muy mala
C. Quebradagrande	30%	0,011	(22)– IV (de rango inferior)	Mala cercana a muy mala

**Tabla 2 d.** Resultados obtenidos para clasificar las rocas de los macizos estudiados: Índice de calidad de roca RQD, Índice de Calidad de Túneles Q del NGI y clasificación del CSIR según Bieniawski.

#### Cálculo de ademes

No se hace este cálculo, el del sistema de apuntalamiento o entibado, puesto que no se dispone de la información geotécnica suficiente la cual demanda perforaciones exploratorias para obtener la resistencia inconfiada, el módulo de elasticidad de Young, la relación de Poisson y el peso unitario.

El diseño racional de los sistemas de ademado, parte de las características y naturaleza de los materiales que entran en juego, y en consecuencia de las relaciones esfuerzo deformación entre roca y ademe. A esto se suma el criterio ingenieril (Ver Figura 2u)

En el caso de la Formación Manizales habrá que considerar el anclaje de bloques redondeados potencialmente inestables y la voladura de la parte sobresaliente de otros, sin afectar demasiado la matriz. También se deberá considerar las concavidades que quedan de los bloques desprendidos, puesto que estas hacen que los marcos de soporte y el macizo respondan de formas diferentes. Se recuerda que el Túnel Manizales podría cruzar un macizo del Complejo Quebradagrande

En el caso de la Formación Casabianca, es evidente que se trata de un macizo fácilmente plastificable, dado que su resistencia a la compresión difícilmente soporta la presión del suelo. Es además, un material muy plástico y esto interesa para valorar el punto de ruptura a partir de las deformaciones. La presencia ocasional de los suelos blancos expansivos es otro factor a considerar. Este macizo es de interés para el Túnel La Avanzada.

Para el Complejo Quebradagrande, la propensión a su intensa laminación a causa de las discontinuidades primarias del miembro metasedimentario (foliación –estratificación), y el fracturamiento que varía en intensidad, son las características condicionantes de los bloques. A la heterogeneidad asociada a este patrón de fracturamiento, se suma la alternancia de capas plásticas afines a materiales de naturaleza tipo arcillolita, con otras rígidas compuestas de materiales silíceos, posiblemente lavas, e incluso chert. De forma casi segura, por lo menos en el Túnel del Tablazo, aparecerán los suelos de naturaleza carbonosa, altamente deleznable y alterables, ya comentados.

## Vulnerabilidad Sísmica

En casos de sismos se han evaluado túneles, minas y grandes espacios subterráneos, para conocer el desempeño frente a los sismos de estas obras excavadas y ubicadas bajo espesores sustanciales de roca. Para la OPS en el caso de sismo el desempeño de los túneles de conducción como el que nos ocupa, ha sido generalmente satisfactorio (Vulnerability of Water Supply Systems to Landslides. 1997). Según, Owen y Sholl (1981), citados por el documento de la OPS, agruparon las estadísticas sobre los efectos constatados en túneles de acuerdo a los siguientes tres grados:

- No daños: sin grietas ni caída de bloques.
- Daños menores: Nuevos agrietamientos y caída de bloques.
- Daños severos: Agrietamientos graves, taponamientos y deslizamientos especialmente en los portales.

Los rangos de aceleración y velocidad sísmicas, para estos tres grados, han sido:

Niveles de daños	Aceleración (g)	Velocidad (cm/seg)
No daños	<0,20	<20
Daños menores	0,20 - 0,40	20 - 40
Daños	>0,40	>40

**Tabla 2e.** Niveles de daños en túneles asociados a movimientos del suelo. Fuente: Vulnerability of Water Supply Systems to Landslides (PAHO, 1997)

En términos de Intensidades, las valoraciones anteriores según PAHO son

Niveles de daños	Intensidad Mercalli				
	VI	VII	VIII	IX	X
No daños	90	70	40	10	-
Daños menores	10	28	40	40	15
Daños severos	-	2	20	50	85

**Tabla 2f.** Intensidades de Mercalli. Fuente: Vulnerability of Water Supply Systems to Landslides (PAHO, 1997)

De conformidad con lo anterior, la vulnerabilidad de las conducciones está absolutamente ligada a la calidad del suelo y de la estructura, y al nivel de la amenaza. Utilizando y adaptando el modelo de la OPS aplicado en la evaluación de la vulnerabilidad de tuberías a partir de la estadística de daños y reparaciones por sismos reportados por el American Society of Mechanical Engineers (1985) y otros, se ha elaborado la Tabla 2g suponiendo las conducciones con diseños y calidades de construcción estándar. Para el efecto se le asignan 100 puntos al escenario más desfavorable, el del túnel en la Formación Casabianca con una aceleración que alcanza hasta 0,4g.

Espesor del suelo m	F. Casabianca	C. Quebradagrande	F. Manizales
0-10	0,005	0,002	0,001
10-20	0,2	0,08	0,04
20-30	7,5	2,5	0,3
30-40	100	50	15

**Tabla 2g.** Grado de vulnerabilidad relativa de la oferta ambiental para las conducciones, a causa de la amenaza sísmica. Arbitrariamente se le ha asignado una intensidad o nivel de daños igual a 100 al escenario más desfavorable. Obsérvese que los túneles estarían en los niveles de la primera fila, si no se considera el factor topográfico, y únicamente entra el espesor del suelo, en m, sobre el basamento.

Esta Tabla 2g que se puede coordinar con la Figura 1g, permite, además de comparar la estabilidad relativa de las conducciones en cada unidad litológica, observar la ventaja de las conducciones en suelos y rocas cada vez más competentes y asignarles un nivel de riesgo específico, para las conducciones bien hechas, así:

- Riesgo sísmico bajo, entre 0,1 y 1.
- Riesgo sísmico moderado, entre 1 y 10.
- Riesgo sísmico alto, entre 10 y 100.

De ahí que se recomendarán ciertas precauciones en los diferentes túneles, adicionales a la de utilizar tuberías flexibles y tecnología sismorresistente, para las conducciones por fuera de los túneles, en los accesos a los túneles, dentro de los túneles, a la salida de los túneles y después de ellos.

Definitivamente, el mayor riesgo parece estar fuera de los túneles, en las zonas de laderas habitadas, en especial cuando se trata de suelos blandos y con espesores importantes (Ver Figura 1g y el Factor Topográfico para el período en el mismo aparte).

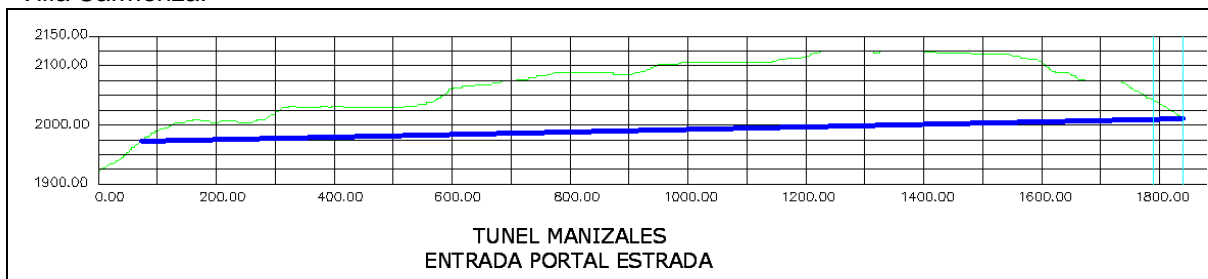
### III- PARTE CONCLUSORIA

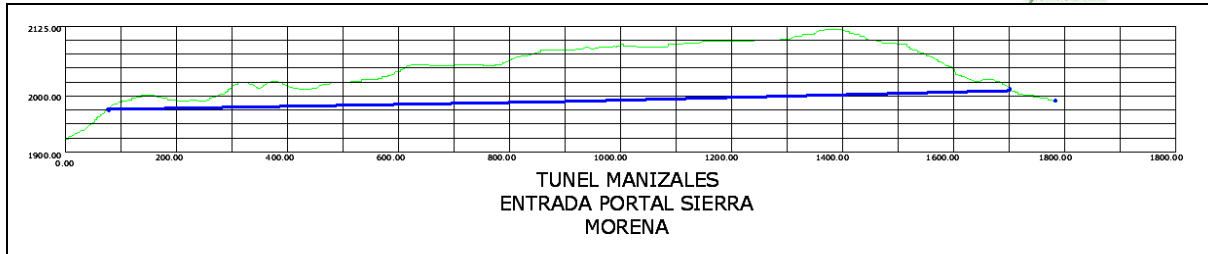
#### Túneles de primera opción.

Se sugieren los túneles a partir de las siguientes opciones:

Túnel Manizales: 1850m de longitud y 150 m de techo máximo; aunque la alternativa que aparentemente no cruza fallas surge uniendo los portales Sierramorena y Panamericana, se optará por el trazo desde el Barrio Estrada desplazando ligeramente el alineamiento que así deberá cruzar en medio de dos trazos de fallas cartografiadas, y como consecuencia de la fotointerpretación y valoración morfotectónica de la superficie del terreno, en el sector de Fundadores y la Renault, donde se ha considerado conveniente salvar las depresiones a lado y lado de la Avenida Santander y a los costados del alineamiento del túnel. Además, el acceso para la construcción del portal de entrada, está frente al Barrio Estrada. Se agrega que el túnel tendrá un desvío cerca del portal de salida, hacia la quebrada Marmato. En Marmato y Olivares se contemplaron escombreras con posibilidades de beneficio social, aplicando el concepto de lo que se ha logrado en Villa Carmenza (rellenos que han permitido el desarrollo de instalaciones deportivas y de recreación).

En los sectores vecinos a los portales por el lado de la Q. Marmato y la Q. Olivares, se contemplaron escombreras con posibilidades de beneficio social, aplicando el concepto de lo que se ha logrado en Villa Carmenza.





**Figura 3a.** Perfiles longitudinales del túnel Manizales, de S a N. Arriba la Alternativa desde Estrada y abajo, desde Sierramorena. La profundidad máxima del túnel es de 150 m, lo que supone un esfuerzo del orden de 30 kg/cm<sup>2</sup>. Este valor es varias veces inferior a la resistencia de la roca y por eso la presión no le causa plastificación al túnel, al tiempo que confina convenientemente el macizo rocoso. La zona más crítica de un túnel está en los portales, justamente por falta de presión suficiente para confinar los bloques sueltos de la roca.

Queda entonces la alternativa Sierramorena-Panamericana, como segunda opción para el túnel Manizales, la que debe entra en caso de proseguir con la prospección.

Si por cualquier motivo se presenta ruptura o taponamiento en el Túnel Manizales, y las fugas aparecen en las zonas de los portales, gracias a las condiciones propicias del entorno inmediato se pueden administrar debidamente los flujos. Además de la planeación preventiva para el uso y manejo del suelo, e deberá prever esta circunstancia al construir las obras en el portal de salida, aprovechando la disposición adecuada del alineamiento desviado hacia la Q. Marmato. Igualmente, en la vecindad del portal de acceso en la Q. Olivares

En términos de amenaza sísmica y por deslizamientos, el antecedente de estabilidad del sistema de canales de CHEC, excavado sobre la F. Manizales, con tramos sin recubrimiento alguno en concreto u otro material, y con más de 60 años en servicio, al igual que el de los túneles de conducción de la CHC del Río Sanfrancisco construidos hace algunas décadas en conglomerados aluviales y de inferior calidad, resulta ser un referente válido. Para el diseño sismorresistente es suficiente aplicar el espectro de la Norma NSR-98.

Túnel Santa Helena: 180 m de longitud y 40m de techo máximo; se sugiere desplazar el portal de salida un poco hacia el sur para continuar por la margen izquierda, puesto que de pasar la Q. Olivares, la conducción cae en Villa Julia y entra en terreno inestable. Se sugieren obras para prevenir la socavación fluvial, por el fuerte control estructural de la Q Olivares antes y después de los dos portales, cerca de ellos.

Se debe prever una obra de vertimiento a la Q Olivares antes y después del túnel, para verter el flujo en caso de una eventual falla de la conducción.

La tubería deberá satisfacer las normas de la Zona C para el diseño sismorresistente, que son las del NSR-98; no obstante, se sugiere aplicar el Factor de Amplificación Topográfica al espectro de diseño, en virtud del uso del suelo y circunstancias geotécnicas del entorno.

Túnel La Avanzada: 240m de longitud y 35m de techo máximo; es viable la obra si las condiciones antrópicas en el portal del costado oriental se mitigan. Además se recomienda desplazar el portal occidental corriéndolo al sur, para facilitar el acceso a la obra.

En caso de falla del sistema de conducción, las circunstancias pueden ser críticas en el portal de salida, dado que la ocupación antrópica es intensa. Se deben construir las obras de vertimiento en caso de falla, y preparar adecuadamente los taludes vecinos a los dos portales, dado que esta conducción subterránea, entre las demás, está en la zona más desfavorable por razones de ocupación humana y en la unidad litológica menos competente entre las tres estudiadas. La tubería

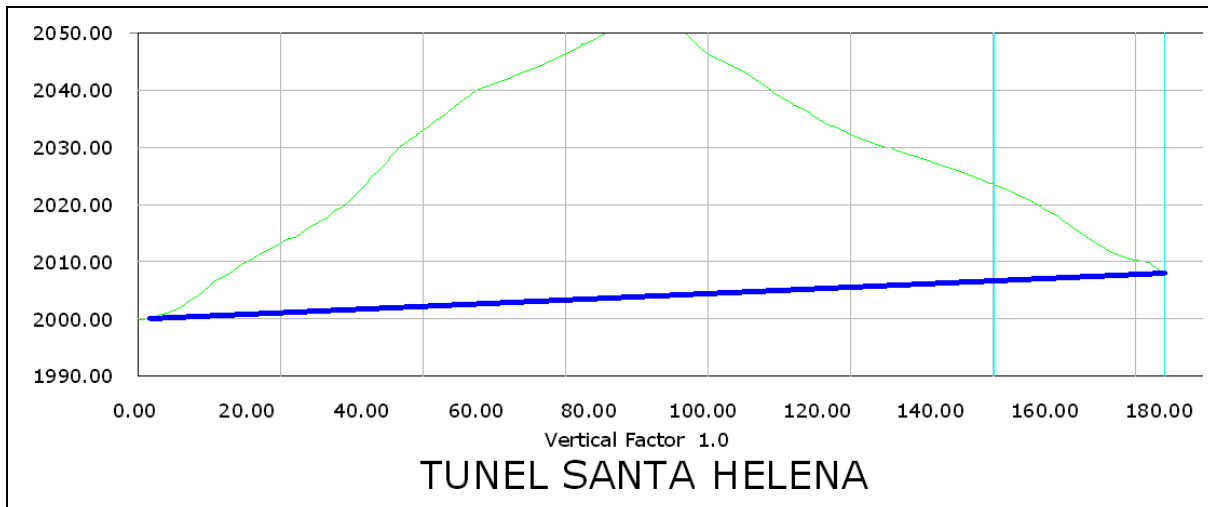
deberá satisfacer las normas de la Zona C para el diseño sismorresistente, que son las del NSR- 98; no obstante, se sugiere aplicar el Factor de Amplificación Topográfica al espectro de diseño.

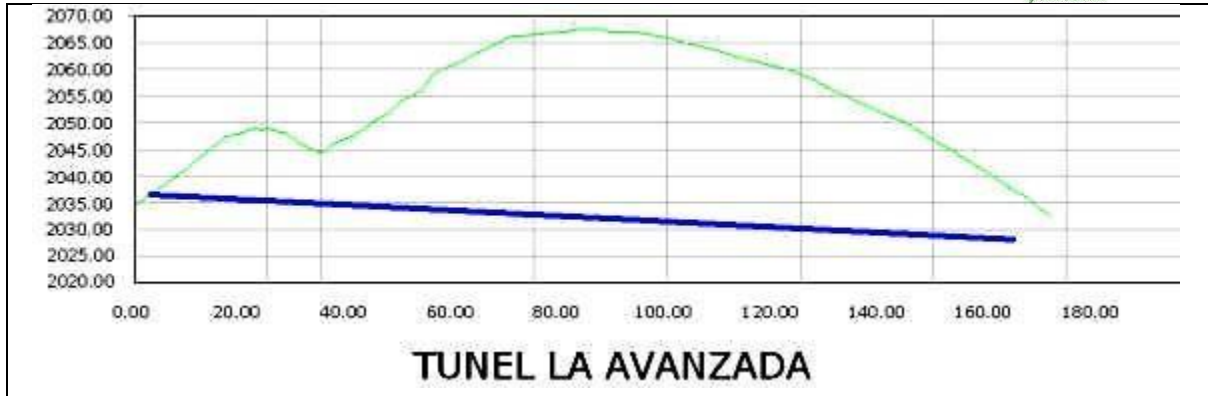
Túnel El Tablazo: 830m de longitud y 150 m de techo máximo; se sugiere tal cual se presenta. Este túnel y su conducción complementaria en caso de resultar económicamente viable extender el sistema hacia el sector del Rosario. Según los planes de desarrollo de varias épocas y diferentes administraciones, sistemáticamente identifican la aptitud del sector occidental del territorio para la expansión de la zona industrial y recreacional de Manizales, y la necesidad de no presionar más las laderas orientales vecinas a la ciudad. También han considerado siempre la necesidad de densificar el actual espacio urbano para las demás funciones urbanas, como la residencial, comercial y de servicios.

Debe hacerse el manejo de aguas de escorrentía hacia el portal de La Turbina, y de resolverse o salvarse el fenómeno de los sedimentos de la cárcava del Tablazo, también puede aprovecharse el potencial gravitacional en el otro lado, el del portal de salida hacia el sector del Rosario, para la generación hidráulica (Ver Figura 2h). Los sedimentos aportados por la Cárcava del Tablazo, imponen previsiones en el desarrollo de este proyecto energético adicional y en la ruta para la conducción, que en cualquier caso es viable.

La tubería deberá satisfacer las normas de la Zona C para el diseño sismorresistente, que son las del NSR-98; no obstante, se sugiere aplicar el Factor de Amplificación Topográfica al espectro de diseño, por lo menos en la zona del portal de salida y construir obras de vertimiento para eventual caso de falla en la conducción (Ver Figura 1h).

Túnel La Francia: 2500m; no parece recomendable dado que cruza tres fallas: la primera en el sector de entrada con la calle 22, y dos más en la base inferior del escarpe de Chipre, lugar deprimido que ya es de poca carga. Lo anterior significa que, en esta zona vecina al portal de salida, el macizo rocoso estaría fracturado y posiblemente constituido por coluviones; todo esto en un terreno inclinado y en ambiente húmedo, no ofrece condiciones adecuadas de estabilidad a largo plazo.





**Figura 3b.** Perfiles longitudinales de los túneles Santa Helena y La Avanzada vistos en sentido E-W. La profundidad máxima de estos túneles es del orden de 40m, lo que supone un esfuerzo de unos 8 kg/cm<sup>2</sup>. En caso de sismo, esta presión se incrementa a unos 10 kg/cm<sup>2</sup>. Este valor es superado por la resistencia de la roca en Santa Helena, pero difícilmente en La Avanzada, donde se puede dar la plastificación del túnel si el refuerzo de la estructura resulta insuficiente. La zona más crítica de ambos túneles está en los portales, y ambos requieren recubrimiento y soporte a medida que se excava.

### Costos y rendimientos provisionales.

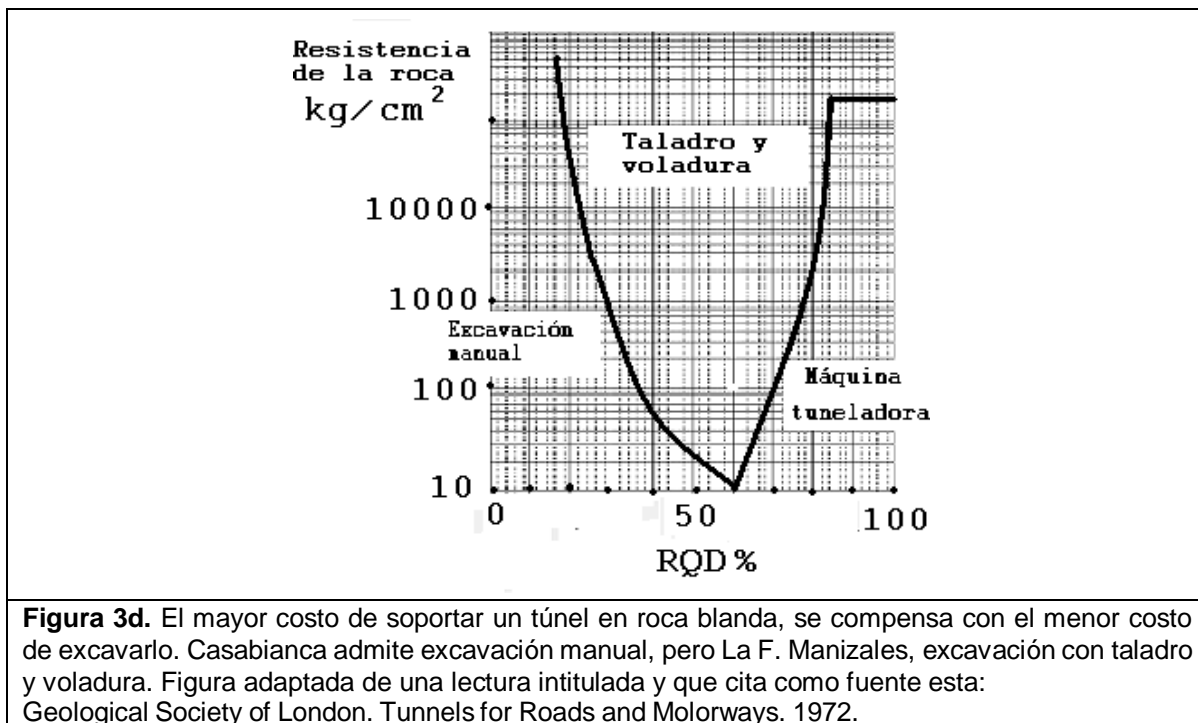
Con base en información confiable, suministrada por la firma Ingeniería y Contratos Limitada de Medellín, el costo por metro lineal de una galería en conglomerados, con entibado de madera y tecnología de minas auríferas excavadas en aluvión, y cuyas dimensiones son de 1,8m en altura por 1,4m de base, puede ser \$3 millones. Para esa obra el rendimiento estimado es de 2 m por día.

Si los túneles tuvieran este diámetro, entonces, por las longitudes, los tiempos y costos sin elementos de recubrimiento y soporte, ni adecuación de portales, los que incluyen excavación y entibado, como se muestra en la tabla adjunta, serían los mayores de la Tabla 3a.

Los costos estimados y rendimientos en el túnel piloto de La Línea, entre Cajamarca (Tolima) y Calarcá (Quindío), según información suministrada para el Ingeniero Luis Ernesto Sanz de Ingesam, son de \$9'610.000 por metro lineal y de 11,8 m por día. Esta obra de 8580m de longitud cuyo diámetro es de 4,4m, está programada para 730 días (24 meses) y la proporción de costos es la siguiente:

• Costo excavación	\$76'600.000.000	(92,9%)
• Interventoría y diseño	\$5'500.000.000	(6,7%)
• Adquisición de predios	\$300.000.000	(0,4%)
• Costo total estimado	\$82'450.000.000	

Si aplicamos el costo del Túnel de La Línea a nuestro caso, entonces el costo de nuestros túneles sería de \$2'000.000, por metro lineal. Con base en este y admitiendo que es posible que el tener un costo más similar al del Túnel de la Línea y que el rendimiento de la obra puede ser de unos 5m por día, se presenta un escenario bajo de costos y rendimientos, el dado entre paréntesis, en Tabla 3ª.



RESUMEN DE LOS TÚNELES				
Nombre y longitud aproximada, tiempos estimados de la obra, y rango de costos de construcción.				
Túneles	Longitud y portales de entrada y salida	Tiempo de Excavación con dos frentes	Geología dominante	Costo básico estimado en pesos del 2006
Manizales	1850 m entre Sierramorena y La Panamericana	31 meses (12,3 meses)	F. Manizales y C posiblemente el Quebradagrande	\$5550 millones (\$3700 millones)
El Tablazo	830 m entre El Aventino y La Turbina	14 meses (5,5 meses)	C. Quebradagrande	\$2490 millones (\$1660 millones)
Santa Helena	180 m entre los portales oriental y occidental	3 meses (1,2 meses)	C Quebradagrande	\$540 millones (\$360 millones)
La Avanzada	240 m entre los portales occidental este y oriental	4 meses (1,6 meses)	F. Casabianca	\$720 millones (\$480 millones)
Total	3100 m			\$9300 millones (\$6200 millones)

**Tabla 3a.** Estimación de costos y tiempos para la obra, en dos escenarios: Alto y (Bajo)

Es evidente que el tiempo estimado para los túneles más largos, El Túnel Manizales y el Túnel El Tablazo, demandan métodos más eficaces para que pasen de 2 metros por día, a 5 metros por día. Así el tiempo de construcción se reducirá notablemente.

Las obras en los portales se estiman del orden de \$1000 millones cada una, más o menos \$500 millones. Estas dependen de si se requiere anclar pantallas, además del perfilado y de los canales colectores; no incluyen de ser necesario en algún portal, el costo de un falso túnel. Se deberán incluir en estas los diseños para evacuar flujos en caso de daños por sismo u otros eventos.

Para estimar la relación de costos aproximados entre la excavación y los otros insumos en túneles, vale mencionar las que presenta el Profesor Fernando Fujimura de la Universidad de Sao Paulo, Brasil, en su conferencia sobre Excavaciones Subterráneas, presentada en el Congreso Suramericano de Mecánica de Rocas, con el título “Reservatorio Subterráneo De Agua Tratada...” recogiendo las experiencias en costos de obras para el abastecimiento de grandes centros urbanos; es esta:

- Excavación: 74,8%
- Soporte: 10,1%
- Revestimiento definitivo: 5,9%
- Estructura de concreto: 7,2%
- Equipamiento electromecánico: 2%

Otro costo de interés, el de Las perforaciones exploratorias que podrán tener un costo del orden de los \$250 mil por metro lineal en conglomerado, necesarias para obtener la información geotécnica de diseño, y también para construir drenajes previos que serán inversiones opcionales que se definirán después de la prospección en detalle, caso por caso y túnel por túnel.

## Actividades de Prospección y recomendaciones

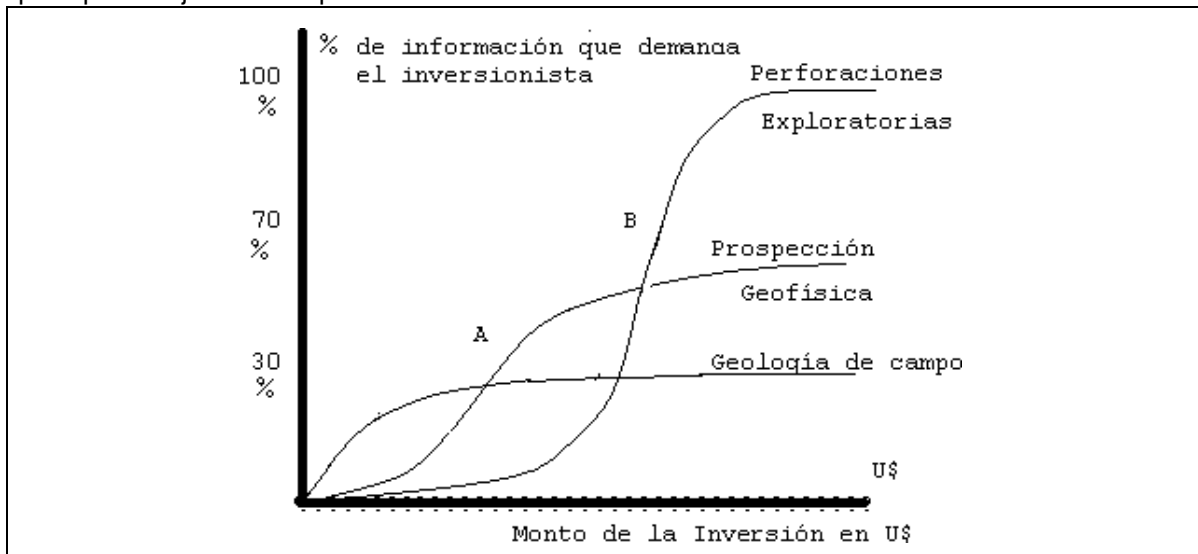
Para todos los túneles se hace necesario obtener, mediante perforaciones profundas, los parámetros geomecánicos de las rocas. Esta información es fundamental para el diseño de ademes y estructuras de soporte.

### Túnel Manizales:

La incertidumbre litológica sobre la continuidad de la Formación Manizales, tiene relevancia por las circunstancias estructurales del orden tectónico, únicamente. En un escenario en el cual aparezca uno o dos bloques levantados entre Fundadores y Cervantes, el correspondiente fallamiento cortaría transversalmente el alineamiento del túnel. La geoelectrica no procede con ventajas para el caso, pues el mayor contraste que advierte, el del NAF, poca información sobre cambios estructurales entrega. La sísmica de refracción informaría sólo del contacto entre la F. Casabianca y otra más densa abajo, que requeriría calibración previa para saber si la que subyace es la F. Manizales o el C Quebradagrande. Los rellenos y la ceniza generan ruido en la información geofísica, pero salvable. La gravimetría de detalle soportada en la base topográfica existente y una altimetría de precisión, complementarían el anterior método.

Puede considerarse la conveniencia de perforaciones subhorizontales opcionales para drenar el macizo rocoso por abajo del túnel, buscando mejorar las condiciones menos favorables en el extremo sur, las que podrían disponerse transversalmente desde la Quebrada Marmato. Estas perforaciones igualmente aportarían valiosa información adicional y permitirían una decisión más precisa en caso de contemplarse la alternativa desde Sierramorena. La permeabilidad primaria de esta formación, es deficiente por el grado de consolidación y la mediana cementación de su matriz.

El accidentado perfil longitudinal, los usos del suelo y la cobertura edificada, dificultan y condicionan las actividades de prospección geoelectrica y de sísmica de refracción. Contrariamente la situación, distribución y estado de las vías facilita el acceso al lugar, aunque el corredor de estudio corta los principales flujos de transporte urbano.



**Figura 3e.** Los métodos geofísicos, de escalas de costos intermedios, pueden hacer el puente entre las muy costosas perforaciones exploratorias, y la geología de campo más económica pero más limitada. En algunos casos la brecha entre A y B se cierra, ya por la información existente, ya por las limitaciones de la geofísica. Fuente, G. Duque. Manual de Geología para Ingenieros.

### Túnel El Tablazo:

La calidad y estado del macizo rocoso requieren perforación exploratoria para precisar el agua infiltrada, el RQD, la actitud de las discontinuidades y en especial las rocas carbonosas o grafitosas, condicionantes de obras adicionales inmediatas y medidas de protección de la obra a corto y largo plazo. La geoelectrónica no ofrece ventajas para conocer el NAF en este caso porque el C. Quebradagrande es de porosidad secundaria.

El perfil longitudinal quebrado y el acceso por la escasez de vías son la mayor dificultad para las actividades de prospección, que se ven favorecidas por el uso del suelo en actividades agrarias, aunque el corredor de estudio corta la vía Manizales Chinchiná.

Es relevante la conveniencia de perforaciones subhorizontales para drenar el macizo, dado el problema de la alta susceptibilidad de las rocas carbonosas a la humedad, además del efecto positivo que se le aporta a la resistencia, cuando la roca se drena.

La presión de sepultura, que en caso de sismo puede llegar a 40 kg/cm<sup>2</sup> en la parte intermedia del túnel, puede ser insuficiente para mantener la relación 1 a 5, con la resistencia a la compresión inconfiada de la roca, de este sector del túnel. El recubrimiento el soporte inmediato de la roca, como el refuerzo en zonas críticas como esta y las que resulten fracturadas, son necesarias.

### Túnel Santa Helena:

Una única perforación posiblemente puede resolver las variables deseadas sobre el NAF, la cobertura y la calidad del macizo rocoso que subyace la F. Casabianca. Dependiendo de ella solamente se procedería a una segunda. Un perfil de sísmica de refracción para el basamento que está próximo y que es el C Quebradagrande, resultaría conveniente antes de la perforación inicial. El uso residencial del suelo en viviendas de bajo porte para este pequeño túnel no es limitante, ya que la su profundidad es del orden de los 40 m. La baja densidad de vivienda urbana y el acceso vial son sus fortalezas.

### Túnel La Avanzada:

En este túnel, los portales son en el suelo residual de naturaleza conglomerática, la que hacia adentro se cualifica como Formación Casabianca, sin descartar una eventual presencia del C. Quebradagrande. Un par de perforaciones posiblemente pueden darles mayor resolución a las variables deseadas: éstas se relacionan con el NAF, la cobertura de suelos residuales y sobretodo la calidad y naturaleza del macizo rocoso que se espera y que probablemente sería de la F. Casabianca.

El uso residencial del suelo es la mayor limitante, a la que se suma el factor de inseguridad. La baja densidad de vivienda urbana es una fortaleza de este subproyecto. Se sugiere desviar elportal occidental un poco hacia el sur para facilitar el acceso a la obra.

### **Complementos y estrategias**

La generación de escombros, la necesidad de construir un ambiente de seguridad para las obras y una actitud favorable al proyecto, pasa por la extensión de los beneficios sociales, los nombres de los túneles y sus portales, las obras complementarias y las oportunidades para vincular otros socios estatales y privados.

Los nombres de los túneles, tales como Manizales, El Tablazo... y el de los portales, que aluden al del espacio vital de cada comunidad, deben responder a un propósito y a un motivo: los íconos de la ciudad siempre están en otras partes no marginadas. Pero una obra cumbre de la ingeniería local,

como ésta, aunque esté en los extramuros, puede ser motivo de orgullo para los moradores del lugar, si se le da el sentido adecuado, si se hace con el ambiente y la estética amigables, y si se articula al imaginario colectivo mediante procesos educativos que le permitan a los moradores vecinos su comprensión.



**Figura 3f.** Cuando no existen referentes, es porque tampoco hay propósitos colectivos. Los íconos referentes fortalecen los procesos porque facilitan la organización de la comunidad. Imágenes tomadas de Internet.

Con el proyecto, el río y la cañada ya no serán las cloacas, sino los espacios limpios que podrán ser compartidos por masas humanas que pueden transformarse en verdaderas comunidades “empoderadas” de su ambiente, siempre y cuando se les facilite los procesos, se les facilite el espacio público y se le complemente con los recursos que demandan.

Y en este caso para el equipamiento que alivie las enormes limitaciones de seguridad e infraestructura, se puede hacer de las escombreras medios de soporte para obras como pequeños polideportivos y rutas, para el bienestar, el esparcimiento, la integración y la socialización, de las comunidades de Sierramorena y Estrada, urgidas de acceso hacia y desde la vía a Neira, entre otras. Esto procedería también en el portal de salida sobre la Panamericana. Tomando como ejemplo las obras que se observan en Villa Carmenza, y que sirven de paso y para la recreación a los moradores del Barrio Nevado y El Paraíso, los residuos de las excavaciones y obras de construcción complementarias, servirían para modelar el terreno de Olivares, salvar este obstáculo y construir una ruta de paso y de recreación ambiental o deportiva, en asocio con el municipio.



**Figura.** Sector de Villa Carmenza: construida la escombrera, la comunidad encuentra en este espacio de recuperación ambiental, escenarios para socializar mediante la recreación y el deporte. Los escombros del Túnel Manizales, deben servir para similares fines y tener buen destino.

## Agradecimientos

Este trabajo se hizo con el concurso de varias Instituciones y personas tanto para las labores de campo como para las de oficina. En primera instancia a Aguas de Manizales por preocuparse en los asuntos ambientales asociados a la calidad del agua, y a INGESAM por brindarle su experiencia a la Ciudad en esta materia. También al Doctor Manuel García López, eminente Profesor y Maestro, por su orientación y confianza depositada en nosotros, al proponernos para esta tarea. A los ingenieros Gustavo Navia y Jairo Suárez por habernos ocupado y entregado el soporte demandado para esta tarea, al Ingeniero Luis Ernesto Sanz, de muy valioso desempeño, quien aportando su experiencia y buen sentido y apoyado por su asistente, el Ingeniero Gerardo Andrés España, se tomó el trabajo de estudiar en detalle las opciones geométricas sobre las cuales hemos hecho la evaluación geológica y geotécnica del sistema de túneles que aquí se presenta.

## IV- BIBLIOGRAFÍA

Aguas de Manizales. Base topográfica digitalizada y Lineamientos estructurales en el área de Manizales, e Imágenes digitales de la Ciudad. 2006

Aerofotografías del área de Manizales. Línea de vuelo C-2275 fotos N° 66 y 67.  
Línea de vuelo C-2277 fotos N° 40, 41, y 42. IGAC 1987

Alberto S Nieto. Caracterización Geotécnica de Macizos de Roca Blanda. SIMR&SCG. I Congreso Suramericano de Mecánica de Rocas. Bogotá. 1982

Aquaterra Ingenieros Consultores SA. Estudio de Suelos para la Rehabilitación Estructural del Teatro Fundadores. Manizales 2003.

Aquaterra Ingenieros Consultores SA. Estudio Geológico, Geotécnico e Hidráulico de la Ladera Sur del Barrio La Sultana, Manizales. Manizales 2004.

Álvaro Correa Arroyave. Mecánica de rocas: teoría de elasticidad y elementos finitos. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, 1992.

Darrell Herd. Glacial and Volcanic Geology of the Ruiz-Tolima Volcanic Complex, Cordillera Central-Colombia. Washington, 1974.

Jean Francois Toussaint. La neotectónica regional del territorio colombiano y su relación con algunas amenazas geológicas. III conferencia colombiana de geología ambiental. Armenia 1994.

E. Hoek & E.T. Brown. Excavaciones subterráneas en roca. Mc Graw Hill. USA 1980.

Francisco José Cruz Prada. Relaciones Lluvias Deslizamientos en la Ciudad de Manizales- Revista SCIA 48 años. Manizales 2004.

Fernando Fujimura. Excavaciones Subterráneas: Reservatorio Subterráneo De Agua Tratada, Congreso Suramericano de Mecánica de Rocas. I Congreso Suramericano de Mecánica de Rocas. Bogotá. 1982

Germán Chicangana, Arturo Barrientos, Carlos A. Vargas-Jiménez. Determinación de esfuerzos a partir de los análisis de microtectónica en algunos sectores de los sistemas de fallas que cruzan el Eje Cafetero, Colombia. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá 2002.

Gonzalo Duque Escobar. [Manual de geología para ingenieros](#). Universidad Nacional de Colombia

1998

Gonzalo Duque Escobar y Carlos Enrique Escobar Potes. [Mecánica de los suelos](#). Universidad Nacional de Colombia. 2002.

John G. Ramsay. Plegamientos y fracturamiento de rocas. Editorial H. Blume. España, 1977.

José Luis Naranjo. Modelo de evolución morfotectónica del Sistema de Fallas de Romeral a nivel regional. Universidad de Caldas. Manizales 2005.

José Luis Naranjo y Pedro Antonio Ríos. Geología de Manizales y sus alrededores y su influencia en los riesgos geológicos. Universidad de Caldas, Manizales 1989.

Manuel García, Lisandro Beltrán y Álvaro González. Curso de estabilidad de taludes. Posgrado en geotecnia. Universidad Nacional de Colombia. Manizales 1993.

Michel Hermelín y Andrés Velásquez. Prediagnóstico de aspectos geológicos. Inédito. Plan Integral de Desarrollo Urbano de Manizales. Medellín 1985.

Microzonificación Sísmica de la Ciudad de Manizales, CIMOC -Alcaldía de Manizales, 2002.

OPS. Vulnerability of Water Supply Systems to Landslides. Mitigación de Desastres en Sistemas de Agua Potable y Alcantarillado Sanitario. [www.disaster-info.net/watermitigation/e/publicaciones/EstudioVEN/INDEX.HTML](http://www.disaster-info.net/watermitigation/e/publicaciones/EstudioVEN/INDEX.HTML) PAHO, 1997

Volfson & Yakoclen. Estructura de los campos y yacimientos metalíferos. Ed Mir. Moscú. 1982.

V. V. Belousov. Geología estructural. 2 ed. Moscú, 1979.

\*\*\*

### LOS AUTORES



[Eugenio Duque-Escobar](#), es Profesor de la U.N. de Colombia Sede Manizales, Geólogo de la U. de Caldas con títulos de Especialista en Geotecnia y de Magíster en Hábitat, de U.N. de Colombia.



[Gonzalo Duque-Escobar](#); es Profesor Especial de la Universidad Nacional de Colombia, e Ing. Civil con posgrados en Geotecnia, Geofísica y Economía; y coautoría de 20 textos y más de 1200 ítems.

...  
DOCUMENTOS RELACIONADOS:

<p><i>Acceso al suelo y segregación urbana.</i></p> <p><i>Adaptación al cambio climático para Manizales.</i></p> <p><i>Adaptación del PCC al Cambio Climático.</i></p> <p><i>Agua y Clima: El cuidado de la casa común.</i></p> <p><i>Aguas subterráneas: patrimonio abundante inexplorado y amenazado.</i></p> <p><i>Al Bahareque le Fue Muy Bien.</i></p> <p><i>Amenaza climática en el trópico andino.</i></p> <p><i>Amenaza sísmica en el Eje Cafetero.</i></p> <p><i>Árboles, poblaciones y ecosistemas.</i></p> <p><i>Asuntos del Clima Andino en Colombia</i></p> <p><i>Bosques en la cultura del agua.</i></p> <p><i>Bosques: regulación hídrica y pluviométrica.</i></p> <p><i>Cambio climático y gestión ambiental en Caldas.</i></p> <p><i>Cambio Climático: acciones-desafíos y el caso de Colombia.</i></p> <p><i>Cambio Climático y Pasivos Ambientales del Modelo Urbano.</i></p> <p><i>Clima andino y problemática ambiental.</i></p> <p><i>Clima, deforestación y corrupción.</i></p> <p><i>Colombia: huracanes y terremotos acechan.</i></p> <p><i>Colombia: retos y desafíos del cambio climático.</i></p> <p><i>Colombia: riesgos geodinámicos y hábitat.</i></p> <p><i>Colombia – Sismos de 1979.</i></p> <p><i>Cuando llegan las lluvias.</i></p> <p><i>Cultura del agua en los ríos urbanos.</i></p> <p><i>De la aldea cafetera a la ciudad fragmentada.</i></p> <p><i>De la amenaza climática a la gestión del riesgo.</i></p> <p><i>De la gestión del riesgo por las amenazas naturales.</i></p> <p><i>Degradación del hábitat y gestión ambiental.</i></p> <p><i>Del antropocentrismo al biocentrismo.</i></p>	<p><i>El calentamiento global arrecia... ¿y las heladas qué?</i></p> <p><i>El Estado y la función del suelo urbano en Manizales.</i></p> <p><i>El fantasma de la imprevisión.</i></p> <p><i>El inestable clima y la crisis del agua.</i></p> <p><i>El modelo de ocupación urbano – territorial de Manizales.</i></p> <p><i>El ocaso del bosque andino y la selva tropical.</i></p> <p><i>El porqué de los aguaceros en Colombia.</i></p> <p><i>Fragmentación urbana y clima en Colombia.</i></p> <p><i>Geomecánica.</i></p> <p><i>Geotecnia para el trópico andino.</i></p> <p><i>Gestión del riesgo por inestabilidad de terrenos en Manizales: Conclusiones y Recomendaciones.</i></p> <p><i>Gobernanza forestal para la ecorregión andina”.</i></p> <p><i>Huracanes y terremotos acechan</i></p> <p><i>Ingeniería, incertidumbre y ética.</i></p> <p><i>Ingenierías, medio ambiente y humanidades.</i></p> <p><i>Invasiones y pasivos ambientales en Manizales.</i></p> <p><i>La Ingeniería en la transformación del territorio.</i></p> <p><i>La encrucijada ambiental de Manizales.</i></p> <p><i>La lluvia solo fue el detonante y no la causa real del desastre.</i></p> <p><i>Laderas del trópico andino: Caso Manizales.</i></p> <p><i>Las huellas ecológica e hídrica.</i></p> <p><i>Manual de geología para ingenieros.</i></p> <p><i>Pasivos ambientales, suelo urbano y política pública en Manizales.</i></p> <p><i>PCC, cultura cafetera y cambio climático.</i></p> <p><i>Pequeños desastres que también cuentan en Colombia</i></p> <p><i>Vulnerabilidad de las laderas de Manizales.</i></p> <p><i>¿Y la transición ecológica, qué?.</i></p>
--	--

## **V- ANEXOS**

- 1. Aerofotografías e imágenes del área de estudio**
- 2. Columnas estratigráficas para el Túnel Manizales**
- 3. Fotografías en zona de portales**
- 4. Fotografías de unidades litológicas**
- 5. Mapas de la geología de Manizales**
- 6. Plano de lineamientos en Manizales,**
- 7. Planos de plantas y perfiles de túneles**

\*\*\*\*\*

## **CONTENIDO**

### **I- PARTE DESCRIPTIVA**

<b>Presentación</b>	<b>Pg 03</b>
<b>Justificación</b>	<b>Pg 04</b>
<b>Geología de Manizales</b>	<b>Pg 04</b>
<b>Aspectos morfológicos y geotécnicos</b>	<b>Pg 13</b>
<b>Definición del problema</b>	<b>Pg 20</b>

### **II- PARTE ANALÍTICA**

<b>Alcance del estudio</b>	<b>Pg22</b>
<b>Descripción de portales opcionales</b>	<b>Pg 22</b>
<b>Características geomecánicas de las rocas</b>	<b>Pg 34</b>
<b>Análisis fotogeológico estructural</b>	<b>Pg 36</b>
<b>Clasificación de los macizos rocosos</b>	<b>Pg 38</b>

### **III- PARTE CONCLUSORIA**

<b>Túneles de primera opción</b>	<b>Pg 50</b>
<b>Costos y rendimientos provisionales</b>	<b>Pg 53</b>
<b>Actividades de prospección y recomendaciones</b>	<b>Pg 55</b>
<b>Complementos y estrategias</b>	<b>Pg 57</b>
<b>Agradecimientos</b>	<b>Pg 58</b>

### **IV- BIBLIOGRAFÍA**

### **V- ANEXOS (6 Carpetas)**