

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

**CARACTERIZACIÓN GEOMECÁNICA Y MODELADO 3D
DE LOS MACIZOS ROCOSOS CORRESPONDIENTES AL
DESARROLLO DE LAS OBRAS SUBTERRÁNEAS DEL
SISTEMA CARACAS-GUARENAS-GUATIRE**

Presentado ante la ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por los Brs. Chacón C. Ángel A.,
Guevara B. Woodwarde J.
Para optar al título de Ingeniero Geólogo

Caracas, Abril 2008

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

CARACTERIZACIÓN GEOMECÁNICA Y MODELADO 3D DE LOS MACIZOS ROCOSOS CORRESPONDIENTES AL DESARROLLO DE LAS OBRAS SUBTERRÁNEAS DEL SISTEMA CARACAS-GUARENAS-GUATIRE

TUTOR ACADÉMICO: Prof. Armando Díaz Q.

Presentado ante la ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por los Brs. Chacón C. Ángel A.,
Guevara B. Woodwarde J.
Para optar al título de Ingeniero Geólogo

Caracas, Abril 2008

Caracas, Abril 2008

Los abajo firmantes, miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Geología, Minas y Geofísica, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por los Bachilleres Chacón C. Ángel A. y Guevara B. Woodwarde J., titulado:

**“CARACTERIZACIÓN GEOMECÁNICA Y MODELADO 3D DE LOS
MACIZOS ROCOSOS CORRESPONDIENTES AL DESARROLLO DE
LAS OBRAS SUBTERRÁNEAS DEL SISTEMA CARACAS-GUARENAS-
GUATIRE”**

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudios, conducentes al Título de Ingeniero Geólogo, y sin que ello signifique que se hacen solidarios con las ideas expuestas por los autores, lo declaran APROBADO.

Jurado

Jurado

Tutor: Prof. Armando Díaz Q.

AGRADECIMIENTOS

Gracias a Dios por darme salud, valor y ayudarme a superar los momentos difíciles.

Gracias a la Universidad Central de Venezuela por educarme y darme la oportunidad de convertirme en profesional, estoy orgulloso de ser UCEVISTA.

Quiero agradecer a mis padres Yolanda y Ángel, por darme la mejor educación del mundo y haber elegido lo mejor para mí.

Agradezco a mis abuelos Maíta y Paíto, por todos sus consejos, especialmente a ti Maita, que siempre me apoyaste y me diste motivos para seguir adelante, gracias por ser el pilar principal de esta bella familia.

Gracias a mi hermana Maite, a Rufo y a mis sobrinos Maibersy, Jorge y Vanesa, por haber creído en mí y por su constante apoyo, saben que sin ustedes todo hubiese sido distinto.

Gracias a Gerardo, Chela, Gabriela y Fernanda por haberme dado el privilegio de formar parte de su familia, además del apoyo y el cariño que siempre me ofrecieron, por dejarme contar con ustedes en los momentos difíciles y ofrecer siempre los consejos más acertados, a ustedes, les deseo lo mejor del mundo, gracias, los quiero mucho...

Quiero agradecer a las familias: Cárdenas Hernández, Pino Cárdenas, Perdomo Cárdenas, Cárdenas Rangel, Rangel Cárdenas, Quintero Rangel, Guerra Rangel y Chacón Guerrero, por su gran apoyo.

Gracias a ti Susi, por haberme apoyado en todo momento, por estar allí cada vez que te he necesitado, gracias amor, recuerda cuán importante eres para mí... Gracias a Saúl, Lula, Leo, Evelyn, Juri, Sandra, Ale, Alessandra, Sori, José Luis y a Bruno José por brindarme su valiosa amistad.

Gracias a la empresa RGR, por darnos la oportunidad de realizar el Trabajo Especial de Grado, particularmente a Roque García, Roberto Ucar, Huáscar Godoy, Michael Werhmann, Javier y Eduardo García, Javier Adrian, Vanesa, Rommel, Jhonny Farfán, Tonny y las señoras María y Josefina.

Agradezco a la empresa Odebrecht por darnos la oportunidad de ingresar al proyecto del sistema Caracas-Guarenas-Guatire, especialmente a Gladys Díaz, Ricardo Vélez y Adriana Zambrano.

Gracias a los profesores de la escuela de Geología que de manera desinteresada colaboraron con mi formación en esta gran casa de estudio, especialmente agradezco a los profesores: Armando Quintero, Ricardo Alezones, Lennin González, Rafael Falcón, Alfredo Mederos y Sebastián Grande.

Gracias a Woody, mi compañero de tesis, de deporte y gran amigo, por fin lo logramos hermano, como tu dices, ya cerramos este ciclo, es hora de iniciar otro y seguir adelante, se le quiere mucho.

Gracias a mis amigos, aquellos que vivieron buenos y malos momentos a mi lado a lo largo de la carrera, a Grazi y a la Yoyis, las mejores amigas que tengo, sin ustedes no hubiese sido lo mismo, a mis mompirris: Manuel, Canache, Joao, Lonio, Marcos, Andrés, Gherisi, Eduardo, Richard y Joa.

Gracias a mis amigos de Carrizal, esos que desde un principio creyeron en mí y me apoyaron moralmente, especialmente a: Alejo, Manuel, Mariela, Arnold y a todos los muchachos del equipo Carrizal Futbol Club, de corazón, gracias a todos los que de alguna manera me ayudaron a lograr este sueño...

Ángel Chacón...

Agradezco a dios por darme la vida y todo lo que he necesitado en su debido momento, también le agradezco por haberme bendecido con la hermosa familia que tengo. A él también le agradezco de forma infinita por la existencia de la mejor universidad del planeta... MI UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA...

Agradezco a mi madre por todas las cosas que ha sacrificado por sus tres hijos, por todos sus sacrificios, sólo dios sabe... a mi padre por su incansable labor día a día para darnos siempre lo mejor, a mis hermanos por su apoyo y por siempre estar unidos en la buenas y en las malas. A mis abuelos Otilio y Dominga, a mi difunta abuela Lucia, a mis tíos y tías, muy en especial a Lilian y a Miguel, a mis primos y primas, a Jonhatan, Eudi, Norelis, Carlos Alexis, Maritza, Luis Vivas, Elvira, por el apoyo de siempre.

A mi amigo incondicional, mi futuro compadre, mi gran compañero de medio-campo en el Deportivo Geología y en Carrizal FC, y sobre todas las cosas a un gran profesional con quien compartí casi toda mi carrera universitaria: mi compañero de tesis *ÁNGEL CHACÓN*.

A mis amigos, desde el Núcleo de Cagua a: Adriana Ubieda, Harú, Adrian, Carmen, Ybeth, Verónica, Laura, Luis Fernando, Oscar Utrera, Ramón, Denis, Juan Sánchez, Alberto Ochoa, Mariela...y a todos aquellos con quienes compartí buenos momentos. A mis amigos de la UCV - Caracas: Andrés, Graziana (mención especial por ser tan comprensiva, tan buena persona y sobretodo tan honesta y aplicada), Adriana Zambrano, Javier, Ricardo Vélez, Jesús Gheresi, Fredy, Erick "Canache", Enzo, Iliana, Walter, Enrique, Alexandra, María Antonieta, María Fernanda, Johana (Martínez & Ojeda), Richard, Manuel, Hildemaro, Pedro, Allí, Humberto, José Penín, Alexis, William "Golonio" Méndez, Joao, Gerardo, y a muchos otros que quizás no recuerdo pero que siempre llevaré en mi memoria como una parte trascendente en esta hermosa etapa de mi vida... Al Deportivo Geología FC por darme siempre tantas alegrías y satisfacciones en el deporte más hermoso del planeta: el Fútbol, y ante todo crear ese sentido de pertenencia que hoy tengo de mi Escuela de Geología y de mi UCV. A mi amor María Virginia por apoyarme en las buenas y más aun en las malas, por ser siempre tan comprensible y porque ante todo es una excelente amiga...Te quiero mucho...

A mi profesor Ricardo Alezones, quien fue mi mentor y guía en el mundo de la geología y a quien considero un familiar más, al Prof. Franco Urbani, por sus sabios consejos, a mi tutor Armando Díaz Quintero, quien siempre nos apoyo en los momentos difíciles de la fase final de nuestra carrera. A la profe Carolina Machillanda por su paciencia y excelente forma de enseñar...

Al Ing. Geólogo Roque García Ruiz por el incondicional apoyo para la realización de este trabajo, al Ing. Geólogo Peter Werhmann por sus sabios consejos y asesorías en momentos claves para esta tesis, al Dr. Roberto Ucar por su ayuda

desinteresada y colaboración incondicional en este trabajo, a todo el personal de RGR por el excelente trato que dispensaron hacia nosotros, realmente nos hicieron sentir como en casa; en especial a Javier Adrian y Vanessa González por ser tan panas y al gran Jhony Farfán por todas esas grandes ayudas en AUTOCAD, como sabe de eso...

A la Organización de Bienestar Estudiantil (OBE), ente que siempre me tendió una mano desde mi llegada a Caracas y a quienes agradezco de forma infinita toda la ayuda que brinda a personas que como yo venimos del interior del país con el sueño de ser profesionales de la patria... sigan así...A Guillermo Manrique, a la Flia. Hernandez Ramos, a la Flia. Velásquez Villa, a la Flia. Bauce Cárdenas, a la Sra. Ángela de Pablos por sus sabios consejos y excelente trato hacia mi persona...

Woodwarde...

DEDICATORIA

“Esta dedicatoria va a dirigida a ti, que me diste la vida, que me viste crecer, que me apoyaste siempre y me diste motivos para salir adelante en los momentos difíciles, una vez me dijiste que las personas deben creer en si mismas y respetar esas creencias para poder conseguir lo que se proponen, bueno, por lo menos yo lo entendí así...jajajaja.... Gracias a ese consejo en este momento he logrado una de mis metas y todo esto te lo debo a ti, espero que puedas verme desde donde estés y te sientas orgullosa de tu hijo, gracias mamá, a ti te dedico este triunfo.... TE AMO!!!”

Ángel Chacón.

“A dios, Aida, Argenis, Atkins & Jason, A mi Abuela Dominga & Abuelo Otilio, A la memoria de mi Abuela Lucia, a la memoria de mi Tía Silvia, a la memoria de mi primo Arnoldo...a la Universidad Central de Venezuela y a mi bello País...”

...Woodwarde

Chacón C. Ángel A., Guevara B. Woodward J.

**CARACTERIZACIÓN GEOMECÁNICA Y MODELADO 3D DE LOS
MACIZOS ROCOSOS CORRESPONDIENTES AL DESARROLLO DE LAS
OBRAS SUBTERRÁNEAS DEL SISTEMA CARACAS-GUARENAS-
GUATIRE**

Tutor Académico: Prof. Armando Díaz Q.

**Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Geología, Minas y
Geofísica. Año 2008, 143 p.**

Palabras Claves: Geotecnia, geomecánica, vía férrea, túnel, Caracas, Guarenas,
Guatire.

RESUMEN

El proyecto del Sistema Caracas – Guarenas – Guatire (SCGG) surge por la necesidad de mejorar la red de transporte a nivel nacional, por lo tanto la creación de nuevas alternativas que suplan las ya sobrecargadas vías de comunicación existentes son de gran vitalidad para el desarrollo económico y social del país, y es aquí donde las vías ferroviarias surgen como la alternativa más adecuada. Pero para la ejecución de un proyecto ferroviario de esa magnitud, es necesario poseer una buena información geológica de la zona y del comportamiento geomecánica de los macizos rocosos correspondientes a las secciones de túnel, es por esto que surge la idea de la realización de la caracterización geomecánica y modelado 3D de los macizos correspondientes al desarrollo de las obras subterráneas del Sistema Caracas - Guarenas – Guatire.

La zona de estudio se encuentra ubicada al nor – oeste del Estado Miranda, comprendiendo tres secciones de un tramo ubicado entre los sitios denominados La Culebrita y Puerta del Este, entre las coordenadas 10°31'-10°27' de latitud norte y

66°45'-66°39' de longitud oeste. La misma posee un área total aproximada de 40 km².

El área de estudio está compuesta en su totalidad por rocas metamórficas correspondientes a la Formación Las Mercedes, las cuales provienen de protolitos sedimentarios y están afectadas por un metamorfismo de la facies de los esquistos verdes.

Los macizos rocosos varían en calidad desde excepcionalmente malos a medios de acuerdo a la clasificación Q de Barton, cuyos parámetros se trabajaron con valores estadísticos que arrojaban una determinada probabilidad de ocurrencia del valor de Q para cada sector del trazado, y de muy mala a media en la RMR de Bieniawski. Se identificaron tres familias de diaclasas y una foliación predominante, con rumbos subverticales y suaves respectivamente.

ÍNDICE

| | |
|--|------|
| AGRADECIMIENTOS..... | IV |
| DEDICATORIA | VIII |
| RESUMEN | IX |
| ÍNDICE..... | XI |
| CAPÍTULO I. GENERALIDADES | 1 |
| PROBLEMA | 1 |
| JUSTIFICACIÓN..... | 1 |
| OBJETIVO GENERAL | 2 |
| OBJETIVOS ESPECÍFICOS | 2 |
| UBICACIÓN..... | 2 |
| TRABAJOS PREVIOS | 5 |
| CAPÍTULO II. METODOLOGÍA..... | 6 |
| FASE PRE-CAMPO | 6 |
| FASE CAMPO..... | 7 |
| FASE POST – CAMPO | 14 |
| CAPÍTULO III. GEOGRAFÍA FÍSICA | 36 |
| RELIEVE | 36 |
| DRENAJE | 39 |
| VEGETACIÓN | 41 |
| CLIMA..... | 43 |
| CAPÍTULO IV. MARCO TEÓRICO..... | 44 |
| PROPIEDADES FÍSICAS DE LA MATRIZ ROCOSA..... | 44 |
| CLASIFICACIONES GEOMECÁNICAS | 46 |
| CLASIFICACIÓN RMR. | 47 |

| | |
|---|-----|
| CLASIFICACIÓN DEL MACIZO ROCOSO Q | 47 |
| CLASIFICACIÓN RMI | 49 |
| CAPÍTULO V. GEOLOGÍA REGIONAL | 51 |
| ESTRATIGRAFÍA REGIONAL | 53 |
| GEOLOGÍA ESTRUCTURAL REGIONAL | 59 |
| CAPÍTULO VI. RESULTADOS | 62 |
| GEOLOGÍA LOCAL..... | 62 |
| GEOLOGÍA ESTRUCTURAL LOCAL | 82 |
| GEOMECÁNICA | 110 |
| CAPÍTULO VII. ANÁLISIS DE RESULTADOS | 125 |
| GEOLOGÍA | 125 |
| GEOMECÁNICA | 134 |
| CAPÍTULO VIII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES | 139 |
| BIBLIOGRAFÍA..... | 142 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura #1. Ubicación de la zona de estudio | 4 |
| Figura# 2. Representación esquemática de las propiedades geométricas de las discontinuidades..... | 9 |
| Figura #3. Modelos de continuidad o persistencia..... | 10 |
| Figura #4. Actualización de 1993 del grafico de diseño del sistema Q para túneles y cavernas, basados en los principios de de sostenimiento permanente del MNT..... | 25 |
| Figura #5. Factores de ajuste para el sostenimiento en roca..... | 30 |
| Figura #6. Ábaco de sostenimiento para terrenos diaclasados..... | 31 |
| Figura #7. Portal de entrada del túnel El Encantado, visto desde la urbanización Miranda. | 38 |
| Figura #8. Portal de entrada del túnel de Mampote, visto desde el extremo este del club Mampote. Rumbo E-O..... | 39 |
| Figura #9. Portal de entrada del túnel de Mampote, visto desde la autopista Caracas Guarenas. Rumbo E-O..... | 39 |
| Figura #10. Cauce del río Guarenas | 40 |
| Figura #11. Vegetación tipo sabanera..... | 41 |
| Figura #12. Bosque tropófilo | 41 |
| Figura #13. Bromelia | 42 |
| Figura #14. Ubicación de las fajas tectónicas.. | 52 |
| Figura #15. Afloramiento del esquistos cuarzoso de aspecto gnéisico, muscovítico y feldespático, representativo de la unidad Klm1. Rumbo N 50° E. | 63 |
| Figura #16. Cristal de calcita con exfoliación romboédrica presente en la muestra MI-004. Izquierda: nicoles paralelos. Derecha: nicoles cruzados. Foto tomada con objetivo de 10X de aumento..... | 66 |

| | |
|--|----|
| Figura #17 Cristales de muscovita entrelazados con grafito evidenciando micropliegue. Izquierda: nicoles paralelos. Derecha: nicoles cruzados. Foto tomada con objetivo de 10X de aumento..... | 66 |
| Figura #18. Afloramiento del esquisto calcáreo-cuarzo-moscovítico, representativo de la unidad Klm2. Rumbo E-O..... | 67 |
| Figura #19. Cristales de muscovita orientados intercalados con cristales de cuarzo. Izquierda :nicoles paralelos. Derecha: nicoles cruzados. Foto tomada con objetivo de 10X de aumento. | 69 |
| Figura #20. Pseudomorfo de pirita en contacto con cristales de cuarzo y muscovita. Izquierda: nicoles paralelos. Derecha: nicoles cruzados. Foto tomada con objetivo de 10X de aumento. | 69 |
| Figura #21. Afloramiento del esquisto cuarzo-feldespático-calcáreos, de la unidad Klm3. Rumbo E-O. | 70 |
| Figura #22. Afloramiento del esquisto de aspecto gnéisico cuarzo-feldespático-calcáreos, de la unidad Klm3 (g). Rumbo N 65° E..... | 71 |
| Figura #23. Cristales euhedrales de pirita en contacto con cristales de cuarzo y muscovita. Izquierda: nicoles paralelos. Derecha: nicoles cruzados. Foto tomada con objetivo de 10X de aumento..... | 74 |
| Figura #24. Cristales de calcita en contacto con cristales anhedrales de cuarzo.74. Izquierda: nicoles paralelos. Derecha: nicoles cruzados. Foto tomada con objetivo de 10Xde aumento. | 74 |
| Figura #25. Cristales anhedrales de cuarzo. Izquierda: nicoles paralelos. Derecha: nicoles cruzados. Foto tomada con objetivo de 10X de aumento..... | 77 |
| Figura # 26. Filosilicatos dispuestos en bandas subparalelas intercaladas con cristales de cuarzo. Izquierda: nicoles paralelos. Derecha: nicoles cruzados. Foto tomada con objetivo de 10X de aumento..... | 77 |
| Figura #27. Afloramiento del esquisto cuarzo micáceo, representativo de la unidad Klm5. Rumbo N 55° E. | 78 |
| Figura #28. Filosilicatos entrelazados con finas laminas de grafito dispuestos en bandas subparalelas intercaladas con cristales de cuarzo. Izquierda: nicoles | |

| | |
|---|----|
| paralelos. Derecha: nicoles cruzados. Foto tomada con objetivo de 10X de aumento. | 81 |
| Figura #29. Pseudomorfos de pirita en contacto con cristales de cuarzo y muscovita. Izquierda: nicoles paralelos. Derecha: nicoles cruzados. Foto tomada con objetivo de 10X de aumento..... | 82 |
| Figura #30 Evidencia de falla en el margen Oeste de la quebrada La Encantada..... | 83 |
| Figura #31. Diagramas que muestran la foliación dominante en el Túnel El Encantado,85. Con rumbo preferencial N 30°- 40° E y la distribución de los polos de dichos planos..... | 85 |
| Figura #32. Evidencia de la foliación en la quebrada Valencia, perteneciente al túnel La Encantada..... | 86 |
| Figura #33. Vista en detalle de la foto anterior..... | 86 |
| Figura #34. Diagramas que muestran la foliación dominante en el Sector #1 (S1) del Túnel Caucagüita, Con rumbos muy dispersos y la distribución de los polos de dichos planos (* Dos Polos)..... | 87 |
| Figura #35. Diagramas que muestran la foliación dominante en el Sector #2 (S2) del Túnel Caucagüita, Con rumbos preferencial N 50° - 70° E y la distribución de los polos de dichos planos. (* Dos Polos)..... | 88 |
| Figura #36. Evidencia de la foliación y diaclasas en la quebrada Placer, perteneciente al sector #2 (S2) del túnel Caucagüita..... | 89 |
| Figura #37. Evidencia de la foliación y diaclasas en la quebrada QDY, perteneciente al sector #2 (S2) del túnel Caucagüita..... | 89 |
| Figura #38. Diagramas que muestran la foliación dominante en el Sector #3 (S3) del Túnel Caucagüita, Con rumbo N 50° - 60° E y la distribución de los polos de dichos planos (* Dos Polos)..... | 90 |
| Figura #39. Evidencia de la foliación y diaclasas en la quebrada GUAR, perteneciente al sector #3 (S3) del túnel Caucagüita..... | 91 |
| Figura #40. Evidencia de la foliación en la quebrada QMB, perteneciente al sector #2 (S2) del túnel Mampote..... | 91 |

| | |
|---|-----|
| Figura #41 Detalle de la foliación en la quebrada QEZ, perteneciente al sector #2 (S2) del túnel Mampote. | 92 |
| Figura #42 Evidencia de la foliación en la sección CDN-002, perteneciente al sector #2 (S2) del túnel Mampote. | 92 |
| Figura #43. Diagramas que muestran la foliación dominante en el Sector #2 (S2) del Túnel Mampote, Con rumbos entre N 60° E – E_O y N 50° O – E_O, junto a la distribución de los polos de dichos planos (* Dos Polos). | 93 |
| Figura #44. Diagramas que muestran las diaclasas dominante en el Túnel El Encantado, Tres familias, D1: N 31° O 88° N, D2: N 60° O SV, D3: N 16° O 70° S , junto al diagrama de concentración de los polos de dichos planos (* Dos Polos). | 94 |
| Figura #45. Evidencia del diaclasado en la quebrada Valencia, perteneciente al túnel La Encantada. | 95 |
| Figura #46. Diagramas que muestran las diaclasas dominante en el Sector #1 (S1) del Túnel Caucaçüita, Dos familias, D1: N 79° E 89° S, D2: N 35° O 79°N , junto al diagrama de concentración de los polos de dichos planos (* Dos Polos). | 96 |
| Figura #47. Diagramas que muestran las diaclasas dominante en el Sector #2 (S2) del Túnel Caucaçüita, Tres familias, D1: N 5° E 88° S, D2: N 30° O 84 N, D3: N 59° E 72° S , junto al diagrama de concentración de los polos de dichos planos (* Dos, * Tres, * Cuatro Polos). | 97 |
| Figura #48. Diagramas que muestran las diaclasas dominante en el Sector #3 (S3) del Túnel Caucaçüita, Tres familias, D1: N 22° O 83° N, D2: N 63° E 85 N, D3: N 78° E 56° S , junto al diagrama de concentración de los polos de dichos planos. ... | 98 |
| Figura #49. Diagramas que muestran las diaclasas dominante en el Sector #2 (S2) del Túnel Mampote, Cuatro familias, D1: N 15° E 86° S, D2: N 31° O 80 N, D3: N 51° E 50° S, D4: N 18° O 70° S junto al diagrama de concentración de los polos de dichos planos. | 99 |
| Figura #50. Evidencia de la foliación en la quebrada QMB, perteneciente al sector #2 (S2) del túnel Mampote. | 100 |
| Figura #51. Evidencia del diaclasado en la sección CDN-002, perteneciente al sector #2 (S2) del túnel Mampote. | 100 |

| | |
|---|-----|
| Figura #52. Vista desde el Nor – Oeste en perspectiva (Izquierda) y frontal aproximadamente Oeste - Este (Derecha) de las posibles cuñas que se generarían en el túnel La Encantada. | 101 |
| Figura #53. Vista desde el Sur de las posibles cuñas que se generarían en el túnel La Encantada. | 102 |
| Figura #54. Vista desde el Nor – Oeste en perspectiva (arriba) y frontal aproximadamente Oeste – Este (abajo) de las posibles cuñas que se generarían en el sector #1 (S1) del túnel Caucaçüita. | 104 |
| Figura #55. Vista desde el Sur de las posibles cuñas que se generarían en el sector #1 (S1) del túnel Caucaçüita. | 104 |
| Figura #56. Vista desde el Norte en perspectiva (Izquierda) y frontal desde el Nor – Oeste (derecha) de las posibles cuñas que se generarían en el sector #2 (S2) del túnel Caucaçüita. | 105 |
| Figura #57. Vista desde el Sur - Oeste de las posibles cuñas que se generarían en el sector #2 (S2) del túnel Caucaçüita. | 106 |
| Figura #58. Vista desde el Sur – Oeste en perspectiva (arriba) y frontal Oeste – Este (abajo) de las posibles cuñas que se generarían en el sector #3 (S3) del túnel Caucaçüita. | 107 |
| Figura #59. Vista desde el Sur de las posibles cuñas que se generarían en el sector #3 (S3) del túnel Caucaçüita. | 108 |
| Figura #60. Vista desde el Nor - Oeste en perspectiva (Izquierda) y frontal desde el Sur – Oeste (derecha) de las posibles cuñas que se generarían en el sector #2 (S2) del túnel Mampote. | 108 |
| Figura #61. Vista desde el Sur – Este de las posibles cuñas que se generarían en el sector #2 (S2) del túnel Mampote. | 109 |
| Figura #62. Diagrama que muestra la concentración de polos de la foliación dominante en los tres túneles del proyecto, donde se aprecia los bajos buzamientos de dichos planos entre 15° y 35° Norte. | 130 |
| Figura #63. Diagrama que muestra la dirección principal de la foliación dominante en los tres túneles del proyecto, N 60° - 70° E. | 131 |

Figura #64. Diagrama que muestra la concentración de polos de las diaclasas dominantes en los tres túneles del proyecto, mostrando buzamientos subverticales para las familias de diaclasas. 132

Figura #65. Diagrama que muestra las diaclasas dominantes en los tres túneles del proyecto, Tres familias, **D1: N 11° E 85° S, D2: N 31° O 85°N, D3: N 83° E 83° S.** (* Uno, ▲ Dos, ► Tres, + Cuatro, x Cinco, ♦ Seis, ▼ Siete Polos). 133

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla #1. Descripción del grado de meteorización. | 8 |
| Tabla #2. Descripción del espaciado. | 10 |
| Tabla #3. Descripción de la continuidad. | 11 |
| Tabla #4. Descripción de la rugosidad. | 11 |
| Tabla #5. Descripción de la abertura. | 12 |
| Tabla #6. Determinación del GSI en rocas metamórficas de la cordillera de la costa en Venezuela. | 13 |
| Tabla #7. Clasificación Geomecánica según BIENAWSKI, 1989. RMR. | 16 |
| Tabla #8. Parámetros que forman el índice Q según BARTON, 1974. | 17 |
| Tabla #9. Clase de roca en base al índice Q según BARTON, 1974. | 18 |
| Tabla #10. Valores de los parámetros que forman el índice Q según BARTON, 1974. | 18 |
| Tabla #11. Parámetros que forman el índice R _{Mi} según PALLSTRÖM, 1995,2000. | 25 |
| Tabla #12. Valores de los parámetros que forman el índice R _{Mi} según PALLSTRÖM, 1995,2000. | 26 |
| Tabla #13. Características geomecánicas del macizo rocoso. | 32 |
| Tabla #14. Valores de la constante <i>m_i</i> para roca intacta por tipos de roca. | 33 |
| Tabla #15. Clasificación de la excavación por rangos de cobertura. | 34 |
| Tabla #16. Propiedades de la matriz rocosa y métodos para su determinación. | 45 |
| Tabla #17. Valores de abundancia mineral expresados en porcentaje en esquistos calcáreos cuarzosos, esquistos cuarzosos de aspecto gnéisico, moscovítico y feldespático. | 64 |

| | |
|---|-----|
| Tabla #18. Valores de abundancia mineral expresados en porcentaje en esquistos calcáreos cuarzo-moscovíticos-grafitoso | 68 |
| Tabla #19. Valores de abundancia mineral expresados en porcentaje en esquistos cuarzo feldespático- calcáreos o no, esquistos micáceos y filitas micáceas grafitosas | 72 |
| Tabla #20. Valores de abundancia mineral expresados en porcentaje en esquistos cuarzo feldespático-calcáreos o no de aspecto gnéisico..... | 74 |
| Tabla #21. Valores de abundancia mineral expresados en porcentaje en esquistos cuarzo micáceos y filitas micáceas, ligeramente grafitosas, calcáreas o no..... | 79 |
| Tabla #22. Datos de las respectivas cuñas en el túnel La Encantada..... | 102 |
| Tabla #23. Datos de las respectivas cuñas en el sector #1 (S1) del túnel Caucaçüita..... | 104 |
| Tabla #24. Datos de las respectivas cuñas en el sector #2 (S2) del túnel Caucaçüita..... | 105 |
| Tabla #25. Datos de las respectivas cuñas en el sector #3 (S3) del túnel Caucaçüita..... | 106 |
| Tabla #26. Datos de las respectivas cuñas en el sector #2 (S2) del túnel Mampote..... | 108 |
| Tabla#27. Densidad y absorción | 110 |
| Tabla #28. Resultados del ensayo de carga puntual y cálculo de la resistencia a la compresión simple..... | 111 |
| Tabla #29. Valores estimados de RQD para el macizo correspondiente al túnel La Encantada..... | 112 |
| Tabla #30. Valores estimados de RQD para el macizo correspondiente al túnel de Mampote | 112 |
| Tabla #31. Valores estimados de RQD para el macizo correspondiente al túnel Caucaçüita..... | 113 |
| Tabla #32. Caracterización del macizo en base a la clasificación (Q) de Barton..... | 114 |

| | |
|---|-----|
| Tabla #33. Caracterización del macizo en base a la clasificación (RMR) de Bieniawski..... | 114 |
| Tabla #34. Caracterización del macizo en base a la clasificación (RMR) de Bieniawski..... | 115 |
| Tabla #35. Caracterización del macizo en base a la clasificación (RMR) de Bieniawski..... | 116 |
| Tabla #36. Caracterización del macizo en base a la clasificación (RMi) de Pallmström. | 117 |
| Tabla #37. Caracterización del macizo en base a la clasificación (RMi) de Pallmström. | 118 |
| Tabla #38. Caracterización del macizo en base a la clasificación (RMi) de Pallstöm..... | 119 |

CAPÍTULO I

GENERALIDADES

PROBLEMA

La necesidad de mejorar la red de transporte del país es vital para el desarrollo económico y social del mismo, por lo cual la construcción de nuevas vías de comunicación es una necesidad imperante hoy en día. Estas nuevas vías incluyen la construcción de ferrocarriles, que permitan transportar mayor cantidad de usuarios y mercancía en menor tiempo que los sistemas de transporte convencionales automotores.

La ejecución de este tipo de obras requieren la construcción de túneles en algunos de los tramos en los que se encuentra proyectada la misma, es aquí donde se hace indispensable disponer de la información geológica y geomecánica detallada de los macizos rocosos o los suelos en los cuales se llevarán a cabo las excavaciones.

JUSTIFICACIÓN

Teniendo como objetivo actualizar la información geológica, realizar la caracterización geomecánica detallada de los macizos rocosos a excavar e implementar una herramienta vanguardista en el área como es el modelado en 3D, para el desarrollo de las obras subterráneas del Sistema Caracas – Guarenas – Guatire (SCGG), se ha decidido realizar el presente trabajo especial de grado. A fin de tener una base de información indispensable para el desarrollo del proyecto.

OBJETIVO GENERAL

Realizar la caracterización geomecánica junto al modelado en 3D de los macizos rocosos correspondientes a las obras subterráneas que conforman el tramo sub-urbano del Sistema Caracas – Guarenas – Guatire (SCGG).

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ✘ Realizar la caracterización geológica de las zonas de interés a través del levantamiento de campo, en el cual se tomarán muestras para la elaboración de secciones finas y ensayos de laboratorio.
- ✘ Determinar las características mineralógicas y texturales de los diferentes litotipos encontrados.
- ✘ Elaborar un mapa Geológico integrado al perfil geomecánico a escala 1:5.000 (túnel Caucagüita), 1:2500 (túneles La Encantada y Mampote).
- ✘ Realizar la caracterización geomecánica de los macizos rocosos en los cuales se ejecutaran las obras subterráneas del proyecto.
- ✘ Generar un modelado en 3D que muestre la distribución de los distintos parámetros geomecánicos en los tramos del proyecto.
- ✘ Actualizar la información geológica regional.

UBICACIÓN

El área de estudio se localiza hacia la zona nor – oeste del estado Miranda, comprendiendo tres secciones de un tramo ubicado entre los sitios denominados La Culebrita y Puerta del Este. La primera sección va desde la zona este de la quebrada Perico, ubicada al oeste del sector la Culebrita, con coordenadas UTM N:1.161.300 y E:746.250, hasta el margen oeste de la quebrada La Encantada (zona correspondiente al primer túnel, La Encantada), la segunda inicia al este de la quebrada La Encantada y finaliza al oeste del helipuerto Ávila del Estado Miranda (zona correspondiente al

segundo túnel, Caucagüita) y por ultimo, la tercera sección, que inicia en una zona ubicada al este de Terrazas de Mampote y culmina 1 km al oeste del cementerio situado en las cercanías de la carretera vieja Caracas-Guarenas con coordenadas UTM N:1.158.750 y E:752.750, a una distancia aproximada de 3 km del sector Puerta del Este (zona correspondiente al tercer túnel, Mampote). Ver Figura#1.

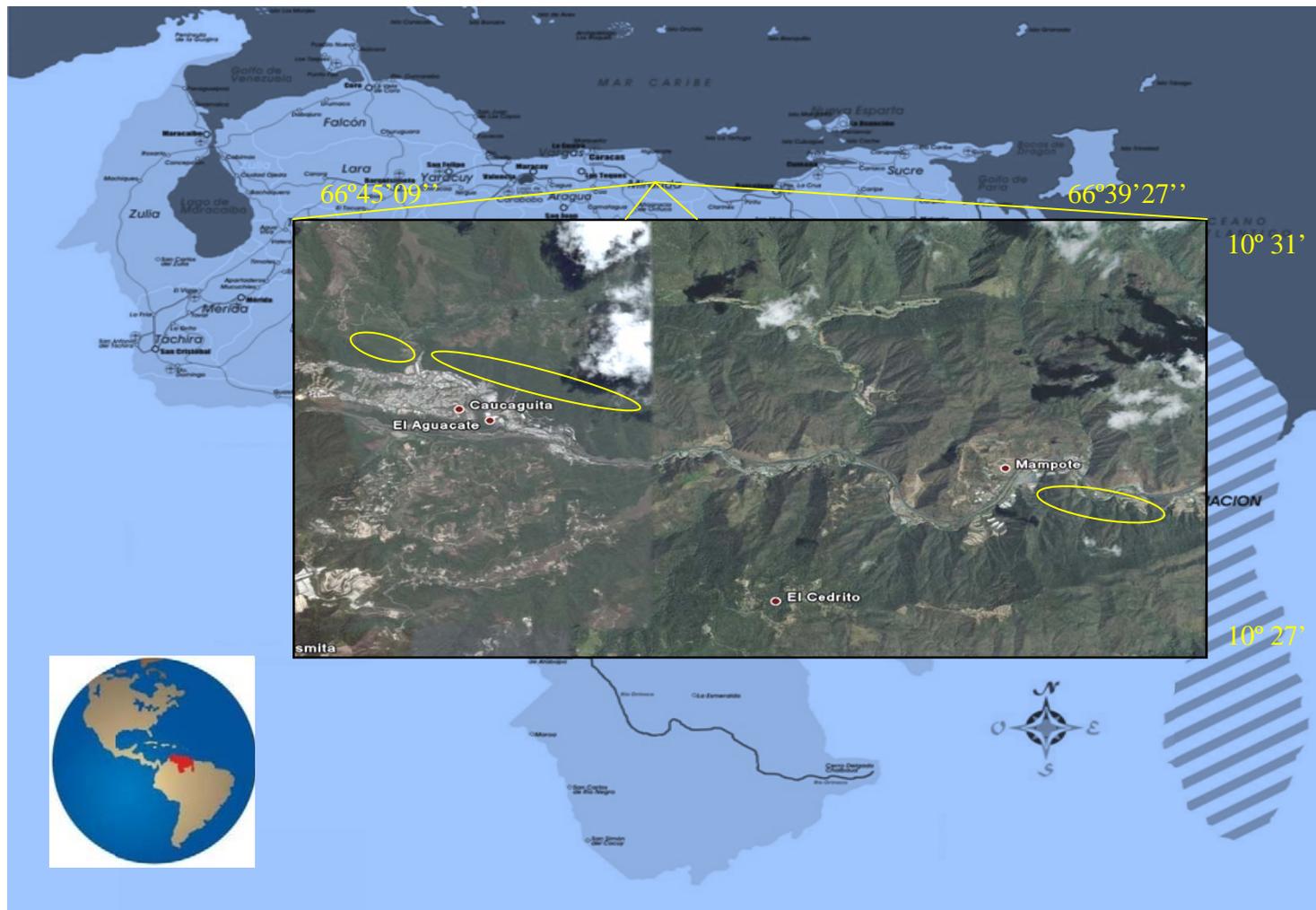


Figura #1. Ubicación de la zona de estudio (), (Tomado y modificado de Google Earth y <http://www.cotatur.gov.ve>).

TRABAJOS PREVIOS

WEHRMANN (1972) y la revisión de GONZÁLEZ DE JUANA et al. (1980, p. 317), definen la formación Las Mercedes en la cual la litología predominante consiste en esquisto cuarzo - moscovítico - calcítico - grafitoso con intercalaciones de mármol grafitoso en forma de lentes, que cuando alcanza gruesos espesores se ha denominado "Caliza de Los Colorados". Las rocas presentan buena foliación y grano de fino a medio, el color característico es el gris pardusco. La mineralogía promedio consiste en cuarzo (40%) en cristales dispuestos en bandas con la mica, moscovita (20%) en bandas lepidoblásticas a veces con clivaje crenulado, calcita (23%) en cristales con maclas polisintéticas, grafito (5%), y cantidades menores de clorita, óxidos de hierro, epidoto y ocasionalmente plagioclasa sódica. El mármol intercalado con esquisto se presenta en capas delgadas usualmente centimétricas a decimétricas, son de color gris azulado, cuya mineralogía es casi en su totalidad calcita, escasa dolomita y cantidades accesorias de cuarzo, muscovita, grafito, piritita y óxidos de hierro. En lo que respecta a la Formación las Brisas, WEHRMANN (*op. cit.*) afirma que está constituida en un 90% de esquistos cuarzo-feldespático-moscovíticos; el 10% restante lo constituyen, en orden de abundancia, esquistos cuarzo-feldespáticos, epidóticos o cloríticos, calizas, cuarcitas y metaconglomerados. Menciona igualmente, mineralizaciones pobres de cobre en algunas calizas, en forma de sulfuros y sulfatos.

BARBOZA & RODRÍGUEZ (2001), determinaron 3 patrones de falla, siendo el más antiguo el de orientación E – W, a este sistema pertenecen las fallas de San Sebastián, Macuto y Ávila. Los otros dos sistemas son N 40° - 70° W y N 30° - 70° E. La foliación se debe a las texturas metamórficas lepidoblásticas y nematoblásticas. La foliación predominante N 10° - 80° E con buzamiento al norte y al sur entre 16° - 84°. Las diaclasas tienen orientación principal N 35° - 80° E y buzamiento 40° - 80° tanto al sur como al norte y N 35° - 80° W, con buzamiento 30° - 85° al norte.

CAPÍTULO II

METODOLOGÍA

El desarrollo del proyecto se llevo a cabo en tres fases bien diferenciadas, las cuales se describen de forma detallada a continuación:

FASE PRE-CAMPO

Etapa en la cual se realizaron las labores que antecedieron al trabajo de campo y en la que se ejecutaron las siguientes actividades:

- ✘ Recopilación de la información bibliográfica disponible del área de estudio, en bibliotecas, empresas y a través de la internet. Se consultaron Tesis de Grado, Trabajos de Ascenso, Congresos, Seminarios, Conferencias, Revistas Especializadas, Libros, Informes Técnicos y material no publicado que estuvo al alcance.
- ✘ Integración de las hojas cartográficas 6847 – I – SO, 6847 – II – NO, 6847 – III – NE y 6847 – IV – SE a escala 1:25.000, puestas a disposición en formato digital por parte de la empresa Constructora Norberto Odebrecht S.A.
- ✘ Estudio fotogeológico de la misión aerofotográfica: 030198 N# 3190 - 3198 que cubren la región, orientada a la identificación de las evidencias de deformaciones tectónicas que pudiesen estar afectando al área en estudio y a la actualización de la cartografía geológica existente sobre la misma.
- ✘ Planificación de la exploración geológica y geomecánica superficial.

FASE CAMPO

En esta etapa se realizaron todas las actividades relacionadas con la recopilación de información en el área de estudio, las cuales se describen con detalle a continuación:

- ✘ Realizar un inventario detallado de todos los litotipos presentes en la zona, con énfasis particular en la ponderación de sus propiedades geomecánicas a fin de realizar las clasificaciones propuestas por BIENAWSKI (RMR, 1989), HOEK & BROWN (GSI modificado por TRUZMAN, 2000), BARTON (Q, 1974; actualizado en 1994) y PALLMSTRÖM (RMi, 1995; actualizado en 2000) y verificar los resultados obtenidos del estudio fotogeológico previo.
- ✘ Constatar la presencia de los procesos de geodinámica previamente identificados y de otros que no se hubiesen percibido durante la etapa de fotointerpretación, precisando su ubicación espacial, sus características físicas y sus extensiones superficiales.
- ✘ Toma de muestras representativas para su posterior procesamiento en el laboratorio.

Los aspectos tomados en cuenta al momento de realizar la caracterización de los macizos rocosos fueron los siguientes:

a) *DESCRIPCION DEL AFLORAMIENTO*: en esta actividad se realizó la identificación y descripción general del afloramiento, incluyendo la sectorización del mismo a fin de establecer zonas con características similares, y se especificaron las siguientes características:

- I. Formación y edad geológica.
- II. Litología.

- III. Rasgos estructurales observables a gran escala, por ejemplo: macizo estratificado, fallado, fracturado, masivo, plegado, etc.
- IV. Zonas alteradas, meteorizadas y espesor de las mismas.
- V. Presencia de agua, manantiales, etc.

Se incluyo de igual forma el grado de meteorización de la roca, a fin de tener una aproximación de las propiedades mecánicas de la misma. Tal caracterización se realizó de manera visual según la siguiente tabla:

Tabla #1. Descripción del grado de meteorización. (Tomado y modificado de GONZÁLEZ *ET AL.*, 2002).

| TERMINO | DESCRIPCION |
|---------------------|--|
| Fresca | No se observan signos de meteorización en la matriz rocosa. |
| Decolorada | Se observan cambios en el color original de la matriz rocosa. Es conveniente indicar el grado de cambio. Se debe destacar si se observa que el cambio de color se restringe a uno o algunos minerales. |
| Desintegrada | La roca se ha alterado al estado de un suelo, manteniéndose la fábrica original. La roca es friable, pero los granos minerales no están descompuestos. |
| Descompuesta | La roca se ha alterado al estado de un suelo, algunos o todos los minerales están descompuestos. |

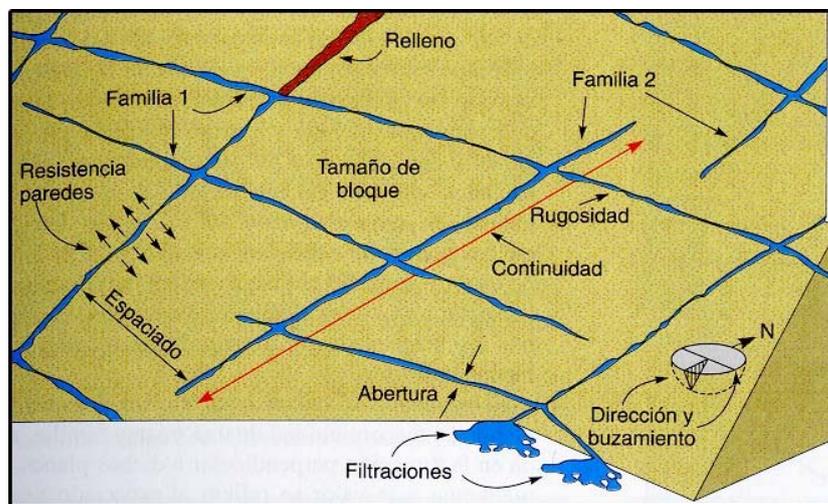
La presencia de agua en el macizo será descrita de forma visual haciendo particular énfasis en las discontinuidades del mismo y especificando si el agua se presenta fluyendo, goteando o si el macizo esta húmedo, ligeramente húmedo o seco.

b) *DESCRIPCION DE LAS DISCONTINUIDADES*: en esta etapa se realizó la descripción de cada familia de discontinuidades tomando en consideración los siguientes parámetros:

- I. Orientación.
- II. Espaciado.
- III. Continuidad o Persistencia.
- IV. Rugosidad.

- V. Resistencia de las paredes.
- VI. Abertura.
- VII. Relleno.

La orientación de las discontinuidades se pudo conocer por medio de la medición de la dirección de buzamiento y por la medición del buzamiento, usando para esto una brújula de campo con clinómetro.



Figura# 2. Representación esquemática de las propiedades geométricas de las discontinuidades.
(Tomado de GONZÁLEZ *ET AL.*, 2002).

La distancia comprendida entre dos planos de discontinuidad de la misma familia y medida de manera perpendicular a dichos planos es conocida como espaciado, esta medición se debe realizar, como norma general, a una superficie 10 veces mayor a la longitud del espaciado y se efectuó utilizando una cinta métrica. La tabla #3 muestra los diferentes tipos de espaciado utilizados:

Tabla #2. Descripción del espaciado. (Tomado y modificado de GONZÁLEZ *ET AL.*, 2002).

| DESCRIPCIÓN | ESPACIADO |
|--------------------------------|-------------|
| Extremadamente junto | < 2 cm |
| Muy junto | 2 - 6 cm |
| Junto | 6 - 20 cm |
| Moderadamente junto | 20 - 60 cm |
| Separado | 60 cm - 2 m |
| Muy separado | 2 - 6 m |
| Extremadamente separado | >6 m |

La continuidad o persistencia de un plano de discontinuidad es su extensión superficial, medida por la longitud según la dirección del plano y según su buzamiento. Esta medición se realizó con una cinta métrica. A continuación se muestra la descripción de la continuidad, junto a modelos de continuidad o persistencia:

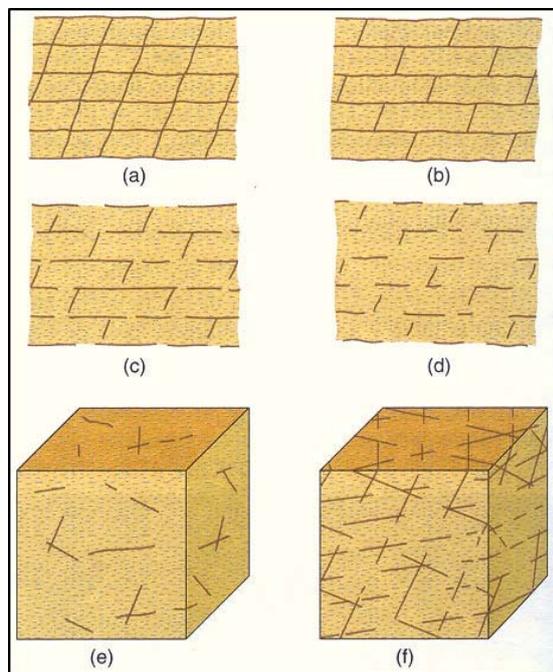
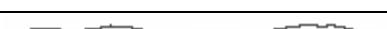
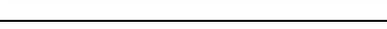
**Figura #3.** Modelos de continuidad o persistencia. (Tomado de GONZÁLEZ *ET AL.*, 2002).

Tabla #3. Descripción de la continuidad. (Tomado de GONZÁLEZ *ET AL.*, 2002).

| CONTINUIDAD | LONGITUD |
|-----------------------------|-----------------|
| Muy baja continuidad | < 1 m |
| Baja continuidad | 1 – 3 m |
| Continuidad media | 3 – 10 m |
| Alta continuidad | 10 – 20 m |
| Muy alta continuidad | > 20 m |

La rugosidad se define como el nivel de las irregularidades de las superficies a pequeña escala de dichos planos, por lo que puede ser medida en escalas centimétricas y milimétricas. La medición hecha en campo se llevo a cabo a través de comparación visual con los perfiles estándar de rugosidad que se muestran a continuación:

Tabla #4. Descripción de la rugosidad. (Tomado de BECHARA & MATOS, 2006).

| PERFILES DE RUGOSIDAD | SEGÚN ISRM, 1981 | ADAPTACION A LA CLASIFICACION RMR,1989 |
|---|-----------------------------|---|
|  | Escalonado – Rugoso | Muy Rugoso |
|  | Ondulado – Rugoso | |
|  | Plano – Rugoso | Rugoso |
|  | Escalonado – Liso | Ligeramente Rugoso |
|  | Escalonado – Pulido | |
|  | Ondulado – Liso | Ondulado |
|  | Ondulado – Pulido | Suave |
|  | Plano – Liso | |
|  | Plano – Pulido | |

La abertura se refiere a la distancia entre ambas caras de la discontinuidad medida en forma perpendicular a las mismas, para la clasificación geomecánica se tomó el promedio de los valores obtenidos para cada familia de discontinuidades. A continuación la tabla #6 muestra la descripción de la abertura.

Tabla #5. Descripción de la abertura. (Tomado y modificado de GONZÁLEZ *ET AL.*, 2002).

| ABERTURA | DESCRIPCION |
|------------|----------------------|
| 0 | Muy cerrada |
| < 0,1 mm | Cerrada |
| 0,1 – 1 mm | Parcialmente abierta |
| 1 – 5 mm | Abierta |
| > 5 mm | Muy abierta |

El relleno es el material existente entre las paredes de las discontinuidades, de naturaleza distinta a la roca. Las características descritas en campo son: el espesor (medido por medio del uso de una regla graduada) y la resistencia al corte, siendo esta última tomada como duro o blando.

c) *Determinación del GSI (Geological Strength Index)*: esta propiedad evalúa la calidad del macizo rocoso en función del grado y las características de fracturación, estructuras geológicas, tamaño de los bloques y alteración de las discontinuidades. Se definió en campo de acuerdo a las estructuras presentes y las condiciones de la superficies de discontinuidad, utilizando la clasificación modificada por TRUZMAN, 2003 para las rocas de la cordillera de la costa venezolana (ver tabla #7).

Tabla #6. Determinación del GSI en rocas metamórficas de la cordillera de la costa en Venezuela. (Tomado de TRUZMAN, 2003).

| CARACTERÍSTICAS DEL MACIZO ROCOSO PARA ESTIMAR EL ÍNDICE DE RESISTENCIA GEOLOGICA (GSI) A partir de la descripción de la estructura y las condiciones de la superficie de la masa rocosa, seleccionar el intervalo apropiado de esta gráfica. Estimar el valor promedio del Índice de Resistencia Geológica (GSI) de dicho intervalo. No intentar ser tan preciso. Escoger un rango de GSI de 36 a 42 es más aceptable que fijar un GSI = 38. También es importante reconocer que el criterio de Hoek-Brown debería ser aplicado solamente en macizos rocosos donde el tamaño de los bloques o fragmentos es pequeño comparado con el tamaño de la excavación a ser evaluada. Cuando el tamaño de los bloques individuales es aproximadamente mayor a un cuarto de la dimensión de la excavación, generalmente la falla estaría controlada por la estructura y el criterio de Hoek-Brown no debería ser utilizado. | | CONDICIÓN SUPERFICIE DE DISCONTINUIDAD DISMINUCIÓN EN CALIDAD DE SUPERFICIE | | | | |
|--|---|---|-----|----|-----|-----|
| ESTRUCTURA ROCAS NO FOLIADAS ROCAS FOLIADAS | | MUY BUENA Muy rugosa, bordes sanos, superficies cerradas, sin rellenos BUENA Rugosa, ligeramente meteorizada, abertura menor a 0,1 mm, predominan los rellenos duros MEDIA Ligeramente rugosa, moderadamente meteorizada, abertura entre 0,1-1,0 mm, rellenos duros y blandos MALA Lisa, muy meteorizada, abertura entre 1,0-5,0 mm, predominan los rellenos blandos MUY MALA Espesores de falla, superficies descompuestas, abertura mayor a 5,0 mm, rellenos blandos | | | | |
| <p>INTACTA O MASIVA macizo rocoso con pocas discontinuidades, carentes de planos de foliación</p> | | 90 | | | N/A | N/A |
| <p>NO FOLIADA/FRACTURADA macizo rocoso poco perturbado consistente de bloques cúbicos formados por tres sistemas ortogonales de discontinuidades, muy bien unidos entre sí</p> | <p>POCO FOLIADA macizo rocoso parcialmente fracturado con hasta tres sistemas de discontinuidades. Puede contener intercalaciones delgadas de rocas foliadas</p> | 80 | 70 | | | |
| <p>NO FOLIADA/MUY FRACTURADA macizo rocoso parcialmente perturbado consistente de bloques angulares unidos entre sí, formados por cuatro o más sistemas de discontinuidades</p> | <p>MODERADAMENTE FOLIADA macizo rocoso fracturado constituido por intercalaciones de rocas foliadas y no foliadas en proporciones semejantes</p> | | 60 | 50 | | |
| <p>NO FOLIADA/PERTURBADA macizo rocoso plegado y/o fallado con bloques angulares formados por la intersección de varios sistemas de discontinuidades</p> | <p>FOLIADA macizo rocoso plegado y/o fallado, muy fracturado, donde predominan las rocas foliadas, con ocasionales intercalaciones de rocas no foliadas</p> | | | 40 | 30 | |
| <p>NO FOLIADA/DESINTEGRADA macizo rocoso altamente fracturado con mezcla de fragmentos angulares y redondeados, pobremente unidos entre sí</p> | <p>MUY FOLIADA macizo rocoso plegado, muy fracturado, constituido únicamente por rocas muy foliadas</p> | | | | 20 | |
| <p>BRECHADA/CIZALLADA macizo rocoso muy plegado, alterado tectónicamente, con aspecto brechoide, carente de bloques</p> | | N/A | N/A | | | 10 |

d) *Recolección de muestras:* se seleccionaron las muestras más representativas de los macizos estudiados, estando éstos ubicados lo más cerca

posible del alineamiento de la vía férrea. Las muestras poseían forma cúbica de 15 cm por lado en las cuales se efectuaron los siguientes ensayos:

- I. Resistencia a la compresión simple.
- II. Densidad.
- III. Absorción.
- IV. Secciones delgadas para el estudio petrográfico.

FASE POST – CAMPO

✦ Etapa de laboratorio

En esta etapa se procedió a la elaboración de las secciones delgadas y a ensayar las muestras recolectadas en campo. A través del análisis petrográfico de las secciones delgadas se determinó la mineralogía, textura y el grado de metamorfismo de las rocas que conformaban el macizo rocoso determinando así la geología del mismo. De igual forma se procedió a realizar los siguientes ensayos:

a) *Peso específico y absorción de agregado grueso (granulometría muy gruesa y homogénea). Según la norma ASTM C127-88.*

b) *Ensayo de carga puntual. Según la norma ASTM D 5731 - 02.*

✧ *Etapa de oficina*

En esta etapa se realizó la caracterización geomecánica del macizo rocoso según los siguientes métodos:

- a) BIENAWSKI (1989), *Rock Mass Rating (RMR)*. Ver tabla #7.
- b) BARTON (1974, 2000), *Clasificación ingenieril de macizos rocosos para el diseño del soporte en túnel (Q)*. Ver tablas #8, #9 y #10.
- c) PALLMSTRÖM (1995, 2000), *RMi - Un sistema de caracterización de macizos rocosos con fines ingenieriles*.
- d) Determinación de características geomecánicas de resistencia y deformación del macizo rocoso, según HOEK & BROWN (1997), PERRI (1999) y MARINOS & HOEK (2001) (GSI modificado por TRUZMAN, 2003). Ver tablas #13 y #14.

En la clasificación RMR se requiere del parámetro geomecánico RQD (*Rock Quality Designation*), el cual se calcula de forma empírica a partir de la fórmula de PALLSTRÖM (1979) en GONZÁLEZ (2002), que se muestra a continuación:

$$RQD = 115 - 3,3 \cdot J_v \quad \text{para } J_v > 4,5$$

$$RQD = 100 \quad \text{para } J_v \leq 4,5$$

$$J_v = \sum \frac{N\# \text{ de Discontinuidades}}{\text{Longitud de medida}}$$

Donde:

J_v = Número total de discontinuidades que interceptan una unidad de volumen (1 m³) del macizo rocoso.

En la clasificación geomecánica RMR (BIENAWSKI, 1989), vista en la tabla #9, se asignaron los valores correspondientes a cada parámetro, obteniéndose una cantidad que se corrigió según la orientación de las discontinuidades del macizo

rocoso. Este valor se conoce como RMR corregido y se utilizó para determinar la clase (de I a V) y la calidad (desde muy buena hasta muy mala) del macizo rocoso. A partir de la clase se obtuvieron las características geotécnicas de cohesión y ángulo de fricción y se determinó el tipo de sostenimiento para cada sección del macizo rocoso.

Tabla #7. Clasificación Geomecánica según BIENAWSKI, 1989. RMR. (Tomado y modificado de GONZÁLEZ ET AL., 2002).

| | | | | | | | | | |
|-------------------|---|---|------------|---------------------|----------------------|-----------------------|---|----------|----------|
| 1 | Resistencia de la matriz rocosa (Kg/cm ²) | Ensayo de Carga Puntual | > 100 | 100 - 40 | 40 - 20 | 20 - 10 | Compresión Simple (Kg / cm ²) | | |
| | | Compresión Simple | > 2500 | 2500 - 1000 | 1000 - 500 | 500 - 250 | 250 - 50 | 50 - 10 | < 10 |
| Puntuación | | | 15 | 12 | 7 | 4 | 2 | 1 | 0 |
| 2 | RQD (%) | | 100 - 90 | 90 - 75 | 75 - 50 | 50 - 25 | < 25 | | |
| | Puntuación | | 20 | 17 | 13 | 6 | 3 | | |
| 3 | Separación entre Diaclasas | | > 2 m | 2 - 0,6 m | 60 - 20 cm | 20 - 6cm | < 6 cm | | |
| | Puntuación | | 20 | 15 | 10 | 8 | 5 | | |
| 4 | Estado de las Discontinuidades | Longitud de la Discontinuidad | < 1 m | 3 - 1 m | 10 - 3 m | 20 - 10 m | > 20 m | | |
| | | Puntuación | 6 | 4 | 2 | 1 | 0 | | |
| | | Abertura | Nada | < 0,1 mm | 1 - 0,1 mm | 5 - 1 mm | > 5 mm | | |
| | | Puntuación | 6 | 5 | 3 | 1 | 0 | | |
| | | Rugosidad | Muy Rugosa | Rugosa | Ligeramente Rugosa | Ondulada | Suave | | |
| | | Puntuación | 6 | 5 | 3 | 1 | 0 | | |
| | | Relleno | Ninguno | Relleno Duro < 5 mm | Relleno Duro > 5 mm | Relleno Blando < 5 mm | Relleno Blando > 5 mm | | |
| | | Puntuación | 6 | 4 | 2 | 2 | 0 | | |
| 5 | Agua Freática | Caudal por 10 m de túnel | Nulo | <10 litros / min | 10 - 25 litros / min | 25 - 125 litros / min | >125 litros / min | | |
| | | Relación: Presión de Agua / Tensión Principal Mayor | 0 | 0 - 0,1 | 0,1 - 0,2 | 0,2 - 0,5 | > 0,5 | | |
| | | Estado General | Seco | Ligeramente Húmedo | Húmedo | Goteando | Agua Fluyendo | | |
| Puntuación | | | 15 | 10 | 7 | 4 | 0 | | |

| Corrección por la orientación de las Discontinuidades | | | | | | |
|---|---------------------------------|----------------|----------------|-------------------------------------|----------------|---|
| Dirección perpendicular al eje del túnel | | | | Dirección paralela al eje del túnel | | Buzamiento 0° - 20° cualquier dirección |
| Excavación con el buzamiento | Excavación contra el buzamiento | | | Buz. 45° - 90° | Buz. 20° - 45° | |
| Buz. 45° - 90° | Buz. 20° - 45° | Buz. 45° - 90° | Buz. 20° - 45° | Buz. 45° - 90° | Buz. 20° - 45° | |
| Muy favorable | Favorable | Media | Desfavorable | Muy desfavorable | Media | Media |
| 0 | - 2 | - 5 | - 10 | - 12 | - 5 | - 5 |
| Clasificación | | | | | | |
| Clase | I | II | III | IV | V | |
| Calidad | Muy Buena | Buena | Media | Mala | Muy Mala | |
| Valoración RMR | 100 - 81 | 80 - 61 | 60 - 41 | 40 - 21 | < 20 | |

| Características Geotécnicas | | | | | |
|------------------------------------|--------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|--------------------------|
| Clase | I | II | III | IV | V |
| Tiempo de Mantenimiento y Longitud | 20 años con 15 m de luz | 1 año con 10 m de luz | 1 semana con 5 m de luz | 10 horas con 2,5 m de luz | 30 min con 1 m de luz |
| Cohesión | > 4 kg / cm ² | 4 - 3 kg / cm ² | 3 - 2 kg / cm ² | 2 - 1 kg / cm ² | < 1 kg / cm ² |
| Angulo de Fricción | > 45° | 45° - 35° | 35° - 25° | 25° - 15° | < 15° |

La clasificación del macizo rocoso **Q**, según BARTON (1974, 1994), evalúa los siguientes parámetros:

Tabla #8. Parámetros que forman el índice Q según BARTON, 1974.

(Tomado de BARTON *ET AL.*, 1994).

| | | |
|-----|---|--|
| RQD | Índice de fracturación. | Medida del tamaño del bloque. |
| Jn | Índice de diaclasado. | |
| Jr | Índice de rugosidad de la discontinuidad. | Medida del Angulo de fricción entre bloques. |
| Ja | Índice de alteración o relleno de la discontinuidad. | |
| Jw | Factor de reducción por la presencia de agua o filtraciones a través de las discontinuidades. | Medida de las tensiones efectivas. |
| SRF | Factor representativo de las condiciones tensionales de la roca | |

Y se define a través de la siguiente expresión:

$$Q = \left(\frac{RQD}{Jn} \right) \times \left(\frac{Jr}{Ja} \right) \times \left(\frac{Jw}{SRF} \right)$$

Donde **Q** puede variar entre cero (0) y mil (1000), a partir del cual se generan las clases de rocas siguientes:

Tabla #9. Clase de roca en base al índice Q según BARTON, 1974.
(Tomado de BARTON *ET AL.*, 1994).

| CLASE DE DE ROCA | | INDICE Q |
|------------------|------------------------|--------------|
| A | Excepcionalmente Buena | 400 – 1000 |
| | Extremadamente Buena | 100 – 400 |
| | Muy Buena | 40 – 100 |
| B | Buena | 10 – 40 |
| C | Media | 4 – 10 |
| D | Mala | 1 – 4 |
| E | Muy Mala | 0,4 – 1 |
| | | 0,1 – 0,4 |
| F | Extremadamente Mala | 0,04 – 0,1 |
| | | 0,01 – 0,04 |
| G | Excepcionalmente Mala | 0,001 – 0,01 |

A continuación se muestran los valores correspondientes a los parámetros característicos del sistema de clasificación **Q**:

Tabla #10. Valores de los parámetros que forman el índice Q según BARTON, 1974.
(Tomado de BARTON *ET AL.*, 1994).

| 1. Calidad del testigo RQD (Rock Quality Designation) | | RQD (%) |
|--|-------------------|---------|
| A | Calidad muy mala | 0-25 |
| B | Calidad mala | 25-50 |
| C | Calidad media | 50-75 |
| D | Calidad buena | 75-90 |
| E | Calidad excelente | 90-100 |
| Notas: | | |
| i) Cuando se obtienen valores del RQD inferiores a 10 (incluyendo el 0), se toma un valor nominal de 10 para calcular el índice Q. | | |
| ii) Los intervalos de 5 unidades para el RQD, es decir, 100, 95, 90, etc., tienen | | |

| | | |
|--|--|----------------------|
| suficiente precisión. | | |
| 2. Índice de diaclasado | | J_n |
| A | Roca masiva, sin diaclasar o con fisuración escasa | 0,5-1,0 |
| B | Una familia de diaclasas | 2 |
| C | Una familia y algunas diaclasas aleatorias | 3 |
| D | Dos familias de diaclasas | 4 |
| E | Dos familias y algunas diaclasas aleatorias | 6 |
| F | Tres familias de diaclasas | 9 |
| G | Tres familias y algunas diaclasas aleatorias | 12 |
| H | Cuatro o más familias, diaclasas aleatorias, roca muy fracturada, roca en terrones, etc. | 15 |
| J | Roca triturada, terrosa | 20 |
| Notas: | | |
| i) En intersecciones de túneles, se utiliza la expresión (3. J _n) | | |
| ii) En las bocas de los túneles, se utiliza la expresión (2. J _n) | | |
| 3. Índice de rugosidad de las Discontinuidades | | J_r |
| a) Contacto entre las dos caras de la discontinuidad ante un desplazamiento cortante. | | |
| b) Contacto entre las dos caras de la discontinuidad ante un desplazamiento cortante inferior a 10 cm. | | |
| A | Diaclasas discontinuas | 4 |
| B | Diaclasas onduladas, rugosas o irregulares | 3 |
| C | Diaclasas onduladas, lisas | 2 |
| D | Diaclasas onduladas, perfectamente lisas | 1,5 |
| E | Diaclasas planas, rugosas o irregulares | 1,5 |
| F | Diaclasas planas, lisas | 1 |
| G | Diaclasas planas, perfectamente lisas | 0,5 |
| Notas: | | |
| i) Las descripciones se refieren a caracterizaciones a pequeña escala y escala | | |

| | | | |
|--|--|-----------------------------------|-------------------------|
| intermedia, por este orden. | | | |
| c) No existe contacto entre las caras de la discontinuidad ante un desplazamiento cortante. | | | |
| H | Zona que contiene minerales arcillosos con un espesor suficiente para impedir el contacto de las caras de la discontinuidad. | 1 | |
| J | Zona arenosa, de gravas o triturada con un espesor suficiente para impedir el contacto entre las dos caras de la discontinuidad. | 1 | |
| Notas: | | | |
| i) Si el espaciado de la principal familia de discontinuidades es superior a 3 m, se debe aumentar el índice J_r , en una unidad. | | | |
| ii) En el caso de diaclasas planas perfectamente lisas que presenten lineaciones, y que dichas lineaciones estén orientadas según la dirección de mínima resistencia, se puede utilizar el valor $J_r = 0,5$. | | | |
| 4. Índice de alteración de las discontinuidades | | Φ_r aprox. | J_a |
| a) Contacto entre los planos de la discontinuidad (sin minerales de relleno intermedios) | | | |
| A | Discontinuidad cerrada, dura, sin reblandecimientos, impermeable, cuarzo. | | 0,75 |
| B | Planos de discontinuidad inalterados, superficies ligeramente manchadas. | 25°-35° | 1,0 |
| C | Planos de discontinuidades ligeramente alterados. Presentan minerales no reblandecibles, partículas arenosas, rocas desintegrada libre de arcillas, etc. | 25°-30° | 2,0 |
| D | Recubrimientos de arcillas limosas o arenosas. Fracción pequeña de arcilla (no blanda). | 20°-25° | 3,0 |
| E | Recubrimientos de arcillas blandas de baja fricción. | 8°-16° | 4,0 |

| | | | |
|---|--|---------|------|
| b) Contacto entre los planos de la discontinuidad ante un desplazamiento cortante inferior a 10cm. (Minerales de relleno en pequeños espesores) | | | |
| F | Partículas arenosas, rocas desintegrada libre de arcillas, etc. | 25°-30° | 4,0 |
| G | Fuertemente sobreconsolidados, con rellenos de minerales arcillosos no blandos (continuos, pero con espesores inferiores a 5 mm) | 16°-24° | 6,0 |
| H | Sobreconsolidación media o baja, con reblandecimiento, rellenos de minerales arcillosos (continuos, pero de espesores inferiores a 5 mm). | 12°-16° | 8,0 |
| J | Rellenos de arcillas expansivas, es decir, montmorillonita (continuos, pero con espesores inferiores a 5 mm). El valor de J_a depende del porcentaje de partículas con tamaños similares a los de las arcillas expansivas. | 6°-12° | 8-12 |

| | | | |
|---|---|--------|------------------|
| c) No se produce contacto entre los planos de la discontinuidad ante un desplazamiento cortante (Rellenos de mineral de gran espesor) | | | |
| K L M | Zonas o bandas de roca desintegrada o triturada y arcillas (ver clases G, H y J para la descripción de las condiciones de las arcillas) | 6°-24° | 6,8, ó 8-12 |
| N | Zonas o bandas de arcillas limosas o arenosas, con pequeñas fracciones de arcillas no reblandecibles. | - | 5,0 |
| O P R | Zonas o bandas continuas de arcillas, de espesor grueso (ver clases G, H y J, para la descripción de las condiciones de las arcillas) | 6°-24° | 10,13 ó 13-20 |
| Nota: Los valores expresados para los parámetros J_r y J_a se aplican a las familias de diaclasas o discontinuidades que son menos favorables con relación a la estabilidad, | | | |

| tanto por la orientación de las mismas como por su resistencia al corte (esta resistencia puede evaluarse mediante la expresión: $T \approx \sigma_n \cdot \tan^{-1}(J_r/J_a)$) | | | |
|--|---|--|----------------------|
| 5. Factor de reducción por la presencia de agua | | Presión de agua (kg/cm²) | J_w |
| A | Excavaciones secas o pequeñas afluencias, inferiores a 5 l/min, de forma localizada | < 1 | 1,0 |
| B | Afluencia o presión medias, con lavado ocasional de los rellenos de las discontinuidades | 1-2,5 | 0,66 |
| C | Afluencia importante o presión alta en rocas competentes con discontinuidades sin relleno. | 2,5-10 | 0,5 |
| D | Afluencia, importante o presión alta, produciéndose un lavado considerable de los rellenos de las diaclasas. | 2,5-10 | 0,33 |
| E | Afluencia, excepcionalmente alta o presión elevada en el momento de realizar las voladuras, decreciendo con el tiempo. | > 10 | 0,2-0,1 |
| F | Afluencia excepcionalmente alta o presión elevada de carácter persistente, sin disminución apreciable. | > 10 | 0,1-0,05 |
| i) Los valores de las clases C, D, E y F son meramente estimativos. Si se acometen medidas de drenaje, puede incrementarse el valor de J _w . | | | |
| ii) No se han considerado los problemas especiales derivados de la formación de hielo. | | | |
| 6. Condiciones tensionales de la roca (<i>Stress Reduction Factor</i>) | | | SRF |
| a) Las zonas débiles intersectan a la excavación, pudiendo producirse desprendimientos de roca a medida que la excavación del túnel va avanzando. | | | |
| A | Múltiples zonas débiles, conteniendo arcilla o roca desintegrada químicamente, roca de contorno muy suelta (a cualquier | | 10 |

| | | | | |
|--|--|-----------------------------|----------------------------------|------------|
| | profundidad). | | | |
| B | Zonas débiles aisladas, conteniendo arcilla o roca desintegrada químicamente (profundidad de la excavación ≤ 50 m). | | | 5 |
| C | Zonas débiles aisladas, conteniendo arcilla o roca desintegrada químicamente (profundidad de la excavación > 50 m). | | | 2,5 |
| D | Múltiples zonas de fracturas en roca competente (libres de arcillas), roca de contorno suelta (a cualquier profundidad). | | | 7,5 |
| E | Zonas de fractura aisladas en roca competente (libre de arcillas)(profundidad de excavación ≤ 50 m) | | | 5 |
| F | Zonas de fracturas aisladas en roca competente (libre de arcillas)(profundidad de excavación > 50 m) | | | 2,5 |
| G | Terreno suelto, diaclasas abiertas, fuertemente fracturado, en terrones, etc. (a cualquier profundidad) | | | 5 |
| Notas: | | | | |
| i) Se reducen los valores expresados del SRF entre un 25-50% si las zonas de fracturas sólo ejercen cierta influencia pero no intersectan a la excavación. | | | | |
| b) Rocas competentes, problemas tensionales en las rocas. | | $\frac{\sigma_c}{\sigma_1}$ | $\frac{\sigma_\theta}{\sigma_c}$ | SRF |
| H | Tensiones pequeñas cerca de la superficie, diaclasas abiertas. | > 200 | $< 0,01$ | 2,5 |
| J | Tensiones medias, condiciones tensionales favorables. | 200 - 10 | 0,01 – 0,03 | 1 |
| K | Tensiones elevadas, estructura muy compacta. Normalmente favorable para la estabilidad, puede ser desfavorable para la estabilidad de los hastiales. | 10 – 5 | 0,3 – 0,4 | 0,5 - 2 |
| L | Lajamiento moderado de la roca después de 1 hora en rocas masivas. | 5 - 3 | 0,5 – 0,65 | 5 - 50 |
| M | Lajamiento y estallido de la roca después | 3 - 2 | 0,65 - 1 | 50 - 200 |

| | | | | |
|--|--|----------------------------------|---------|-----------|
| | de algunos minutos en rocas masivas. | | | |
| N | Estallidos violentos de la roca (deformación explosiva) y deformaciones dinámicas inmediatas en rocas masivas. | < 2 | > 1 | 200 - 400 |
| <p>Notas:</p> <p>iii) Si se comprueba la existencia de campos tensionales fuertemente anisotrópicos: cuando $5 \leq \sigma_1/\sigma_3 > 10$, se tomará en vez de σ_c el valor $0,5 \cdot \sigma_c$, donde σ_c es la resistencia a compresión simple, σ_1 y σ_3 son las tensiones principales mayor y menor, respectivamente y σ_θ es la tensión tangencial máxima (estimada a partir de la teoría de la elasticidad).</p> <p>iv) En aquellos casos en los que la profundidad de la clave del túnel es menor que la anchura de la excavación, se sugiere aumentar el valor del factor SRF entre 2,5 y 5 unidades (véase clase H).</p> | | | | |
| c) Rocas deformables: flujo plástico de roca incompetente sometida a altas presiones litostáticas. | | $\frac{\sigma_\theta}{\sigma_c}$ | SRF | |
| O | Presión de deformación suave. | 1 – 5 | 5 – 10 | |
| P | Presión de deformación intensa | > 5 | 10 - 20 | |
| v) Los fenómenos de deformación o fluencia de rocas suelen ocurrir a profundidades: $H > 350 \cdot Q^{1/3}$, donde γ es la densidad de la roca en g/cm ³ (Singh, 1993). | | | | |
| d) Rocas expansivas: actividad expansiva química dependiendo de la presencia de agua. | | | | |
| Q | Presión de expansión suave. | | | 5 – 10 |
| R | Presión de expansión intensa. | | | 10 - 15 |
| $Q = \left(\frac{RQD}{J_n} \right) \cdot \left(\frac{J_r}{J_a} \right) \cdot \left(\frac{J_w}{SRF} \right)$ | | | | |

Una vez hallado el valor **Q**, que determina la calidad del macizo rocoso, se procedió a recomendar el tipo de sostenimiento en función a dicho valor. Esta se hizo a través de la grafica de sostenimiento mostrada en la figura #12

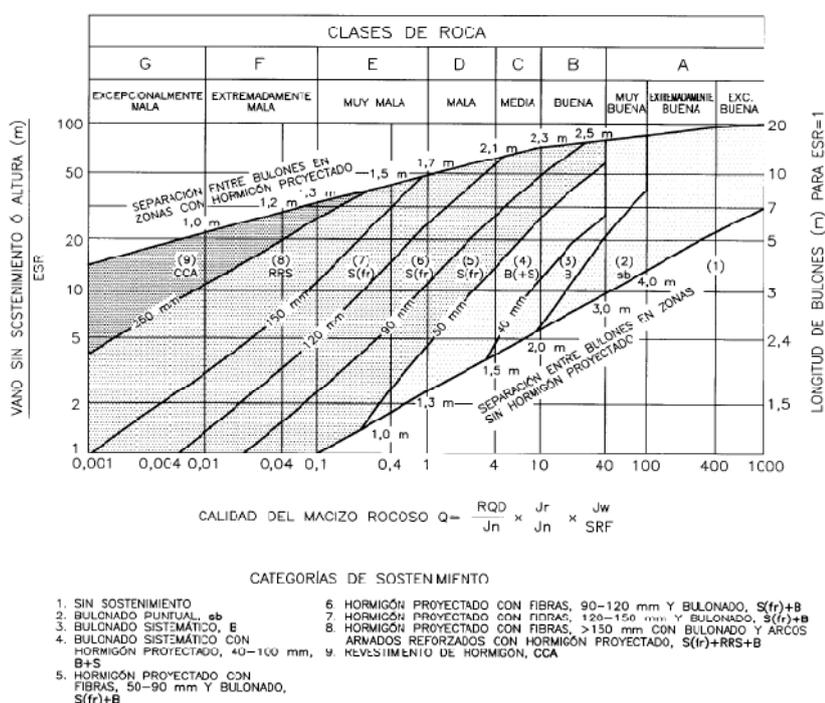


Figura #4. Actualización de 1993 del gráfico de diseño del sistema Q para túneles y cavernas, basados en los principios de de sostenimiento permanente del MNT (GRIMSTAD Y BARTON, 1993).

Finalmente se realizó la clasificación del macizo rocoso según el **RMi**, PALLSTRÖM (1995, 2000) el cual evalúa los parámetros que se muestran en la tabla a continuación:

Tabla #11. Parámetros que forman el índice RMi según PALLSTRÖM, 1995,2000. (Tomado de PALLSTRÖM., 2000).

| | |
|------------|---|
| σ_c | Resistencia a la compresión de la roca intacta. |
| m_i | Factor para roca intacta empleado en el criterio de rotura de Hoek & Brown. |
| j_R | Factor de rugosidad de las diaclasas (las valoraciones de j_R están basadas en J_r del sistema Q). Esta incluye los factores de ondulación (j_w) y suavidad (j_s) de las diaclasas. |
| j_A | Factor de alteración de las diaclasas (las valoraciones para j_A son |

| | |
|---------------------|--|
| | similares a las de Ja en el sistema Q). |
| jL | Factor de tamaño de las diaclasas. |
| (β) | Factor de forma de los bloques. |
| Vb, RQD ó Jv | Volumen del bloque, Índice de calidad de la roca ó conteo volumétrico de diaclasas |

Tabla #12. Valores de los parámetros que forman el índice RMi según PALLSTRÖM, 1995,2000.
(Tomado de PALLSTRÖM., 2000).

| PARÁMETROS DE ENTRADA AL RMI. | | | | | |
|---|---|--|-----------------------|-------------|------------------------------------|
| Resistencia a la compresión simple, σ_c de la roca intacta. Valor (en MPa). | | Obtenidos de ensayos de laboratorio(o asumidos de las tablas de manuales). | | | |
| Factor para roca intacta (m_i) | | Empleado en el criterio de rotura de Hoek & Brown. | | | |
| Factor de rugosidad de las diaclasas (jR) (las valoraciones de jR están basadas en Jr del sistema Q). | | | | | |
| Suavidad a pequeña escala de la superficie de la diaclasa (j_s) | Ondulación a gran escala de los planos de las diaclasas (j_w) | | | | |
| | Planos | Ligeramente Ondulados | Fuertemente ondulados | Escalonados | Fijados mutuamente (a gran escala) |
| Muy rugoso | 3 | 4 | 6 | 7,5 | 9 |
| Rugoso | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Ligeramente rugoso | 1,5 | 2 | 3 | 4 | 4,5 |
| Suave | 1 | 1,5 | 2 | 2,5 | 3 |

| | | | | | |
|--|------------------------------------|---|---------|---------------------|---------|
| Pulido | 0,75 | 1 | 1,5 | 2 | 2,5 |
| Alisado (espejos de falla) *) | 0.6 - 1.5 | 1 - 2 | 1.5 - 3 | 2 - 4 | 2.5 - 5 |
| Para diaclasas rellenas $jR = 1$ Para diaclasas irregulares, se sugiere una valoración de $jR = 5$ | | | | | |
| Factor de alteración de las diaclasas (jA) (las valoraciones para jA son similares a las de J_a en el sistema Q) | | | | | |
| a) Contacto entre las dos paredes de las diaclasas | | | | | |
| Contacto de la pared de la diaclasa | | Descripción | | Valoración del jA | |
| Diaclasas limpias | Diaclasas unidas o soldadas | Relleno impermeable no ablandado (cuarzo, epidota, etc.) | | 0,75 | |
| | Paredes de las diaclasas sanas | No existe relleno ni recubrimiento en la diaclasa, excepto el debido al óxido | | 1 | |
| | Paredes de las diaclasas alteradas | Un grado más de alteración que la roca del bloque | | 2 | |
| | | Dos grados más de alteración que la roca del bloque | | 4 | |
| Recubrimientos o rellenos delgados de: | Materiales de fricción | Dos grados más de alteración que la roca del bloque | | 3 | |
| | Materiales cohesivos | Materiales de arcilla, clorita, talco, etc. | | 4 | |
| b) Diaclasas rellenas con paredes sin contacto o con contacto parcial | | | | | |

| Tipo de relleno | Descripción | Contacto parcial entre las paredes: Relleno delgado (aprox. < 5 mm) | No hay contacto entre las paredes: Relleno Grueso | |
|---|--|--|--|------------------------|
| Materiales de fricción | Arena, calcita limosa, etc., sin contenido en arcilla | 4 | 8 | |
| Materiales cohesivos duros | Relleno compactado de arcilla, clorita, talco, etc. | 6 | 10 | |
| Materiales cohesivos blandos | Arcilla medio o poco sobre consolidada, clorita, talco, etc. | 8 | 12 | |
| Materiales expansivos | El material de relleno tiene propiedades expansivas | 8 - 12 | 12 – 20 | |
| Factor de tamaño de las diaclasas (jL) | | | | |
| Longitud de las diaclasas | Término | Tipo | Diaclasas continuas**) | Diaclasas discontinuas |
| < 0,5 m | Muy corta | Divisiones de estratificación o foliación | jL = 3 | 6 |
| 0,1 – 1 m | Corta o pequeña | Diaclasa | 2 | 4 |
| 1 – 10 m | Media | Diaclasa | 1 | 2 |
| 10 – 30 m | Larga o grande | Diaclasa | 0,75 | 1,5 |
| > 30 m | Muy larga o grande | Diaclasa (rellena), filón o cizalla *) | 0,5 | 1 |
| *) Frecuentemente una única discontinuidad y se deben tratar estos casos por separado | | | | |

| |
|---|
| **) Diaclasas discontinuas terminadas en roca masiva |
| Valores del factor de forma de los bloques (β) para algunas formas características de bloque.*) |
| $\beta = 30$ para bloques compactos o cúbicos; $\beta = 40$ para bloques ligeramente alargados o planos; $\beta = 75$ para bloques alargados o planos; $\beta = 250$ para bloques muy alargados o planos; $\beta = 500$ para bloques extremadamente alargados o planos. |
| *)Se puede utilizar el valor del índice RQD , o bien el índice del conteo volumétrico de diaclasas Jv . |

Obteniéndose el valor del **RMi** a partir de la siguiente fórmula:

$$RMi = \sigma_c \times 0,2 \times \sqrt{jC} \times Vb^D (D = 0,37 \times jC^{-0,2})$$

En donde:

$$jC = jL \times \frac{jR}{jA}$$

Para las rocas diaclasadas como las que se presentan en todos los macizos rocosos evaluados, cuya clasificación según el **RMi** es:

Muy Alto; **RMi** > 10

Alto; **RMi** = 1 – 10

Moderado; **RMi** = 0,1 – 1

Bajo; **RMi** = 0,01 – 0,1

Muy bajo; **RMi** < 0,01

Luego se estimó el sostenimiento de la roca en función del valor del **RMi**, en el cual se aplicaron las siguientes fórmulas:

$$G_c = R M i \times (S L \times C)$$

$$S_r = C F \times (C_o \div N_j) = (D_t \div D_b) \times (C_o \div N_j)$$

En donde:

D_t = Diámetro o luz del túnel o excavación, en metros. (Para hastiales, en vez del diámetro (D_t), se usa la altura del mismo (W_t)).

D_b = Diámetro equivalente del bloque, en metros.

C = Factor de ajuste por la gravedad para el sostenimiento en el techo o en los hastiales. Su valoración depende de la inclinación de los hastiales y del techo; y pueden leerse sus valores en la figura #13.

S_L = Factor de ajuste por nivel de tensiones, ver figura #13.

C_o = Factor de ajuste por la orientación de la principal familia de diaclasas, o diques (vetas, grietas, fisuras); ver figura #13.

N_j = Factor de ajuste por el número de familias de diaclasas; se considera aquí el grado de libertad de los bloques a fallar. Ver figura #13.

| FACTORES DE AJUSTE PARA EL SOSTENIMIENTO EN ROCA | | | | | | | |
|--|-----------------------|--------------------------|------------------|--|-----------------------------------|---------------------------------|---------------|
| NIVEL DE TENSIONES | | Recubrimiento aproximado | Valoración SL | NÚMERO DE FAMILIAS DE JUNTAS *) | Valoración Nj | NÚMERO DE FAMILIAS DE JUNTAS *) | Valoración Nj |
| Muy bajo (en portales, etc.) | | < 10 m | 0,1 | Una familia | 3 | Tres familias | 1 |
| Bajo | | 10 - 35 m | 0,5 | Una familia + aleatorias | 2 | Tres familias+aleatorias | 0,85 |
| Moderado | | 35 - 350 m | 1 | Dos familias | 1,5 | Cuatro familias | 0,75 |
| Alto | | > 350 m | 1,5 *) | Dos familias+ aleatorias | 1,2 | Cuatro familias+aleatorias | 0,65 |
| *) Un alto nivel de tensiones puede ser desfavorable para la estabilidad de hastiales altos. Valoración posible SL= 0,5-0,75 | | | | *) Significa el número de familias de juntas dentro del sitio de observación. (no el número de juntas observadas dentro de una gran área)) | | | |
| ORIENTACIÓN DE LAS JUNTAS (en relación al eje del túnel) | | | | | INCLINACIÓN DE TECHOS O HASTIALES | | |
| EN HASTIALES | | EN TECHO | TÉRMINO | Valoración Co y Co _g | Valoración C | | |
| para rumbos > 30° | para rumbos < 30° | para cualquier rumbo | | | Horizontal (techo) | 1 | |
| buzamiento < 30° | buzamiento < 20° | buzamiento > 60° | favorable | 1 | 30° inclinación | 1,5 | |
| buzamiento = 30 - 80° | buzamiento = 20 - 45° | buzamiento = 45 - 60° | admisible | 1,5 | 45° inclinación | 2,2 | |
| buzamiento > 80° | buzamiento = 45 - 60° | buzamiento = 20 - 45° | desfavorable | 2 | 60° inclinación | 3 | |
| - | buzamiento > 80° | buzamiento < 20° | muy desfavorable | 3 | Vertical (hastiales) | 5 | |

Figura #5. Factores de ajuste para el sostenimiento en roca. (Tomado de PALLSTRÖM, 2000).

Y se utilizó la siguiente figura, G_c y S_r , para determinar dicho sostenimiento para la roca.

Figura #6.Ábaco de sostenimiento para terrenos diaclasados. (Tomado de PALLSTRÖM, 2000).

Una vez realizada la caracterización geomecánica del macizo rocoso según el **RMR, Q & R_{Mi}** se procedió a determinar las características geomecánicas, vistas en la tabla #15, según HOEK & BROWN (1997), PERRI (1999) y MARINO & HOEK (2001). La aplicación de las fórmulas que se muestran a continuación requerían de los siguientes parámetros básicos, dos de ellos relativos a los materiales rocosos que conforman el macizo y el tercero relativo a la macro – estructura del macizo (Tomado de PERRI, 2002):

- ✘ La resistencia a la compresión uniaxial de la roca intacta (σ_{ci}), cuyo valor se determina a través de ensayos de laboratorio.
- ✘ La constante (m_i) que define el carácter friccionante de la roca, estimado a partir de la tabla #16.
- ✘ El GSI (*Geological Strength Index*) del macizo rocoso.

Tabla #13. Características geomecánicas del macizo rocoso. (Tomado y modificado de PERRI, 2002).

| Autor (es) | Parámetro | Fórmula |
|-----------------------|--------------------------------------|---|
| PERRI (1999) | Cohesión | $c_m = 0,75 \cdot \sigma_{ci} (0,0058 + 0,0004 \cdot m_i) \cdot e^{GSI(0,0455 - 0,0073 \ln m_i)}$ |
| | Angulo de fricción | $\varphi_m = 0,424 \cdot GSI - 0,0016 \cdot GSI^2 - 6 + 9 \ln m_i$ |
| MARINOS & HOEK (2001) | Resistencia a la compresión uniaxial | $\sigma_{cm} = (0,0034 \cdot m_i^{0,8}) \cdot \sigma_{ci} \cdot [1,029 + 0,025 \cdot e^{(-0,1 \cdot m_i)}]^{GSI}$ |
| HOEK & BROWN (1997) | Modulo de deformación | $\epsilon_m = 1000 \cdot \sqrt{\frac{\sigma_{ci}}{100}} \cdot 10^{\frac{GSI-10}{40}}$ |

Tabla #14. Valores de la constante m_i para roca intacta por tipos de roca. (Tomado y modificado de HOEK, 2001 en PERRI, 2002).

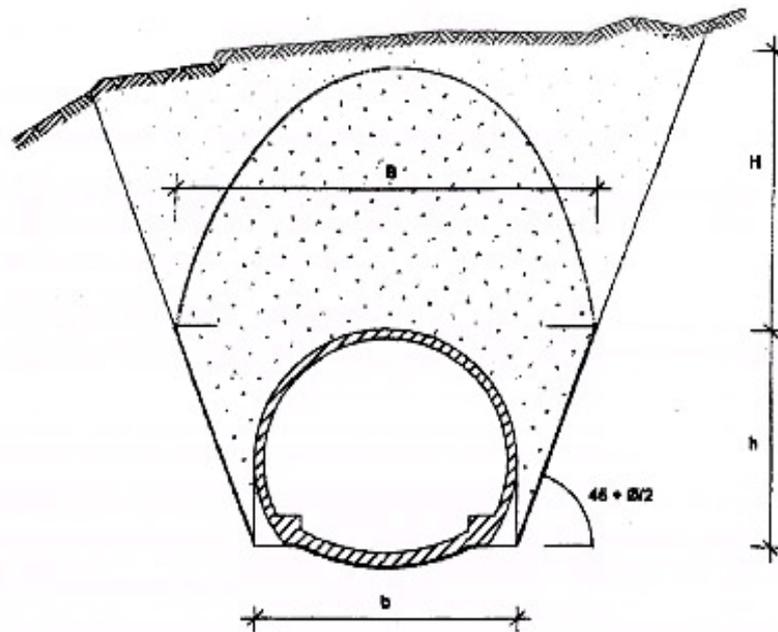
| Tipo de Roca | Clase | Grupo | Textura | | | |
|---------------|----------------------|---------------|--|---|---|--|
| | | | Gruesa | Media | Fina | Muy Fina |
| Sedimentarias | Clásticas | | Conglomerado (21 ± 3) Brecha (19 ± 5) | Arenisca (17 ± 4) | Limolitas (7 ± 2) Grauvacas (18 ± 3) | Lutitas (4 ± 2) Arcillas (6 ± 2) Margas (7 ± 2) |
| | Clásticas | Carbonatos | Caliza Cristalina (12 ± 3) | Caliza Esparítica (10 ± 2) Yeso (8 ± 2) | Caliza Micrítica (9 ± 2) Anhidrita (12 ± 2) | Dolomitas (9 ± 3) Creta (7 ± 2) |
| | | Evaporitas | | | | |
| | | Orgánicas | | | | |
| Metamórficas | No foliadas | | Mármol (9 ± 3) | Hornfel (19 ± 4) Metarenisca (19 ± 3) | Cuarcitas (20 ± 3) | |
| | Ligeramente foliadas | | Migmatita (29 ± 3) | Anfibolita (26 ± 3) | | |
| | Foliadas | | Gneis (28 ± 5) | Esquisto (12 ± 3) | Filita (7 ± 3) | Pizarra (7 ± 4) |
| Ígneas | Plutónicas | Félsicas | Granito (32 ± 3) | Diorita (25 ± 5) Granodiorita (29 ± 3) | | |
| | | Máficas | Gabro (27 ± 3) | Dolerita (16 ± 5) Norita (20 ± 5) | | |
| | | Hipoabisales | Pórfidos (20 ± 5) | | Diabasa (15 ± 5) | Peridotita (25 ± 5) |
| | Volcánicas | Lava | | Riolita (25 ± 5) Andesita (25 ± 5) | Dacita (25 ± 3) Basalto (25 ± 5) | Obsidiana (19 ± 3) |
| | | Piroclásticas | Aglomerado (19 ± 3) | Brecha (19 ± 5) | Toba (13 ± 5) | |

Luego de calculadas las características geomecánicas se clasificaron los macizos según su rango de cobertura para cada sector del túnel. Ver tabla #17.

Tabla #15. Clasificación de la excavación por rangos de cobertura. (Tomado y modificado de HOEK, 2001 en PERRI, 2002).

| Condición Cobertura | Clasificación | Caso A (roca GSI ≥ 25) | Caso B (roca GSI < 25 y/o suelo) |
|---------------------|---------------|-------------------------------|-------------------------------------|
| 1 | Superficial | $H \leq D_i$ | $H \leq B$ |
| 2 | Intermedia | $D_i < H \leq 2.5 D_i$ | $B < H \leq 2.5 B$ |
| 3 | Profunda | $H > 2.5 D_i$ | $H > 2.5 B$ |

En donde:



H : Cobertura de la excavación.

D_i : Diámetro equivalente de la excavación ($\approx b$, siendo "b" el ancho de la excavación)

$$B = b + 2 \cdot h \cdot \tan \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) \cdot \frac{15}{GSI}$$

Siendo:

h = Altura de la excavación.

φ = Angulo de fricción del macizo rocoso.

Como producto final se generó un perfil geológico geomecánico a lo largo de la vía férrea en el cual quedó plasmado la información generada a través de las distintas clasificaciones geomecánicas que se aplicaron. Además se realizó un modelado en 3D de los macizos rocosos analizados donde se pudiese apreciar la información geomecánica contenida en los perfiles.

CAPÍTULO III

GEOGRAFÍA FÍSICA

RELIEVE

El área de estudio comprende tres secciones de un tramo ubicado entre los sitios denominados La Culebrita y Puerta del Este. La primera sección va desde la zona este de la quebrada Perico, ubicada al oeste del sector la Culebrita, con coordenadas UTM N:1.161.300 y E:746.250, hasta el margen oeste de la quebrada La Encantada (zona correspondiente al primer túnel, La Encantada), la segunda inicia al este de la quebrada La Encantada y finaliza al oeste del helipuerto Ávila del Estado Miranda (zona correspondiente al segundo túnel, Caucagüita) y por último, la tercera sección, que inicia en una zona ubicada al este de Terrazas de Mampote y culmina 1 km al oeste del cementerio situado en las cercanías de la carretera vieja Caracas-Guarenas con coordenadas UTM N:1.158.750 y E:752.750, a una distancia aproximada de 3 km del sector Puerta del Este (zona correspondiente al tercer túnel, Mampote).

La trayectoria del trazado sigue cercano al curso del río Guarenas, un valle profundo y angosto, con pobre desarrollo de planicies aluviales en sus márgenes, en ocasiones truncada por deslizamientos antiguos de bloques, que ocasionalmente han originado la formación de depósitos lacustres de dimensiones reducidas. Tales deslizamientos han enmascarado la expresión de la traza de la falla Caucagüita-Guarenas, haciéndola invisible y dudoso su reconocimiento.

Este valle separa dos unidades morfológicamente distintas entre sí, a pesar de que están sustentadas por unidades litológicamente similares. La diferencia radica en el control estructural de ambas unidades.

La unidad norte, al este de la Encantada, algo más separada y alejada de la influencia de la falla del Ávila, continúa con cerros, cuyas cotas varían entre 400 y 850 m, pero con filas más agudas, ya que el control estructural es mayor en el tramo anterior (Petare-La Culebrita). Estas se orientan en sentido NW-SE, con pendientes que oscilan entre 25 y 40%, las cuales generan un relieve que va de abrupto a muy abrupto. Los cursos de agua, una vez que atraviesan la falla del Ávila, también siguen el mismo rumbo.

Por otra parte, la unidad sur, cuya altura máxima se encuentra en fila de Mariches, está orientada en sentido SO-NE, al igual que los cursos de agua principales, los cuales tienen un evidente control estructural. Esta tendencia sufre un cambio progresivo hacia el este, donde toman un rumbo NNO-SSE hasta llegar a Guarenas.

Las secciones estudiadas forman parte de la unidad norte y sur, por lo que las características de dichos tramos son similares a los expuestos anteriormente. No obstante, cada sección del túnel fue estudiado a detalle, y arrojaron datos característicos como los siguientes:

- ✘ La sección correspondiente al primer túnel (La Encantada), está ubicada entre la zona este de la quebrada Perico hasta el extremo oeste de la quebrada La Encantada. La misma posee una extensión de 1 km y altitudes que oscilan entre los 650 y 850 m, está conformado por cerros con topes redondeados e irregulares con una dirección aproximada NW-SE, con pendientes que van de 20° (zona este) a 25° (zona oeste), generando un relieve abrupto.



Figura #7. Portal de entrada del túnel El Encantado, visto desde la urbanización Miranda.

- ✘ La sección correspondiente al segundo túnel (Caucagüita), se ubica al este de la quebrada La Encantada y finaliza al oeste del helipuerto. Las cotas oscilan entre los 580 y 850 m y posee una extensión de 3.6 km. Este tramo está compuesto en su totalidad por cerros con topes redondeados y laderas irregulares, poseen una dirección aproximada N15-25°W, con pendientes de 25° las cuales generan un relieve abrupto.

- ✘ La sección correspondiente al tercer túnel (Mampote), al Sur de la autopista Caracas-Guarenas, pertenece a una zona ubicada al este de Terrazas de Mampote y culmina 1 km al oeste del cementerio situado en las cercanías de la carretera vieja Caracas-Guarenas, está compuesta por cerros con topes redondeados y laderas irregulares, con una altitud variable entre los 450 y 650 m. Estos cerros poseen una dirección aproximada N30-40°W, con pendientes que varían entre los 20 y 25°, generando así un relieve abrupto.



Figura #8. Portal de entrada del túnel de Mampote, visto desde el extremo este del club Mampote.
Rumbo E-O.



Figura #9. Portal de entrada del túnel de Mampote, visto desde la autopista Caracas Guarenas. Rumbo E-O.

DRENAJE

La red de drenaje presente en la zona es medianamente densa, y el curso de agua de primer orden está representado por el río Guarenas, el cual está alimentado por varias quebradas afluentes al mismo.

El río Guarenas posee una dirección preferencial este-oeste, siguiendo una geometría sinuosa, con valles profundos y angostos con pobre desarrollo de planicie

aluvial. El curso de las aguas es oeste-este, y el cual posee un caudal de agua moderadamente alto y constante a lo largo del año.

Los drenajes secundarios de mayor importancia son los que vienen de la zona norte, los cuales se incorporan al drenaje principal de manera ortogonal al curso de sus aguas, además, poseen un arreglo subparalelo entre si. Estos afluentes están entallados, formando valles medianamente profundos, con un caudal moderado y constante. Los mismos están representados por las quebradas Agua Salada, Perico, La encantada y una quebrada ubicada a 1.5 Km al Oeste del helipuerto Ávila, del Estado Miranda.

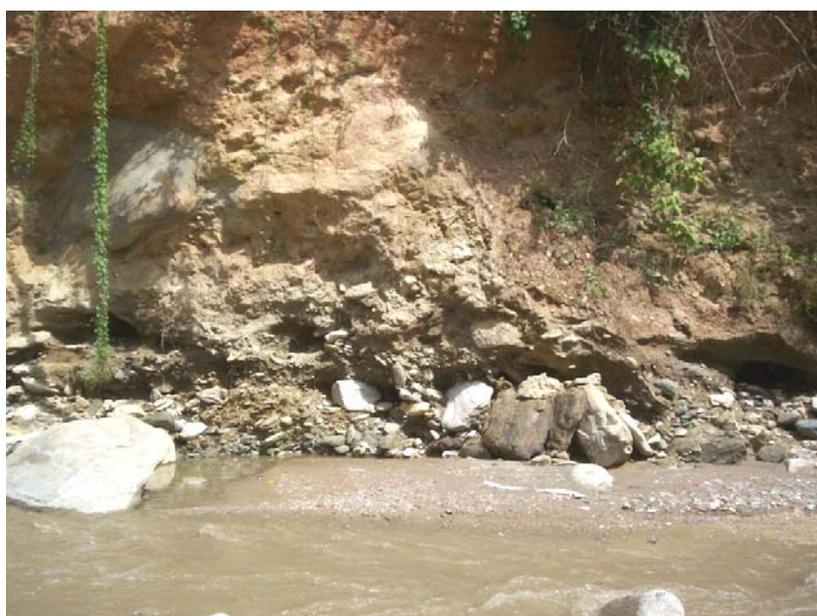


Figura #10. Cauce del río Guareñas

La red de drenajes secundarios ubicados al sur de la zona de estudio, está compuesto por quebradas de curso intermitente y medianamente entalladas.

VEGETACIÓN

La zona de estudio se encuentra ubicada en las cercanías del Parque Nacional El Ávila, en el cual se identifican alturas que oscilan entre los 120 y los 2.765 metros de altura sobre el nivel del mar, lo que permite conseguir vegetación muy diversa. En la parte inferior del parque se encuentra una vegetación de tipo sabanera, caracterizada por la abundancia de gramíneas, con gran variedad de árboles, plantas y arbustos. Más arriba (hasta los 1.200 metros de altura aproximadamente) se consigue vegetación de tipo bosque tropófilo, es decir, árboles y arbustos que pierden su follaje durante el verano, dando una sensación de sequía.



Figura #11. Vegetación tipo sabanera (Tomado de www.el-avila.com/images/sabana_01.jpg).

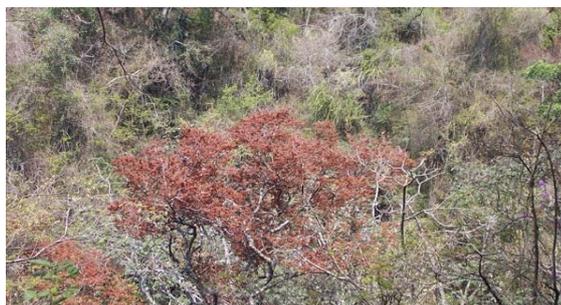


Figura #12. Bosque tropófilo (Tomado de www.el-avila.com/images/sabana_01.jpg).

Esta región cuenta con una vegetación muy diversa, identificándose de manera abundante el cedro, el samán, el bucare, el araguaney, el pardillo, el equiseto gigante, la palma grapa, la palma bendita y los helechos. Además, se pueden observar hermosas flores como la bromelia y la orquídea.



Figura #13. Bromelia (Tomado de pegasus.ucla.edu/ve/.../bromelia.jpg).

Luego, entre los 1.200 y 2.000 metros de altura, aproximadamente, se consigue vegetación de selva nublada, donde la constante capa de niebla que cubre esta zona ocasiona que los árboles estén siempre verdes, y la humedad permite el crecimiento de muchas especies de orquídeas y helechos. Finalmente, a partir de los 2.000 metros de altura se encuentra vegetación de sub-páramo, es decir, muy parecida a la que se consigue en las regiones del páramo en nuestro país, sólo con algunas excepciones (Tomado de <http://www.mipunto.com/venezuelavirtual>).

CLIMA

La diversidad territorial de Venezuela se ve reflejada en una variedad de climas, los cuales se asocian directamente a los paisajes existentes. En el Litoral Venezolano, predomina un clima semiárido con vegetación seca, precipitaciones anuales de 600 mm³ y temperaturas anuales de 24° C de promedio.

La dinámica de la atmosfera sobre el territorio venezolano es la responsable de la distribución de lluvias sobre el territorio nacional. Los vientos alisios del noreste predominan sobre la mayor parte del territorio nacional desde Diciembre hasta Abril, como consecuencia del predominio del anticiclón atlántico. Estas masas de aire anticiclónicas se manifiestan, especialmente, por encima de los 1.500 m de altura, donde se producen fuertes inversiones de temperatura. Así, el viento anticiclónico de altura es completamente seco y la única nubosidad que se produce es la originada por fenómenos convectivos. Durante los meses mencionados, el territorio Venezolano, al norte del 6° L.N., está pasando por la estación seca (verano). En dicha estación el frente de convergencia entre el anticiclón del noreste está por debajo de los 3° de L.N., y los vientos alisios del norte predominan sobre casi todo el país. El efecto del frente de convergencia que desvía a los vientos del noreste se hace sentir hasta el paralelo 6° L.N., y al sur de esta área se producen precipitaciones hasta la altitud mencionada. Desde Abril hasta Noviembre, el frente de convergencia se desplaza hasta el paralelo 5° de L.N. Los vientos alisios que provienen del Atlántico, desde el noreste, sufren una fuerte desviación hacia el este, y por efectos de su choque con el frente de convergencia provocan precipitaciones frecuentes sobre todo el territorio situado al Sur del paralelo 10° de L.N (Tomado y modificado de: http://www.yv5fih.org.ve/clima_de_venezuela.html).

CAPÍTULO IV

MARCO TEÓRICO

GONZÁLEZ ET AL (2002), define los macizos rocosos como el conjunto integrado que se encuentra constituido por la “roca intacta” o bloques de matriz rocosa separados por discontinuidades o superficies de debilidad. Además de ser medios anisótropos, discontinuos y heterogéneos, mecánicamente hablando. Por lo tanto se puede considerar que estos presentan una resistencia a la tracción nula.

La matriz rocosa se define como el material exento de discontinuidades o los bloques de “roca intacta” que quedan entre ellas, tienden a tener un comportamiento heterogéneo y anisótropo íntimamente relacionado a su fábrica y a su microestructura mineral. Mecánicamente se caracteriza en base a su peso específico, resistencia a la compresión y deformabilidad.

La superficie de discontinuidad corresponde a cualquier plano de origen mecánico o sedimentario que separa bloques de matriz rocosa en un macizo. Mecánicamente queda caracterizada por su resistencia al corte o por la del material de relleno. Generalmente la resistencia a la tracción de esta superficie tiende a ser muy baja o nula.

Propiedades físicas de la matriz rocosa

Los parámetros que se emplean en la identificación y descripción cuantitativa de las propiedades básicas de las rocas, permiten establecer una primera clasificación con fines geotécnicos. Estas propiedades son conocidas como las propiedades índice que conjuntamente con la fábrica y la composición mineralógica determinan las

propiedades y el comportamiento mecánico de la matriz rocosa. A continuación se presenta la tabla #16 un cuadro con las propiedades de la matriz rocosa y métodos para su determinación.

Tabla #16. Propiedades de la matriz rocosa y métodos para su determinación.

(Tomado de GONZÁLEZ *ET AL.*, 2002).

| | PROPIEDADES | MÉTODOS DE DETERMINACION |
|---|---|--|
| Propiedades de identificación y clasificación. | Composición mineralógica. Fábrica y textura. Tamaño de grano. Color. | Descripción visual. Microscopía óptica y electrónica. Difracción de rayos X. |
| | Porosidad (n). | Técnicas de laboratorio. |
| | Peso específico o unitario (γ). | |
| | Contenido en humedad. | |
| | Permeabilidad (coeficiente de permeabilidad, k). | Ensayo de permeabilidad. |
| | Durabilidad. Alterabilidad (índice de alterabilidad). | Ensayos de alterabilidad. |
| Propiedades mecánicas. | Resistencia a la compresión simple (σ_c). | Ensayo de compresión. Ensayo de carga puntual. Martillo Schmidt. |
| | Resistencia a la tracción (σ_t). | Ensayo de tracción directa. Ensayo de tracción indirecta. |
| | Velocidad de ondas sísmicas (V_p , V_s). | Medida de velocidad de ondas elásticas en laboratorio. |
| | Resistencia (parámetros c y ϕ). | Ensayo de compresión triaxial. |
| | Deformabilidad (módulos de deformación elástica estáticos: ϵ o dinámicos: ν). | Ensayo de compresión uniaxial Ensayo de velocidad sísmica. |

A continuación se definen las propiedades índice de mayor relevancia al momento de identificar y caracterizar cuantitativamente la matriz rocosa.

- ✘ Estudio Petrográfico: realizado a través de la observación macroscópica de la muestra y el análisis microscópico de secciones delgadas, con el objeto de determinar su composición mineralógica, textura, porosidad, grado de alteración, microfracturación y fábrica. También se pueden aplicar métodos como la difracción de rayos X y microscopia electrónica.
- ✘ Peso Específico (γ): Se define como el peso por unidad de volumen y depende de sus componentes. La unidad más común corresponde a gr / cm^3 . Comúnmente es trabajado como la densidad.
- ✘ Resistencia a la compresión simple o uniaxial (σ_c): corresponde al máximo esfuerzo que soporta la roca sometida a compresión uniaxial, determinada sobre una probeta cilíndrica sin confinar en el laboratorio.

$$\sigma_c = \frac{F_c}{A} = \frac{\text{Fuerza Compresiva Aplicada}}{\text{Area de Aplicación}}$$

Clasificaciones Geomecánicas

Estas clasificaciones establecen el grado de calidad del macizo rocoso, tomando en cuenta las propiedades de la matriz rocosa y de las discontinuidades y así proporcionar propiedades resistentes globales. (Tomado y modificado de GONZÁLEZ ET AL, 2002)

Las clasificaciones utilizadas en el desarrollo de este trabajo fueron:

- ✘ Rock Mass Rating (RMR) de BIENIAWSKI (1989).
- ✘ BARTON (1974, 2000).
- ✘ PALLMSTRÖM (1995, 2000), ***RMI***.
- ✘ Criterio de HOEK & BROWN (1997).

a) *Clasificación RMR.*

Fue desarrollada por BIENIAWSKI en 1973 y actualizada en 1979 y 1989. Constituye un sistema de clasificación de macizos rocosos que permite relacionar índices de calidad con parámetros geotécnicos del macizo y de excavación y sostenimiento en túneles. Toma en cuenta los siguientes parámetros geomecánicos:

- I. Resistencia uniaxial de la matriz rocosa.
- II. Grado de fracturación en términos del RQD (Rock Quality Designation).
- III. Espaciado de las discontinuidades.
- IV. Condiciones de las discontinuidades.
- V. Condiciones hidrogeológicas.
- VI. Orientación de las discontinuidades con respecto a la excavación.

La incidencia de los parámetros en el comportamiento geomecánico de un macizo se expresa a través del índice de calidad RMR, que varía de 0 a 100 y se obtiene sumando los puntos obtenidos en cada uno de los primeros cinco parámetros, para finalmente aplicar las correcciones debidas a la orientación de las discontinuidades con respecto a la excavación. Esta clasificación asigna cinco clases al macizo rocoso y le atribuye determinadas características geotécnicas, como las mostradas en la última parte de la tabla #9 del Capítulo II. (Tomado y modificado de GONZÁLEZ ET AL, 2002)

b) *Clasificación del macizo rocoso Q, según BARTON (1974,2000).*

Luego de un extenso y reiterado periodo de ensayos y tanteos ejecutados en el año 1973, se tomaron en consideración, finalmente, un total de seis parámetros y un conjunto de categorías dentro del Sistema Q. De acuerdo con este sistema de clasificación, la calidad del macizo rocoso puede definirse mediante la expresión:

$$Q = \frac{(RQD)}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{(SRF)}$$

El rango de valores numéricos que puede tomar el índice Q de calidad de la roca oscila entre 0,001 (excepcionalmente mala) y 1.000 (excepcionalmente buena). Los seis parámetros pueden estimarse a partir de la cartografía geológica de la zona y de la descripción de los testigos procedentes de los sondeos de investigación, pudiéndose verificar, o bien corregirse, posteriormente, durante la excavación. Los parámetros que componen esta clasificación son los siguientes:

- I. Índice de fracturación.
- II. Índice de diaclasado.
- III. Índice de rugosidad de la discontinuidad.
- IV. Índice de alteración o relleno de la discontinuidad.
- V. Factor de reducción por la presencia de agua o filtraciones a través de las discontinuidades.
- VI. Factor representativo de las condiciones tensionales de la roca.

El amplio rango de valores que puede tomar el índice Q (seis órdenes de magnitud) constituye una característica muy importante del Sistema y refleja la variación en la calidad de la roca, de manera probablemente más rápida, que mediante la escala lineal del índice RMR. Debido a esta característica, se logra de manera más fácil la correlación con el resto de parámetros físicos de la roca.

La calidad del macizo rocoso, Q, se correlaciona con el sostenimiento instalado, de forma que los resultados obtenidos con esta correlación se resumen en tablas detalladas o simplificadas, tal y como se muestra en el Capítulo II, en la sección correspondiente a la clasificación del macizo rocoso Q. (Tomado y modificado de BARTON 1974,2000)

c) *Clasificación R_{Mi}, según PALLMSTRÖM (1995, 2000).*

El método de sostenimiento R_{Mi} (Índice del Macizo Rocoso –Rock Mass index-) fue introducido en 1995. El mismo pide como datos de entrada, los principales rasgos que influyen las propiedades del macizo rocoso; para ser expresados como la resistencia a la compresión uniaxial del macizo rocoso y se expresa de la siguiente forma:

✘ Para rocas diaclasadas:

$$R_{Mi} = \sigma_c \times JP = \sigma_c \times 0.2\sqrt{jC} \times Vb^D; (D = 0.37 \times jC^{-0.2})$$

✘ Para rocas masivas:

$$R_{Mi} = \sigma_c \times f_\sigma = \sigma_c \times \left(\frac{0.05}{Db}\right)^{0.2} \approx 0.5 \times \sigma_c$$

Como fue presentado anteriormente por Palmström (1995, 1996), el R_{Mi} puede utilizarse en varias aplicaciones, adicionales a su uso en la estimación del sostenimiento, tales como: la caracterización de la resistencia y deformabilidad del macizo rocoso, el cálculo de las constantes del criterio de rotura de Hoek y Brown para macizos rocosos y la valoración o estimación del grado de penetración de máquinas tuneladoras a sección completa (TBM).

Este método solo usa como parámetros de entrada el volumen del bloque y el diámetro del túnel, los cuales son suficientes para realizar una estimación preliminar del sostenimiento. Esto puede ser de utilidad cuando solo sea disponible información limitada sobre las condiciones del terreno, por ejemplo como en el caso del estado inicial de un proyecto. Posteriormente, cuando los valores o valoraciones de los distintos factores que constituyen los datos de entrada, haya sido posible su observación o medida, puede hacerse una estimación más precisa del sostenimiento. (Tomado y modificado de PALLSTRÖM 1995, 2000).

Los parámetros utilizados en esta clasificación son los siguientes:

- I. Resistencia a la compresión uniaxial de la roca intacta.
- II. Parámetro del diaclasado.
- III. Factor de estado (o condición) de las diaclasas.
- IV. Volumen del bloque.
- V. Parámetro de masividad (para rocas masivas).
- VI. Diámetro equivalente del bloque (para rocas masivas).

CAPÍTULO V

GEOLOGÍA REGIONAL

AGUERREVERE & ZULOAGA (1937), realizaron el primer estudio sistemático de las rocas de la Cordillera de la Costa y la Serranía del Interior Central aportando conceptos sobre la geología estructural y la estratigrafía regional que han sido base para un sinnúmero de publicaciones en la referida área. En dicho trabajo quedan divididas las rocas de la zona en: las rocas gnéissicas graníticas del núcleo de la Cordillera que forman el basamento metamorfizado de la cuenca y tres series metasedimentarias: Serie Caracas, Serie Villa de Cura y Serie San Juan de los Morros. Estas series luego son correlacionadas con rocas sedimentarias de edad conocida, como las lutitas de la Formación Colón, la Formación La Luna, el Grupo Cogollo y la Formación Río Negro. De esta forma se fija una edad Cretácica para estas formaciones en base a las correlaciones.

SMITH (1952), estudia la Serranía del Interior, y la denomina “Serranía de la Costa” definiéndola como dos series de esquistos y filitas de edad Cretácica suprayacente a un basamento de roca granítica. Establece que las rocas metamórficas y las relaciones estructurales son parte del sistema de arco de islas del Caribe Este.

SEIDERS (1965), reconoce tres secuencias estratigráficas, compuestas por el Grupo Caracas y tres formaciones suprayacentes al norte y centro de la zona, en el área central el gneis de La Aguadita y rocas discordantes suprayacentes y por último asigna la tercera serie al Grupo Villa de Cura. Se asigna edad Maastrichtiense-Paleoceno para la deformación principal de la zona. Con excepción del basamento, establece que la facies de los esquistos verdes es el grado metamórfico más alto.

MENÉNDEZ (1966) reconoce cuatro fajas tectónicas de rumbo general este-oeste en las montañas occidentales del Caribe y establece el Eoceno superior como la edad del principal proceso de plegamiento. BELL (1968) amplía la subdivisión hecha por MENÉNDEZ (1966) y la aumenta a ocho Fajas (figura #14), basándose en rasgos estructurales; que en sentido Norte - Sur son:



Figura #14. Ubicación de las fajas tectónicas. (Tomado y modificado de MENÉNDEZ, ET. AL. 2000).

- ✘ *Faja tectónica de la Cordillera de la Costa:* Limitada al norte por el sistema de fallas del Caribe y al sur por la zona de fallas de La Victoria. Contiene a las rocas metasedimentarias del Grupo Caracas y presenta grandes pliegues abiertos.
- ✘ *Faja tectónica de Caucahua-El Tinaco:* Limitada al norte por la falla de La Victoria y por la zona de fallas de Santa Rosa al sur. Es una faja interrumpida de bloques de basamento que infrayace una secuencia vulcano-sedimentaria ligeramente metamorfizada. Son característicos los pliegues.
- ✘ *Faja tectónica de Paracotos:* Limitada entre la falla de Santa Rosa al norte y la falla de Agua Fría al sur. Contiene a las capas de la Formación Paracotos que buzanan al sur.
- ✘ *Faja tectónica de Villa de Cura:* Limitado al norte por la falla de Agua Fría al norte y la falla de Cantagallo al sur. Compuesta por una acumulación de rocas volcánicas ligeramente metamorfizadas.

- ✘ *Faja Piemontina*: Limitada al norte por la falla de Cantagallo y al sur por el Corrimiento Frontal. Esta faja es la más extensa y forma el cinturón sur que bordea al Grupo Villa de Cura.
- ✘ *Cinturón de Fallas de Corrimiento*: Se denomina así por ser un sistema discontinuo de fallas, que exponen repetidamente secciones de formaciones ubicadas al norte del mismo.
- ✘ *Faja Volcada*: Corresponde a un cinturón angosto de rocas terciarias volcadas hacia el sur.
- ✘ *Faja de buzamientos suaves*: Constituida por rocas sedimentarias del Eoceno que forman un homoclinal que buza al sur y constituye la parte septentrional de los Llanos a medida que suaviza el buzamiento hacia el sur.

URBANI, ET. AL (2004) en el Atlas Geológico de la Cordillera de la Costa, compilaron e integraron trabajos previos de la misma, donde separan la totalidad de la cordillera de la Costa en seis napas que son las siguientes:

- ✘ Napas de la Serranía del Litoral:
 - I. 1.1. Napa Costera.
 - II. Napa Ávila.
 - III. Napa Caracas.
- ✘ Napas de la Serranía del Interior:
 - IV. 2.1. Napa Caucagua-El Tinaco.
 - V. 2.2. Napa Loma de Hierro.
 - VI. 2.3. Napa de Villa de Cura

Estratigrafía Regional

URBANI, ET. AL (2004) en el Atlas Geológico de la Cordillera de la Costa realiza una muy completa definición y clasificación de las unidades litodémicas que afloran en esta región.

✘ Napas de la Serranía del Litoral:

I. Napa Costera: Unidades del Cretácico, con probables elementos más antiguos.

i. Asociación Metamórfica de La Costa.

1. Esquisto verde de Agua Viva.
2. Mármol de Antímano.
3. Peridotita Serpentinizada de La Bimba.
4. Metaígneas de Cabo Codera.
5. Complejo Nirgua.
6. Esquisto de Tacagua.
7. Metadiorita de Todasana.

ii. Cuerpos de Serpentinita dispersos sin nombre formal.

II. Napa Ávila: Unidades Paleozoicas, a excepción del Gneis de Peña de Mora.

i. Asociación Metamórfica Ávila.

1. Gneis Cabriales.
2. Metatonalita de Caruao.
3. Gneis Granítico de Choróní.
4. Gneis de Colonia Tovar.
5. Metagranito de Guaremal.
6. Metagranito de Naiguatá.
7. Augengneis de Peña de Mora.
8. Complejo de San Julián.

9. Metaígneas de Tócome.
10. Complejo de Yaritagua.

III. Napa Caracas: Unidades del Paleozoico al Cretácico.

i. Asociación Metasedimentaria Caracas.

1. Esquisto de Chuspita.
2. Esquisto de Las Brisas.
 - a. Metaconglomerado de Baruta.
 - b. Metaconglomerado de La Mariposa.
 - c. Mármol de Zenda.
- 3. Esquisto de Las Mercedes.**
 - a. Mármol de Los Colorados.

ii. Cuerpos de Serpentinita dispersos sin nombre formal.

iii. Gneis de Sebastopol.

iv. Asociación Metamórfica Los Cristales.

1. Esquisto de Aroa.
2. Esquisto de Mamey.

✘ Napas de la Serranía del Interior.

I. Napa Caucagua-El Tinaco: Unidades del Precámbrico al Cretácico.

i. Complejo El Tinaco.

1. Gneis de La Aguadita.
 2. Esquisto de Tinapú.
- ii. Unidades no agrupadas en asociaciones.
1. Metaconglomerado de Charallave.
 2. Complejo de Conoropa.
 - a. Gneis Granítico de San Vicente.
 3. Gneis Tonalítico de Curiepe.
 4. Serpentinita de El Chupón.
 5. Hornblendita, diorita y basalto- Zona de El Tinaco.
 6. Trondjemita de La Gloria.
 7. Metadiorita de La Guacamaya.
 8. Filita de Las Placitas.
 9. Filita de Muruguata.
 10. Volcánicas de Pílancones.
 11. Brecha ígnea de Sabana Larga.
 12. Serpentinita de San Antonio.
 13. Peridotita de Tinaquillo.
 14. Filita de Tucutunemo.
 - a. Metalava de Los Naranjos.
 15. Filita de Urape.

II. Napa Loma de Hierro: Unidades del Cretácico al Eoceno.

- i. Vulcano-sedimentarias de Boca del Oro.
- ii. Serpentinita de Las Peñas Negras.

iii. Complejo Ofiolítico de Loma de Hierro.

1. Ultramáficas de Loma de Níquel.
2. Gabro de Mesía.
3. Metalava de Tiara.

iv. Filita de Paracotos.

v. Rocas volcánico-sedimentarias del Río Guare.

vi. Cuerpos de Serpentinita dispersos sin nombre formal.

III. Napa Villa de Cura: Unidades del Jurásico (?) al Cretácico.

i. Asociación Metavulcano-sedimentaria de Villa de Cura.

1. Metatoba de El Caño.
2. Metalava de El Carmen.
3. Metatoba de El Chino.
4. Granofel de Santa Isabel.

ii. Asociación Metaígneas San Sebastián.

1. Unidades Volcánicas.
 - a. Metalava de Las Hermanas.
 - b. Volcánicas de Tiramuto.
2. Unidades plutónicas ultramáficas a máficas.
 - a. Ultramáficas de Apa.
 - b. 2.3.2.2.2. Ultramáficas de Cerro Pelón.

- c. 2.3.2.2.3. Ultramáficas de Chacao.
- 3. Unidades plutónicas máficas.
 - a. Metagabro de Cantagallo.
 - b. Diorita Piroxénica de Platillón.

La formación que aflora en el área de estudio corresponde a **Las Mercedes**, que se describe a continuación.

AGUERREVERE & ZULOAGA (1937) establecen que son esquistos principalmente calcáreos, con zonas grafitosas y localmente zonas micáceas. Según GONZÁLEZ DE JUANA *ET AL.* (1980) la litología consiste en esquisto cuarzo - muscovítico-calcítico-grafitoso con algunos cuerpos lenticulares de mármol grafitoso que se denominó “Caliza de los Colorados” por AGUERREVERE & ZULOAGA (*op cit.*). La mineralogía promedio del esquisto consiste en 40% cuarzo, 20% muscovita, 23% calcita, grafito 5%, y cantidades menores de clorita, óxidos de hierro, epidoto y ocasionalmente plagioclasa sódica. El mármol se presenta en capas delgadas, son de color gris azulado y su mineralogía consiste en casi su totalidad calcita, escasa dolomita y cuarzo, muscovita, pirita y óxidos de hierro en cantidades accesorias.

WEHRMANN (1972), menciona metaconglomerados en su base, esquistos cloríticos y una sección en el tope, de filitas negras, poco metamorfizadas, con nódulos de mármol negro similares a los de las formaciones La Luna y Querecual, indica que el tope de la formación se hace más cuarzosa y menos calcárea en su transición hacia la Formación Chuspita.

SEIDERS (1965), menciona además, meta-areniscas puras, feldespáticas y cuarzosas, de estratificación de grano variable, a veces gradada. El Léxico Estratigráfico habla de una edad de Mesozoico sin diferenciar debido a que la fauna de esta formación es poco diagnóstica. Se considera que el contacto inferior de la Formación Las Mercedes es generalmente transicional y a veces estructural, y el

contacto superior con la Formación Chuspita es transicional (SEIDERS (*op cit.*)). Esta formación se extiende desde Carenero, estado Miranda, hasta el estado Cojedes.

Geología Estructural Regional

La zona de estudio se encuentra en el límite norte de la Asociación Metasedimentaria Caracas, a través de la Formación Las Mercedes, con la Asociación Metamórfica Ávila, a través del Augengneis de Peña de Mora (URBANI, *ET. AL (op cit.)*).

La orientación de la foliación en la Napa Caracas (Fm. Las Mercedes) se compone por cuatro direcciones: N 30°-70° E con buzamiento al norte, N 60°-70° E con buzamiento al sur, N-S buzando al oeste y E-O con buzamiento al norte. Dicha foliación se debe a la textura lepidoblástica, común en todas las unidades. Se diferencian tres períodos de plegamiento en esta napa. (ORTA, 2003).

WEHRMANN (*op cit.*) menciona que en la Fm. Las Mercedes, en la carretera Petare – Santa Lucia, debido al cizallamiento producto del volcamiento de las estructuras se logra apreciar un clivaje incipiente paralelo al plano axial de los ejes del plegamiento. WHITTEN (1966) le denomina foliación crenulada y refiere que es producto de una nueva foliación (S2), perpendicular a la foliación original (S1), que sufre cizallamiento a lo largo de sus planos en la zona de los ejes de los micropliegues.

✧ *Fallamiento*

Las estructuras de carácter regional que determinan el esquema estructural de la región, son las fallas principales del Sistema Tacagua – El Ávila y Caucaüita – Guarenas, las cuales a su vez pertenecen a un complejo sistema mayor, producto de la colisión de placas Caribe y Suramericana. El bloque entre estas fallas presenta una

serie de fallas conjugadas de rumbo NO – SE y movimiento transcurrente, generalmente dextral. En un ángulo casi recto se generan fallas de gravedad de rumbo general NE – SW y buzamiento al sur. El bloque ubicado al sur de la falla Caucagüita – Guarenas, presenta una serie de fallas mayores de gravedad como las de Caiza, Carimao, Quebrada Seca y Guacarapa, de rumbo ENE – OSO y buzamiento aparente al norte, las cuales colisionan y se truncan contra la falla de Caucagüita – Guarenas, al igual que las del bloque Norte, generando una geometría estructural bastante compleja a ambos lados de la falla principal. (Comunicación personal con WEHRMANN, 2008).

OLLARVES, *ET AL.* (2007), menciona que el sistema de falla Tacagua – El Ávila subdivide la Cordillera de la Costa en dos sistemas montañosos elongados en dirección Este – Oeste, ubicados uno en posición septentrional y el otro meridional, siendo el primero de mayor elevación. La depresión de Guarenas – Guatire se encuentra limitada al norte por esta falla. La traza activa de ésta muestra una geometría curvilínea que recorre el piedemonte de la montaña del Ávila, sugiriendo que esta falla no es vertical, y que además, buza hacia el norte.

En las adyacencias de la Universidad Metropolitana, la falla El Ávila se expresa en el paisaje como un conjunto de fallas de muy alto buzamiento, en donde las facetas triangulares y las bermas representan las geoformas características. Se reconocen zonas de fallas con rocas serpentinizadas, altamente trituradas, similares a las que se encuentran en el flanco norte de la Cordillera de la Costa a lo largo del sistema de fallas de Macuto. La estructuración de la falla en este sector, consiste en un sistema paralelo, ocasionalmente “*en échelon*”, el cual se expresa en el paisaje con escarpes de fallas en las laderas de la montaña del Ávila, generando a su vez, un sistema escalonado de bermas. Este patrón se observa a todo lo largo de las estribaciones sur del Ávila hasta llegar a la cuenca de Guarenas – Guatire.

✧ *Metamorfismo*

Las formaciones Las Brisas, Antímano, Las Mercedes y Tacagua se localizan dentro de los límites geográficos de la subfacie metamórfica Cuarzo – Albita – Muscovita – Clorita, perteneciente a la facie de los Esquistos Verdes con relación P/T (presión/temperatura) intermedia. Esta subfacie se caracteriza por la presencia de muscovita en el 100% de las muestras y de clorita y actinolita como minerales secundarios en algunas. En menor porcentaje aún se hallan epidoto, granate, calcita y esfena. (WEHRMANN, 1972)

✧ *Sismicidad*

De acuerdo a los eventos sísmicos registrados entre el 2000 y 2007, asociados posiblemente al sistema de fallas Tacagua - El Ávila, se refieren a sismos de baja magnitud (Ms, entre 2 y 3), y someros (menores que 10 km, de profundidad). Siendo la mayor cantidad de éstos registrados en el área del cañón de Tacagua, y hacia el extremo este de Caracas, existiendo un vacío de eventos hacia la parte central de Caracas y hacia la parte norte de Guarenas – Guatire.

Para realizar aproximaciones sobre el potencial sísmico del sistema de falla Tacagua – El Ávila, se considera que es una sola falla sin segmentación, por lo tanto, considerando la ecuación de MATSUDA (1975), y tomando como variable los 65 km de longitud de la falla, se estima que el potencial sismo génico de ésta, puede alcanzar una magnitud máxima (Ms) de 7,9. Asimismo, utilizando de WELLS & COOPERSMITH (1994), la magnitud máxima (Mw) es de 7,1 tomando en cuenta los 65 km de longitud de la falla y 20 km de profundidad para la zona de bloqueo. (Tomado de OLLARVES, *ET AL.* (2007), FUNVISIS)

CAPÍTULO VI

RESULTADOS

Geología Local

Luego de un estudio detallado de la zona se pudo determinar que la misma consta de 4 litotipos, en su totalidad compuestos por rocas metamórficas y pertenecientes a la Formación Las Mercedes. Los mismos fueron clasificados de acuerdo a la mineralogía y características texturales de la roca.

La zona de estudio está compuesta en su totalidad por lo esquistos típicos de la Formación Las Mercedes y comprende un tramo ubicado entre los ya citados sitios de La Culebrita y Puerta del Este, siguiendo una trayectoria cercana al curso del río Guarenas. De este trazado se pudieron diferenciar los siguientes litotipos:

✦ *Unidad Klm 1*

Esta unidad consta de un tipo litológico de la Formación Las Mercedes, el cual consiste en un esquisto calcáreo cuarzoso intercalado con un esquisto cuarzoso de aspecto gnésico, muscovítico y feldespático, con cantidades variables de grafito y abundantes vetas de cuarzo y ocasionalmente, calcita.

Estos esquistos son sumamente tenaces, masivos y resistentes a la erosión, pero muy fracturados debido a esfuerzos tectónicos. Las vetas de feldespato y cuarzo son comunes, alcanzando ocasionalmente un par de decímetros de espesor. Eventualmente se hallan intercalados esquistos grafitosos de color negro, calcáreos,

en forma lenticular, en particular en las quebradas Santa Rosa, cerca del contacto con las facies Peña de Mora y cerca de su confluencia con la quebrada Ayala.

I. *Características de campo*

Presenta un color fresco que varía de gris medio a oscuro, dependiendo de la cantidad de grafito presente, y un gris más claro como color meteorizado, la foliación está bien marcada y se pudieron observar vetas de cuarzo y calcita de hasta 3 cm de espesor perpendiculares y paralelos a la misma.



Figura #15. Afloramiento del esquistoso cuarzoso de aspecto gnéisico, muscovítico y feldespático, representativo de la unidad K1m1. Rumbo N 50° E.

II. *Petrografía*

A continuación se presentan los resultados del análisis petrográfico de las muestras representativas del litotipo K1m1.

Tabla #17. Valores de abundancia mineral expresados en porcentaje en esquistos calcáreos cuarzosos, esquistos cuarzosos de aspecto gnéisico, moscovítico y feldespático.

| MUESTRAS | Ca | Qz | Mu | Cl | Plag | Feld | Gr | Goe | Pi | Leu | Tu |
|------------------|-------------|-------------|-------------|------------|------------|------------|----------|------------|----------|------------|----------|
| QVN-002-A | 74 | 10 | 12 | 0 | 0 | 3 | 1 | Tz | Tz | 0 | 0 |
| MI-004 | 76 | 9 | 11 | 0 | 0 | 3 | 1 | 0 | Tz | 0 | 0 |
| MAGA | 24 | 32 | 27 | 1 | 5 | 0 | 4 | 6 | 0 | 1 | 0 |
| CER | 16 | 56 | 17 | 1 | 3 | 2 | 2 | 3 | Tz | 0 | Tz |
| PL-001 | 63 | 17 | 15 | 0 | 0 | 3 | 2 | Tz | 0 | Tz | 0 |
| PROMEDIO | 50.6 | 24.8 | 16.4 | 0.4 | 1.6 | 2.2 | 2 | 1.8 | 0 | 0.2 | 0 |

Calcita (Ca); Cuarzo (Qz); Muscovita (Mu); Clorita (Cl); Plagioclasa (Plag); Feldespato (Feld);

Grafito (Gr); Goethita (Goe); Pirita (Pi); Leucoxeno (Leu); Turmalina (Tu).

La mayoría de las muestras analizadas poseen microfracturas rellenas de cuarzo y en algunos casos se pueden ver pliegues, evidenciados por la forma flexionada de los filosilicatos. En general los minerales encontrados se describen de la siguiente manera:

CALCITA: Se presentan como cristales anhedrales y subhedrales, con exfoliación romboédrica muy bien marcada en la mayoría de los casos. Los mismos, en algunos casos se pueden ver orientados y distribuidos uniformemente a lo largo de toda la sección. El tamaño de los cristales varía entre 0,05 y 0,7 mm.

CUARZO: Se observan cristales anhedrales tanto monocristalinos como policristalinos dispuestos a lo largo de toda la sección, con un tamaño de grano que oscila entre los 0,02 y 1,5 mm y un tamaño modal de 0,25 mm. En algunos casos este mineral se encuentra orientado y rellenando pequeñas vetas.

MUSCOVITA: Se presentan como cristales alargados con una dirección preferencial en la mayoría de los casos, dispuestos en bandas subparalelas. Los mismos se pueden ver algo deformados y en pocas ocasiones desorientados y en

grandes concentraciones con presencia de un clivaje de crenulación. Estos cristales se encuentran entrelazados con láminas delgadas de grafito.

CLORITA: al igual que la muscovita, la clorita se presenta como cristales hojosos dispuestos en bandas a lo largo de toda la sección, el mismo no excede el 1% en las secciones observadas.

PLAGIOCLASA: Se observan cristales subhedrales de albita distribuidos uniformemente a lo largo de toda la sección. Los mismos, en su mayoría, se encuentran muy alterados, lo que dificulta un poco su identificación. El tamaño de estos cristales varía entre 0,01 y 2 mm.

FELDESPATO: Se presentan como cristales anhedrales de menos de 0,07 mm de tamaño, distribuidos aleatoriamente a lo largo de la sección. En algunos casos se aprecian arcillas como producto de alteración.

GRAFITO: Se observa mayormente como delgadas láminas entrelazadas con muscovita, lo que resalta el aspecto foliado de la muestra. En otros casos se puede encontrar relleno de espacios vacíos como microfisuras y/o porosidades.

GOEHTITA: Aparece como pseudomorfo de pirita en la mayoría de los casos y en otros relleno de microfracturas y/o espacios vacíos.

PIRITA: Se presenta como un mineral accesorio con cristales euhedrales de 0,5 mm. Se encuentran distribuidos aleatoriamente a lo largo de toda la sección. La mayoría presentan oxidación en los bordes.

LEUCOXENO: Esta dispuesto de manera muy puntual a lo largo de toda la sección en cantidades mínimas.

TURMALINA: Se presentan como cristales anhedrales, en algunos casos alargados y perpendiculares a la foliación. Poseen un tamaño promedio de 0,1.

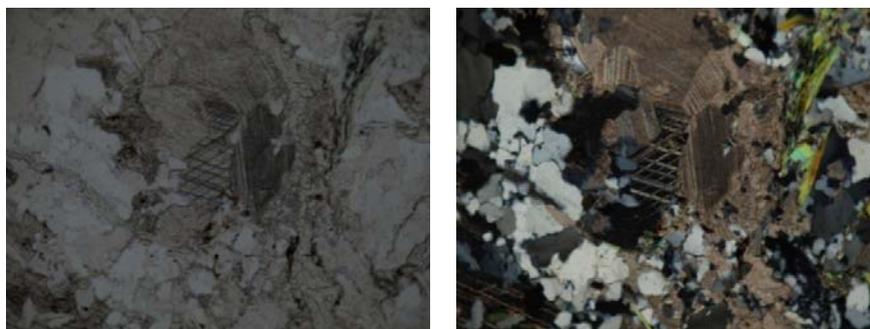


Figura #16. Cristal de calcita con exfoliación romboédrica presente en la muestra MI-004. Izquierda: nicoles paralelos. Derecha: nicoles cruzados. Foto tomada con objetivo de 10X de aumento.

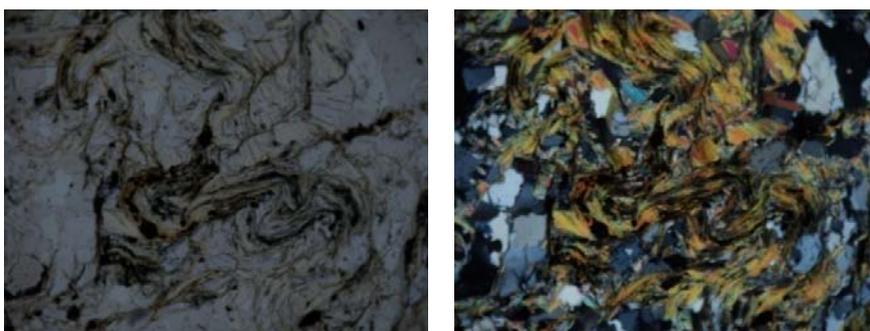


Figura #17 Cristales de muscovita entrelazados con grafito evidenciando micropliegue. Izquierda: nicoles paralelos. Derecha: nicoles cruzados. Foto tomada con objetivo de 10X de aumento.

✧ *Unidad Klm 2*

Constituye la unidad típica de la Formación Las Mercedes, compuesta por esquistos calcáreos cuarzo-moscovíticos-grafitosos, con abundantes vetas de calcita y cuarzo, distribuidos tanto en la foliación como en las diaclasas. La presencia de piritita y sus derivados férricos y ferrosos es variable y aleatoria. Cabe destacar que, aun cuando es la unidad más cercana a la litología típica de la sección tipo, no deja de tener sus diferencias en cuanto a la composición porcentual de cuarzo y feldespato.

Esta unidad se localiza específicamente entre Petare, la Urbanización Miranda y el sector Turumo.

I. *Características de campo*

Presenta color fresco gris claro a medio, dependiendo de la cantidad de grafito presente, y un pardo claro y varias tonalidades de gris claro como color meteorizado. La zona se encuentra muy plegada y fracturada, además presenta foliación moderadamente desarrollada.



Figura #18. Afloramiento del esquistó calcáreo-cuarzo-moscovítico, representativo de la unidad K1m2. Rumbo E-O.

II. *Petrografía*

A continuación se presentan los resultados del análisis petrográfico de las muestras representativas del litotipo K1m2.

Tabla #18. Valores de abundancia mineral expresados en porcentaje en esquistos calcáreos cuarzo-moscovíticos-grafíticos.

| MUESTRAS | Qz | Mu | Cl | Ca | Plag | Goe | Gr | Tu | Ep |
|----------|----|----|----|----|------|-----|----|----|----|
| BA-001 | 65 | 13 | 8 | 5 | 4 | 4 | 1 | Tz | Tz |

Cuarzo (Qz); Muscovita (Mu); Clorita (Cl); Calcita (Ca); Plagioclasa (Plag); Goethita (Goe); Grafito (Gr); Turmalina (Tu); Epidoto (Ep).

CUARZO: Se pueden observar cristales anhedrales tanto monocristalinos como policristalinos distribuidos uniformemente a lo largo de toda la sección, el tamaño de los mismos oscila entre 0,05 y 0,6 mm, con un tamaño modal de 0,15 mm.

MUSCOVITA: Las mismas se presentan como cristales tabulares dispuestos en bandas subparalelas en la mayoría de los casos, también se pueden apreciar dispuestas de manera aleatoria.

CLORITA: Esta se presenta dispuesta en bandas subparalelas en contacto con grafito y muscovita.

CALCITA: Se presenta como cristales anhedrales distribuidos en pequeñas concentraciones a lo largo de toda la sección.

PLAGIOCLASA: Se presentan como cristales subhedrales, con tamaño promedio de 0,25 mm y distribuidos uniformemente a lo largo de toda la sección. Se pueden observar cristales alterando a arcilla.

GOEHTITA: Se presenta rellenando poros o microfisuras. Casi siempre se encuentra en contacto con calcita y como pseudomorfos de pirita.

GRAFITO: La mayor concentración de este mineral se encuentra en contacto con los filosilicatos, se presenta como finas láminas entrelazadas con moscovita o clorita, lo que acentúa el aspecto foliado de la muestra.

TURMALINA: Se presentan como cristales anhedrales y subhedrales con tamaños menos a 0,3 mm. Se presentan por lo general de manera perpendicular a la foliación.

EPIDOTO: Se presenta en contacto con los filosilicatos y en bajas concentraciones.



Figura #19. Cristales de muscovita orientados intercalados con cristales de cuarzo. Izquierda :nicoses paralelos. Derecha: nicoses cruzados. Foto tomada con objetivo de 10X de aumento.

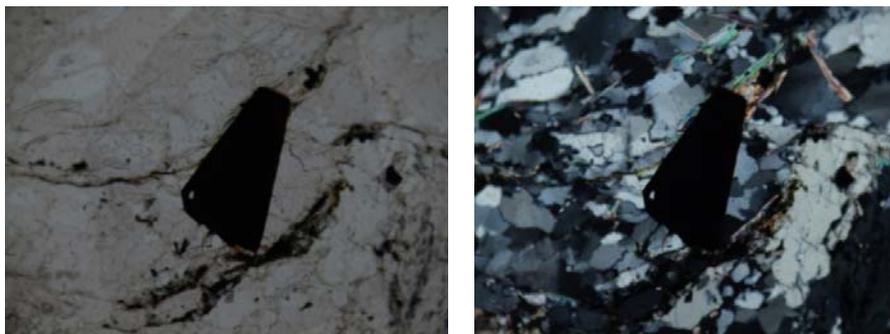


Figura #20. Pseudomorfo de pirita en contacto con cristales de cuarzo y muscovita. Izquierda: nicoses paralelos. Derecha: nicoses cruzados. Foto tomada con objetivo de 10X de aumento.

✦ *Unidad Klm 3*

Es una unidad que se presenta localmente al este de la quebrada La Encantada, en el área de los barrios El Aguacate y El Placer y consta de esquistos cuarzo-feldespático-calcáreos o no, esquistos micáceos y filitas micáceas grafitosas de colores variables grises a negro, con abundantes vetas de calcita y cuarzo paralelas a la foliación y rellenando diaclasas. En superficie el feldespato se encuentra generalmente alterado a caolín y con frecuencia desaparece, dejando oquedades en la roca.

La unidad se presenta con intervalos de esquistos de aspectos gnéísicos, de foliaciones gruesas, lo cual se ha asignado como Klm 3 (g).



Figura #21. Afloramiento del esquistos cuarzo-feldespático-calcáreos, de la unidad Klm3.
Rumbo E-O.



Figura #22. Afloramiento del esquistos de aspecto gnéisico cuarzo-feldespático-calcáreos, de la unidad K1m3 (g). Rumbo N 65° E.

I. *Características de campo*

Presenta un color fresco que varía de gris medio a oscuro, dependiendo de la cantidad de grafito existente, y de color meteorizado gris claro y pardo muy claro a blanquecino. Se observan vetas de cuarzo y calcita perpendiculares y paralelas a la foliación, las mismas poseen espesores no mayores a 4 cm. Se pudo apreciar una variación en el tamaño de grano en algunas zonas del área de estudio, permitiendo así clasificar a estos esquistos como esquistos de aspecto gnéisico en zonas específicas.

II. *Petrografía*

A continuación se presentan los resultados del análisis petrográfico de las muestras representativas del litotipo K1m3 y la subdivisión K1m3 (g).

*Klm3***Tabla #19.** Valores de abundancia mineral expresados en porcentaje en esquistos cuarzo feldespático-calcareos o no, esquistos micáceos y filitas micáceas grafitosas

| MUESTRAS | Qz | Ca | Mu | Bio | Feld | Gr | Goe | Pi | Tu | Leu |
|-----------------|-------------|-----------|-------------|------------|------------|------------|------------|----------|----------|----------|
| QDCR-001 | 43 | 20 | 24 | 1 | 8 | 3 | 1 | Tz | Tz | Tz |
| CPL-002 | 12 | 74 | 9 | 0 | 3 | 2 | Tz | Tz | Tz | 0 |
| PROMEDIO | 27.5 | 47 | 16.5 | 0.5 | 5.5 | 2.5 | 0.5 | 0 | 0 | 0 |

Cuarzo (Qz); Calcita (Ca); Muscovita (Mu); Biotita (Bio); Feldepató (Feld); Grafito (Gr); Goehíta (Goe); Pirita (Pi); Turmalina (Tu); Leucóxeno (Leu).

Algunas muestras presentaron orientación en los cristales que la constituyen y microfisuras perpendiculares a la foliación. En general los minerales encontrados se describen de la siguiente manera:

CUARZO: Se presenta como cristales anhedrales policristalinos y monocristalinos, orientados y en algunos casos con sobrecrecimiento. El tamaño de los mismos oscila entre 0,02 y 0,7 mm, con una moda de (0,1-0,3) mm. Se pueden apreciar, en algunos casos, como poiquilos en cristales de calcita.

CALCITA: Se observan cristales anhedrales distribuidos uniformemente a lo largo de toda la sección. La exfoliación romboédrica se observa perfectamente, y poseen una orientación preferencial al igual que el cuarzo y los filosilicatos en la mayoría de los casos.

MUSCOVITA: Se presentan distribuidas de dos maneras, como pequeñas concentraciones dispuestas de manera aleatoria y en bandas paralelas y de un espesor aproximado de 0,5 mm.

BIOTITA: Se presentan como laminas delgadas en contacto con moscovita y grafito.

FELDESPATO: Se observan cristales anhedrales de feldespato distribuidos de manera uniforme a lo largo de toda la sección, algunos de estos se encuentran alterando a arcillas.

PLAGIOCLASA: Se presentan como cristales anhedrales de tamaños menores a 0,03 mm. Se observan cristales de albita zonados.

GRAFITO: Se pueden observar en contacto con los filosilicatos mayormente, lo que acentúa el aspecto foliado de la muestra. Se presenta como delgadas hojas entrelazadas con los filosilicatos distribuido de manera uniforme a lo largo de toda la sección.

GOEHTITA: Se presentan distribuidos de manera uniforme a lo largo de toda la sección, en contacto con calcita y rodeando bordes de cristales de piritita como producto de la oxidación de los mismos.

PIRITA: Se observan cristales euhedrales de este mineral. Presenta evidencia de oxidación en los bordes y se distribuyen de manera muy escasa.

TURMALINA: Se presentan como cristales anhedrales distribuidos de manera aleatoria y muy escasa.

LEUCOXENO: Se presenta de manera muy escasa a lo largo de la sección estudiada.



Figura #23. Cristales euhedrales de pirita en contacto con cristales de cuarzo y muscovita. Izquierda: nicoles paralelos. Derecha: nicoles cruzados. Foto tomada con objetivo de 10X de aumento.

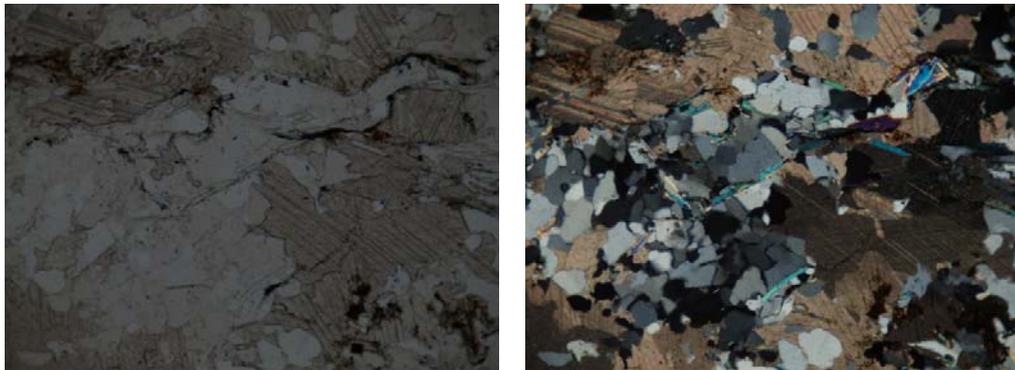


Figura #24. Cristales de calcita en contacto con cristales anhedrales de cuarzo. Izquierda: nicoles paralelos. Derecha: nicoles cruzados. Foto tomada con objetivo de 10X de aumento.

Klm3 (g)

Tabla #20. Valores de abundancia mineral expresados en porcentaje en esquistos cuarzo feldespático-calcáreos o no de aspecto gnésico.

| MUESTRAS | Qz | Mu | Cl | Bio | Ca | Feld | Plag | Gr | Goe | Pi | Tu | Leu |
|-----------------|-----------|-------------|------------|----------|-------------|------------|----------|------------|------------|----------|----------|----------|
| QHE-001 | 71 | 7 | 5 | 0 | 5 | 10 | 2 | Tz | Tz | Tz | Tz | Tz |
| QHE-002-A | 31 | 12 | 5 | 3 | 28 | 0 | 8 | 6 | 7 | 0 | 0 | 0 |
| QHE-002-B | 51 | 19 | 1 | 0 | 19 | 0 | 5 | 1 | 4 | 0 | 0 | 0 |
| PROMEDIO | 51 | 12.7 | 3.7 | 1 | 17.3 | 3.3 | 5 | 2.3 | 3.7 | 0 | 0 | 0 |

Cuarzo (Qz); Muscovita (Mu); Clorita (Cl); Biotita (Bio); Calcita (Ca); Feldepató (Feld); Plagioclasa (Plag); Grafito (Gr); Goehita (Goe); Pirita (Pi); Turmalina (Tu); Leucóxeno (Leu).

Las muestras analizadas en la subunidad Klm3 (g) presentan tamaños de cristales de cuarzo mayores que la unidad Klm3, se pueden observar bandas más gruesas de este mineral. También se aprecian microfracturas rellenas de óxido y grafito. En general los minerales encontrados se describen de la siguiente manera:

CUARZO: Se presentan como cristales anhedrales policristalinos y monocristalinos, con un tamaño que oscila entre 0,02 y 1 mm y una moda de 0,4 mm. Se pueden observar como poiquilos en cristales de calcita, en algunos casos.

MUSCOVITA: Este filosilicato está dispuesto en bandas a lo largo de toda la sección, los mismos se encuentran flexionados, lo que evidencia una zona sometida a esfuerzos. Las bandas de moscovita poseen un espesor menor a 1mm en la mayoría de los casos, mantienen una disposición subparalela y pocas ocasiones algunas son perpendiculares a la foliación.

CLORITA: Esta se presenta como cristales tabulares dispuestos en bandas subparalelas en contacto con grafito y moscovita.

BIOTITA: Se presentan como laminas delgadas en contacto con moscovita, clorita, goethita y grafito.

CALCITA: En general se presentan como cristales anhedrales dispuestos de manera uniforme en la mayoría de los casos, ya que la concentración del mismo varía en las muestras observadas. Presenta exfoliación romboédrica marcada y sus cristales poseen un tamaño promedio de 0,5 mm. Se puede observar en contacto con grafito y/o con óxido. El mismo puede verse alterado dejando poros, los cuales están rellenos por óxido y en otros casos como pórfidos conteniendo cristales de cuarzo.

FELDESPATOS: Están dispuestos a lo largo de toda la sección de manera aleatoria, poseen un alto grado de alteración en la mayoría de los casos, produciendo

así la generación de arcillas. Los mismos se presentan como cristales anhedrales con bordes redondeados y con un tamaño que varía entre 0,025 y 1,5 mm.

PLAGIOCLASA: Se presentan como cristales subhedrales y anhedrales de albita con tamaños no mayores de 1mm, distribuidos aleatoriamente a lo largo de toda la sección. En algunos casos estos cristales están medianamente alterados.

GRAFITO: Aparecen en delgadas laminas entrelazadas con los filosilicatos en la mayoría de los casos, en otras ocasiones se puede ver a este mineral en microfisuras o espacios vacíos.

GOEHTITA: Se encuentra relleno de espacios libres como microfracturas y poros, además esta en contacto con los filosilicatos y en otros casos se puede observar como pseudomorfo de pirita de color rojizo y con caras bien definidas.

PIRITA: Se presentan como cristales euhedrales con bordes oxidados y un tamaño no mayor a 0,4 mm.

TURMALINA: Se observan cristales anhedrales, en algunos casos alargados y perpendiculares a la foliación. Poseen un tamaño promedio de 0,1 mm.

LEUCOXENO: Se presentan como cristales anhedrales distribuidos a lo largo de toda la sección de manera escasa.

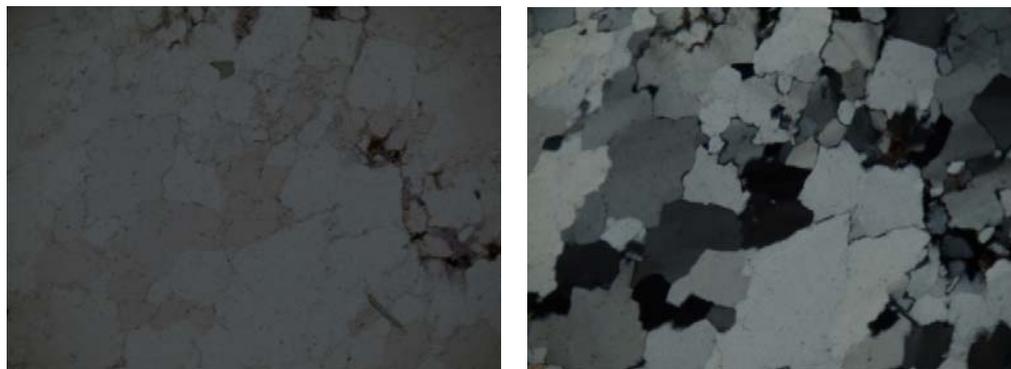


Figura #25. Cristales anhedrales de cuarzo. Izquierda: nicoles paralelos. Derecha: nicoles cruzados.
Foto tomada con objetivo de 10X de aumento.



Figura # 26. Filosilicatos dispuestos en bandas subparalelas intercaladas con cristales de cuarzo.
Izquierda: nicoles paralelos. Derecha: nicoles cruzados. Foto tomada con objetivo de 10X de aumento.

✧ *Unidad Klm 5*

Se observa este grupo litológico solamente en la vertiente Sur del valle del río Guarenas, a partir del Km 16+800 hasta aproximadamente el Km 20+100. Consta de esquistos cuarzo micáceos y filitas micáceas, ligeramente grafitosas, calcáreas o no, de colores gris oscuro. Hacia el cauce, los afloramientos observados son de color negro, fresco, pero en las laderas la roca se encuentra profundamente meteorizada, destacándose amplios anfiteatros topográficos de deslizamiento antiguo.

I. *Características de campo*

Se observa un color fresco gris claro a medio y un color meteorizado gris pálido con manchas puntuales de oxidación de color rojizo, presenta una foliación bien marcada y vetas de cuarzo concordantes y discordantes a la misma, con un espesor promedio de 0,5 cm. Se pudieron observar, en algunos casos, lentes de cuarzo de unos 12 cm de ancho y 30 cm de largo aproximadamente.



Figura #27. Afloramiento del esquistu cuarzo micáceo, representativo de la unidad K1m5.
Rumbo N 55° E.

II. *Petrografía*

A continuación se presentan los resultados del análisis petrográfico de las muestras representativas del litotipo K1m5.

Tabla #21. Valores de abundancia mineral expresados en porcentaje en esquistos cuarzo micáceos y filitas micáceas, ligeramente grafitosas, calcáreas o no.

| MUESTRAS | Qz | Mu | Cl | Bio | Feld | Plag | Ca | Gr | Leu | Pi | Tu | Goe |
|-----------------|--------------|-------------|-------------|----------|-------------|----------|-------------|-------------|-------------|----------|----------|----------|
| QEZ-001 | 63 | 18 | 2 | 0 | 3 | 5 | 3 | 0 | Tz | 0 | 0 | 6 |
| QMA-003-A | 61 | 20 | 2 | 0 | 0 | 5 | 0 | 6 | Tz | 0 | 0 | 6 |
| QMB-003 | 62 | 22 | 4 | 0 | 0 | 4 | 0 | 3 | Tz | Tz | Tz | 5 |
| QG-002-A | 61 | 14 | 7 | 4 | 0 | 2 | 2 | 6 | 1 | 0 | Tz | 3 |
| PROMEDIO | 61.75 | 18.5 | 3.75 | 1 | 0.75 | 4 | 1.25 | 3.75 | 0.25 | 0 | 0 | 5 |

Cuarzo (Qz); Muscovita (Mu); Clorita (Cl); Biotita (Bio); Feldepatato (Feld); Plagioclasa (Plag); Calcita (Ca); Grafito (Gr); Leucoxeno (Leu); Pirita (Pi); Turmalina (Tu); Goehita (Goe).

Se pueden observar microfisuras en algunas muestras analizadas. En general estas muestras están compuestas mayormente por cuarzo, con un porcentaje promedio de 61% de este mineral. En general los minerales encontrados se describen de la siguiente manera:

CUARZO: Está dispuesto de manera masiva a lo largo de toda la sección, esta intercalado con bandas orientadas de moscovita. El tamaño de los cristales varía entre 0,1 y 0,6 mm, con un tamaño modal de 0,3 mm. En algunos casos se observa a este mineral rellenando microfisuras, las cuales están orientadas de manera subparalela a las bandas de filosilicatos.

MUSCOVITA: Se presentan como cristales tabulares dispuestos en bandas subparalelas de hasta 0,5 mm de espesor. Se pueden observar entrelazados con grafito y en otros casos con goehita.

CLORITA: Esta se presenta como laminas delgadas dispuestas en bandas subparalelas en contacto con moscovita y grafito.

BIOTITA: Se presentan como finas láminas entrelazadas con moscovita, clorita, goehita y grafito, e intercaladas con bandas gruesas de cuarzo masivo.

FELDESPATOS: Se encuentran distribuidos en la sección de manera aleatoria. Se presentan como cristales anhedrales algo alterados y fracturados con un tamaño promedio de 0,3 mm.

PLAGIOCLASA: Se presentan como cristales anhedrales y subhedrales de albita con un tamaño que oscila entre 0,1 y 0,3 mm, siendo este último el tamaño modal. Se observan varios cristales alterando a arcillas.

CALCITA: Se presentan como cristales anhedrales distribuidos de manera aleatoria a lo largo de toda la sección. En algunos casos se observa relleno de espacios vacíos y en otros en contacto con grafito.

GRAFITO: Se pueden observar delgadas láminas entrelazadas con los filosilicatos dando un aspecto foliado a la muestra. El mismo está distribuido de manera uniforme a lo largo de toda la sección.

LEUCOXENO: Se presenta como un mineral accesorio, distribuido de manera aleatoria a lo largo de la sección estudiada. Se observan cristales alargados y redondeados.

PIRITA: Se presentan en cristales euhedrales distribuidos de manera aleatoria y en cantidades menores al 1%.

TURMALINA: Se observan cristales anhedrales dispuestos de manera aleatoria y escasa a lo largo de la sección estudiada.

GOEHTITA: Están distribuidos a lo largo de toda la sección de manera aleatoria. Se presentan cristales euhedricos de color rojizo, debido a que son pseudomorfos de pirita. Por otra parte aparece de manera puntual relleno de microfracturas o porosidad.

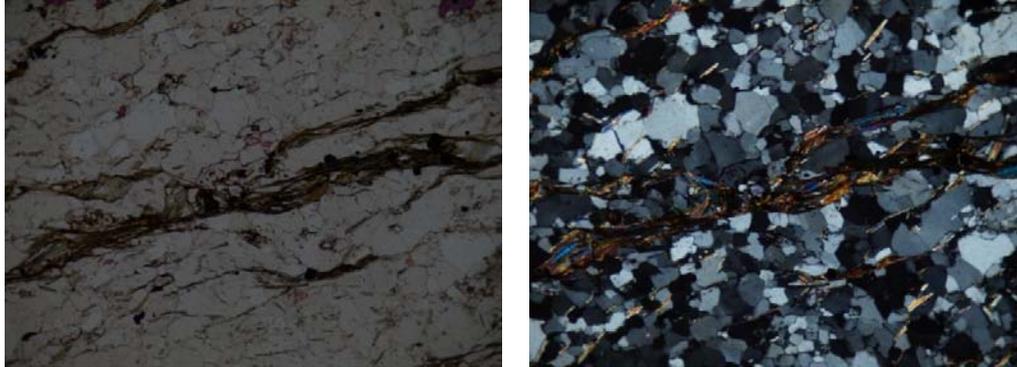


Figura #28. Filosilicatos entrelazados con finas laminas de grafito dispuestos en bandas subparalelas intercaladas con cristales de cuarzo. Izquierda: nicols paralelos. Derecha: nicols cruzados.

Foto tomada con objetivo de 10X de aumento.

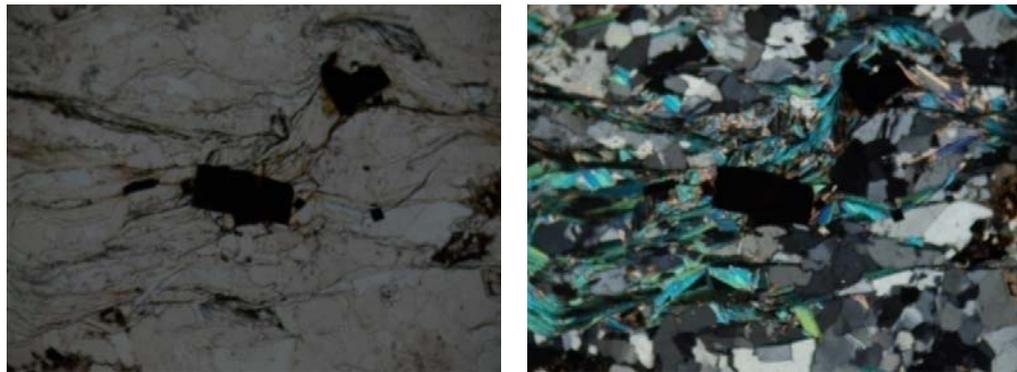


Figura #29. Pseudomorfos de pirita en contacto con cristales de cuarzo y muscovita .Izquierda: nicols paralelos. Derecha: nicols cruzados. Foto tomada

con objetivo de 10X de aumento.

Geología Estructural Local✧ *Fallamiento*

Los macizos rocosos que comprenden la zona de estudio presentan diversas fallas locales que obedecen a patrones de fallamiento a nivel regional, las cuales son responsables de la morfología presente en el valle entre Caracas y Guarenas.

En la zona del portal oeste del túnel La Encantada se localiza una confluencia de tres fallas normales, con rumbos aproximado N 70° O, N 15° O y N 30° E, respectivamente. Por lo que debe darse un especial tratamiento al momento de la ejecución de dicho portal a fin de prevenir problemas de estabilidad por la baja calidad de roca y la presencia de las mencionadas fallas en el área. Este portal se localiza aproximadamente a 1200 m. al este, a lo largo del eje del trazado (progresiva 5 + 700), del viaducto de Turumo. Se ubica en el mapa y el perfil con los puntos CTR y CON.

Hacia el portal este del túnel en mención se infiere la existencia de una falla normal en dirección casi E – O y paralela al eje del trazado, ubicándose casi 200 m. al norte del mismo, por lo que habría que prestar especial atención en caso que esta pueda ser atravesada de forma longitudinal por el trazado en el subsuelo.



Figura #30 Evidencia de falla en el margen Oeste de la quebrada La Encantada.

En la progresiva 7 + 800, correspondiente a la zona oeste del túnel Caucagüita, se ubica una falla normal de rumbo aproximado N 20° E. Se ubica a lo largo de la quebrada El Placer, homónimo del Barrio que esta al sur de la misma y cuyos puntos de levantamiento se identifican como PL.

Existe entre la progresiva 8 + 150 y 8 + 200 una zona de falla en la cual dos fallas normales de rumbo N 15° O y N 75° E, la limitan al oeste y al este respectivamente. Esta zona de falla coloca en contacto la fase de esquisto cuarzo – feldespato calcáreo y esquistos micáceos de la unidad Klm 3 con su fase gnéica Klm 3(g).

En las progresivas 8 + 550 y 9 + 300 se hallan dos fallas normales con rumbo aproximado N 70° E y N 30° E que atraviesan la fase gnéica de Klm 3(g), y cortan el eje del trazado casi en ángulo recto.

En el túnel de Mampote se localizan múltiples deslizamientos a lo largo del eje del trazado, y en la progresiva 16 + 250 se halla una falla normal con dirección N 40° E, en la cual se ven truncadas sendas evidencias de deslizamientos con sentido NO – SE.

✦ *Foliación*

Los datos se agruparon para los diferentes sectores en los tres túneles del proyecto, utilizándose los diagramas de rosetas donde las clases de estudio miden 10° y estereogramas de densidad de polos.

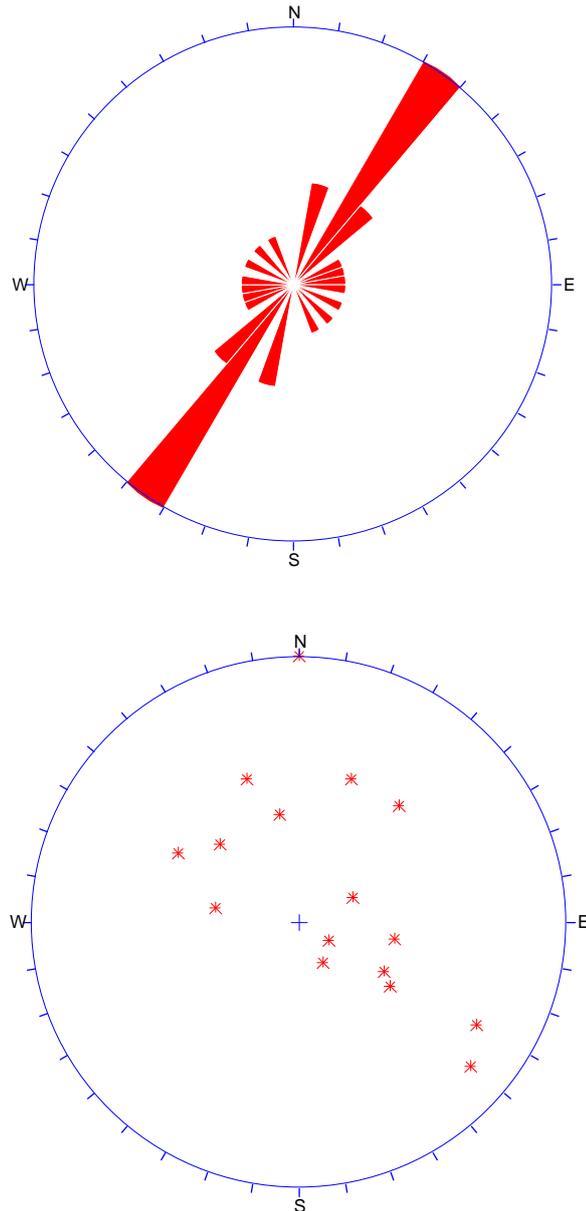


Figura #31. Diagramas que muestran la foliación dominante en el Túnel El Encantado, Con rumbo preferencial N 30°- 40° E y la distribución de los polos de dichos planos.



Figura #32. Evidencia de la foliación en la quebrada Valencia, perteneciente al túnel La Encantada.



Figura #33. Vista en detalle de la foto anterior.

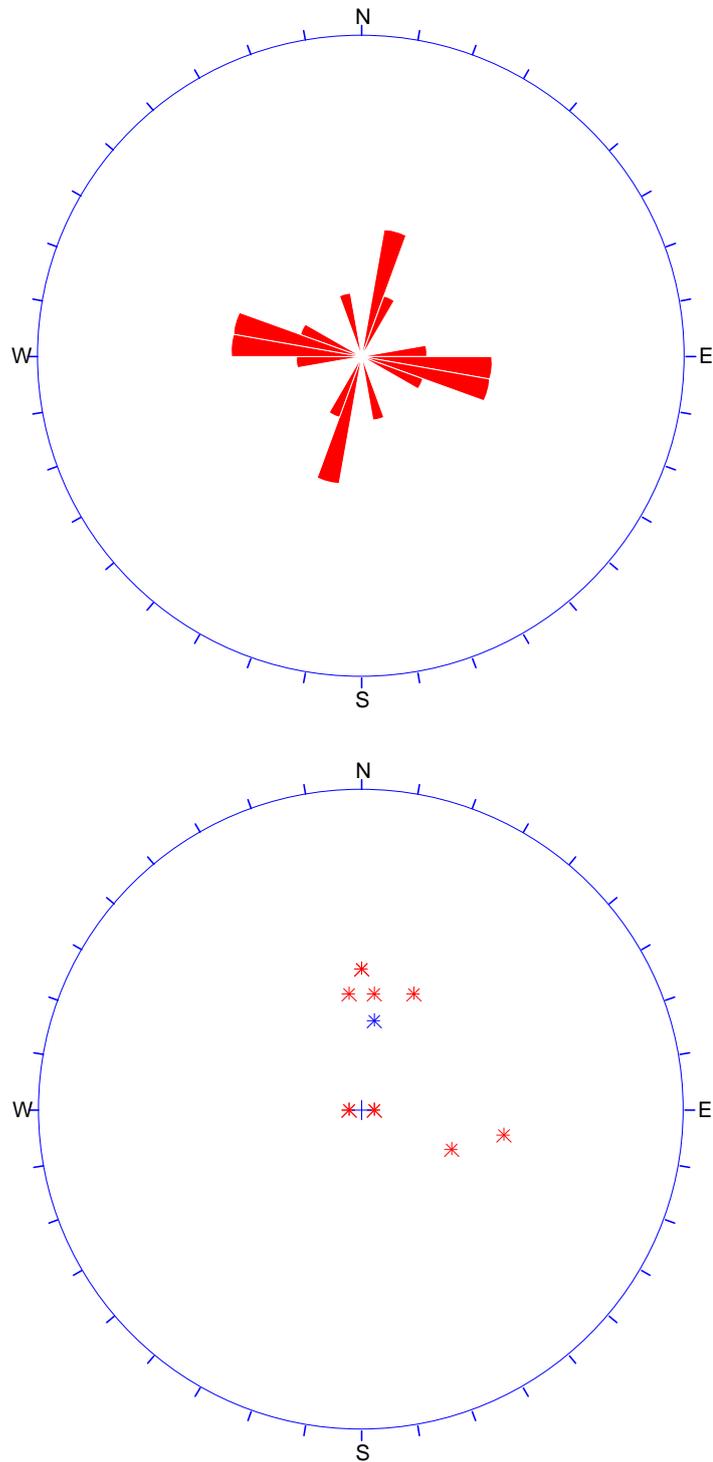


Figura #34. Diagramas que muestran la foliación dominante en el Sector #1 (S1) del Túnel Caucagiüita, Con rumbos muy dispersos y la distribución de los polos de dichos planos (* Dos Polos).

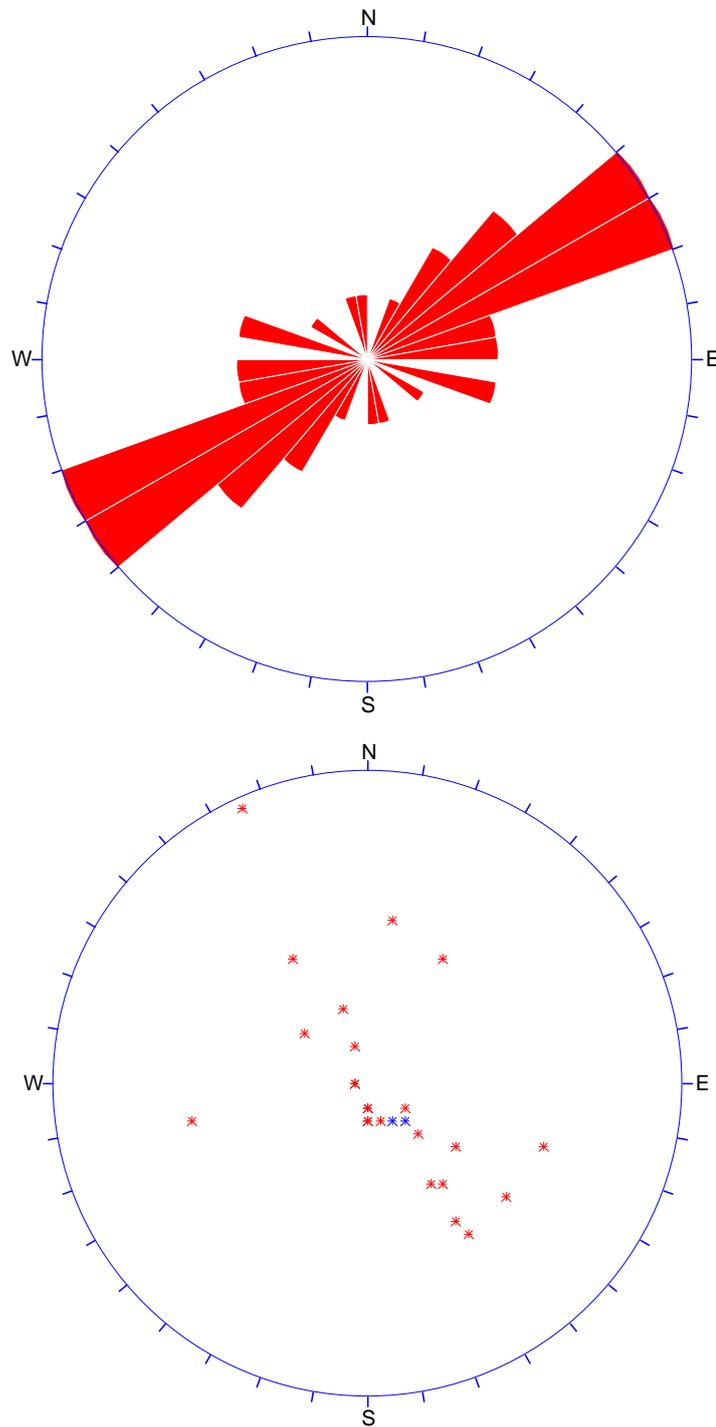


Figura #35. Diagramas que muestran la foliación dominante en el Sector #2 (S2) del Túnel Caucagüita, Con rumbos preferencial N 50° - 70° E y la distribución de los polos de dichos planos. (* Dos Polos).



Figura #36. Evidencia de la foliación y diaclasas en la quebrada Placer, perteneciente al sector #2 (S2) del túnel Caucagüita.



Figura #37. Evidencia de la foliación y diaclasas en la quebrada QDY, perteneciente al sector #2 (S2) del túnel Caucagüita.

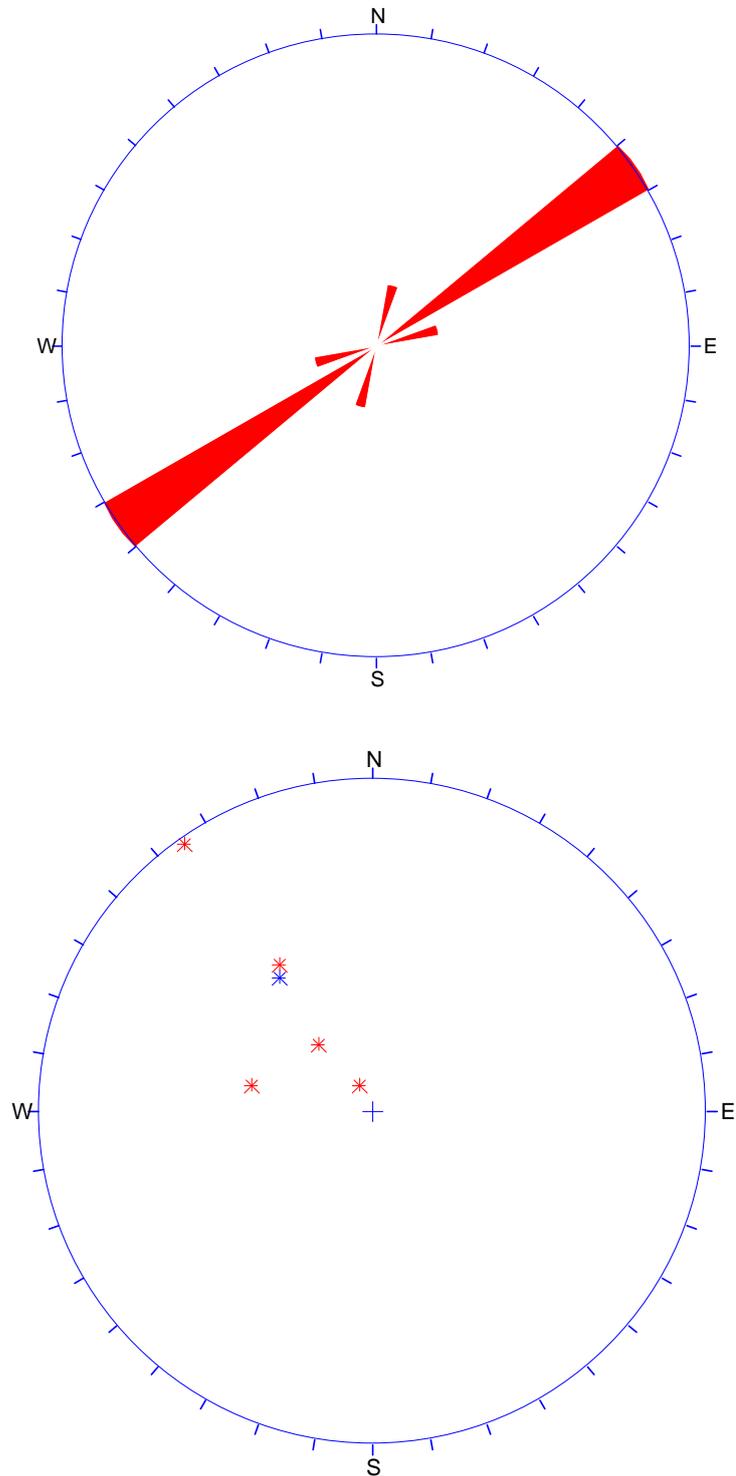


Figura #38. Diagramas que muestran la foliación dominante en el Sector #3 (S3) del Túnel Caucagiita, Con rumbo N 50° - 60° E y la distribución de los polos de dichos planos (* Dos Polos).



Figura #39. Evidencia de la foliación y diaclasas en la quebrada GUAR, perteneciente al sector #3 (S3) del túnel Caucagüita.



Figura #40. Evidencia de la foliación en la quebrada QMB, perteneciente al sector #2 (S2) del túnel Mampote.



Figura #41 Detalle de la foliación en la quebrada QEZ, perteneciente al sector #2 (S2) del túnel Mampote.



Figura #42 Evidencia de la foliación en la sección CDN-002, perteneciente al sector #2 (S2) del túnel Mampote.

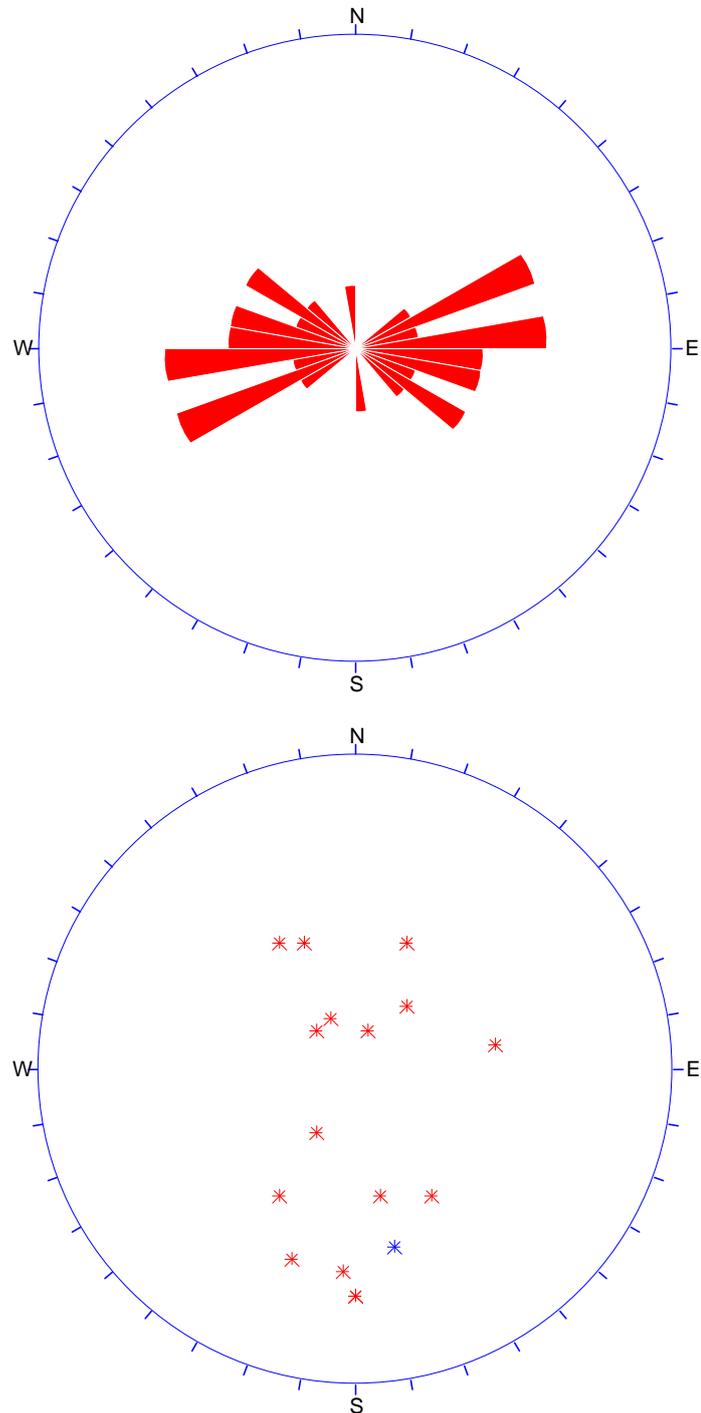


Figura #43. Diagramas que muestran la foliación dominante en el Sector #2 (S2) del Túnel Mampote, Con rumbos entre N 60° E – E_O y N 50° O – E_O, junto a la distribución de los polos de dichos planos (* Dos Polos).

La sección #1 correspondiente al túnel de Mampote presenta numerosos plegamientos y efectos de tectonismo que hacen imposible la correcta medición de las discontinuidades en dicho macizo con un grado de acierto adecuado.

✧ *Diaclasas*

Los datos se agruparon para los diferentes sectores en los tres túneles del proyecto, utilizándose los diagramas de rosetas donde las clases de estudio miden 10° y estereogramas de densidad de polos.

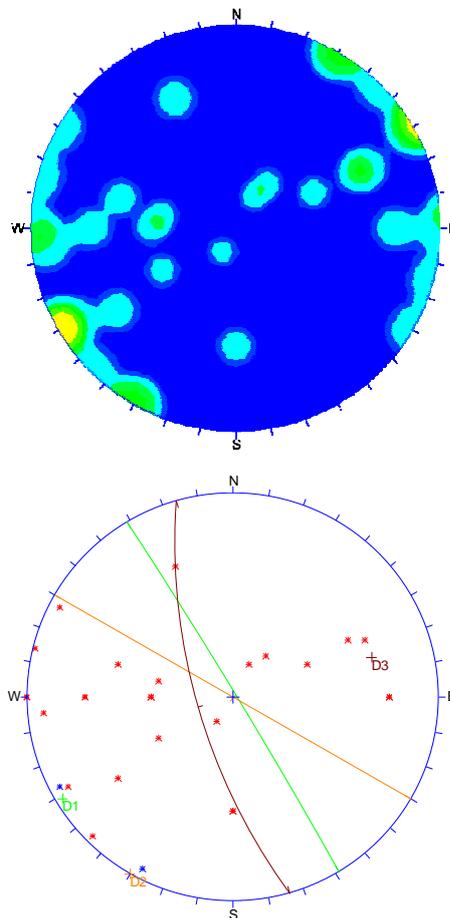


Figura #44. Diagramas que muestran las diaclasas dominante en el Túnel El Encantado, Tres familias, **D1: N 31° O 88° N**, **D2: N 60° O SV**, **D3: N 16° O 70° S**, junto al diagrama de concentración de los polos de dichos planos (* Dos Polos).



Figura #45. Evidencia del diaclasado en la quebrada Valencia, perteneciente al túnel La Encantada.

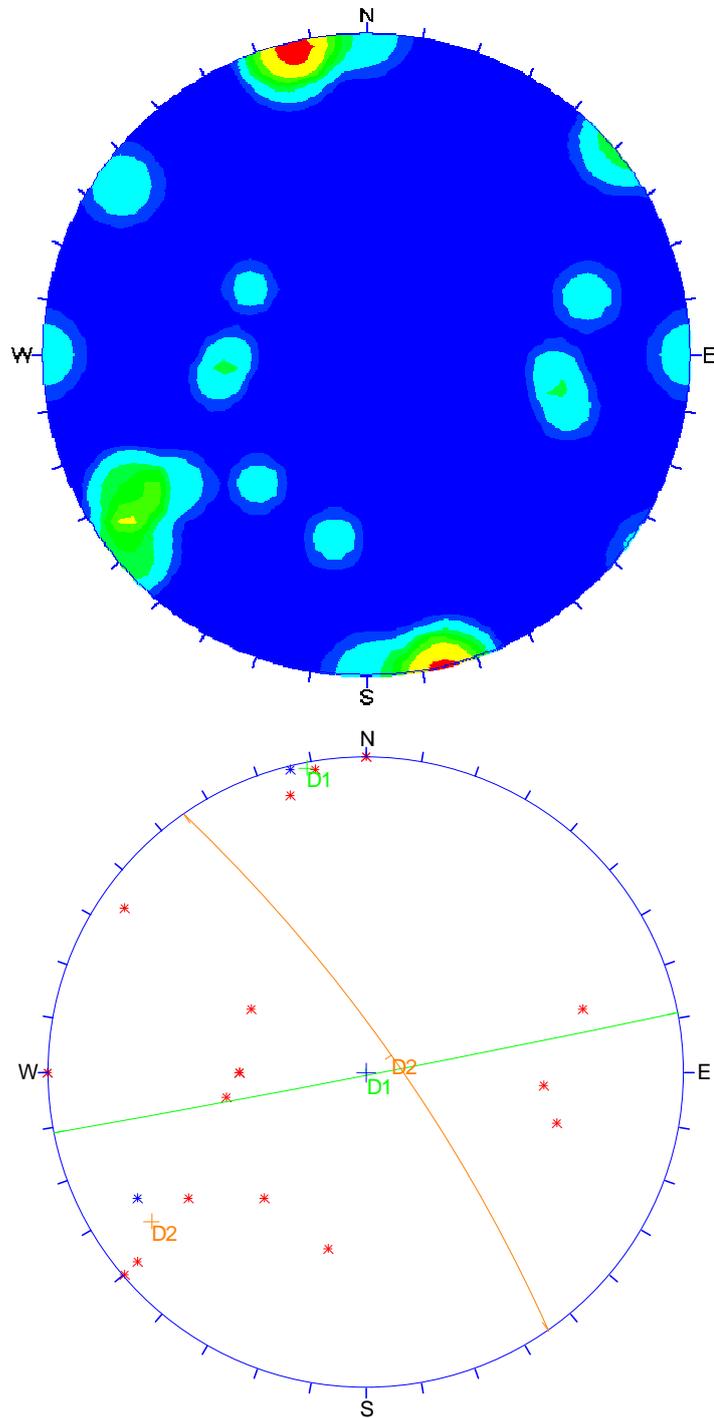


Figura #46. Diagramas que muestran las diaclasas dominante en el Sector #1 (S1) del Túnel Caucagüita, Dos familias, **D1: N 79° E 89° S**, **D2: N 35° O 79°N**, junto al diagrama de concentración de los polos de dichos planos (* Dos Polos).

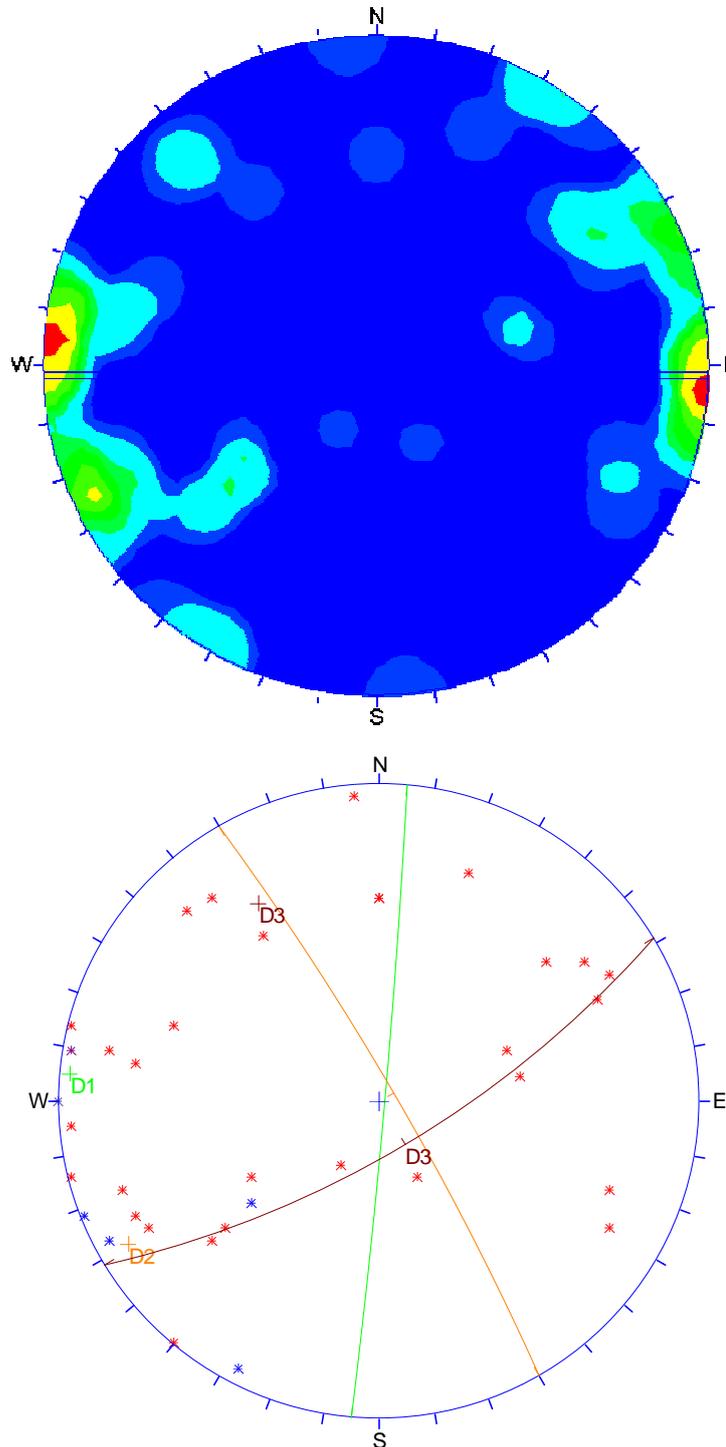


Figura #47. Diagramas que muestran las diaclasas dominante en el Sector #2 (S2) del Túnel Caucagüita, Tres familias, **D1: N 5° E 88° S**, **D2: N 30° O 84 N**, **D3: N 59° E 72° S**, junto al diagrama de concentración de los polos de dichos planos (* Dos, * Tres, * Cuatro Polos).

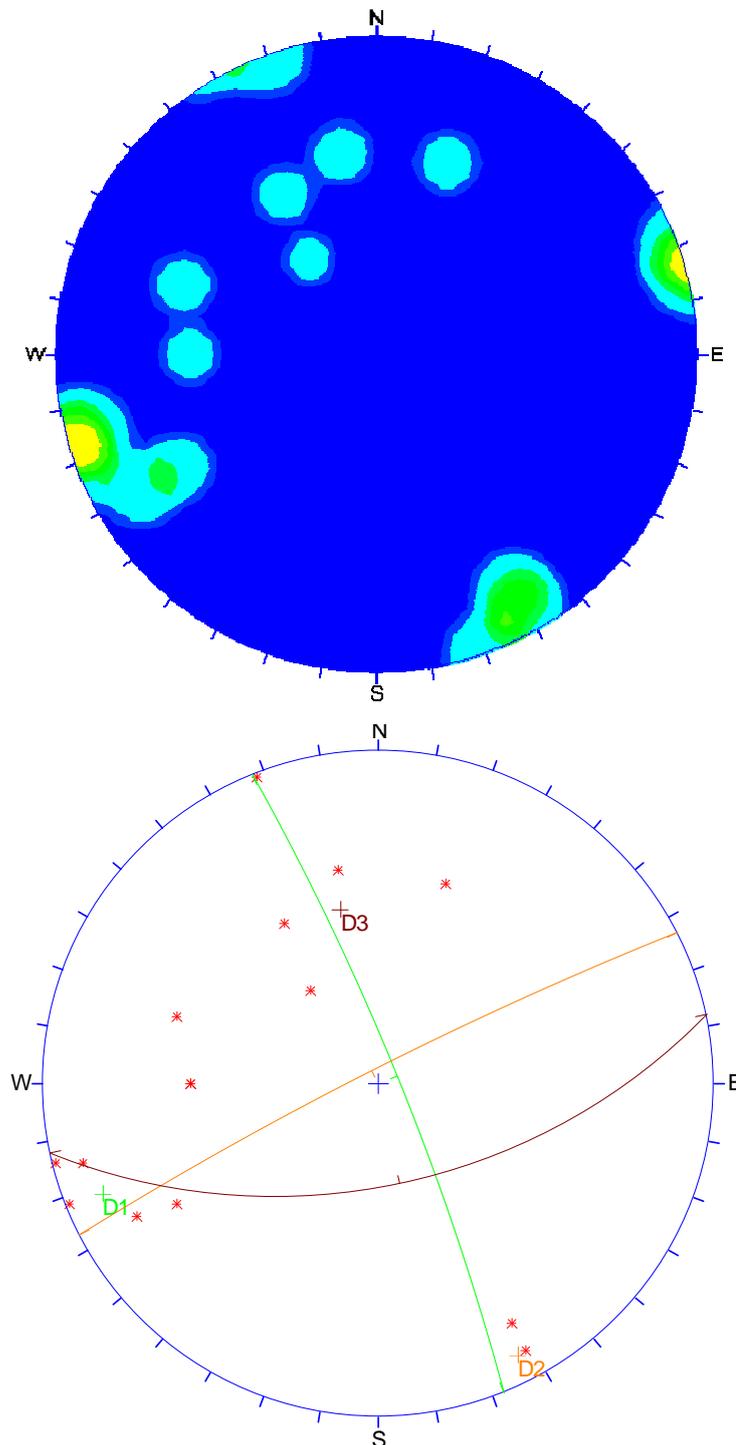


Figura #48. Diagramas que muestran las diaclasas dominante en el Sector #3 (S3) del Túnel Caucagüita, Tres familias, **D1: N 22° O 83° N**, **D2: N 63° E 85 N**, **D3: N 78° E 56° S**, junto al diagrama de concentración de los polos de dichos planos.

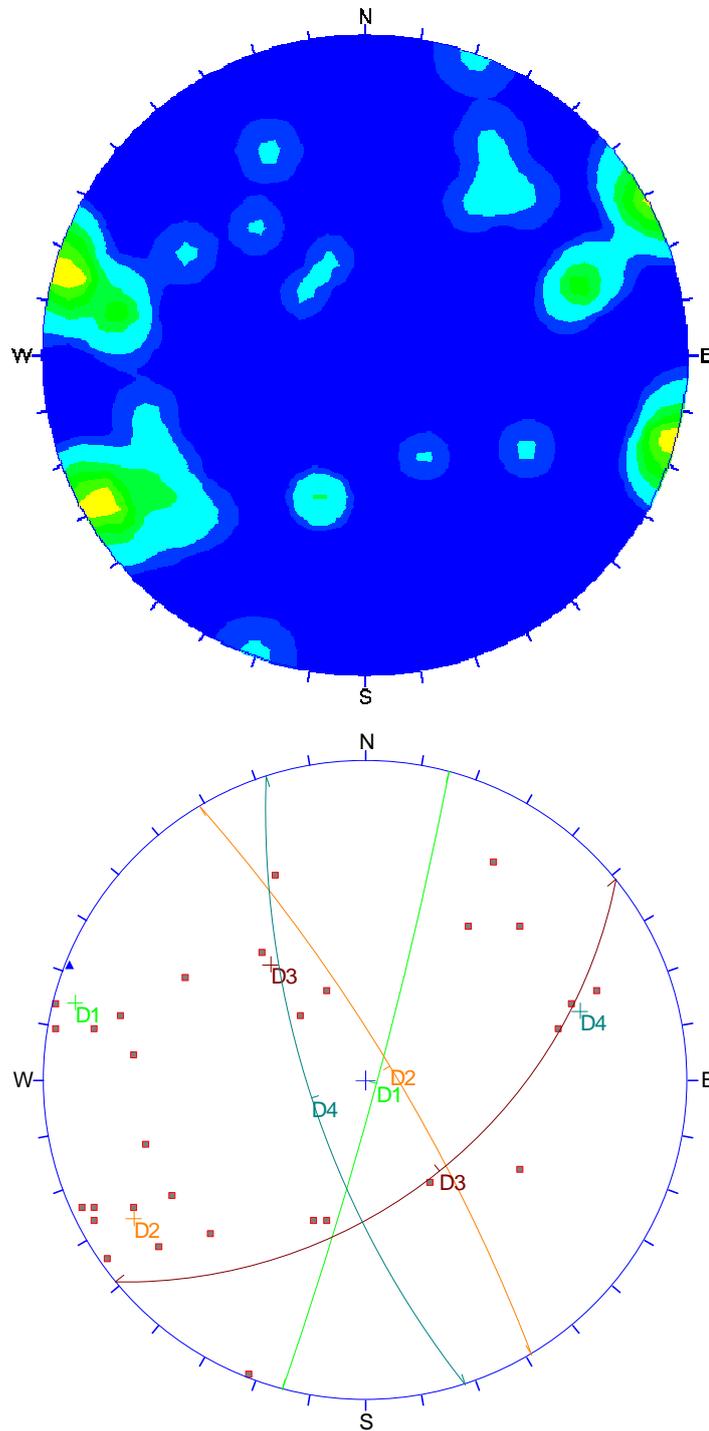


Figura #49. Diagramas que muestran las diaclasas dominante en el Sector #2 (S2) del Túnel Mampote, Cuatro familias, **D1: N 15° E 86° S**, **D2: N 31° O 80 N**, **D3: N 51° E 50° S**, **D4: N 18° O 70° S** junto al diagrama de concentración de los polos de dichos planos.



Figura #50. Evidencia de la foliación en la quebrada QMB, perteneciente al sector #2 (S2) del túnel Mampote.



Figura #51. Evidencia del diaclasado en la sección CDN-002, perteneciente al sector #2 (S2) del túnel Mampote.

✦ *Estabilidad de la excavación*

En esta sección se muestran las posibles cuñas que se generarían durante la excavación de los diferentes túneles en cada una de sus secciones. Para esto se utilizó el programa de computación **UNWEDGE VERSION: 3.005**, el cual emplea como datos de entrada la orientación de las discontinuidades en el macizo rocoso, al igual que la dirección de foliación, y la orientación del eje del túnel para generar a través de la intersección de estos planos las posible cuñas dentro de la excavación. A continuación la información respectiva de cada sector:

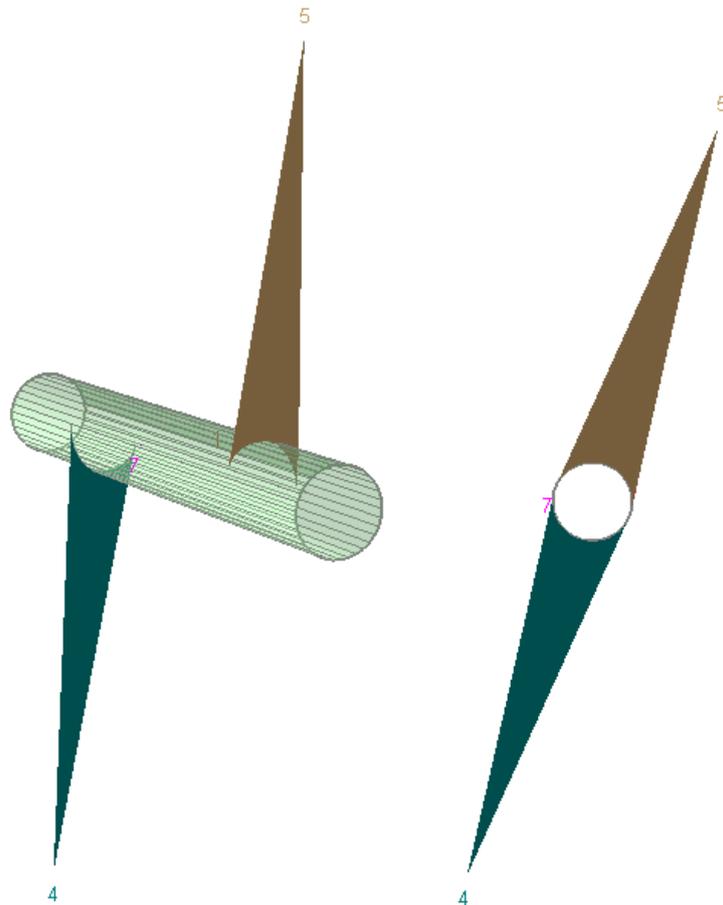


Figura #52. Vista desde el Nor – Oeste en perspectiva (Izquierda) y frontal aproximadamente Oeste - Este (Derecha) de las posibles cuñas que se generarían en el túnel La Encantada.

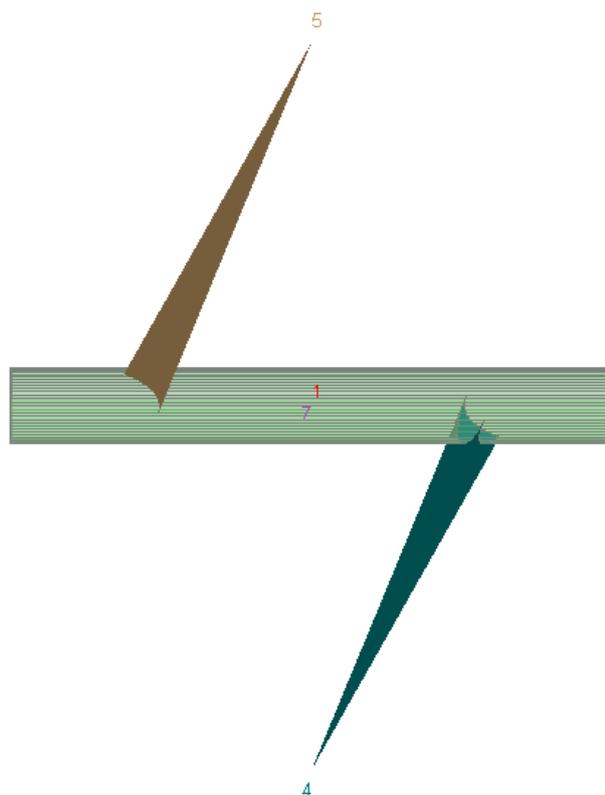


Figura #53. Vista desde el Sur de las posibles cuñas que se generarían en el túnel La Encantada.

Tabla #22. Datos de las respectivas cuñas en el túnel La Encantada.

| CUÑA # | FACTOR DE SEGURIDAD | PESO (Ton) |
|-----------|---------------------|------------|
| 5 (Techo) | 7,197 | 361,8 |
| 4 (Piso) | Muy Estable | 361,2 |
| 1, 7 | Muy Estable | |

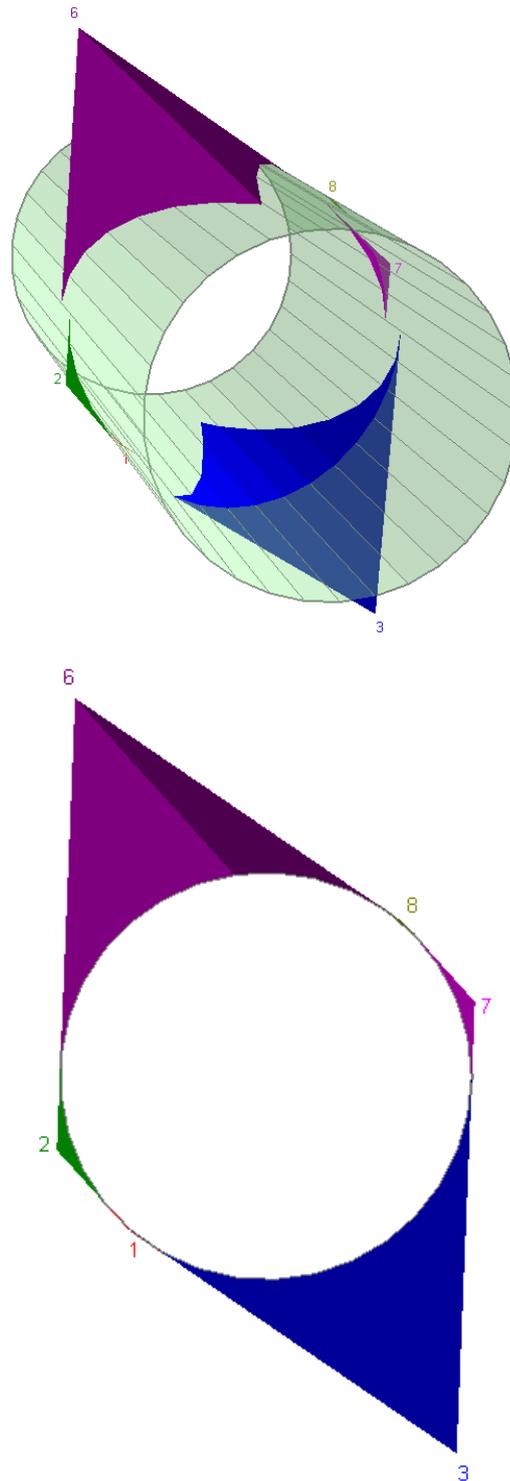


Figura #54. Vista desde el Nor – Oeste en perspectiva (arriba) y frontal aproximadamente Oeste – Este (abajo) de las posibles cuñas que se generarían en el sector #1 (S1) del túnel Caucaçuiita.

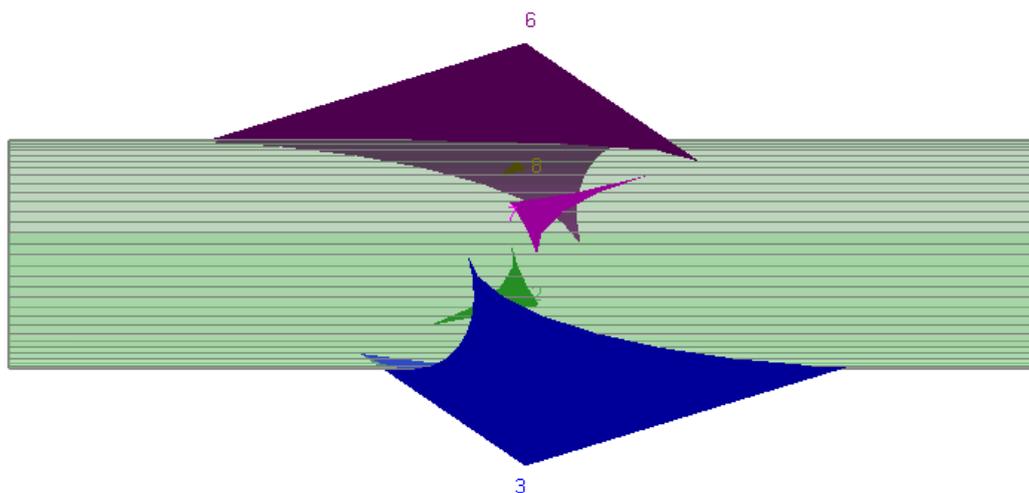


Figura #55. Vista desde el Sur de las posibles cuñas que se generarían en el sector #1 (S1) del túnel Caucagüita.

Tabla #23. Datos de las respectivas cuñas en el sector #1 (S1) del túnel Caucagüita.

| CUÑA # | FACTOR DE SEGURIDAD | PESO (Ton) |
|-------------------|---------------------|------------|
| 6 (Techo) | 2,562 | 102,8 |
| 7 (Techo Derecho) | 6,034 | 0,447 |
| 8 (Techo Derecho) | 0 | 0,007 |
| 1, 2, 3 | Muy Estable | |

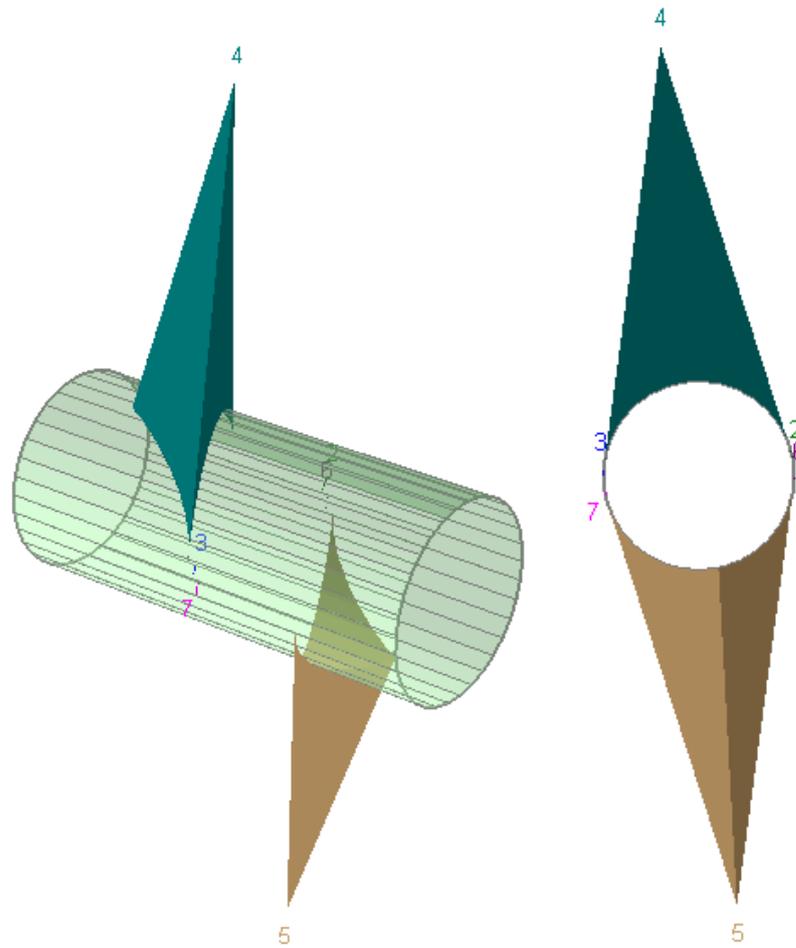


Figura #56. Vista desde el Norte en perspectiva (Izquierda) y frontal desde el Nor – Oeste (derecha) de las posibles cuñas que se generarían en el sector #2 (S2) del túnel Caucağıiita.

Tabla #24. Datos de las respectivas cuñas en el sector #2 (S2) del túnel Caucağıiita.

| CUÑA # | FACTOR DE SEGURIDAD | PESO (Ton) |
|------------|---------------------|------------|
| 4 (Techo) | 3,792 | 117,4 |
| 5 (Piso) | Muy Estable | 117,8 |
| 2, 3, 6, 7 | Muy Estable | |

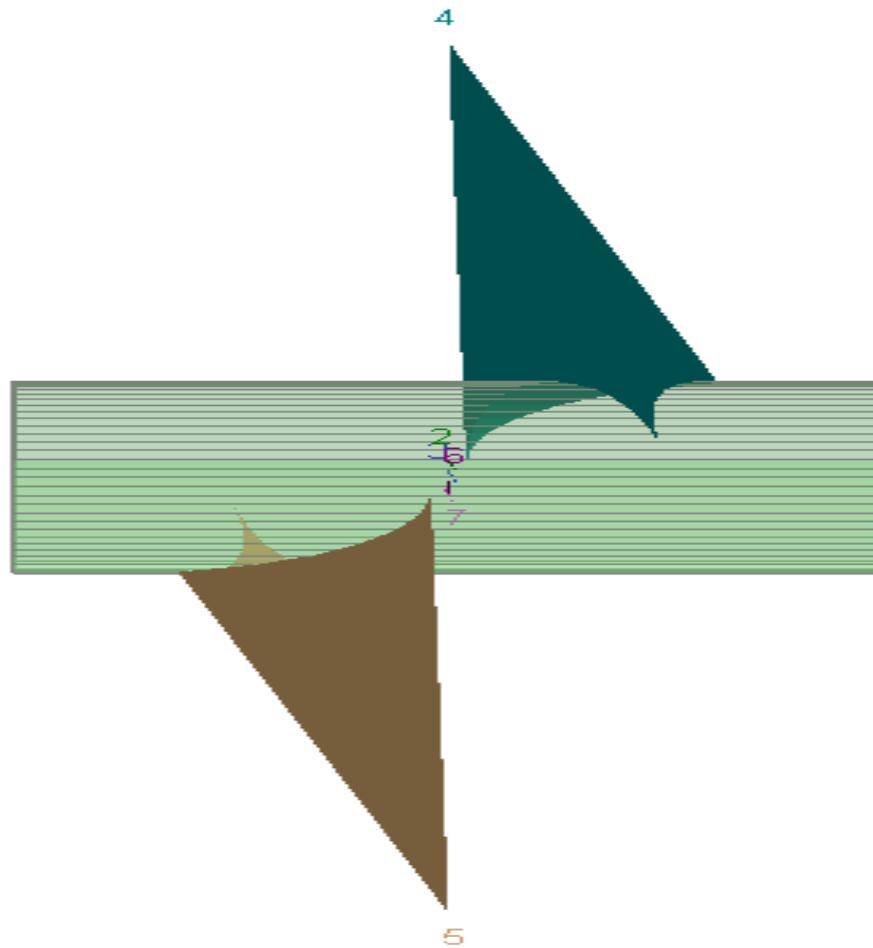


Figura #57. Vista desde el Sur - Oeste de las posibles cuñas que se generarían en el sector #2 (S2) del túnel Caucaçüita.

Tabla #25. Datos de las respectivas cuñas en el sector #3 (S3) del túnel Caucaçüita.

| CUÑA # | FACTOR DE SEGURIDAD | PESO (Ton) |
|---------------|---------------------|------------|
| 8 (Techo) | 0 | 55,49 |
| 1, 3, 4, 5, 6 | Muy Estable | |

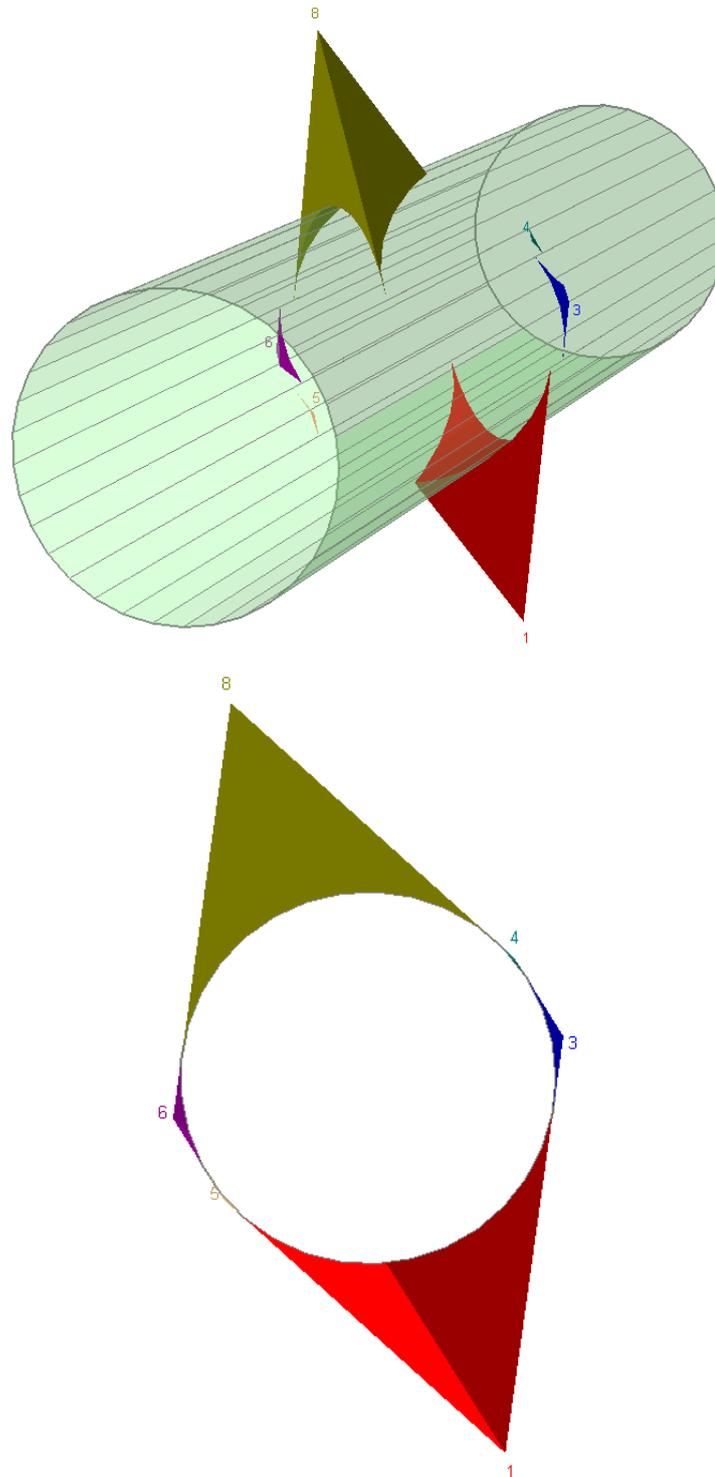


Figura #58. Vista desde el Sur – Oeste en perspectiva (arriba) y frontal Oeste – Este (abajo) de las posibles cuñas que se generarían en el sector #3 (S3) del túnel Caucajiüta.

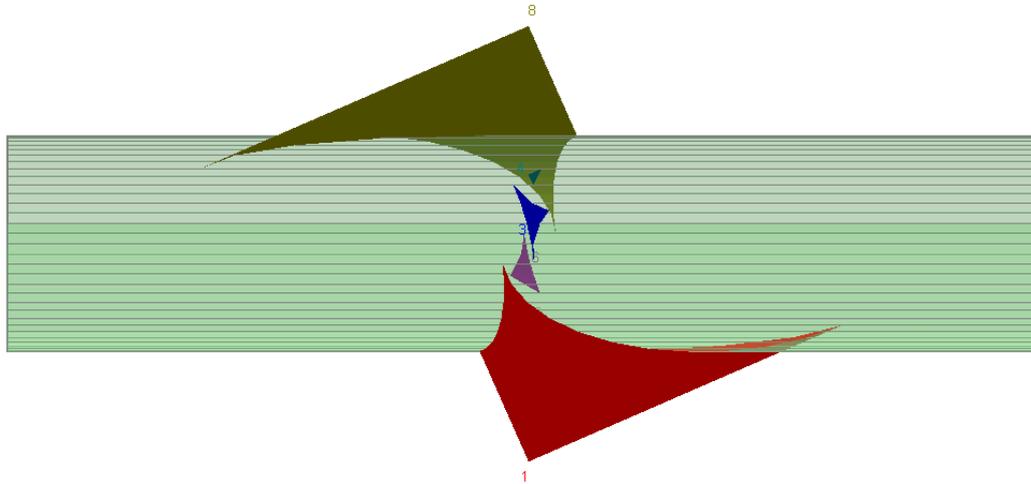


Figura #59. Vista desde el Sur de las posibles cuñas que se generarían en el sector #3 (S3) del túnel Caucaçüita.

Tabla #26. Datos de las respectivas cuñas en el sector #2 (S2) del túnel Mampote.

| CUÑA # | FACTOR DE SEGURIDAD | PESO (Ton) |
|---------------|---------------------|------------|
| 8 (Techo) | 0 | 11,28 |
| 1, 3, 4, 5, 6 | Muy Estable | |

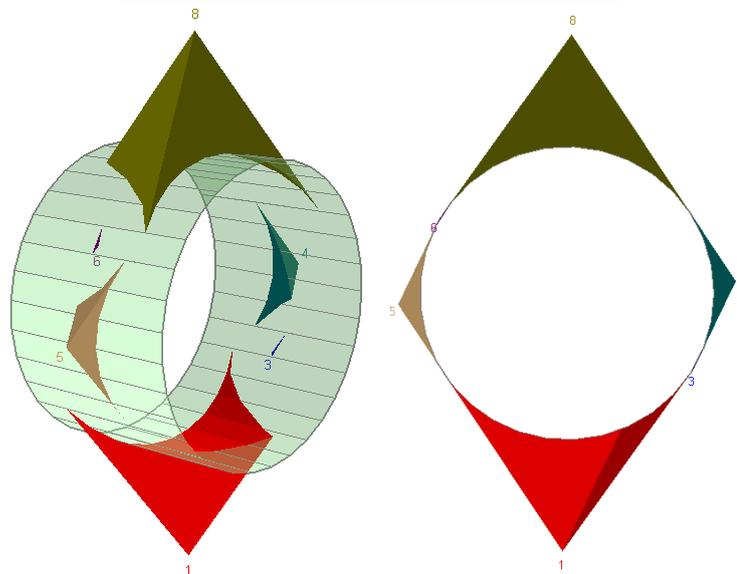


Figura #60. Vista desde el Nor - Oeste en perspectiva (Izquierda) y frontal desde el Sur – Oeste (derecha) de las posibles cuñas que se generarían en el sector #2 (S2) del túnel Mampote.

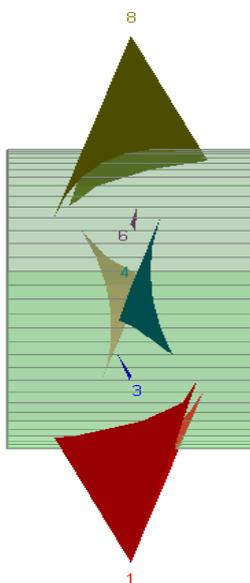


Figura #61. Vista desde el Sur – Este de las posibles cuñas que se generarían en el sector #2 (S2) del túnel Mampote.

Geomecánica

Los ensayos correspondientes a las muestras recolectadas se presentan a continuación:

Tabla#27. Densidad y absorción.

| MUESTRA | PESO ESPECIFICO | ABSORCION (%) | PESO UNITARIO (Ton/m ³) |
|---------------|-----------------|---------------|-------------------------------------|
| QEZ - 001 | 2,59 | 0,71 | 2,57 |
| QHE - 001 | 2,49 | 1,42 | 2,46 |
| MI - 004 | 2,74 | 0,55 | 2,73 |
| QMA - 003 - B | 2,49 | 1,13 | 2,46 |
| QMB - 001 | 2,48 | 1,07 | 2,45 |
| BA - 001 | 2,50 | 1,21 | 2,47 |
| QG - 002 | 2,52 | 1,79 | 2,48 |
| QHE - 002 - A | 2,59 | 1,37 | 2,55 |
| QDY - 001 | 2,44 | 2,04 | 2,39 |
| QDCR - 002 | 3,07 | 3,52 | 2,97 |
| CPL - 002 | 2,54 | 0,68 | 2,52 |
| PL - 001 | 2,27 | 3,56 | 2,19 |
| MAGA | 2,45 | 1,26 | 2,42 |
| QHE - 004 | 2,63 | 1,20 | 2,60 |
| QVN - 001 | 2,55 | 1,72 | 2,51 |
| QVN - 002 | 2,52 | 1,48 | 2,49 |
| ENC - 005 - B | 2,50 | 2,30 | 2,44 |
| NP - 001 | 2,55 | 1,73 | 2,50 |
| QMB - 003 | 2,56 | 0,81 | 2,54 |
| QVN - 002 - A | 2,59 | 1,09 | 2,56 |
| QG - 002 - A | 2,47 | 1,61 | 2,43 |

Tabla #28. Resultados del ensayo de carga puntual y cálculo de la resistencia a la compresión simple.

| Muestra | De(mm2) | Carga Neta (kN) | Factor de Corrección | Is (50) | C | Resistencia a la Compresión (Kg/cm ²) | Promedio (MPa) | Dirección de Aplicación de la carga | Túnel |
|-----------|------------|-----------------|----------------------|---------|----|---|----------------|--|--------------|
| NP-001 | 331559,00 | 1,80 | 47,04 | 0,26 | 23 | 59,92 | 8,67 | Paralela a la dirección de la foliación | LA ENCANTADA |
| NP-001 | 248736,51 | 3,00 | 41,34 | 0,50 | 23 | 116,96 | | Perpendicular a la dirección de la foliación | |
| MI-004 | 1004388,18 | 6,60 | 77,47 | 0,51 | 23 | 119,42 | 18,60 | Perpendicular a la dirección de la foliación | |
| MI-004 | 297359,86 | 6,60 | 49,94 | 1,11 | 23 | 260,03 | | Perpendicular a la dirección de la foliación | |
| QVN-001 | 934690,79 | 8,80 | 75,00 | 0,71 | 23 | 165,65 | 16,24 | Perpendicular a la dirección de la foliación | |
| ENC-005-B | 576795,22 | 5,10 | 60,36 | 0,53 | 23 | 125,20 | 15,71 | Paralela a la dirección de la foliación | |
| ENC-005-B | 692750,42 | 8,80 | 65,54 | 0,83 | 23 | 195,32 | | Perpendicular a la dirección de la foliación | |
| MAGA | 301147,60 | 0,30 | 45,05 | 0,04 | 23 | 10,53 | 7,65 | Paralela a la dirección de la foliación | CAUCAGÜITA |
| MAGA | 269032,25 | 3,90 | 42,82 | 0,62 | 23 | 145,63 | | Perpendicular a la dirección de la foliación | |
| PL-001 | 224005,57 | 1,80 | 39,43 | 0,32 | 23 | 74,34 | 8,25 | Perpendicular a la dirección de la foliación | |
| PL-001 | 347450,80 | 2,60 | 53,56 | 0,40 | 23 | 94,03 | | Perpendicular a la dirección de la foliación | |
| CPL-002 | 234245,80 | 3,60 | 44,86 | 0,69 | 23 | 161,72 | 14,46 | Perpendicular a la dirección de la foliación | |
| CPL-002 | 273172,68 | 3,60 | 43,12 | 0,57 | 23 | 133,30 | | Perpendicular a la dirección de la foliación | |
| QDCR-001 | 382208,69 | 2,70 | 55,91 | 0,39 | 23 | 92,66 | 8,56 | Perpendicular a la dirección de la foliación | |
| QDCR-001 | 351174,18 | 3,00 | 53,82 | 0,46 | 23 | 107,86 | | Perpendicular a la dirección de la foliación | |
| QDCR-002 | 619428,40 | 2,60 | 62,32 | 0,26 | 23 | 61,37 | 8,23 | Perpendicular a la dirección de la foliación | |
| QDY-001 | 541182,46 | 3,30 | 58,65 | 0,36 | 23 | 83,90 | | Perpendicular a la dirección de la foliación | |
| QHE-001 | 287783,76 | 9,30 | 44,14 | 1,43 | 23 | 334,64 | 28,38 | Perpendicular a la dirección de la foliación | |
| QHE-001 | 271276,42 | 9,30 | 47,92 | 1,64 | 23 | 385,39 | | Perpendicular a la dirección de la foliación | |
| QHE-004 | 304577,30 | 8,40 | 45,28 | 1,25 | 23 | 292,97 | | Perpendicular a la dirección de la foliación | |
| QHE-002-A | 398355,91 | 7,80 | 56,96 | 1,12 | 23 | 261,66 | | Perpendicular a la dirección de la foliación | |
| QHE-002-A | 478283,10 | 5,70 | 61,85 | 0,74 | 23 | 172,92 | 34,00 | Perpendicular a la dirección de la foliación | MAMPOTE |
| BA-001 | 319004,47 | 10,20 | 46,23 | 1,48 | 23 | 346,81 | | Perpendicular a la dirección de la foliación | |
| QEZ-001 | 1024319,68 | 23,40 | 78,15 | 1,79 | 23 | 418,85 | 31,05 | Perpendicular a la dirección de la foliación | |
| QEZ-001 | 201459,88 | 10,71 | 41,91 | 2,23 | 23 | 522,73 | | Perpendicular a la dirección de la foliación | |
| QMB-001 | 927508,02 | 8,80 | 74,74 | 0,71 | 23 | 166,36 | 31,05 | Perpendicular a la dirección de la foliación | |
| QMB-003 | 316741,26 | 2,40 | 51,38 | 0,39 | 23 | 91,33 | | Perpendicular a la dirección de la foliación | |
| QMB-003 | 573490,27 | 15,60 | 60,20 | 1,64 | 23 | 384,16 | 28,75 | Perpendicular a la dirección de la foliación | |
| QMA-003-A | 169716,89 | 7,80 | 38,80 | 1,78 | 23 | 418,35 | | Perpendicular a la dirección de la foliación | |
| QMA-003-B | 554237,05 | 6,70 | 59,28 | 0,72 | 23 | 168,12 | 20,85 | Perpendicular a la dirección de la foliación | |
| QG-002 | 373191,02 | 0,60 | 49,62 | 0,08 | 23 | 18,71 | | Perpendicular a la dirección de la foliación | |
| QG-002 | 310314,94 | 6,90 | 45,66 | 1,02 | 23 | 238,20 | 20,85 | Perpendicular a la dirección de la foliación | |
| QG-002 | 651898,43 | 16,60 | 63,77 | 1,62 | 23 | 380,97 | | Perpendicular a la dirección de la foliación | |

Los resultados arrojados por el ensayo de carga puntual se utilizaron para calcular la resistencia a la compresión simple de la roca intacta, los cuales se expresan en Kg/m² pero con motivo de la clasificación RMi y el cálculo de los parámetros geomecánicos de Hoek se empleó el promedio de los valores de muestras en zonas adyacentes utilizando como unidad el MPa.

En la siguiente tabla se aprecian los valores del Rock Quality Designation (RQD), calculado en función del espaciamiento de las familias de diaclasas que afectaron al macizo:

Tabla #29. Valores estimados de RQD para el macizo correspondiente al túnel La Encantada

| TUNEL: LA ENCANTADA LOCALIDAD | COORDENADAS | | PLANILLA | INVERSO DEL ESPACIADO | | | | Jv | RQD (%) |
|----------------------------------|-------------|---------|-----------|-----------------------|----|----|----|----|---------|
| | NORTE | ESTE | | F1 | F2 | F3 | F4 | | |
| Quebrada Encantada | 1.160.905 | 747.095 | ENC - 005 | 20 | 0 | 0 | 0 | 20 | 49 |
| Quebrada Valencia | 1.160.589 | 746.623 | MI - 001 | 20 | 0 | 0 | 0 | 20 | 49 |
| Quebrada Valencia | 1.160.593 | 746.465 | MI - 002 | 15 | 0 | 0 | 0 | 15 | 66 |
| Quebrada Valencia | 1.160.589 | 746.441 | MI - 003 | 8 | 6 | 0 | 0 | 14 | 69 |
| Quebrada Valencia | 1.160.597 | 746.415 | MI - 004 | 25 | 25 | 0 | 0 | 50 | 10 |
| Quebrada Valencia | 1.160.584 | 746.433 | MAI - 004 | 10 | 5 | 0 | 0 | 15 | 66 |
| Quebrada Valencia | 1.160.622 | 746.281 | MAI - 005 | 20 | 4 | 0 | 0 | 24 | 36 |
| Quebrada Valencia | 1.160.547 | 746.630 | QVN - 001 | 20 | 15 | 15 | 0 | 50 | 10 |
| Quebrada Valencia | 1.160.515 | 746.820 | QVN - 002 | 15 | 20 | 0 | 0 | 35 | 10 |
| Quebrada Contraloría | 1.160.710 | 746.068 | CTR - 001 | 5 | 0 | 0 | 0 | 5 | 99 |
| Quebrada Contraloría | 1.160.740 | 746.043 | CTR - 002 | 5 | 6 | 0 | 0 | 11 | 79 |
| Quebrada Contraloría | 1.160.784 | 746.035 | CTR - 003 | 6 | 6 | 0 | 0 | 12 | 75 |

Tabla #30. Valores estimados de RQD para el macizo correspondiente al túnel de Mampote .

| TUNEL: MAMAPOTE LOCALIDAD | COORDENADAS | | PLANILLA | INVERSO DEL ESPACIADO | | | | Jv | RQD (%) |
|------------------------------------|-------------|---------|-----------|-----------------------|----|----|----|----|---------|
| | NORTE | ESTE | | F1 | F2 | F3 | F4 | | |
| Quebrada Ultima | 1.158.440 | 756.420 | QG - 001 | 20 | 1 | 0 | 0 | 21 | 46 |
| Quebrada Ultima | 1.158.503 | 756.455 | QG - 002 | 7 | 0 | 0 | 0 | 7 | 92 |
| Barrio Divino Niño | 1.158.389 | 756.310 | DN - 001 | 10 | 5 | 0 | 0 | 15 | 66 |
| Barrio Divino Niño | 1.158.392 | 756.368 | DN - 002 | 10 | 0 | 0 | 0 | 10 | 82 |
| Barrio Divino Niño | 1.158.324 | 756.376 | DN - 003 | 7 | 0 | 0 | 0 | 7 | 92 |
| Barrio Divino Niño | 1.158.381 | 756.114 | DN - 004 | 10 | 5 | 0 | 0 | 15 | 66 |
| Barrio Divino Niño | 1.158.383 | 756.120 | DN - 005 | 13 | 7 | 0 | 0 | 20 | 49 |
| Barrio Divino Niño | 1.158.321 | 756.148 | DN - 006 | 8 | 0 | 0 | 0 | 8 | 89 |
| Barrio Divino Niño | 1.158.296 | 756.153 | DN - 007 | 12 | 4 | 0 | 0 | 16 | 62 |
| Barrio Divino Niño | 1.158.371 | 756.118 | DN - 008 | 10 | 6 | 0 | 0 | 16 | 62 |
| Quebrada MA (QMA) | 1.158.580 | 755.995 | QMA - 001 | 7 | 3 | 0 | 0 | 10 | 82 |
| Quebrada MA (QMA) | 1.158.550 | 756.005 | QMA - 002 | 8 | 8 | 0 | 0 | 16 | 62 |
| Quebrada MA (QMA) | 1.158.500 | 756.000 | QMA - 003 | 12 | 20 | 0 | 0 | 32 | 10 |
| Quebrada MA (QMA) | 1.158.412 | 756.017 | QMA - 004 | 1 | 5 | 0 | 0 | 6 | 95 |
| Quebrada MB (QMB) | 1.158.440 | 755.890 | QMB - 001 | 6 | 20 | 0 | 0 | 26 | 29 |
| Quebrada MB (QMB) | 1.158.460 | 755.890 | QMB - 002 | 10 | 0 | 0 | 0 | 10 | 82 |
| Quebrada MB (QMB) | 1.158.500 | 755.890 | QMB - 003 | 7 | 5 | 0 | 0 | 12 | 75 |
| Quebrada Ezequiel Zamora (QEZ) | 1.158.520 | 755.563 | QEZ - 001 | 4 | 1 | 2 | 0 | 7 | 92 |
| Quebrada Ezequiel Zamora (QEZ) | 1.158.564 | 755.596 | QEZ - 002 | 8 | 1 | 0 | 0 | 9 | 85 |
| Quebrada Ezequiel Zamora (QEZ) | 1.158.743 | 755.540 | QEZ - 003 | 8 | 20 | 0 | 0 | 28 | 23 |
| Quebrada Ezequiel Zamora (QEZ) | 1.158.725 | 755.460 | QEZ - 004 | 8 | 1 | 0 | 0 | 9 | 85 |
| Carretera Barrio Divino Niño (CDN) | 1.158.534 | 755.922 | CDN - 001 | 6 | 6 | 1 | 0 | 13 | 72 |
| Carretera Barrio Divino Niño (CDN) | 1.158.550 | 755.932 | CDN - 002 | 12 | 4 | 1 | 0 | 17 | 59 |
| PORTAL ENTRADA (BA) | 1.158.870 | 755.090 | BA - 001 | 40 | 0 | 0 | 0 | 40 | 10 |

Tabla #31. Valores estimados de RQD para el macizo correspondiente al túnel Caucağıta.

| TUNEL: CAUCAGÜITA LOCALIDAD | COORDENADAS | | PLANILLA | INVERSO DEL ESPACIADO | | | | Jv | RQD (%) |
|--------------------------------|-------------|---------|--------------|-----------------------|----|----|----|----|---------|
| | NORTE | ESTE | | F1 | F2 | F3 | F4 | | |
| Quebrada Helipuerto (QHE) | 1.159.581 | 750.556 | QHE - 001 | 15 | 10 | 0 | 0 | 25 | 33 |
| Quebrada Helipuerto (QHE) | 1.159.550 | 750.561 | QHE - 002 | 5 | 1 | 0 | 0 | 6 | 95 |
| Quebrada Helipuerto (QHE) | 1.159.511 | 750.574 | QHE - 003 | 8 | 10 | 0 | 0 | 18 | 56 |
| Quebrada Helipuerto (QHE) | 1.159.451 | 750.614 | QHE - 004 | 5 | 6 | 0 | 0 | 11 | 79 |
| Quebrada Guarenas (Qda.Guar) | 1.159.550 | 749.840 | Qda.Guar - 1 | 10 | 8 | 0 | 0 | 18 | 56 |
| Quebrada Guarenas (Qda.Guar) | 1.159.520 | 749.840 | Qda.Guar - 2 | 10 | 0 | 0 | 0 | 10 | 82 |
| Quebrada Guarenas (Qda.Guar) | 1.159.480 | 749.840 | Qda.Guar - 3 | 15 | 8 | 0 | 0 | 23 | 39 |
| Camino El Aguacatico (AG) | 1.159.872 | 749.183 | AG - 018 | 10 | 6 | 4 | 0 | 20 | 49 |
| Camino El Aguacatico (AG) | 1.159.839 | 749.135 | AG - 017 | 6 | 10 | 0 | 0 | 16 | 62 |
| Camino El Aguacatico (AG) | 1.159.826 | 749.110 | AG - 016 | 10 | 8 | 0 | 0 | 18 | 56 |
| Camino El Aguacatico (AG) | 1.159.812 | 749.082 | AG - 015 | 4 | 1 | 0 | 0 | 5 | 99 |
| Camino El Aguacatico (AG) | 1.159.779 | 748.982 | AG - 014 | 10 | 8 | 0 | 0 | 18 | 56 |
| Camino El Aguacatico (AG) | 1.159.871 | 748.919 | AG - 022 | 10 | 15 | 0 | 0 | 25 | 33 |
| Camino El Aguacatico (AG) | 1.159.886 | 748.933 | AG - 023 | 20 | 20 | 10 | 1 | 51 | 10 |
| Camino El Aguacatico (AG) | 1.159.900 | 748.948 | AG - 024 | 25 | 8 | 0 | 0 | 33 | 10 |
| Camino El Aguacatico (AG) | 1.159.854 | 748.916 | AG - 021 | 3 | 0 | 0 | 0 | 3 | 100 |
| Camino El Aguacatico (AG) | 1.159.816 | 748.901 | AG - 008 | 12 | 12 | 0 | 0 | 24 | 36 |
| Camino El Aguacatico (AG) | 1.159.802 | 748.885 | AG - 009 | 10 | 0 | 0 | 0 | 10 | 82 |
| Camino El Aguacatico (AG) | 1.159.787 | 748.871 | AG - 010 | 10 | 10 | 0 | 0 | 20 | 49 |
| Barrio El Aguacate | 1.159.885 | 748.848 | QDY - 001 | 7 | 0 | 0 | 0 | 7 | 92 |
| Barrio El Aguacate | 1.159.980 | 748.608 | QDCR - 1 | 10 | 10 | 0 | 0 | 20 | 49 |
| Barrio El Aguacate | 1.160.018 | 748.651 | QDCR - 2 | 10 | 0 | 0 | 0 | 10 | 82 |
| Camino El Placer | 1.160.334 | 748.336 | CPL - 001 | 25 | 0 | 0 | 0 | 25 | 33 |
| Camino El Placer | 1.160.316 | 748.329 | CPL - 002 | 8 | 15 | 0 | 0 | 23 | 39 |
| Camino El Placer | 1.160.296 | 748.325 | CPL - 003 | 15 | 0 | 0 | 0 | 15 | 66 |
| Camino El Placer | 1.160.280 | 748.327 | CPL - 004 | 10 | 0 | 0 | 0 | 10 | 82 |
| Camino El Placer | 1.160.192 | 748.316 | CPL - 005 | 10 | 0 | 0 | 0 | 10 | 82 |
| Camino El Placer | 1.160.135 | 748.327 | CPL - 006 | 30 | 0 | 0 | 0 | 30 | 16 |
| Quebrada El Placer | 1.160.382 | 748.126 | PL - 001 | 30 | 20 | 0 | 0 | 50 | 10 |
| Quebrada El Placer | 1.160.399 | 748.130 | PL - 002 | 30 | 25 | 0 | 0 | 55 | 10 |
| Quebrada El Placer | 1.160.433 | 748.128 | PL - 003 | 17 | 15 | 0 | 0 | 32 | 10 |
| Quebrada El Placer | 1.160.452 | 748.122 | PL - 004 | 8 | 15 | 0 | 0 | 23 | 39 |
| Cerrajería Portuguesa | 1.160.365 | 747.872 | CER - 008 | 15 | 3 | 0 | 0 | 18 | 56 |
| Cerrajería Portuguesa | 1.160.442 | 747.769 | CER - 007 | 20 | 6 | 0 | 0 | 26 | 29 |
| Cerrajería Portuguesa | 1.160.550 | 747.598 | CER - 006 | 5 | 0 | 0 | 0 | 5 | 99 |
| Cerrajería Portuguesa | 1.160.549 | 747.571 | CER - 005 | 8 | 10 | 0 | 0 | 18 | 56 |
| Cerrajería Portuguesa | 1.160.555 | 747.549 | CER - 004 | 10 | 1 | 0 | 0 | 11 | 79 |
| Cerrajería Portuguesa | 1.160.563 | 747.391 | CER - 003 | 10 | 2 | 0 | 0 | 12 | 75 |
| Cerrajería Portuguesa | 1.160.558 | 747.368 | CER - 001 | 10 | 5 | 0 | 0 | 15 | 66 |
| EMPRESA MAGA | 1.160.555 | 747.289 | MAGA - 002 | 15 | 6 | 0 | 0 | 21 | 46 |
| EMPRESA MAGA | 1.160.555 | 747.267 | MAGA - 001 | 3 | 8 | 15 | 0 | 26 | 29 |

Luego se clasificó el macizo rocoso según la metodología expuesta en el Capítulo II, estas se muestran en las siguientes tablas:

Tabla #32. Caracterización del macizo en base a la clasificación (Q) de Barton.

| TÚNEL | PROGRESIVA (RANGO) | RQD | Jn | Jr | Ja | Jw | SRF | Q | PROBABILIDAD (%) | COEF. VARIACIÓN | CLASE DE ROCA |
|-----------------|--------------------|------|-------|------|------|------|-------------|-------------|------------------|-----------------|---------------------------|
| LA ENCANTADA | 5+778 - 5+930 | 82 | 3,00 | 1,25 | 6,00 | 0,84 | 1,75 | 3,38 | 60 | 0,41 | D (MALA) |
| | 5+930 - 6+270 | 30 | 3,00 | 1,25 | 5,00 | 0,66 | 7,50 | 0,30 | 70 | 0,66 | E (MUY MALA) |
| | 6+270 - 6+540 | 47 | 3,00 | 1,25 | 2,50 | 0,58 | 1,75 | 2,87 | 60 | 0,34 | D (MALA) |
| | 6+540 - 6+708 | 47 | 3,00 | 1,25 | 2,00 | 0,58 | 1,75 | 3,73 | 60 | 0,40 | D (MALA) |
| CAUCAGÜITA | 7+340 - 7+900 | 60 | 5,00 | 1,25 | 5,00 | 0,58 | 1,75 | 1,38 | 70 | 0,71 | D (MALA) |
| | 7+900 - 7+930 | 30 | 3,50 | 1,25 | 5,00 | 0,58 | 7,50 | 0,17 | 60 | 0,44 | E (MUY MALA) |
| | 7+930 - 8+220 | 48 | 3,00 | 1,25 | 5,00 | 0,80 | 1,75 | 2,55 | 70 | 0,66 | D (MALA) |
| | 8+220 - 8+250 | 70 | 3,00 | 1,25 | 2,00 | 0,58 | 7,50 | 1,26 | 60 | 0,38 | D (MALA) |
| | 8+250 - 8+420 | 45 | 3,00 | 1,25 | 6,00 | 0,58 | 1,75 | 1,29 | 60 | 0,50 | D (MALA) |
| | 8+420 - 8+440 | 70 | 3,00 | 1,25 | 1,50 | 0,58 | 7,50 | 1,39 | 60 | 0,38 | D (MALA) |
| | 8+440 - 8+750 | 70 | 3,00 | 1,25 | 2,50 | 0,58 | 1,75 | 4,29 | 60 | 0,46 | C (MEDIA) |
| | 8+750 - 8+780 | 70 | 3,00 | 1,25 | 2,00 | 0,58 | 7,50 | 1,26 | 60 | 0,37 | D (MALA) |
| | 8+780 - 9+430 | 55 | 7,00 | 1,25 | 5,00 | 0,58 | 1,75 | 0,92 | 70 | 0,87 | E (MUY MALA) |
| | 9+430 - 9+450 | 70 | 3,00 | 1,25 | 2,00 | 0,58 | 3,75 | 2,43 | 60 | 0,38 | D (MALA) |
| 9+450 - 9+900 | 60 | 3,50 | 1,25 | 7,00 | 0,58 | 3,75 | 1,09 | 60 | 0,34 | D (MALA) | |
| 9+900 - 10+554 | 60 | 3,50 | 1,25 | 4,50 | 0,58 | 1,75 | 2,10 | 70 | 0,62 | D (MALA) | |
| MAMPOTE | 16+010 - 16+400 | 12 | 18,00 | 0,75 | 7,00 | 0,58 | 7,50 | 0,01 | 90 | 0,31 | G (EXCEPCIONALMENTE MALA) |
| | 16+400 - 16+780 | 54 | 3,50 | 1,25 | 5,00 | 0,58 | 1,75 | 1,62 | 70 | 0,60 | D (MALA) |
| | 16+780 - 17+300 | 51 | 5,00 | 1,25 | 5,00 | 0,58 | 1,75 | 1,09 | 70 | 0,77 | D (MALA) |
| | 17+300 - 17+560 | 69 | 3,00 | 1,25 | 1,80 | 0,58 | 1,75 | 5,96 | 60 | 0,43 | C (MEDIA) |
| 17+560 - 17+780 | 68 | 3,00 | 1,25 | 4,00 | 0,83 | 1,75 | 3,94 | 60 | 0,44 | D (MALA) | |

Tabla #33. Caracterización del macizo en base a la clasificación (RMR) de Bieniawski.

| TUNEL: LA ENCANTADA | Coordenadas U.T.M | | PLANILLA | Resistencia de la matriz rocosa | RQD | Espaciado | Continuidad | Abertura | Rugosidad | Relleno | Meteorización | Hidrogeología | RMR | | Calidad del macizo | |
|----------------------|-------------------|---------|-----------|---------------------------------|-----|-----------|-------------|----------|-----------|---------|---------------|---------------|---------|-----------|--------------------|---------|
| | NORTE | ESTE | | | | | | | | | | | Inicial | Corregido | Clase | Calidad |
| Quebrada Encantada | 1.160.905 | 747.095 | ENC - 005 | 2 | 8 | 5 | 6 | 1 | 3 | 2 | 3 | 10 | 40 | 30 | IV | MALA |
| Quebrada Valencia | 1.160.589 | 746.623 | MI - 001 | 2 | 8 | 5 | 6 | 4 | 5 | 6 | 3 | 7 | 46 | 36 | IV | MALA |
| Quebrada Valencia | 1.160.593 | 746.465 | MI - 002 | 2 | 13 | 5 | 6 | 1 | 5 | 2 | 3 | 7 | 44 | 34 | IV | MALA |
| Quebrada Valencia | 1.160.589 | 746.441 | MI - 003 | 2 | 13 | 5 | 6 | 4 | 3 | 6 | 5 | 10 | 54 | 44 | III | MEDIA |
| Quebrada Valencia | 1.160.597 | 746.415 | MI - 004 | 2 | 3 | 5 | 6 | 4 | 5 | 6 | 6 | 7 | 44 | 34 | IV | MALA |
| Quebrada Valencia | 1.160.584 | 746.433 | MAI - 004 | 2 | 20 | 5 | 6 | 6 | 5 | 4 | 5 | 10 | 63 | 58 | III | MEDIA |
| Quebrada Valencia | 1.160.622 | 746.281 | MAI - 005 | 2 | 20 | 5 | 6 | 1 | 5 | 4 | 3 | 10 | 56 | 51 | III | MEDIA |
| Quebrada Valencia | 1.160.547 | 746.630 | QVN - 001 | 2 | 3 | 5 | 6 | 4 | 3 | 6 | 3 | 7 | 39 | 29 | IV | MALA |
| Quebrada Valencia | 1.160.515 | 746.820 | QVN - 002 | 2 | 3 | 5 | 6 | 4 | 3 | 4 | 5 | 7 | 39 | 29 | IV | MALA |
| Quebrada Contraloría | 1.160.710 | 746.068 | CTR - 001 | 2 | 20 | 5 | 6 | 1 | 5 | 2 | 3 | 15 | 59 | 47 | III | MEDIA |
| Quebrada Contraloría | 1.160.740 | 746.043 | CTR - 002 | 2 | 17 | 5 | 6 | 1 | 5 | 2 | 3 | 15 | 56 | 44 | III | MEDIA |
| Quebrada Contraloría | 1.160.784 | 746.035 | CTR - 003 | 2 | 17 | 5 | 6 | 1 | 5 | 2 | 5 | 15 | 58 | 46 | III | MEDIA |

Tabla #34. Caracterización del macizo en base a la clasificación (RMR) de Bieniawski.

| TUNEL: CAUCAGÜITA | Coordenadas U.T.M | | PLANILLA | Resistencia de la matriz rocosa | RQD | Espaciado | Continuidad | Abertura | Rugosidad | Relleno | Meteorización | Hidrogeología | RMR | | Calidad del macizo | | |
|------------------------------|-------------------|---------|--------------|---------------------------------|-----|-----------|-------------|----------|-----------|---------|---------------|---------------|------|---------|--------------------|-------|---------|
| | LOCALIDAD | NORTE | | | | | | | | | | | ESTE | Inicial | Corregido | Clase | Calidad |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Quebrada Helipuerto (QHE) | 1.159.581 | 750.556 | QHE - 001 | 4 | 8 | 5 | 4 | 6 | 5 | 6 | 3 | 10 | 51 | 41 | III | MEDIA | |
| Quebrada Helipuerto (QHE) | 1.159.550 | 750.561 | QHE - 002 | 4 | 20 | 5 | 6 | 4 | 3 | 6 | 3 | 10 | 61 | 51 | III | MEDIA | |
| Quebrada Helipuerto (QHE) | 1.159.511 | 750.574 | QHE - 003 | 4 | 13 | 5 | 6 | 4 | 5 | 6 | 3 | 10 | 56 | 46 | III | MEDIA | |
| Quebrada Helipuerto (QHE) | 1.159.451 | 750.614 | QHE - 004 | 4 | 17 | 5 | 6 | 4 | 1 | 6 | 5 | 10 | 58 | 48 | III | MEDIA | |
| Quebrada Guarenas (Qda.Guar) | 1.159.550 | 749.840 | Qda.Guar - 1 | 4 | 13 | 5 | 6 | 1 | 5 | 2 | 5 | 10 | 51 | 41 | III | MEDIA | |
| Quebrada Guarenas (Qda.Guar) | 1.159.520 | 749.840 | Qda.Guar - 2 | 4 | 17 | 5 | 6 | 1 | 5 | 2 | 3 | 10 | 53 | 43 | III | MEDIA | |
| Quebrada Guarenas (Qda.Guar) | 1.159.480 | 749.840 | Qda.Guar - 3 | 4 | 8 | 5 | 6 | 1 | 3 | 2 | 3 | 10 | 42 | 32 | IV | MALA | |
| Camino El Aguacatico (AG) | 1.159.872 | 749.183 | AG - 018 | 2 | 8 | 5 | 6 | 1 | 5 | 2 | 6 | 10 | 45 | 35 | IV | MALA | |
| Camino El Aguacatico (AG) | 1.159.839 | 749.135 | AG - 017 | 2 | 13 | 5 | 6 | 1 | 5 | 2 | 6 | 10 | 50 | 40 | IV | MALA | |
| Camino El Aguacatico (AG) | 1.159.826 | 749.110 | AG - 016 | 2 | 13 | 5 | 6 | 1 | 5 | 4 | 6 | 10 | 52 | 42 | III | MEDIA | |
| Camino El Aguacatico (AG) | 1.159.812 | 749.082 | AG - 015 | 2 | 20 | 5 | 6 | 1 | 5 | 2 | 5 | 10 | 56 | 46 | III | MEDIA | |
| Camino El Aguacatico (AG) | 1.159.779 | 748.982 | AG - 014 | 2 | 13 | 5 | 6 | 1 | 5 | 4 | 3 | 10 | 49 | 39 | IV | MALA | |
| Camino El Aguacatico (AG) | 1.159.871 | 748.919 | AG - 022 | 2 | 8 | 5 | 4 | 0 | 3 | 2 | 5 | 10 | 39 | 29 | IV | MALA | |
| Camino El Aguacatico (AG) | 1.159.886 | 748.933 | AG - 023 | 2 | 3 | 5 | 6 | 1 | 5 | 2 | 5 | 10 | 39 | 29 | IV | MALA | |
| Camino El Aguacatico (AG) | 1.159.900 | 748.948 | AG - 024 | 2 | 3 | 5 | 6 | 0 | 3 | 2 | 5 | 10 | 36 | 26 | IV | MALA | |
| Camino El Aguacatico (AG) | 1.159.854 | 748.916 | AG - 021 | 2 | 20 | 5 | 6 | 1 | 1 | 2 | 5 | 10 | 52 | 42 | III | MEDIA | |
| Camino El Aguacatico (AG) | 1.159.816 | 748.901 | AG - 008 | 2 | 8 | 5 | 6 | 1 | 5 | 4 | 3 | 10 | 44 | 34 | IV | MALA | |
| Camino El Aguacatico (AG) | 1.159.802 | 748.885 | AG - 009 | 2 | 17 | 5 | 6 | 1 | 5 | 4 | 3 | 10 | 53 | 43 | III | MEDIA | |
| Camino El Aguacatico (AG) | 1.159.787 | 748.871 | AG - 010 | 2 | 8 | 5 | 6 | 1 | 5 | 6 | 3 | 10 | 46 | 36 | IV | MALA | |
| Barrio El Aguacate | 1.159.885 | 748.848 | QDY - 001 | 2 | 20 | 5 | 6 | 1 | 5 | 6 | 3 | 10 | 58 | 48 | III | MEDIA | |
| Barrio El Aguacate | 1.159.980 | 748.608 | QDCR - 1 | 2 | 8 | 5 | 6 | 1 | 3 | 6 | 3 | 10 | 44 | 42 | III | MEDIA | |
| Barrio El Aguacate | 1.160.018 | 748.651 | QDCR - 2 | 2 | 17 | 5 | 6 | 4 | 5 | 6 | 1 | 10 | 56 | 54 | III | MEDIA | |
| Camino El Placer | 1.160.334 | 748.336 | CPL - 001 | 2 | 8 | 5 | 6 | 6 | 5 | 6 | 3 | 15 | 56 | 46 | III | MEDIA | |
| Camino El Placer | 1.160.316 | 748.329 | CPL - 002 | 2 | 8 | 5 | 6 | 4 | 5 | 6 | 3 | 15 | 54 | 44 | III | MEDIA | |
| Camino El Placer | 1.160.296 | 748.325 | CPL - 003 | 2 | 13 | 5 | 6 | 1 | 5 | 2 | 3 | 15 | 52 | 42 | III | MEDIA | |
| Camino El Placer | 1.160.280 | 748.327 | CPL - 004 | 2 | 17 | 5 | 6 | 1 | 3 | 6 | 5 | 15 | 60 | 55 | III | MEDIA | |
| Camino El Placer | 1.160.192 | 748.316 | CPL - 005 | 2 | 17 | 5 | 6 | 1 | 5 | 2 | 3 | 15 | 56 | 51 | III | MEDIA | |
| Camino El Placer | 1.160.135 | 748.327 | CPL - 006 | 2 | 3 | 5 | 6 | 1 | 5 | 2 | 5 | 15 | 44 | 39 | IV | MALA | |
| Quebrada El Placer | 1.160.382 | 748.126 | PL - 001 | 2 | 3 | 5 | 6 | 0 | 3 | 2 | 5 | 7 | 33 | 28 | IV | MALA | |
| Quebrada El Placer | 1.160.399 | 748.130 | PL - 002 | 2 | 3 | 5 | 6 | 0 | 5 | 2 | 5 | 7 | 35 | 30 | IV | MALA | |
| Quebrada El Placer | 1.160.433 | 748.128 | PL - 003 | 2 | 3 | 5 | 6 | 0 | 3 | 6 | 5 | 7 | 37 | 32 | IV | MALA | |
| Quebrada El Placer | 1.160.452 | 748.122 | PL - 004 | 2 | 8 | 5 | 4 | 1 | 5 | 2 | 5 | 7 | 39 | 34 | IV | MALA | |
| Cerrajería Portuguesa | 1.160.365 | 747.872 | CER - 008 | 2 | 13 | 5 | 6 | 6 | 1 | 6 | 3 | 10 | 52 | 47 | III | MEDIA | |
| Cerrajería Portuguesa | 1.160.442 | 747.769 | CER - 007 | 2 | 8 | 5 | 4 | 1 | 5 | 6 | 5 | 7 | 43 | 38 | IV | MALA | |
| Cerrajería Portuguesa | 1.160.550 | 747.598 | CER - 006 | 2 | 20 | 5 | 6 | 4 | 5 | 6 | 5 | 10 | 63 | 58 | III | MEDIA | |
| Cerrajería Portuguesa | 1.160.549 | 747.571 | CER - 005 | 2 | 13 | 5 | 6 | 4 | 1 | 6 | 5 | 10 | 52 | 42 | III | MEDIA | |
| Cerrajería Portuguesa | 1.160.555 | 747.549 | CER - 004 | 2 | 17 | 5 | 4 | 4 | 5 | 6 | 3 | 10 | 56 | 46 | III | MEDIA | |
| Cerrajería Portuguesa | 1.160.563 | 747.391 | CER - 003 | 2 | 17 | 5 | 6 | 1 | 1 | 6 | 5 | 10 | 53 | 48 | III | MEDIA | |
| Cerrajería Portuguesa | 1.160.558 | 747.368 | CER - 001 | 2 | 13 | 5 | 6 | 1 | 5 | 6 | 5 | 10 | 53 | 48 | III | MEDIA | |
| EMPRESA MAGA | 1.160.555 | 747.289 | MAGA - 002 | 2 | 8 | 5 | 6 | 1 | 1 | 2 | 3 | 10 | 38 | 33 | IV | MALA | |
| EMPRESA MAGA | 1.160.555 | 747.267 | MAGA - 001 | 2 | 8 | 5 | 6 | 1 | 5 | 6 | 5 | 10 | 48 | 43 | III | MEDIA | |

Tabla #35. Caracterización del macizo en base a la clasificación (RMR) de Bieniawski.

| TUNEL: MAMPOTE | Coordenadas U.T.M | | PLANILLA | Resistencia de la matriz rocosa | RQD | Espaciado | Continuidad | Abertura | Rugosidad | Relleno | Meteorización | Hidrogeología | RMR | | Calidad del macizo | |
|------------------------------------|-------------------|---------|-----------|---------------------------------|-----|-----------|-------------|----------|-----------|---------|---------------|---------------|---------|-----------|--------------------|---------|
| | NORTE | ESTE | | | | | | | | | | | Inicial | Corregido | Clase | Calidad |
| Quebrada Ultima | 1.158.440 | 756.420 | QG - 001 | 2 | 8 | 5 | 6 | 1 | 3 | 0 | 5 | 10 | 40 | 40 | IV | MALA |
| Quebrada Ultima | 1.158.503 | 756.455 | QG - 002 | 2 | 20 | 5 | 6 | 1 | 3 | 2 | 5 | 10 | 54 | 54 | III | MEDIA |
| Barrio Divino Niño | 1.158.389 | 756.310 | DN - 001 | 4 | 13 | 5 | 6 | 1 | 5 | 4 | 3 | 10 | 51 | 46 | III | MEDIA |
| Barrio Divino Niño | 1.158.392 | 756.368 | DN - 002 | 4 | 17 | 5 | 4 | 1 | 5 | 0 | 3 | 10 | 49 | 44 | III | MEDIA |
| Barrio Divino Niño | 1.158.324 | 765.376 | DN - 003 | 4 | 20 | 5 | 6 | 1 | 5 | 0 | 3 | 10 | 54 | 49 | III | MEDIA |
| Barrio Divino Niño | 1.158.381 | 756.114 | DN - 004 | 4 | 13 | 5 | 4 | 1 | 5 | 0 | 6 | 10 | 48 | 36 | IV | MALA |
| Barrio Divino Niño | 1.158.383 | 756.120 | DN - 005 | 4 | 8 | 5 | 4 | 6 | 5 | 6 | 3 | 10 | 51 | 39 | IV | MALA |
| Barrio Divino Niño | 1.158.321 | 756.148 | DN - 006 | 4 | 17 | 5 | 4 | 1 | 5 | 0 | 6 | 10 | 52 | 40 | IV | MALA |
| Barrio Divino Niño | 1.158.296 | 756.153 | DN - 007 | 4 | 13 | 5 | 4 | 1 | 5 | 2 | 6 | 10 | 50 | 38 | IV | MALA |
| Barrio Divino Niño | 1.158.371 | 756.118 | DN - 008 | 4 | 13 | 5 | 4 | 1 | 5 | 0 | 5 | 10 | 47 | 35 | IV | MALA |
| Quebrada MA (QMA) | 1.158.580 | 755.995 | QMA - 001 | 4 | 17 | 5 | 6 | 0 | 1 | 0 | 5 | 10 | 48 | 43 | III | MEDIA |
| Quebrada MA (QMA) | 1.158.550 | 756.005 | QMA - 002 | 4 | 13 | 5 | 6 | 1 | 3 | 6 | 6 | 10 | 54 | 49 | III | MEDIA |
| Quebrada MA (QMA) | 1.158.500 | 756.000 | QMA - 003 | 4 | 3 | 5 | 6 | 1 | 3 | 2 | 3 | 10 | 37 | 32 | IV | MALA |
| Quebrada MA (QMA) | 1.158.412 | 756.017 | QMA - 004 | 4 | 20 | 5 | 6 | 1 | 5 | 6 | 3 | 10 | 60 | 55 | III | MEDIA |
| Quebrada MB (QMB) | 1.158.440 | 755.890 | QMB - 001 | 4 | 8 | 5 | 6 | 0 | 5 | 0 | 3 | 10 | 41 | 39 | IV | MALA |
| Quebrada MB (QMB) | 1.158.460 | 755.890 | QMB - 002 | 4 | 17 | 5 | 6 | 0 | 3 | 0 | 3 | 10 | 48 | 46 | III | MEDIA |
| Quebrada MB (QMB) | 1.158.500 | 755.890 | QMB - 003 | 4 | 17 | 5 | 6 | 0 | 1 | 0 | 3 | 10 | 46 | 44 | III | MEDIA |
| Quebrada Ezequiel Zamora (QEZ) | 1.158.520 | 755.563 | QEZ - 001 | 4 | 20 | 5 | 6 | 0 | 3 | 0 | 5 | 10 | 53 | 53 | III | MEDIA |
| Quebrada Ezequiel Zamora (QEZ) | 1.158.564 | 755.596 | QEZ - 002 | 4 | 17 | 5 | 6 | 0 | 1 | 6 | 3 | 10 | 52 | 50 | III | MEDIA |
| Quebrada Ezequiel Zamora (QEZ) | 1.158.743 | 755.540 | QEZ - 003 | 4 | 3 | 5 | 6 | 6 | 5 | 6 | 1 | 10 | 46 | 36 | IV | MALA |
| Quebrada Ezequiel Zamora (QEZ) | 1.158.725 | 755.460 | QEZ - 004 | 4 | 17 | 5 | 6 | 6 | 1 | 6 | 3 | 10 | 58 | 48 | III | MEDIA |
| Carretera Barrio Divino Niño (CDN) | 1.158.534 | 755.922 | CDN - 001 | 4 | 13 | 5 | 6 | 6 | 1 | 6 | 3 | 7 | 51 | 51 | III | MEDIA |
| Carretera Barrio Divino Niño (CDN) | 1.158.550 | 755.932 | CDN - 002 | 4 | 13 | 5 | 6 | 6 | 5 | 6 | 5 | 7 | 57 | 57 | III | MEDIA |
| PORTAL ENTRADA (BA) | 1.158.870 | 755.090 | BA - 001 | 4 | 3 | 5 | 4 | 6 | 5 | 2 | 3 | 15 | 47 | 35 | IV | MALA |

Tabla #36. Caracterización del macizo en base a la clasificación (RMi) de Palmström.

| TUNEL: LA ENCANTADA | COORDENADAS U.T.M | | PLANILLA | σ_c Resistencia a la compresión simple (MPa) | m_i Factor para roca intacta | js Factor de Suavidad de las diaclasas | jw Factor de Ondulación de las diaclasas | ja Factor de Alteración de las diaclasas | jl Factor de Longitud de las diaclasas | jt Factor de Terminación de las diaclasas | RQD Rock Quality Designation | jR Factor de Rugosidad de las Diaclasas | jL Factor de Tamaño de las Diaclasas | Vb Volumen del Bloque (m ³) | Db Diámetro del Bloque Equivalente (m) | jC Factor de Estado de las Diaclasas | JP Parámetro de Diaclasado | RMi |
|----------------------|-------------------|---------|-----------|--|-----------------------------------|--|--|--|--|---|------------------------------------|---|--|---|--|--|----------------------------------|------|
| | NORTE | ESTE | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Quebrada Encantada | 1.160.905 | 747.095 | ENC - 005 | 15,71 | 20 | 1,5 | 1,5 | 8 | 3 | 2 | 49 | 2,25 | 6 | 0,005 | 0,17 | 1,69 | 0,04 | 0,69 |
| Quebrada Valencia | 1.160.589 | 746.623 | MI - 001 | 18,60 | 12 | 2 | 1,5 | 1 | 3 | 2 | 49 | 3 | 6 | 0,005 | 0,17 | 18,00 | 0,28 | 5,23 |
| Quebrada Valencia | 1.160.593 | 746.465 | MI - 002 | 18,60 | 12 | 2 | 1,5 | 8 | 3 | 2 | 66 | 3 | 6 | 0,012 | 0,23 | 2,25 | 0,07 | 1,38 |
| Quebrada Valencia | 1.160.589 | 746.441 | MI - 003 | 18,60 | 12 | 1,5 | 1,5 | 1 | 2 | 2 | 69 | 2,25 | 4 | 0,014 | 0,24 | 9,00 | 0,22 | 4,05 |
| Quebrada Valencia | 1.160.597 | 746.415 | MI - 004 | 18,60 | 12 | 2 | 1,5 | 1 | 3 | 2 | 10 | 3 | 6 | 0,001 | 0,11 | 18,00 | 0,21 | 3,92 |
| Quebrada Valencia | 1.160.584 | 746.433 | MAI - 004 | 18,60 | 12 | 1,5 | 1,5 | 3 | 2 | 2 | 66 | 2,25 | 4 | 0,012 | 0,23 | 3,00 | 0,09 | 1,73 |
| Quebrada Valencia | 1.160.622 | 746.281 | MAI - 005 | 18,60 | 12 | 1,5 | 1,5 | 3 | 3 | 2 | 36 | 2,25 | 6 | 0,003 | 0,14 | 4,50 | 0,09 | 1,59 |
| Quebrada Valencia | 1.160.547 | 746.630 | QVN - 001 | 16,24 | 12 | 1,5 | 1,5 | 1 | 3 | 2 | 10 | 2,25 | 6 | 0,001 | 0,11 | 13,50 | 0,17 | 2,73 |
| Quebrada Valencia | 1.160.515 | 746.820 | QVN - 002 | 16,24 | 12 | 1,5 | 1,5 | 0,75 | 3 | 2 | 10 | 2,25 | 6 | 0,001 | 0,11 | 18,00 | 0,21 | 3,43 |
| Quebrada Contraloría | 1.160.710 | 746.068 | CTR - 001 | 8,70 | 12 | 2 | 1,5 | 4 | 3 | 2 | 99 | 3 | 6 | 0,320 | 0,68 | 4,50 | 0,31 | 2,70 |
| Quebrada Contraloría | 1.160.740 | 746.043 | CTR - 002 | 8,70 | 12 | 2 | 1,5 | 4 | 3 | 2 | 79 | 3 | 6 | 0,320 | 0,68 | 4,50 | 0,31 | 2,70 |
| Quebrada Contraloría | 1.160.784 | 746.035 | CTR - 003 | 8,70 | 12 | 2 | 1,5 | 4 | 3 | 2 | 75 | 3 | 6 | 0,320 | 0,68 | 4,50 | 0,31 | 2,70 |

Tabla #37. Caracterización del macizo en base a la clasificación (RMi) de Pallmström.

| TUNEL: MAMPOTE | COORDENADAS U. T. M | | PLANILLA | Resistencia a la compresión simple (MPa) | Factor para roca intacta m_i | Factor de Suavidad de las diaclasas js | Factor de Ondulación de las diaclasas jw | Factor de Alteración de las diaclasas ja | Factor de Longitud de las diaclasas jl | Factor de Terminación de las diaclasas jt | Rock Quality Designation RQD | Factor de Rugosidad de las Diaclasas jr | Factor de Tamaño de las Diaclasas jl | Volumen del Bloque (m^3) Vb | Diámetro del Bloque Equiv lente (m) Db | Factor de Estado de las Diaclasas jc | Parámetro de Diaclasado JP | RMi |
|------------------------------------|---------------------|---------|-----------|--|--------------------------------|--|--|--|--|---|--------------------------------|---|--|-----------------------------------|--|--|------------------------------|-------|
| | NORTE | ESTE | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Quebrada Ultima | 1158440 | 756.420 | QG - 001 | 20.85 | 7 | 1.50 | 1.50 | 8.00 | 3.00 | 2.00 | 46 | 2.25 | 6.00 | 0.004 | 0.16 | 1.69 | 0.04 | 0.88 |
| Quebrada Ultima | 1158503 | 756.455 | QG - 002 | 20.85 | 7 | 1.50 | 1.50 | 8.00 | 3.00 | 2.00 | 92 | 2.25 | 6.00 | 0.111 | 0.48 | 1.69 | 0.12 | 2.60 |
| Barrio Divino Niño | 1158389 | 756.310 | DN - 001 | 28.75 | 12 | 2.00 | 1.50 | 3.00 | 2.00 | 2.00 | 66 | 3.00 | 4.00 | 0.012 | 0.23 | 4.00 | 0.12 | 3.32 |
| Barrio Divino Niño | 1158392 | 756.368 | DN - 002 | 28.75 | 12 | 2.00 | 1.50 | 4.00 | 1.00 | 2.00 | 82 | 3.00 | 2.00 | 0.038 | 0.34 | 1.50 | 0.08 | 2.31 |
| Barrio Divino Niño | 1158324 | 756.376 | DN - 003 | 28.75 | 12 | 2.00 | 1.50 | 4.00 | 2.00 | 2.00 | 92 | 3.00 | 4.00 | 0.111 | 0.48 | 3.00 | 0.18 | 5.18 |
| Barrio Divino Niño | 1158381 | 756.114 | DN - 004 | 28.75 | 12 | 2.00 | 1.50 | 4.00 | 1.00 | 2.00 | 66 | 3.00 | 2.00 | 0.012 | 0.23 | 1.50 | 0.05 | 1.55 |
| Barrio Divino Niño | 1158383 | 756.120 | DN - 005 | 28.75 | 12 | 2.00 | 1.50 | 1.00 | 1.00 | 2.00 | 49 | 3.00 | 2.00 | 0.005 | 0.17 | 6.00 | 0.12 | 3.56 |
| Barrio Divino Niño | 1158321 | 756.148 | DN - 006 | 28.75 | 12 | 2.00 | 1.50 | 4.00 | 1.00 | 2.00 | 89 | 3.00 | 2.00 | 0.077 | 0.43 | 1.50 | 0.10 | 2.94 |
| Barrio Divino Niño | 1158296 | 756.153 | DN - 007 | 28.75 | 10 | 2.00 | 1.50 | 4.00 | 1.00 | 2.00 | 62 | 3.00 | 2.00 | 0.009 | 0.21 | 1.50 | 0.05 | 1.43 |
| Barrio Divino Niño | 1158371 | 756.118 | DN - 008 | 28.75 | 10 | 2.00 | 1.50 | 4.00 | 1.00 | 2.00 | 62 | 3.00 | 2.00 | 0.009 | 0.21 | 1.50 | 0.05 | 1.43 |
| Quebrada MA (QMA) | 1158580 | 755.995 | QMA - 001 | 28.75 | 19 | 1.00 | 1.00 | 8.00 | 1.00 | 2.00 | 82 | 1.00 | 2.00 | 0.038 | 0.34 | 0.25 | 0.02 | 0.58 |
| Quebrada MA (QMA) | 1158505 | 756.005 | QMA - 002 | 28.75 | 19 | 1.50 | 1.50 | 1.00 | 3.00 | 2.00 | 62 | 2.25 | 6.00 | 0.009 | 0.21 | 13.50 | 0.26 | 7.57 |
| Quebrada MA (QMA) | 1158500 | 756.000 | QMA - 003 | 28.75 | 19 | 1.00 | 1.50 | 6.00 | 3.00 | 2.00 | 9 | 1.50 | 6.00 | 0.001 | 0.11 | 1.50 | 0.02 | 0.71 |
| Quebrada MA (QMA) | 1158412 | 756.017 | QMA - 004 | 28.75 | 13 | 2.00 | 1.50 | 1.00 | 3.00 | 2.00 | 95 | 3.00 | 6.00 | 0.167 | 0.55 | 18.00 | 0.59 | 14.37 |
| Quebrada MB (QMB) | 1158440 | 755.890 | QMB - 001 | 31.05 | 13 | 2.00 | 1.50 | 8.00 | 3.00 | 2.00 | 29 | 3.00 | 6.00 | 0.002 | 0.13 | 2.25 | 0.04 | 1.36 |
| Quebrada MB (QMB) | 1158460 | 755.890 | QMB - 002 | 31.05 | 13 | 1.50 | 1.50 | 8.00 | 3.00 | 2.00 | 82 | 2.25 | 6.00 | 0.038 | 0.34 | 1.69 | 0.09 | 2.72 |
| Quebrada MB (QMB) | 1158500 | 755.890 | QMB - 003 | 31.05 | 13 | 1.00 | 1.00 | 8.00 | 3.00 | 2.00 | 75 | 1.00 | 6.00 | 0.022 | 0.28 | 0.75 | 0.04 | 1.20 |
| Quebrada Ezequiel Zamora (QEZ) | 1158520 | 755.563 | QEZ - 001 | 31.05 | 19 | 1.50 | 1.50 | 10.00 | 3.00 | 2.00 | 92 | 2.25 | 6.00 | 0.111 | 0.48 | 1.35 | 0.11 | 3.35 |
| Quebrada Ezequiel Zamora (QEZ) | 1158564 | 755.596 | QEZ - 002 | 31.05 | 19 | 1.00 | 1.00 | 4.00 | 3.00 | 2.00 | 85 | 1.00 | 6.00 | 0.051 | 0.37 | 1.50 | 0.09 | 2.75 |
| Quebrada Ezequiel Zamora (QEZ) | 1158743 | 755.540 | QEZ - 003 | 31.05 | 13 | 2.00 | 1.50 | 1.00 | 3.00 | 2.00 | 23 | 3.00 | 6.00 | 0.002 | 0.12 | 18.00 | 0.23 | 7.11 |
| Quebrada Ezequiel Zamora (QEZ) | 1158725 | 755.460 | QEZ - 004 | 31.05 | 19 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 2.00 | 2.00 | 85 | 1.00 | 4.00 | 0.051 | 0.37 | 4.00 | 0.17 | 5.38 |
| Carretera Barrio Divino Niño (CDN) | 1158534 | 755.922 | CDN - 001 | 31.05 | 13 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 2.00 | 2.00 | 72 | 1.00 | 4.00 | 0.017 | 0.26 | 4.00 | 0.13 | 3.99 |
| Carretera Barrio Divino Niño (CDN) | 1158550 | 755.932 | CDN - 002 | 31.05 | 13 | 2.00 | 1.50 | 1.00 | 3.00 | 2.00 | 59 | 3.00 | 6.00 | 0.008 | 0.20 | 18.00 | 0.31 | 9.66 |
| PORTAL ENTRADA (BA) | 1.158.870 | 755.090 | BA - 001 | 34.00 | 13 | 2.00 | 1.50 | 3.00 | 1.00 | 2.00 | 10 | 3.00 | 2.00 | 0.001 | 0.11 | 2.00 | 0.03 | 1.11 |

Tabla #38. Caracterización del macizo en base a la clasificación (RMI) de Pallstöm.

| TUNEL: CAUCAGÜITA | COORDENADAS U.T.M | | PLANILLA | Resistencia a la compresión simple (MPa) | Factor para roca intacta m_i | Factor de Suavidad de las diaclasas js | Factor de Ondulación de las diaclasas jw | Factor de Alteración de las diaclasas ja | Factor de Longitud de las diaclasas jl | Factor de Terminación de las diaclasas jt | Rock Quality Designation RQD | Factor de Rugosidad de las Diaclasas jr | Factor de Tamaño de las Diaclasas jl | Volumen del Bloque (m ³) Vb | Diámetro del Bloque Equivalente (m) Db | Factor de Estado de las Diaclasas jc | Parámetro de Diaclasado jp | RMI |
|------------------------------|-------------------|---------|--------------|--|--------------------------------|--|--|--|--|---|------------------------------|---|--|---|--|--|------------------------------|-------|
| | NORTE | ESTE | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Quebrada Heliporto (QHE) | 1.159.581 | 750.566 | QHE - 001 | 28.38 | 12 | 2.00 | 1.50 | 1.00 | 1.00 | 2.00 | 33 | 3.00 | 2.00 | 0.003 | 0.14 | 6.00 | 0.10 | 2.97 |
| Quebrada Heliporto (QHE) | 1.159.560 | 750.561 | QHE - 002 | 28.38 | 14 | 1.50 | 1.50 | 1.00 | 3.00 | 2.00 | 95 | 2.25 | 6.00 | 0.167 | 0.55 | 13.50 | 0.50 | 14.07 |
| Quebrada Heliporto (QHE) | 1.159.511 | 750.574 | QHE - 003 | 28.38 | 12 | 2.00 | 1.50 | 1.00 | 3.00 | 2.00 | 56 | 3.00 | 6.00 | 0.007 | 0.19 | 18.00 | 0.30 | 8.55 |
| Quebrada Heliporto (QHE) | 1.159.451 | 750.614 | QHE - 004 | 28.38 | 20 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 3.00 | 2.00 | 79 | 1.00 | 6.00 | 0.030 | 0.31 | 6.00 | 0.20 | 5.59 |
| Quebrada Guarenas (Qda.Guar) | 1.159.550 | 749.840 | Qda.Guar - 1 | 28.38 | 20 | 2.00 | 1.50 | 4.00 | 3.00 | 2.00 | 56 | 3.00 | 6.00 | 0.007 | 0.19 | 4.50 | 0.11 | 3.07 |
| Quebrada Guarenas (Qda.Guar) | 1.159.520 | 749.840 | Qda.Guar - 2 | 28.38 | 12 | 2.00 | 1.50 | 8.00 | 3.00 | 2.00 | 82 | 3.00 | 6.00 | 0.038 | 0.34 | 2.25 | 0.11 | 3.05 |
| Quebrada Guarenas (Qda.Guar) | 1.159.480 | 749.840 | Qda.Guar - 3 | 28.38 | 12 | 1.50 | 1.50 | 8.00 | 3.00 | 2.00 | 39 | 2.25 | 6.00 | 0.003 | 0.15 | 1.69 | 0.04 | 1.09 |
| Camino El Aguacatico (AG) | 1.159.872 | 749.183 | AG - 018 | 8.23 | 20 | 2.00 | 1.50 | 4.00 | 3.00 | 2.00 | 49 | 3.00 | 6.00 | 0.005 | 0.17 | 4.50 | 0.10 | 0.81 |
| Camino El Aguacatico (AG) | 1.159.839 | 749.135 | AG - 017 | 8.23 | 20 | 2.00 | 1.50 | 3.00 | 2.00 | 2.00 | 62 | 3.00 | 4.00 | 0.009 | 0.21 | 4.00 | 0.11 | 0.89 |
| Camino El Aguacatico (AG) | 1.159.826 | 749.170 | AG - 016 | 8.23 | 20 | 2.00 | 1.50 | 4.00 | 3.00 | 2.00 | 56 | 3.00 | 6.00 | 0.007 | 0.19 | 4.50 | 0.11 | 0.89 |
| Camino El Aguacatico (AG) | 1.159.900 | 748.948 | AG - 024 | 8.23 | 12 | 1.50 | 1.50 | 10.00 | 3.00 | 2.00 | 6 | 2.25 | 6.00 | 0.001 | 0.10 | 1.35 | 0.02 | 0.18 |
| Camino El Aguacatico (AG) | 1.159.854 | 748.916 | AG - 021 | 8.23 | 12 | 1.00 | 1.50 | 10.00 | 3.00 | 2.00 | 100 | 1.50 | 6.00 | 0.386 | 0.73 | 0.90 | 0.13 | 1.09 |
| Camino El Aguacatico (AG) | 1.159.816 | 748.901 | AG - 008 | 8.23 | 9 | 2.00 | 1.50 | 3.00 | 2.00 | 2.00 | 36 | 3.00 | 6.00 | 0.003 | 0.14 | 4.00 | 0.08 | 0.64 |
| Camino El Aguacatico (AG) | 1.159.802 | 748.885 | AG - 009 | 8.23 | 9 | 2.00 | 1.50 | 3.00 | 2.00 | 2.00 | 82 | 3.00 | 4.00 | 0.038 | 0.34 | 4.00 | 0.16 | 1.32 |
| Camino El Aguacatico (AG) | 1.159.787 | 748.871 | AG - 010 | 8.23 | 9 | 2.00 | 1.50 | 2.00 | 3.00 | 2.00 | 49 | 3.00 | 6.00 | 0.005 | 0.17 | 9.00 | 0.17 | 1.39 |
| Barrio El Aguacate | 1.159.885 | 748.848 | QDY - 001 | 8.23 | 12 | 2.00 | 1.50 | 4.00 | 3.00 | 2.00 | 92 | 3.00 | 6.00 | 0.111 | 0.48 | 4.50 | 0.23 | 1.91 |
| Barrio El Aguacate | 1.159.980 | 748.608 | QDCR - 1 | 8.56 | 12 | 1.50 | 1.50 | 4.00 | 3.00 | 2.00 | 49 | 2.25 | 6.00 | 0.005 | 0.17 | 3.38 | 0.08 | 0.67 |
| Barrio El Aguacate | 1.160.018 | 748.651 | QDCR - 2 | 8.56 | 12 | 2.00 | 1.50 | 1.00 | 3.00 | 2.00 | 82 | 3.00 | 6.00 | 0.038 | 0.34 | 18.00 | 0.43 | 3.69 |
| Camino El Placer | 1.160.334 | 748.336 | CPL - 001 | 14.46 | 12 | 2.00 | 1.50 | 1.00 | 3.00 | 2.00 | 33 | 3.00 | 6.00 | 0.003 | 0.14 | 18.00 | 0.25 | 3.56 |
| Camino El Placer | 1.160.316 | 748.329 | CPL - 002 | 14.46 | 12 | 2.00 | 1.50 | 1.00 | 3.00 | 2.00 | 39 | 3.00 | 6.00 | 0.003 | 0.15 | 18.00 | 0.26 | 3.73 |
| Camino El Placer | 1.160.296 | 748.325 | CPL - 003 | 14.46 | 9 | 2.00 | 1.50 | 8.00 | 3.00 | 2.00 | 66 | 3.00 | 6.00 | 0.012 | 0.23 | 2.25 | 0.07 | 1.07 |
| Camino El Placer | 1.160.280 | 748.327 | CPL - 004 | 14.46 | 9 | 1.50 | 1.50 | 4.00 | 3.00 | 2.00 | 82 | 2.25 | 6.00 | 0.038 | 0.34 | 3.38 | 0.14 | 2.06 |
| Camino El Placer | 1.160.192 | 748.316 | CPL - 005 | 14.46 | 9 | 2.00 | 1.50 | 8.00 | 3.00 | 2.00 | 82 | 3.00 | 6.00 | 0.038 | 0.34 | 2.25 | 0.11 | 1.55 |
| Camino El Placer | 1.160.135 | 748.327 | CPL - 006 | 14.46 | 9 | 2.00 | 1.50 | 8.00 | 3.00 | 2.00 | 16 | 3.00 | 6.00 | 0.001 | 0.11 | 2.25 | 0.04 | 0.56 |
| Quebrada El Placer | 1.160.382 | 748.126 | PL - 001 | 8.25 | 12 | 1.50 | 1.50 | 10.00 | 3.00 | 2.00 | 10 | 2.25 | 6.00 | 0.001 | 0.11 | 1.35 | 0.02 | 0.19 |
| Quebrada El Placer | 1.160.399 | 748.130 | PL - 002 | 8.25 | 9 | 2.00 | 1.50 | 10.00 | 3.00 | 2.00 | 10 | 3.00 | 6.00 | 0.001 | 0.11 | 1.80 | 0.03 | 0.24 |
| Quebrada El Placer | 1.160.433 | 748.128 | PL - 003 | 8.25 | 12 | 2.00 | 1.50 | 4.00 | 3.00 | 2.00 | 9 | 3.00 | 6.00 | 0.001 | 0.11 | 4.50 | 0.07 | 0.55 |
| Quebrada El Placer | 1.160.452 | 748.122 | PL - 004 | 8.25 | 9 | 2.00 | 1.50 | 10.00 | 3.00 | 2.00 | 39 | 3.00 | 4.00 | 0.003 | 0.15 | 1.20 | 0.03 | 0.23 |
| Cerrajería Portuguesa | 1.160.365 | 747.872 | CER - 008 | 8.25 | 9 | 1.00 | 1.50 | 4.00 | 3.00 | 2.00 | 56 | 1.50 | 6.00 | 0.007 | 0.19 | 2.25 | 0.06 | 0.52 |
| Cerrajería Portuguesa | 1.160.442 | 747.769 | CER - 007 | 7.65 | 12 | 2.00 | 1.50 | 4.00 | 1.00 | 2.00 | 29 | 3.00 | 2.00 | 0.002 | 0.13 | 1.50 | 0.03 | 0.23 |
| Cerrajería Portuguesa | 1.160.598 | 747.598 | CER - 006 | 7.65 | 9 | 2.00 | 1.50 | 1.00 | 3.00 | 2.00 | 99 | 3.00 | 6.00 | 0.320 | 0.68 | 18.00 | 0.67 | 3.83 |
| Cerrajería Portuguesa | 1.160.549 | 747.571 | CER - 005 | 7.65 | 9 | 1.00 | 1.00 | 6.00 | 3.00 | 2.00 | 56 | 1.00 | 6.00 | 0.007 | 0.19 | 1.00 | 0.03 | 0.24 |
| Cerrajería Portuguesa | 1.160.555 | 747.549 | CER - 004 | 7.65 | 9 | 2.00 | 1.50 | 1.00 | 1.00 | 2.00 | 79 | 3.00 | 2.00 | 0.030 | 0.31 | 6.00 | 0.20 | 1.51 |
| Cerrajería Portuguesa | 1.160.563 | 747.391 | CER - 003 | 7.65 | 12 | 1.00 | 1.00 | 10.00 | 2.00 | 2.00 | 75 | 1.00 | 4.00 | 0.022 | 0.28 | 0.40 | 0.02 | 0.18 |
| Cerrajería Portuguesa | 1.160.558 | 747.368 | CER - 001 | 7.65 | 12 | 2.00 | 1.50 | 10.00 | 3.00 | 2.00 | 66 | 3.00 | 6.00 | 0.012 | 0.23 | 1.80 | 0.06 | 0.48 |
| EMPRESA MAGA | 1.160.555 | 747.289 | MAGA - 002 | 7.65 | 15 | 1.50 | 1.00 | 8.00 | 2.00 | 2.00 | 46 | 1.50 | 4.00 | 0.004 | 0.16 | 0.75 | 0.02 | 0.16 |
| EMPRESA MAGA | 1.160.555 | 747.267 | MAGA - 001 | 7.65 | 12 | 2.00 | 1.50 | 8.00 | 3.00 | 2.00 | 29 | 3.00 | 6.00 | 0.002 | 0.13 | 2.25 | 0.04 | 0.34 |

CARACTERIZACIÓN GEOMECÁNICA Y MODELADO 3D DE LOS MACIZOS ROCOSOS
CORRESPONDIENTES AL DESARROLLO DE LAS OBRAS SUBTERRÁNEAS DEL
SISTEMA CARACAS - GUARENAS - GUATIRE

A continuación la tabla que muestra los valores de m_i :

Tabla #39. Valores de m_i , túnel La Encantada.

| TUNEL: LA ENCANTADA LOCALIDAD | COORDENADAS U.T.M | | PLANILLA | m_i | LITOLOGIA |
|----------------------------------|-------------------|---------|-----------|-------|--|
| | NORTE | ESTE | | | |
| Quebrada Encantada | 1.160.905 | 747.095 | ENC - 005 | 20 | ESQUISTO CUARZO-MICACEO-CALCAREO |
| Quebrada Valencia | 1.160.589 | 746.623 | MI - 001 | 12 | ESQUISTO CALCÁREO-MICACEO-CUARZOSO |
| Quebrada Valencia | 1.160.593 | 746.465 | MI - 002 | 12 | ESQUISTO CUARZO-MICACEO-GRAFITOSO |
| Quebrada Valencia | 1.160.589 | 746.441 | MI - 003 | 12 | ESQUISTO CUARZO-MICACEO-GRAFITOSO |
| Quebrada Valencia | 1.160.597 | 746.415 | MI - 004 | 12 | ESQUISTO CUARZO-MICACEO-CALCÁREOGRAFITOSO |
| Quebrada Valencia | 1.160.584 | 746.433 | MAI - 004 | 12 | ESQUISTO GRAFITOSO-CALCÁREO-CUARZOSO-MICACEO |
| Quebrada Valencia | 1.160.622 | 746.281 | MAI - 005 | 12 | ESQUISTO GRAFITOSO-CUARZO-CALCÁREO |
| Quebrada Valencia | 1.160.547 | 746.630 | QVN - 001 | 12 | ESQUISTO GRAFITOSO-CUARZOSO-CALCÁREO |
| Quebrada Valencia | 1.160.515 | 746.820 | QVN - 002 | 12 | ESQUISTO GRAFITOSO-CALCÁREO |
| Quebrada Contraloría | 1.160.710 | 746.068 | CTR - 001 | 12 | ESQUISTO CUARZO-MICACEO-GRAFITOSO |
| Quebrada Contraloría | 1.160.740 | 746.043 | CTR - 002 | 12 | ESQUISTO CUARZO-MICACEO-GRAFITOSO |
| Quebrada Contraloría | 1.160.784 | 746.035 | CTR - 003 | 12 | ESQUISTO CUARZO-MICACEO-GRAFITOSO |

Tabla #40. Valores de m_i , túnel Mampote.

| TUNEL: MAMPOTE LOCALIDAD | COORDENADAS U.T.M | | PLANILLA | m_i | LITOLOGIA |
|------------------------------------|-------------------|---------|-----------|-------|-----------------------------------|
| | NORTE | ESTE | | | |
| Quebrada Ultima | 1.158.440 | 756.420 | QG - 001 | 7 | FILITA CUARZO-MICACEA-GARFITOSA |
| Quebrada Ultima | 1.158.503 | 756.455 | QG - 002 | 7 | FILITA CUARZO-MICACEA-GARFITOSA |
| Barrio Divino Niño | 1.158.389 | 756.310 | DN - 001 | 12 | ESQUISTO CUARZO-MICACEO-GRAFITOSO |
| Barrio Divino Niño | 1.158.392 | 756.368 | DN - 002 | 12 | ESQUISTO CUARZO-MICACEO-GRAFITOSO |
| Barrio Divino Niño | 1.158.324 | 765.376 | DN - 003 | 12 | ESQUISTO CUARZO-MICACEO-GRAFITOSO |
| Barrio Divino Niño | 1.158.381 | 756.114 | DN - 004 | 12 | ESQUISTO CUARZO-MICACEO-GRAFITOSO |
| Barrio Divino Niño | 1.158.383 | 756.120 | DN - 005 | 12 | ESQUISTO CUARZO-MICACEO-GRAFITOSO |
| Barrio Divino Niño | 1.158.321 | 756.148 | DN - 006 | 12 | ESQUISTO CUARZO-MICACEO-GRAFITOSO |
| Barrio Divino Niño | 1.158.296 | 756.153 | DN - 007 | 10 | ESQUISTO CUARZO-MICACEO-GRAFITOSO |
| Barrio Divino Niño | 1.158.371 | 756.118 | DN - 008 | 10 | ESQUISTO CUARZO-MICACEO-GRAFITOSO |
| Quebrada MA (QMA) | 1.158.580 | 755.995 | QMA - 001 | 19 | ESQUISTO CUARZO-MICACEO-CALCÁREO |
| Quebrada MA (QMA) | 1.158.550 | 756.005 | QMA - 002 | 19 | ESQUISTO CUARZO-MICACEO-CALCÁREO |
| Quebrada MA (QMA) | 1.158.500 | 756.000 | QMA - 003 | 19 | ESQUISTO CUARZO-MICACEO |
| Quebrada MA (QMA) | 1.158.412 | 756.017 | QMA - 004 | 13 | ESQUISTO CUARZO-MICACEO |
| Quebrada MB (QMB) | 1.158.440 | 755.890 | QMB - 001 | 13 | ESQUISTO CUARZO-MICACEO-GRAFITOSO |
| Quebrada MB (QMB) | 1.158.460 | 755.890 | QMB - 002 | 13 | ESQUISTO CUARZO-MICACEO-GRAFITOSO |
| Quebrada MB (QMB) | 1.158.500 | 755.890 | QMB - 003 | 13 | ESQUISTO CUARZO-MICACEO-GRAFITOSO |
| Quebrada Ezequiel Zamora (QEZ) | 1.158.520 | 755.563 | QEZ - 001 | 19 | ESQUISTO CUARZO-MICACEO-CALCÁREO |
| Quebrada Ezequiel Zamora (QEZ) | 1.158.564 | 755.596 | QEZ - 002 | 19 | ESQUISTO CUARZO-MICACEO-CALCÁREO |
| Quebrada Ezequiel Zamora (QEZ) | 1.158.743 | 755.540 | QEZ - 003 | 13 | ESQUISTO CUARZO-MICACEO |
| Quebrada Ezequiel Zamora (QEZ) | 1.158.725 | 755.460 | QEZ - 004 | 19 | ESQUISTO CUARZO-MICACEO |
| Carretera Barrio Divino Niño (CDN) | 1.158.534 | 755.922 | CDN - 001 | 13 | ESQUISTO CUARZO-MICACEO |
| Carretera Barrio Divino Niño (CDN) | 1.158.550 | 755.932 | CDN - 002 | 13 | ESQUISTO CUARZO-MICACEO |
| PORTAL ENTRADA (BA) | 1.158.870 | 755.090 | BA - 001 | 13 | ESQUISTO CUARZO-MICACEO-CALCÁREO |

Tabla #41. Valores de m_i , túnel Caucaquíta.

| TUNEL: CAUCAGÜITA LOCALIDAD | COORDENADAS U.T.M | | PLANILLA | m_i | LITOLOGIA |
|--------------------------------|-------------------|---------|--------------|-------|---|
| | NORTE | ESTE | | | |
| Quebrada Helipuerto (QHE) | 1.159.581 | 750.556 | QHE - 001 | 12 | ESQUISTO CUARZO-MICACEO-FELDESPÁTICO |
| Quebrada Helipuerto (QHE) | 1.159.550 | 750.561 | QHE - 002 | 14 | ESQUISTO CUARZO-MICACEO-CALCÁREO-GRAFITOSO |
| Quebrada Helipuerto (QHE) | 1.159.511 | 750.574 | QHE - 003 | 12 | ESQUISTO CUARZO-MICACEO-GRAFITOSO |
| Quebrada Helipuerto (QHE) | 1.159.451 | 750.614 | QHE - 004 | 20 | ESQUISTO CUARZO-MICACEO-GRAFITOSO |
| Quebrada Guarenas (Qda.Guar) | 1.159.550 | 749.840 | Qda.Guar - 1 | 20 | ESQUISTO CUARZO-MICACEO-GRAFITOSO |
| Quebrada Guarenas (Qda.Guar) | 1.159.520 | 749.840 | Qda.Guar - 2 | 12 | ESQUISTO CUARZO-MICACEO-GRAFITOSO |
| Quebrada Guarenas (Qda.Guar) | 1.159.480 | 749.840 | Qda.Guar - 3 | 12 | ESQUISTO CUARZO-MICACEO-CALCÁREO-GRAFITOSO |
| Camino El Aguacatico (AG) | 1.159.872 | 749.183 | AG - 018 | 20 | ESQUISTO CUARZO-MICACEO-CALCÁREO |
| Camino El Aguacatico (AG) | 1.159.839 | 749.135 | AG - 017 | 20 | ESQUISTO CUARZO-MICACEO-CALCÁREO |
| Camino El Aguacatico (AG) | 1.159.826 | 749.110 | AG - 016 | 20 | ESQUISTO CUARZO-MICACEO-CALCÁREO |
| Camino El Aguacatico (AG) | 1.159.812 | 749.082 | AG - 015 | 20 | ESQUISTO CUARZO-MICACEO |
| Camino El Aguacatico (AG) | 1.159.779 | 748.982 | AG - 014 | 20 | ESQUISTO CUARZO-MICACEO-CALCÁREO |
| Camino El Aguacatico (AG) | 1.159.871 | 748.919 | AG - 022 | 12 | ESQUISTO GRAFITOSO-MICACEO |
| Camino El Aguacatico (AG) | 1.159.886 | 748.933 | AG - 023 | 12 | ESQUISTO GRAFITOSO-MICACEO |
| Camino El Aguacatico (AG) | 1.159.900 | 748.948 | AG - 024 | 12 | ESQUISTO GRAFITOSO-MICACEO |
| Camino El Aguacatico (AG) | 1.159.854 | 748.916 | AG - 021 | 12 | ESQUISTO GRAFITOSO-MICACEO |
| Camino El Aguacatico (AG) | 1.159.816 | 748.901 | AG - 008 | 9 | FILITA MICÁCEA-CALCÁREA-GRAFITOSA |
| Camino El Aguacatico (AG) | 1.159.802 | 748.885 | AG - 009 | 9 | FILITA MICÁCEA-CALCÁREA-GRAFITOSA |
| Camino El Aguacatico (AG) | 1.159.787 | 748.871 | AG - 010 | 9 | FILITA MICÁCEA-CALCÁREA-GRAFITOSA |
| Barrio El Aguacate | 1.159.885 | 748.848 | QDY - 001 | 12 | ESQUISTO CUARZO-MICACEO-GRAFITOSO |
| Barrio El Aguacate | 1.159.980 | 748.608 | QDCR - 1 | 12 | ESQUISTO CUARZO-MICACEO-CALCÁREO-GRAFITOSO |
| Barrio El Aguacate | 1.160.015 | 748.651 | QDCR - 2 | 12 | ESQUISTO CUARZO-MICACEO-CALCÁREO-GRAFITOSO |
| Camino El Placer | 1.160.334 | 748.336 | CPL - 001 | 12 | ESQUISTO CALCÁREO-CUARZO-MICACEO-GRAFITOSO |
| Camino El Placer | 1.160.316 | 748.329 | CPL - 002 | 12 | ESQUISTO CALCÁREO-CUARZO-MICACEO-GRAFITOSO |
| Camino El Placer | 1.160.296 | 748.325 | CPL - 003 | 9 | FILITA CUARZO-MICÁCEA-GRAFITOSA-CALCÁREA |
| Camino El Placer | 1.160.280 | 748.327 | CPL - 004 | 9 | FILITA CUARZO-MICÁCEA-GRAFITOSA-CALCÁREA |
| Camino El Placer | 1.160.192 | 748.316 | CPL - 005 | 9 | FILITA CUARZO-MICÁCEA-GRAFITOSA-CALCÁREA |
| Camino El Placer | 1.160.135 | 748.327 | CPL - 006 | 9 | FILITA CUARZO-MICÁCEA-GRAFITOSA-CALCÁREA |
| Quebrada El Placer | 1.160.382 | 748.126 | PL - 001 | 12 | ESQUISTO CALCÁREO-CUARZO-MICACEO-GRAFITOSO |
| Quebrada El Placer | 1.160.399 | 748.130 | PL - 002 | 9 | FILITA CUARZO-GRAFITOSA |
| Quebrada El Placer | 1.160.433 | 748.128 | PL - 003 | 12 | ESQUISTO CALCÁREO-CUARZO-MICACEO-GRAFITOSO |
| Quebrada El Placer | 1.160.452 | 748.122 | PL - 004 | 9 | FILITA CUARZO-GRAFITOSA |
| Cerrajería Portuguesa | 1.160.365 | 747.872 | CER - 008 | 9 | FILITA CALCÁREA-CUARZO-MICÁCEA-GRAFITOSA |
| Cerrajería Portuguesa | 1.160.442 | 747.769 | CER - 007 | 12 | ESQUISTO CUARZO-MICACEO-GRAFITOSO |
| Cerrajería Portuguesa | 1.160.550 | 747.598 | CER - 006 | 9 | FILITA GRAFITOSA-CUAZO-MICÁCEA-CALCÁREA |
| Cerrajería Portuguesa | 1.160.549 | 747.571 | CER - 005 | 9 | FILITA GRAFITOSA-CUAZO-MICÁCEA-CALCÁREA |
| Cerrajería Portuguesa | 1.160.555 | 747.549 | CER - 004 | 9 | FILITA GRAFITOSA-CUAZO-MICÁCEA-CALCÁREA |
| Cerrajería Portuguesa | 1.160.563 | 747.391 | CER - 003 | 12 | ESQUISTO CALCÁREO-CUARZO-MICACEO-GRAFITOSO |
| Cerrajería Portuguesa | 1.160.558 | 747.368 | CER - 001 | 12 | ESQUISTO CUARZO-MICACEO-CALCÁREO-FELDESPÁTICO |
| EMPRESA MAGA | 1.160.555 | 747.289 | MAGA - 002 | 15 | ESQUISTO CUARZO-MICACEO-CALCÁREO-GRAFITOSO |
| EMPRESA MAGA | 1.160.555 | 747.267 | MAGA - 001 | 12 | ESQUISTO CUARZO-MICACEO-CALCÁREO-GRAFITOSO |

Finalmente se calcularon los parámetros geomecánicos de Hoek y se clasificó la excavación en función de la cobertura, como lo muestran las siguientes tablas, y que pueden ser apreciados con mayor detalles en el Mapa Geológico – Perfil Geomecánico correspondiente a los anexos # 1, 2 y 3.

Tabla #42. Clasificación de la excavación según la cobertura.

| PROGRESIVA (RANGO) | | CLASIFICACIÓN DE LA EXCAVACIÓN SEGÚN COBERTURA | TUNEL |
|--------------------|--------|--|--------------|
| 5+778 | 5+780 | SUPERFICIAL | LA ENCANTADA |
| 5+780 | 5+783 | INTERMEDIA | |
| 5+783 | 6+700 | PROFUNDA | |
| 6+700 | 6+705 | INTERMEDIA | |
| 6+705 | 6+708 | SUPERFICIAL | |
| 7+340 | 7+400 | INTERMEDIA | CAUCAGÜITA |
| 7+400 | 10+530 | PROFUNDA | |
| 10+530 | 10+544 | INTERMEDIA | |
| 10+544 | 10+554 | SUPERFICIAL | |
| 16+010 | 16+012 | SUPERFICIAL | MAMPOTE |
| 16+012 | 16+014 | INTERMEDIA | |
| 16+014 | 17+763 | PROFUNDA | |
| 17+763 | 17+774 | INTERMEDIA | |
| 17+774 | 17+780 | SUPERFICIAL | |

Tabla #43. Parámetros geomecánicos según Hoek, túnel La Encantada.

| TÚNEL: LA ENCANTADA LOCALIDAD | COORDENADAS U.T.M | | PLANILLA | GSI | σ_{ci} (MPa) | m_i | σ_{cm} (MPa) | C_m (MPa) | ϕ_m (Grados) | E_m (MPa) |
|----------------------------------|-------------------|---------|-----------|-----|------------------------|-------|------------------------|----------------|----------------------|-----------------|
| | NORTE | ESTE | | | | | | | | |
| Quebrada Encantada | 1.160.905 | 747.095 | ENC - 005 | 30 | 15,71 | 20 | 1,53 | 0,33 | 32,24 | 1.253,46 |
| Quebrada Valencia | 1.160.589 | 746.623 | MI - 001 | 40 | 18,60 | 12 | 1,94 | 0,44 | 30,76 | 2.425,30 |
| Quebrada Valencia | 1.160.593 | 746.465 | MI - 002 | 38 | 18,60 | 12 | 1,80 | 0,42 | 30,17 | 2.161,55 |
| Quebrada Valencia | 1.160.589 | 746.441 | MI - 003 | 41 | 18,60 | 12 | 2,01 | 0,45 | 31,06 | 2.569,01 |
| Quebrada Valencia | 1.160.597 | 746.415 | MI - 004 | 43 | 18,60 | 12 | 2,16 | 0,48 | 31,64 | 2.882,47 |
| Quebrada Valencia | 1.160.584 | 746.433 | MAI - 004 | 40 | 18,60 | 12 | 1,94 | 0,44 | 30,76 | 2.425,30 |
| Quebrada Valencia | 1.160.622 | 746.281 | MAI - 005 | 38 | 18,60 | 12 | 1,80 | 0,42 | 30,17 | 2.161,55 |
| Quebrada Valencia | 1.160.547 | 746.630 | QVN - 001 | 35 | 16,24 | 12 | 1,42 | 0,34 | 29,24 | 1.699,41 |
| Quebrada Valencia | 1.160.515 | 746.820 | QVN - 002 | 33 | 16,24 | 12 | 1,32 | 0,32 | 28,61 | 1.514,60 |
| Quebrada Contraloría | 1.160.710 | 746.068 | CTR - 001 | 33 | 8,70 | 12 | 0,71 | 0,17 | 28,61 | 1.108,56 |
| Quebrada Contraloría | 1.160.740 | 746.043 | CTR - 002 | 32 | 8,70 | 12 | 0,68 | 0,17 | 28,29 | 1.046,55 |
| Quebrada Contraloría | 1.160.784 | 746.035 | CTR - 003 | 33 | 8,70 | 12 | 0,71 | 0,17 | 28,61 | 1.108,56 |

Tabla #44. Parámetros geomecánicos según Hoek, túnel Caucaquíta.

| TUNEL: CAUCAGÜITA LOCALIDAD | COORDENADAS U.T.M | | PLANILLA | GSI | σ_{ci} (MPa) | m_i | σ_{cm} (MPa) | C_m (MPa) | φ_m (Grados) | E_m (MPa) |
|--------------------------------|-------------------|---------|--------------|-----|------------------------|-------|------------------------|----------------|-------------------------|----------------|
| | NORTE | ESTE | | | | | | | | |
| Quebrada Helipuerto (QHE) | 1.159.581 | 750.556 | QHE - 001 | 40 | 28,38 | 12 | 2,96 | 0,67 | 30,76 | 2.995,96 |
| Quebrada Helipuerto (QHE) | 1.159.550 | 750.561 | QHE - 002 | 35 | 28,38 | 14 | 2,67 | 0,61 | 30,63 | 2.246,65 |
| Quebrada Helipuerto (QHE) | 1.159.511 | 750.574 | QHE - 003 | 40 | 28,38 | 12 | 2,96 | 0,67 | 30,76 | 2.995,96 |
| Quebrada Helipuerto (QHE) | 1.159.451 | 750.614 | QHE - 004 | 25 | 28,38 | 20 | 2,35 | 0,53 | 30,56 | 1.263,39 |
| Quebrada Guarenas (Qda.Guar) | 1.159.550 | 749.840 | Qda.Guar - 1 | 30 | 28,38 | 20 | 2,76 | 0,60 | 32,24 | 1.684,75 |
| Quebrada Guarenas (Qda.Guar) | 1.159.520 | 749.840 | Qda.Guar - 2 | 29 | 28,38 | 12 | 1,99 | 0,50 | 27,31 | 1.590,51 |
| Quebrada Guarenas (Qda.Guar) | 1.159.480 | 749.840 | Qda.Guar - 3 | 29 | 28,38 | 12 | 1,99 | 0,50 | 27,31 | 1.590,51 |
| Camino El Aguacatico (AG) | 1.159.872 | 749.183 | AG - 018 | 28 | 8,23 | 20 | 0,75 | 0,17 | 31,58 | 808,54 |
| Camino El Aguacatico (AG) | 1.159.839 | 749.135 | AG - 017 | 28 | 8,23 | 20 | 0,75 | 0,17 | 31,58 | 808,54 |
| Camino El Aguacatico (AG) | 1.159.826 | 749.110 | AG - 016 | 27 | 8,23 | 20 | 0,73 | 0,16 | 31,24 | 763,31 |
| Camino El Aguacatico (AG) | 1.159.812 | 749.082 | AG - 015 | 29 | 8,23 | 20 | 0,77 | 0,17 | 31,91 | 856,45 |
| Camino El Aguacatico (AG) | 1.159.779 | 748.982 | AG - 014 | 28 | 8,23 | 20 | 0,75 | 0,17 | 31,58 | 808,54 |
| Camino El Aguacatico (AG) | 1.159.871 | 748.919 | AG - 022 | 25 | 8,23 | 12 | 0,50 | 0,13 | 25,96 | 680,30 |
| Camino El Aguacatico (AG) | 1.159.886 | 748.933 | AG - 023 | 29 | 8,23 | 12 | 0,58 | 0,14 | 27,31 | 856,45 |
| Camino El Aguacatico (AG) | 1.159.900 | 748.948 | AG - 024 | 22 | 8,23 | 12 | 0,45 | 0,12 | 24,92 | 572,40 |
| Camino El Aguacatico (AG) | 1.159.854 | 748.916 | AG - 021 | 20 | 8,23 | 12 | 0,42 | 0,11 | 24,20 | 510,15 |
| Camino El Aguacatico (AG) | 1.159.816 | 748.901 | AG - 008 | 29 | 8,23 | 9 | 0,49 | 0,14 | 24,73 | 856,45 |
| Camino El Aguacatico (AG) | 1.159.802 | 748.885 | AG - 009 | 30 | 8,23 | 9 | 0,51 | 0,14 | 25,06 | 907,19 |
| Camino El Aguacatico (AG) | 1.159.787 | 748.871 | AG - 010 | 30 | 8,23 | 9 | 0,51 | 0,14 | 25,06 | 907,19 |
| Barrio El Aguacate | 1.159.885 | 748.848 | QDY - 001 | 30 | 8,23 | 12 | 0,60 | 0,15 | 27,64 | 907,19 |
| Barrio El Aguacate | 1.159.980 | 748.608 | QDCR - 1 | 29 | 8,56 | 12 | 0,60 | 0,15 | 27,31 | 873,45 |
| Barrio El Aguacate | 1.160.018 | 748.651 | QDCR - 2 | 40 | 8,56 | 12 | 0,89 | 0,20 | 30,76 | 1.645,27 |
| Camino El Placer | 1.160.334 | 748.336 | CPL - 001 | 40 | 14,46 | 12 | 1,51 | 0,34 | 30,76 | 2.138,38 |
| Camino El Placer | 1.160.316 | 748.329 | CPL - 002 | 45 | 14,46 | 12 | 1,80 | 0,39 | 32,20 | 2.851,57 |
| Camino El Placer | 1.160.296 | 748.325 | CPL - 003 | 34 | 14,46 | 9 | 1,05 | 0,28 | 26,34 | 1.513,85 |
| Camino El Placer | 1.160.280 | 748.327 | CPL - 004 | 29 | 14,46 | 9 | 0,87 | 0,24 | 24,73 | 1.135,23 |
| Camino El Placer | 1.160.192 | 748.316 | CPL - 005 | 29 | 14,46 | 9 | 0,87 | 0,24 | 24,73 | 1.135,23 |
| Camino El Placer | 1.160.135 | 748.327 | CPL - 006 | 29 | 14,46 | 9 | 0,87 | 0,24 | 24,73 | 1.135,23 |
| Quebrada El Placer | 1.160.382 | 748.126 | PL - 001 | 30 | 8,25 | 12 | 0,60 | 0,15 | 27,64 | 908,30 |
| Quebrada El Placer | 1.160.399 | 748.130 | PL - 002 | 31 | 8,25 | 9 | 0,54 | 0,14 | 25,38 | 962,11 |
| Quebrada El Placer | 1.160.433 | 748.128 | PL - 003 | 28 | 8,25 | 12 | 0,56 | 0,14 | 26,98 | 809,52 |
| Quebrada El Placer | 1.160.452 | 748.122 | PL - 004 | 35 | 8,25 | 9 | 0,62 | 0,16 | 26,66 | 1.211,23 |
| Cerrajería Portuguesa | 1.160.365 | 747.872 | CER - 008 | 29 | 8,25 | 9 | 0,50 | 0,14 | 24,73 | 857,49 |
| Cerrajería Portuguesa | 1.160.442 | 747.769 | CER - 007 | 30 | 7,65 | 12 | 0,56 | 0,14 | 27,64 | 874,64 |
| Cerrajería Portuguesa | 1.160.550 | 747.598 | CER - 006 | 42 | 7,65 | 9 | 0,76 | 0,19 | 28,76 | 1.745,14 |
| Cerrajería Portuguesa | 1.160.549 | 747.571 | CER - 005 | 26 | 7,65 | 9 | 0,41 | 0,12 | 23,72 | 694,75 |
| Cerrajería Portuguesa | 1.160.555 | 747.549 | CER - 004 | 39 | 7,65 | 9 | 0,67 | 0,17 | 27,88 | 1.468,35 |
| Cerrajería Portuguesa | 1.160.563 | 747.391 | CER - 003 | 28 | 7,65 | 12 | 0,52 | 0,13 | 26,98 | 779,53 |
| Cerrajería Portuguesa | 1.160.558 | 747.368 | CER - 001 | 37 | 7,65 | 12 | 0,72 | 0,17 | 29,86 | 1.308,67 |
| EMPRESA MAGA | 1.160.555 | 747.289 | MAGA - 002 | 25 | 7,65 | 15 | 0,53 | 0,13 | 27,97 | 655,89 |
| EMPRESA MAGA | 1.160.555 | 747.267 | MAGA - 001 | 35 | 7,65 | 12 | 0,67 | 0,16 | 29,24 | 1.166,35 |

Tabla #45. Parámetros geomecánicos según Hoek, túnel Mampote.

| TÚNEL: MAMPOTE LOCALIDAD | COORDENADAS U.T.M | | PLANILLA | GSI | σ_{ci} (MPa) | m_i | σ_{cm} (MPa) | C_m (MPa) | φ_m (Grados) | E_m (MPa) |
|------------------------------------|-------------------|---------|-----------|-----|------------------------|-------|------------------------|----------------|-------------------------|----------------|
| | NORTE | ESTE | | | | | | | | |
| Quebrada Última | 1.158.440 | 756.420 | QG - 001 | 32 | 20,85 | 7 | 1,23 | 0,37 | 23,44 | 1619,98 |
| Quebrada Última | 1.158.503 | 756.455 | QG - 002 | 32 | 20,85 | 7 | 1,23 | 0,37 | 23,44 | 1619,98 |
| Barrio Divino Niño | 1.158.389 | 756.310 | DN - 001 | 35 | 28,75 | 12 | 2,50 | 0,60 | 29,24 | 2261,04 |
| Barrio Divino Niño | 1.158.392 | 756.368 | DN - 002 | 34 | 28,75 | 12 | 2,42 | 0,58 | 28,93 | 2134,56 |
| Barrio Divino Niño | 1.158.324 | 765.376 | DN - 003 | 33 | 28,75 | 12 | 2,33 | 0,56 | 28,61 | 2015,15 |
| Barrio Divino Niño | 1.158.381 | 756.114 | DN - 004 | 37 | 28,75 | 12 | 2,69 | 0,63 | 29,86 | 2536,93 |
| Barrio Divino Niño | 1.158.383 | 756.120 | DN - 005 | 43 | 28,75 | 12 | 3,34 | 0,74 | 31,64 | 3583,50 |
| Barrio Divino Niño | 1.158.321 | 756.148 | DN - 006 | 36 | 28,75 | 12 | 2,60 | 0,61 | 29,55 | 2395,01 |
| Barrio Divino Niño | 1.158.296 | 756.153 | DN - 007 | 36 | 28,75 | 10 | 2,38 | 0,59 | 27,91 | 2395,01 |
| Barrio Divino Niño | 1.158.371 | 756.118 | DN - 008 | 35 | 28,75 | 10 | 2,29 | 0,58 | 27,60 | 2261,04 |
| Quebrada MA (QMA) | 1.158.580 | 755.995 | QMA - 001 | 35 | 28,75 | 19 | 3,18 | 0,67 | 33,38 | 2261,04 |
| Quebrada MA (QMA) | 1.158.550 | 756.005 | QMA - 002 | 38 | 28,75 | 19 | 3,51 | 0,72 | 34,30 | 2687,25 |
| Quebrada MA (QMA) | 1.158.500 | 756.000 | QMA - 003 | 33 | 28,75 | 19 | 2,98 | 0,64 | 32,75 | 2015,15 |
| Quebrada MA (QMA) | 1.158.412 | 756.017 | QMA - 004 | 47 | 28,75 | 13 | 3,98 | 0,83 | 33,48 | 4511,36 |
| Quebrada MB (QMB) | 1.158.440 | 755.890 | QMB - 001 | 40 | 31,05 | 13 | 3,36 | 0,75 | 31,48 | 3133,39 |
| Quebrada MB (QMB) | 1.158.460 | 755.890 | QMB - 002 | 39 | 31,05 | 13 | 3,24 | 0,73 | 31,19 | 2958,11 |
| Quebrada MB (QMB) | 1.158.500 | 755.890 | QMB - 003 | 35 | 31,05 | 13 | 2,82 | 0,65 | 29,96 | 2349,71 |
| Quebrada Ezequiel Zamora (QEZ) | 1.158.520 | 755.563 | QEZ - 001 | 45 | 31,05 | 19 | 4,74 | 0,92 | 36,34 | 4178,44 |
| Quebrada Ezequiel Zamora (QEZ) | 1.158.564 | 755.596 | QEZ - 002 | 35 | 31,05 | 19 | 3,44 | 0,72 | 33,38 | 2349,71 |
| Quebrada Ezequiel Zamora (QEZ) | 1.158.743 | 755.540 | QEZ - 003 | 45 | 31,05 | 13 | 4,00 | 0,85 | 32,92 | 4178,44 |
| Quebrada Ezequiel Zamora (QEZ) | 1.158.725 | 755.460 | QEZ - 004 | 40 | 31,05 | 19 | 4,04 | 0,82 | 34,90 | 3133,39 |
| Carretera Barrio Divino Niño (CDN) | 1.158.534 | 755.922 | CDN - 001 | 37 | 31,05 | 13 | 3,02 | 0,69 | 30,58 | 2636,42 |
| Carretera Barrio Divino Niño (CDN) | 1.158.550 | 755.932 | CDN - 002 | 48 | 31,05 | 13 | 4,45 | 0,93 | 33,75 | 4966,09 |
| PORTAL ENTRADA (BA) | 1.158.870 | 755.090 | BA - 001 | 25 | 34,00 | 13 | 2,17 | 0,55 | 26,68 | 1382,74 |

CAPÍTULO VII

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Geología

a) *Litología*

La zona de estudio está compuesta en su totalidad por rocas metamórficas correspondientes a la Formación Las Mercedes.

Todas las rocas encontradas en el área son de aspecto foliado y con variaciones en el tamaño de grano, lo que conlleva a clasificarlas como: filitas, esquistos y esquistos de aspecto gnéisico. Los litotipos presentes se encuentran distribuidos de manera uniforme a lo largo de toda la zona de estudio presentando solo algunas variaciones mineralógicas locales. Además, es necesario mencionar que el grafito está presente en la mayoría de los casos, característica importante para la identificación del protolito de la roca.

b) *Metamorfismo*

La zona de estudio está conformada en su totalidad por la Formación Las Mercedes, la cual se presenta según AGUERREVERE & ZULOAGA (1937), en toda la extensión y en los flancos del macizo central de la Cordillera de la Costa, entre Carenero, estado Miranda, hasta el estado Cojedes. Por otra parte, el área de estudio comprende tres secciones de un tramo ubicado entre La Culebrita y Puerta del Este, siguiendo una trayectoria cercana al curso del río Guarenas. La primera sección va desde la zona este de la quebrada Perico ubicada al oeste del sector la Culebrita, con

coordenadas N:1.161.300 y E:746.250, hasta el extremo oeste de la quebrada La Encantada (zona correspondiente al primer túnel, La Encantada), la segunda inicia al este de la quebrada La Encantada y finaliza al oeste del helipuerto del Estado Miranda (zona correspondiente al segundo túnel, Caucagüita) y por último la tercera sección, que inicia en una zona ubicada al este de Terrazas de Mampote y culmina 1 km al oeste del cementerio situado en las cercanías de la carretera vieja Caracas-Guarenas con coordenadas N:1.158.750 y E:752.750, a una distancia aproximada de 3 km del sector Puerta del Este (zonas correspondiente al tercer túnel, Mampote).

Cada una de éstas secciones se corresponde con uno a dos grupos litológicos respectivamente, como lo es el caso del tramo correspondiente al túnel La Encantada, el cual está compuesto por la unidad Klm1, el tramo correspondiente al túnel Caucagüita, compuesto por las unidades Klm1 y Klm3 y por último el tramo correspondiente al túnel de Mampote, compuesto por las unidades Klm2 y Klm5.

Para cada uno de los litotipos identificados en el área de estudio y que componen las secciones de túnel, se estableció una asociación mineralógica basándose en los minerales índices de facies metamórficas, los cuales resultan de la composición mineralógica original de los protolitos que dieron origen a dichas rocas, así como de las condiciones de temperatura y presión que éstas alcanzaron.

Debido a que los litotipos están compuestos totalmente por rocas metamórficas, se puede asegurar que cada uno de éstos involucra una roca protolito y un grado de metamorfismo, lo que ayudaría a definir la facies metamórfica de la formación. A continuación se presentan las secciones de túnel con los grupos litológicos que la componen:

✧ *Túnel La Encantada*

Esta sección está construida en su totalidad por la unidad litológica K1m1, la cual está compuesta por:

- I. *ESQUISTO CALCÁREO-CUARZOSO*
- II. *ESQUISTO CUARZOSO DE ASPECTO GNEÍSICO MUSCOVÍTICO-FELDESPÁTICO*

✧ *Túnel Caucagüita*

Esta sección está compuesta por las unidades K1m1, K1m3 y la subdivisión de ésta última K1m3 (g). En dicha zona se mantienen las características litológicas de la unidad K1m1, expuestas en la sección de túnel anterior, hasta el intervalo comprendido entre las progresivas 7+900 y 7+930, el mismo intervalo corresponde con la zona de contacto entre las unidades K1m1 y K1m3 y es considerada una zona de falla normal con rumbo aproximado N 20° E . A continuación se nombrarán las rocas que componen éstas unidades:

- I. *ESQUISTO CALCÁREO-CUARZOSO (K1m1)*
- II. *ESQUISTO CUARZOSO DE ASPECTO GNEÍSICO MUSCOVÍTICO-FELDESPÁTICO (K1m1)*
- III. *ESQUISTO CUARZO FELDESPÁTICO CALCÁREO O NO (k1m3)*
- IV. *ESQUISTO MICÁCEO (K1m3)*
- V. *FILITA MICÁCEA -GRAFITOSA (K1m3)*

✦ *Túnel Mampote*

La sección del túnel de Mampote está compuesta por las unidades K1m2 y K1m5, las cuales están divididas por una falla normal con dirección N 40° E, ubicada en el intervalo comprendido entre las progresivas 16+390 y 16+410. Las rocas que componen éstas unidades son las siguientes:

- I. *ESQUISTO CALCÁREO-CUARZO-MUSCOVÍTICO-GRAFITOSO (K1m2)*
- II. *ESQUISTO MICÁCEO ALGO CUARZOSO (K1m5)*
- III. *FILÍTA MICÁCEA LIGERAMENTE GRAFITOSA, CALCÁREA O NO (K1m5)*

Protolitos de las unidades

La presencia constante de cuarzo, micas y calcita, evidencia un protolito sedimentario, además, la abundancia de filosilicatos en éstas rocas revela que los mismos se formaron como producto del metamorfismo de las abundantes arcillas presentes en la zona, la cual se puede determinar como un ambiente de plataforma de energía baja a media y además anóxico, en algunos casos, debido a la presencia de pirita y grafito (generado por materia orgánica) en las muestras. La variación en el tamaño de grano y la presencia de calcita sirven como referencia para estimar el tipo de ambiente en el que se creó la roca original, debido a que las rocas más alejadas de la línea de costa presentan un tamaño de grano más fino y muy poca concentración de calcita, mientras que las más cercanas poseen altas concentraciones de calcita y un tamaño de grano mayor.

Metamorfismo de las unidades

La presencia de clorita, muscovita y en pocos casos de epidoto, en conjunto con la ausencia de zeolitas, prehnita, pumpellita y lawsonita, sugieren que éstas rocas sufrieron un metamorfismo que alcanzaron las facies de los esquistos verdes, ubicándose en la zona de la clorita, con una presión comprendida entre los 2 y 12 Kbar y un rango de temperatura de 300° a 600°.

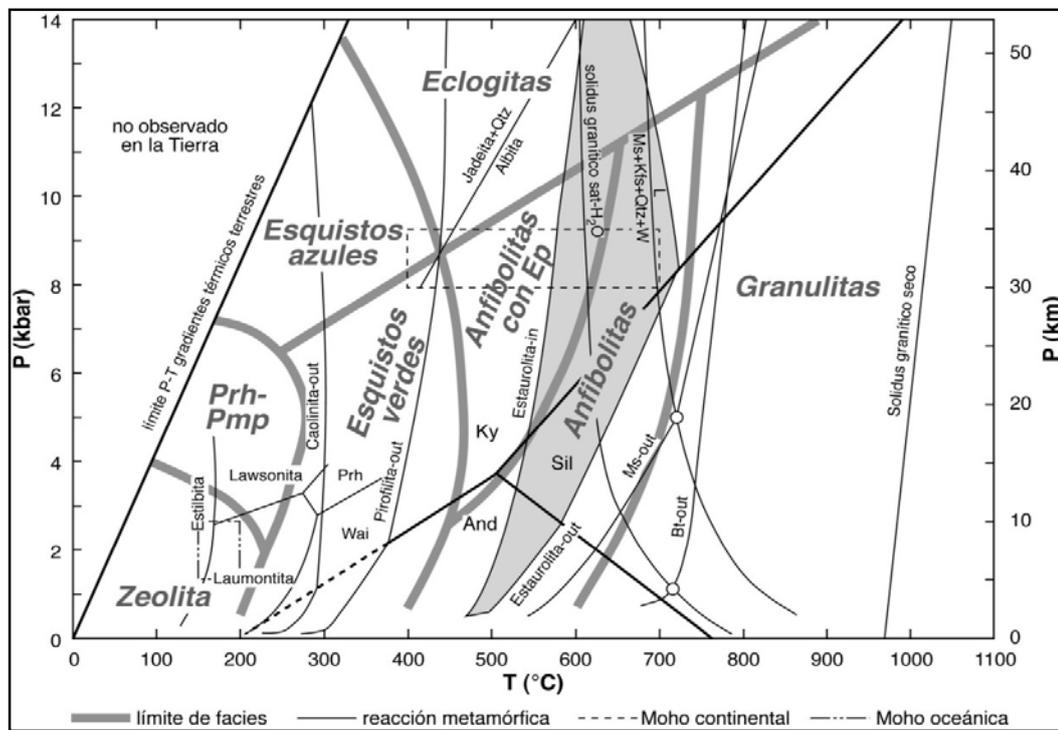


Figura # 61. Facies Metamórficas (Tomado de www.ugr.es/geopeta/ej6.htm)

c) *Geología Estructural*

La presencia de numerosas fallas de carácter local aunada a la existencia de fallas de mayor envergadura, como la de Caucaгүйita y El Ávila, resultan en un complejo cuadro estructural que ha dado como resultado tres familias de diaclasas y una dirección de foliación preferencial, aunque con mucha dispersión en dichos planos, en los tres macizos rocosos estudiados.

La dirección principal de acortamiento, responsable de la dirección de la foliación corresponde con $N 40^\circ - 50^\circ O$, lo cual se aprecia claramente en la figura #62.

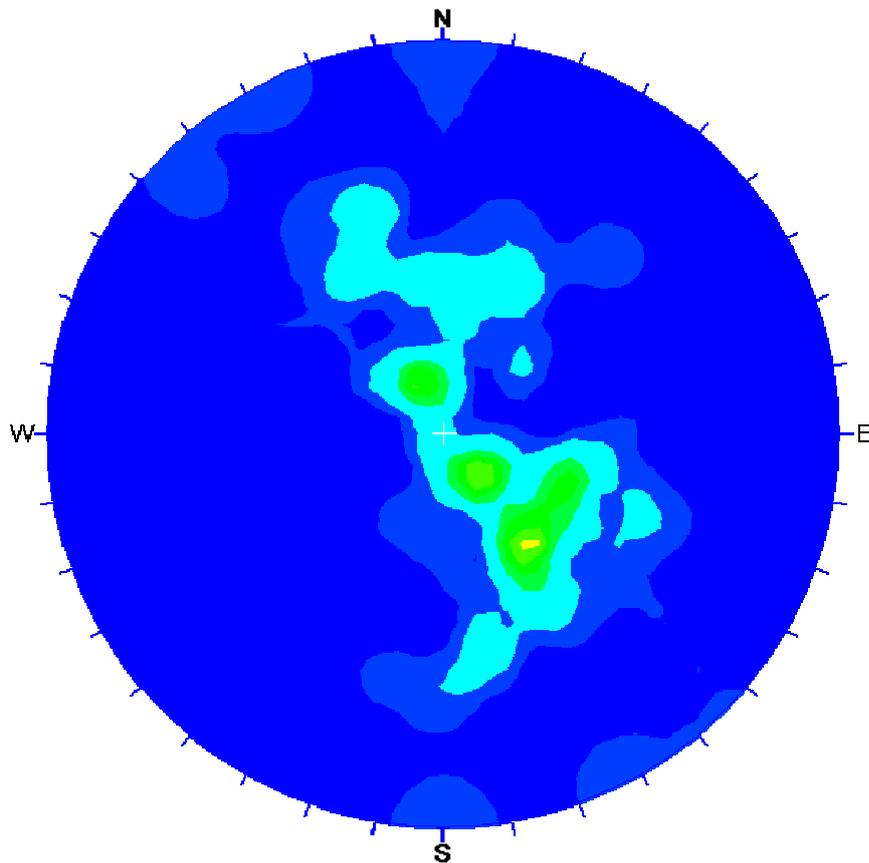


Figura #62. Diagrama que muestra la concentración de polos de la foliación dominante en los tres túneles del proyecto, donde se aprecia los bajos buzamientos de dichos planos entre 15° y 35° Norte.

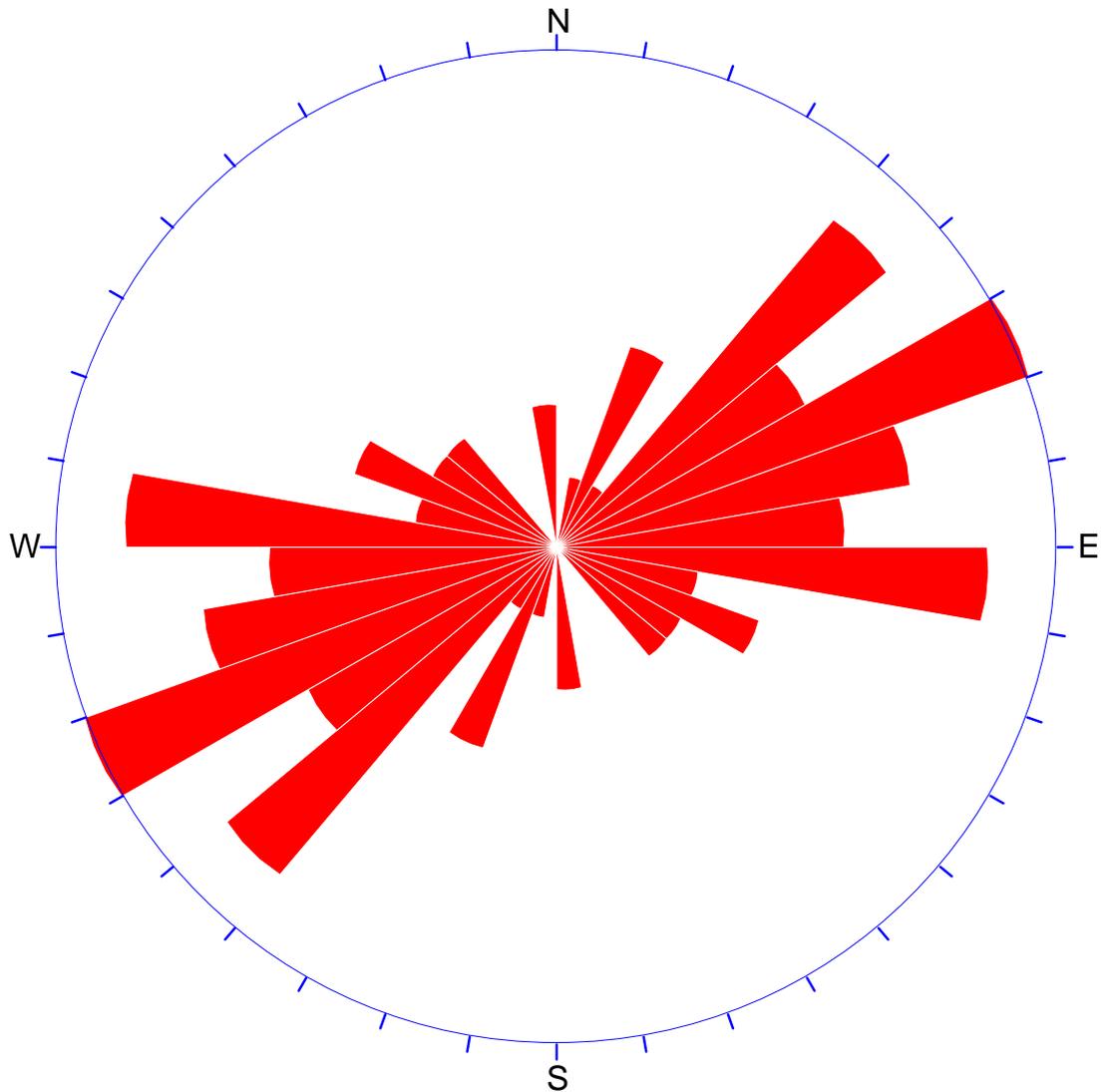


Figura #63. Diagrama que muestra la dirección principal de la foliación dominante en los tres túneles del proyecto, N 60° - 70° E.

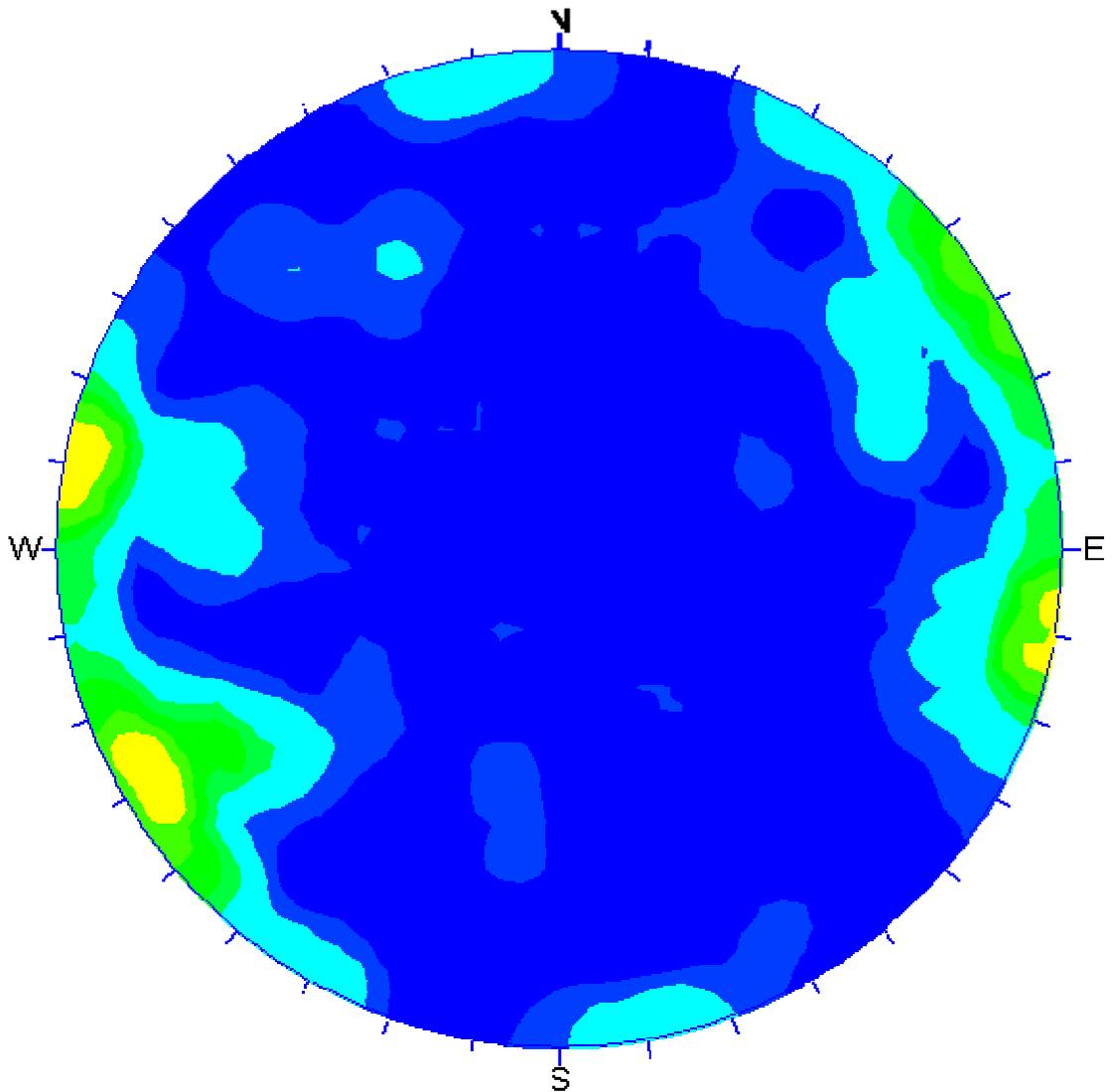


Figura #64. Diagrama que muestra la concentración de polos de las diaclasas dominantes en los tres túneles del proyecto, mostrando buzamientos subverticales para las familias de diaclasas.

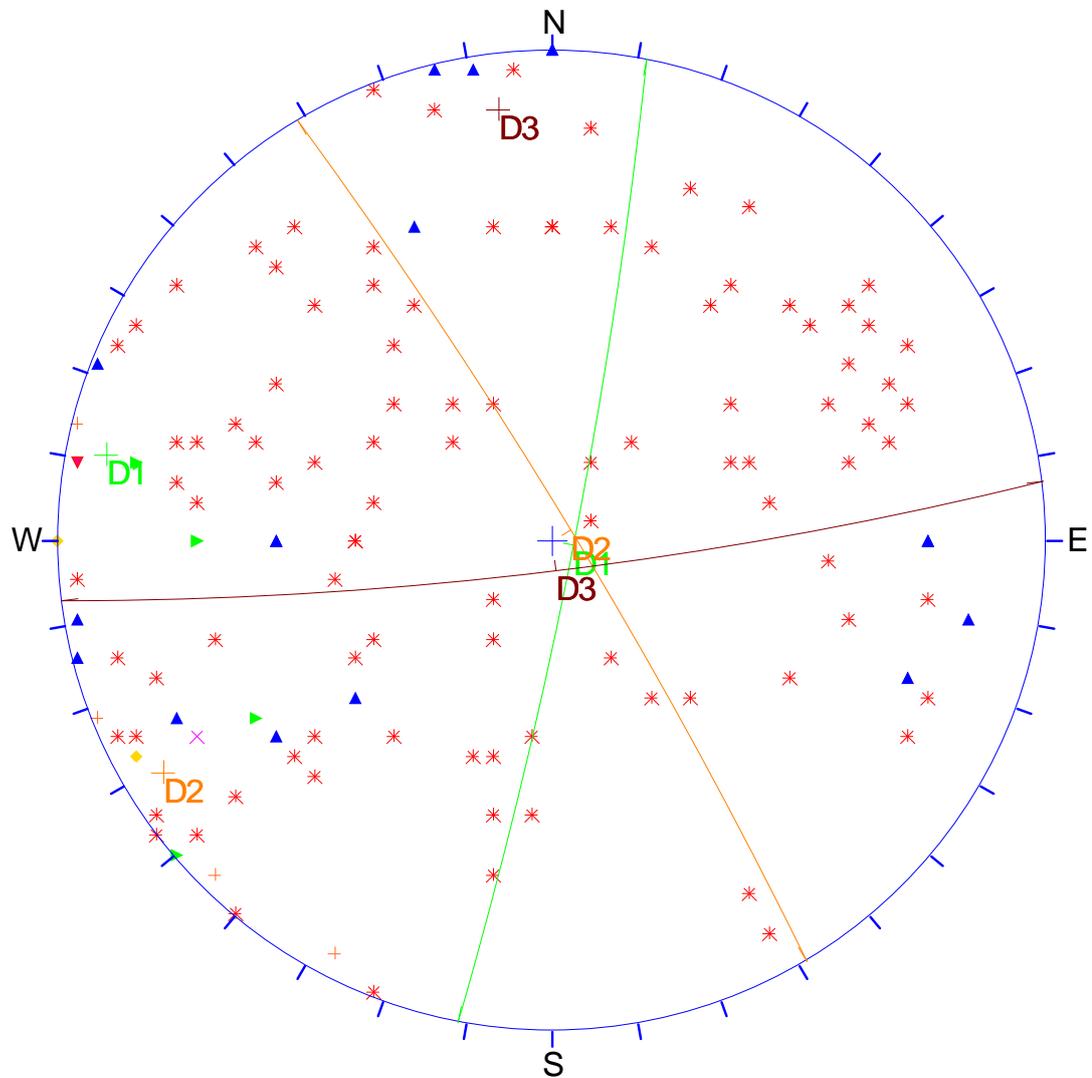


Figura #65. Diagrama que muestra las diaclasas dominantes en los tres túneles del proyecto, Tres familias, **D1: N 11° E 85° S**, **D2: N 31° O 85°N**, **D3: N 83° E 83° S**. (* Uno, ▲ Dos, ► Tres, + Cuatro, x Cinco, ◆ Seis, ▼ Siete Polos).

Geomecánica

El proyecto ferroviario Sistema Caracas – Guarenas – Guatire contempla tres túneles, denominados en sentido oeste – este: La Encantada, con una longitud aproximada de 906 m.; Caucagüita, con 3087 m. de longitud aproximada y Mampote con una longitud aproximada de 1742 m.

✦ *Túnel La Encantada*

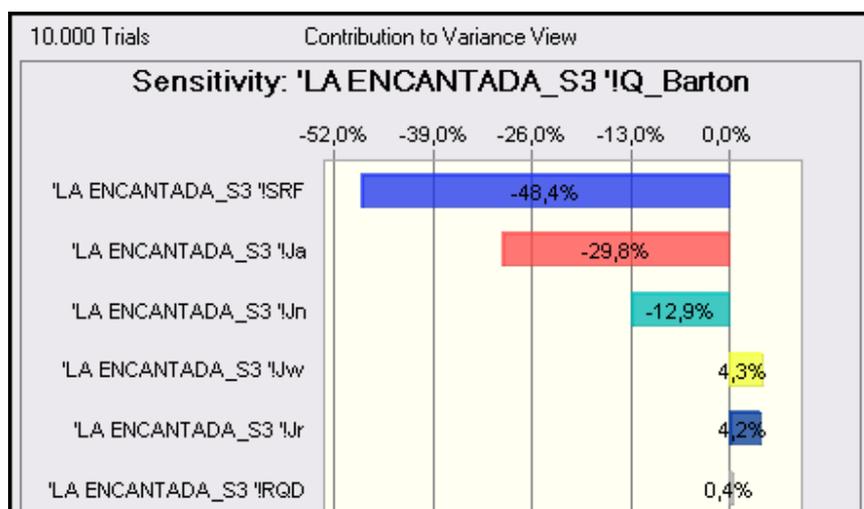
La roca presente en este túnel posee un peso unitario que se ubica entre 2,50 – 2,70 ton/m³ y una absorción entre 0,55 – 1,70 %. Posee en la clasificación RMR valores entre 30 – 46 lo que corresponde a una clase de roca IV – III de calidad Mala – Media; en la clasificación RMi obtuvo valores entre 2,53 – 3,98 que se corresponde con valores altos en dicho sistema.

En la clasificación Q de Barton, obtuvo valores entre 0,30 – 3,73 que le confieren una calidad de roca E – D, entiéndase Muy Mala – Mala. Implicando esto el uso del siguiente sostenimiento: Hormigón proyectado con fibras, 50 – 150 mm de espesor y colocación de pernos, S (fr)+B). En el cálculo del valor de Q, para todos los túneles, se aplicó el programa de estadística Crystal Ball, que permitió determinar una probabilidad de ocurrencia de dicho valor entre 60% – 70% y un coeficiente de variación entre 0,34 – 0,66, lo que significa que la desviación estándar posee un valor relativo a la media muy alto debido a la incertidumbre de los parámetros medidos. También se generó una tabla de sensibilidad de los parámetros involucrados en el cálculo de Q donde se aprecia la relevancia que posee tanto el SRF (48%) como el Ja (29%) en dicho valor.

La zona correspondiente a la clasificación de Muy Mala (E), entre las progresivas 5+930 – 6+270, presenta numerosas evidencias de deslizamientos los

cuales influyen fuertemente en la calidad geomecánica de la roca, mas aun tratándose del Esquisto Calcáreo Cuarzo de Klm 1, que se encuentra a lo largo de este túnel.

Tabla #46. Sensibilidad de los parámetros en el cálculo del Q de Barton, túnel La Encantada.



✦ *Túnel Caucağıita*

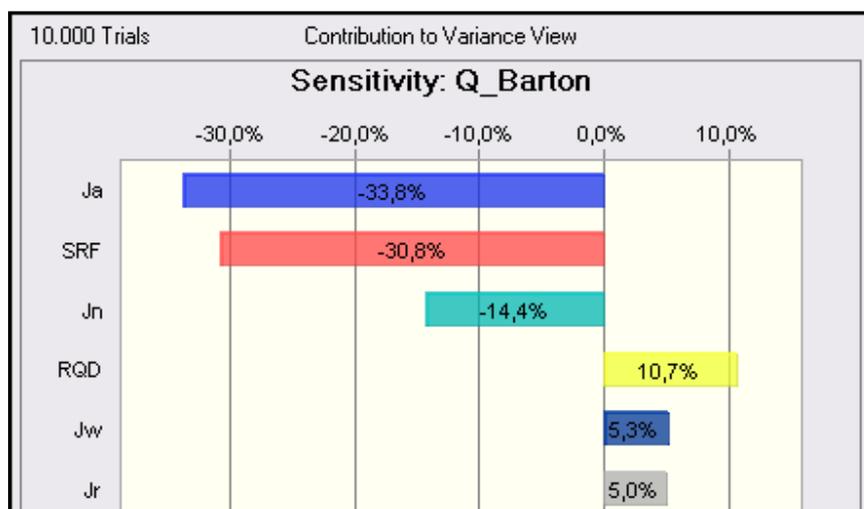
La roca presente en este túnel posee un peso unitario que se ubica entre 2,19 – 2,97 ton/m³ y una absorción entre 0,68 – 3,56 %. Posee en la clasificación RMR valores entre 31 – 48 lo que corresponde a una clase de roca IV – III de calidad Mala – Media; en la clasificación RMi obtuvo valores entre 0,30 – 7,80 que se corresponde con valores desde Moderado – Altos en dicho sistema.

En la clasificación Q de Barton, obtuvo valores entre 0,17 – 4,29 que le confieren una calidad de roca E – C, entiéndase Muy Mala – Media. Implicando esto el uso del siguiente sostenimiento: Hormigón proyectado, 40 – 100 mm de espesor y colocación de pernos, B + S, entre las progresiva 8+440 – 8+750 en la cual se encuentra la unidad Klm3 (g) compuesta por Esquistos de foliación muy gruesa (aspecto gnéisico) cuarzo feldespáticos calcáreos. Para el resto del trazado en este túnel se debería emplear el Hormigón proyectado con fibras, 50 – 150 mm de espesor

y colocación de pernos, S (fr)+B. La probabilidad de ocurrencia de los valores de Q en este túnel se encuentran entre 60% – 70% y un coeficiente de variación entre 0,34 – 0,87, lo que significa que la desviación estándar posee un valor relativo a la media extremadamente alto debido a la incertidumbre de los parámetros medidos. También se generó una tabla de sensibilidad de los parámetros involucrados en el cálculo de Q donde se aprecia la relevancia que posee tanto el Ja (34%) como el SRF (31%) en dicho valor.

La zona correspondiente a la clasificación de Muy Mala (E), entre las progresivas 7+900 – 7+930, es una zona de falla que coloca en contacto la unidad Klm 1 (Esquisto Calcáreo Cuarzo) con Klm 3 (Esquisto Cuarzo Feldespático Calcáreo, Esquisto Micáceo); y la zona entre las progresivas 8+780 – 9+430 está compuesta básicamente por las Filitas Micáceas que se intercalan en la unidad Klm3 (g) y es por ello su baja calidad geomecánica (E).

Tabla #47. Sensibilidad de los parámetros en el cálculo del Q de Barton, túnel Caucaгүйта.

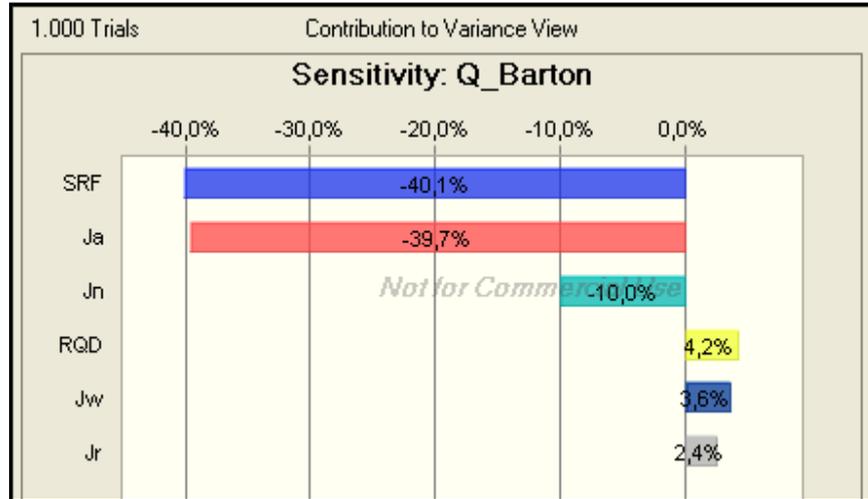


✦ *Túnel Mampote*

La roca presente en este túnel posee un peso unitario que se ubica entre 2,45 – 2,54 ton/m³ y una absorción entre 0,81 – 1,79 %. Posee en la clasificación RMR valores entre 35 – 50 lo que corresponde a una clase de roca IV – III de calidad Mala – Media; en la clasificación RMi obtuvo valores entre 1,11 – 5,41 que se corresponde con valores Altos en dicho sistema.

En la clasificación Q de Barton, obtuvo valores entre 0,012 – 5,96 que le confieren una calidad de roca G – C, entiéndase Excepcionalmente Mala – Media. Implicando esto el uso del siguiente sostenimiento: Revestimiento de Hormigón CCA, entre las progresiva 16+010 – 16+400 en la cual se encuentra la unidad Klm2 compuesta por Esquisto Calcáreo Cuarzo Moscovítico Grafítico y presenta un cizallamiento realmente fuerte. Entre las progresivas 17+300 – 17+560 se debería emplear el Hormigón proyectado, 40 – 150 mm de espesor y colocación de pernos, B + S; y para el resto del trazado de este túnel se debería emplear como sostenimiento el Hormigón proyectado con fibras, 50 – 120 mm de espesor y colocación de pernos, S (fr)+B. La probabilidad de ocurrencia de los valores de Q en este túnel se encuentran entre 60% – 90% y un coeficiente de variación entre 0,31 – 0,77, lo que significa que la desviación estándar posee un valor relativo a la media muy alto debido a la incertidumbre de los parámetros medidos. También se generó una tabla de sensibilidad de los parámetros involucrados en el cálculo de Q donde se aprecia la relevancia que posee tanto el SRF (40%) como el Ja (39%) en dicho valor. (Ver Tabla # 48).

Tabla #48. Sensibilidad de los parámetros en el cálculo del Q de Barton, túnel Mampote.



CAPÍTULO VIII

CONCLUSIONES

La zona de estudio está compuesta en su totalidad por rocas metamórficas pertenecientes a la formación Las Mercedes, las mismas poseen un aspecto foliado y variación en el tamaño de grano, lo que genera la aparición de filitas, esquistos y esquistos de aspecto gnéisicos. En general, los esquistos aparecen en toda el área de estudio, es decir, en las cuatro unidades litológicas estudiadas, mientras que las filitas aparecen de manera intercalada con los mismos en las unidades Klm3 y Klm5, y los esquistos de aspecto gnéisico en la unidad Klm1 y la sub- unidad Klm3 (g).

Las rocas presentes en el área de estudio poseen un protolito de origen sedimentario de ambiente anóxico. Esto se ve evidenciado por la presencia de cuarzo, filosilicatos y calcita en las muestras estudiadas, además, por la aparición de grafito y pirita, lo que acentúa la hipótesis de un ambiente anóxico.

En cuanto al metamorfismo sufrido por las rocas presentes en la zona, se puede decir que las mismas están afectadas por un metamorfismo que alcanzó la facies de los esquistos verdes.

La zona de estudio presenta una alta complejidad estructural que se ve evidenciada por la gran cantidad de fallas que la afectan y que han generado las bajas condiciones geomecánicas en los macizos rocosos en cuestión, además existen dos fallas de gran alcance como lo son la de Caucagüita y El Ávila. La dirección predominante de foliación es N 60° - 70° E con valores de buzamiento bajos, entre 15° y 35° Norte.

Se identificaron tres familias de diaclasas con las siguientes direcciones: **D1: N 11° E 85° S, D2: N 31° O 85°N, D3: N 83° E 83° S**, aunque en ciertas zonas de los macizos rocosos se encontraron hasta cinco familias.

En cuanto al comportamiento geomecánico se encontraron grandes variaciones en la calidad de la roca debida principalmente a efectos de tectonismo y condiciones litológicas desfavorables, existiendo zonas caracterizadas como Excepcionalmente Malas y otras, de menor extensión areal, de calidad Media que inciden de forma directa en el tipo de sostenimiento a utilizar y repercute inexorablemente en los costos del proyecto.

El uso de valores estadísticos en los cálculos del Q de Barton generan una gran fiabilidad en los mismos y muestran un panorama distinto en cuanto al uso de estos sistemas de clasificación ya que se evitan, en lo posible, las subjetividades del autor al determinar el número de diaclasas por metro o los valores de GSI, y se puede determinar cuan posible sea que el valor calculado represente el correcto a utilizar.

RECOMENDACIONES

- ✘ Realizar un estudio de geodinámica de superficie detallado en las zonas correspondientes a los portales de entrada y salida de las secciones de túnel.

- ✘ Evitar la construcción de viviendas y empresas en la superficie de los macizos correspondientes a las secciones de túnel, ya que eso podría ocasionar la percolación de aguas servidas, las cuales poseen un grado de acidez que afectaría de manera determinante la obra.

- ✘ Realizar el estudio detallado con núcleos de perforación a fin de tener valores de las propiedades geomecánicas más fiables, debido a la gran cobertura existente en la mayoría de los trayectos.

BIBLIOGRAFIA

BIENIAWSKI, Z. T. (1989). **Engineering rock mass classifications**. New York. John Wiley and Sons Inc: pp. 251.

GONZÁLEZ, L. I. *ET AL.* (2002). **Ingeniería Geológica**. Madrid. Prentice Hall: pp. 744.

GONZÁLEZ DE VALLEJO, L. I. (2003). **SRC rock mass classifications of tunnels under high tectonics stress excavated in weak rocks**. Engineering Geology. Elsevier, LXIX (3-4): pp. 273-285.

HOEK, E. & BROWN, E. T. (1997). **Practical estimates of rock mass strength**. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. Elsevier, XXXIV (8): pp. 1165-1186.

[HTTP://WWW.COTATUR.GOV.VE](http://www.cotatur.gov.ve). [CONSULTA: DICIEMBRE, 2007].

[HTTP://WWW.MIPUNTO.COM/VENEZUELAVIRTUAL/000/002/035/010.HTML](http://www.mipunto.com/venezuelavirtual/000/002/035/010.html). [CONSULTA: ENERO, 2008].

[HTTP://WWW.PDV.COM/LEXICO/LEXICOH.HTM](http://www.pdv.com/lexico/lexicoh.htm). [CONSULTA: ENERO, 2008].

[HTTP://WWW.YV5FIH.ORG.VE/CLIMA_DE_VENEZUELA.HTML](http://www.yv5fih.org.ve/clima_de_venezuela.html)
[CONSULTA: ENERO, 2008].

MARINOS, P. & HOEK, E. (2001). **Estimating the geotechnical properties of heterogeneous rock masses such as flysch**. Bulletin of the International Association of Engineering Geologist. (60): pp. 85–92.

- PERRI, G. (1999). **Contribución a la caracterización geomecánica de los macizos rocosos en base al GSI de Hoek.** Boletín de la Sociedad Venezolana de Geotecnia. (75).
- PERRI, G. (2002). **Proyecto de Túneles: Criterios de Diseño.** Boletín de la Sociedad Venezolana de Geotecnia. (81): pp. 3-41.
- SEIDERS, V. (1965). **Geología de Miranda central, Venezuela.** Boletín de Geología, VI (12): 289-416.
- SINGER, A., SCHMITZ, M., *ET AL.* (2008). **Estudio de amenaza sísmica, procesos geomorfológicos activos y estimación de los efectos de sitio para el proyecto del tren Caracas-Guarenas-Guatire.** Informe técnico. (40).
- TRUZMAN, M. (2000). **Determinación del índice de resistencia geológica (GSI) en rocas metamórficas de la cordillera de la costa.** Boletín de la Sociedad Venezolana de Geotecnia. (78).
- URBANI, F. Y J. RODRÍGUEZ (2003). **Atlas Geológico de la Cordillera de la Costa. Venezuela. UCV. FUNVISIS.**