



Vigilada Mineducación

ESTIMACIÓN DEL ÍNDICE DE RESISTENCIA GEOLÓGICA EN MACIZOS
ROCOSOS ESTRATIFICADOS BASADO EN LA TEORÍA FRACTAL

Estimation of Geological Strength Index in stratified rock mass based on fractal
theory

EDUARD ENRIQUE PALMEZANO PINTO

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de Magíster
en Ingeniería

Asesor, docente

JOHNATAN RAMOS RIVERA

UNIVERSIDAD EAFIT
ESCUELA DE INGENIERÍAS
MAESTRÍA EN INGENIERÍA
MEDELLÍN

2021

**ESTIMACIÓN DEL ÍNDICE DE
RESISTENCIA GEOLÓGICA EN
MACIZOS ROCOSOS
ESTRATIFICADOS BASADO EN LA
TEORÍA FRACTAL**

*Estimation of Geological Strength Index in stratified rock mass based on
fractal theory*

Por: EDUARD ENRIQUE PALMEZANO PINTO

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de
Magíster en Ingeniería

Diciembre 2021
Medellín, Colombia

Docente Asesor: JOHNATAN RAMOS RIVERA

© 2021, Eduard Palmezano-Pinto, Universidad EAFIT

Ninguna parte de esta tesis puede reproducirse o transmitirse bajo ninguna forma o por ningún medio o procedimiento, sin permiso por escrito del autor o la Universidad.

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento

“...Porque no hay nada como el beso de una madre, el abrazo de un buen padre y el cariño de un hogar.”

Romualdo Brito: Mis Viejos Queridos

A mis padres Ildemaro y Anselma que me enseñaron el valor de la educación como herramienta de vida.

A mi esposa Angélica y a mis hijos Gabriel y Miguel quienes me acompañan siempre en todos mis sueños y metas.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco especialmente a Integral S.A. por todo el apoyo en mi crecimiento profesional, darme la oportunidad de consolidar mis conocimientos como Ingeniero Geólogo, tanto desde el campo laboral al abrirme las puertas de grandes proyectos de infraestructura, así como en lo académico donde me han respaldado para seguir creciendo en mi formación profesional. Muy especialmente, a los ingenieros Óscar Moreno y Belin Márquez por su apoyo incondicional para realizar este estudio.

A la Secretaría de Infraestructura Física de la Gobernación de Antioquia por permitir la utilización de la información del proyecto denominado “Construcción del Túnel Guillermo Gaviria Echeverri y sus Vías de Acceso”.

Al Consorcio Antioquia al Mar – CAM – quien me facilitó toda la información del proyecto en sus etapas de preconstrucción y construcción para la elaboración de este trabajo.

Especialmente quiero agradecer a mi Asesor Johnatan Ramos Rivera, por ese voto de confianza, además fue quien, con su acompañamiento permanente, dedicación y paciencia me orientó desde el inicio de este proyecto.

Finalmente, quiero agradecer infinitamente a mi madre Anselma Pinto, a mi padre Ildemaro Palmezano, a mi Esposa Angélica Bonilla y a mis hijos Gabriel y Miguel quienes siempre me acompañan en cada emprendimiento que acometo para ser el cimiento que me lleva a alcanzar las metas propuestas. A Alejandro Bonilla por su apoyo durante el desarrollo de este trabajo.

¡MUCHAS GRACIAS!

Resumen

El Índice de Resistencia Geológica (GSI por sus siglas en inglés), que ha sido utilizado ampliamente para el diseño numérico y la construcción de obras subterráneas, es un índice de clasificación que tiene en cuenta los parámetros de resistencia y deformación del macizo rocoso basado en los criterios de falla generalizados de Hoek-Brown y Mohr-Coulomb. El GSI se puede estimar utilizando un gráfico estándar y observaciones de campo basados en dos parámetros que definen la resistencia y la deformabilidad de la matriz rocosa y las discontinuidades. El valor GSI da una representación numérica de la calidad geotécnica general del macizo rocoso. En este estudio, se propone un método para determinar el GSI cuantitativamente utilizando imágenes fotográficas de afloramientos de rocas estratificadas que presentan afectación tectónica, con tecnología de procesamiento de imágenes, teoría fractal y análisis geomecánico de discontinuidades. A su vez, el índice GSI estimado se utilizará para caracterizar el macizo rocoso en un tramo del túnel Vial Guillermo Gaviria Echeverri o Túnel del Toyo.

Palabras clave – Macizo Rocos, GSI, Discontinuidades, Teoría Fractal, Análisis Geomecánico, Estimación.

Abstract

The geological strength index system (GSI), widely used for the design and practice of underground numerical process, is a rock mass classification system that considers to the rock mass strength and deformation parameters based on the generalized Hoek-Brown and Mohr-Coulomb failure criteria. The GSI can be estimated using standard chart and field observations of rock mass block size and discontinuity surface conditions. The GSI value gives a numerical representation of the overall geotechnical quality of the rock mass. this study proposes a method to determine the GSI quantitatively using photographic images of in situ estratified heterogeneous rock masses with image processing technology, fractal theory and the geomechanic analysis for joins. Using the GSI system to characterize the jointed rock mass around the Guillermo Gaviria Echeverri or El Toyo Road tunnel.

Keywords – Rock Mass, GSI, Joins, Fractal Theory, geomechanic analysis, Estimate.

Índice general

AGRADECIMIENTOS	I
Resumen	II
Abstract	III
1. Introducción	1
1.1. Generalidades	1
1.2. Planteamiento del problema	2
1.3. Justificación	4
1.4. Objetivos	4
1.4.1. Objetivos específicos	4
2. Marco Teórico	6
2.1. Marco Teórico	6
2.1.1. Rock tunneling quality index (Q – barton)	7
2.1.2. Rock Mass Rating (<i>RMR</i>)	11
2.1.3. Geological Strength Index (GSI)	13
2.2. Teoría Fractal	18
2.2.1. Dimensión fractal	20
3. Metodología	24
3.1. Introducción	24
3.2. Área de estudio	25
3.2.1. Geología Regional	27
3.2.1.1. Geología Estructural	31
3.2.2. Modelo Geológico del Túnel GGE	34
3.3. Caracterización geomecánica durante construcción	37
3.3.1. Caracterización Geomecánica de las Discontinuidades	40
3.3.1.1. Tendencias estructurales	42
4. Pre-Post Procesamiento de Imágenes	44
4.1. Análisis de imágenes y dimensión fractal	44
4.1.1. Análisis de Imágenes	44
4.1.2. Dimensión Fractal	47

4.1.3. Relación entre el Geological Strength Index (GSI) de macizos rocosos heterogéneos y la dimensión fractal	48
5. Caso de estudio: Túnel Guillermo Gaviria Echeverri - Túnel del Toyo	51
5.1. Introducción	51
5.2. Uso de la Dimensión fractal en el túnel Guillermo Gaviria Echeverri	52
5.3. Condiciones de las discontinuidades	56
5.3.1. Estimación del GSI	58
5.4. Calibración propuesta GSI Fractal	60
6. Conclusiones	66
7. Referencias	68

Índice de cuadros

2.1.1.Índice de Calidad de la Roca (RQD).	9
2.1.2.Número de familias de discontinuidades (J_n).	9
2.1.3.Número de rugosidad de las discontinuidades (J_r).	10
2.1.4.Número de alteración de las discontinuidades (J_a).	10
2.1.5.Factor asociado al estado tensional (SRF).	10
2.1.6.Sistema de clasificación del macizo rocoso Rock Mass Rating, (RMR), Adaptado de Bieniawski (1989).	12
2.1.7.Evaluación de las condiciones de las discontinuidades (JC en inglés), Adaptado de Bieniawski (1989).	12
3.2.1.Sectorización preliminar por soporte y tipos de terreno del Túnel GGE, Modificado de Consorcio Antioquia al Mar, (2017).	35
3.3.1.Tendencias estructurales predominantes en el Túnel GGE, km 35+211,00 - km 34+214,25.	43
4.1.1.Rangos de dimensión fractal (DF) y GSI basados en Hoek & Marinos (2000).	50

Índice de figuras

2.1.1. Caracterización del macizo rocoso a partir de las observaciones geológicas mediante la estimación del GSI.	14
2.1.2. Estimación del GSI para macizos rocosos heterogéneos como Flysch, (Hoek & Marinos, 2000)	16
2.1.3. (Comparación entre GSI mapeado y GSI estimado a partir de JC89 y RQD, (Hoek et al., 2013).	17
2.2.1. Objetos fractales típicos (helecho, Zig-Zag y triángulo Sierpinsky, (Xie, 1993)	19
2.2.2. Curva de Koch, (Magaña et al., 2011)	20
2.2.3. Dimensión fractal, (Correa Villa, 2014)	21
2.2.4. Dimensiones de objetos (a) 1 dimensión, (b) 2 dimensiones y, (c) 3 dimensiones., (Magaña et al., 2011)	22
2.2.5. Cálculo de la dimensión fractal D de la curva de Koch. (Magaña et al., 2011)	23
3.1.1. Fases del enfoque cualitativo, (Hernández et al., 2014)	24
3.1.2. Metodología para la estimación de GSI	25
3.2.1. Localización general del Túnel Guillermo Gaviria Echeverri y sus Vías de Acceso, departamento de Antioquia, Colombia, Fuentes Varias	26
3.2.2. Ubicación detallada del Túnel Guillermo Gaviria Echeverri en el tramo 1, Elaboración Propia	26
3.2.3. Ubicación detallada del Túnel Guillermo Gaviria Echeverri en el tramo 1, (Consorcio Antioquia al Mar, 2017)	27
3.2.4. Interacción de las placas Nazca, Caribe, Suramérica y Panamá, (Universidad Nacional de Colombia, 2011)	28
3.2.5. Marco geológico regional asociado a la zona de estudio del Túnel GGE, (Consorcio Antioquia al Mar, 2017)	29
3.2.6. Modelo tectónico al noroccidente colombiano, (Consorcio Antioquia al Mar, 2017)	32
3.2.7. Fallas principales en el occidente Antioqueño, (Consorcio Antioquia al Mar, 2017)	33
3.2.8. Modelo geológico de diseño del túnel GGE, planta y perfil., (Consorcio Antioquia al Mar, 2017)	35

3.3.1. Levantamiento Macizo Rocoso en el Túnel GGE, km 35+136,00, (Consorcio Antioquia al Mar, 2020)	38
3.3.2. Macizo rocoso excavado en el Túnel GGE, km 35+092,25, Elaboración Propia	39
3.3.3. Parámetros de clasificación del macizo rocoso en el Túnel GGE, km 35+211,00 - km 34+214,25, Elaboración Propia	40
3.3.4. Principales condiciones geomecánicas de las discontinuidades en el Túnel GGE, km 35+211,00 - km 34+214,25, Elaboración Propia	42
3.3.5. Tendencias estructurales generales de las discontinuidades en el Túnel GGE, km 35+211,00 - km 34+214,25., km 35+211,00 - km 34+214,25, Elaboración Propia	43
4.1.1. Etapas determinación de la dimensión fractal (DF) utilizando la técnica de procesamiento de imágenes, (Basirat et al., 2019)	45
4.1.2. Análisis fractal mediante Harmonic and Fractal Image Analyzer (HARFA), Elaboración Propia	48
4.1.3. Estimación del GSI para macizos rocosos heterogéneos como Flysch, Modificado de Hoek & Marinos (2000)	49
4.1.4. Estimación de la dimensión fractal (DF) para macizos rocosos heterogéneos como Flysch., Modificado de Hoek & Marinos (2000)	50
5.2.1. DF Túnel GGE, Abscisa km 34+936,75, Elaboración Propia	53
5.2.2. Condiciones del macizo rocoso excavado en el área de estudio, Elaboración Propia	54
5.2.3. Distribución de DF del Túnel GGE, entre las abscisas km 35+211,00 y km 34+214,25 del Túnel GGE, Portal Salida, Elaboración Propia	55
5.2.4. Porcentaje de ocurrencia por tipo de GSI del Túnel GGE, entre las abscisas km 35+211,00 y km 34+214,25 del Túnel GGE, Portal Salida, Elaboración Propia	56
5.3.1. Distribución de JC entre las abscisas km 35+211,00 y km 34+214,25 del Túnel GGE, Portal Salida, Elaboración Propia	57
5.3.2. Análisis de dimensión fractal sobre las condiciones del frente de excavación	59
5.3.3. Distribución de GSI Estimado para el tramo del Túnel GGE comprendido entre las abscisas km 35+211,00 y km 34+214,25, Portal Salida, Elaboración Propia	60
5.4.1. Comparativo entre GSI de Campo y GSI Estimado a partir de JC y DF, Elaboración Propia	61
5.4.2. Perfil de cobertura o techo del Túnel GGE, Elaboración Propia	62
5.4.3. Comparativo entre GSI de Campo y GSI Estimado teniendo en cuenta la cobertura vertical del Túnel GGE, km 35+211,00 y km 34+214,25, Portal Salida, Elaboración Propia	63
5.4.4. Comparativo entre GSI de Campo (visual y calculado), GSI de diseño y GSI Estimado a partir de JC y DF, Elaboración Propia	64
5.4.5. Porcentajes de ajuste de las clasificaciones por GSI vs la clasificación real de la obra por RMR, Elaboración Propia	65

Capítulo 1

Introducción

1.1. Generalidades

El Túnel Guillermo Gaviria Echeverri y sus vías de acceso, inicialmente denominado Túnel del Toyo, es uno de los proyectos viales 4G (Cuarta Generación) que, permitirán la conexión más eficiente los principales centros de producción del interior del País con las costas Caribe y Pacífica; particularmente en el departamento de Antioquia estas obras buscan mejorar la conectividad entre Medellín y los proyectos portuarios que se piensan construir en la sub-región de Urabá.

Esas conexiones viales que se han pensado en Antioquia y en Colombia en general, han permitido un mayor desarrollo de obras subterráneas lineales que faciliten las conectividades y hagan las vías más seguras. Se presenta de esta manera una oportunidad para que, junto con el desarrollo de las obras de infraestructura, se tengan avances en la caracterización de los macizos rocosos a excavar y así se logren mejores ajustes en las previsiones de soporte, presupuesto y cronograma en general de los proyectos.

Con el desarrollo de este trabajo se busca suplir, en cierta medida, esa necesidad de tener proyectos bien estructurados desde lo técnico y lo económico, enfocando su estudio a una de las que a juicio propio del autor es de las mayores falencias que se tienen a la hora de realizar los diseños de las obras subterráneas, es en sí la caracterización de los macizos rocosos y con ello vendría ligada un bajo ajuste entre las condiciones que se piensan antes de la construcción de las obras y lo que

realmente se ejecuta.

Este documento presenta un recuento conceptual de las metodologías típicamente utilizadas para la clasificación de macizos rocosos, así como la fundamentación de la teoría fractal y su potencial de uso en la geotecnia. Además, se resume la caracterización geológica – geotécnica en cada una de las etapas de desarrollo del Proyecto Vial Túnel Guillermo Gaviria Echeverri y sus vías de acceso, como son: diseño y construcción, con el fin de exponer las condiciones para la estimación de la calidad del macizo rocoso por medio de Índice de Resistencia Geológica (GSI por sus siglas en inglés).

Durante la caracterización geomecánica de la etapa de construcción se abordan en detalle las condiciones encontradas durante la excavación del túnel por el sector Cañasgordas, las características generales del macizo rocoso intervenido, incluyendo las caracterizaciones geomecánicas de los materiales, y las observaciones obtenidas mediante el trabajo de recolección, procesamiento y análisis de la información disponible en el sitio. Como resultado, se presenta una metodología que permite estimar la calidad geotécnica de los macizos rocosos estratificados que han sido afectados por actividad tectónica. Finalmente, se exponen las validaciones de la metodología propuesta, a partir del entorno geológico de la zona de estudio y la influencia del trazado del túnel respecto a la superficie, a tener en cuenta al momento de pensar su utilización para la sectorización o clasificación de terrenos por medio de este método de estimación.

1.2. Planteamiento del problema

Reconocer las propiedades geomecánicas del macizo rocoso es un requisito fundamental para el diseño de los sostenimientos de las obras subterráneas. Por eso, desde principios de los años 90 del siglo XX, muchos estudios han propuesto una variedad de métodos para determinar los parámetros de resistencia y deformación de macizos rocosos. En ese aspecto, los trabajos desarrollados por Hoek et al., con la incorporación del índice GSI, han sido fundamentales para lograr la correlación correcta de las condiciones geomecánicas del macizo rocoso establecidas durante diseño y la construcción de las obras subterráneas. La resistencia de un macizo rocoso fracturado depende de las propiedades de los bloques de roca intacta, así como de la libertad de estos para deslizarse y girar bajo distintas condiciones de

esfuerzo. Esta libertad es controlada por el perfil geométrico de los bloques de roca intacta; al igual que, por la condición de las superficies de las discontinuidades que separan dichos bloques. Es así como los bloques de roca angulosos, con caras definidas por superficies lisas e irregulares, producen un macizo rocoso mucho más competente que uno que contenga bloques con planos o paredes de discontinuidades meteorizadas y/o alteradas.

El índice GSI considera cualitativamente la condición de la superficie de las paredes de las discontinuidades y la cantidad de bloques de un macizo rocoso, y se utiliza para estimar un valor entre 0 y 100 que representa la calidad geotécnica general del macizo rocoso. En la actualidad, se ha demostrado que la determinación del GSI de manera gráfica es efectiva utilizando adecuadamente la carta para su determinación (Hoek E. 2006). La evaluación gráfica del GSI es tan confiable como las metodologías donde se hacen cálculos para caracterizar el macizo rocoso. Además, la utilización de la carta GSI es también significativamente más simple, no obstante, para su valoración se requiere de geólogos, ingenieros geólogos e ingenieros geotécnicos experimentados. Ahora bien, la cuantificación de las estimaciones de GSI puede proporcionar un medio para reducir los errores involuntarios y las inconsistencias de profesionales menos experimentados en la clasificación de un macizo rocoso.

La clasificación adecuada de macizos rocosos para el diseño de obras subterráneas ha sido un problema común en la industria, generalmente, la exploración detallada es significativamente costosa y su ejecución se lleva a cabo en algunos sitios de interés de estas obras lineales como son los portales, zonas de falla y/o contactos litológicos, posibles zonas portadoras de agua, etc. La extrapolación de la información puntual obtenida bajo exploración con métodos directos e indirectos ha generado una mayor incertidumbre de los diseños de las obras subterráneas que se han construido o que se están construyendo actualmente en Colombia, acarreado en cierta medida con diseños poco ajustados a la realidad que llevan a que contratistas y los dueños de los proyectos se vean obligados a gastar mayores recursos – dinero y tiempo – al momento de ejecutar los proyectos que involucren obras subterráneas.

1.3. Justificación

Teniendo en cuenta la problemática que persiste en la intensión de geólogos y geotecnistas de poder ajustar la caracterización de los macizos rocosos que se hace durante el diseño de las obras subterráneas y la caracterización que se obtiene durante la excavación o construcción de estas obras, con el método de estimación propuesto en este trabajo, se pretende dar a la industria una herramienta de diseño que busca reducir la incertidumbre en la caracterización de macizos rocosos estratificados a excavarse en obras lineales subterráneas, permitiendo un buen ajuste entre las condiciones esperadas y las realmente encontradas en los sitios donde se construyen túneles y galerías, de manera que se vea reflejado en la optimización de diseños, en los presupuestos y en los cronogramas de las obras.

Por medio de este trabajo se busca determinar cuantitativamente el GSI detectando primero, el grado de fracturamiento del macizo rocoso en fotografías bidimensionales (2D), para esto se hace procesamiento de imágenes, luego se establece la dimensión fractal para proporcionar un grado de fracturamiento al macizo rocoso y finalmente se estima el GSI combinando el grado de fracturamiento con las condiciones geomecánicas predominantes de las discontinuidades del macizo rocoso en estudio.

1.4. Objetivos

Desarrollar una propuesta para determinar cuantitativamente el Índice de Resistencia Geológica (GSI) en macizos rocosos heterogéneos estratificados a partir del uso de la teoría fractal y experiencias de otros autores en esta materia, de manera que permita estimar la calidad de los macizos rocosos a excavarse en obras subterráneas lineales teniendo en cuenta la caracterización previa de las condiciones de las discontinuidades.

1.4.1. Objetivos específicos

- Adaptar propuestas existentes para la estimación del Índice de Resistencia Geológica (GSI) utilizando la tecnología de procesamiento de imágenes.
- Desarrollar una nueva propuesta que permita mejorar el estimativo de la calidad de macizos rocosos estratificados a partir de la recolección de datos

qualitativos y cuantitativos en frentes de obra.

- Establecer una metodología para disminuir la incertidumbre en los diseños de las obras subterráneas a partir de la estimación y sectorización por zonas homogéneas de calidad del macizo rocoso.

Capítulo 2

Marco Teórico

2.1. Marco Teórico

La caracterización de los macizos rocosos en el diseño y construcción de túneles, galerías y demás obras subterráneas, es la herramienta base para la ejecución de los proyectos en cuanto a los tratamientos de soporte que se han de implementar para mantener las obras con el grado de estabilidad adecuado durante operación.

Para la clasificación de macizos rocosos se han propuesto diferentes metodologías o sistemas que buscan establecer zonas con comportamientos homogéneos, asimismo, dar las bases para la comprensión de las características que definen cada zona y finalmente, valorar de manera cuantitativa el macizo rocoso para establecer el tipo de soporte más adecuado para la atención de las sollicitaciones del terreno ante las aperturas subterráneas.

Estos sistemas tienen en cuenta la constitución de los macizos rocosos, por tal motivo involucran rocas de origen geológico diferente, el grado de meteorización y las características estructurales de gran escala que se presentan como consecuencia de los movimientos de la corteza terrestre e inducen esfuerzos naturales variables en magnitud, dirección y sentido, por lo tanto, influyen considerablemente en las propiedades geomecánicas de la roca.

De lo anterior, al estudiar las leyes de la mecánica para investigar el comportamiento de un macizo rocoso se deben incluir discontinuidades, heterogeneidad, anisotropía y el intervalo del estado de esfuerzos naturales.

Estas características no se pueden controlar a voluntad y deben ser estudiadas para cada caso, con el fin de conocer los límites de validez de las aplicaciones teóricas. Aplicaciones referentes a los modelos constitutivos con los cuales se pretenden reproducir o simular el comportamiento de los materiales involucrados, en el intervalo de tensiones consideradas.

En la clasificación de macizos rocosos se utilizan parámetros que se recuerden con facilidad y que sean comprensibles, cada término debe ser claro y la terminología utilizada ampliamente aceptada, incluir las propiedades más significativas de la masa rocosa y basarse en un sistema de clasificación que permita separar la importancia relativa de cada parámetro.

Los sistemas de clasificación propuestos suelen ser útiles en trabajos de exploración previos a la construcción de obras subterráneas y en estudios de anteproyectos donde se requiere:

- Definir la ruta y tipo de sección transversal del túnel.
- Previsión de soporte primario y las condiciones generales de estabilidad durante la excavación.
- Determinación del tiempo de excavación y costo aproximado.
- Selección del procedimiento de excavación.

En la actualidad los sistemas de clasificación geomecánica de macizos rocosos más utilizados son: el Índice Q propuesto por Barton N., Lien R. y Lunde J. (1974), y el Rock Mass Rating (RMR) desarrollado por Bieniawski (1976). Además, la implementación del Geological Strength Index (GSI), presentado por Hoek (1994) para definir la calidad geotécnica del macizo rocoso, ha tomado relevancia y su utilización tanto en el diseño como en la construcción de obras subterráneas ya es visto como un sistema de clasificación ampliamente aceptado en el gremio.

2.1.1. Rock tunneling quality index (Q – barton)

El sistema del Q de Barton fue desarrollado en el instituto Geotécnico Noruego (NGI) entre 1971 y 1974, por Barton, Lien y Lunde. Desde la introducción de este sistema en 1974, se han realizado varias revisiones que consideran un mayor número de ejemplos de excavaciones subterráneas en países como Noruega, India y Suiza, así como, profundidad en el desarrollo de la tecnología del concreto

lanzado, el refuerzo mediante fibras y “costillas” de acero, que incluyen aspectos como espesor, espaciamiento, interacción entre los diferentes sistemas y un mayor número de casos registrados.

El índice Q se obtiene mediante la siguiente expresión.

$$Q = RQD/J_n * J_r/J_a * J_w/SRF \quad (2.1.1)$$

Donde:

- RQD es el índice de calidad de la roca
- J_n Parámetro para describir el número de familias de discontinuidad
- J_r Parámetro para describir la rugosidad de las juntas
- J_a Parámetro para describir la alteración de las juntas
- J_w Factor asociado a la condición de la presencia de agua en las juntas
- SRF Factor asociado al estado tensional (zonas de corte, fluencia, expansividad, tensiones in situ)

El SRF se puede considerar como un parámetro de esfuerzo total que permite medir:

1. La cantidad de carga perdida cuando la excavación atraviesa una zona de cizalla.
2. Esfuerzo in situ en la roca competente.
3. Esfuerzo en rocas débiles.

El parámetro J_w permite cuantificar la presión de agua, debe ser visto como una reducción en el esfuerzo normal la cual tiene un efecto desfavorable sobre la resistencia al corte en las paredes de las discontinuidades.

El valor del Q de Barton es usado para la clasificación del macizo rocoso en excavaciones subterráneas con respecto a la estabilidad de la excavación. Este valor se basa a partir del cálculo de seis parámetros que permiten la descripción de la calidad de la roca y los cuales se pueden agrupar en tres conjuntos.

- Grado de fracturamiento: (RQD/J_n) representa la estructura del macizo

rocoso mediante una medida rudimentaria del tamaño de los bloques o de las partículas

- Fricción de la discontinuidad: (J_r/J_a) representa la rugosidad y las características de la fricción de las paredes de las fisuras o de los materiales de relleno. La evaluación J_r y J_a debe hacerse a la familia o discontinuidad más desfavorable para la estabilidad tanto desde el punto de vista de la orientación como de la resistencia al corte.
- Nivel de esfuerzos: (J_w/SRF) consiste en dos parámetros de esfuerzo que combinan condiciones de agua y tensión y por tanto puede representar una tensión activa y eficaz.

Para evaluar la calidad del macizo rocoso bajo la implementación del índice Q, Barton et al., propusieron una metodología basada en observaciones de campo de los seis parámetros, los cuales se cuantifican según las siguientes tablas que fueron tomadas y adaptadas de Barton et al. (1974), y su modificación de Grimstad-Barton (1993).

Tabla 2.1.1: Índice de Calidad de la Roca (RQD).

1. Rock Quality Designation	RQD
A. Muy Mala	00 – 25
B. Mala	25 – 50
C. Regular	50 – 75
D. Buena	75 – 90
E. Excelente	90 – 100

Tabla 2.1.2: Número de familias de discontinuidades (J_n).

Número de familias de juntas	J_n
A. Macizos rocosos masivos, sin o con muy pocas discontinuidades.	0,5 – 1,0
B. Macizos rocosos con una familia de discontinuidades.	2
C. Macizos rocosos con una familia de discontinuidades más estructuras aleatorias.	3
D. Macizos rocosos con dos familias de discontinuidades.	4
E. Macizos rocosos con dos familias de discontinuidades más estructuras aleatorias.	6
F. Macizos rocosos con tres familias de discontinuidades.	9
G. Macizos rocosos con tres sets de estructuras más estructuras aleatorias.	12
H. Macizos rocosos con cuatro o más familias de discontinuidades	15
I. Macizo rocoso triturado, similar a un suelo granular.	20

Tabla 2.1.3: Número de rugosidad de las discontinuidades (J_r).

Rugosidad de las paredes	J_r
a) Contacto entre las paredes de roca. Y,	
b) Contacto entre las paredes de roca o cizalladura menor de 10 cm.	
A. Estructuras discontinuas.	4
B. Paredes ondulosas y rugosas o irregulares.	3
C. Paredes ondulosas y lisas.	2
D. Paredes ondulosas y pulidas.	1,5
E. Paredes planas y rugosas.	1,5
F. Paredes planas y lisas.	1
G. Paredes planas y pulidas.	0,5
c) No hay contacto entre las paredes de roca por cizalladura	
H. Zona que contiene minerales arcillosos gruesos como para evitar el contacto entre las paredes.	1
I. Zona de arena, grava o roca triturada que evita el contacto entre las paredes.	1

Tabla 2.1.4: Número de alteración de las discontinuidades (J_a).

Alteración de las Paredes	J_a	r (Aprox.)
a) Contacto entre las paredes de roca.		
A. Discontinuidades selladas con rellenos duros, impermeables.	0.75	-
B. Paredes inalteradas, que solo presentan pátinas locales.	1	25° - 35°
C. Paredes ligeramente alteradas. Pátinas de materiales que no se ablandan y libres de arcilla.	2	25° - 30°
D. Relleno limoso o areno-arcilloso, con poco contenido de arcillas que no se ablandan.	3	20° - 25°
E. Relleno de minerales arcillosos de baja fricción	4	8° - 16°
b) Contacto entre las paredes de roca o cizalladura menor de 10 cm.		
F. Rellenos de arenas y/o roca triturada, libres de arcilla.	4	25° - 30°
G. Rellenos de arcillas sobre-consolidadas, que no se ablandan (con espesores <5 mm).	6	16° - 24°
H. Rellenos de arcillas medio a poco pre-consolidadas, que se ablandan (con espesores <5 mm).	8	12° - 16°
J. Rellenos de arcillas expansivas, (con espesores <5 mm).	8 - 12	6° - 12°
c) No hay contacto entre las paredes de roca por cizalladura		
K, L, M. Discontinuidades con rellenos de roca desintegrada o triturada, con arcillas.	6 - 8 o 8 - 12	6° - 24°
N. Rellenos potentes de limos arenas-arcillosas, con poco contenido de arcillas.	5 10 - 13	-
O, P, R. Rellenos potentes de salvanda arcillosa.	o 13 - 20	6° - 24°

Tabla 2.1.5: Factor asociado al estado tensional (SRF).

Condición de los Esfuerzos			SRF
a) Zonas de debilidad intersecan la excavación, pueden causar desprendimientos de roca (loosening) cuando se excava el túnel.			
A. Múltiples zonas de debilidad que contienen arcilla o roca desintegrada, con roca suelta en su entorno.			10
B. Una zona de debilidad que contiene arcilla o roca químicamente desintegrada (profundidad de excavación 50 m).			5
C. Una zona de debilidad que contiene arcilla o roca químicamente desintegrada (profundidad de excavación >50 m).			2,5
D. Múltiples zonas de cizalla en un macizo rocoso competente, con roca suelta a su alrededor.			7,5
E. Una zona de cizalla en un macizo rocoso competente y libre de arcilla (profundidad de excavación 50 m).			5
F. Una zona de cizalla en un macizo rocoso competente y libre de arcilla (profundidad de excavación >50 m).			2,5
b) Roca competente, problemas de esfuerzos sobre la roca.			
H. Esfuerzos bajos en cercanías de la superficie, discontinuidades abiertas.	σ_c/σ_1 >200	$\sigma\theta/$ <0,01	SRF 2,5
J. Esfuerzos de magnitud moderada, condición de esfuerzos favorable.	200 - 10	0,01 - 0,3	1
K. Esfuerzos altos, estructura muy compacta.	10 - 5	0,3 - 0,4	0,5 - 2
L. Lajamiento de roca (slabbing) moderado después de 1 hora en roca masiva.	5 - 3	0,5 - 0,65	5 - 50
M. Lajamiento y estallido de roca (rockburst) después de unos minutos en roca masiva.	3 - 2	0,65 - 1	50 - 200
N. Estallidos violentos de roca (strain-burst) y deformaciones dinámicas en rocas masivas.	<2	>1	200 - 400
c) Rocas deformables (squeezing rock): roca incompetente sometida a altas presiones litostáticas.			
O. Deformación suave.	1 - 5		5 - 10
P. Deformación severa.	>5		10 - 20
d) Rocas expansivas (Swelling rock): actividad expansiva química dependiendo de la presencia de agua			
R. Expansión suave.			5 - 10
S. Expansión Severa.			10 - 15

2.1.2. Rock Mass Rating (*RMR*)

El sistema de clasificación Rock Mass Rating (*RMR*) fue inicialmente desarrollado en el South African Council of Scientific and Industrial Research (CSIR) por Bieniawski (1973), basado en datos de túneles someros excavados en rocas sedimentarias. El sistema de clasificación *RMR* ha cambiado en varias ocasiones desde su origen en 1973, por ejemplo, se bajó de 8 a 6 la cantidad de parámetros, se modificó su alcance, se redujo la cantidad de soporte requerido, etc. La clasificación *RMR* utiliza seis parámetros para evaluar la calidad del macizo rocoso, según la actualización hecha por Bieniawski (1989), se debe tener en cuenta al aplicar esta metodología que, el área de estudio debe ser dividida en unidades estructurales homogéneas con el fin de asignar una calidad geotécnica particular a cada caso. Los parámetros que deben ser evaluados mediante el sistema *RMR* 89 son los siguientes:

- Resistencia a la compresión uniaxial de la roca intacta (UCS por sus siglas en inglés).
- Rock quality designation, *RQD* (Deere, 1988).
- Espaciamiento de las juntas o discontinuidades, (*J_s*, Siglas en inglés).
- Condición de las paredes de la discontinuidad (*J_C*, siglas en inglés).
- Condición de agua en el suelo, (*W_C*, siglas en inglés).
- Orientación de las discontinuidades, (*J_o*, siglas en inglés).

Este último parámetro fue incorporado en la versión de 1989 para utilizar el sistema de clasificación en túneles.

El *RMR* será entonces el resultado de sumar los valores obtenidos mediante la cuantificación de los parámetros anteriores, los cuales deben ser definidos a través de las siguientes tablas:

Los parámetros presentados en la 2.1.7 se definieron siguiendo los criterios del sistema de clasificación *RMR* y para el desarrollo de este trabajo fueron adoptados bajos los siguientes criterios:

- Persistencia: se refiere a la continuidad de una misma estructura y es medida en metros, siendo muy bajas para los planos con longitud menor que 1,0 m,

Tabla 2.1.6: Sistema de clasificación del macizo rocoso Rock Mass Rating, (RMR), Adaptado de Bieniawski (1989).

Parámetro		Rango de Valores				
1	Carga Puntual (MPa)	>10	4-10	2-4	1-2	Para este rango es preferible la prueba de compresión uniaxial
	Compresión Uniaxial (Mpa)	>250	100-250	50-100	25-50	
	Puntaje	15	12	7	4	2 1 0
2	RQD (%)	90 - 100	75 - 90	50 - 75	25 - 50	<25
	Puntaje	20	17	13	8	3
3	J_s	>2	0.6-2	0.2-0.6	0.06-0.2	<0.06
	Puntaje	20	15	10	8	5
4	JC	Paredes muy rugosas, discontinuas, selladas y sin meteorización	Paredes ligeramente rugosas, algo meteorizadas, abertura <1 mm	Paredes ligeramente rugosas, altamente meteorizadas, abertura <1 mm	Paredes continuas, pulidas, o relleno <5 mm, o abertura de 1 - 5 mm	Paredes continuas, relleno blando >5 mm, o aberturas >5 mm
	Puntaje	30	25	20	10	0
5	Q *10 m de túnel (l/min)	Ninguna	<10	10-25	25-125	>125
	Presión del agua / σ_1	0	0-0.1	0.1-0.2	0.2-0.5	>0.5
	Condiciones generales	Seco	Húmedo	Mojado	Goteo	Flujo
	Puntaje	15	10	7	4	0

Tabla 2.1.7: Evaluación de las condiciones de las discontinuidades (JC en inglés), Adaptado de Bieniawski (1989).

Parámetro	Características o Rango de Valores				
Persistencia	<1 m	1-3 m	3-10 m	10-20 m	>20 m
Puntaje	6	4	2	1	0
Abertura	Sellada	<0,1 mm	0,1-1,0 mm	1-5 mm	>5 mm
Puntaje	6	5	4	1	0
Rugosidad	Muy rugosa	Rugosa	Ligeramente rugosa	Lisa	Pulida
Puntaje	6	5	3	1	0
Relleno	Ninguno	Duro <5 mm	Duro >5 mm	Blando <5 mm	Blando >5 mm
Puntaje	6	4	2	2	0
Alteración	Inalterada	Ligeramente alterada	Moderadamente alterada	Muy alterada	Descompuesta
Puntaje	6	5	3	1	0

bajas entre 1,0 y 3,0 m, moderadas entre 3,0 y 10,0 m, altas entre 10,0 y 20,0 m, y muy altas para planos con continuidades mayores a 20,0 m.

- Abertura: mide la separación de las paredes de las discontinuidades, clasificadas en selladas (sin espacio entre planos), muy cerradas (espesores menores de 0,1 mm), cerradas (espesores entre 0,1 y 1,0 mm), abiertas

(espesores entre 1,0 y 5,0 mm) y anchas (espesores mayores a de 5,0 mm).

- Rugosidad: es establecida por los parámetros que definen la ondulación superficial de las paredes de las discontinuidades en un rango que va desde pulida (slickensided) hasta planos con paredes muy rugosas, pasando por liso, ligeramente rugoso (suave) y rugoso.
- Tipo de relleno: definido según la consistencia y el espesor de los materiales que los componen. Para esto se establecieron cuatro rangos, entre materiales blandos y duros con espesores menores o mayores a los 5,0 mm. Esta escala se complementó con la ausencia de los rellenos, en cuyo caso se indicaba como 'ninguno'.
- Alteración: hace referencia al grado de alteración física y/o química de las paredes de las discontinuidades, clasificadas en descompuesta, muy alterada, moderadamente alterada, ligeramente alterada e inalterada.

2.1.3. Geological Strength Index (GSI)

Evaluar la resistencia al corte de un macizo rocoso fracturado va a depender de la valoración de las propiedades de la roca intacta y de las paredes de las discontinuidades, enmarcado en el comportamiento de estas dos características ante la acción de esfuerzo. En el caso de las paredes de las discontinuidades dependerá de la facilidad que tenga un bloque de roca para deslizarse o rotar. La facilidad que puede tener un bloque de roca para deslizar o rotar dependerá de la forma de los bloques de roca intacta y de la condición de las paredes de las discontinuidades. Es así como los bloques de roca que sean angulosos y presenten paredes con superficies lisas y escalonadas, representaran un macizo rocoso mucho más competente que uno que contenga bloques completamente rodeados con presencia de meteorizado y/o alterado entre las paredes de sus discontinuidades.

Para estimar el anterior efecto como respuesta del macizo rocoso a excavaciones subterráneas, Hoek et al. (1995) proporciona un sistema para calcular la disminución de la resistencia que presentaría un macizo rocoso bajo diferentes condiciones geológicas mediante un índice de resistencia geológica (GSI por sus siglas en inglés), el GSI fue presentado por Hoek con el fin de calcular los parámetros s y m_b en su criterio generalizado de falla en roca. Este índice ha sido actualizado en varias ocasiones para su utilización en macizos rocosos débiles, 1998, 2000 y

2001, Marinós et al. (2007).

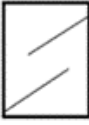





<p>GEOLOGICAL STRENGTH INDEX FOR JOINTED ROCKS (Hoek and Marinos, 2000) From the lithology, structure and surface conditions of the discontinuities, estimate the average value of GSI. Do not try to be too precise. Quoting a range from 33 to 37 is more realistic than stating that GSI = 35. Note that the table does not apply to structurally controlled failures. Where weak planar structural planes are present in an unfavourable orientation with respect to the excavation face, these will dominate the rock mass behaviour. The shear strength of surfaces in rocks that are prone to deterioration as a result of changes in moisture content will be reduced if water is present. When working with rocks in the fair to very poor categories, a shift to the right may be made for wet conditions. Water pressure is dealt with by effective stress analysis.</p>		SURFACE CONDITIONS				
		VERY GOOD Very rough, fresh unweathered surfaces	GOOD Rough, slightly weathered, iron stained surfaces	FAIR Smooth, moderately weathered and altered surfaces	POOR Stickensided, highly weathered surfaces with compact coatings or fillings or angular fragments	VERY POOR Stickensided, highly weathered surfaces with soft clay coatings or fillings
STRUCTURE		DECREASING SURFACE QUALITY →				
	INTACT OR MASSIVE - intact rock specimens or massive in situ rock with few widely spaced discontinuities	90			N/A	N/A
	BLOCKY - well interlocked undisturbed rock mass consisting of cubical blocks formed by three intersecting discontinuity sets	80	70			
	VERY BLOCKY - interlocked, partially disturbed mass with multi-faceted angular blocks formed by 4 or more joint sets		60	50		
	BLOCKY/DISTURBED/SEAMY - folded with angular blocks formed by many intersecting discontinuity sets. Persistence of bedding planes or schistosity			40	30	
	DISINTEGRATED - poorly interlocked, heavily broken rock mass with mixture of angular and rounded rock pieces				20	
	LAMINATED/SHEARED - Lack of blockiness due to close spacing of weak schistosity or shear planes	N/A	N/A			10

Figura 2.1.1: Caracterización del macizo rocoso a partir de las observaciones geológicas mediante la estimación del GSI.

La evaluación del índice GSI se hace por comparación del caso que interesa con las condiciones típicas que se muestran en la Figura 2.1.1 y este índice puede variar de 0 a 100, lo que permite definir 5 clases de macizos rocosos (Karzulovic, 2006):

- Macizos de calidad Muy Mala ($0 < \text{GSI} < 20$)
- Macizos de calidad Mala ($20 < \text{GSI} < 40$)
- Macizos de calidad Regular ($40 < \text{GSI} < 60$)
- Macizos de calidad Buena ($60 < \text{GSI} < 80$)
- Macizos de calidad Muy Buena ($80 < \text{GSI} < 100$)

El GSI permite caracterizar el macizo rocoso de manera sencilla, para esto se evalúa visualmente la condición estructural de roca, por un lado se define la cantidad de bloques que tiene el macizo rocoso y por otra parte se determina la condición superficial de las paredes de las discontinuidades, basados en la rugosidad y alteración de las juntas definida por Bieniawski en el JC. Una vez evaluados estos dos parámetros se confrontan para determinar un rango de características dominantes que definen la calidad del macizo rocoso valorado.

La determinación de los dos parámetros descritos anteriormente, consiste en describir la calidad del macizo rocoso, contrario a la cuantificación de datos de entrada que requieren los sistemas RMR y Q. El GSI es utilizado para la estimación de los parámetros de entrada para el cálculo de la resistencia, por lo cual solo es una relación empírica para los procesos asociados a las clasificaciones de la ingeniería de rocas. La estimación de la calidad de los macizos rocosos fracturados típicos mediante el GSI se hace a partir de la Figura 1 a las que se ingresa desde dos ejes diferentes, uno horizontal: referente al tamaño y fracturamiento de bloques, composición y estructura; el ingreso vertical es referente a las condiciones de las discontinuidades, se converge posteriormente en el valor del GSI dispuesto en las líneas diagonales.

En algunos casos, puede ser necesario implementar una versión especial de la carta de estimación del índice GSI, como es el caso de los macizos rocosos heterogéneos estratificados. Por ejemplo, la Figura 2.1.2 presenta una tabla desarrollada por Hoek & Marinos en el año 2000 para determinar la calidad de macizos rocosos heterogéneos estratificados (Flysch).

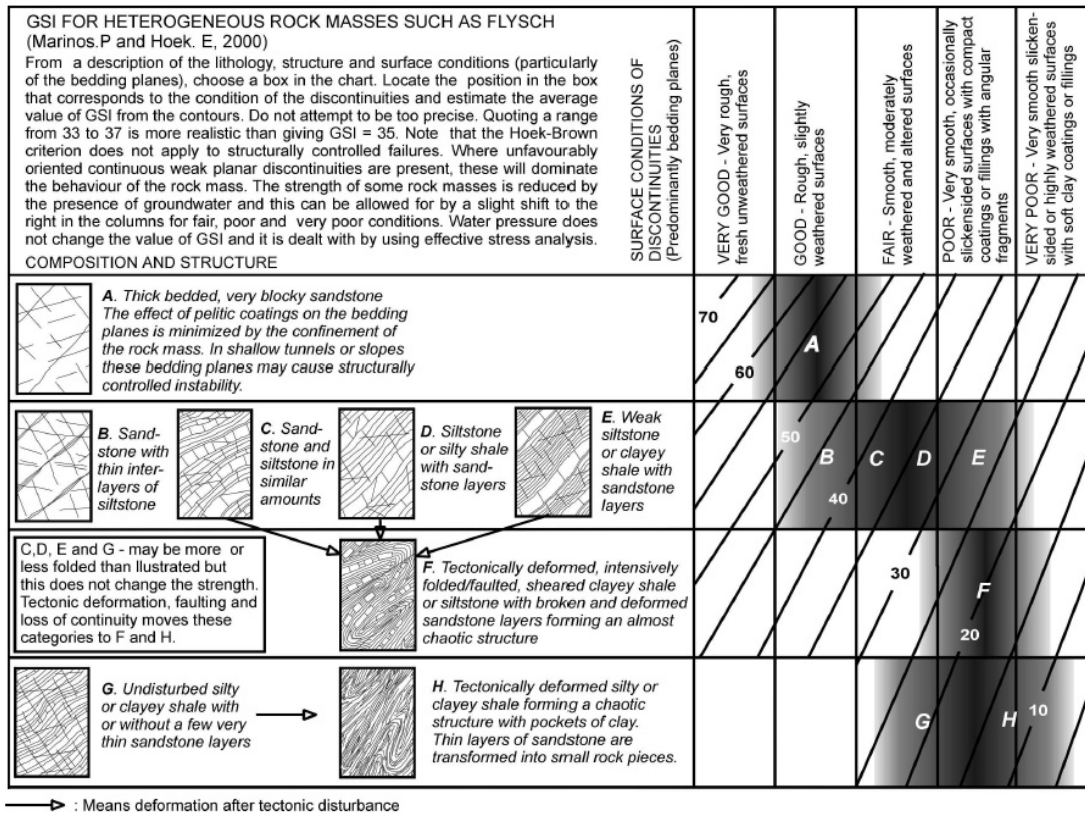


Figura 2.1.2: Estimación del GSI para macizos rocosos heterogéneos como Flysch, (Hoek & Marinos, 2000)

El término flysch se atribuye al geólogo B. Studer y proviene de la palabra alemana “fliessen” que significa flujo, probablemente denotando los frecuentes deslizamientos de tierra en áreas que consisten en estas formaciones (Hoek & Marinos, 2000). Es términos generales, es un depósito sedimentario que consiste en capas delgadas de lutitas o margas que se alternan con estratos más gruesos como areniscas o conglomerados.

Alternativamente, el GSI puede ser determinado en función de la condición de las paredes de la discontinuidad para lo cual se utiliza el parámetro JC del sistema de clasificación propuesto por Bieniawski en 1989, así como del índice de calidad de la roca RQD, presentado por Deere en 1963. En este caso, (Hoek et al., 2013) propusieron la correlación dada en la ecuación 2.1.2.

$$GSI = 1.5 JC89 + RQD/2 \tag{2.1.2}$$

Al momento de la publicación (2013), los autores disponían de una serie de datos

de campo realmente confiables levantados en un túnel excavado con perforación y voladura que les permitieran verificar la funcionalidad o no de la correlación presentada en la ecuación 2.1.2, utilizando así los valores de GSI estimados (2.1.2) versus los valores de GSI tomados en campo. De esta manera, los valores de GSI calculados a partir de JC89 y RQD fueron graficados contra los valores de GSI mapeados en campo (Figura 2.1.3). Este gráfico mostró que la correlación entre los valores de GSI, calculados y mapeados está razonablemente cerca de la relación ideal 1:1 para un ajuste casi perfecto.

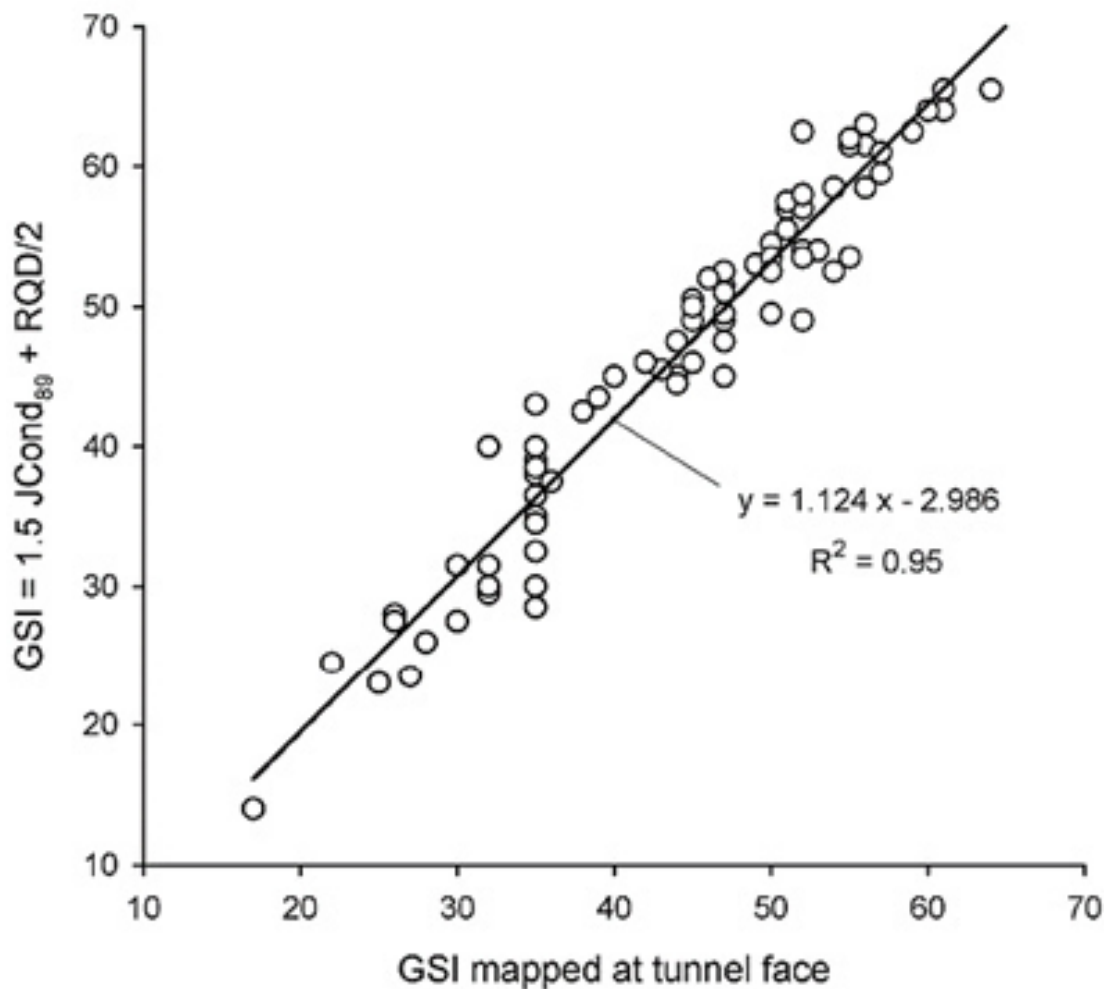


Figura 2.1.3: (Comparación entre GSI mapeado y GSI estimado a partir de JC89 y RQD, (Hoek et al., 2013).

2.2. Teoría Fractal

La dinámica de muchos modelos físicos, químicos, económicos, y otros, ha sido descrita y modelada durante años por medio de los sistemas y modelos lineales. No obstante, más recientemente se ha demostrado que, existen algunos sistemas no lineales que no pueden ser representados mediante los sistemas lineales debido a la complejidad de sus dinámicas. El ejemplo más claro de este fenómeno lo constituyen los conjuntos de Mandelbrot y de Julia (Magaña et al., 2011). Estos conjuntos representan gráficamente, infinitos comportamientos que resultan de la iteración de una ecuación no lineal cuadrática.

Gutiérrez (1998) plantea que, un sistema no lineal presenta una gran variedad de posibles comportamientos, entre los cuales se destaca por su complejidad, el conocido como caos determinista. Los sistemas caóticos se comportan de forma impredecible, aun cuando están definidos por ecuaciones deterministas, esto se debe a que son sensibles a pequeñas perturbaciones externas.

Si se tiene en cuenta que, la región del espacio hacia la que tiende una órbita caótica es asintótica y tiene estructura fractal, se puede decir que la geometría fractal y la teoría de los sistemas dinámicos están íntimamente ligadas. Los fractales tienen propiedades muy particulares que permiten su caracterización basándose en medidas cuantitativas relacionadas con su grado de irregularidad, entre estas propiedades se tienen la autosemejanza y la apariencia irregular. De estas medidas cuantitativas la más popular es la dimensión fractal, siendo una extensión de la dimensión euclidiana para objetos autosemejantes (Magaña et al., 2011).

La geometría euclidiana estudia las propiedades y mediciones de puntos, líneas, planos y objetos volumétricos que poseen propiedades de continuidad y diferenciabilidad. Sin embargo, existen otros objetos geométricos irregulares que, a diferencia de estos objetos geométricos clásicos, presentan una misma estructura a cualquier escala y tienen puntos no diferenciables, es decir, un número infinito de singularidades. Entre estos objetos podemos resaltar las formas encontradas en la naturaleza, como montañas, franjas costeras, sistemas hidrográficos, nubes, hojas, árboles, y demás cuerpos que no pueden ser descritos con facilidad a través de la geometría tradicional.

La geometría fractal permite una descripción matemática de las formas irregulares

descritas en el párrafo anterior, las cuales han sido denominadas como fractales (Barnsley , 1990). Una de las principales características de los fractales es que no varían su forma ante los cambios de escala; es decir, si se disminuye la escala y se representa una copia de un objeto fractal, este mantendrá su estructura. Por ejemplo, la Figura 2.2.1 muestra tres objetos fractales típicos (el helecho de Barnsley, el sistema de funciones iteradas Zig-Zag y triángulo de Sierpinsky. (Xie, 1993)). Se puede ver en la Figura 4 que, el triángulo de Sierpinsky está formado por tres copias de sí mismo (a escala 0,5).



Figura 2.2.1: Objetos fractales típicos (helecho, Zig-Zag y triángulo Sierpinsky, (Xie, 1993))

Mediante la implementación de la geometría fractal se han podido obtener parámetros cuantitativos para definir qué tan irregular puede ser un objeto determinado. Esto es un criterio basado en teoría de la medida, en la que se cuantifican características de cualquier conjunto mediante una cantidad escalar.

Según Magaña et al. (2011), en matemáticas una medida es una función (o mapeo u operador) que, asigna un número a subconjuntos de un conjunto dado, por ejemplo, a un “volumen” o “probabilidad”. Es decir, son funciones que implican manejos algebraicos diferentes según el conjunto al que se aplican. Para definir un fractal se deben tener en cuenta las siguientes características :

- Autosimilitud: A diferentes escalas, un fractal conserva la misma apariencia, siempre existe una clara similitud entre partes muy distantes de una misma figura fractal.
- Infinito detalle: Relacionada con la característica anterior, al ampliar un fractal, tanto más detalle revela éste, sin que se tenga un límite en el que se aprecien curvas suavizadas.

- **Dimensión no entera:** Al contrario de la geometría clásica, en la que las figuras tienen 1, 2 o 3 dimensiones, un fractal puede desarrollarse en una dimensión no entera, por ejemplo, la curva de Koch (Figura 2.2.2), que lo hace en la dimensión 1.26; esto es, ocupa parte del plano, pero no llega a tener la entidad de figura bidimensional. Esta dimensión se deduce a partir de la medida de Hausdorff.
- Las fórmulas o algoritmos que los definen son relativamente sencillos y operan con un conjunto muy reducido de datos.
- Su algoritmia es definida por una característica clave: la iteración. La aparición en la ingeniería de las computadoras es lo que permite experimentar y descubrir nuevos conjuntos y sin ellas, probablemente Mandelbrot no hubiese llegado tan lejos.

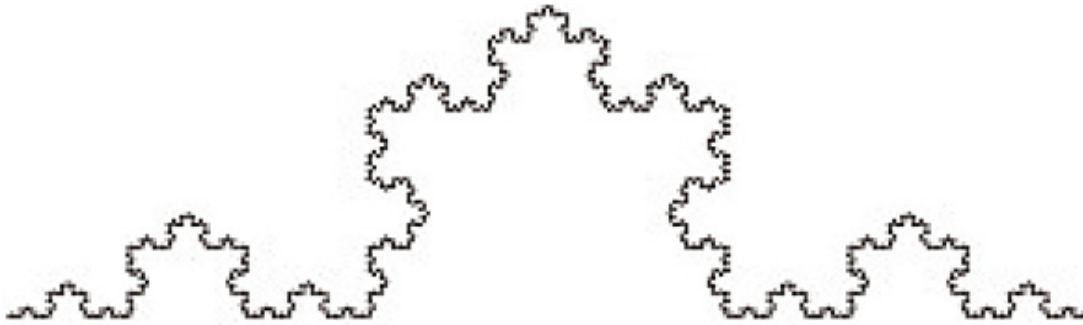


Figura 2.2.2: Curva de Koch, (Magaña et al., 2011)

2.2.1. Dimensión fractal

En Correa Villa (2014), se menciona, “el concepto de dimensión euclídea asigna un número natural a los distintos objetos geométricos que pueden definirse en un espacio dado. Por ejemplo, un conjunto contable de puntos tiene dimensión cero, una curva dimensión uno, una superficie dimensión 2, etc. (Figura 2.2.3). Este concepto de dimensión tiene diversas interpretaciones intuitivas como, por ejemplo, el número de grados de libertad que son necesarios para definir el objeto.”

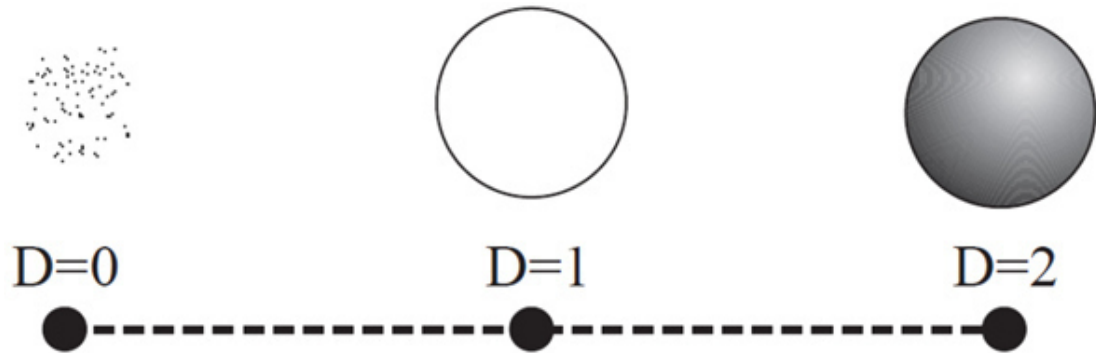


Figura 2.2.3: Dimensión fractal, (Correa Villa, 2014)

Para ejemplificar el cálculo de la dimensión fractal se puede proceder de la siguiente manera:

1. Para un segmento de longitud 1, si se parte en diferentes segmentos de longitud L , se obtienen N partes, de manera que $N \cdot L^1 = 1$, sin importar la longitud L (Figura 2.2.4 a.).
2. Si inicialmente se tiene un objeto cuadrado de superficie 1 y se compara con unidades cuadradas que tengan lado de longitud L , entonces, el número de unidades que es necesario para recubrirlo N , se cumple $N \cdot L^2 = 1$ (Figura 2.2.4 b.).
3. Por último, si el objeto es cúbico de volumen 1 (tridimensional), y se mide respecto a unidades que sean cubos de arista L , entonces se cumple que $N \cdot L^3 = 1$ (Figura 2.2.4 b.).

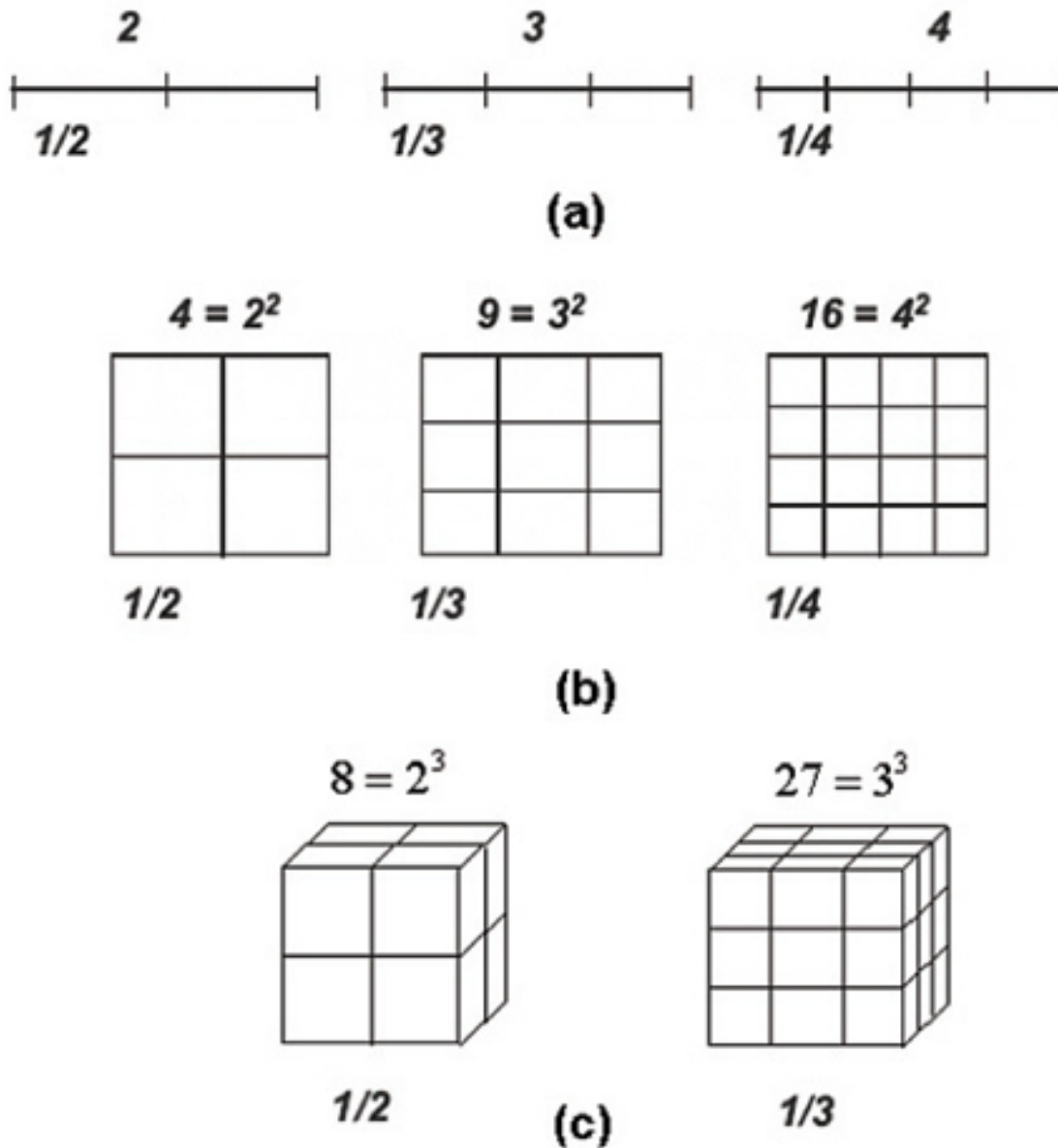


Figura 2.2.4: Dimensiones de objetos (a) 1 dimensión, (b) 2 dimensiones y, (c) 3 dimensiones., (Magaña et al., 2011)

Así pues, si se tiene en cuenta la curva de Koch mostrada en la Figura 2.2.2, reducida en $1/3$ de su escala, se puede ver que se descompone en 4 partes (Figura 2.2.5), luego, al utilizar la ecuación para hallar D se obtiene que dicha curva tiene una dimensión fractal de 1,2618.

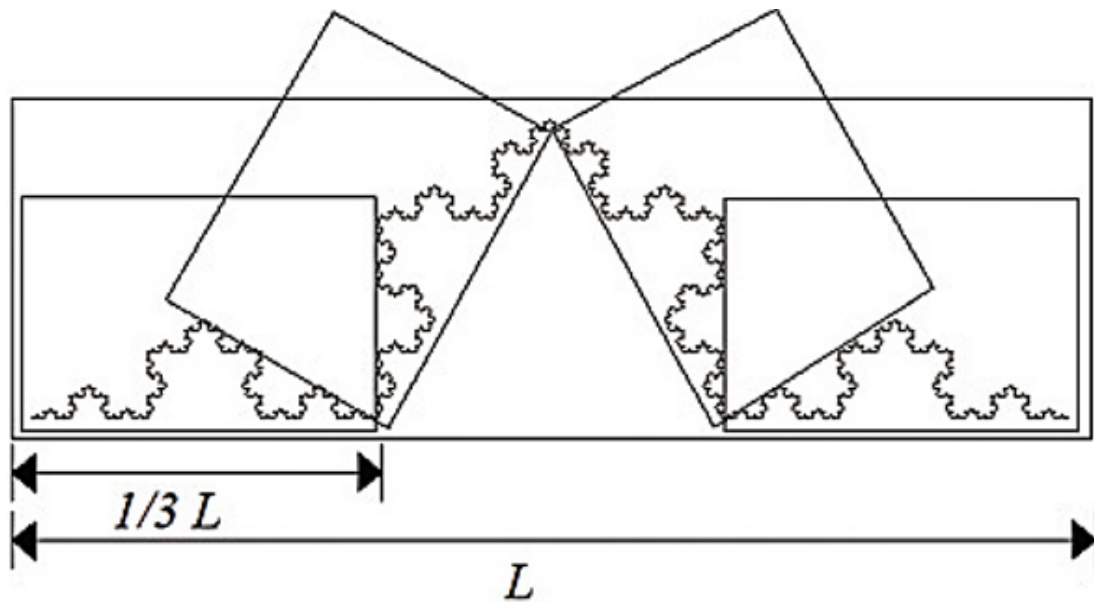


Figura 2.2.5: Cálculo de la dimensión fractal D de la curva de Koch. (Magaña et al., 2011)

A medida que D pasa de uno a dos, las curvas resultantes pasan de “parecidas a líneas” a “llenar planos”. Este fenómeno ocurre también con las figuras con dimensión entre 2 y 3, cada vez comienzan a llenarse más el espacio (Magaña et al., 2011).

Capítulo 3

Metodología

3.1. Introducción

Para el desarrollo de este trabajo se tuvo en cuenta el enfoque cualitativo para el diseño metodológico propuesto por (Hernández et al., 2014). Este enfoque cuenta con 9 fases (Figura 3.1.1), iniciando con el rastreo bibliográfico y finalizando con la presentación los resultados de la investigación.

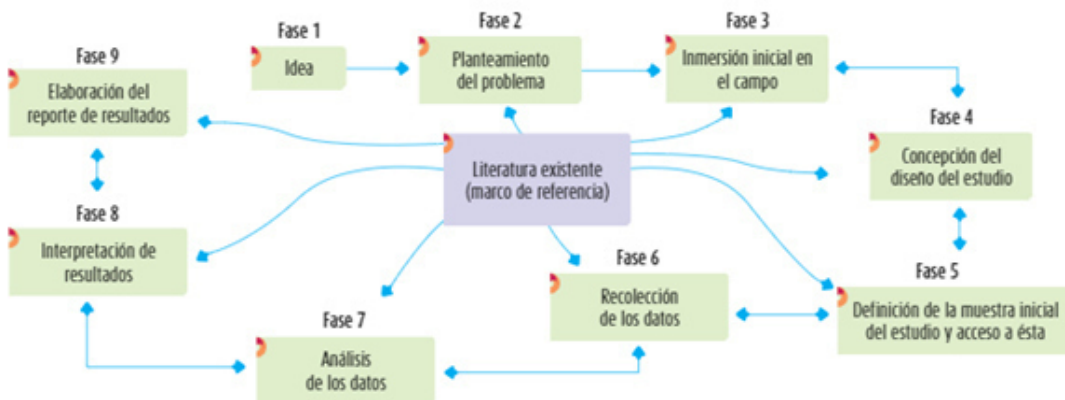


Figura 3.1.1: Fases del enfoque cualitativo, (Hernández et al., 2014)

Centrados en la idea de presentar una metodología para la estimación del GSI bajo la implementación de la teoría fractal y la caracterización geomecánica de las paredes de las discontinuidades de macizos rocosos heterogéneos estratificados, se hizo una recopilación de la información que permitiera darle en enfoque conceptual al desarrollo del trabajo.

Con la información recopilada en la zona de estudio durante las etapas de diseño y construcción se dieron las bases para el análisis de los datos que permitieran obtener los resultados de estimación y cuantificación de la calidad del macizo rocoso con características geomecánicas particulares (Figura 3.1.2). Luego, se hizo una validación de los resultados obtenidos a partir del procesamiento y análisis mediante la metodología de estimación propuesta en este trabajo, para finalmente presentar los comentarios y recomendaciones de uso de esta.

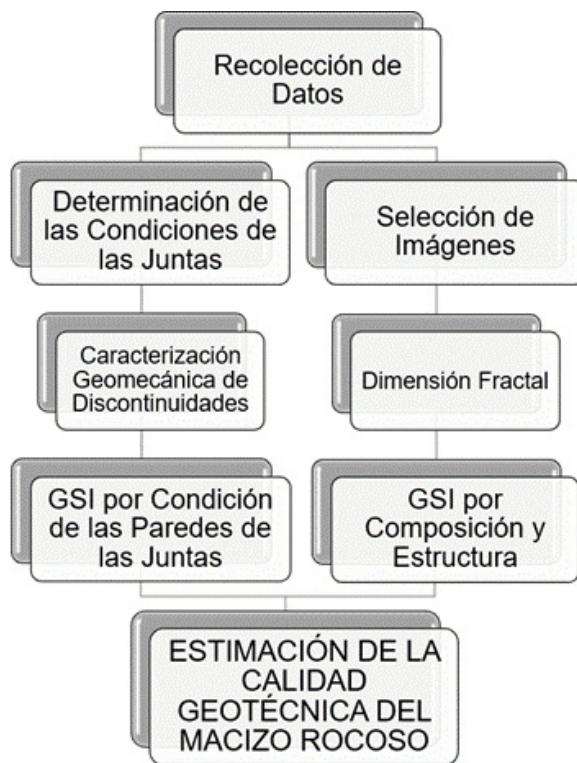


Figura 3.1.2: Metodología para la estimación de GSI

3.2. Área de estudio

Este trabajo toma como zona de estudio el trazado del Túnel Guillermo Gaviria Echeverri, inicialmente denominado Túnel 17 – El Toyo – en adelante Túnel GGE.

El Túnel Guillermo Gaviria Echeverri y sus vías de acceso es uno de los proyectos viales de cuarta generación (4G) que, busca mejorar la conectividad entre el centro de Antioquia y los proyectos portuarios que se piensan construir en la sub-región de Urabá. La construcción del Túnel GGE se lleva a cabo en el Departamento de Antioquia, entre los municipios de Santafé de Antioquia y Cañasgordas. Para

efectos constructivos la construcción de este espacio subterráneo y vías de acceso fue dividido en (2) tramos como se muestra en la Figura 3.2.1.

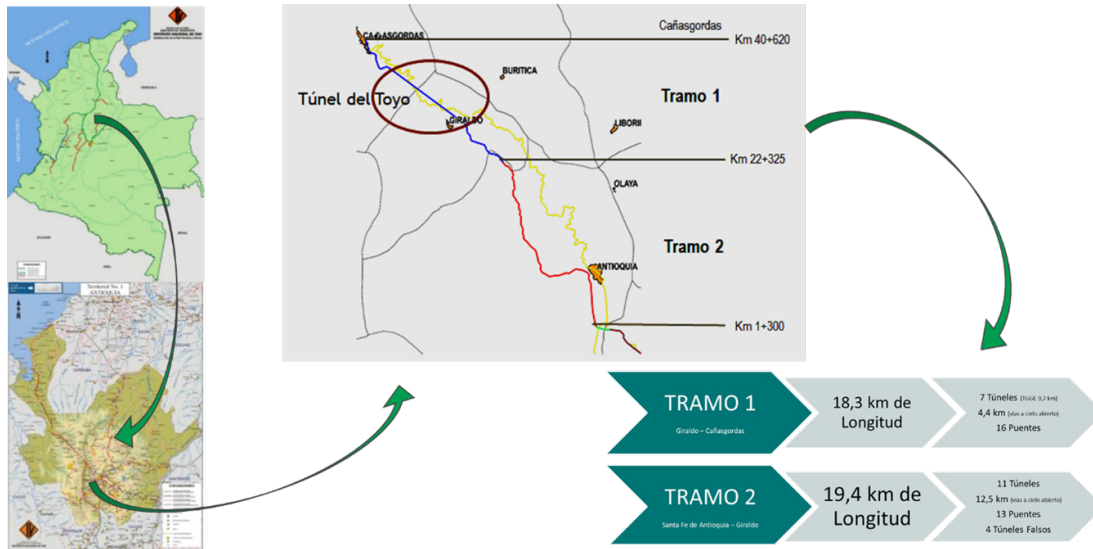


Figura 3.2.1: Localización general del Túnel Guillermo Gaviria Echeverri y sus Vías de Acceso, departamento de Antioquia, Colombia, Fuentes Varias

El trazado del Túnel GGE se ubica en el tramo 1, presenta una longitud total de 9370 m, con inicio en la abscisa km 27+125 (Portal Entrada - Giraldo) y final en la abscisa km 36+855 (Portal Salida - Cañasgordas), como se puede ver en la Figura 3.2.2.

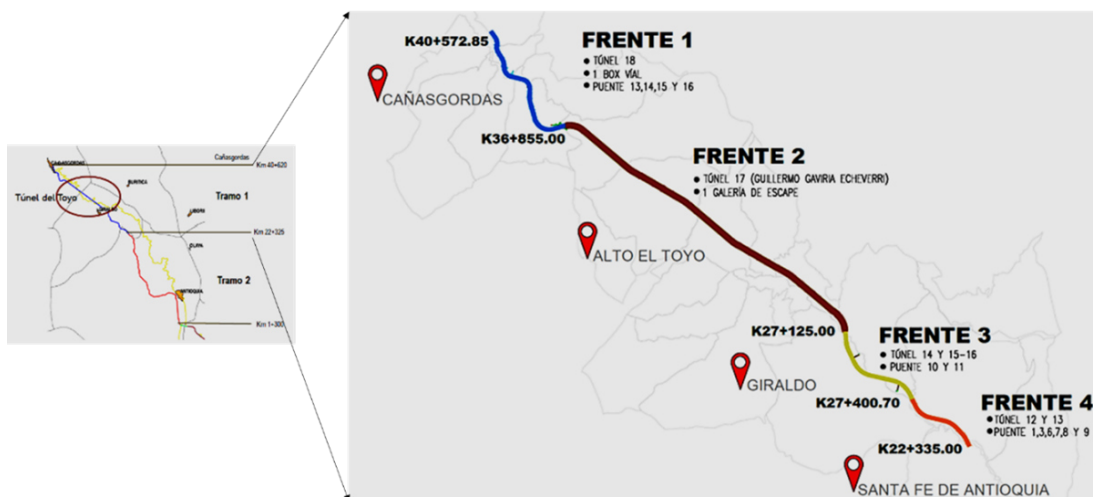


Figura 3.2.2: Ubicación detallada del Túnel Guillermo Gaviria Echeverri en el tramo 1, Elaboración Propia

El túnel principal presenta una sección tipo herradura con un área promedio de

110 m² como se muestra en la Figura 3.2.3. Por su carácter en arco, la geometría seleccionada permite la adecuada redistribución de esfuerzos alrededor de la cavidad, minimizando la concentración de esfuerzos de compresión y la generación de esfuerzos de tensión.

Dentro del proyecto Túnel GGE y sus vías de acceso se localizan varias obras, túneles cortos, puentes y excavaciones a cielo abierto. Sobre el km 23+156, en el municipio de Giraldo se encuentra el primer túnel del tramo, denominado Túnel 11 y a la altura del km 39+964, en la entrada la cabecera municipal de Cañasgordas, se ubica el último túnel, denominado 18.

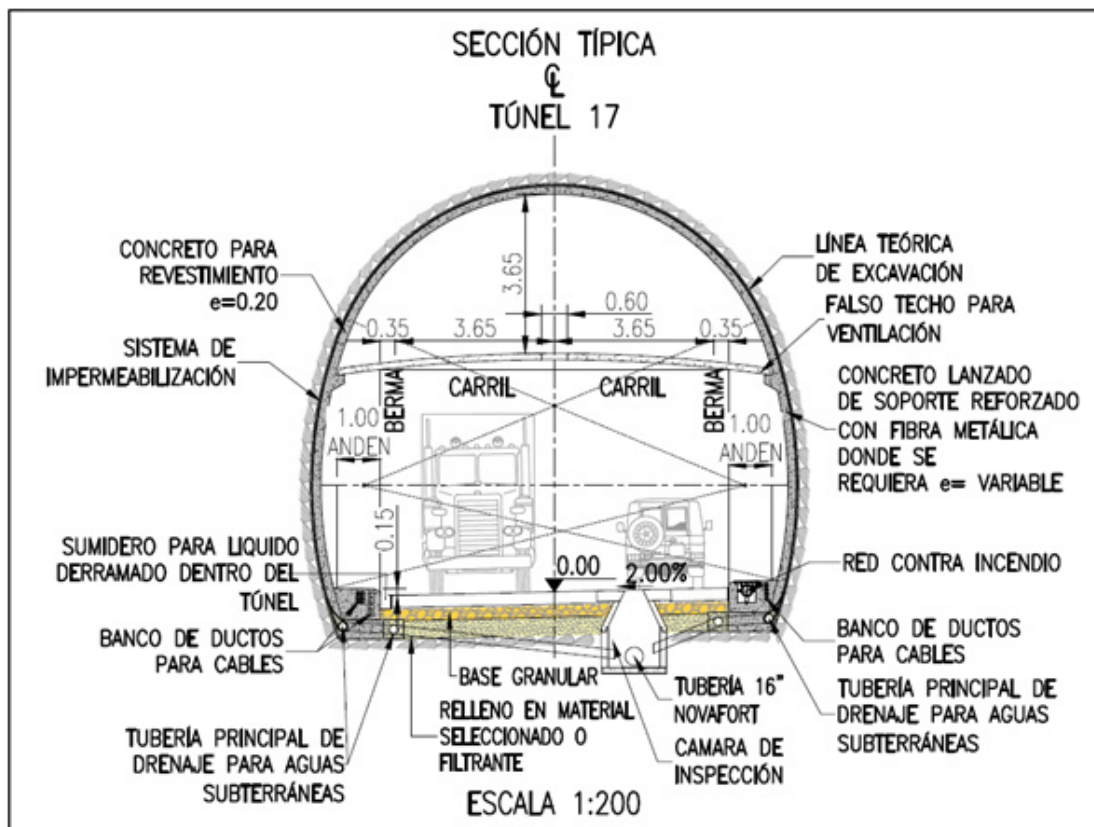


Figura 3.2.3: Ubicación detallada del Túnel Guillermo Gaviria Echeverri en el tramo 1, (Consortio Antioquia al Mar, 2017)

3.2.1. Geología Regional

El Túnel del GGE se localiza en el flanco oriental de la cordillera Occidental de Colombia, en el norte del departamento de Antioquia entre los municipios de Giraldo y Cañasgordas. Las condiciones fisiográficas presentan paisajes de montaña con valles estrechos y profundos, con pendientes topográficas altas y

condiciones geológicas variadas relacionadas con las rocas ígneas y sedimentarias que han sido emplazadas en ambientes volcano-sedimentarios de origen marino, con gran influencia tectónica debido al límite de placas que le compete al occidente colombiano.

El contexto tectónico – estructural del noroccidente colombiano se enmarca en la interacción de las placas tectónicas de Nazca, Sudamericana y del Caribe, y en menor medida, por la interacción con el bloque de Panamá. Esta zona de subducción ha hecho que se tengan esfuerzos compresivos que controlan el comportamiento de la corteza terrestre, como se muestra en la Figura 3.2.4.

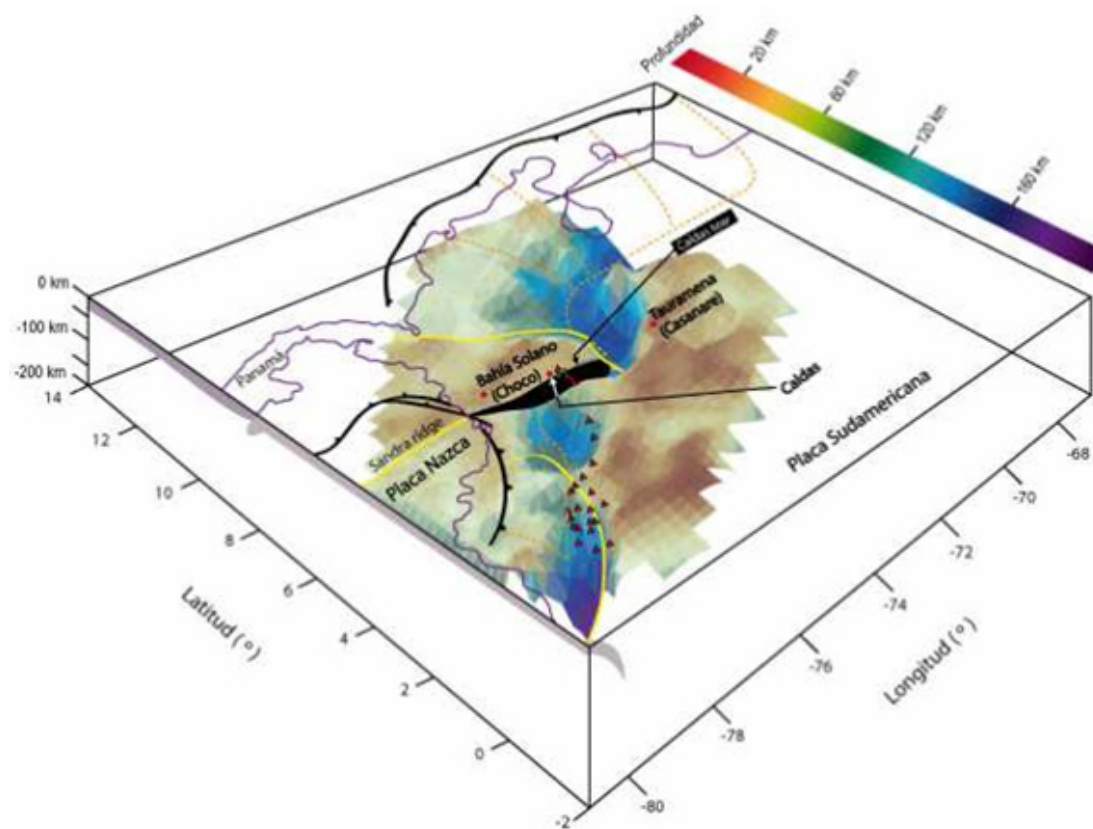


Figura 3.2.4: Interacción de las placas Nazca, Caribe, Suramérica y Panamá, (Universidad Nacional de Colombia, 2011)

Debido a la colisión entre las placas, se han generado varios sistemas de fallas en las cordilleras colombianas que, ponen en contacto formaciones rocosas y provocan plegamientos y fracturamientos menores. Además, por la subducción de la placa de Nazca bajo la placa Sudamericana, en la Cordillera Occidental domina un ambiente litológico marino del cretácico, que se unen a la Cordillera Central por

medio del sistema de Fallas Cauca-Romeral.

Si bien la mayoría de las rocas de origen oceánico que conforman la Cordillera Occidental presentan edades del cretácico, pueden encontrarse algunas que presenten edades diferentes a este periodo. Las rocas en la zona de estudio hacen parte de la secuencia volcano-sedimentaria que conforman la Formación Barroso que presenta un dominio de rocas volcánicas como basaltos y diabasas, y la Formación Penderisco que está conformada principalmente por rocas sedimentarias como lutitas/lodolitas, areniscas, chert, entre otras. El origen de esta secuencia de depositación puede explicarse como la acumulación de capas de lava, sobre las cuales se fueron depositaron sedimentos, siendo la Formación Barroso el piso de la columna litoestratigráfica y la Formación Penderisco el techo para conformar de esta manera el denominado Grupo Cañasgordas.

Según INGEOMINAS (1999), la geología en la zona de construcción del Túnel GGE comprende unidades geológicas de origen ígneo tanto volcánico como plutónico, y unidades de origen sedimentario, asociadas principalmente a la Formación Barroso las rocas volcánicas, y a la Formación Penderisco las sedimentarias, respectivamente. De otra parte, los cuerpos de rocas plutónicas graníticas e intermedias pueden considerarse como unidades independientes pertenecientes al Batolito de Sabanalarga y al Stock de Buriticá respectivamente, como se puede ver en la Figura 3.2.5

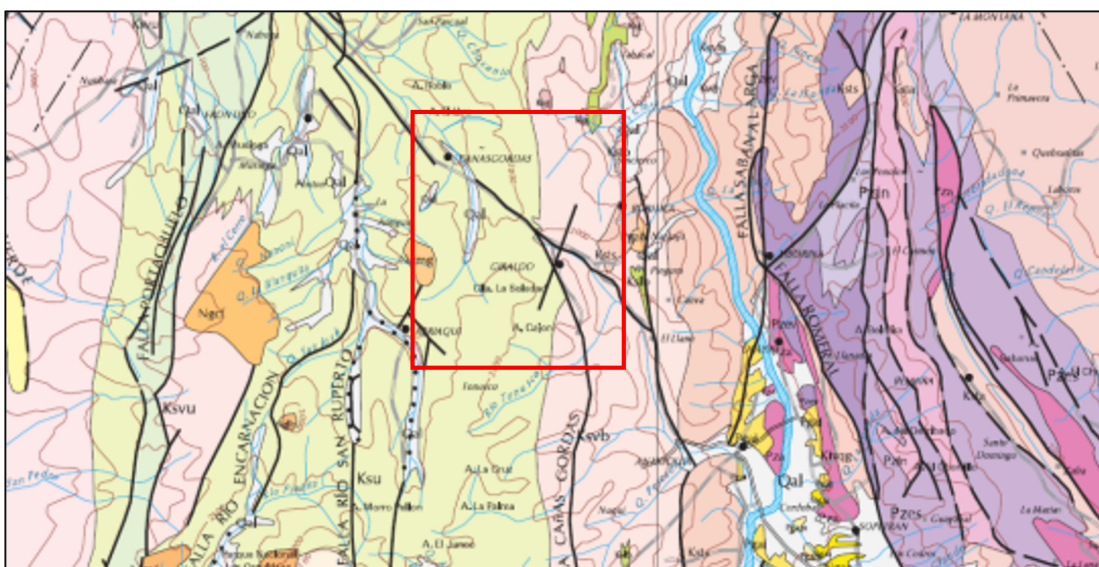


Figura 3.2.5: Marco geológico regional asociado a la zona de estudio del Túnel GGE, (Consortio Antioquia al Mar, 2017)

Según el tipo de roca y las condiciones atmosféricas dominantes en la zona de estudio, se tiene asociado un desarrollo de los suelos residuales. En el caso de las rocas ígneas se pueden encontrar suelos residuales gruesos con perfiles de meteorización bien desarrollados, siendo más notorio en las rocas plutónicas de composición intermedia. Los suelos residuales originados de la meteorización de las rocas sedimentarias tienden a ser más delgados y menos desarrollados que los que se han producido de la descomposición química de las rocas ígneas.

En términos generales, las unidades geológicas descritas anteriormente han sido afectadas por la actividad tectónica regional que caracteriza a la Cordillera Occidental de Colombia. Particularmente en la zona de estudio, esta afectación estaría asociada a las zonas de influencia de los sistemas de fallas Cañasgordas y Tonusco, así como a sus sistemas de fallas satélites o menores. En la Formación Barroso es común encontrar intercalaciones pequeñas con rocas sedimentarias. Igualmente, en la Formación Penderisco es usual que encuentren rocas sedimentarias intercaladas con rocas volcánicas. Por otro lado, las rocas ígneas graníticas e intermedias se encuentran como intrusiones principalmente sobre las unidades volcánicas de la Formación Barroso.

- Formación Barroso (Ksvb) (K1vb, K1lb): Unidad comprendida principalmente por rocas volcánicas localizadas en el flanco oriental de la Cordillera Occidental, al oeste del sistema de Fallas de Romeral y asimismo del río Cauca.
- Grupo Cañasgordas - Formación Penderisco (Ksu) Unidad de rocas sedimentarias que afloran en la parte axial y en el flanco occidental de la Cordillera Occidental en el departamento de Antioquia, extendiéndose hasta los departamentos de Risaralda, Chocó y Valle del Cauca. Se encuentra formada por dos miembros: Urrao, compuesto por rocas sedimentarias de origen turbidítico, como areniscas, conglomerados y arcillolitas y, Nutibara, compuesto por rocas de origen químico como liditas, chert y calizas negras.
- Batolito de Sabanalarga (Ksts) (K1bs) y Stock de Buriticá (Kstb): El Batolito de Sabanalarga es un cuerpo alargado con dirección Norte-Sur ubicado entre las cordilleras Central y Occidental que corresponde a una roca con varias facies debido a sus cambios composicionales.
- Andesita de Buriticá (Pgab): Cuerpo de 2 km de diámetro y una extensión

de 3 km² que aflora entre Pinguro y Buriticá y que se encuentra asociado a numerosos diques de composición andesítica y textura porfirítica. Las rocas ígneas de composición intermedia se encuentran en contacto intrusivo con las rocas volcánicas y sedimentarias de la Formación Barroso y con el Batolito de Sabanalarga. El contacto oriental con la Formación Barroso se encuentra delimitado por la Falla Tonusco.

3.2.1.1. Geología Estructural

Como se dijo antes, la geología estructural y el ambiente tectónico del occidente colombiano está fuertemente influenciado por la interacción de las placas tectónicas de Nazca, Sudamericana y del Caribe; y en menor medida, por la interacción con el bloque de Panamá. Además, esta zona de subducción ha hecho que se tengan esfuerzos compresivos que controlan el comportamiento de la corteza terrestre, como se muestra en la Figura 3.2.6.

Debido a lo anterior, a lo largo de todas las cordilleras se pueden encontrar sistemas de fallas de gran importancia, las cuales ponen en contacto grandes formaciones rocosas y configuran las deformaciones de las rocas mediante plegamientos y fracturamientos menores. Así pues, la Cordillera Occidental, donde predominan rocas de origen oceánico de edad cretácica principalmente, es puesta en contacto con la Cordillera Central mediante las estructuras que conforman el sistema de Fallas de Cauca-Romeral.

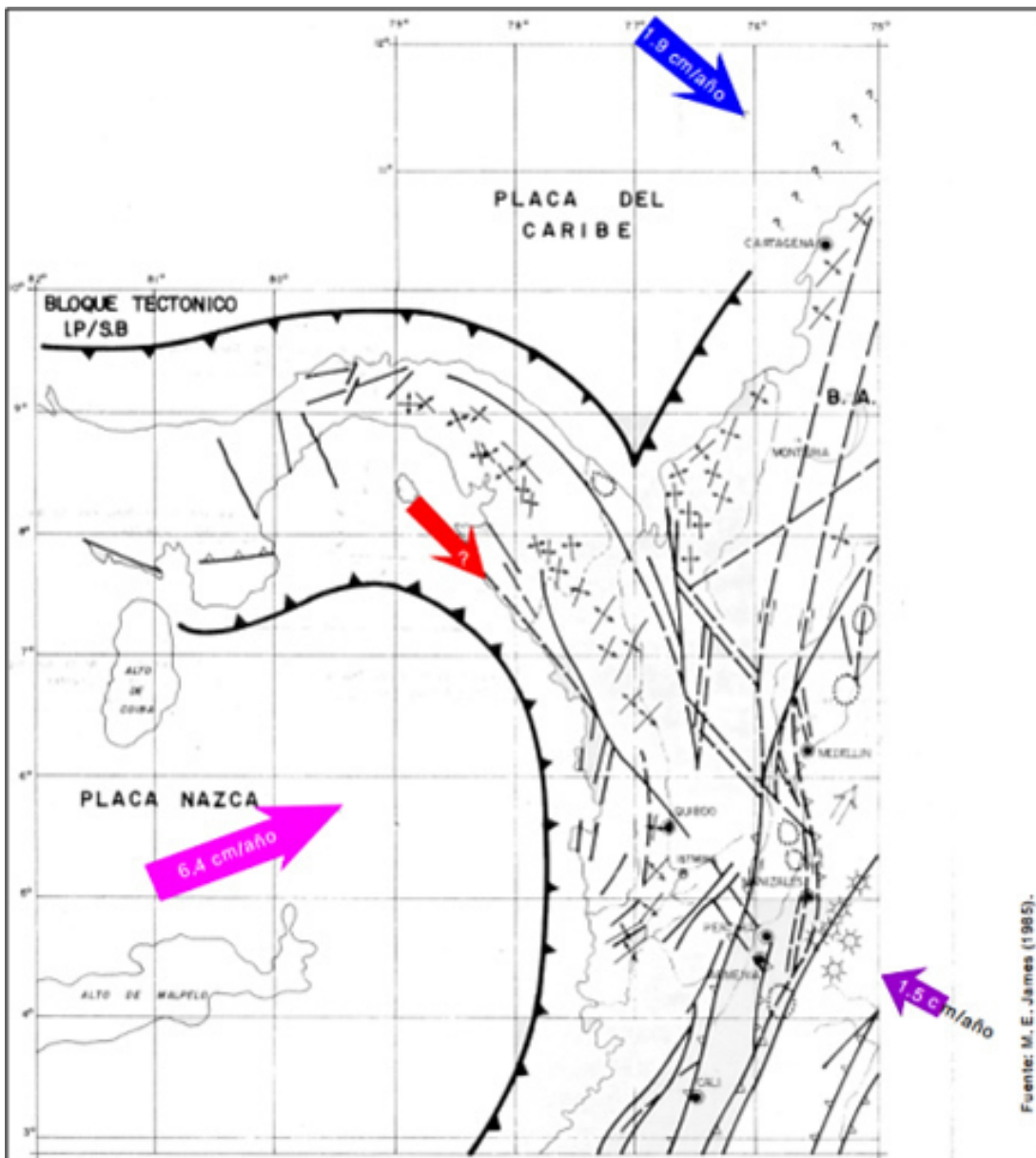


Figura 3.2.6: Modelo tectónico al noroccidente colombiano, (Consortio Antioquia al Mar, 2017)

Según Sánchez et al. (2003), las fallas más importantes del occidente Antioqueño son de oriente a occidente: Fallas de Sabanalarga, Fallas del Cauca, Falla Anzá, Falla Peque, Fallas de Urrao, Falla Cañasgordas, Falla Tonusco, Falla Abriaquí, Falla de Tucurá, Falla San Pedro, Falla Murrí – Mutatá, Falla Murindó y Falla Atrato (Figura 3.2.7).

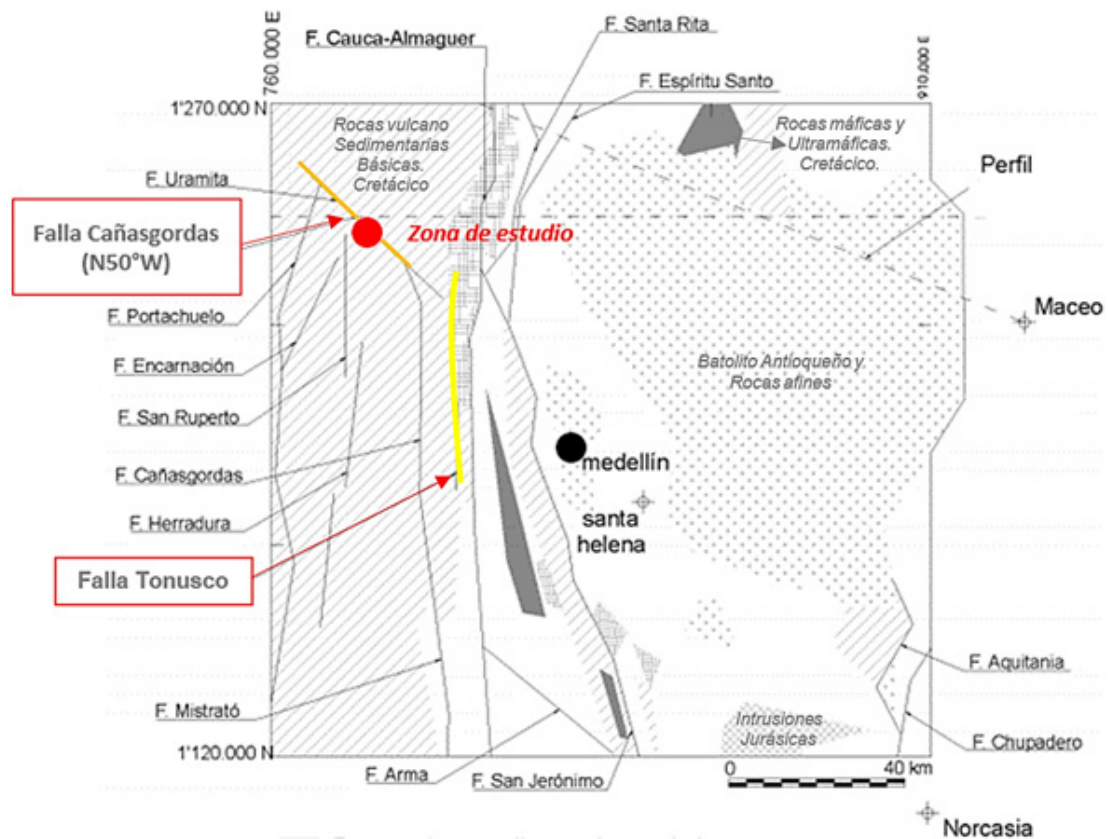


Figura 3.2.7: Fallas principales en el occidente Antioqueño, (Consortio Antioquia al Mar, 2017)

Particularmente, el Túnel Guillermo Gaviria Echeverri se encuentra en las zonas de influencia de las fallas Cañasgordas y Tonusco, siendo más influyente para el trazado del túnel el sistema de fallas Cañasgordas que el Tonusco. La Falla Cañasgordas se encuentra asociada con la cuenca del río Sucio hasta la zona de Dabeiba, mientras que, la Falla Tonusco coincide con el lineamiento del río Tonusco en su tramo de desembocadura hacia el río Cauca (INGEOMINAS, 2001).

- Falla Cañasgordas: Como se mencionó anteriormente, esta falla presenta un rumbo de N50°W y una longitud de aproximadamente 50 km, buzamiento casi vertical y una dirección de movimiento de rumbo, sinistral, por lo que se le ha denominado una falla oblicua. Algunos autores consideran la falla con actividad de bajo grado (Page, 1986), y a ella se encuentran asociadas varias fallas sub-paralelas. Los macizos rocosos asociados a la Falla Cañasgordas se caracterizan por presentar estructuras como consecuencia de efectos dinámicos, la cual presenta una dirección igual a la del sistema de fallas. (INGEOMINAS, 2001).

Su dirección es casi paralela con el alineamiento del proyecto cuya dirección corresponde a N46°W. Esta falla ha sido asociada con la Falla Tonusco, sin embargo, en la zona del río Tonusco la estructura presenta un rumbo en dirección NS por lo que se ha considerado que realmente existen dos fallas que se interceptan cerca del municipio de Giraldo, siendo la NS denominada como Falla Tonusco, el otro trazo de falla se localiza entre la población de Cañasgordas hasta el municipio de Giraldo. La Falla Cañasgordas en el sector de Dabeiba se une a la Falla Uramita. (ISA, 2012).

- Falla Tonusco: Esta falla, con una longitud de 68 km aproximadamente, el lineamiento de la falla controla el curso del río Tonusco, del cual toma su nombre y el cual drena hacia el sureste paralelo al río Cauca. A la falla Tonusco se le han asociado dos ramales, uno de ellos estaría hacia Buriticá y el otro sería compuesto por fracturas continuas de las cuales la más importante es la que coincide con la orientación de la quebrada Las Habas, y las otras de menor importancia, presentan una dirección S-SW hasta encontrarse con la falla Gusabra o Mistrató.

En la zona de estudio, la Falla Tonusco afecta las rocas de la Formación Barroso, así como al Batolito de Sabanalarga y presenta movimiento sinistral, algunos afloramientos de esta falla fueron identificados por Cossio (2014) en los cauces de la quebradas Las Habas y Gusabra

3.2.2. Modelo Geológico del Túnel GGE

El modelo geológico del túnel GGE, fue dividido en dos grandes zonas homogéneas que a su vez se subdividen en 42 tramos homogéneos definidos por litología, comportamiento geomecánico y/o coberturas verticales. En la Figura 3.2.8 se muestra el modelo geológico de diseño en planta y perfil, en color rosado se puede observar el dominio volcánico que representa la Formación Barroso y en color amarillo el dominio sedimentario de la Formación Penderisco.

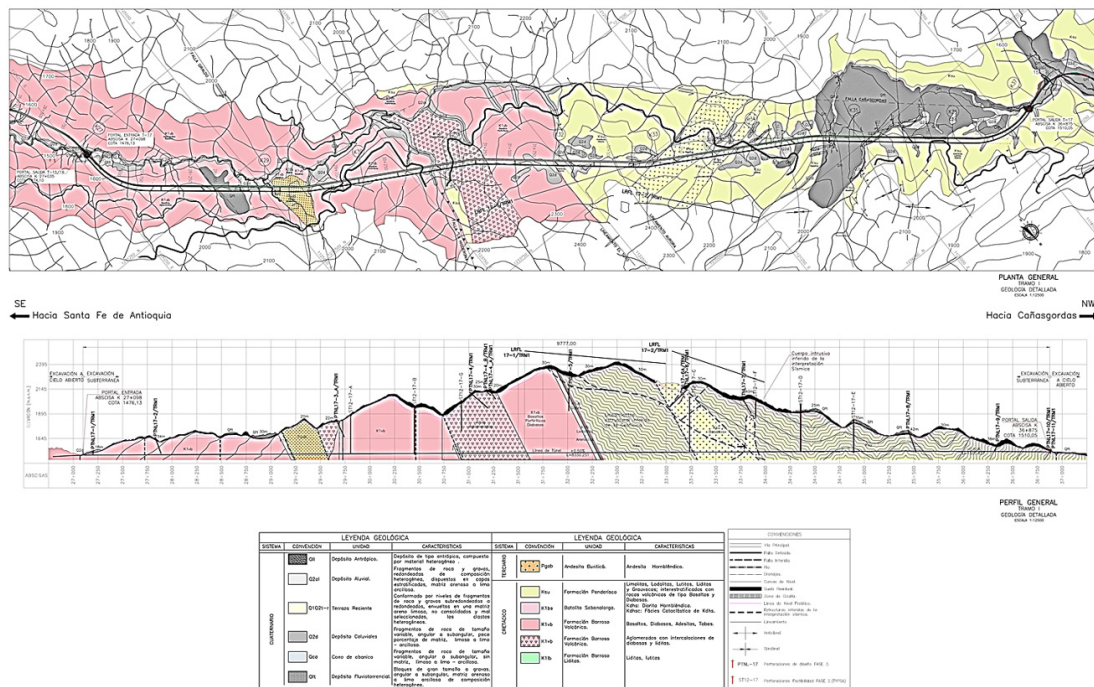


Figura 3.2.8: Modelo geológico de diseño del túnel GGE, planta y perfil., (Consortio Antioquia al Mar, 2017)

Asimismo, una vez hecha la zonificación geológica, se elaboró una zonificación geomecánica con el fin de establecer tramos homogéneos para la instalación de soporte según las clasificaciones por tipo de terreno. En la Tabla 3.2.1 se pueden ver los tramos por tipo de terreno además de los parámetros adoptados para el diseño del soporte.

Tabla 3.2.1: Sectorización preliminar por soporte y tipos de terreno del Túnel GGE, Modificado de Consortio Antioquia al Mar, (2017).

N° Tramo	Inicio (km)	Final (km)	Tipo de Terreno Dominante	Tipo de Roca	Cobertura (m)	RMR
1	27+125	27+205	SUELO	Qc /Qal	34	N.A.
2	27+205	27+305	IV	Basalto	48	40
3	27+305	27+683	III	Basalto	174	60
4	27+683	27+743	V	Basalto	187	25
5	27+743	28+310	III	Basalto	236	60
6	28+310	28+447	IV	Basalto	219	40

Table 3.2.1 continued from previous page

N° Tramo	Inicio (km)	Final (km)	Tipo de Terreno Dominante	Tipo de Roca	Cobertura (m)	RMR
7	28+447	28+507	V	Basalto	186	25
8	28+507	28+880	III	Basalto	221	60
9	28+880	29+180	IV	Basalto	265	40
10	29+180	29+240	V*	Chert	282	20
11	29+240	29+527	III	Andesita	351	60
12	29+527	29+587	V*	Chert	272	20
13	29+587	29+775	II	Basalto	371	70
14	29+775	30+423	I	Basalto	593	85
15	30+423	30+483	IV	Basalto	463	40
16	30+483	30+843	III	Aglomerado	480	60
17	30+843	30+903	V*	Falla	409	20
18	30+903	31+020	III	Aglomerado	587	60
19	31+020	31+580	III	Aglomerado	790	60
20	31+580	32+100	III	Basalto	875	60
21	32+100	32+250	IV	Chert	833	40
22	32+250	32+310	V	Gabro	850	25
23	32+310	32+360	V*	Contacto	850	20
24	32+360	32+420	V	Lodolita	877	25
25	32+420	32+560	IV	Lodolita	907	40
26	32+560	33+227	III	Arenisca	889	60
27	33+227	33+287	V	Arenisca	710	25
28	33+287	33+620	II	Basalto	707	70
29	33+620	33+815	II	Basalto	574	70
30	33+815	33+865	IV	Basalto	568	40
31	33+865	33+930	III	Arenisca	557	60
32	33+930	34+050	III	Basalto	522	60
33	34+050	34+100	V	Basalto	461	25
34	34+100	34+570	IV	Lodolita	428	40
35	34+570	34+875	IV	Arenisca	395	40
36	34+875	35+000	III	Arenisca	311	60

Table 3.2.1 continued from previous page

N° Tramo	Inicio (km)	Final (km)	Tipo de Terreno Dominante	Tipo de Roca	Cobertura (m)	RMR
37	35+000	35+255	III	Arenisca	268	60
38	35+255	35+615	III	Arenisca	197	60
39	35+615	35+970	IV	Lodolita	244	40
40	35+970	36+450	III	Lodolita	198	60
41	36+450	36+782	IV	Lodolita	117	40
42	36+782	36+855	V	Lodolita	60	25

3.3. Caracterización geomecánica durante construcción

La caracterización geológica-geotécnica del macizo rocoso excavado por el portal salida del Túnel Guillermo Gaviria Echeverri – dominio sedimentario de la Formación Penderisco – se realizó a partir de la información recopilada en los Levantamientos del Macizo Rocosó (LMR) realizados durante la excavación de la obra entre junio de 2020 y la primera semana de abril de 2021, lapso en el cual el túnel tuvo un avance cercano al kilómetro, tramo donde se realizaron 182 LMR entre las abscisas km 35+211,00 y km 34+214,25, excavación realizada en contra del aumento de las abscisas de la vía.

La recopilación de datos se realizó por parte del CAM, utilizando un formato que contiene información relacionada con la descripción del sitio o frente de avance, tipo de estructura geológica, disposición y demás características geomecánicas de los diferentes sistemas de discontinuidades presentes en el macizo rocoso excavado, entre otros aspectos (Figura 3.3.1). Con estos parámetros se determinan las condiciones geológicas bajo las cuales se realizaron las excavaciones, como es el caso la condición de las discontinuidades, resistencia de la matriz rocosa, etc.

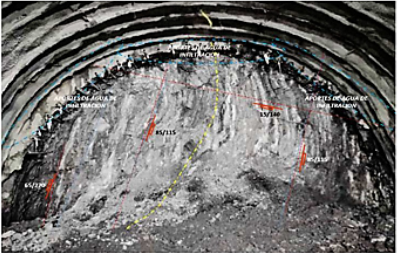
CONSORCIO ANTIOQUIA AL MAR		REGISTRO GEOLOGICO - GEOTECNICO DEL MACIZO ROCOSO				FTPC-GJ 009 VERSION: 02 FECHA: 10/10/2019																																																																																																																												
SEDE/PROYECTO: CONSTRUCCIÓN DEL PROYECTO TUNEL DEL TOYO Y SUS VIAS DE ACCESO EN SUS FASES DE PRECONSTRUCCIÓN, CONSTRUCCIÓN, OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO CONTRATO No. 4600004806-2015																																																																																																																																		
FRENTE:	TOYO-PS	FECHA:	27/06/2020	ABSCISA:	K35+136.00	REGISTRO No.	278																																																																																																																											
CLASIF. MACIZO ROCOSO	V	SECCIÓN:	SUPERIOR	SOPORTE TIPO:	V	GSI:	15 - 20																																																																																																																											
DESCRIPCIÓN GEOLOGICA & GEOTECNICA																																																																																																																																		
<p>Macizo rocoso conformado por fuertes estratificaciones replegadas de lutitas/liditas/arcillas, con un grado de alteración moderado y resistencia moderado/baja. Se identifican 3 patrones de discontinuidad (E: 65/270; D1: 65/140; D2: 85/115) de persistencia moderada a alta, abertura mayor a 5 mm, superficies lisas a ligeramente onduladas, con rellenos blandos de más de 5 mm de espesor. Aporte de agua de infiltración a manera de humedades y goteos constantes a través de planos de estratificación. Debido a las condiciones geomecánicas presentes se recomienda llevar a cabo un buen desabombe, concreto lanzado primario e instalación inmediata de soporte, se presenta sobrecavación inevitable por incidencias de humedades, goteos y baja competencia del material arcilloso (pierde capacidad de autosuporte).</p>																																																																																																																																		
<p>Conv. Diaclasa Plano-Cizalla Foliación Sicken sides Estratificación Filtración</p> <p>CLASIFICACION GEOMECANICA - SISTEMA RMR (1989)</p>																																																																																																																																		
Resistencia de la matriz rocosa: 2																																																																																																																																		
UCS	R _u = 250 Mpa		R _u 100-250 Mpa		R _u 50-100 Mpa		R _u 25-50 Mpa																																																																																																																											
RQD (Índice de calidad de roca): 4																																																																																																																																		
RQD	90-100%		75-90%		50-75%		25-50%																																																																																																																											
Separación entre discontinuidades: 5																																																																																																																																		
SD	> 2 m		0.6 - 2.0 m		200 - 600 mm		60 - 200 mm																																																																																																																											
Condición de las discontinuidades: 11																																																																																																																																		
<table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">Tipo</th> <th colspan="5">Persistencia</th> <th colspan="3">Abertura</th> <th colspan="4">Rugosidad</th> <th colspan="4">Relleno</th> <th colspan="4">Alteración</th> </tr> <tr> <th>< 1 m</th> <th>1-3 m</th> <th>3-10 m</th> <th>10-20 m</th> <th>>20m</th> <th>Sellada</th> <th>< 0.1 mm</th> <th>0.1-1.0 mm</th> <th>1-5 mm</th> <th>> 5 mm</th> <th>Sicken sides</th> <th>Liso</th> <th>Lig. Rugoso</th> <th>Rugoso</th> <th>Muy Rugo</th> <th>Ninguno</th> <th>Relleno-duro < 5mm</th> <th>Rell. Blando < 5mm</th> <th>> 5mm</th> <th>Inalt.</th> <th>Lig. Alt.</th> <th>Mod. Alt.</th> <th>Muy Alt.</th> <th>Desc.</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>E</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>D1</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>D2</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>								Tipo	Persistencia					Abertura			Rugosidad				Relleno				Alteración				< 1 m	1-3 m	3-10 m	10-20 m	>20m	Sellada	< 0.1 mm	0.1-1.0 mm	1-5 mm	> 5 mm	Sicken sides	Liso	Lig. Rugoso	Rugoso	Muy Rugo	Ninguno	Relleno-duro < 5mm	Rell. Blando < 5mm	> 5mm	Inalt.	Lig. Alt.	Mod. Alt.	Muy Alt.	Desc.	E																										D1																										D2																									
Tipo	Persistencia					Abertura			Rugosidad				Relleno				Alteración																																																																																																																	
	< 1 m	1-3 m	3-10 m	10-20 m	>20m	Sellada	< 0.1 mm	0.1-1.0 mm	1-5 mm	> 5 mm	Sicken sides	Liso	Lig. Rugoso	Rugoso	Muy Rugo	Ninguno	Relleno-duro < 5mm	Rell. Blando < 5mm	> 5mm	Inalt.	Lig. Alt.	Mod. Alt.	Muy Alt.	Desc.																																																																																																										
E																																																																																																																																		
D1																																																																																																																																		
D2																																																																																																																																		
Promo. 3																																																																																																																																		
Condición Agua Subterránea: 8																																																																																																																																		
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Condición</th> <th colspan="2">Lig. Húmedo</th> <th colspan="2">Húmedo</th> <th colspan="2">Goteo</th> <th colspan="2">Flujo</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>gw</td> <td>Completamente seco</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>								Condición		Lig. Húmedo		Húmedo		Goteo		Flujo		gw	Completamente seco																																																																																																															
Condición		Lig. Húmedo		Húmedo		Goteo		Flujo																																																																																																																										
gw	Completamente seco																																																																																																																																	
<table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">Tipo</th> <th rowspan="2">Orientación (Dip/DipDir)</th> <th rowspan="2">Muy desfavo.</th> <th rowspan="2">Desfavo</th> <th rowspan="2">Regular</th> <th rowspan="2">Favorable</th> <th rowspan="2">Muy Favo.</th> <th colspan="2">RMR SYSTEM (1989)</th> <th rowspan="2">Valor</th> <th rowspan="2">RMR</th> </tr> <tr> <th>Resistencia de la roca Intacta</th> <th>RQD</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>E</td> <td>65/270</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>2</td> <td>19</td> </tr> <tr> <td>D1</td> <td>65/140</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>4</td> <td>Tipo terreno</td> </tr> <tr> <td>D2</td> <td>85/115</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>5</td> <td></td> </tr> <tr> <td colspan="7">Promedio</td> <td></td> <td></td> <td>11</td> <td>V</td> </tr> <tr> <td colspan="7">Promo.</td> <td></td> <td></td> <td>8</td> <td></td> </tr> <tr> <td colspan="7">Promo.</td> <td></td> <td></td> <td>-11</td> <td>Clasi. Soporte</td> </tr> <tr> <td colspan="7">Promo.</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>V</td> </tr> </tbody> </table>								Tipo	Orientación (Dip/DipDir)	Muy desfavo.	Desfavo	Regular	Favorable	Muy Favo.	RMR SYSTEM (1989)		Valor	RMR	Resistencia de la roca Intacta	RQD	E	65/270								2	19	D1	65/140								4	Tipo terreno	D2	85/115								5		Promedio									11	V	Promo.									8		Promo.									-11	Clasi. Soporte	Promo.										V																																	
Tipo	Orientación (Dip/DipDir)	Muy desfavo.	Desfavo	Regular	Favorable	Muy Favo.	RMR SYSTEM (1989)								Valor	RMR																																																																																																																		
							Resistencia de la roca Intacta	RQD																																																																																																																										
E	65/270								2	19																																																																																																																								
D1	65/140								4	Tipo terreno																																																																																																																								
D2	85/115								5																																																																																																																									
Promedio									11	V																																																																																																																								
Promo.									8																																																																																																																									
Promo.									-11	Clasi. Soporte																																																																																																																								
Promo.										V																																																																																																																								
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">G</th> <th colspan="2">S</th> <th colspan="2">I</th> <th colspan="2">B</th> <th colspan="2">VB</th> <th colspan="2">B/D/S</th> <th colspan="2">D</th> <th colspan="2">L/S</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>SC</td> <td>VG</td> <td>G</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Sed.</td> <td>A</td> <td>B</td> <td>C</td> <td>D</td> <td>E</td> <td>F</td> <td>G</td> <td>H</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>								G		S		I		B		VB		B/D/S		D		L/S		SC	VG	G														Sed.	A	B	C	D	E	F	G	H																																																																																		
G		S		I		B		VB		B/D/S		D		L/S																																																																																																																				
SC	VG	G																																																																																																																																
Sed.	A	B	C	D	E	F	G	H																																																																																																																										
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">NOMBRE:</th> <th colspan="2">ELABORÓ:</th> <th colspan="2">REVISÓ:</th> <th colspan="2">APROBÓ:</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td colspan="2">CARGO:</td> <td colspan="2">COORD. GEOLOGIA</td> <td colspan="2">DIR. OFICINA TECNICA</td> <td colspan="2">DIR. TECNICO</td> </tr> <tr> <td colspan="2">EMPRESA:</td> <td colspan="2">CAM</td> <td colspan="2">CAM</td> <td colspan="2">CAM</td> </tr> </tbody> </table>								NOMBRE:		ELABORÓ:		REVISÓ:		APROBÓ:		CARGO:		COORD. GEOLOGIA		DIR. OFICINA TECNICA		DIR. TECNICO		EMPRESA:		CAM		CAM		CAM																																																																																																				
NOMBRE:		ELABORÓ:		REVISÓ:		APROBÓ:																																																																																																																												
CARGO:		COORD. GEOLOGIA		DIR. OFICINA TECNICA		DIR. TECNICO																																																																																																																												
EMPRESA:		CAM		CAM		CAM																																																																																																																												
GSI: 15 - 20																																																																																																																																		

Figura 3.3.1: Levantamiento Macizo Rocosos en el Túnel GGE, km 35+136,00, (Consortio Antioquia al Mar, 2020)

Con la información contemplada en los registros de los frentes de avance fue posible establecer la resistencia de la matriz rocosa, el grado de fracturamiento representado por el índice RQD y la separación de las discontinuidades, las condición superficial de las paredes de las juntas y las condiciones hidrogeológicas, como se puede apreciar en la Figura 3.3.2 donde se observan un macizo rocoso compuesto por rocas sedimentarias tipo lutitas y/o liditas de color negro, intercaladas con areniscas de grano fino y color gris, poco meteorizadas; en general altamente fracturado, es decir con bajo porcentaje de RQD a razón de estructuras juntas a muy juntas, que al ser excavadas mecánicamente se “desquebrajan” con facilidad, de igual manera, se observan aportes de agua desde el frontón.



Figura 3.3.2: Macizo rocoso excavado en el Túnel GGE, km 35+092,25, Elaboración Propia

Dicha información permitió caracterizar el macizo rocoso que comprende el Túnel GGE en el tramo de estudio, teniendo en cuenta el sistema de clasificación RMR descrito en el Marco Teórico adaptado a los rangos principales encontrados en el proyecto. De esta manera, se encontró una roca de muy baja a baja resistencia a la compresión uniaxial (5 – 50 MPa), con calidad geotécnica mala a muy mala según el índice RQD que se encontró predominantemente menor de 50 %, calidad que estuvo asociada además a una separación de las discontinuidades predominantemente menor de 60 mm, generando un grado de fracturamiento del macizo rocoso muy alto, permitiendo encontrar bloques de roca decimétricos o centimétricos, controlado por una estratificación delgada de las rocas sedimentarias presentes en el tramo (Figura 3.3.3).

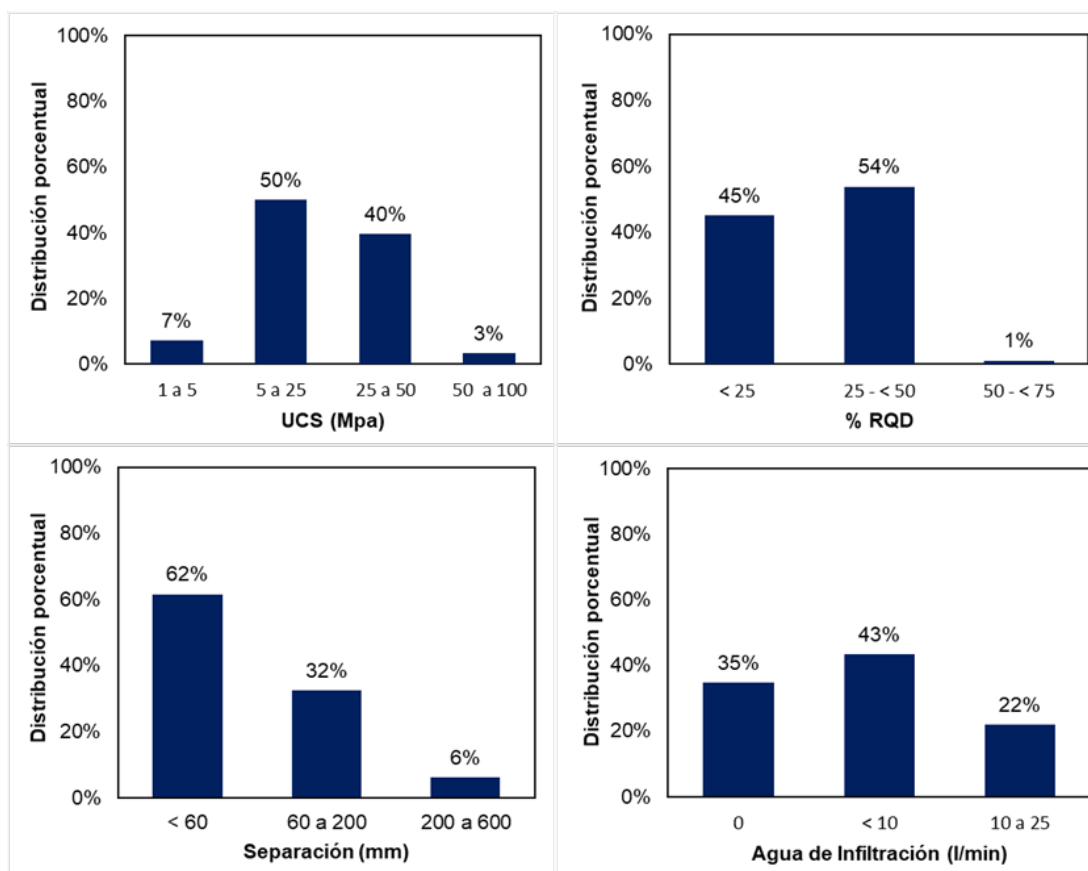


Figura 3.3.3: Parámetros de clasificación del macizo rocoso en el Túnel GGE, km 35+211,00 - km 34+214,25, Elaboración Propia

Las infiltraciones de agua a lo largo de la excavación del Túnel GGE por el portal salida, y particularmente en el tramo de estudio tuvieron un comportamiento irregular, en algunos sectores se encontraron a manera de zonas húmedas o goteos leves entre los planos de la estratificación; eventualmente estuvieron concentradas a través de algunas perforaciones (exploración, pernos, drenajes, enfilaje), generando goteos rápidos y/o flujos; en otras ocasiones la excavación se encontró seca, es decir, sin presencia de agua de infiltración.

3.3.1. Caracterización Geomecánica de las Discontinuidades

La información geológica recopilada para cada uno de los diferentes sistemas de discontinuidades que componen el macizo rocoso excavado entre las abscisas km 35+211,00 y km 34+214,25 del Túnel GGE (456 datos), consistió en la toma de datos estructurales y de sus características geomecánicas, teniendo en cuenta principalmente, parámetros como la persistencia, la abertura, la rugosidad, y el

grado de alteración, definidos por Bieniawski en 1989 para la clasificación del macizo rocoso bajo la implementación del sistema RMR.

Se exponen así, las condiciones de las discontinuidades bajo un análisis estadístico con el fin de definir las propiedades geomecánicas que caracterizan el macizo rocoso encontrado en el tramo de estudio. Las discontinuidades identificadas están definidas por la estratificación como estructura predominante, principales familias de diaclasas, y algunas fracturas de cizalla que aparecen cortando los planos de estratificación generalmente, y en otros casos particulares presentan una disposición concordante con la estructura predominante.

Los resultados muestran que la persistencia es principalmente moderada (3 a 10 m), es común que se encuentren discontinuidades con paredes abiertas (1 a 5 mm) a anchas (>5 mm), las superficies de las paredes suelen ser lisas a ligeramente rugosas, debido a la abertura de las paredes se encuentran rellenos de consistencia blanda principalmente y, se encuentran moderadamente alterados generalmente (Figura 3.3.4).

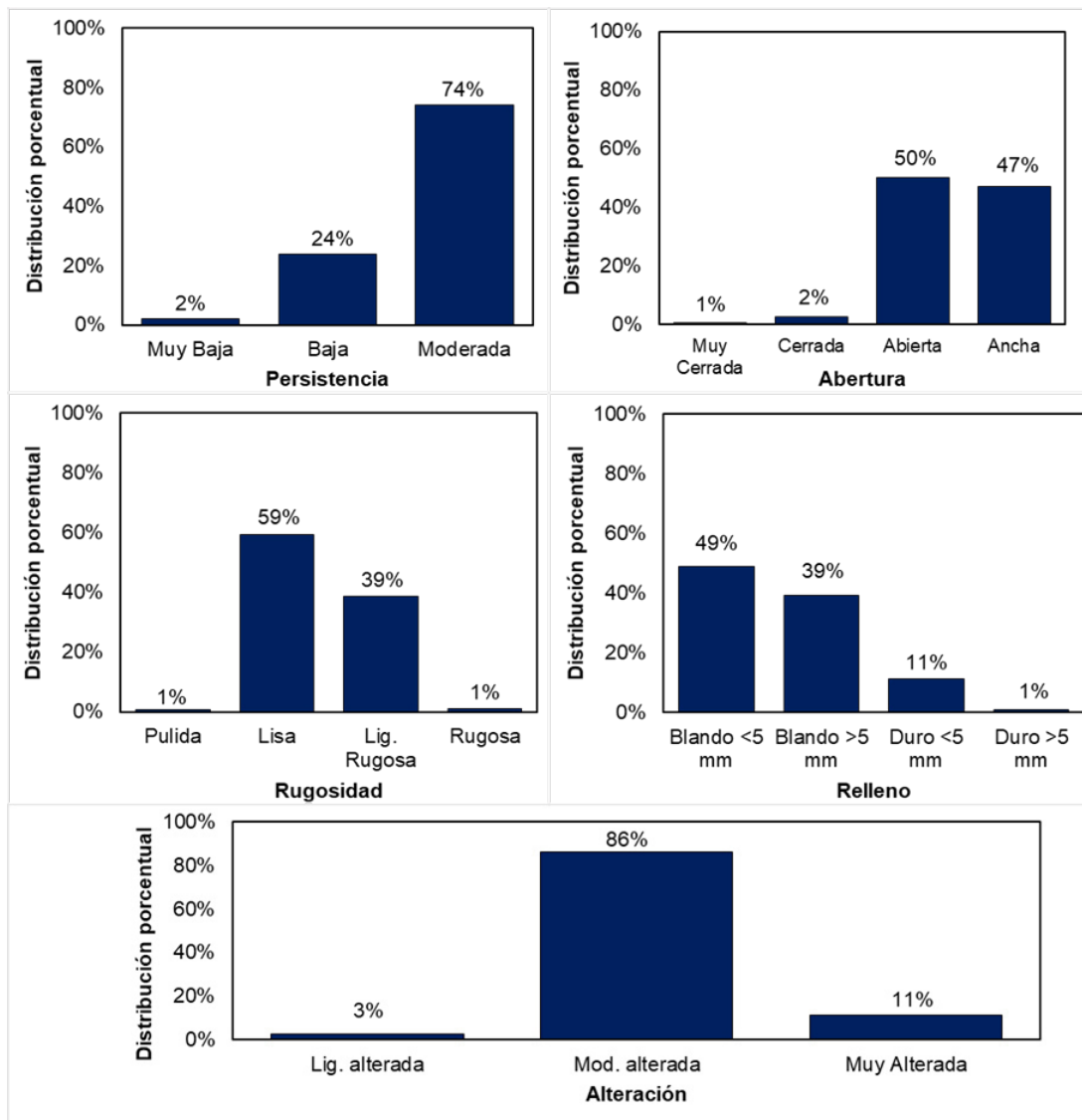


Figura 3.3.4: Principales condiciones geomecánicas de las discontinuidades en el Túnel GGE, km 35+211,00 - km 34+214,25, Elaboración Propia

3.3.1.1. Tendencias estructurales

El análisis estadístico de las orientaciones de las discontinuidades del macizo rocoso en el Túnel GGE entre las abscisas km 35+211,00 y km 34+214,25 (sentido del avance), permitió identificar las principales tendencias estructurales de las discontinuidades que lo componen, representadas a través de estereogramas o diagramas de polos.

Mediante el uso del software de RocScience – DipsV6, se observó una tendencia predominante de la estratificación de las rocas sedimentarias excavadas (Figura

3.3.5), tres familias de diaclasas principales y dos a tres tendencias de fracturas de cizallas, tal y como se muestran en la Tabla 3.3.1.

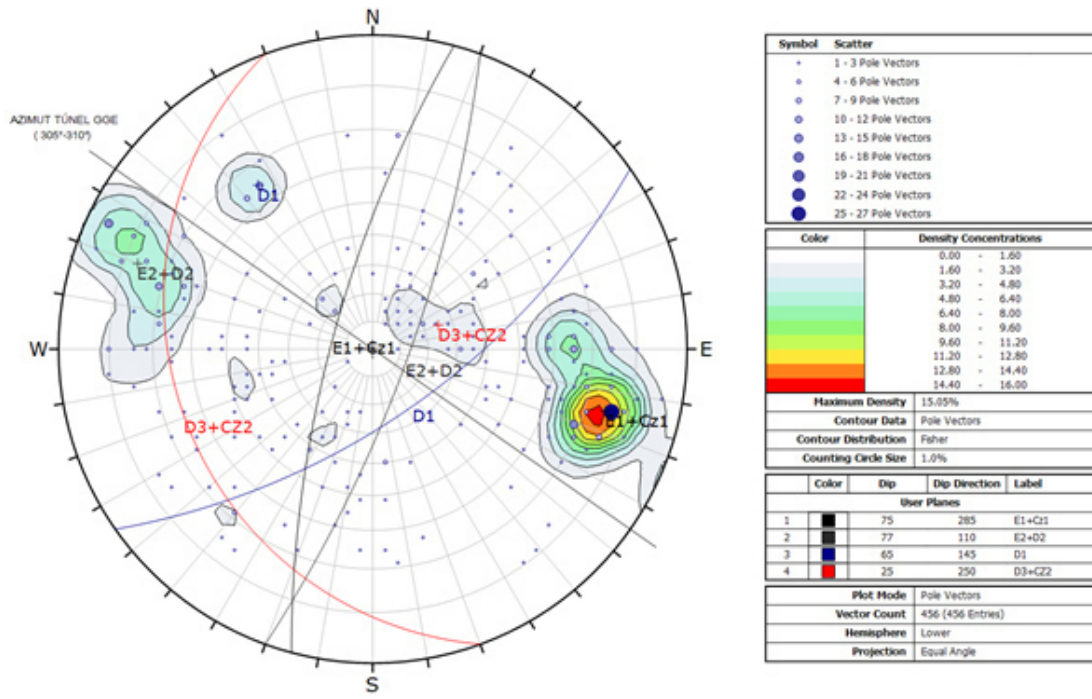


Figura 3.3.5: Tendencias estructurales generales de las discontinuidades en el Túnel GGE, km 35+211,00 - km 34+214,25., km 35+211,00 - km 34+214,25, Elaboración Propia

Tabla 3.3.1: Tendencias estructurales predominantes en el Túnel GGE, km 35+211,00 - km 34+214,25.

Nº	ID	Tipo de Estructura	Dip/Dip Dir
1	E1	Estratificación	75°/285°
	Cz1	Fractura de cizalla	
2	E2	Estratificación	75°/110°
	D2	Diaclasa	
3	D1	Diaclasa	65°/145°
	D3	Diaclasa	
4	Cz2	Fractura de cizalla	25°/250°

Finalmente, el arreglo estructural del macizo rocoso es complementado por múltiples sistemas de discontinuidades que se presentan de forma aleatoria, como también se puede ver en la Figura 3.3.5, representados por contornos tenues y puntos diseminados por todo el estereograma con buzamientos menores a 80°.

Capítulo 4

Pre-Post Procesamiento de Imágenes

4.1. Análisis de imágenes y dimensión fractal

La obtención de la dimensión fractal es esencial para asignar un valor cuantitativo bajo la implementación de la teoría fractal, a los conceptos cualitativos que a los sistemas de clasificación geomecánica compete. Para ello, inicialmente, se realizó un procesamiento de imágenes que permitió extraer el grado de fracturamiento del macizo rocoso en este estudio, siguiendo los hallazgos, recomendaciones y lecciones aprendidas por Hong et al. (2017) y Moná (2019) aplicando este método a macizos rocosos y extrayendo el índice geológico de resistencia (GSI).

4.1.1. Análisis de Imágenes

El procesamiento de imágenes para el desarrollo de este trabajo se hizo siguiendo la metodología propuesta por Basirat et al. (2019). En ese sentido, con los Levantamientos de Macizo Rocosos ejecutados en los diferentes frentes de avance del Túnel GGE en el tramo de estudio, abscisas km 35+211,00 a km 34+214,25 (sentido del avance), se tomaron igual cantidad de fotografías para analizar, 182 imágenes en total.

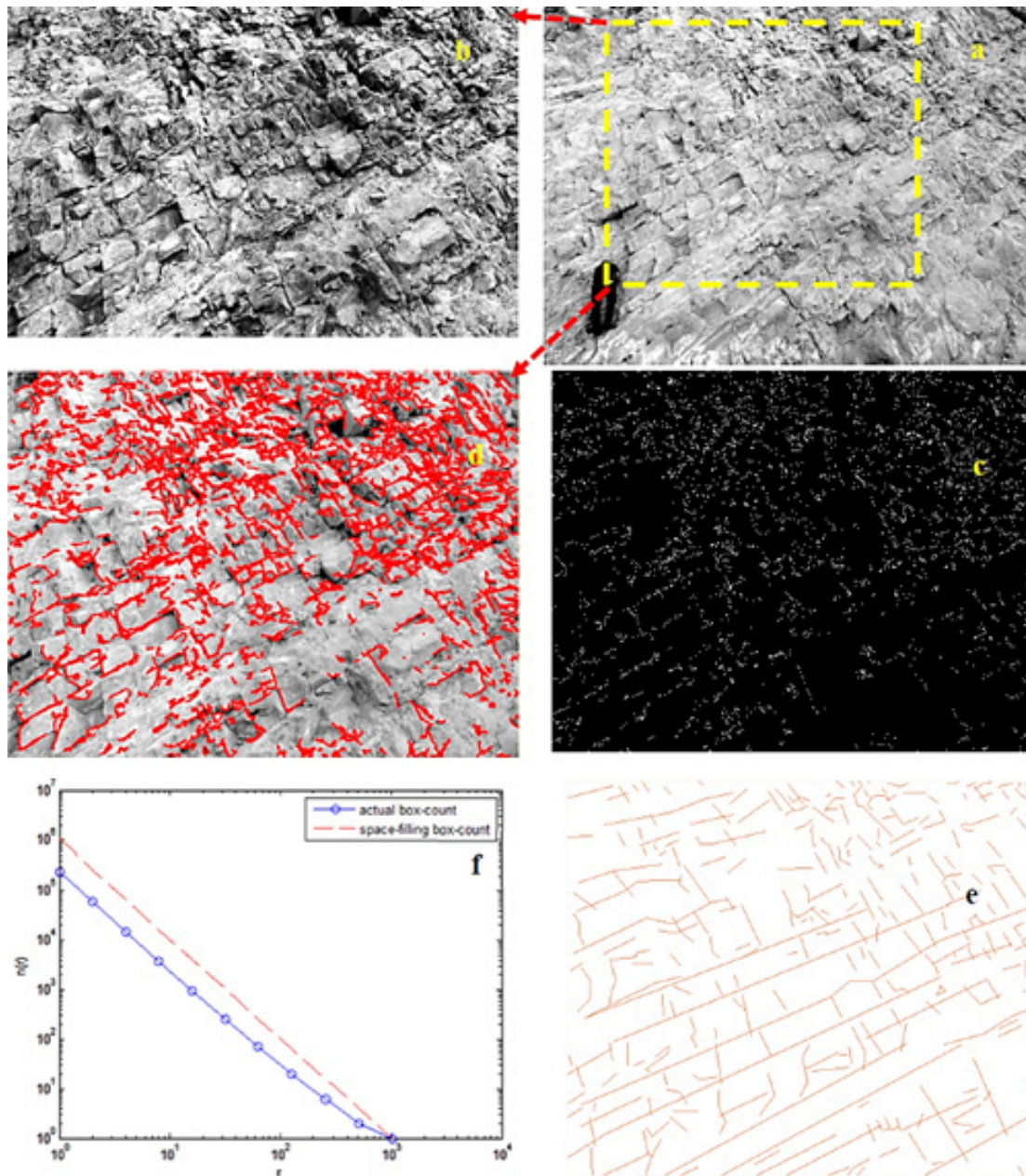


Figura 4.1.1: Etapas determinación de la dimensión fractal (DF) utilizando la técnica de procesamiento de imágenes, (Basirat et al., 2019)

El procedimiento seguido corresponde a las etapas a, b, c, d y e de la metodología presentada en la Figura 4.1.1 y que se describen a continuación:

1. Las fotografías originales se llevaron a escala de grises.
2. Se tomó un área representativa del grado de fracturamiento dominante en el frontón del túnel.

3. Se detectaron los puntos de borde con el algoritmo de Canny.
4. Se mostraron los puntos identificados en la fotografía.
5. se detectaron las fracturas mediante la transformada de Hough.

Para las etapas 1, 2, 3 y 4 se utilizó el “Canny Edge Detector” mediante la aplicación online de BIOMEDICAL IMAGING GROUP (BIG). El algoritmo de Canny es un operador desarrollado por John F. Canny en 1986 que, utiliza un algoritmo de múltiples etapas para detectar una amplia gama de bordes en imágenes. Según Valverde (2007), consiste en tres grandes pasos:

- Obtención del gradiente: en este paso se calcula la magnitud y orientación del vector gradiente en cada píxel.
- Supresión no máxima: en este paso se logra el adelgazamiento del ancho de los bordes, obtenidos con el gradiente, hasta lograr bordes de un píxel de ancho.
- Histéresis de umbral: en este paso se aplica una función de histéresis basada en dos umbrales; con este proceso se pretende reducir la posibilidad de aparición de contornos falsos.

La etapa 5. se desarrolló utilizando el sistema de cómputo numérico que ofrece un entorno de desarrollo integrado con un lenguaje de programación propio, MATLAB en su versión online.

En MATLAB, cuando se utiliza $[H, \theta, \rho] = \text{hough}(BW)$ se puede calcular la Transformada Estándar de Hough (SHT por sus siglas en inglés) de la imagen binaria. BW. La función fue creada para detectar líneas. hough mediante la representación paramétrica de una línea: $\rho = x \cdot \cos(\theta) + y \cdot \sin(\theta)$. Esta función muestra, la distancia entre el origen y la línea a lo largo de un vector perpendicular a la línea y, el ángulo en grados entre el eje y este vector. rhotheta. Asimismo, la función también devuelve la Transformada Estándar de Hough que, es una matriz de espacio de parámetros cuyas filas y columnas corresponden a valores respectivamente. Hrhotheta, (mathworks.com).

4.1.2. Dimensión Fractal

El concepto fractal es utilizado para satisfacer varios propósitos en problemas geológicos. Una de estas aplicaciones es la distribución frecuencia-tamaño de las discontinuidades. En diversas circunstancias, la distribución de frecuencia y tamaño de fracturas, fallas, depósitos minerales, campos petrolíferos, terremotos y topografía puede representarse mediante el concepto de fractales (Basirat et al., 2019).

Para la obtención de la dimensión fractal a partir de imágenes previamente procesadas, se han propuesto diferentes maneras que implican la utilización de lenguajes de programación bajo códigos y/o softwares de uso libre o licenciado. En este trabajo se utilizó el software Harmonic and Fractal Image Analyzer (HarFA - Zmeskal et al (2001)), en consecuencia de los buenos resultados obtenidos por Moná (2019) en su implementación en macizos rocosos. Este software se basa en la metodología de conteo de cajas “Box Counting Method” ampliamente aceptada para estimar la dimensión fractal a partir de imágenes digitalizadas en investigaciones en campos de la mecánica de materiales, biología, medicina, artes, agronomía, comportamiento humano, medio ambiente e ingeniería geotécnica; además, es un software libre de fácil uso. HarFA (Figura 4.1.2)

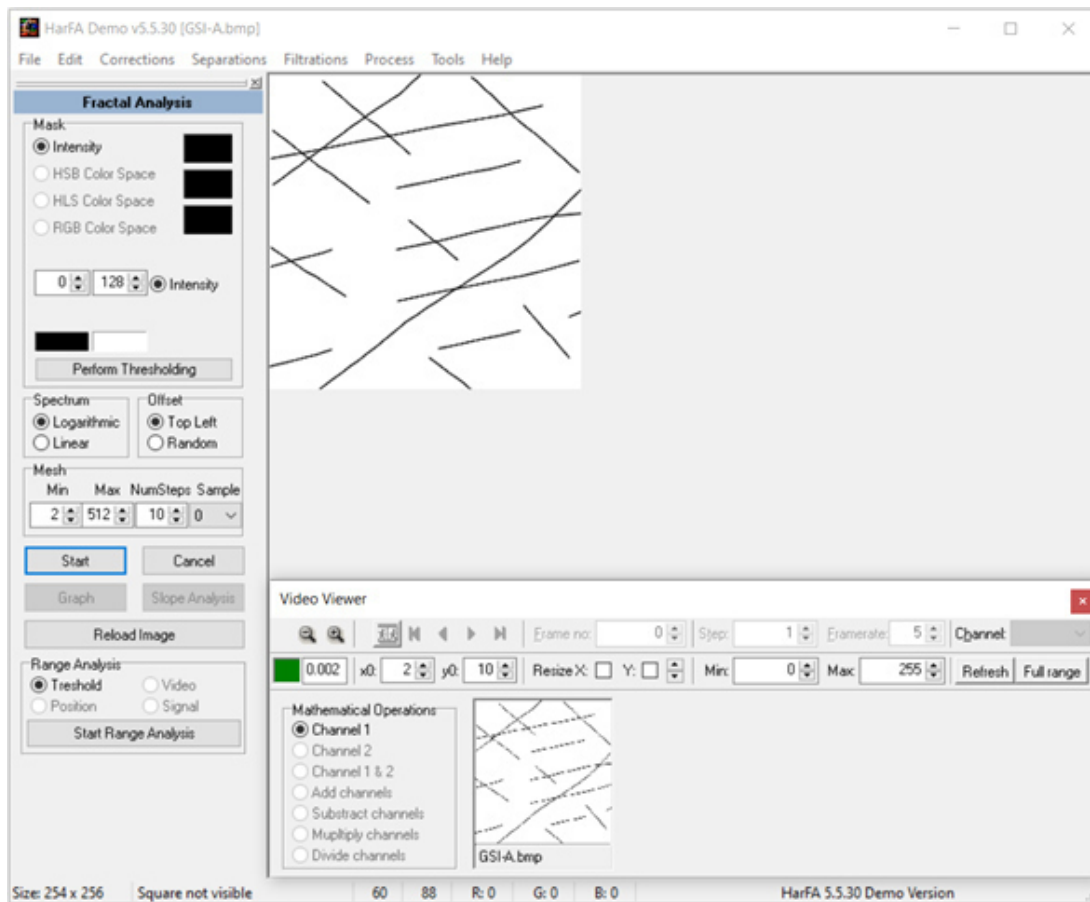


Figura 4.1.2: Análisis fractal mediante Harmonic and Fractal Image Analyzer (HARFA), Elaboración Propia

4.1.3. Relación entre el Geological Strength Index (GSI) de macizos rocosos heterogéneos y la dimensión fractal

A la fecha de estructuración de este trabajo, se encontraron varias publicaciones que se han llevado a cabo para estimar el grado de fracturamiento de macizos rocosos por medio de la teoría fractal, entre los más recientes se tienen: (Hong et al., 2017), (Lichen Li et al., 2019), (Moná, 2019) y (Basirat et al., 2019).

De estas publicaciones se destacan la de Hong et al. (2017) por introducir por primera vez la aplicación de fractales al GSI en rocas sedimentarias mediante el procesamiento de imágenes y su aplicación a redes neuronales, y posteriormente, Moná (2019) por presentar la primera propuesta del GSI en macizos homogéneos utilizando la teoría fractal en el túnel de la Quebra, Colombia, teniendo en cuenta el grado de fracturamiento y estableciendo unos rangos iniciales de dimensión

fractal para cada una de las divisiones del sistema de clasificación. No obstante, estos estudios estiman la dimensión fractal (DF) con base en la carta típica de GSI para macizos rocosos fracturados, sin una afectación tectónica marcada y sin la inclusión de las condiciones de las discontinuidades, tema que trata de abordar esta investigación.

Las propuestas que presentan las publicaciones anteriores en cuanto a la utilización de la teoría fractal para la estimación del grado de fracturamiento de los macizos rocosos, es un insumo importante para la realización de este trabajo, puesto que, dieron un punto de partida para cuantificar y calibrar las dimensiones fractales de las cajas de composición y estructura que presenta la carta de GSI para macizos rocosos heterogéneos (Figura 4.1.3), orientado al estudio de rocas sedimentarias, como corresponde a los casos A. a F. enmarcados en rojo en la Figura 4.1.3.

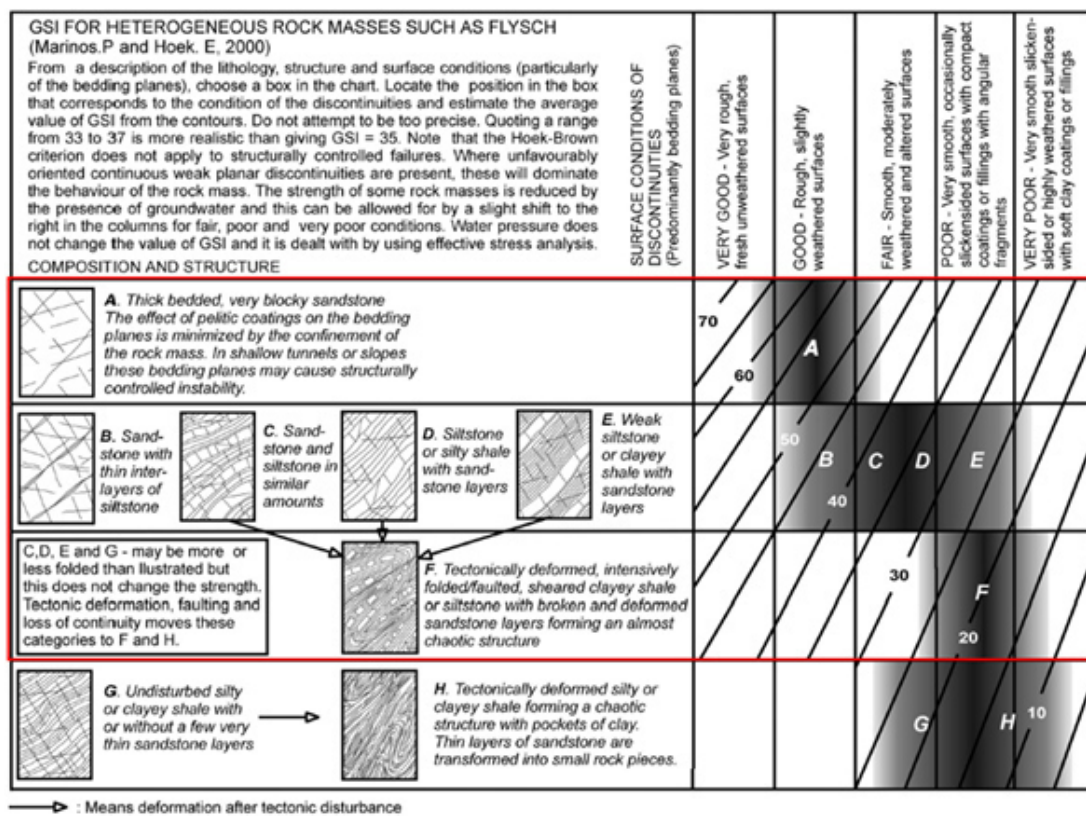


Figura 4.1.3: Estimación del GSI para macizos rocosos heterogéneos como Flysch, Modificado de Hoek & Marinos (2000)

Enfocados en las rocas sedimentarias de la zona de estudio se calculó DF de los casos de composición y estructura A. a F. de la carta de GSI propuesta por Hoek & Marinos (2000) para macizos rocosos heterogéneos estratificados bajo

el procedimiento descrito anteriormente (Figura 4.1.4). Los resultados para las cajas que determinan el fracturamiento y afectación tectónica en cada caso son mostrados en la Tabla 4.1.1.



Figura 4.1.4: Estimación de la dimensión fractal (DF) para macizos rocosos heterogéneos como Flysch., Modificado de Hoek & Marinos (2000)

Las dimensiones fractales obtenidas en cada tipo de GSI permitieron asignarle un rango de GSI por composición y estructura solamente, a la vez que se pudo hacer una clasificación de la carta de GSI para macizos rocosos heterogéneos estratificados, permitiendo establecer que este tipo de macizos rocosos no logran ser de “Muy Buena” calidad geomecánica, como se puede ver en la Tabla 4.1.1.

Tabla 4.1.1: Rangos de dimensión fractal (DF) y GSI basados en Hoek & Marinos (2000).

Tipo GSI	DF	GSI	Clasificación
A	<1,52	>52	Regular a Buena
B	1,52 - 1,65	44 - 52	Regular a Mala
C	1,65 - 1,75	36 - 44	
D	1,75 - 1,80	28 - 36	
E	1,80 - 1,84	20 - 28	
F	>1,84	<20	Mala a Muy Mala

Capítulo 5

Caso de estudio: Túnel Guillermo Gaviria Echeverri - Túnel del Toyo

5.1. Introducción

La información recopilada en cada Levantamiento del Macizo Rocoso del tramo de estudio presenta las bases para el cálculo de la dimensión fractal a partir de las fotografías de los frontones de avance del Túnel Guillermo Gaviria Echeverri (Túnel GGE), así como los parámetros del macizo rocoso para la validación del modelo.

El trazado del Túnel GGE recorre rocas de las formaciones Barroso y Penderisco, estas formaciones geológicas presentan dominios volcánico y sedimentario respectivamente. El desarrollo de este trabajo se centra en la caracterización y clasificación por GSI de rocas las sedimentarias pertenecientes a la Formación Penderisco. La litología del tramo de estudio que estuvo enmarcado entre las abscisas km 35+211,00 – km 34+214,25, dadas en el sentido que se realizó la excavación, se encuentra representadas por rocas sedimentarias de origen marino donde se pudo apreciar una intercalación de lutitas, lidita, y estratos delgados de arenisca color gris. Además, estas rocas presentan afectación mecánica debido a la actividad tectónica regional que caracteriza la Cordillera Occidental de Colombia, y en la zona de estudio como tal, por estar el tramo seleccionado en la zona de influencia de la falla Cañasgordas.

La combinación de los factores anteriormente expuestos, litología y afectación

tectónica, hicieron que, para estimar el GSI bajo la implementación de la teoría fractal y la caracterización geomecánica de las discontinuidades, se debiera utilizar la carta presentada por Hoek Marinos en el año 2000 para el caso de macizos heterogéneos estratificados tipo Flysch.

5.2. Uso de la Dimensión fractal en el túnel Guillermo Gaviria Echeverri

El procesamiento de las imágenes tomadas en los diferentes frentes de avance del Túnel GGE se hizo siguiendo la metodología expuesta en el en la sección Análisis, una vez se seleccionaron los recuadros que mejor representaban el grado de fracturamiento del macizo rocoso del frente de avance de la obra, se procedió a calcular la (DF) para cada afloramiento disponible entre las abscisas km 35+211,00 y km 34+214,25 dadas en el sentido de la excavación del túnel que para el caso del portal salida fue ejecutada contra el abscisado de la vía. En las Figuras 5.2.2a a 5.2.2f, se presentan algunos ejemplos de las condiciones del frente de excavación.

En la Figura 5.2.1 se muestra un ejemplo del cálculo de la dimensión fractal a partir de la digitalización de la fotografía tomada con el túnel en la abscisa km 34+936,75 como resultado redondeado a dos (2) cifras decimales se obtuvo $DF = 1,79$.

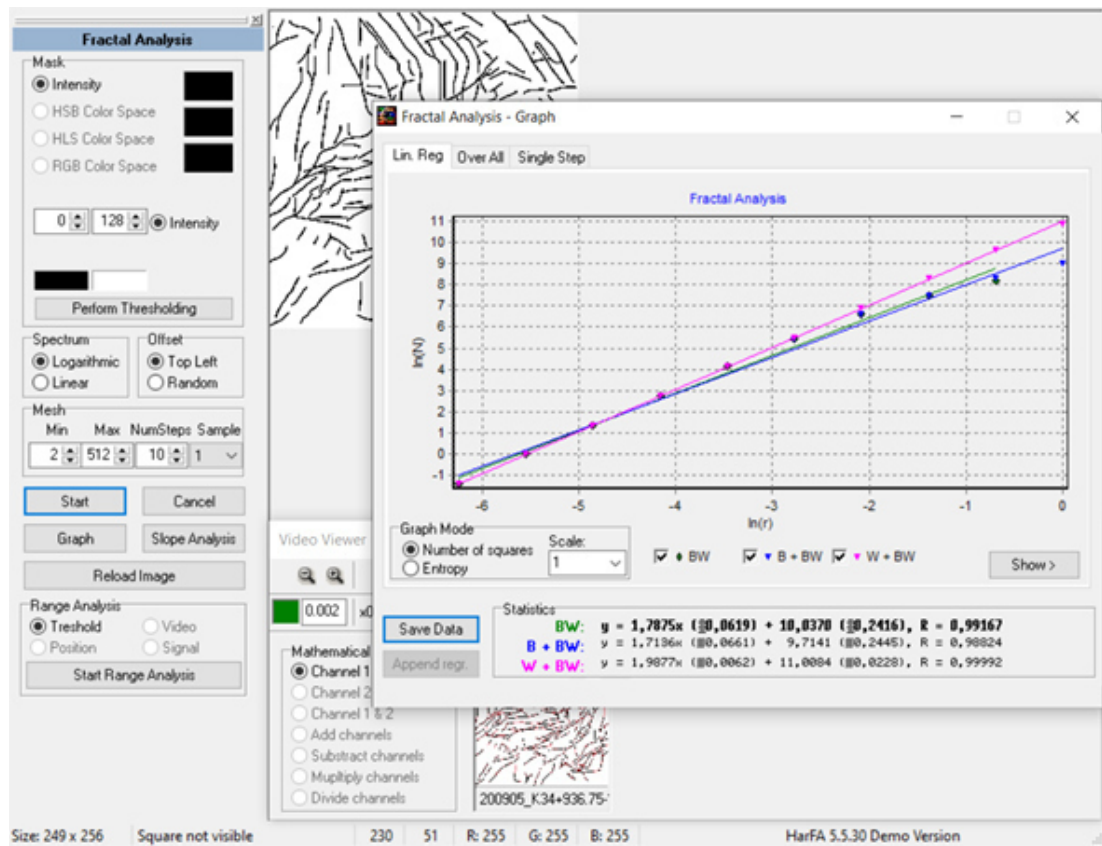


Figura 5.2.1: DF Túnel GGE, Abcisa km 34+936,75, Elaboración Propia



(a) Abscisa K35+166



(b) Abscisa K34+580



(c) Abscisa K34+394.



(d) Fractal K34+530



(e) Abscisa K34+754



(f) Abscisa K35+002

Figura 5.2.2: Condiciones del macizo rocoso excavado en el área de estudio, Elaboración Propia

La movilización de DF a lo largo del tramo de estudio se muestra en la Figura 5.2.3, allí se puede apreciar que, los valores más bajos de la dimensión fractal se concentran entre las abscisas km 34+620 y km 34+550 aproximadamente, con valores DF por debajo de 1,70, dando a entender que, en ese tramo de túnel el macizo rocoso se puede clasificar como Regular a Bueno, en cuanto a fracturamiento o afectación tectónica se refiere.

De la misma manera, es claro que los valores más bajos de la dimensión fractal se establecen en los límites del tramo de estudio, así como entre las abscisas km 34+800 y km 35+000, pudiendo estar por arriba de 1,80 puntos, indicando así mayor grado de fracturamiento y posiblemente mayor alteración mecánica de la roca debida a la afectación tectónica por la presencia de estructuras de debilidad tipo fallas o fracturas de cizalla.

En la Figura 5.2.4 se puede observar que, la calidad de macizo rocoso dominante en el tramo de estudio, según lo establecido en la Tabla 4.1.1 es “Mala” con los tipos de GSI D y E sobresalientes, es decir, con valores de DF entre 1,75 y 1,84.

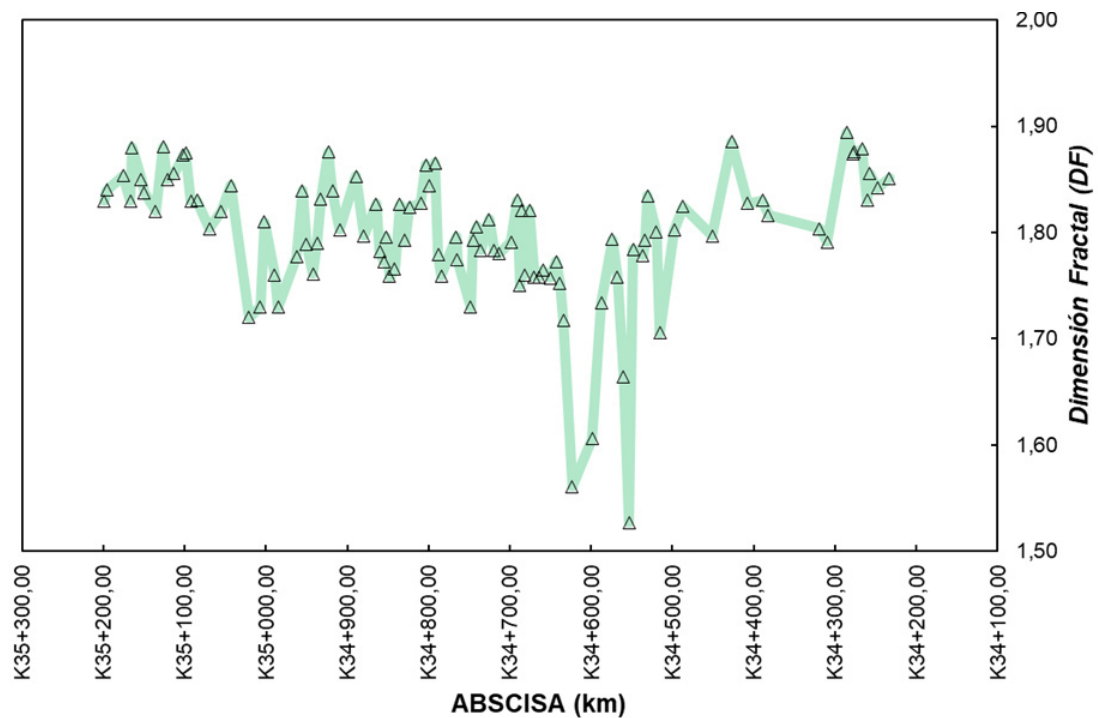


Figura 5.2.3: Distribución de DF del Túnel GGE, entre las abscisas km 35+211,00 y km 34+214,25 del Túnel GGE, Portal Salida, Elaboración Propia

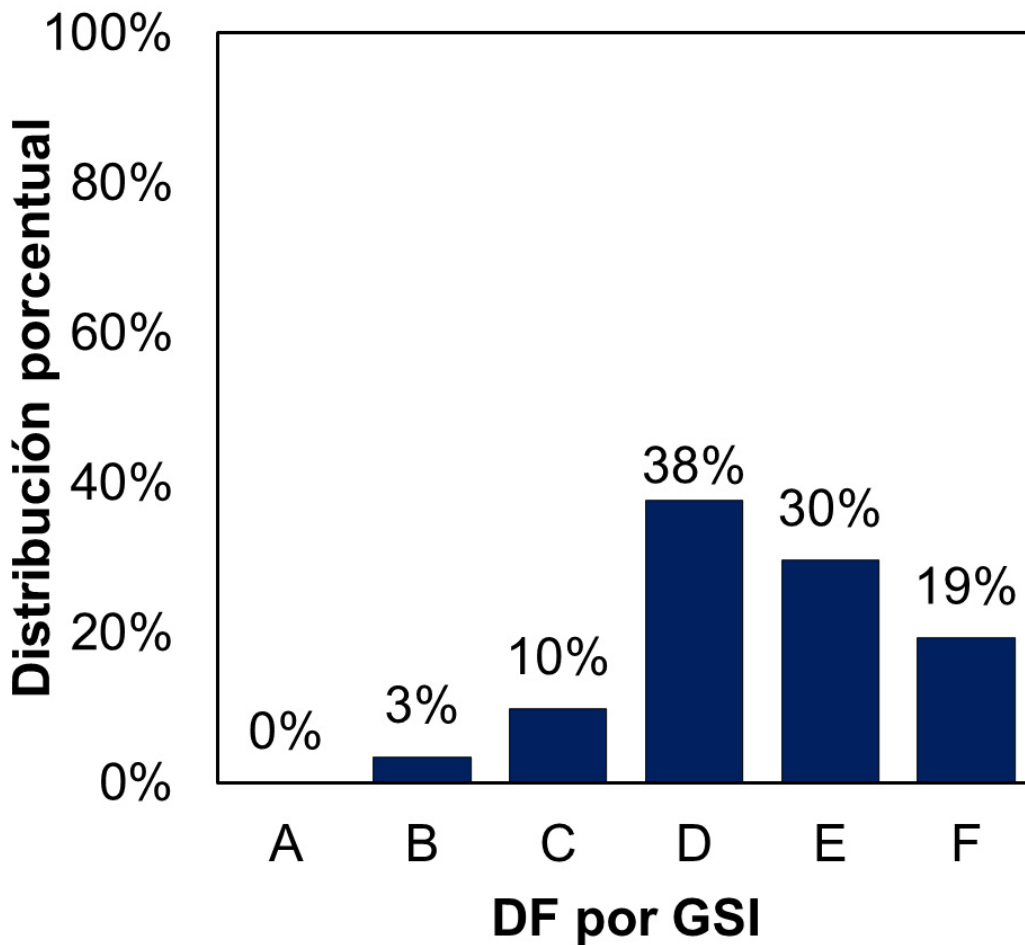


Figura 5.2.4: Porcentaje de ocurrencia por tipo de GSI del Túnel GGE, entre las abscisas km 35+211,00 y km 34+214,25 del Túnel GGE, Portal Salida, Elaboración Propia

5.3. Condiciones de las discontinuidades

La clasificación del macizo rocoso para la asignación de soporte durante la excavación del tramo del Túnel Guillermo Gaviria Echeverri en el tramo comprendido entre las abscisas km 35+211,00 y km 34+214,25 fue hecha bajo el sistema RMR de Bieniawski (1989), este sistema de clasificación tiene en uno de sus parámetros la valoración de las condiciones de las paredes de las discontinuidades. La Condición de las Juntas (JC por sus siglas en inglés), permite estimar la continuidad de las discontinuidades con la persistencia, separación de sus paredes por medio de la abertura, la rugosidad, si se presenta material de

relleno se puede establecer su consistencia y espesor, y finalmente, se puede indicar el grado de meteorización o alteración de las paredes. Todas estas características se pueden correlacionar con las cajas de la condición superficial de las paredes de las discontinuidades de la carta de GSI para macizos rocosos heterogéneos estratificados.

Con los datos de los LMR realizados entre las abscisas km 35+211,00 y km 34+214,25 del Túnel GGE por el sector Cañasgordas, se obtuvo la sumatoria de las condiciones de las paredes de las discontinuidades enunciadas en el párrafo anterior, con el fin de poder estimar el GSI de acuerdo con la Ecuación 2.1.2 propuesta Hoek et al. (2013). La distribución de los valores de JC calculados en el tramo de estudio se presentan en la Figura 5.3.1.

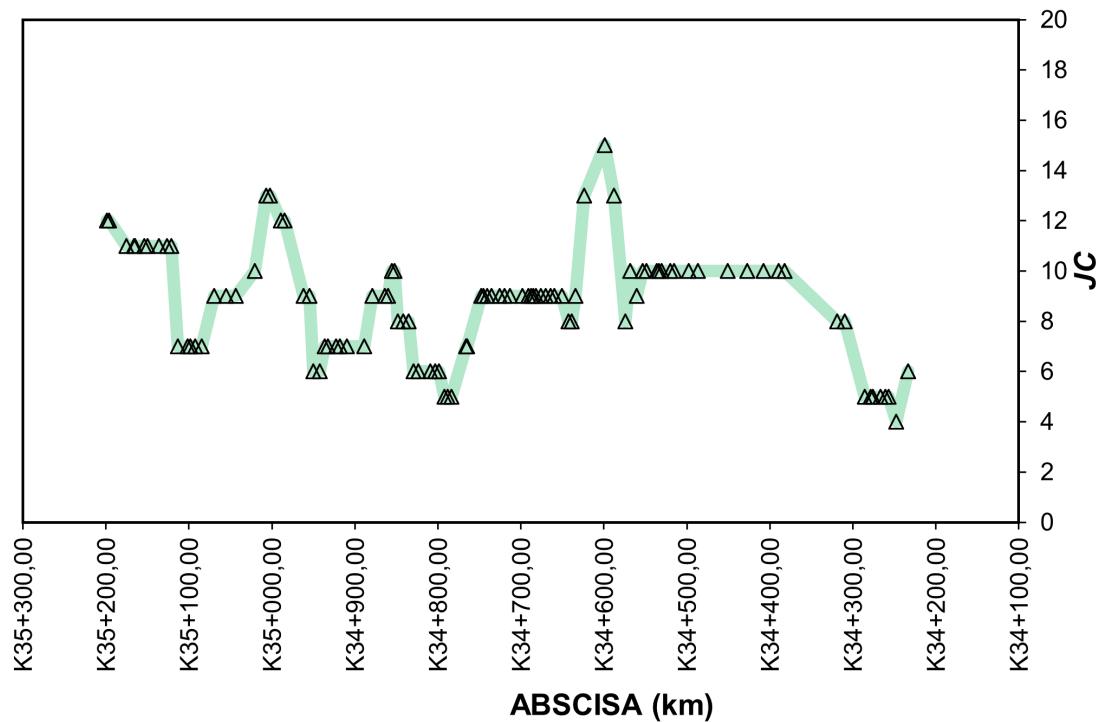


Figura 5.3.1: Distribución de JC entre las abscisas km 35+211,00 y km 34+214,25 del Túnel GGE, Portal Salida, Elaboración Propia

Según lo mostrado en la Figura 5.3.1 los menores valores de JC se encontraron al final del tramo de estudio o cercanos a la abscisa km 34+800, con valores por debajo o iguales a 6 puntos, permitiendo establecer un dominio en la combinación de las condiciones más desfavorables que se muestran en la Figura 3.3.4. También

conviene decir que, los valores más altos se encontraron cerca de la abscisa km 34+600 y superan los 12 puntos de JC. Así pues, la mayor concentración de valores de JC se tuvo entre el rango de 6 a 12 puntos, indicando unas condiciones de las paredes predominantemente desfavorables, es decir, que predominaron las estructuras con persistencia moderada (3 a 10 m), paredes abiertas (1 a 5 mm) a anchas (>5 mm), paredes lisas a ligeramente rugosas, con rellenos de consistencia principalmente blanda y moderadamente alteradas, con alteración mecánica debida a la actividad tectónica del sector.

5.3.1. Estimación del GSI

Teniendo el grado de fracturamiento estimado mediante la dimensión fractal para las fotografías de los frentes de avance, y las condiciones de las paredes de las discontinuidades establecidas en cada LMR, se procedió a buscar la relación que permitiera obtener una ecuación para la cuantificación del GSI mediante la metodología propuesta en este trabajo. Para esto, se tuvo como punto de partida la expresión mostrada en la Ecuación 2.1.2 reemplazando la estimación de la blocosidad del macizo rocoso ($RQD/2$), por el valor de GSI obtenido mediante la dimensión fractal (DF).

La Ecuación 5.3.1 muestra la expresión encontrada para relacionar las condiciones de las paredes de las discontinuidades con el grado de fracturamiento establecido mediante la dimensión fractal, correspondiente a un modelo de regresión lineal.

$$GSI = 2,5JC_{89} + GSI_{DF}/3,5 \quad (5.3.1)$$

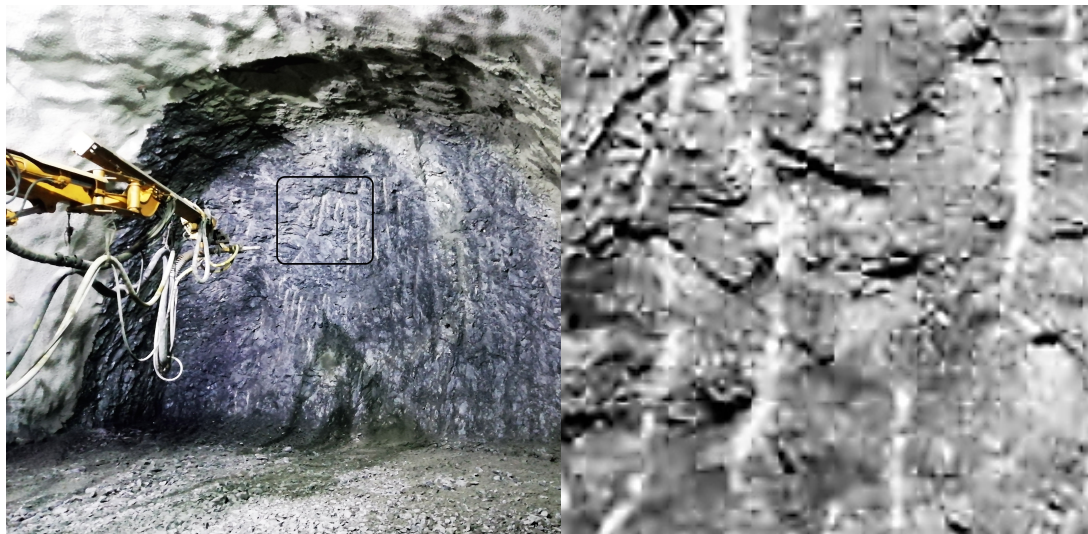
Donde:

GSI es el índice de resistencia geológica

JC_{89} es la condición de las paredes de las discontinuidades según Bieniawski (1989)

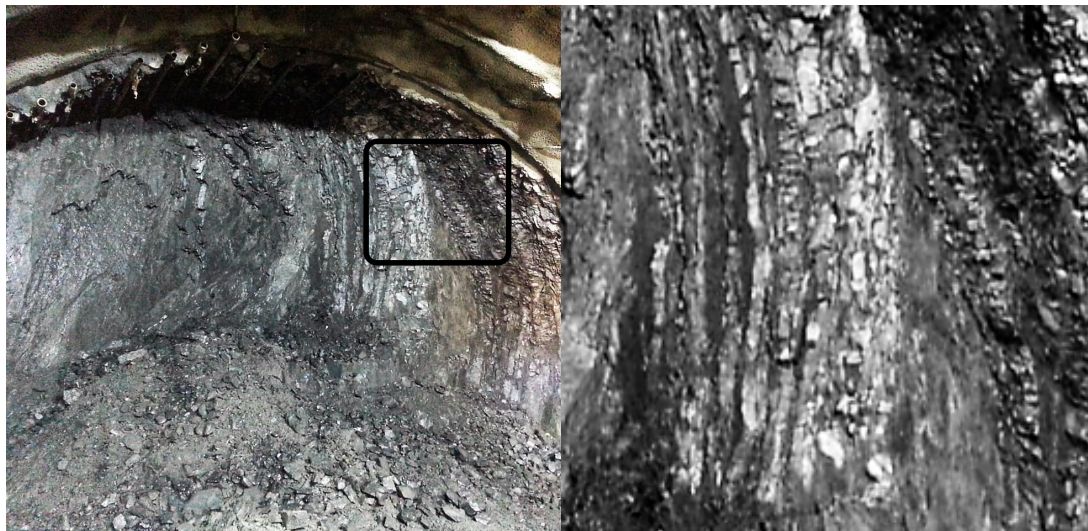
GSI_{DF} es el grado de fracturamiento en términos de GSI obtenido mediante dimensión fractal DF .

En relación con los establecido en los dos numerales anteriores, se puede ver en la Figura 5.3.1 que, los valores de GSI más bajos estarían hacia el final del tramo de estudio y en cercanías de la abscisa km 34+800. Recíprocamente, los valores más



(a) Macizo Rocosó abscisa K34+580

(b) Fractal K34+580



(c) Macizo Rocosó abscisa K35+047.

(d) Fractal K35+047



(e) Macizo Rocosó abscisa K35+055

(f) Fractal K35+055

Figura 5.3.2: Análisis de dimensión fractal sobre las condiciones del frente de excavación

altos se encontraron alrededor de las abscisas km 34+600 y km 35+000.

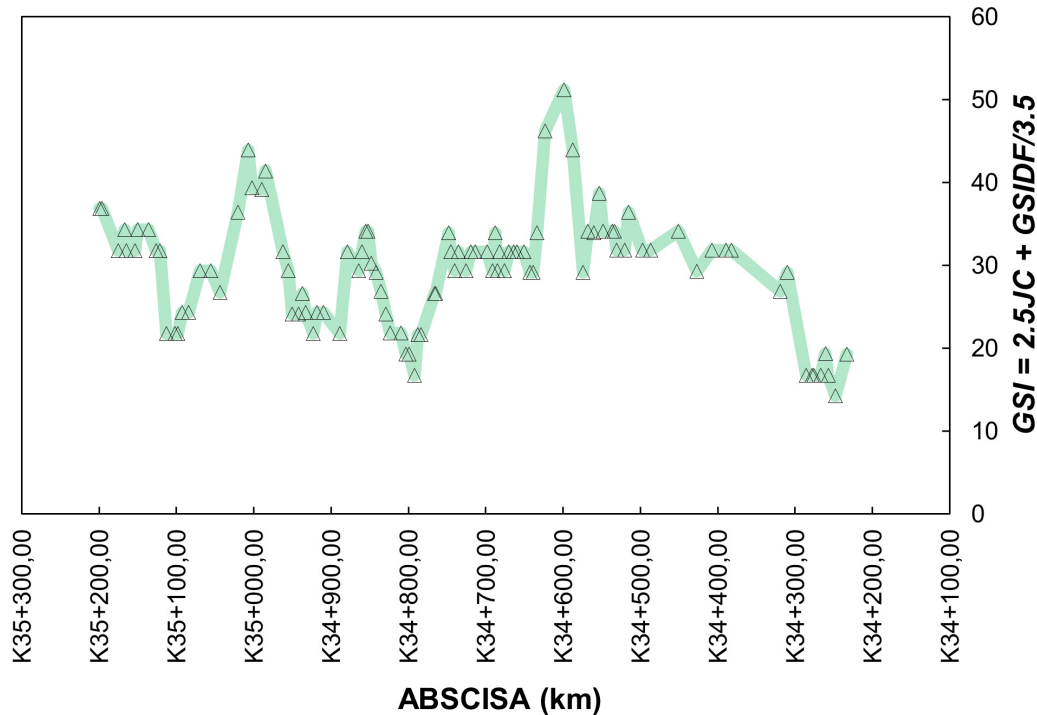


Figura 5.3.3: Distribución de GSI Estimado para el tramo del Túnel GGE comprendido entre las abscisas km 35+211,00 y km 34+214,25, Portal Salida, Elaboración Propia

No obstante, lo anterior, se debe tener en cuenta que en todo caso los valores de GSI estimados se encuentran por debajo de 60, e incluso se concentran mayormente entre los valores de GSI 20 y 40, esta situación permite establecer macizos rocosos de calidad geomecánica predominantemente baja.

5.4. Calibración propuesta GSI Fractal

Para verificar si la cuantificación propuesta de GSI funciona o no, es necesario confrontar los valores de GSI estimados mediante la Ecuación 5.3.1 contra los valores de GSI estimados a partir de las condiciones de las paredes de las discontinuidades y del fracturamiento mapeadas en campo.

Al momento de realización de este trabajo, solamente se contaba con un conjunto de datos de campo confiables para la obtención de GSI por correlación de los parámetros de clasificación mediante el sistema RMR como los son JC y RQD. Si

bien en los Registros Geológicos-Geotécnicos del Macizo Rocosó suministrados con el Consorcio Constructor presentan una clasificación visual de GSI, estos valores estuvieron sujetos a diferentes criterios profesionales que los hacen menos confiables para su utilización, mientras que la determinación del RMR por ser el sistema de clasificación escogido para la fortificación de la obra, se hizo bajo los criterios establecidos en los pliegos de condiciones del proyecto y, el juicio subjetivo en la cuantificación de los parámetros disminuyó.

Así pues, los valores de GSI calculados a partir de JC y RQD mediante la Ecuación 2.1.2 (GSI de Campo), se graficaron contra los valores de GSI estimados bajo la metodología propuesta en este trabajo y los resultados se pueden ver en la Figura 5.4.1.

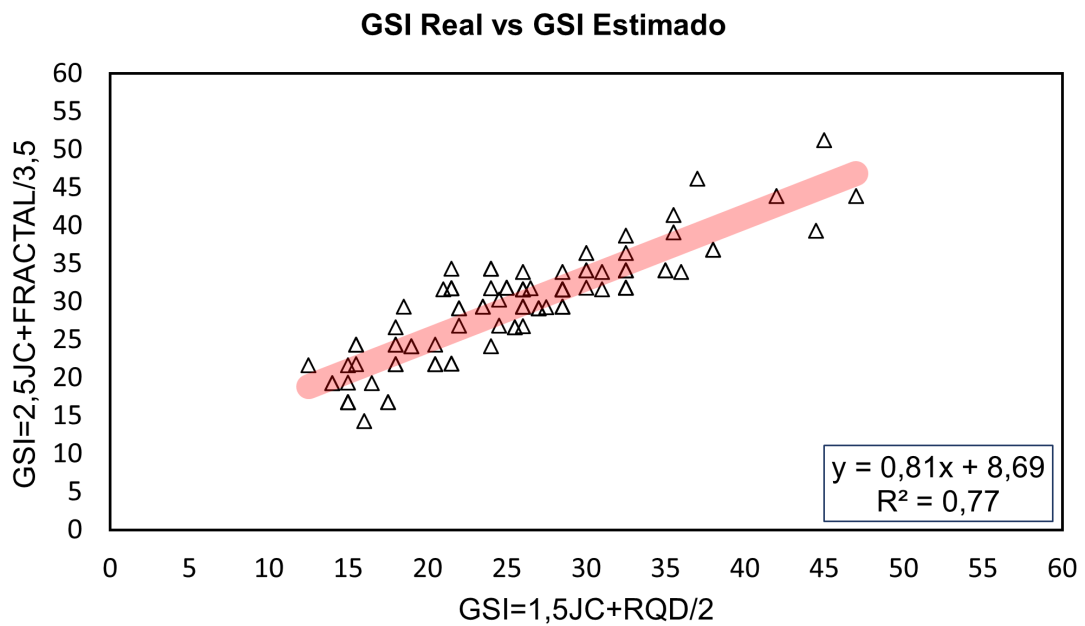


Figura 5.4.1: Comparativo entre GSI de Campo y GSI Estimado a partir de JC y DF, Elaboración Propia

La Figura 5.4.1 muestra que la correlación entre los valores de GSI calculados y los mapeados es razonablemente buena, aun estando un poco alejada de la relación ideal 1:1 que refiere un ajuste perfecto. Esto sugiere que, una vez que se obtengan datos de campo adicionales para macizos rocosos heterogéneos y estratificados, la aplicación de la metodología propuesta para la estimación de GSI podría recomendarse para trabajos futuros.

Ahora bien, es claro que el índice de resistencia geológica no tiene en cuenta

más que la confrontación del grado de fracturamiento del macizo rocoso con las condiciones de las paredes de las discontinuidades. Sin embargo, en el caso de los macizos rocosos heterogéneos estratificados es conveniente establecer la influencia de los esfuerzos del terreno y su posible afectación sobre las aperturas subterráneas, con el fin de aproximar en mayor medida las estimaciones de la calidad de los macizos rocosos a excavar y en últimas, la cuantificación de los soportes a instalar.

En ese sentido, se tuvo en cuenta la relación de la cobertura del túnel en el tramo de estudio (Figura 5.4.2), con los valores de GSI de campo calculados mediante la Ecuación 2.1.2, así como con los valores de GSI estimados mediante la Ecuación 5.3.1. Los resultados de esta operación fueron correlacionados nuevamente a través de la Figura 39, donde se presentan los cocientes de GSI Real/Cobertura versus GSI Estimado/Cobertura.

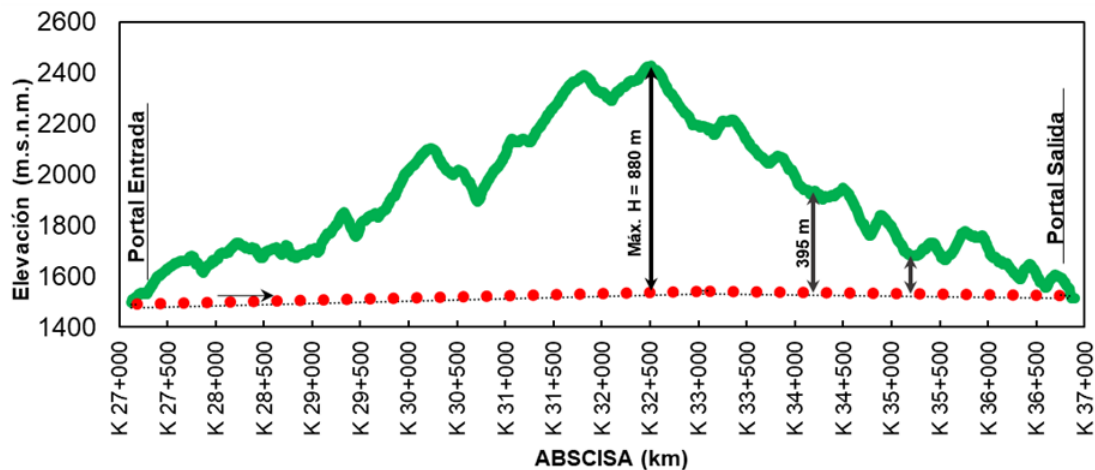


Figura 5.4.2: Perfil de cobertura o techo del Túnel GGE, Elaboración Propia

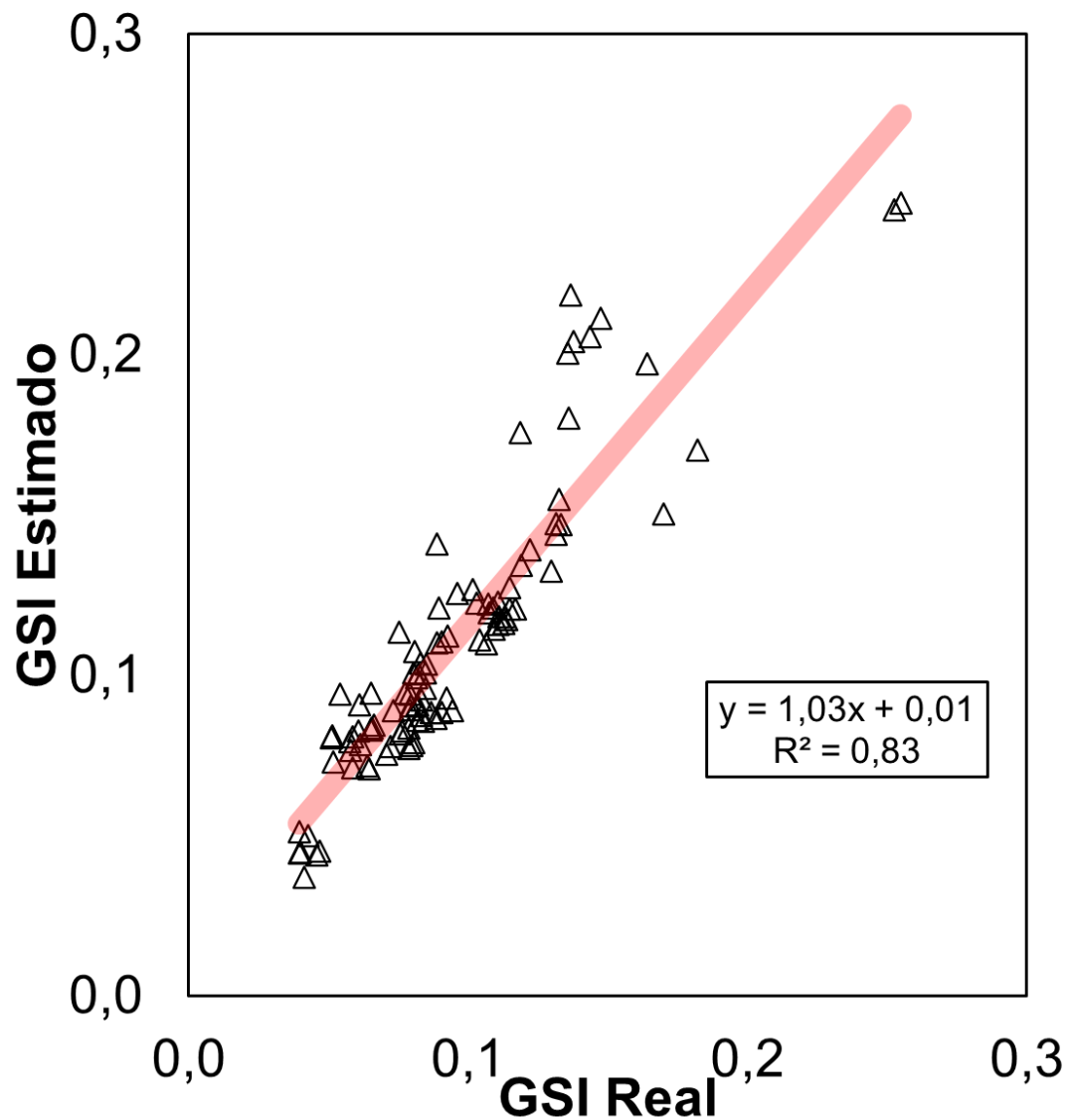


Figura 5.4.3: Comparativo entre GSI de Campo y GSI Estimado teniendo en cuenta la cobertura vertical del Túnel GGE, km 35+211,00 y km 34+214,25, Portal Salida, Elaboración Propia

La Figura 5.4.3 deja ver el efecto de la cobertura en la cuantificación del GSI, si se tiene en cuenta el número de veces que la cobertura tiene influencia sobre los valores de GSI, se puede establecer mejor correlación entre los valores reales y estimados ($R^2 = 0,83$), indicando así que en la medida que los efectos de los esfuerzos se ven caracterizados y contemplados en los diseños de las obras, las aproximaciones a las clasificaciones para la determinación de los soportes a instalarse durante construcción serán más ajustados.

Si se tiene en cuenta el propósito final de este trabajo, el cual trata de entregar una herramienta a la industria para la estimación de la calidad geomecánica de los macizos rocosos a excavar en obras subterráneas lineales para la asignación del soporte durante el diseño de las obras, toma relevancia la comparación y comprobación de la estimación de GSI bajo la metodología propuesta en este trabajo versus las estimaciones de este mismo índice durante construcción y la información de diseño.

Así pues, en la Figura 40 se muestra el esquema comparativo entre los valores de GSI obtenidos para el tramo de estudio, que se enmarca entre las abscisas km 35+211,00 y km 34+214,25 del Túnel Guillermo Gaviria Echeverri, Portal Salida, sector Cañasgordas; este gráfico deja ver un mejor ajuste entre los valores de GSI estimados por medio de la metodología propuesta en este trabajo con los valores de GSI estimados durante la construcción de la obra, en comparación con los valores de GSI previstos durante la etapa de estudios y diseños del proyecto.

Por otro lado, se puede observar en la Figura 5.4.4 un mayor porcentaje de correlación entre los valores de GSI estimados con la Ecuación 5.3.1 y los recuadros que denotan la clasificación real por tipos de terreno en la obra, en comparación especial con los valores de GSI previstos durante los Estudios y Diseños del proyecto, ver también la Figura 5.4.5.

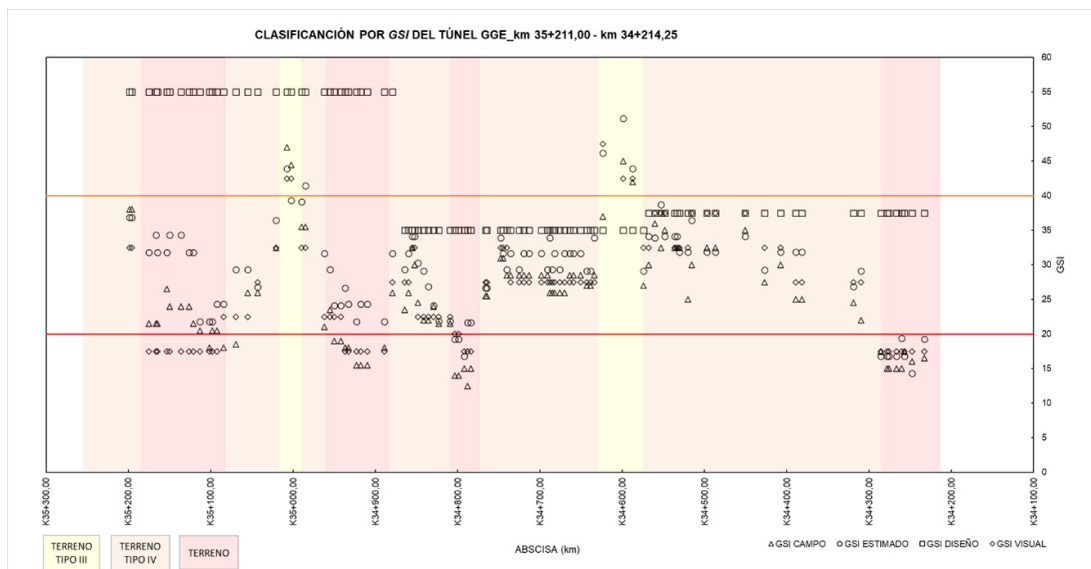


Figura 5.4.4: Comparativo entre GSI de Campo (visual y calculado), GSI de diseño y GSI Estimado a partir de JC y DF, Elaboración Propia

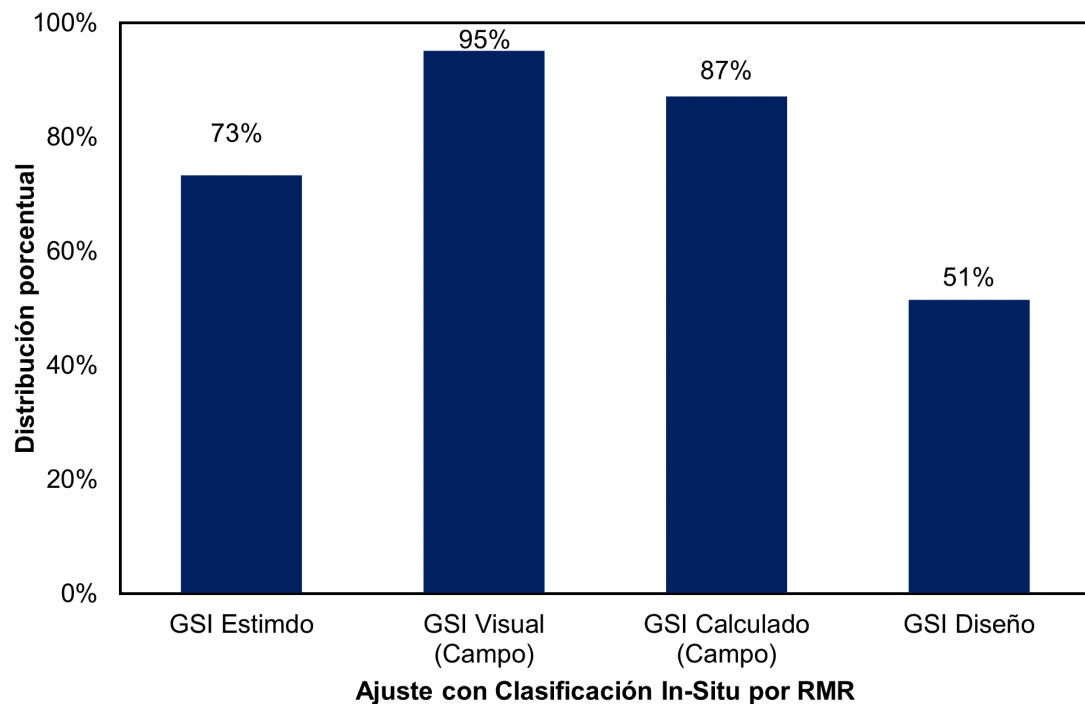


Figura 5.4.5: Porcentajes de ajuste de las clasificaciones por GSI vs la clasificación real de la obra por RMR, Elaboración Propia

La Figura 5.4.5 presenta los porcentajes de ajuste que se obtuvieron entre las clasificaciones por GSI y la clasificación real por RMR que se hizo durante la excavación del tramo de estudio.

Se tiene entonces que, el mejor ajuste se da con la obtención visual de GSI en campo, no obstante, si se centra la atención en el tramo del túnel comprendido entre las abscisas km 35+180 y km 35+110 (5.4.4), se puede ver la mayor divergencia entre los valores de GSI de campo, visuales y los calculados con los datos de RMR, estos últimos siendo más consecuentes con los valores estimados por medio de la metodología propuesta en este trabajo.

Lo indicado en el párrafo anterior hace pensar que, es posible que la clasificación por tipo de terreno en este tramo se debiera más a las condiciones constructivas que a la clasificación misma de la calidad del macizo rocoso, situación que no puede ser prevista por el método de estimación aquí presentado.

Capítulo 6

Conclusiones

Teniendo en cuenta el objetivo principal de este trabajo, el cual busca entregar a la industria un método para determinar cuantitativamente el GSI con la implementación de la teoría fractal y la caracterización previa de las condiciones de las paredes de las discontinuidades para estimar la calidad de los macizos rocosos heterogéneos estratificados a excavarse en obras subterráneas lineales, en la zona donde se emplaza el Túnel Guillermo Gaviria Echeverri – Túnel GGE – inicialmente denominado Túnel del Toyo, especialmente hacia el sector Cañasgordas se tienen las condiciones geológicas-estructurales para la aplicación de esta metodología dado que, se presenta un dominio sedimentario en la Formación Penderisco que ha sido afectado por la actividad tectónica regional que le corresponde a la Cordillera Occidental Colombiana, y en particular para la zona de estudio, la debida al trazado de la falla Cañasgordas.

La caracterización geomecánica de las discontinuidades para este tipo de estudios debe quedar establecida en términos de las condiciones de las paredes de las juntas que permita la cuantificación del JC (Join Condition) que se presenta en Bieniawski (1989), de tal forma que permita su correlación con el grado de fracturamiento del macizo rocoso. La carta de GSI para macizos rocosos heterogéneos estratificados tipo Flysch permite la cuantificación por dimensión fractal para la obtención de los rangos de GSI que les competen a las características de composición y estructura.

El procesamiento de las fotografías tomadas para estimar el grado de fracturamiento representado en la dimensión fractal del macizo rocoso, debe hacerse respecto a una ventana de análisis que, muestre el entramado de fracturas

más representativo del fracturamiento global del afloramiento.

Por los datos analizados de los registros geológicos geotécnicos obtenidos durante la excavación del Túnel GGE es pertinente la utilización de la información menos subjetiva que se tenga disponible para la obtención de las condiciones de las paredes de las discontinuidades. Asimismo, la calidad de las fotografías que se tomen debe ser tal que, permita establecer el grado de fracturamiento del macizo rocoso por medio de la obtención de la dimensión fractal.

La estimación del GSI efectuada en este trabajo permitió establecer calidad geomecánica de los macizos rocosos excavados en el tramo del Túnel GGE comprendido entre las abscisas km 35+211,00 y km 34+214,25, sentido del avance de la excavación, en predominantemente Mala. Lo anterior, teniendo en cuenta que en todo caso los valores de GSI estimados estuvieron por debajo de 60, e incluso estuvieron mayormente concentrados entre los valores de GSI 20 y 40.

La propuesta para la estimación de la calidad de macizos rocosos heterogéneos estratificados planteada en este trabajo, parte de estudios previos para macizos homogéneos realizados por Hong (2017) y Moná (2019).

Los resultados obtenidos en este estudio realizados sobre macizos rocosos heterogéneos permiten tener una mayor predicción de las condiciones reales de macizo rocoso a excavar en obras subterráneas lineales, en comparación con la estimación de la calidad del macizo rocoso típicamente empleada durante los Estudios y Diseños de este tipo de obras.

Finalmente, la aplicación de la metodología propuesta en este trabajo podría recomendarse para la clasificación de macizos rocosos heterogéneos estratificados mediante la estimación de GSI en otras zonas siempre que, se obtengan datos de campo confiables de las condiciones de las paredes de las discontinuidades y se tengan fotografías representativas del grado de fracturamiento dominante en los afloramientos disponibles.

Capítulo 7

Referencias

- Barnsley , M. F. (1990). Fractals Everywhere. New York: Academic Press.
- Barton et al. (1974). Engineering classification of rock masses for design of tunnel support. Rock Mechanics, 6(4), 189-236.
- Basirat et al. (2019). Determination of the Fractal Dimension of the Fracture Network System Using Image Processing Technique. Fractal and Fractional.
- Bieniawski, Z. T. (1973). Engineering classification of jointed rock masses. Trans S Afr Inst Civ Eng,.
- Bieniawski, Z. T. (1976). Rock mass classification in rock engineering. En Z. T. Bieniawski, Proceedings of the symposium on exploration for rock engineering exploration., (págs. 97-106). A.A. Balkema.
- Bieniawski, Z. T. (1989). Engineering Rock Mass Classifications. New York: Wiley.
- Consorcio Antioquia al Mar. (2017). Capitulo 2. Estudio de Transito, Topografía y Diseño Geometrico Para Túnel del Toyo.
- Consorcio Antioquia al Mar. (2017). Volumen IX. Estudios y Diseños de Túneles Capítulo 4. Estudio de Geología y Geotecnia Túnel 17 Toyo.
- Consorcio Antioquia al Mar. (2020). Registro Geológico - Geotécnico del Macizo Rocosó durante construcción.
- Correa Villa, E. (2014). Resistencia de las Discontinuidades Rocosas al

Esfuerzo Cortante. Medellín: Proyecto de Grado, Universidad EAFIT.

- Cossio, J. E. (2014). Parámetros morfométricos, geomorfológicos y correlación estructural en cinco cuencas hidrográficas de la Cuenca Amagá. Antioquia, Medellín: Tesis de grado, Universidad Eafit.
- Grimstad, E., Barton, N. (1993). Updating the Q-System for NTM. Proc. Int. Symp. on Sprayed Shotcrete.
- Gutiérrez, J. (1998). Sistemas no lineales. Conceptos, algoritmos y aplicaciones . V Conferencia Nacional de Ciencias de la Computación, CCBOL'98. Potosí, Bolivia.
- Hernández et al. (2014). Metodología de la investigación (6^a ed.). McGraw-Hill.
- Hoek et al. (1995). Support of Underground Excavations in Hard Rock. Rotterdam: Balkema.
- et al. (2013). Quantification of the Geological Strength Index chart. 47th US Rock Mechanics / Geomechanics Symposium, 23 - 26.
- Hoek, E. (1994). Strength of rock and rock masses. ISRM News Journal, 2(2):4-16.
- Hoek, E. (2006). Practical Rock Engineering. Unpublished online book. Obtenido de <https://www.roscience.com/hoek/corner/>.
- Hoek, E., Marinos, P. (2000). Predicting Tunnel Squeezing. Tunnels and Tunnelling International.
- Hong et al. (2017). Determination of geological strength index of jointed rock mass based on image processing. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering.
- INGEOMINAS. (2001). Memoria explicativa del mapa geológico de Antioquia. Escala 1:400000. Bogotá D.C.
- INGEOMINAS. (1999). Mapa geológico de Antioquia. Escala 1:400000. Bogotá. Bogotá D.C.
- ISA. (2012). Elaboración de estudios y diseños, programación, financiación, construcción, operación, mantenimiento, conservación y explotación

comercial del proyecto Autopistas de La Montaña bajo el esquema de concesión. Tramo I. Medellín.

- Karzulovic, A. (2006). Métodos de calificación geotécnica de macizos rocosos.
- Lichen Li et al. (2019). Characterization of a jointed rock mass based on fractal geometry theory. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*.
- Magaña et al. (2011). Análisis con elemento finito y remalleo fractal en geotecnia. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 103-118.
- Marinos et al. (2007). Geological Strength Index (GSI). A characterization tool for assessing engineering properties for rock masses. *Underground works under special conditions*, eds. Romana, Peruchó Olalla, 13-21.
- Moná, J. E. (2019). Aplicación de la Teoría Fractal para la Estimación de la Distribución Geométrica de Fallas en Macizos Rocosos. Medellín: Trabajo de Grado Maestría, Universidad Nacional de Colombia.
- Universidad Nacional de Colombia . (2011). Nueva falla geológica altera mapa de amenaza sísmica en Colombia. . UN periódico.
- Valverde, J. (2007). Detección de bordes mediante el algoritmo de Canny.
- Xie, H. (1993). Fractals in rock mechanics. A. A. Balkema, 1-453.