

USO DE LOS MATERIALES MERI RESULTANTES DE LAS EXCAVACIONES DE LOS
TÚNELES DEL TRAMO 3 DE LA CONCESIÓN VIAL BOGOTÁ - VILLAVICENCIO



JEAN FABER SANCHEZ ACOSTA



UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
VILLAVICENCIO

2023

USO DE LOS MATERIALES MERI RESULTANTES DE LAS EXCAVACIONES DE LOS
TÚNELES DEL TRAMO 3 DE LA CONCESIÓN VIAL BOGOTÁ - VILLAVICENCIO

JEAN FABER SANCHEZ ACOSTA

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de Ingeniero Civil

Director

Ing. GERMAN ERNESTO CHICANGANA, MSc
Ingeniero de Minas, Magister en Ciencias - Geología

Codirector

Ing. ALFONSINA BOCANEGRA GÓMEZ
Ingeniera Industrial - Geóloga

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
VILLAVICENCIO

2023

Autoridades académicas

P. Álvaro José ARANGO RESTREPO, O.P.

Rector General

P. Mauricio Antonio CORTÉS GALLEGO, O.P.

Vicerrector Académico General

P. José Antonio BALAGUERA CEPEDA, O.P.

Rector Seccional Villavicencio

P. Rodrigo GARCÍA JARA, O.P.

Vicerrector Académico Seccional Villavicencio

Mg. JULIETH ANDREA SIERRA TOBÓN

Secretaría General Seccional Villavicencio

Ing. LUIS FERNANDO DIAZ CRUZ, MSc

Decano Facultad de Ingeniería Civil

Dedicatoria

Dedico este título a mi Mamá quien ha sido un apoyo en todo este proceso de estudio. Me ha demostrado con ejemplo superándose día a día, que no debemos desfallecer y siempre perseverar.

Agradezco a mi Abuela quien ha sido mi segunda mamá y he tenido la fortuna de tener una abuela tan maravillosa la cual fue la que me crio y me enseñó los valores, me enseñó la primera educación importante que es la que viene de casa y de ahí en adelante me preparó para la vida y salir al mundo a triunfar.

Agradecimientos

Agradezco a mi codirectora la Geóloga Alfonsina Bocanegra Gómez, la cual fue de mucha ayuda en mi trabajo de grado, le agradezco su disposición y cooperación en todo lo que requerí para esta investigación, que Dios la bendiga y le de mucha salud.

Agradezco al ingeniero Germán Ernesto Chicangana Montón por su guía durante el proceso de formación como ingeniero y el proceso de desarrollo de este trabajo de grado como director. Que Dios lo bendiga y le de mucha salud.

Tabla de contenido

	Pág.
Resumen.....	11
Abstract.....	12
Introducción	13
Capítulo I. Introducción.....	14
1.1. Objetivos	14
1.1.1. Objetivo General	14
1.1.2. Objetivos Específicos	14
1.2. Alcance.....	14
1.3. Estado del arte.....	15
1.4. Planteamiento del Problema	16
1.4.1. Formulación del problema	17
1.5. Justificación.....	17
1.6. Marco Teórico	17
1.7. Marco conceptual	18
1.8. Marco normativo	19
1.9. Marco geográfico	19
1.9.1. Localización del área de estudio	20
1.9.2. Ubicación ZODME	20
Capítulo 2. Metodología	21
2.1 Fase 1: Identificación geológica de los materiales MERI.....	21
2.2 Fase 2: Mapeo geológico de la zona de excavación.....	22
2.3 Fase 3: Análisis de los procesos geológicos que originaron los materiales MERI	22
Capítulo 3. Geología de la zona de estudio.....	23
Capítulo 4. Resultados	26
4.1 Análisis petrográfico de los materiales	26
4.1.1 Formación Brechas de Buenavista.....	26

4.2	Formación Lutita de Macanal	27
4.3	Formación Arenisca de Cáqueza.....	28
4.4	Pórfido Dacítico.....	29
4.4.1	Litología	29
4.4.2	Minerales.....	31
4.4.3	Forma de los agregados	35
4.4.4	Porosidad y fracturación	35
4.5	Grado de meteorización de las rocas	36
4.6	Ensayos de laboratorio	38
4.6.1	Ensayo de Desgaste (Máquina de Los Ángeles).....	38
4.6.2	Cálculo y resultados prueba de desgaste.....	39
4.7	Ensayo Uniaxial o de Compresión Simple	41
4.7.1	Extracción de Núcleos	41
4.7.2	Resultados prueba Compresión Simple	42
4.8	Clasificación de tipos de fallas a la compresión de cilindros	43
4.9	Prueba de efervescencia	45
5.	Análisis de resultados.....	46
	Conclusiones	47
	Referencias bibliográficas.....	48

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Marco normativo.....	19
Tabla 2. Clasificación petrográfica de los agregados analizados.....	29
Tabla 3. Composición de la roca y columna recalculada para aplicar el diagrama QAPF.....	31
Tabla 4. Unidad Litoestratigráfica a la que pertenecen las Rocas.	36
Tabla 5. Escala para determinar la meteorización de la roca.	37
Tabla 6. Determinación del Grado de Meteorización de Las Rocas.....	37
Tabla 7. Granulometrías representativas de los agregados, para la selección del método de ensayo a usar.	38
Tabla 8. Resultados Prueba de Desgaste en la Máquina de Los Ángeles.	39
Tabla 9. Clasificación de tipos de fallas de cilindros a compresión simple.....	44

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Mapa Tramo 3 vía Bogotá-Villavicencio	20
Figura 2. Ubicación del Zodme	20
Figura 3. Mapa geológico de la zona de estudio.....	24
Figura 4. Bloque diagrama de la geología del túnel de Buenavista con paisaje de su entorno, mostrando hacia la derecha parte del área urbana de Villavicencio.	25
Figura 5. Muestra de roca Brecha de Buenavista.	26
Figura 6. Muestra de Lutita.....	27
Figura 7. Muestra de Arenisca Cuarzosa.	28
Figura 8. Muestra de Roca Pórfido Dacítico.	29
Figura 9. Fotografía del agregado bajo el estereomicroscopio. Tomado de Laboratorio	30
Figura 10. Microfotografías del agregado de granitoide rico en cuarzo en objetivo 5X.	30
Figura 11. Microfotografías del agregado de granitoide rico en cuarzo en objetivo 8X.	31
Figura 12. Microfotografías del agregado de granitoide rico en cuarzo con el objetivo 10X	32
Figura 13. Microfotografías de plagioclasa y feldespato potásico con el objetivo 10X.....	32
Figura 14. Microfotografías de feldespatos potásicos con el objetivo 10X.....	33
Figura 15. Microfotografías de moscovita y biotita con el objetivo 10X.....	33
Figura 16. Microfotografías de calcita con el objetivo 10X.	34
Figura 17. Microfotografías de zircón con el objetivo 50X.	34
Figura 18. Escala de redondez y esfericidad de Powers, 1982.....	35
Figura 19. Extracción de núcleos a las Rocas.....	42
Figura 20. Carga (KN) Vs Tiempo (s), Muestra Brecha de Buenavista.....	42
Figura 21. Deformación frágil y dúctil bajo compresión, torsión y extensión.	43
Figura 22. Resultado de la prueba de efervescencia.	45

Lista de Ecuaciones

	Pág.
Ecuación 1. % Desgaste.	39

Resumen

En este trabajo se llevó a cabo un estudio geológico para identificar los materiales MERI-T (Material resultante de la excavación para la construcción de túneles) extraídos de los túneles de la vía Bogotá – Villavicencio en el tramo 3 sector Chirajara – Fundadores, concesionado por Coviandina S.A.S al cual se le adjudicó el desarrollo, administración y operación de este tramo.

Este estudio se realizó para determinar las características geológicas del material extraído, tener mayor conocimiento sobre él y posteriormente optimizar la utilización de dicho material en proyectos de construcción cercanos a la zona de extracción, ya sea como agregados para concretos, material para subbase, pavimentos o construcción de la superestructura entre otros. Y así aprovechar al máximo los materiales ya que normalmente se depositan en una zona Zodme (Zona de deposición de materiales excavados), que demanda grandes áreas de almacenamiento y posteriormente no se les da ningún otro manejo a estos desechos.

Se identificó la unidad litoestratigráfica a la que pertenecen los materiales MERI-T para tener información detallada sobre las características geológicas específicas de las rocas, detallando su composición mineralógica, estructura y origen geológico.

Luego se realizó un mapeo geológico de la zona de excavación de los túneles para obtener estructuras geológicas, tectónicas, fallas activas y problemas geológicos del macizo rocoso.

Posteriormente se llevaron a cabo una serie de ensayos de laboratorio para determinar las propiedades mecánicas de las rocas, fundamentales para evaluar la resistencia, la durabilidad y la capacidad de soportar cargas cíclicas. Los resultados de estos estudios proporcionarán información crucial para entender el comportamiento de la roca en condiciones reales de uso y facilitarán la toma de decisiones en aplicaciones de ingeniería y construcción donde se emplee este material.

Palabras clave: MERI, Zodme, Túnel, Petrografía, Litología, Geología, Falla.

Abstract

In this work a geological study was carried out to identify the MERI-T materials (Material resulting from excavation for tunnel construction) extracted from the tunnels of the Bogotá-Villavicencio Road in section 3, Chirajara - Fundadores sector, concessioned by Coviandina S.A.S., which was awarded the development, administration and operation of this section.

This study was carried out to determine the geological characteristics of the extracted material and to have more knowledge about it and subsequently optimize the use of such material in construction projects near the extraction area, either as aggregates for concrete, subbase material, pavements or construction of the superstructure, among others. The materials are normally deposited in a Zodme zone (Zone of deposition of excavated materials), which requires large storage areas and then no other management is given to these wastes.

The lithostratigraphic unit to which the MERI-T materials belong was identified in order to have detailed information on the specific geological characteristics of the rocks, detailing their mineralogical composition, structure and geological origin.

A geological mapping of the tunnel excavation area was then carried out to obtain geological and tectonic structures, active faults and geological problems of the rock mass.

Subsequently, a series of laboratory tests were carried out to determine the mechanical properties of the rocks, which are fundamental to evaluate the strength, durability and capacity to withstand cyclic loads. The results of these studies will provide crucial information to understand the behavior of the rock in real conditions of use and will facilitate decision making in engineering and construction applications where this material is used.

Keywords: MERI, Zodme, Tunnel, Petrography, Lithology, Geology, Failure.

Introducción

Los materiales MERI-T (Material resultante de la excavación de túneles) no son muy tomados en cuenta a la hora de construir túneles, pues tan sólo son un residuo de esta actividad, el manejo de estos restos se convierte en un problema porque demandan disponer de grandes áreas de almacenamiento permanente y gestionar los permisos ambientales pertinentes. Esto se podría resolver proponiendo una solución en la cual se hiciera una caracterización del terreno a excavar, se clasifique geotécnicamente y al tiempo se conozcan sus características geológicas, litológicas y composicionales, tal que se pudiera prever de antemano su utilización, de esta forma se reduciría en gran medida la contaminación y desperdicio de estos materiales (Correa, 2019).

En Colombia y en el mundo cada vez más se tiene la concepción de ingeniería sostenible en la que se reduzcan los desperdicios y en la que se reutilicen materiales para ejercer una construcción circular; y dentro de los “Objetivos de desarrollo sostenible para el 2030” desarrollado por la Naciones Unidas, se establecieron 17 objetivos y 169 metas entre las que se encuentran algunas que tienen que ver con la infraestructura vial en el mundo, y más específicamente la meta 9 propone “construir infraestructuras resilientes, promover la industrialización inclusiva y sostenible y fomentar la innovación”. Por eso en este trabajo se lleva a cabo la investigación de la mejor manera de reutilizar estos materiales en las construcciones aledañas a la misma extracción para reducir problemas de contaminación y de costos de construcción los cual mejoraría significativamente la forma en la que se construye y se aprovechan estos materiales una vez realizada la excavación de los túneles (Correa Arroyave, 2021).

Capítulo I. Introducción

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo General

Realizar una identificación geológica de los materiales MERI obtenidos durante la excavación del túnel de Buenavista corredor vial Chirajara-Fundadores.

1.1.2. Objetivos Específicos

- Identificar la unidad litoestratigráfica a la que pertenecen los materiales MERI, determinando su descripción petrográfica.
- Realizar un mapeo geológico detallado de la zona de excavación de los túneles, identificando unidades geológicas, estructuras tectónicas, fallas activas y potenciales problemas geológicos que afectaron el macizo rocoso del que se extrajeron los materiales MERI.
- Analizar los procesos geológicos que dieron origen a los materiales MERI con el fin de determinar su susceptibilidad a procesos de meteorización física y química y poder indicar su comportamiento geotécnico.

1.2. Alcance

El alcance de este proyecto se enfoca en identificar los materiales MERI (Materiales de excavación de reutilización industrial), que son resultantes de los materiales extraídos de los túneles del tramo 3 de la vía Bogotá-Villavicencio en la construcción de los túneles, administrado y financiado al 100% por Coviandina S.A.S., al cual se le adjudicó el desarrollo, administración y operación de este tramo, con la firma del contrato de concesión 005 del 9 de junio de 2015.

Esta obra inició en septiembre de 2016 y constituye el tercio final de tres taramos en los cuales fue dividido el proyecto de la vía al Llano. Este tiene una longitud aproximada de 32,9Km y contempla la construcción de 6 túneles, entre ellos el túnel 7 que tiene una longitud de 4.5 Km y un puente con 762 metros.

1.3. Estado del arte

Según Correa Arroyave, (2019) en Colombia solo se utiliza un 30% de los materiales extraído en la excavación de túneles, el resto son considerados como residuos o material sobrante y son desechados en escombreras autorizadas. Por lo tanto, el desperdiciar ese otro 70% trae un impacto ambiental grade ya que ese material se podría usar como insumo para construcciones aledañas a los túneles tras un proceso de clasificación y más aún porque la falta de materiales de construcción para otras obras incentiva la apertura de nuevas fuentes de materiales tanto de canteras como de gravilleras. Además, obliga a que se utilicen suelos posiblemente agrícolas o ganaderos para el depósito de estos materiales con el agravante que puede propiciar terrenos con estabilidad cuestionable.

En la construcción del túnel de base de San Gotardo, en Suiza, se removieron 25 millones de toneladas de material y los materiales extraídos se utilizaron de la siguiente manera: el 20% se usó para construir terraplenes en el mismo proyecto, el 32% se empleó como agregados en la producción de concreto, incluyendo la elaboración de dovelas para el revestimiento y el 44% restante se vendió a terceros para su uso en la restauración ambiental, como la construcción de islas. En cuanto al manejo de los materiales excavados, se les obligó a utilizar la mayor cantidad posible de ellos con el objetivo de optimizar la gestión económica del material y minimizar los impactos ambientales (ITA – IATES, 2023).

El Departamento del Medio Ambiente Transporte y Agricultura de La República y Cantón de Ginebra (ECOMAT, 2018), indica que los materiales de excavación no deben ser considerados más como desechos o sobrantes si no como preciosos recursos por valorizar.

Oggeri y Ronco (2010), propusieron los "Métodos innovadores para el reciclaje eco compatible y sostenible de los materiales procedentes de la excavación de túneles, teniendo en cuenta también el contenido potencial de minerales nocivos". El objetivo de esta investigación fue proporcionar una base técnica para mejorar el uso de los materiales de escombros en una zona de la cordillera de los Alpes, donde se construían un número importante de túneles.

Curran et al. (1988), señalan que después de buscar las mejores alternativas para la construcción de un túnel de 53 millas, con este se removieron uno 4.6 millones de toneladas de material entre tierra y roca. Los costos de acarreo de este material para llevarlo a vertederos a lo largo del lago Michigan o para cal agrícola había sido descartados debido a que solo los costos de transporte resultaron antieconómicos, lo que conllevó a darle cinco usos factibles que podría tener

este material entre los cuales estuvo utilizarlos como material de cantera, uso en reservas forestales, y elementos para paisajismo entre otros.

Jiménez Fuente, (2017) mediante el uso de algoritmos evolutivos multiobjetivo (AEMO) en la que su principal objetivo es desarrollar una herramienta, para la estabilización de suelos en el desarrollo de infraestructura vial mediante el uso de AEMO, dieron como alternativas de optimización multiobjetivo la utilización de MERI en el campo de la infraestructura vial. El trabajo de esta investigación fue caracterizar los materiales MERI extraídos de la mina de Cerrolargo, caracterizarlos y con base a esto plantear un algoritmo AEMO para optimizar mezclas mediante la adición de porcentajes de cal y cemento y luego utilizarla para estabilizar suelos en el campo de la infraestructura vial.

1.4. Planteamiento del Problema

Todo material resultante de la excavación para la construcción de túneles se le llama material MERI-T. El manejo de estos desechos demanda grandes áreas de almacenamiento permanente las cuales deben ser geotécnicamente diseñadas y construidas garantizando que soporten eventos naturales y antrópicos, pero todo este esfuerzo es en vano ya que posteriormente no se les dará ningún uso a estos desechos. Entonces ¿Qué hacer con estos subproductos de construcción?

En los próximos 10 años se extraerán cerca de 20.000.000m³ de materiales de 170 km túneles viales que se tienen previstos que se construyan en los diferentes proyectos viales en marcha, si tan sólo en lugar de disponer estos desechos en botaderos ZODME (zona de manejo de escombros y material de excavación), se propusiera una solución en la cual se hiciera una caracterización del terreno a excavar, se clasifique geotécnicamente y al tiempo se conozcan sus características geológicas, litológicas y composicionales tal que pudiera preverse de antemano su utilidad, se reduciría en gran medida la contaminación y desperdicio de materiales MERI-T (Correa, 2019).

En Colombia sólo un 30% de los materiales es utilizado por los tuneleros como insumos para sus propios proyectos, no obstante, teniendo en cuenta que se trata de materiales pétreos, son materiales que podrían utilizarse en un sin número de aplicaciones a la ingeniería civil como materia prima para el concreto asfáltico, o como material de relleno para fundaciones, y también en otras ingenierías como agronómica, como correctores de suelos entre otras aplicaciones, dependiendo de sus propiedades (Correa Arroyave, 2021).

1.4.1. *Formulación del problema*

¿Cómo se pueden aprovechar los materiales MERI subproductos de la excavación para la construcción de los túneles del tramo 3 de la vía Bogotá-Villavicencio para mitigar el impacto ambiental y reducir costos en construcciones aledañas?

1.5. Justificación

La presente investigación tiene como objetivo identificar desde el punto de vista geológico los materiales MERI (materiales térmicos naturales, materiales de transición, roca meteorizada, roca fracturada y roca sana), que fueron extraídos durante la construcción de los túneles en el tramo 3 de la concesión vial Bogotá-Villavicencio. Además, se busca analizar y clasificar los materiales producidos durante la construcción de los túneles, incluyendo los escombros y residuos, para identificar posibles usos en la construcción.

Es importante desarrollar soluciones sostenibles para la gestión de los materiales producidos durante la construcción de obras civiles, como los túneles en el tramo 3 vía Bogotá-Villavicencio. Al caracterizar y clasificar estos materiales, se puede determinar racionalmente si deben ser llevados a un botadero, escombrera o Zodme, o si se les puede dar otro uso aplicativo. Además, la reutilización de estos materiales en la construcción puede reducir la necesidad de utilizar materiales nuevos y reducir el impacto ambiental asociado con la extracción de materiales.

1.6. Marco Teórico

A partir del final del siglo XVII y principios del XIX, comenzó la Revolución Industrial, un período en el que los desechos eran utilizados de manera provechosa por la sociedad. Sin embargo, hacia la mitad del siglo XX, la cantidad de residuos producidos empezó a aumentar significativamente, dando lugar a las primeras alertas de contaminación. En cuanto a los Materiales de Escombros Reciclados Industriales (MERI) generados por las industrias mineras, se utilizaron como material de relleno en las propias instalaciones de las industrias, lo que permitió reducir los costos asociados a la evacuación y el almacenamiento.

Los Materiales de Escombros Reciclados Industriales (MERI) se clasifican como desechos inertes y no peligrosos, con un alto nivel de valorización y aprovechamiento. La composición de

los Residuos de Construcción y Demolición (RCD) no es uniforme, y puede variar dependiendo del tipo de estructura, del método de demolición utilizado y de los sistemas de gestión ambiental aplicados.

Una gran cantidad de los residuos conocidos como "escombros" son depositados en vertederos sin que se realice ningún tipo de recuperación o reutilización, lo que plantea serias preocupaciones tanto ambientales como económicas. La eliminación inadecuada de estos residuos puede generar problemas ambientales en distintas áreas, como el suelo, la atmósfera, el agua, la flora, la fauna y el paisaje (Suárez Silgado et al, 2019). Los Materiales de Escombros Reciclados Industriales (MERI), por su parte, han sido utilizados con diversos fines, como el relleno y la disposición en depósitos. Alrededor del 40% de este material es reutilizado como relleno en la propia industria, mientras que el 10% restante se utiliza para fines externos (Jiménez Fuentes, 2017).

La mayor parte de los materiales de excavación generados en distintos proyectos de infraestructura, y en particular en la construcción de túneles viales, son depositados en depósitos conocidos como "zodmes" (zonas de manejo de escombros y material de excavación). En general, se estima que entre el 70% y el 75% de estos materiales son depositados en estos lugares (Correa, 2019). Durante la excavación de túneles, se generan materiales que son sanos, densos, duros y presentan fracturas de alta a mediana intensidad.

1.7. Marco conceptual

Por Materiales MERI se refiere a aquellos materiales téreos naturales (suelos, rocas y materiales de transición) que se remueven en la construcción de toda obra de ingeniería, como la construcción de una presa, una vía o un ducto subterráneo, en este caso particular, un túnel vial. Los materiales producidos durante la excavación del túnel son materiales sanos, densos, duros y de alta a medianamente fracturados. En zonas de falla se encontrará material de características distintas, los cuales demandarán de un tratamiento previo antes de su disposición. La granulometría producida durante la construcción de túneles está íntimamente ligada con el método de arranque (Correa, 2019).

Un túnel se construye con la intención de establecer un pasaje subterráneo estable, mientras que una cantera es un lugar de donde se extraen materiales de construcción, pero a veces su estabilidad puede ser incierta (Correa, 2019).

Los ZODMES (Zonas de Disposición de Materiales de Excavación Sobrantes) son sitios de disposición permanente de este tipo de materiales. Estos sitios se seleccionan teniendo en cuenta criterios económicos, geológicos, geotécnicos y socio ambientales (Correa, 2019).

Por escombros debe entenderse, como todos los materiales no naturales, provenientes de la demolición o procesos constructivos que conlleven a la remoción y desecho de materiales tales como ladrillos, pavimentos, concretos, aceros, plásticos y demás materiales manufacturados por el hombre, los cuales deben removerse para adelantar procesos de rehabilitaciones (Correa Arroyave, 2021).

1.8. Marco normativo

Tabla 1. *Marco normativo*

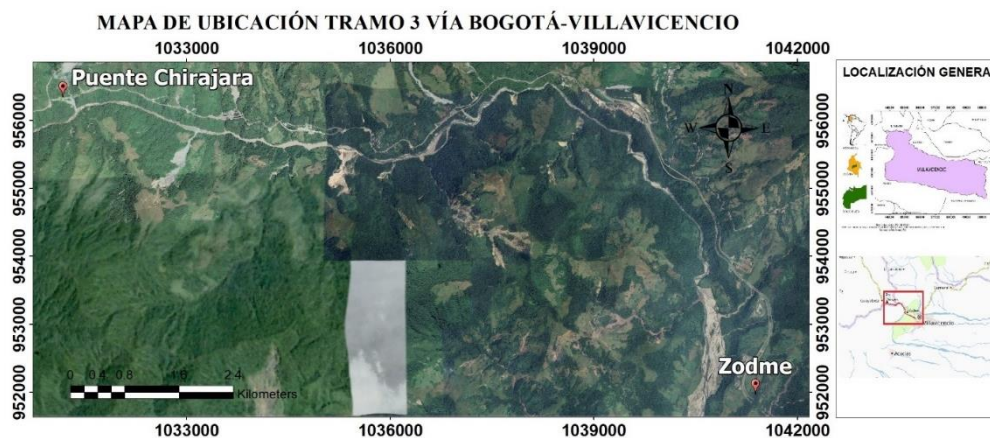
Norma o decreto	Descripción
Ley 93 de 1993	El estado invita a diseñar tecnologías que permitan avanzar en la reutilización, reciclaje y disposición de los desechos que se producen en nuestro territorio.
Política Nacional de Gestión Integral de Residuos (Consejo Nacional Ambiental 1998)	Guía para las prácticas de actividades de aprovechamiento y uso de residuos de construcción y demolición.
Decreto 2981 del 2003. Compilado en el Decreto Único Reglamentario 1077 del 2015	Aclara el panorama jurídico sobre los residuos en Colombia. Indica que se deben incluir acciones que procuren la reutilización de productos para prevenir que estos no sean aprovechados durante su vida útil y terminen deteriorando el aire, la tierra y el suelo.
Resolución 472 del 2017	Ordena a los municipios y distritos a hacer una selección de sitios específicos para la disposición de los residuos de construcción y demolición.

1.9. Marco geográfico

La vía Bogotá-Villavicencio, que abarca 85.6 kilómetros, se divide actualmente en tres secciones: Calzada existente (Tercio inicial), nueva calzada El Tablón-Chirajara (Tercio Medio) construida para ampliar y mejorar la capacidad vial en este tramo intermedio de la carretera, y por último la nueva calzada Chirajara-Fundadores (Tercio Final) también consiste en una nueva calzada para mejorar la infraestructura vial en el tramo final de la ruta hacia Villavicencio.

1.9.1. Localización del área de estudio

Figura 1. Mapa Tramo 3 vía Bogotá-Villavicencio

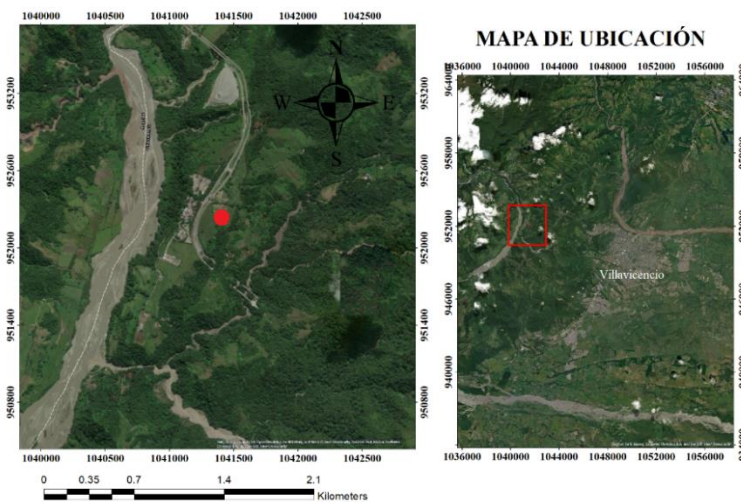


Nota. Adaptado de Google Earth. Escala 1:25.000

1.9.2. Ubicación ZODME

El Zodme 4 abarca un área total de 51878.5 metros cuadrados y es donde se depositaron los MERI provenientes del túnel de Buenavista. Está ubicado aproximadamente un kilómetro antes de entrar al túnel de la calzada sentido Bogotá-Villavicencio. Sus coordenadas geográficas son 4°09'52.4"N de latitud y 73°42'15.6"W de longitud.

Figura 2. Ubicación del Zodme



Nota. Adaptado de (Google Maps, 2023). Escala 1:10.000

Capítulo 2. Metodología

La implementación del proyecto se llevará a cabo mediante una metodología mixta que abarcará observación, análisis e interpretación de las variables clave. Esto permitirá determinar las propiedades fisicoquímicas y mecánicas de los materiales de excavación de manera integral y detallada.

2.1 Fase 1: Identificación geológica de los materiales MERI

Durante esta fase, se llevaron a cabo las siguientes actividades con el fin de alcanzar los objetivos establecidos:

Recopilación de información disponible de estudios previos, recolección de datos y materiales realizando varias visitas al lugar de excavación.

Identificación litológica del material extraído del túnel de Buenavista y depositado en el Zodme, para su clasificación y correlación con las unidades litoestratigráficas que están catalogadas por el servicio geológico colombiano. Esta actividad se realizó mediante la observación detallada de las características físicas y químicas de las muestras de roca. Utilizando algunos métodos tales como:

- Observación visual del color.
- Textura, si la roca es homogénea o presenta granos, cristales o vetas.
- Composición mineral
- Dureza
- Tenacidad, observando si la roca es quebradiza, frágil o dúctil.
- Reacción a Ácido Clorhídrico.

Identificación geológica de una de las rocas solicitando al laboratorio especializado de la empresa E.I.E. Echeverry Ingeniería y Ensayos S.A.S. de la ciudad de Bogotá, para la realización de la caracterización mineralógica y petrográfica, mediante la elaboración de secciones delgadas las cuales fueron analizadas por microscopía óptica de luz polarizada. Microscopio modelo BA310Pol Trinocular, el cual cuenta con un aumento de hasta 100X. Con este se determinó la composición mineralógica de la roca mediante el conteo de puntos y el porcentaje de cada mineral y o agregado.

Realizar pruebas de laboratorio físico mecánicas a los materiales tales como, prueba de desgaste en la máquina de los ángeles, y compresión uniaxial simple en el laboratorio de Concretos de la Universidad Santo Tomás Seccional Villavicencio. Para evaluar la durabilidad, resistencia y la capacidad de los materiales para soportar cargas cíclicas.

2.2 Fase 2: Mapeo geológico de la zona de excavación

Para alcanzar los objetivos trazados en esta fase se llevó a cabo la siguiente metodología:

Revisión de literatura geológica existente sobre la región de estudio para comprender la geología regional, las fallas presentes en la zona y tipos de rocas presentes.

Con trabajo de campo se realizó el mapeo geológico y se delimitó el área específica de estudio que corresponde a la zona de los túneles de Buenavista, al occidente del casco urbano de Villavicencio.

Se elaboró un mapa geológico detallado que incluyó la distribución espacial de las unidades geológicas, estructuras tectónicas y fallas identificadas.

2.3 Fase 3: Análisis de los procesos geológicos que originaron los materiales MERI

Por último, en esta fase final se realizaron las siguientes acciones para lograr los objetivos establecidos:

Realizar una revisión exhaustiva de la literatura geológica relacionada con la zona de los túneles y los materiales MERI para comprender los procesos geológicos que han actuado en la formación y evolución de estos materiales.

Realizar un análisis para evaluar el grado de meteorización de los materiales recolectados para comprender el comportamiento geotécnico de los materiales frente a procesos de meteorización y condiciones ambientales.

Finalmente elaborar una conclusión que documente los procesos geológicos identificados, proporcionando recomendaciones necesarias para aplicaciones de estos materiales en la ingeniería y construcción.

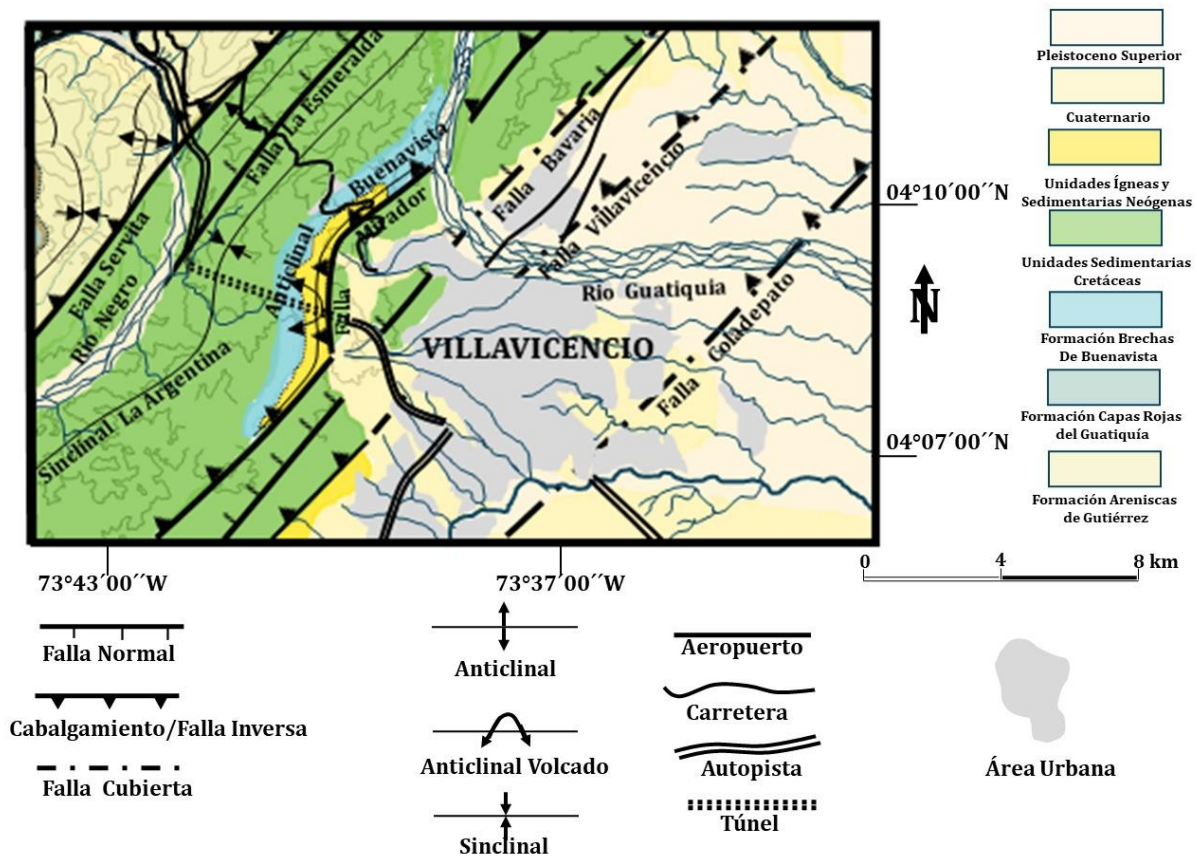
Capítulo 3. Geología de la zona de estudio

El material depositado en el zodme proviene del túnel Buenavista, el cuál atraviesa una zona geológicamente diversa y compleja estructuralmente caracterizada por la presencia de varios estratos de unidades sedimentarias plegados y fallados.

Entre unidades las sedimentarias se encuentran Formación Areniscas de Cáqueza, Formación Lutitas de Macanal y Formación Brechas de Buenavista. Igualmente, entre el material recuperado del zodme se encontró una roca ígnea que mediante análisis petrográfico y mineralógico se clasificó como un Pórfido Dacítico. Las unidades sedimentarias se encuentran plegadas y cortadas por fallas, y abarcan en edades desde el Jurásico Superior piso Titoniano, hasta el Cretáceo Inferior piso Aptiano.

Es importante considerar que el entorno geológico del túnel Buenavista presenta zonas de discontinuidades estructurales, unidades geológicas, estructuras tectónicas y fallas activas, que pueden influir en la estabilidad de la excavación y en la calidad de los materiales extraídos. A continuación, ver figura 3, se mostrará un mapa geológico que ilustra estas particularidades.

Las unidades sedimentarias conforman entre su plegamiento al Anticlinal de Buenavista al este, y el Sinclinal de la Argentina al oeste. La Falla Mirador corta el anticlinal de Buenavista, el cual es volcado y su charnela buza hacia el oeste. Esta falla trunca el flanco oriental del sinclinal, el cual no aflora, y al oriente afloran en la falda oriental del cerro de Buenavista rocas de la Formación Areniscas de Cáqueza. hacia el occidente la Falla la Esmeralda corta a la Formación Lutitas de Macanal sin afectar al sinclinal de la Argentina. En el núcleo del Anticlinal de Buenavista y de manera concordante afloran rocas relacionadas con el Pórfido Dacítico. Hacia el oriente del cerro de Buenavista, se presenta la Falla Bavaria, la cual es una falla normal que está en contacto discordante a la Formación Areniscas de Cáqueza con el Grupo Palmichal de edad Maastrichtiano - Paleoceno (Pulido y Gómez, 2001). Por último, aquí se indica que el cuerpo Pórfirítico Dacítico identificado en este trabajo y que fue extraído de los escombros del túnel de Buenavista 2, es correlacionable con la Riodacita de Quetame a la que le han asignado edad Pliocena (Ujueta et al., 1990).

Figura 3. Mapa geológico de la zona de estudio.

Desde la geología estructural la zona del Túnel de Buenavista esta cruzada por varias fallas entre las que se encuentra las fallas Bavaria, Mirador, y la Esmeralda, y grandes pliegues como el anticlinal volcado de Buenavista y el sinclinal La Argentina A continuación, se describen estas estructuras:

Falla Mirador

Se trata de una falla de cabalgamiento con dirección predominante de S-N y a la altura del caño Parrado toma una curvatura al N-E. Hacia el suroeste, la continuación de esta falla se interrumpe abruptamente debido a la presencia de la Falla el Buque.

Falla Bavaria

Es una falla normal que sirve de contacto discordante entre la Formación Areniscas de Cáqueza y el Grupo Palmichal.

Falla la Esmeralda

Es una falla normal que corta la Formación Lutitas de Macanal al occidente del túnel de Buenavista.

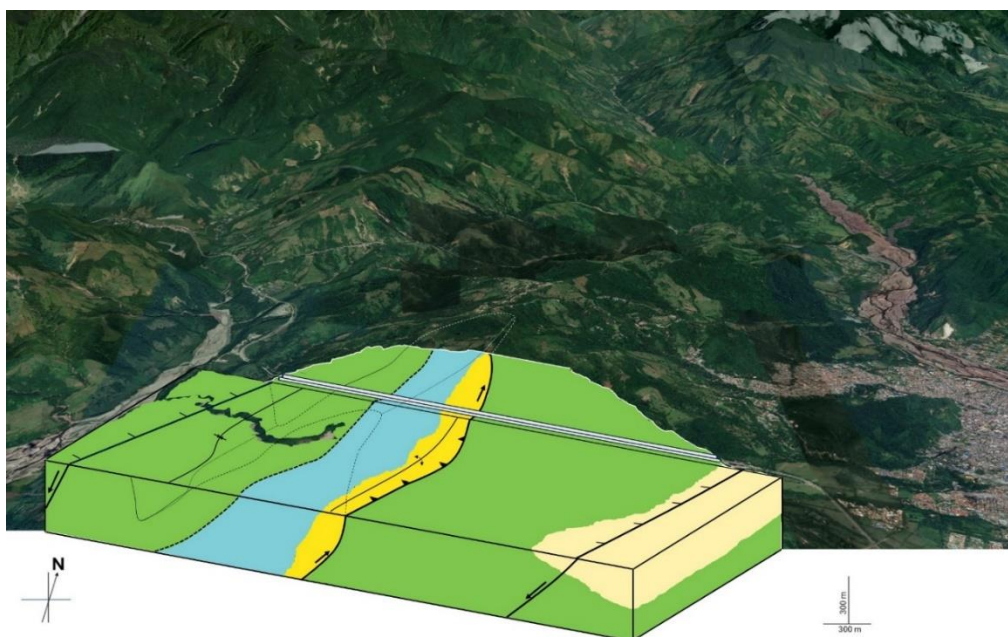
Anticlinal de Buenavista

Según la cartografía geológica, el anticlinal de Buenavista, es un anticlinal volcado y está cortado en su flanco oriental la Falla Mirador, la cual fue una paleo-falla normal activa durante el Cretácico inferior, posiblemente cuando se originó, y con la inversión tectónica que sufrió la cuenca Cretácica colombiana a principios del Cenozoico se tornó inversa.

Sinclinal Argentina

En el Sinclinal de la Argentina, el único afloramiento es la Formación Lutitas de Macanal. Este sinclinal es una estructura geológica donde las capas de roca se encuentran arqueadas hacia abajo, creando un valle en forma de U invertida. LA Formación Lutitas de Macanal consiste principalmente de lutitas y areniscas con edad Hauteriviano (Cretáceo Inferior).

Figura 4. *Bloque diagrama de la geología del túnel de Buenavista con paisaje de su entorno, mostrando hacia la derecha parte del área urbana de Villavicencio.*



Capítulo 4. Resultados

4.1 Análisis petrográfico de los materiales

4.1.1 Formación Brechas de Buenavista

Término usado para nombrar a una serie de brechas y conglomerados de origen local, correlacionable con la parte basal del Grupo Cáqueza o la parte baja eo-mesozoica del Grupo La Ardita.

Dorado Galindo, (1990) hizo un estudio detallado de estas brechas y concluyó que son el resultado de avalanchas de detritus y corrientes cargadas de fango, depositadas en un ambiente continental cerca al mar.

Dadas las propiedades litológicas, el tamaño reducido y las formas irregulares, se puede suponer que el entorno de depósito de las Brechas de Buenavista fue influenciado o restringido por una antigua zona de falla, que en este caso estaría asociada al sistema de fallas del Borde Llanero.

Litológicamente esta formación se compone de fragmentos y bloques con formas angulosas y semi redondeadas, que incluyen filitas, cuarcitas, areniscas, calizas y cuarzo lechoso, dispuestos de manera caótica dentro de una matriz de arena y arcilla.

Figura 5. Muestra de roca Brecha de Buenavista.



4.2 Formación Lutita de Macanal

Termino empleado para referirse a lodolitas negras, micáceas, compactas y con intercalaciones de arenitas cuarzosas de grano fino y de color gris oscuro y niveles de calizas.

Desde el punto de vista litológico, esta unidad se divide en dos partes principales; la porción inferior abarca una secuencia de 200 metros, donde los primeros 70 metros consiste en lodolitas negras dispuestas en bancos de hasta 15 metros de espesor, con intercalaciones de conglomerados en capas de hasta 6 metros de grosor. La parte superior está compuesta por arenitas líticas, algunas de la cuales tienen un ligero contenido calcáreo.

En el área de caño Parrado, la unidad está caracterizada por gravas arenosas de baja madurez, compuestas por cuarzo, plagioclasas, en granos mezclados polisintéticamente, ortoclasa, micropertítica, fragmentos de metaconglomerado cuarzoso y cuarzo deformado por cataclasis, así como filita micácea. Como accesorios, se encuentra circón, y pirita, asociados con láminas de materia orgánica.

Las características petrográficas sugieren que el tipo de depósito fue predominantemente erosivo, con aporte metamórfico proveniente del Grupo Quetame y posiblemente de una fuente ígnea intrusiva cercana, probablemente de composición granítica.

Figura 6. *Muestra de Lutita.*



4.3 Formación Arenisca de Cáqueza

Este término se refiere a un Conjunto Superior de una secuencia que encuentra entre el puente de Cáqueza y la población de Quetame. La localidad tipo está ubicada en los altos de la población de Cáqueza, constituida, en la parte inferior, por arenisca cuarcítica calcárea; hacia la parte media, por lutitas y arenisca cuarcítica, y en la parte superior, por arenisca y conglomerado fino.

Litológicamente esta unidad se caracteriza por una secuencia de arenisca de cuarzo de grano medio a ligeramente conglomerática, que varía en color desde blanco, gris hasta amarillento debido a la meteorización. Entre estos estratos areníticos, se intercalan limolitas de tono grisáceo, con capas que alcanzan hasta 3 metros de espesor. Algunos estratos muestran estratificación cruzada planar.

Las Areniscas de Cáqueza, en esta región, descansan concordantemente sobre las Lutitas de Macanal e infrayacen transicionalmente a la Formación Fómeque. Basándose en observaciones de campo y análisis de algunos cortes geológicos, se estima que el espesor de esta unidad es aproximadamente de 500 metros.

Figura 7. *Muestra de Arenisca Cuarzosa.*



4.4 Pórfido Dacítico

4.4.1 Litología

En general, la acumulación de rocas examinada está compuesta por granitoides ricos en cuarzo, que son rocas ígneas de origen intrusivo con una composición félsica. Estas rocas tienen una resistencia muy buena y su color característico es un tono de gris verdoso, específicamente el color Pale Green (10G 6/2) según el Geological rock-color chart. Cabe destacar que este agregado no presenta monominerales.

Tabla 2. Clasificación petrográfica de los agregados analizados.

CONSTITUYENTES (TIPO DE ROCA)	LITOTIPO	PORCENTAJES	
		AGREGADOS (%)	TOTALES (%)
IGNEA	Granitoide rico en cuarzo	100	100
TOTAL		100	100

Nota. Adaptado del Laboratorio E.I.E. Echeverry Ingeniería y Ensayos S.A.S.

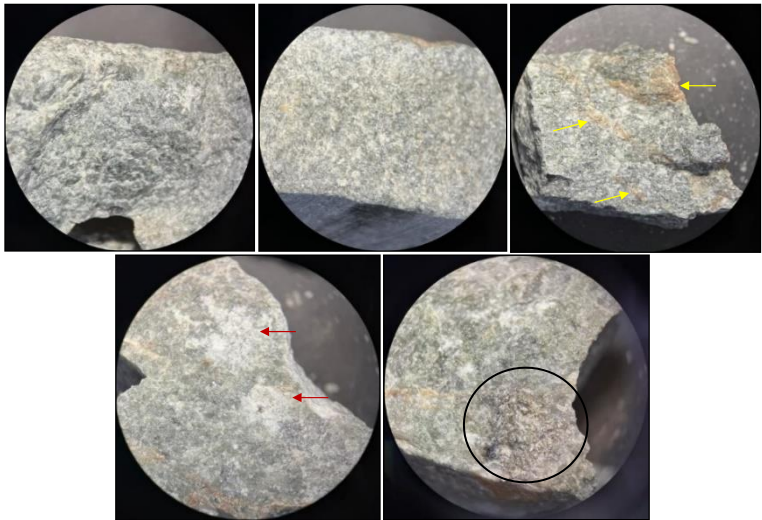
Figura 8. Muestra de Roca Pórfido Dacítico.



Agregados de granitoide rico en cuarzo. **A y B.** Muestra fresca del granitoide, donde se aprecia la abundancia del cuarzo con su característica de brillo vítreo, que lo diferencia de las plagioclasas y feldespatos potásicos. **C.** Presencia de platinas de oxidación de color café rojizo a

naranja, indicadas con flechas amarillas. **D.** Sericita en la superficie de la muestra, originada por la alteración de feldespatos potásicos y plagioclasas, señalada con flechas rojas.

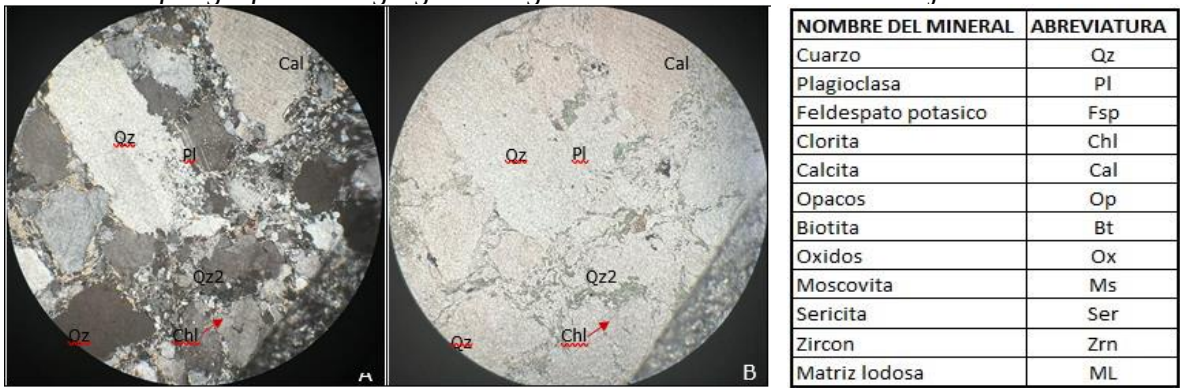
Figura 9. Fotografía del agregado bajo el estereomicroscopio. Tomado de Laboratorio



Nota. Adaptado del Laboratorio E.I.E. Echeverry Ingeniería y Ensayos S.A.S.

A en nicoles cruzados y **B** en paralelos. En esta vista general de la muestra, se evidencia que los cristales son inequigranulares y el tamaño de grano variable entre medio a muy fino. Además, ocurre clorita por la alteración de biotita y moscovita principalmente y también se observa cuarzo con extinción ondulante (Qz2).

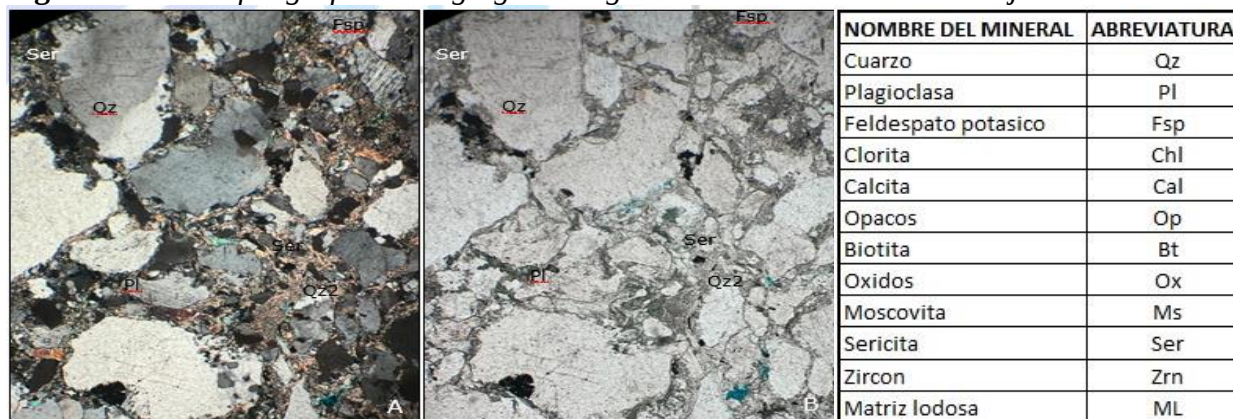
Figura 10. Microfotografías del agregado de granitoide rico en cuarzo en objetivo 5X.



Nota. Adaptado del Laboratorio E.I.E. Echeverry Ingeniería y Ensayos S.A.S.

A en nicoles cruzados y **B** en paralelos. Se observa que los cristales tienen bordes corroídos y están rodeados por sericita originada por la alteración de minerales como plagioclasas, feldespatos potásicos y moscovitas.

Figura 11. Microfotografías del agregado de granitoide rico en cuarzo en objetivo 8X.



Nota. Adaptado del Laboratorio E.I.E. Echeverry Ingeniería y Ensayos S.A.S.

Para nombrar composicionalmente una roca ígnea se usa el diagrama de Streckeisen o QAFP. Según este diagrama la composición de la roca indica que el agregado corresponde a 1b, el cual equivale a rocas definidas como granitoides ricos en cuarzo.

Tabla 3. Composición de la roca y columna recalculada para aplicar el diagrama QAPF.

MUESTRA N°2592	MINERALES	TOTAL (%)
	Feldespatos potásicos (A)	13
	Plagioclase (P)	16
	Cuarzo (Q)	51
	Moscovita	8
	Calcita	5
	Biotita	4
	Zircón	1
	Opacos	2
	TOTAL	100

Nota. Adaptado del Laboratorio E.I.E. Echeverry Ingeniería y Ensayos S.A.S.

4.4.2 Minerales

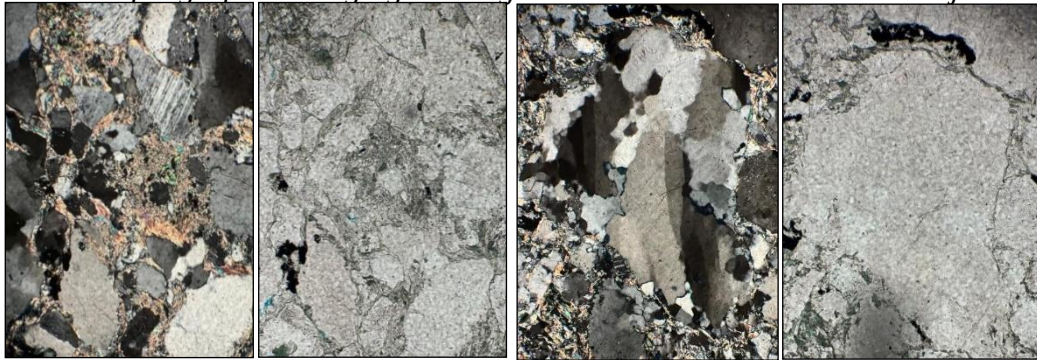
Cuarzo

El cuarzo se presenta de dos formas distintas. La primera es la más común (Qz), se presenta limpio, sin exfoliación y extinción recta. La segunda ocurrencia (Qz2) corresponde a cuarzos con

extinción ondulante. En las rocas graníticas, la característica de extinción ondulante en los cuarzos se atribuye a las presiones irregulares que pueden producirse sobre la roca después de su formación, generando que las moléculas de cuarzo se desalineen. En la Figura 8, se evidencia que la ocurrencia del Qz es mayor al Qz2, esto se debe a que el Qz es la forma más estable de cuarzo y es más probable que se forme durante la solidificación del magma. En la Figura 9, se presenta un cristal de Qz2 rodeado de sericita.

En general, el cuarzo presenta tamaño de grano medio a fino, cristales subhedrales a anhedrales con bordes corroídos y están rodeados de sericita. La minoría de estos minerales están alterados hacia los bordes por clorita.

Figura 12. Microfotografías del agregado de granitoide rico en cuarzo con el objetivo 10X

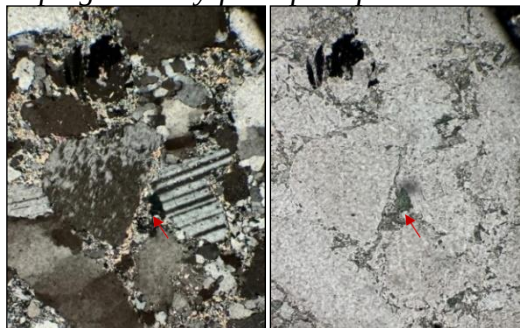


Nota. **A** en nicoles cruzados y **B** en nicoles paralelos.

Plagioclasa

Las plagioclasas sódicas que ocurren en estos granitoides fueron clasificadas como albita-oligoclasa según el método de Michel-Levy. Exhiben macla polisintética en todos sus individuos. La sericitización de las plagioclasas es leve a moderada dependiendo del individuo.

Figura 13. Microfotografías de plagioclasa y feldespato potásico con el objetivo 10X

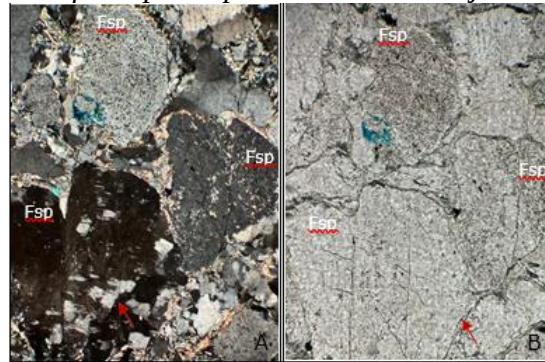


Nota. **A** en nicoles cruzados y **B** en nicoles paralelos.

Feldespato potásico

El feldespato potásico en estos granitoides fue clasificado como ortoclasa y algunos de sus cristales presentan macla de enrejado o tartán. El grado de alteración a sericita de los feldespatos potásicos es moderado a alto. Además, presentan texturas de intercrecimiento conocida como pertitas o textura pertítica, la cual se produce por la exsolución de un feldespato sódico (plagioclasa) dentro de un cristal de feldespato potásico.

Figura 14. Microfotografías de feldespatos potásicos con el objetivo 10X

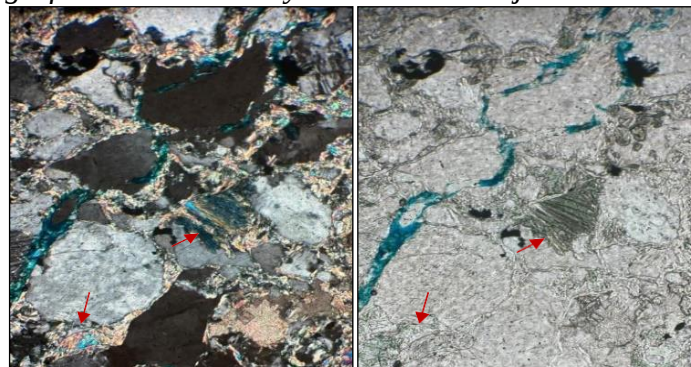


Nota. Adaptado del Laboratorio E.I.E. Echeverry Ingeniería y Ensayos S.A.S.

Micas

Las micas reconocidas en esta muestra son moscovita y biotita, son minerales filosilicatos susceptibles a la alteración. Ambas están alteradas a clorita, pero las biotitas están afectadas en mayor grado. La alteración de estos minerales comienza con la pérdida del hierro y magnesio en su estructura mineral, poco a poco se alteran a sericita y el proceso de pérdida composicional continua hasta convertirse en clorita.

Figura 15. Microfotografías de moscovita y biotita con el objetivo 10X

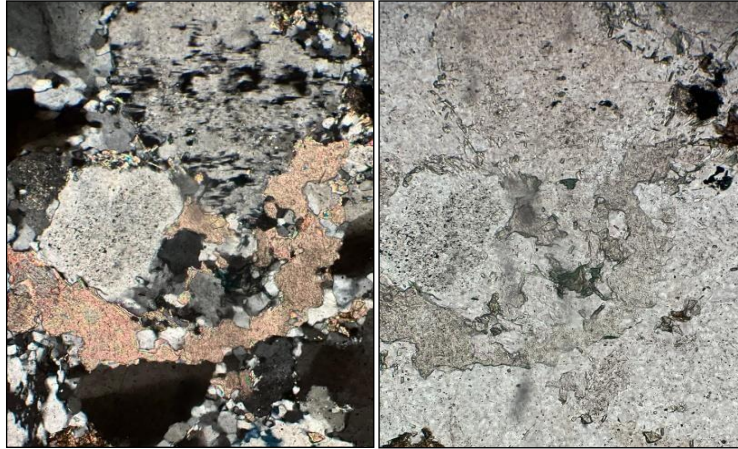


Nota. Adaptado del Laboratorio E.I.E. Echeverry Ingeniería y Ensayos S.A.S.

Calcita

La calcita ocurre como mineral accesorio en estos granitoides y presenta una forma anhedral con bordes irregulares y en algunos casos corroídos.

Figura 16. *Microfotografías de calcita con el objetivo 10X*

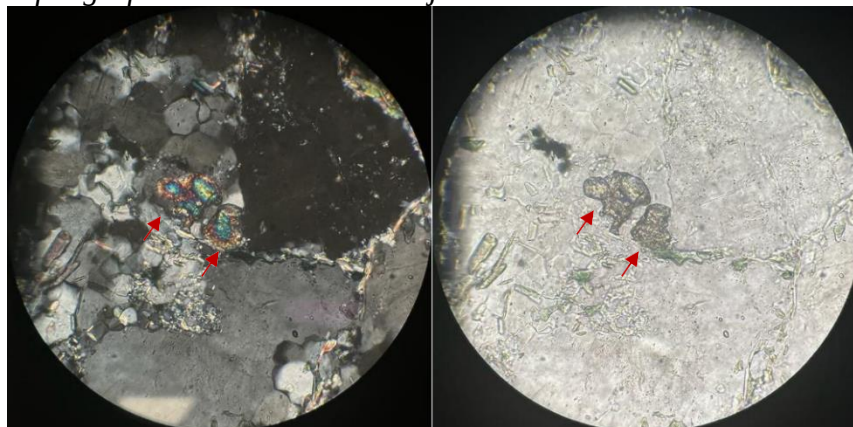


Nota. Adaptado del Laboratorio E.I.E. Echeverry Ingeniería y Ensayos S.A.S.

Zircón

El zircón es un mineral accesorio de estos granitoides, es estable, resistente a la erosión y su formación tuvo lugar durante la cristalización del magma.

Figura 17. *Microfotografías de zircón con el objetivo 50X*



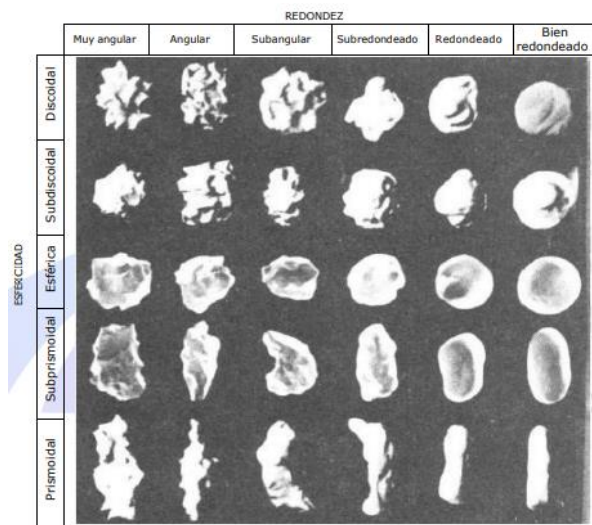
Nota. Adaptado del Laboratorio E.I.E. Echeverry Ingeniería y Ensayos S.A.S.

4.4.3 Forma de los agregados

La textura de una roca viene dada por la forma, cantidad e interrelaciones entre los granos que constituyen el esqueleto de la roca.

Al ubicarse en el extremo izquierdo, se estima que este granitoide rico en cuarzo tiene superficies muy rugosas a rugosas.

Figura 18. Escala de redondez y esfericidad de Powers, 1982.



Nota. Adaptado del Laboratorio E.I.E. Echeverry Ingeniería y Ensayos S.A.S.

4.4.4 Porosidad y fracturación

De acuerdo a su origen, la porosidad puede ser clasificada en primaria y secundaria. La porosidad primaria es aquella que se origina durante el proceso de deposición de material que origina la roca y la porosidad secundaria se desarrolla por algunos procesos de alteración después de la deposición.

El agregado analizado presenta evidencias esporádicas de porosidad interpartícula y por fracturamiento, que corresponden a porosidades secundarias. Se concluye que el origen de la porosidad interpartícula es posiblemente secundario, ya que se encuentra en los espacios donde ocurre la alteración de sericita, la cual está bordeando los minerales principales. Sin embargo, en términos generales del agregado, la porosidad total es muy baja a casi nula, representada en un porcentaje menor al 1% aproximadamente.

Tabla 4. *Unidad Litoestratigráfica a la que pertenecen las Rocas*

Número de roca	Clasificación	Unidad	Descripción
1	Brechas	Formación Brecha de Buenavista (Jsb)	Conglomerado de cantos redondeados y angulares hasta de 1m de diámetro que incluyen cuarcita, pizarra, filita y cuarzo lechoso.
2	Lutitas	Lutita de Macanal (Kilm)	Lodolita gris oscura laminar con delgadas intercalaciones de arenita lítica de grado medio. Algunos niveles de calcáreos. La base de la unidad se constituye por alternancia de lodolita y capas delgadas de conglomerados. Los niveles arcillolíticos presentan amonitas y bivalvos.
3	Areniscas	Arenisca de Cáqueza (Kic)	Arenita cuarzosa blanca, grano medio a conglomerático, con gránulos de cuarzo hasta de 1cm de diámetro. Presenta intercalaciones de lodolitas gris verdosa.
4	Pórfido	Pórfido Dacítico correnacionable con la Riodacita de Quetame (Ujueta et al., 1990).	Textura porfirítica, con fenocristales de feldespato y cuarzo que son los más grandes hasta de centímetros, en menor tamaño son los máficos: biotita, flogopita, clinopiroxeno, hornblenda, y algunos agregados pseudomorfos secundarios, (análisis microscópico y petrográfico realizado por el laboratorio de la empresa E.I.E. Echeverry Ingeniería y Ensayos S.A.S.).

4.5 Grado de meteorización de las rocas

La evaluación del grado de meteorización de la roca se realiza por observación directa de la roca y se compara con los índices estándares de la (ISRM) Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas mostrados en la tabla 4.

Tabla 5. *Escala para determinar la meteorización de la roca*

ESCALA DE METEORIZACIÓN DE LA ROCA (ISRM)		
GRADO	DENOMINACIÓN	CRITERIO DE RECONOCIMIENTO
I	Roca sana	La roca no presenta signos visibles de meteorización, pueden existir ligeras pérdidas de color o pequeñas manchas de óxidos en los planos de discontinuidad
II	Roca ligeramente meteorizada	La roca y los planos de discontinuidad presentan signos de decoloración. Toda la roca ha podido perder su color debido a la meteorización y superficialmente ser más débil que la roca sana
III	Roca moderadamente meteorizada	Menos de la mitad del material está descompuesto a suelo. Aparece roca sana o ligeramente meteorizada de forma continua o en zonas aisladas
IV	Roca meteorizada	Más de la mitad del material está descompuesto a suelo. Aparece roca sana o ligeramente meteorizada de forma discontinua
V	Roca completamente meteorizada	Todo el material está descompuesto a un suelo. La estructura original de la roca se mantiene intacta
VI	Suelo residual	La roca está totalmente descompuesta en un suelo y no puede reconocerse ni la textura ni la estructura original. El material permanece “in situ” y existe un cambio de volumen importante

Nota. Adaptado de (ISRM, 1981).

Tabla 6. *Determinación del Grado de Meteorización de Las Rocas*

Roca	Grado	Denominación	Criterio de Reconocimiento
Brecha de Buenavista 	II	Roca ligeramente meteorizada	La roca y los planos de discontinuidad presentan signos de decoloración. Toda la roca ha podido perder su color debido a la meteorización y superficialmente ser más débil que la roca sana.
Lutita 	I	Roca sana	La roca no presenta signos visibles de meteorización. Pueden existir ligeras pérdidas de color o pequeñas manchas de óxidos en los planos de discontinuidad
Arenisca Cuarzosa 	I	Roca sana	La roca no presenta signos visibles de meteorización. Pueden existir ligeras pérdidas de color o pequeñas manchas de óxidos en los planos de discontinuidad

Tabla 6. *Continuación*

Pórfido Dacítico 	II	Roca ligeramente meteorizada	La roca y los planos de discontinuidad presentan signos de decoloración. Toda la roca ha podido perder su color debido a la meteorización y superficialmente ser más débil que la roca sana.
---	----	------------------------------	--

4.6 Ensayos de laboratorio

4.6.1 Ensayo de Desgaste (Máquina de Los Ángeles)

El ensayo de desgaste es un método donde se determina el desgaste superficial y la resistencia de los agregados gruesos cuando son sometidos a fricción, con el objetivo de medir la capacidad de la roca para no romperse o desintegrarse debido a las cargas repetitivas del tráfico.

En esta prueba, el agregado previamente tamizado a unos diámetros específicos se vierte dentro de un cilindro giratorio donde se le agregan unas bolas de acero las cuales ayudan junto con el giro del cilindro a ir desgastando las rocas hasta que llegue a un número determinado de vueltas por lo general 500 vueltas, y posteriormente se extrae la muestra del cilindro, se vuelve a tamizar y se saca el porcentaje de desgaste.

Tabla 7. *Granulometrías representativas de los agregados, para la selección del método de ensayo a usar*

TAMAÑO DEL CEDAZO		ASTM C 131				ASTM C 535		
PASA	RETENIDO	A	B	C	D	1	2	3
3"	2 ½"					2500±50		
2 ½"	2"					2500±50		
2"	1 ½"					5000±50	5000±50	
1 ½"	1"	1250±25					5000±50	5000±50
1"	¾"	1250±25						5000±50
¾"	½"	1250±10	2500±10					
½"	3/8"	1250±10	2500±10					
3/8"	¼"			2500±10				
¼"	N°4			2500±10				
N°4	N°8				5000±10			
TOTAL PESO (g)		5000±10	5000±10	5000±10	5000±10	10000±10	10000±75	10000±50
N° DE ESFERAS		12	11	8	6	12	12	12
REVOLUCIONES		500				1000		

Nota. Adaptado de Laboratorio de Suelos (Universidad de Los Andes Mérida-Venezuela, 2017).

En este caso en todas las pruebas se eligió la metodología ASTM C 131 (A) ya que por lo general las rocas después de trituradas quedaron retenidas entre los tamices de 1" a 3/8".

4.6.2 Cálculo y resultados prueba de desgaste

El cálculo del resultado se calcula como el porcentaje de desgaste es igual a la diferencia entre el peso inicial y el peso final de la muestra, expresada en porcentaje y se denota de la siguiente forma:

Ecuación 1. % Desgaste

$$\% \text{ Desgaste} = \frac{P_i - P_f}{P_i} * 100$$

Donde:

P_f= Peso final

P_i= Peso inicial

Tabla 8. Resultados Prueba de Desgaste en la Máquina de Los Ángeles

Tipo de Roca	Imagen	Resultados
Brecha de Buenavista		$\% \text{ Desgaste} = \frac{P_i - P_f}{P_i} * 100$ $\% \text{ Desgaste} = \frac{5000g - 3950g}{5000g} * 100$ $\% \text{ Desgaste} = 21\%$

Tabla 8. Continuación

Tipo de Roca	Imagen	Resultados
Lutita		$\% \text{ Desgaste} = \frac{P_i - P_f}{P_i} * 100$ $\% \text{ Desgaste} = \frac{5000g - 1850g}{5000g} * 100$ $\% \text{ Desgaste} = 63\%$
Arenisca Cuarzosa		$\% \text{ Desgaste} = \frac{P_i - P_f}{P_i} * 100$ $\% \text{ Desgaste} = \frac{5000g - 4100g}{5000g} * 100$ $\% \text{ Desgaste} = 18\%$

Tabla 8. Continuación

Tipo de Roca	Imagen	Resultados
Pórfido Dacítico		$\% \text{ Desgaste} = \frac{P_i - P_f}{P_i} * 100$ $\% \text{ Desgaste} = \frac{5000g - 4250g}{5000g} * 100$ $\% \text{ Desgaste} = 15\%$

4.7 Ensayo Uniaxial o de Compresión Simple

Es un ensayo de laboratorio que permite clasificar la roca por su resistencia a través de una compresión simple uniaxial que se le hace a una probeta cilíndrica extraída directamente de la roca.

Su finalidad es establecer las relaciones entre los esfuerzos y las deformaciones durante el proceso de carga y rotura, los esfuerzos a los que está sometida la roca en el momento de la rotura y sus parámetros resistentes.

4.7.1 Extracción de Núcleos

Para la obtención de las probetas cilíndricas se utilizó un extractor de núcleos con una broca diamantada para concreto de 7cm diámetro con la cual se extrajeron dos muestras por cada roca.

En esta prueba se descartó la roca “Lutita de Macanal” ya que en el ensayo con la Máquina de Los Ángeles esta obtuvo un porcentaje de desgaste del 63% lo que demuestra que su baja dureza sería inconveniente extraerle los núcleos puesto que la roca no tendría la solidez necesaria para soportar ser perforada por la broca.

Figura 19. *Extracción de núcleos a las Rocas*



4.7.2 Resultados prueba Compresión Simple

Luego de someter las probetas cilíndricas a compresión uniaxial hasta que se produjo su rotura, la máquina de ensayo UNIVERSA (UTM-001/LCD) registró la carga Kilonewton(KN) en el eje Y Vs el tiempo transcurrido en segundos(s) en el eje X, a continuación, se muestran los resultados:

Figura 20. *Carga (KN) Vs Tiempo (s), Muestra Brecha de Buenavista*

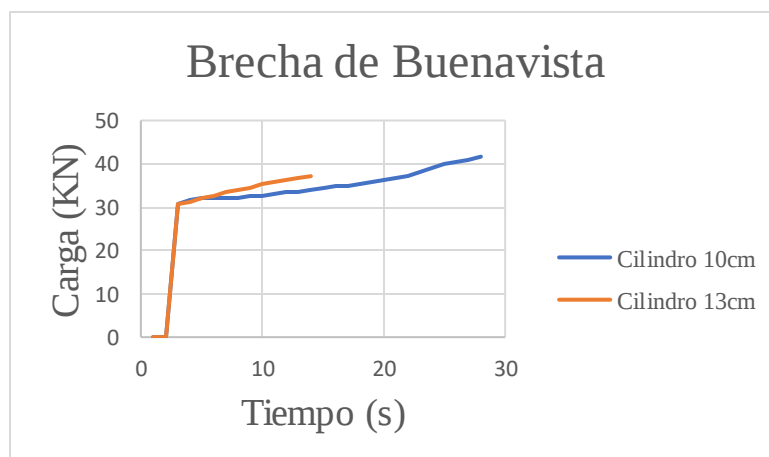
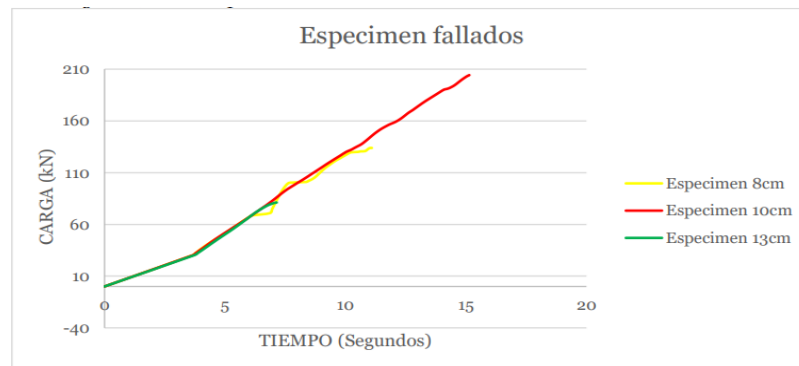
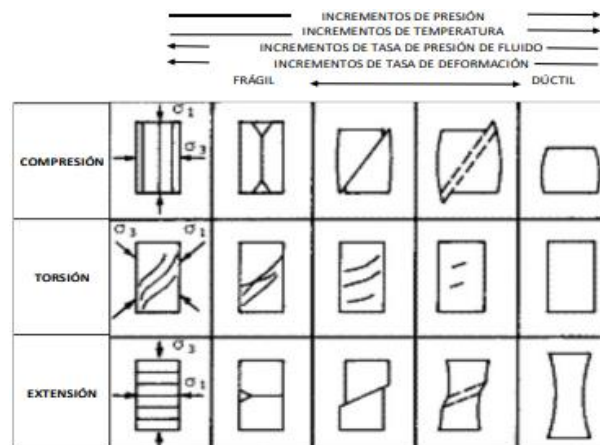


Figura 23. Carga (KN) Vs Tiempo (s). Muestra Arenisca Cuarzosa**Figura 24.** Carga (KN) Vs Tiempo (s). Muestra Pórfido Dacítico

Nota. Adaptado de (Fuentes Baquero, 2023).

4.8 Clasificación de tipos de fallas a la compresión de cilindros

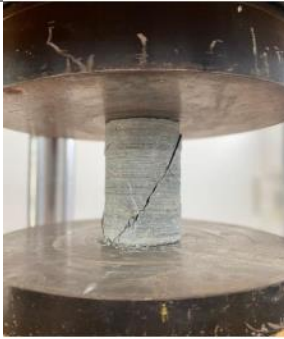
Figura 21. Deformación frágil y dúctil bajo compresión, torsión y extensión

Nota. Tomado de (Universidad de Granada, 2020).

Tabla 9. *Clasificación de tipos de fallas de cilindros a compresión simple*

Roca	Cilindro	Tipo de Falla
Brecha de Buenavista		Falla frágil
	10cm	
		Falla dúctil
	13cm	
Roca	Cilindro	Tipo de Falla
Arenisca Cuarzosa		Falla dúctil
	10cm	
		Falla frágil
	13cm	
Pórfido Dacítico		Falla frágil
	10cm	

Tabla 9. *Continuación*

		Falla dúctil
	13cm	

4.9 Prueba de efervescencia

Esta prueba específica se realizó solamente en la roca sedimentaria. En este procedimiento, se utilizó ácido clorhídrico diluido al 5%, aplicando varias gotas sobre la superficie de la roca. La ausencia de efervescencia indicó que no había presencia de carbonatos en la roca. Este resultado es importante para la clasificación mineralógica de la roca sedimentaria, ya que la reacción con ácido clorhídrico permite descartar la presencia de carbonatos, los cuales son característicos de ciertos tipos de rocas sedimentarias como calizas o dolomitas.

Figura 22. *Resultado de la prueba de efervescencia*

5. Análisis de resultados

Los resultados del ensayo de desgaste mostraron que la Lutita tuvo el mayor desgaste, alcanzando un valor del 63%, lo cual lo descarta como material MERI adecuado para un posterior uso en construcción. Por otro lado, las otras rocas presentaron un buen comportamiento con porcentajes menores de desgaste en este ensayo inicial.

Al realizar la extracción de los cilindros para la prueba de compresión uniaxial en la roca Lutita, se evidenció que esta roca no puede mantener su integridad estructural debido a su composición interna formada por láminas y que a veces la roca en su interior está fisurada, esto conlleva a que durante el transporte se desintegre y también que en la trituración de la roca, su estructura no se convierta en partículas granulares resistentes, sino en partículas planas y laminosas que no son adecuadas para ser utilizadas como agregado grueso en concretos ni como agregados para pavimentos.

Esto deja como buenas opciones para uso en construcción únicamente a las rocas Brecha de Buenavista, Arenisca Cuarzosa y Pórfido Dacítico, las cuales mostraron un comportamiento satisfactorio en ambos ensayos y pueden ser consideradas para aplicaciones constructivas. Es crucial seleccionar adecuadamente los materiales basándose en sus propiedades mecánicas y su capacidad de resistencia al desgaste para garantizar la calidad y durabilidad de las estructuras construidas.

Conclusiones

Después de realizar una exhaustiva investigación y análisis a los materiales MERI, se determinó que algunos de estos materiales encontrados en el Zodme tienen un gran potencial para ser reutilizados en el sector la construcción mejorando así significativamente la reducción de desechos resultantes de la construcción de Túneles.

Los ensayos de laboratorio desempeñaron un papel fundamental en la clasificación de los materiales, proporcionando resultados significativos sobre la composición de cada tipo de roca. Estos ensayos también contribuyeron reconocimiento del comportamiento mecánico y físico de las rocas, lo que ayudó a determinar que la Lutita debe descartarse para su reutilización debido a su baja resistencia al desgaste y a su composición interna respectivamente y que las demás rocas si podrían ser reutilizadas de manera efectiva.

Los materiales MERI que resistieron las pruebas adecuadamente pueden tener usos como capas de estabilización en infraestructura vial, rellenos para la construcción de estructuras, dique o terraplén y concretos.

Se recomienda realizar ensayos más específicos para analizar el comportamiento de estos materiales en aplicaciones más específicas de la construcción, esto permitirá tener una mayor certeza sobre el rendimiento y la funcionalidad de estos materiales, dado que las pruebas realizadas en este trabajo fueron de naturaleza más general.

Referencias bibliográficas

- Association Internationale Des Tunnels Et D L'Espace Souterran (ITA). (2023). *Handling, treatment, and disposal of tunnel spoil materials*. International Tunnelling And Underground Space Association (AITES), Working Group 14 & 15, https://about.ita-aites.org/publications/wg-publications/download/1786_89ac66ec071317e24c8b64acafde0ac7
- Correa Arroyave, A. (2021). Guía metodológica para la utilización de los materiales MERI. (Materiales de Excavación de Reutilización Industrial) Producidos durante la excavación de túneles viales, *Revista Anales de Ingeniería*, 131(944). 36- 41. https://sci.org.co/wp-content/uploads/file/me_jornadas_2021/articulo_1.pdf
- Curran, L. M., Bhagwat, S. B. y Hindman, C. A. (1988). *Disposal alternatives for material to be excavated from the proposed site of the superconducting super collider in Illinois. Champaign*, Environmental Geology - Illinois State Geological Survey. <https://www.ideals.illinois.edu/items/80213>
- Dorado Galindo, J. (1990). Contribución al conocimiento de la estratigrafía de la Formación Brechas de Buenavista (Límite Jurásico-Cretácico). Región Noroeste de Villavicencio (Meta). *Geología Colombiana*. (17): 7-38. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/geocol/article/view/30631>
- E.I.E. Echeverry Ingeniería y Ensayos S.A.S. (2023). *Análisis Petrográfico de Agregados*. Laboratorio de Control de Calidad.
- Ecomat. (2016). *Guide pour la réutilisation des matériaux d'excavation non pollués*. Ecomat. <https://www.ge.ch/document/dechets-guide-reutilisation-materiaux-excavation-non-pollues>
- Fuentes Baquero, W. (2023). Caracterización de los materiales MERI producidos en la excavación de los túneles del corredor vial Chirajara – Fundadores [Tesis pregrado, Universidad Santo Tomás]. *Repositorio Institucional*. <https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/53849/2023wilsonfuentes.pdf?sequence=6&isAllowed=y>
- Instituto Colombiano de Geología y Minería (Ingeominas). (2001). Plancha 266 de Villavicencio. Ingeominas.

- <https://recordcenter.sgc.gov.co/B4/13010010020016/documento/pdf/0101200161101000.pdf>
- Jiménez Fuentes, F, Y. A. (2017). Optimización de materiales de excavación de reutilización industrial (MERI) de la mina de carbón “Cerro Largo” para la estabilización de suelos en el desarrollo de infraestructura vial mediante algoritmos evolutivos multiobjetivo. [Tesis de maestría, Universidad Santo Tomás]. Repositorio Institucional. <https://repository.usta.edu.co/handle/11634/9167>
- Oggeri, C. and Ronco, C. (2010). *Investigation and Test for Reuse of Muck in Tunnelling*. Tunnel Vision Towards 2020. Tunnelling Association of Canada, TAC ITA AITES WTC 2010, https://www.researchgate.net/publication/317937016_Investigation_and_Test_for_Reuse_of_Muck_in_Tunnelling
- Pulido, G, O., Gómez, V, L. S. (2001). *Geología de la Plancha 266 - Villavicencio*. Servicio Geológico Colombiano.
- Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas (ISRM). (1981) *Rock Characterization Testing and Monitoring*. Brown, E., Ed., Pergamon Press,
- Suárez Silgado, S. S., Betancourt Quiroga, C., Molina Benavides, J. y Mahecha Vanegas, L. (2019). La gestión de los residuos de construcción y demolición en Villavicencio: estado actual, barreras e instrumentos de gestión. *Entramado*, 15(1) 224-244 <https://doi.org/10.18041/1900-3803/entramado.1.5408>
- Ujueta, G., Macía, C. y Romero, F. (1990). Cuerpo Riodacítico del Terciario Superior en la región de Quetame, Cundinamarca. *Geología Colombiana*, 17. 143-150. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/geocol/article/view/30665>
- Unión para la Infraestructura (UPI). (2017). *Debida diligencia social y ambiental: tercer tramo Bogotá – Villavicencio Chirajara - Fundadores*. UPI. <https://upli.co/content/uploads/2021/03/debida-diligencia-esg-proyecto-vial-bogota-villavicencio-junio-2017.pdf>
- Universidad de Granada. (2020). *Propiedades de las Rocas de Construcción y Ornamentación*. Sociedad Americana Para el Ensayo de Materiales. <https://www.ugr.es/~agcasco/personal/restauracion/teoria/TEMA05.htm>

Universidad de Los Andes. (2017). *Laboratorio. Desgaste máquina de los ángeles*. LABSP.
<https://pavimentosulacivil.files.wordpress.com/2018/01/prc3a1ctica-nc2b0-8-desgaste-mc3a1quina-de-los-angeles.pdf>