

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA

MAESTRÍA EN GEOTECNIA APLICADA



TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A OBTENER EL TÍTULO DE MÁSTER EN
GEOTECNIA APLICADA

TEMA:

CORRELACIÓN DEL ENSAYO ESCLEROMÉTRICO CON LOS
PARÁMETROS ELÁSTICOS (COMPRESIÓN SIMPLE CON MODULOS DE
ELASTICIDAD), COHESIÓN Y ÁNGULOS DE FRICCIÓN (TRIAxIAL EN
ROCA) DE LOS MÁRMOLES DE LA UNIDAD GEOLÓGICA EL LAUREL,
UBICADOS EN LA CANTERA MOCORAL, OTAVALO, IMBABURA.

AUTOR:

ING. MOPOSITA FLORES RANDY OMAR

DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

ING. WILSON FERNANDO ESPINOZA CHÁVEZ, MS.C. PhD.

JUNIO DE 2024

QUITO DM – ECUADOR

DERECHOS DE AUTOR

Autorizo a la Pontificia Universidad Católica del Ecuador, a distribuir este manuscrito de investigación en medios físicos y electrónicos, con el fin de promover la divulgación de los resultados a la comunidad científica y a la sociedad en general. Adicionalmente autorizo el uso de los contenidos de esta investigación como bibliografía para fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, citando como fuente de información al autor de esta obra.

Autor:

F. _____

Ing. Randy Omar Moposita Flores

CI: 1721352233

APROBACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Ing. Wilson Fernando Espinoza Chávez

Director del Trabajo de Titulación

En mi calidad de Director del Trabajo de Titulación, certifico haber revisado el presente manuscrito de investigación, el mismo que se ajusta a las normas vigentes de la Pontificia Universidad Católica del Ecuador, cumpliendo la Normativa del Trabajo de Titulación; en consecuencia, es apto para su presentación y sustentación.

F. _____

Ing. Wilson Fernando Espinoza Chávez, MSc. PhD.

CI: 0603199449

HOJA DE EVIDENCIA ANTIPLAGIO

Submission date: 10-Jun-2024 04:29PM (UTC-0500)
Submission ID: 2399878317
File name: Tesis_Final_Randy_09-06-2024.pdf (14.09M)
Word count: 34851
Character count: 189829

Trabajo Titulación Maestría Geotecnia Aplicada

ORIGINALITY REPORT

7 %

SIMILARITY INDEX

6 %

INTERNET SOURCES

4 %

PUBLICATIONS

1 %

STUDENT PAPERS

PRIMARY SOURCES

1

www.dspace.uce.edu.ec

Internet Source

5 %

2

repositorio.espe.edu.ec

Internet Source

1 %

3

María Elena Luna-Morales, Jane Russell. "El uso de nuevas tecnologías de información y comunicación científica en el área de partículas elementales: el caso de la física mexicana", Universidad Nacional Autónoma de México, 2009

Publication

1 %

Exclude quotes On

Exclude matches < 1%

Exclude bibliography On

DEDICATORIA

*Dedico todos mis éxitos a Dios, quien me ha llenado de bendiciones en cada momento
de mi vida.*

*Especialmente, dedico esta investigación a mi familia, quienes son las personas más
excepcionales de este mundo.*

*A mi amada hija Adryana, que siempre ha sido mi motivación en cada instante de mi
vida, desde el primer día que la conocí.*

A mi esposa Jenniffer quien me ha llenado de fortaleza y amor en todo momento.

*A mi padre César y mi madre Ana, quienes con sus consejos me han enseñado a
alcanzar mis metas con mucha sabiduría, perseverancia y amor.*

*A mis hermanos, Alejandro y Leonardo, con quienes puedo contar infinitamente, a
quienes quiero y admiro mucho.*

AGRADECIMIENTOS

*A Dios por darme la vida y poner a mi familia como ángeles en mi camino, los cuales
son el motor de mi vida.*

Al Ing. Danny Burbano por el apoyo y tiempo brindado en pro de esta investigación.

*Al Ing. Wilson Espinoza por haberme guiado durante el desarrollo de toda esta
investigación.*

RESUMEN

Esta investigación caracterizó el material calcáreo (mármol), pertenecientes a la Unidad geológica El Laurel, distribuido a lo largo de 3 cuerpos mineralizados en la cantera Mocoral, Otavalo, Ecuador, considerando los parámetros físicos, mecánicos y elásticos de estos macizos rocosos. Para ejecutar el estudio, se realizó una exploración geotécnica, levantando a detalle información concerniente a estaciones geomecánicas, mapeo geológico, análisis de ensayos de laboratorio, cuyos resultados proporcionaron 8 ecuaciones empíricas que describen el comportamiento del parámetro normalizado del ensayo esclerométrico PE_{cam} / R_{cam} , en función de los diferentes parámetros mecánicos de la roca como lo son: i. Resistencia a la compresión, módulo de Young y coeficiente de Poisson (Ensayo de compresión simple con cálculo de módulos de elasticidad), ii. Resistencia a la compresión, tracción, cohesión y ángulo de fricción interna (Ensayo triaxial); y, iii. Índice a la carga puntual (PLT). Estos modelos de regresión tienen alta fiabilidad, debido a que los datos poseen una baja dispersión entre sí. Finalmente, esta caracterización se realizó con la finalidad de exponer una metodología que llene el vacío investigativo referente a parámetros geotécnicos existente en macizos rocosos de las unidades geológicas del país.

Palabras clave: Mocoral, mármol, ensayo esclerométrico, ensayo de compresión simple, ensayo triaxial, ensayo de carga puntual, correlación

ABSTRACT

This research characterized the calcareous material (marble), belonging to the El Laurel geological Unit, distributed throughout 3 mineralized bodies in the Mocoral quarry, Otavalo, Ecuador, considering the physical, mechanical and elastic parameters of these rock masses. To execute the study, a geotechnical exploration was carried out, gathering in detail information concerning geomechanical stations, geological mapping, analysis of laboratory tests, the results of which provided 8 empirical equations that describe the behavior of the normalized parameter of the PE_{cam} / R_{cam} of the sclerometric test, in function of the different mechanical parameters of the rock such as: i. Compressive strength, Young's modulus and Poisson's ratio (Simple compression test with calculation of elastic moduli), ii. Compressive strength, traction, cohesion and angle of internal friction (Triaxial test); and, iii. Point load index (PLT). These regression models have high reliability, because the data have a low dispersion among themselves. Finally, this characterization was carried out with the purpose of exposing a methodology that fills the research gap regarding geotechnical parameters existing in rock masses of the geological units of the country.

Keywords: Mocoral, marble, sclerometric test, simple compression test, triaxial test, point load test, correlation

ÍNDICE GENERAL

	Página
DERECHOS DE AUTOR	ii
APROBACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN	iii
HOJA DE EVIDENCIA ANTIPLAGIO	iv
DEDICATORIA	v
AGRADECIMIENTOS	vi
RESUMEN	vii
ABSTRACT.....	viii
ÍNDICE GENERAL	ix
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xiv
ÍNDICE DE TABLAS	xviii
1. CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Antecedentes	2
1.2 Objetivos	5
1.2.1 Objetivo General	5
1.2.2 Objetivos Específicos	5
1.3 Justificación y Alcance	6
1.4 Ubicación y accesos	6
2. CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO.....	7
2.1 Estado del arte.....	7

2.2	Marco geológico regional	8
2.2.1	Unidad Pilatón (KPI)	10
2.2.2	Unidad El Laurel (EL)	10
2.2.3	Unidad Silante (EO SI)	11
2.2.4	Batolito de Apuela (Mio Ba-GQd)	11
2.3	Geomorfología	12
2.4	Geología Estructural	13
2.5	Ensayos de laboratorio	17
2.5.1	Peso específico	17
2.5.2	Ensayo triaxial en roca	18
2.5.3	Ensayo de compresión simple con cálculo de módulos de elasticidad ...	20
2.5.4	Esclerómetro en laboratorio	21
2.5.5	Ensayo de carga puntual o Point Load Test (PLT)	23
2.5.6	Láminas delgadas	24
2.6	Ensayos de campo	27
2.6.1	Levantamiento geológico	27
2.6.2	Análisis estructural	27
2.6.3	Estaciones Geomecánicas	27
2.6.4	Esclerómetro <i>IN SITU</i>	35
2.7	Análisis estadístico de datos	35
2.7.1	Población y muestra	35

2.7.2	Desviación estándar	35
2.7.3	Coeficiente de variación	36
2.7.4	Modelos de regresión.....	36
3.	CAPÍTULO III: MARCO METODOLÓGICO	39
3.1	Etapa de preparación.....	39
3.2	Etapa de preparación.....	40
3.3	Etapa de campo	41
3.4	Etapa de procesamiento y resultados	41
4.	CAPÍTULO IV: DATOS DE CAMPO Y DE LABORATORIO	42
4.1	Datos de campo.....	42
4.1.1	Levantamiento geológico.....	42
4.1.2	Análisis estructural	52
4.1.3	Estaciones geomecánicas (Clasificación RMR)	63
4.1.4	Datos de esclerómetro <i>IN SITU</i>	86
4.2	Datos de laboratorio.....	88
4.2.1	Peso específico.....	90
4.2.2	Ensayos triaxiales	90
4.2.3	Ensayo de compresión simple con cálculo de módulos de elasticidad...92	
4.2.4	Ensayo esclerométrico en laboratorio.....	93
4.2.5	Ensayo de carga puntual (PLT)	94
4.2.6	Láminas delgadas.....	95

5.	CAPÍTULO V: ANÁLISIS DE RESULTADOS	110
5.1	Geología.....	110
5.2	Estaciones geomecánicas (RMR)	110
5.3	Correlaciones empíricas en base al esclerómetro	111
5.3.1	Correlación empírica del ensayo esclerométrico con parámetros obtenidos del ensayo de compresión simple con módulos de elasticidad	120
5.3.2	Correlación empírica del ensayo esclerométrico con parámetros obtenidos del ensayo triaxial	125
5.3.3	Correlación empírica del ensayo esclerométrico con parámetros obtenidos del PLT.....	132
5.4	Selección de los modelos óptimos de regresión	134
5.4.1	Modelos empíricos que relacionan los datos de esclerómetro <i>IN SITU</i> con los datos de laboratorio	134
5.4.2	Modelos empíricos que relacionan los datos de esclerómetro <i>IN SITU</i> con los parámetros obtenidos del ensayo de compresión simple con módulos de elasticidad	135
5.4.3	Modelos empíricos que relacionan los datos de esclerómetro <i>IN SITU</i> con los parámetros obtenidos del ensayo triaxial	136
5.4.4	Modelos empíricos que relacionan los datos de esclerómetro <i>IN SITU</i> con los parámetros obtenidos del PLT	137
5.5	Validez del modelo empírico	138
6.	CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	145
6.1	Conclusiones	145

6.2	Recomendaciones	148
7.	BIBLIOGRAFÍA	150
8.	ANEXOS	153
	Anexo 1: Peso específico laboratorio	153
	Anexo 2: Ensayos triaxiales en roca	154
	Anexo 3: Ensayos de Compresión Simple con Módulos de elasticidad	170
	Anexo 4: Análisis de los Ensayos de Compresión Simple con Módulos de elasticidad....	202
	Anexo 5: Ensayo de Carga Puntual (PLT)	218
	Anexo 6: Ensayos de Compresión Simple para la validación de los modelos de regresión	219
	Anexo 7: Análisis de los Ensayos de Compresión Simple para la validación de los modelos de regresión	227

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Distribución espacial de los depósitos calcáreos en la zona de estudio	3
Figura 2. Rutas de acceso al proyecto Mocoral. Se encuentra a aproximadamente 170 km al noroeste de la ciudad de Quito, con un recorrido de 4 horas en automóvil.....	6
Figura 3. Mapa geológico regional para la zona de estudio, se marca con estrella púrpura la ubicación de la zona de estudio	9
Figura 4. Vista panorámica de la Mina Mocoral	13
Figura 5. Esquema estructural regional para la zona de estudio.....	15
Figura 6. Mapa de fuentes sismogénicas para la zona de estudio.....	16
Figura 7. Preparación de muestras y ejecución del ensayo triaxial	19
Figura 8. Preparación de muestras y ejecución del ensayo de compresión simple con módulos de elasticidad	21
Figura 9. Ábaco de Miller sugerido para el uso del esclerómetro (Martillo de Schmidt tipo L)	22
Figura 10. Diferentes fragmentos de roca para la ejecución del ensayo PLT.....	23
Figura 11. Esquema para la elaboración de una lámina delgada. A) Cadena de custodia para el ingreso de las muestras al laboratorio.....	26
Figura 12. Determinación del perfil de rugosidad	33
Figura 13. Clasificación geomecánica Rock Mass Rating, RMR.....	34
Figura 14. Metodología utilizada para la ejecución del presente estudio.....	40
Figura 15. Rocas volcano-sedimentarias de la Unidad Pilatón.....	44
Figura 16. Cuerpos mineralizados presentes en la cantera Mocoral.....	45
Figura 17. Mármoles pertenecientes a la Unidad El Laurel.....	46
Figura 18. Disposición morfológica de los coluviales.....	47
Figura 19. Batolito de Apuela, caracterizado por una roca de tipo granodiorita.....	48

Figura 20. Mapa geológico escala 1:1,000 en las inmediaciones de los cuerpos mineralizados de la cantera Mocoral.	49
Figura 21. Perfiles geológicos en las líneas de perfil AA' y BB'	50
Figura 22. Perfiles geológicos en las líneas de perfil CC' y DD'	51
Figura 23. Perfil geológico en la línea de perfil EE'	52
Figura 24. Estereodiagramas para los 2279 datos estructurales tomados en los cuerpos mineralizados.....	53
Figura 25. Estereodiagramas para los 569 datos estructurales tomados en el cuerpo mineralizado 1	54
Figura 26. Estereodiagramas para los 1227 datos estructurales tomados en el cuerpo mineralizado 2	56
Figura 27. Estereodiagramas para los 483 datos estructurales tomados en el cuerpo mineralizado 3	57
Figura 28. Estereodiagramas para los 507 datos estructurales tomados en la unidad volcánica	59
Figura 29. Estereodiagramas para los 139 datos estructurales tomados en el cuerpo intrusivo	60
Figura 30. Simplificación en planta del modelo de cizalla tipo Riedel. Se observa las relaciones geométricas entre los planos de intersección, generados a partir de los planos de Riedel (R).....	62
Figura 31. Resumen del comportamiento de las familias de discontinuidades, de acuerdo a su RMR y su ubicación espacial (Cuerpos mineralizado 1, 2 y 3).	80
Figura 32. Mapa de zonificación geomecánica del área de estudio, en base a la calificación RMR.	85
Figura 33. Mapa de ubicación de las muestras para ensayos de laboratorio	89

Figura 34. Observación en el microscopio petrográfico, para la descripción petrográfica de las muestras de roca.	95
Figura 35. Muestra de la lámina delgada LAB-CM-11 (lente 10X).....	97
Figura 36. Muestra de la lámina delgada LAB-CM-14 (lente 10X).....	99
Figura 37. Muestra de la lámina delgada LAB-CM-18 (lente 4X).....	102
Figura 38. Muestra de la lámina delgada LAB-CM-01 (lente 4X).....	104
Figura 39. Muestra de la lámina delgada CM-J2-28 (lente 4X)	107
Figura 40. Muestra de la lámina delgada RM-PC-46 (lente 4X).....	109
Figura 41. Distribución de los datos de peso específico en función de su tipología (IN SITU y laboratorio)	113
Figura 42. Distribución de los resultados de los datos de esclerómetro obtenidos en laboratorio.....	114
Figura 43. Distribución de los resultados de los datos de esclerómetro obtenidos en campo (PE_{cam} / R_{cam})	115
Figura 44. Distribución de todos los resultados de los datos de esclerómetro. De color verde los datos de laboratorio y azul los datos de campo.....	117
Figura 45. Distribución de los resultados en función de los valores normalizados, PE_{lab} / R_{lab} y PE_{cam} / R_{cam}	118
Figura 46. Distribución de los resultados de resistencia a la compresión simple del ensayo de compresión simple con módulos de elasticidad (σ_{CS-C}) en función de los valores normalizados, PE_{cam} / R_{cam}	121
Figura 47. Distribución de los resultados de Módulo de Young (E_{prom}) en función de los valores normalizados, PE_{cam} / R_{cam}	123
Figura 48. Distribución de los resultados de coeficiente de Poisson (ν) en función de los valores normalizados, PE_{cam} / R_{cam}	124

Figura 49. Distribución de los resultados de la resistencia a la compresión simple, obtenida del ensayo triaxial (σ_{CS-T}) en función de los valores normalizados, PE_{cam} / R_{cam}	126
Figura 50. Distribución de los resultados de la tracción (σ_t), calculada del ensayo triaxial, en función de los valores normalizados, PE_{cam} / R_{cam}	127
Figura 51. Distribución de los resultados de la cohesión (C), en función de los valores normalizados, PE_{cam} / R_{cam}	129
Figura 52. Distribución de los resultados de ángulo de fricción interna (ϕ), en función de los valores normalizados, PE_{cam} / R_{cam}	131
Figura 53. Distribución de los resultados del índice de carga puntual (I_{s50}), en función de los valores normalizados, PE_{cam} / R_{cam}	133
Figura 54. Muestras de mármol (preparadas para los ensayos), recolectadas a lo largo de los cuerpos mineralizados: 1, 2 y 3	138
Figura 55. Comprobación y validez del modelo empírico (Ecuación 5.2)	139
Figura 56. Mapa de ubicación de las muestras recolectadas para la verificación y validez de las ecuaciones empíricas.....	140
Figura 57. Comprobación y validez del modelo empírico (Ecuación 5.5)	141
Figura 58. Comprobación y validez del modelo empírico (Ecuación 5.6)	142
Figura 59. Comprobación y validez del modelo empírico (Ecuación 5.7)	143
Figura 60. Modelo de regresión generalizado que relaciona la Resistencia a la Compresión Simple (σ_{cs}) de los ensayos de Compresión Simple con módulos de elasticidad, triaxial y esclerométrico.....	144

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	29
Tabla 2	30
Tabla 3	30
Tabla 4	31
Tabla 5	32
Tabla 6	32
Tabla 7	33
Tabla 8	34
Tabla 9	53
Tabla 10	55
Tabla 11	56
Tabla 12	58
Tabla 13	59
Tabla 14	61
Tabla 15	63
Tabla 16	65
Tabla 17	68
Tabla 18	70
Tabla 19	72
Tabla 20	74
Tabla 21	75
Tabla 22	76
Tabla 23	77
Tabla 24	78

Tabla 25	79
Tabla 26	81
Tabla 27	82
Tabla 28	83
Tabla 29	83
Tabla 30	84
Tabla 31	86
Tabla 32	87
Tabla 33	90
Tabla 34	91
Tabla 35	92
Tabla 36	93
Tabla 37	94
Tabla 38	96
Tabla 39	98
Tabla 40	100
Tabla 41	103
Tabla 42	105
Tabla 43	108
Tabla 44	112
Tabla 45	115
Tabla 46	116
Tabla 47	118
Tabla 48	119
Tabla 49	120

Tabla 50	122
Tabla 51	122
Tabla 52	124
Tabla 53	125
Tabla 54	126
Tabla 55	128
Tabla 56	130
Tabla 57	130
Tabla 58	132
Tabla 59	133
Tabla 60	138
Tabla 61	139
Tabla 62	141
Tabla 63	142

1. CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

El análisis de las propiedades mecánicas de las rocas es esencial en el campo de la geotecnia y la ingeniería geológica, ya que permite prever cómo se comportarán los materiales rocosos frente a diferentes cargas y tensiones. En este contexto, la evaluación de los mármoles presentes en la unidad geológica El Laurel, situados en la cantera Mocal, Otavalo, adquiere gran relevancia debido a su uso en el diseño y planificación en la explotación de la cantera, además de proporcionar una metodología que puede ser replicada en estudios de otras unidades geológicas en el país. Esta investigación se enfoca en correlacionar el ensayo esclerométrico con los parámetros elásticos del ensayo de compresión simple con módulos elásticos (Módulo de Young y coeficiente Poisson), cohesión y ángulos de fricción (ensayo triaxial en roca) de estos mármoles, con el objetivo de establecer ecuaciones empíricas que mejoren la caracterización de sus propiedades mecánicas a través de los resultados del ensayo esclerométrico.

El ensayo esclerométrico, es una técnica no destructiva que evalúa la resistencia superficial de las rocas mediante el rebote de un percutor, proporciona una primera aproximación al comportamiento mecánico in situ del material rocoso; resulta especialmente útil para evaluaciones rápidas y económicas. No obstante, para comprender plenamente aspectos como capacidad de carga, deformabilidad y resistencia al corte del material rocoso, es fundamental relacionar estos resultados con ensayos más detallados, como los ensayos de compresión simple o triaxiales.

El presente estudio proporciona una correlación empírica mediante una metodología sistemática, elaborada a través de los datos de ensayos de compresión simple y triaxiales, mismos que se evaluaron sobre los resultados obtenidos de la ejecución de ensayos esclerométricos in situ. Se buscó no solo la validación del esclerómetro como herramienta de

evaluación preliminar, sino también se establecieron modelos predictivos que facilitarán la estimación de los parámetros elásticos y de resistencia de los mármoles de El Laurel a partir de mediciones esclerométricas rápidas y no destructivas. Esto con la finalidad de optimizar la caracterización geomecánica de esta unidad geológica en la zona de estudio; además de contribuir a una mejor gestión de los recursos y a la planificación de la explotación de la cantera Mocoral.

1.1 Antecedentes

Burns et al. (2014), describen la disposición y composición litoestratigráfica de las rocas aflorantes en la Mina Mocoral, donde mencionan que la Unidad El Laurel es de edad Eocénica (~50 millones de años), compuesta principalmente de secuencias calcáreas, donde predomina la presencia de calizas con alternancias de lutitas, limitadas por contactos tectónicos. Destacan el proceso de metamorfismo local donde las calizas han sido metamorfoseadas a mármol por la presencia de un cuerpo plutónico (Batolito de Apuela) de edad Miocénica (~15 millones de años) de composición granodiorítica y granítica. Reportan la presencia de metasedimentos (metavolcánicos) cuyo origen lo atribuyen al metamorfismo de la Formación Pilatón de edad Cretácico Tardío (~65-90 millones de años) compuesta por areniscas turbidíticas de origen volcánico.

Señalan que el depósito de mármol (Unidad El Laurel) mantiene una tendencia general noreste a suroeste a lo largo de una longitud de ~2.5 km y con buzamientos verticales hacia el noroeste. En el sector de la Unidad El Laurel se disponen tres depósitos de mármol designados desde el suroeste al noreste como; depósito A, B y C (Figura 1). Donde la Mina Mocoral explota el Depósito A (sector suroeste) y UNACEM (antiguamente Lafarge) dispone de los depósitos B y C (sector noreste) del cual el depósito B es el que actualmente se explota. En

términos de reservas reportan que el Depósito B mantiene menor reserva a comparación con los depósitos A y C.

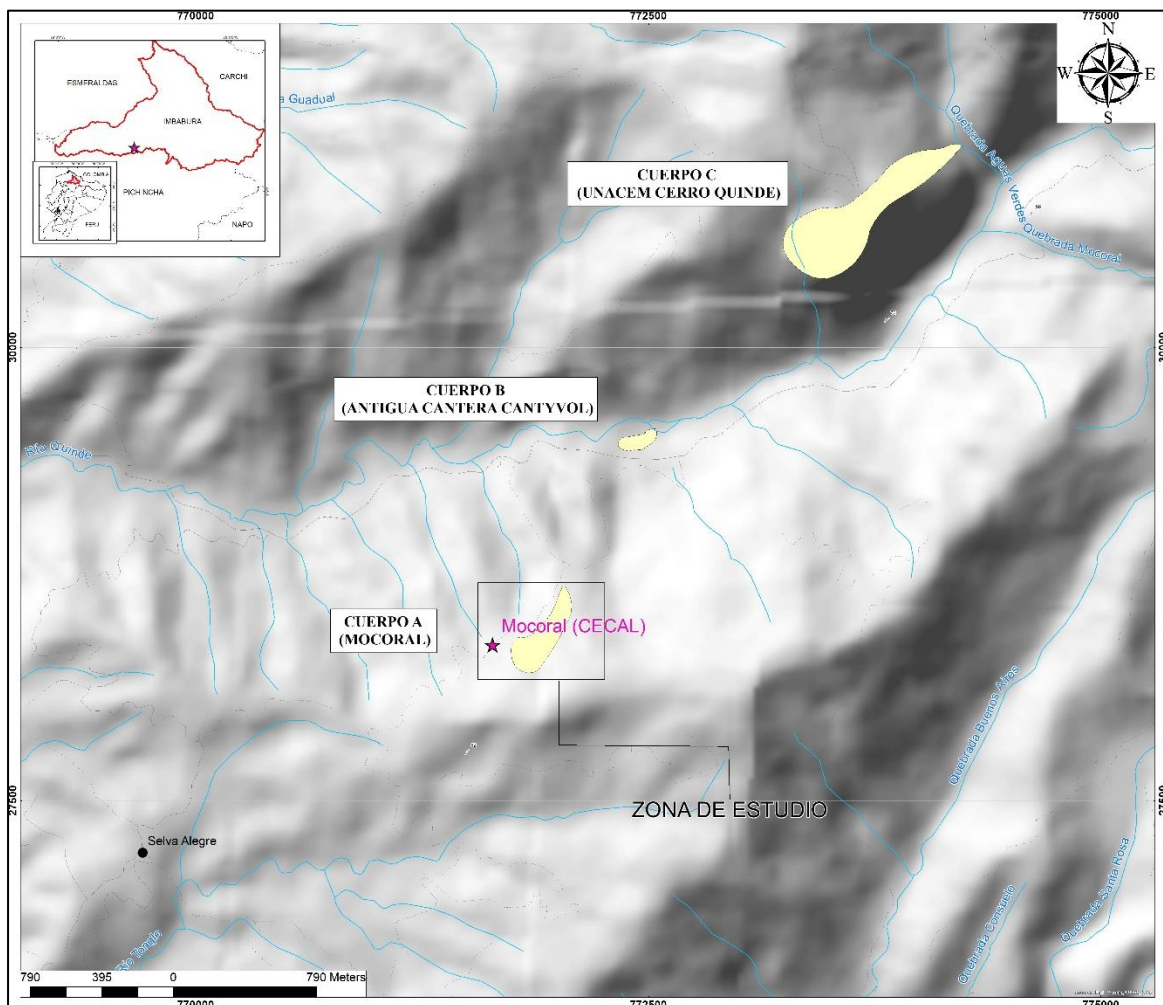


Figura 1. Distribución espacial de los depósitos calcáreos en la zona de estudio. Se puede apreciar la dirección preferencial en sentido noreste-suroeste de estos cuerpos calcáreos. Modificado de Egúez et al. (1986).

Como descripción litológica y mineralógica se define a la unidad geológica como un mármol granulado, con predominancia de grano medio, moteada de tonalidades blanquecinas con bandas grises pero es persistente el mármol de color gris claro, se encuentra fracturado, asociado al óxido de hierro e hidróxido se desarrolla un skarn pequeño (calco-silicatos) con minerales como wollastonita, granate y/o cuarzo, los sulfuros (predominantemente pirita) parecen estar diseminados en varias concentraciones a lo largo el cuerpo de mineral. El cuerpo de mineral de mármol parece ser menos puro a lo largo del contacto sureste (cuerpo mineralizado 1) con la secuencia metavolcánica (Burns et al., 2014).

En el año 2022 CECAL realiza un estudio geotécnico, para la evaluación de la estabilidad de los taludes de liquidación, parte de este estudio fue la ejecución de diversos ensayos de laboratorio, tales como: ensayos de compresión simple con módulos de elasticidad y triaxiales en la roca donde se emplaza el mineral de explotación (mármoles). Estos ensayos fueron los insumos iniciales sobre los cuales se plantearon algunas correlaciones empíricas.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

Determinar la correlación matemática del ensayo esclerométrico con los parámetros elásticos, cohesión y ángulos de fricción de los mármoles de la unidad geológica El Laurel, ubicados en la cantera Mocoral, Otavalo, Imbabura.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Efectuar un levantamiento y modelo geológico a detalle (Escala 1:1000) en la zona de estudio (cuerpos mineralizados, localizados en la cantera Mocoral), además de la realización de un análisis estructural para definir patrones estructurales y familias de juntas.
- Realizar una zonificación geomecánica en base al Rock Mass Rating (RMR) para la definición del cambio espacial de la calidad de la roca a lo largo del área de estudio.
- Realizar el análisis de los parámetros mecánicos y elásticos obtenidos de la campaña de ensayos de laboratorio 2022, ejecutados a muestras de mármol por parte de la empresa CECAL.
- Proponer una correlación matemática que permita obtener los módulos elásticos (Modulo de Young y coeficiente Poisson), cohesión y ángulo de fricción de los ensayos de compresión simple y triaxial, respectivamente, a través de datos obtenidos con los valores de Rebotes del ensayo de esclerómetro (martillo de Schmidt tipo L).

1.3 Justificación y Alcance

El presente estudio busca llenar el vacío investigativo sobre macizos rocosos en el país, proporcionando una metodología que puede ser replicada en diferentes unidades geológicas, demostrando su eficiencia y validez. Además, es necesario generar modelos predictivos que permitan estimar los parámetros elásticos y de resistencia de los mármoles a partir de ensayos no destructivos rápidos y económicos, como lo es el ensayo esclerométrico.

1.4 Ubicación y accesos

La cantera Mocoral se ubica en la provincia de Imbabura, al suroeste del cantón Otavalo, en la Parroquia de Selva Alegre. Desde Quito se encuentra a 170 km (4 horas en auto) hacia el noroeste, la ruta más rápida es desde la capital, se toma la E35 hasta Otavalo, aquí se continua por el camino de segundo orden hacia el poblado de Selva Alegre (Figura 2).



Figura 2. Rutas de acceso al proyecto Mocoral. Se encuentra a aproximadamente 170 km al noroeste de la ciudad de Quito, con un recorrido de 4 horas en automóvil. Recuperado de Google Maps (2024).

2. CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1 Estado del arte

Existe un vacío investigativo en cuanto al diseño y propuesta de una correlación del ensayo esclerométrico con los ensayos de compresión simple con módulos de elasticidad (módulo de Young y coeficiente de Poisson) y triaxial en rocas, sin embargo, existen algunos estudios de correlaciones en base a otros parámetros. Los artículos científicos e investigaciones descritas a continuación están ordenados cronológicamente de acuerdo con la fecha en que fueron publicados, lo que permite destacar los avances en la investigación de metodologías relacionadas con las correlaciones de parámetros geotécnicos en roca.

Aceves et al. (2003), elaboran una evaluación indirecta de los módulos de rigidez *in situ* y la relación entre ondas V_p / V_s y el ángulo de fricción interna. Estos investigadores establecen que existe una relación directa entre la masa de las rocas y suelos, sus propiedades mecánicas, y las velocidades de propagación de las ondas. Reconociendo que ciertos sitios, especialmente en zonas de rocas y material piroclástico (tobas), resulta impráctico y costoso obtener muestras para ensayos, por este motivo se utiliza la densidad y las velocidades de las ondas de compresión (V_p) y de corte (V_s) para determinar el coeficiente de Poisson “ ν ”. Además, con la densidad se infieren los Módulos Elásticos Dinámicos: Rigidez “G”, Young “E” y Bulk “K” para cada Unidad Geológica de dicha zona de estudio.

Bejarano (2013), la autora realiza un análisis sobre la variabilidad de los parámetros mecánicos de resistencia de una roca blanda altamente meteorizada en un talud, ubicado en la vía Bogotá-Tunja, determinando una correlación empírica de los parámetros mecánicos de humedad (grado de saturación) y densidad, con los parámetros de resistencia al corte, cohesión y ángulo de fricción para rocas blandas. El modelo muestra análisis matemáticos mediante

regresiones cuadráticas y lineales que permiten describir la variación de una variable en función de otra. Cabe señalar que estos modelos son propios para estos materiales y este lugar.

Ceballos & Restrepo (2016), presentan una correlación matemática entre la humedad, porosidad eficaz y la resistencia a compresión uniaxial en rocas (porosas y permeables), esta investigación permitió la determinación de ecuaciones empíricas, en las que se pueden estimar valores de la resistencia a compresión Uniaxial de la roca a partir de su porosidad eficaz y del contenido de humedad. Es importante destacar que este tipo de correlaciones son representativas para rocas que tengan similares características genéticas, petrológicas y litológicas, ya que el modelo presentado por los autores está afinado para este lugar geográfico específico (sur occidente de Colombia).

Feijoo & Román (2019), destacan la importancia de la resistencia a la compresión simple (RCS) del material rocoso en la implementación de obras civiles (trabajos mineros, túneles y/o taludes), misma que está directamente condicionada con la deformación del macizo rocoso. En este estudio se realizan varios ensayos de laboratorio para determinar la deformación y la RCS, para finalmente establecer una correlación entre dichas variables geotécnicas, proporcionando una forma práctica de determinar la RCS, con un bajo costo y cierto grado de confiabilidad, con la finalidad de obtener una aproximación del parámetro evitando los largos tiempos de espera para obtener los resultados de laboratorio.

2.2 Marco geológico regional

La zona de estudio está ubicada en el flanco centro-Oeste de la cordillera Occidental, geológicamente incluye a las unidades: Pilatón (rocas volcánicas y volcanoclásticas), El Laurel (rocas carbonatadas), Silante (rocas sedimentarias), además del batolito de Apuela (rocas intrusivas de afinidad granodiorítica) y en superficie se encuentran depósitos sedimentarios cuaternarios (Figura 3), los cuales son descritos en los acápites posteriores.

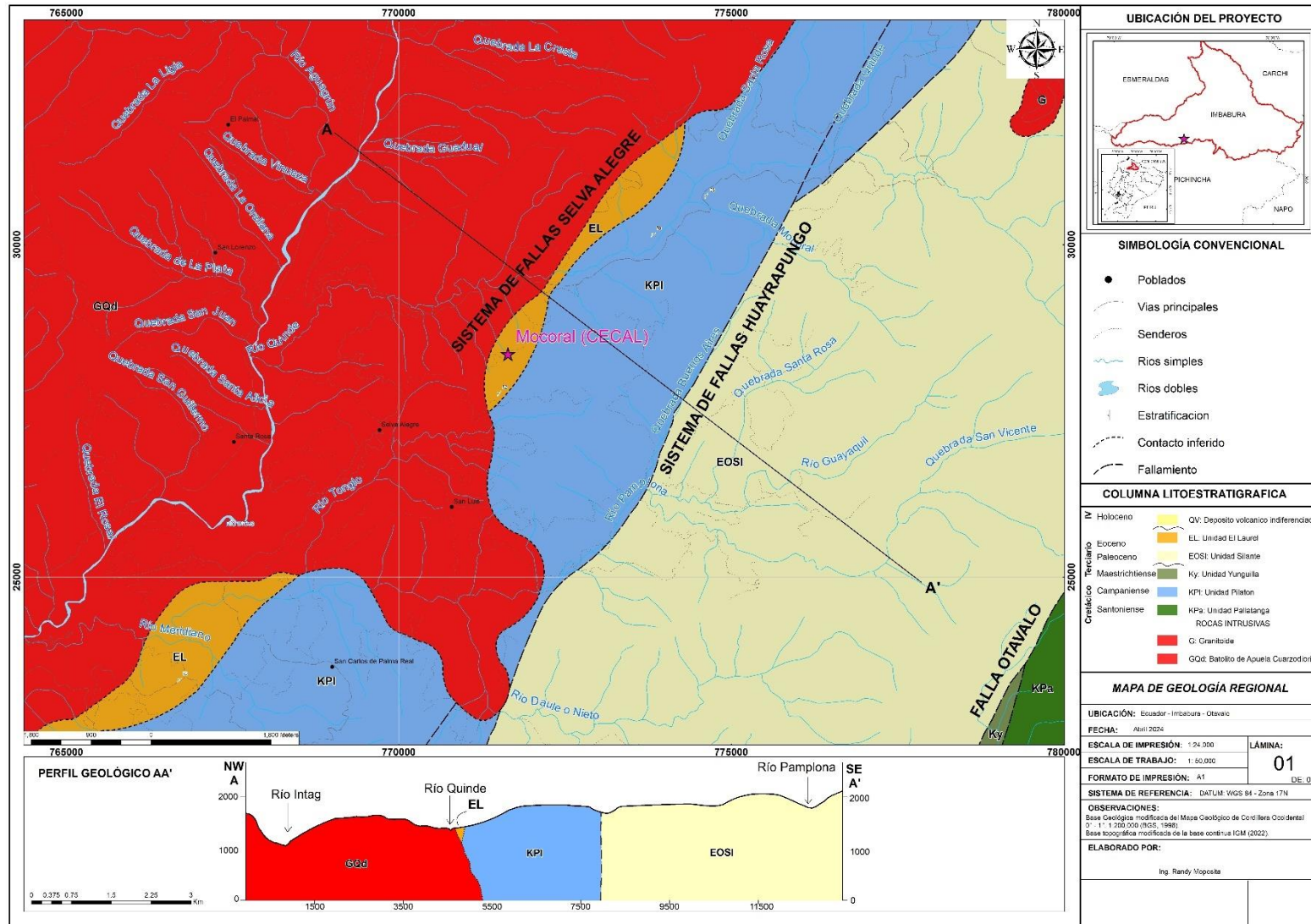


Figura 3. Mapa geológico regional para la zona de estudio, se marca con estrella púrpura la ubicación de la zona de estudio (Datum: WGS 84 – Zona 17N: 771638.90, 28343.69), donde se observa que la mina se asienta sobre la unidad geológica El Laurel. Geodatabase: IIGE (2000).

2.2.1 Unidad Pilatón (KPI)

Es una secuencia volcánica y volcanoclástica, compuesta de conglomerados, brechas volcánicas, areniscas, limolitas y cherts de tonalidades grisáceas, distribuidas espacialmente con una potencia cercana a los 2000 m (Vallejo, 2007). Por otro lado, Van Thournout (1991), señala que esta unidad consiste de areniscas ricas en líticos volcánicos y material piroclástico (tobas primarias) desplazadas por corrientes de turbidez de alta densidad. Además, PRODEMINCA (2000), indica que las areniscas se disponen con una textura fino granular, compuesta principalmente de cuarzo; varios afloramientos presentan indicios de metasomatismo, evidenciado principalmente por la existencia de cuarzo secundario, epidotas y hornfels.

2.2.2 Unidad El Laurel (EL)

Van Thournout (1991), describe a esta unidad como una secuencia de lodolitas de tonalidades grisáceas, intercaladas con areniscas (matriz-soportada) de grano fino. Parte de la secuencia se puede observar en la cantera Mocoral, donde se evidencia una potencia de 100 m de mármol, intercalada con materiales pelágicos, mismos que presentan una leve recristalización producto del metasomatismo, inducido por el emplazamiento del batolito de Apuela (PRODEMINCA, 2000).

Basándose en los fósiles de foraminíferos, encontrados en las calizas, se estima que El Laurel data del Eoceno y su ambiente genético corresponde a un abanico submarino distal (Van Thournout, 1991).

2.2.3 Unidad Silante (EO SI)

La unidad se distribuye espacialmente en sentido Norte – Sur; al oriente se encuentra limitado por las unidades geológicas Natividad, Yunguilla y Pallatanga; y al occidente por la unidad Pilatón (PRODEMINCA, 2000). Boland et al. (2000), la discretizan como una secuencia sedimentaria de grano fino, de color rojizo a púrpura, con una genética de origen continental con un alto aporte de material volcánico. Esa secuencia incluye lutitas, brechas, microconglomerados y conglomerados, ubicadas cerca del contacto con la unidad Yunguilla.

2.2.4 Batolito de Apuela (Mio Ba-GQd)

Van Thournout (1991), describe la distribución espacial del batolito de Apuela, localizada desde el sector del río Guayllabamba (al sur) hasta el poblado de Apuela (al norte), cubriendo un área de aproximadamente 750 km². PRODEMINCA (2000), indica un emplazamiento discordante dentro de la unidad Mulaute. Petrográficamente se describe entre una cuarzomonzonita y diorita, aunque en la zona de estudio se describe una granodiorita-cuarzodiorita.

Una de las interacciones más importantes del cuerpo intrusivo con las unidades Pilatón, Mulaute y El Laurel, es el metamorfismo de contacto producto del emplazamiento del batolito. Las principales evidencias son los hornfels y presencia de biotita secundaria en las Unidades Pilatón – Mulaute y la presencia de mármoles en El Laurel (PRODEMINCA, 2000).

2.3 Geomorfología

La Cantera de Mocal se localiza en los andes septentrionales ecuatorianos en las estribaciones de la Cordillera Occidental. Esta región se encuentra bajo un dominio morfoestructural que corresponde a un sistema montañoso andino del Ecuador que forma una impresionante barrera, donde destacan elevaciones de hasta 3500 msnsm.

Los sistemas de fallas regionales y sus litologías propensas al intemperismo, han generado zonas en las cuales las formaciones (unidades geológicas) experimentan una marcada reducción de su resistencia, razón por la cual, se generan extensas zonas vulnerables a los procesos erosivos, fuertemente dependientes de las condiciones climáticas dominantes en los contrafuertes andinos, formando relieves que corresponden a colinas alargadas con vertientes moderadas (15 - 30%) y contrafuertes con dirección nor-noreste (NNE), con cimas preferentemente agudas que ocurren en litologías de carácter volcánico; mientras que hacia el sur las cimas se presentan levemente redondeadas respondiendo a litologías de naturaleza intrusiva (Figura 4). Estas colinas configuran el lineamiento de un interfluvio que delimitan a la microcuenca del río Quinde. A escala local se observan geformas pertenecientes a depósitos coluviales antiguos con desarrollo de vegetación, cuyas superficies son onduladas y pendientes que no superan el 15% (baja); en otros sectores la pendiente es inferior al 10% con superficies planas, este desarrollo es evidente donde se asienta los poblados de Pamplona y Selva Alegre.

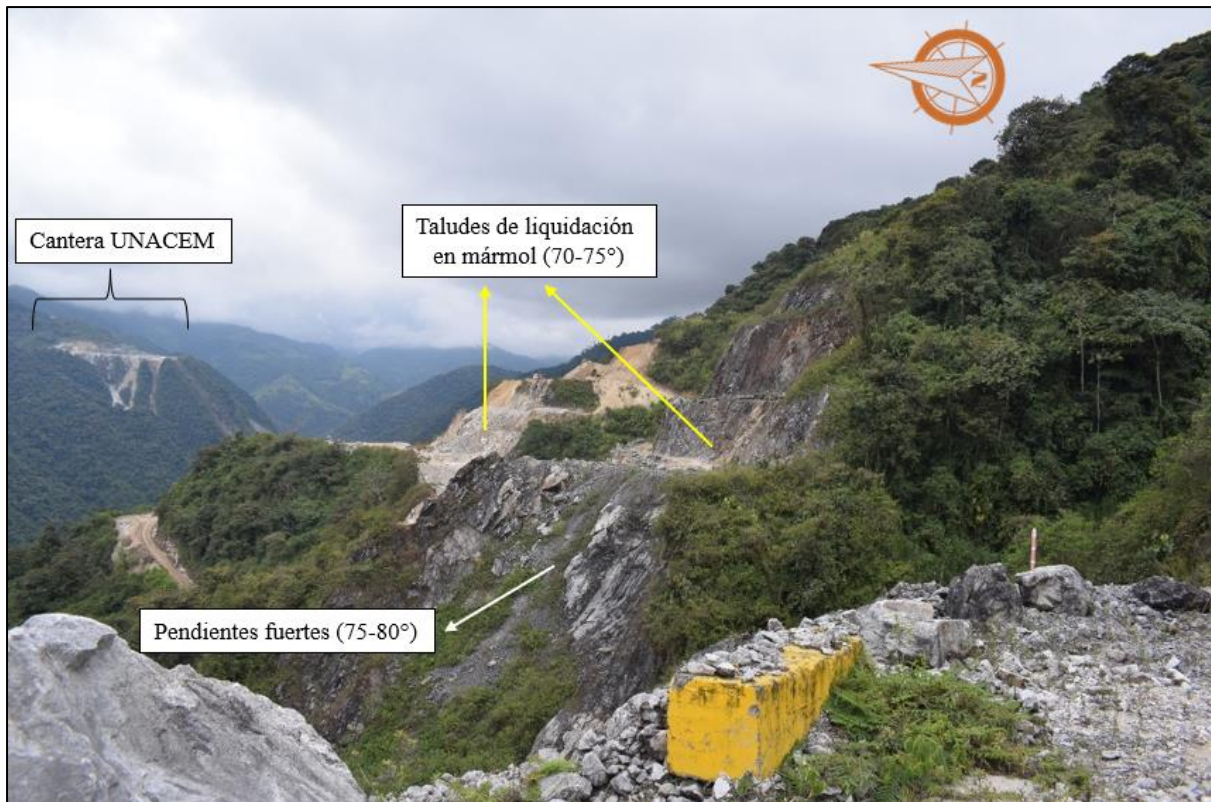


Figura 4. Vista panorámica de la Mina Mocal. Se observa el rasgo morfológico con pendientes fuertes ($75-80^\circ$) en la cual se configuran los taludes de liquidación sobre el material de mármol con una inclinación de $70-75^\circ$, al fondo se puede observar la Cantera UNACEM y sus labores de explotación a cielo abierto.

2.4 Geología Estructural

La cordillera occidental en el tramo comprendido entre los 0° a 1° N, está estructuralmente constituida por una serie de fallamientos regionales con una orientación predominante nor-noreste – sur-suroeste (NNE – SSW). En algunos sectores, también es atravesada por estructuras dispuestas casi ortogonalmente (E – W). La incidencia de esta tectónica, repercute en los contactos discordantes entre las unidades geológicas.

Los principales sistemas de fallas localizadas en el área de estudio son: la falla Calacalí – Pujilí – Pallatanga y falla Toachi, que presentan amplias zonas de deformación frágil y dúctil (Boland et al., 2000).

Según Boland et al. (2000), la falla Toachi marca el límite entre la unidad Mulaute y sedimentos marginales de la cordillera occidental. Esta falla define el límite occidental de la zona de cizalla conocida como Mulaute y desarrolla una extensa zona de deformación dúctil de ~

8 km de ancho, que puede llegar hasta los 25 km de ancho, de manera local la zona de estudio es directamente influenciada por los sistemas estructurales denominados como: Sistema de Fallas de rumbo de Apuela (al norte) y el sistema de Fallas transcurrentes Huayrapungo, al sur (Figura 5).

La falla Pallatanga constituye el límite oriental estructural de la cordillera occidental, Vallejo (2007) indica que esta falla separa la secuencia estratigráfica cretácica de la terciaria, evidenciada por las gruesas capas de depósitos cuaternarios, presentes en el Valle Interandino, su extensión hacia Colombia se define como falla de Calacalí – Cauca – Patía.

Según las fuentes sismogénicas mencionadas en Aguiar (2017), la cantera Mocal se encuentra en la fuente sismogénica 2C. Esta zona se caracteriza por un mecanismo de fallas de tipo Strike Slip, que implica un dominio de fallas con un componente de desplazamiento lateral, con presencia de componentes conjugados de cinemática dextral, sinistral, normal e inversa (Figura 6).

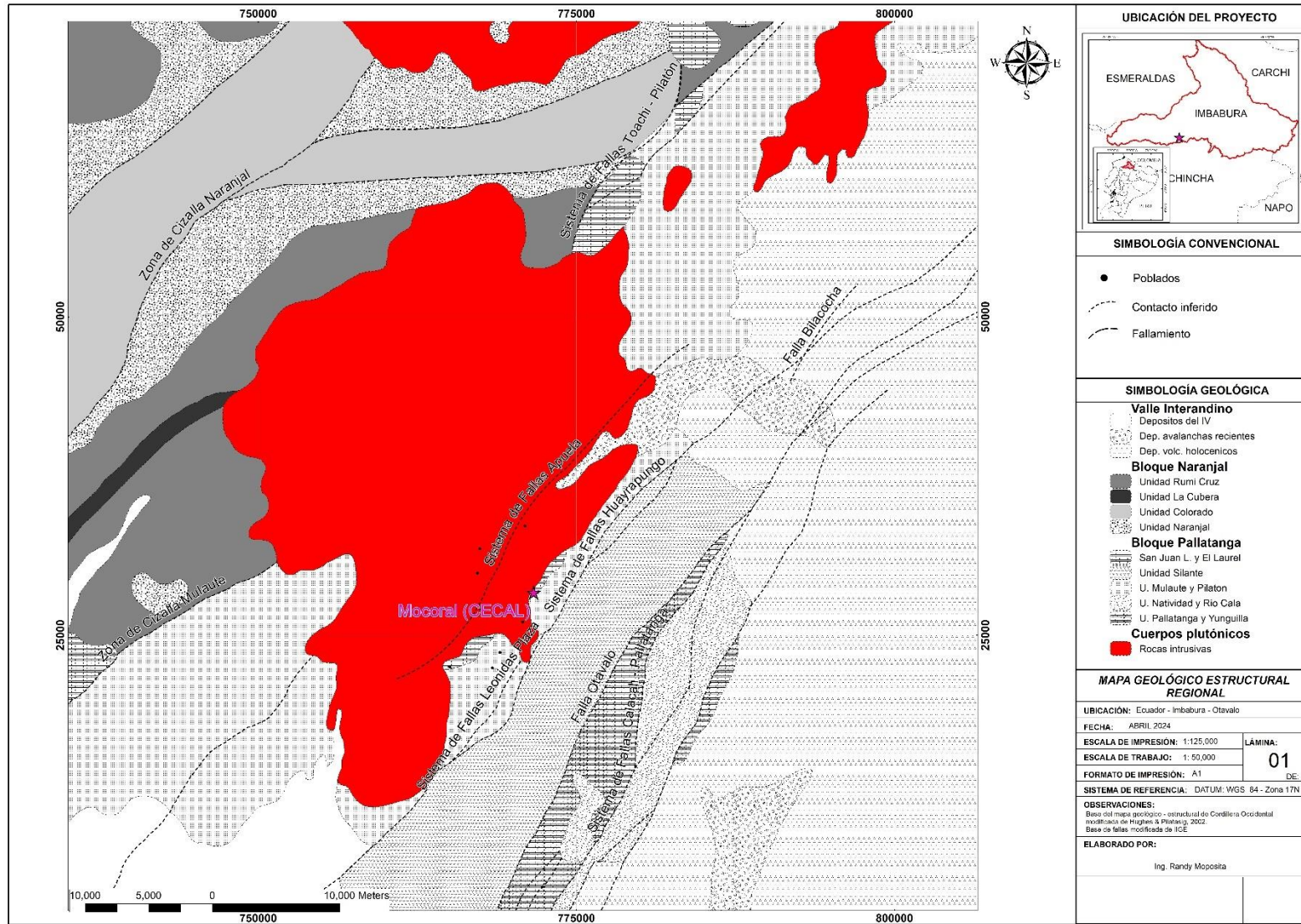


Figura 5. Esquema estructural regional para la zona de estudio. Los sistemas de fallas con mayor influencia al sector son: i. Sistema de fallas Apuela: ubicada al norte del sector, se caracteriza por fallas dextrales y conjugadas; y ii. Sistema de fallas Huayrapungo: ubicada al sur, caracterizada por fallas transcurrentes. Geodatabase: IIGE, (2020).

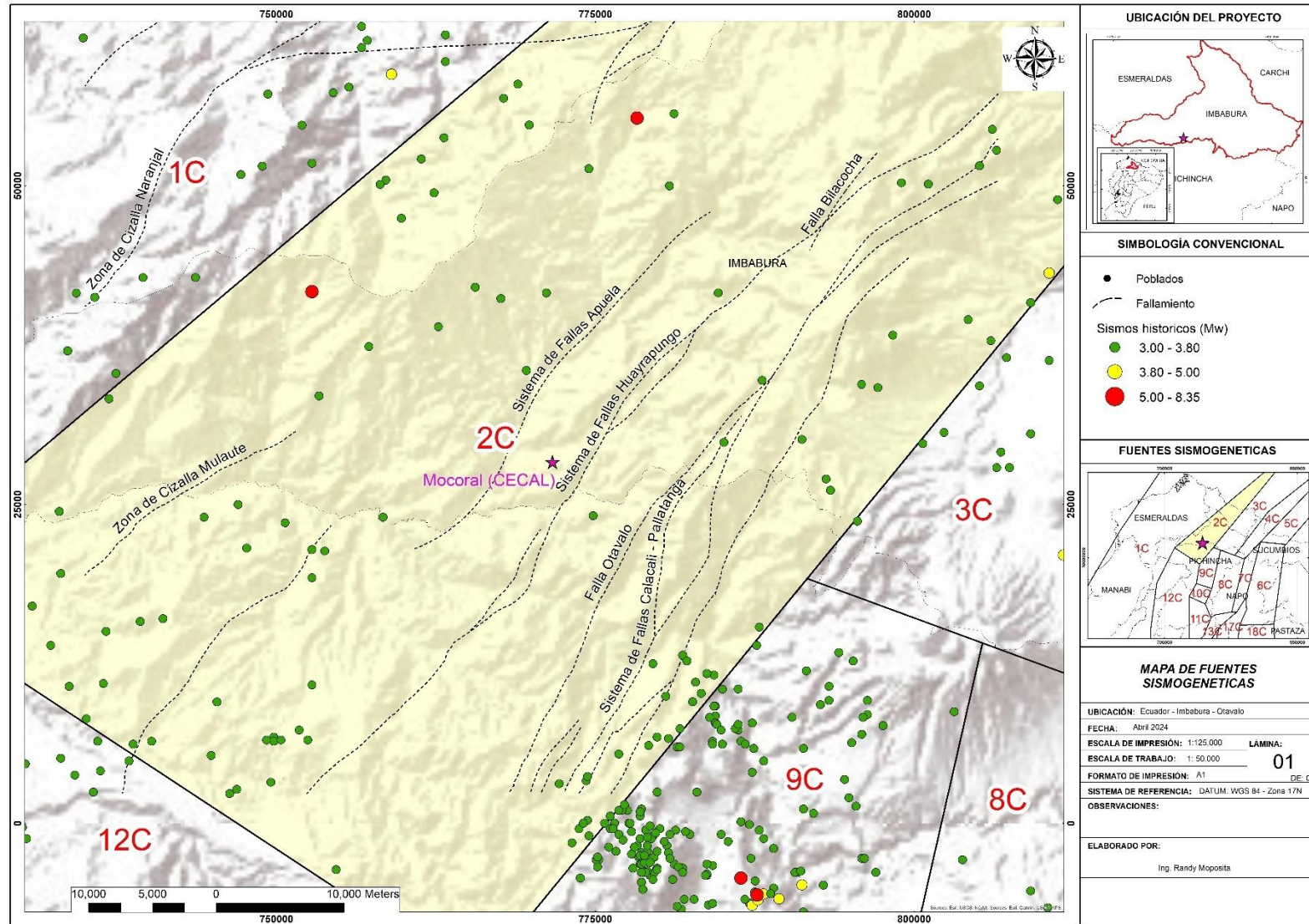


Figura 6. Mapa de fuentes sismogénicas para la zona de estudio. Se resalta la fuente sismogénica 2C (fallas de cinemática transcurrentes dextrales, sinestrales, inversa, normal). Además, se muestran los epicentros de sismos históricos que incurrir en la zona de estudio. Geodatabase: IG-EPN, (2022).

2.5 Ensayos de laboratorio

2.5.1 Peso específico

Dentro de las propiedades de identificación (índice), se ejecutó el ensayo de densidad mediante el picnómetro (ASTM D1480-21, 2024), el picnómetro es básicamente un frasco con un volumen conocido y preciso que se utiliza para medir el volumen de un sólido basándose en el principio de Arquímedes. De manera sintética el procedimiento es:

- **Registro del peso de la muestra seca:** Previamente se seca la muestra en un horno a una temperatura adecuada por 2 horas. Una vez seca, se pesa la muestra en una balanza de precisión para obtener su masa en el aire (m_1).
- **Registro del peso del picnómetro vacío:** Se pesa el picnómetro vacío y completamente seco (P_1). Es de vital importancia asegurarse de que el picnómetro esté limpio y seco antes de pesarlo para garantizar la precisión de la medición.
- **Registro del peso del picnómetro lleno con agua:** Se llena el picnómetro con agua destilada a una temperatura controlada (generalmente 20 °C) y se pesa (P_2). Es importante llenarlo y asegurarse que no queden burbujas de aire en el interior.
- **Registro del peso del picnómetro con agua + muestra:** La muestra seca se introduce cuidadosamente en el picnómetro lleno. Se debe tener cuidado de eliminar cualquier burbuja de aire que pueda quedar adherida a la muestra o en el picnómetro, ya que esto afectaría el volumen real del agua desplazada. Después de asegurarse de que todas las burbujas de aire han sido eliminadas,

se pesa nuevamente el conjunto del picnómetro con el agua y la muestra de roca (P_3).

- Cálculo del volumen desplazado y peso específico: El volumen desplazado por la muestra de roca se calcula utilizando las masas obtenidas anteriormente. Además, se emplea la Ecuación 2.1 para este cálculo.

$$V = \frac{(P_3 - P_1) - (m_1 P_2)}{\rho_{agua}} \quad (2.1)$$

Donde es P_1 es el peso del picnómetro vacío, P_2 es el peso del picnómetro lleno de agua, P_3 es el peso del picnómetro con la muestra de roca y agua, m_1 es el peso de la muestra seca, y ρ_{agua} es la densidad del agua (aproximadamente 1 g/cm³ a 20°C).

Una vez que se tiene el volumen desplazado por la muestra, el peso específico (ρ) de la roca se calcula utilizando la relación entre la masa seca de la roca (m_1) y el volumen desplazado (V), como se muestra en la Ecuación 2.2.

$$\rho = \frac{m_1}{V} \quad (2.2)$$

2.5.2 Ensayo triaxial en roca

El ensayo simula las condiciones de las rocas IN SITU sometidas a esfuerzo confinantes, aplicando de manera uniforme presión hidráulica alrededor de la muestra de roca. Para las muestras se usó un esfuerzo principal menor (σ_3) de 1 MPa, 3 MPa y 6 MPa, en las muestras LAB-CM-01 y LAB-CM-02, además de 1 MPa, 2 MPa y 4 MPa, en el resto de muestras. La carga aplicada fue seleccionada en función de la carga litostática en la zona de estudio y necesidades específicas de la empresa al momento de realizar la campaña de ensayos de laboratorio. El resultado para cada ensayo (σ_1) se definió usando el criterio de rotura de Mohr-Coulomb, este procedimiento facilita la determinación de la envolvente o

curva de resistencia del material rocoso, proporcionando así los valores de sus parámetros resistentes de cohesión (c [MPa]) y ángulo de fricción (ϕ [°]).

El procedimiento para la buena ejecución de los ensayos consistió en la aplicación de la norma (ASTM D7012-23, 2024) la cual consiste resumidamente en (Figura 7):

- Seleccionar una muestra representativa de nuestro afloramiento. La geometría de la muestra fue de aproximadamente de 30 cm x 20 cm x 30 cm.
- Perforar con broca diamantada la muestra irregular para obtener un testigo.
- Cortar la muestra guardando una aceptable relación longitud / diámetro; para este caso se usó la relación de $L/D = 2.0$.
- Tallar las bases de las probetas para ser planas - paralelas y perpendiculares al eje del cilindro.



Figura 7. Preparación de muestras y ejecución del ensayo triaxial. A) Muestreo, B) Perforación de muestras, C) Evidencia de extracción de probetas de 37 mm de diámetro. D) Tripleta de testigos por cada muestra, E) Lijado de bases de la probeta, F) Ejecución de ensayo triaxial mediante Celda Hoek.

2.5.3 Ensayo de compresión simple con cálculo de módulos de elasticidad

El valor de la resistencia aporta información sobre las propiedades ingenieriles de las rocas, y permite determinar en el laboratorio; las constantes elásticas de la muestra: el módulo de Young (E) y coeficiente de Poisson (ν). El criterio para la aplicación de los esfuerzos es: $\sigma_1 \neq 0$; $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$ (González de Vallejo, 2012). La determinación de la resistencia a compresión simple de la matriz rocosa, permite una clasificación de las rocas a partir de sus valores de resistencia; debido a que este parámetro mecánico es vital en los criterios de rotura más utilizados (Hoek-Brown y Mohr-Coulomb) y permite estimar los cálculos de diseño de obras ingenieriles y la calificación en macizos rocosos.

El ensayo se realiza sobre un cilindro de roca, al que se le aplica gradualmente cargas axiales hasta que se produce su rotura. Las deformaciones axiales que se van produciendo en la probeta se mide mediante compradores o bandas extensométricas.

El ensayo se encuentra normalizado por: Barton (1978) y la ASTM D3148-02 (2024). Los aspectos básicos de las normas aplicados son las siguientes (Figura 8):

- Deben utilizarse probetas cilíndricas o muestras regulares. Para este caso se usó testigos de diámetro 37 mm. El diámetro será al menos 10 veces mayor que el tamaño de grano mineral más representativo de la roca. Su altura debe ser igual 2,0 – 2,5 veces el diámetro (Barton, 1978).
- El cilindro no debe tener fracturas internas dentro de la matriz rocosa.
- Las superficies de la probeta de roca, que están en contacto directo con la prensa, deben ser planas, paralelas y perpendiculares al eje del cilindro.
- La carga se debe aplicar con una velocidad constante, la gradiente de velocidad fue condicionada a un tiempo en 10 minutos.

- Los Strain Gauges fueron ubicados; 1 en la dirección del eje axial y 1 en la dirección del eje transversal con el fin de detectar variaciones de deformación y obtener las constantes elásticas representativas.



Figura 8. Preparación de muestras y ejecución del ensayo de compresión simple con módulos de elasticidad. A) Perforación de probetas de 37 mm, B) Testigos de diferentes longitudes, C) Equipo de corte, D) Lijado de las bases del testigo con el fin de mantener el paralelismo entre las caras. E) Juego de Strain Gauges con factor de galga de 120 ± 1 [ohmios (Ω)], longitud de 20 mm. F) Pegado de galgas extensométricas en el eje axial y radial. D) Ejecución del ensayo de compresión simple con medición de la deformación (axial y radial) con el fin de calcular las constantes elásticas.

2.5.4 Esclerómetro en laboratorio

Conocido con el nombre de Martillo de Schmidt (ASTM D5873-14, 2023), es un ensayo no destructivo muy extendido por su facilidad y rapidez de uso. El esclerómetro se define como un pequeño aparato con un muelle en su interior con una punta retráctil que al presionarla contra la roca hace que el muelle se dispare. El rebote producido se relaciona con la dureza (o resistencia) de la roca (matriz y discontinuidades).

Se empleó el Martillo de Schmidt con el objeto de estimar la resistencia a compresión simple de la matriz de la roca, por ser de uso rápido y ágil. Para la ejecución del ensayo en

laboratorio, se sometió a la muestra de campo a 20 golpes (rebotes), seguidamente se empleó el criterio de la ASTM D5873-14 (2023) y Barton (1978), que resumidamente señala que se tomarán 20 datos esclerométricos de los cuales se ordenarán de mayor a menor y se descartarán el 50% de datos más bajos, de los datos resultantes se sacará una media, este valor (R), servirá para obtener la resistencia a la compresión simple mediante el ábaco de Miller (Figura 9) sugerido para el esclerómetro utilizado (Martillo de Schmidt tipo L).

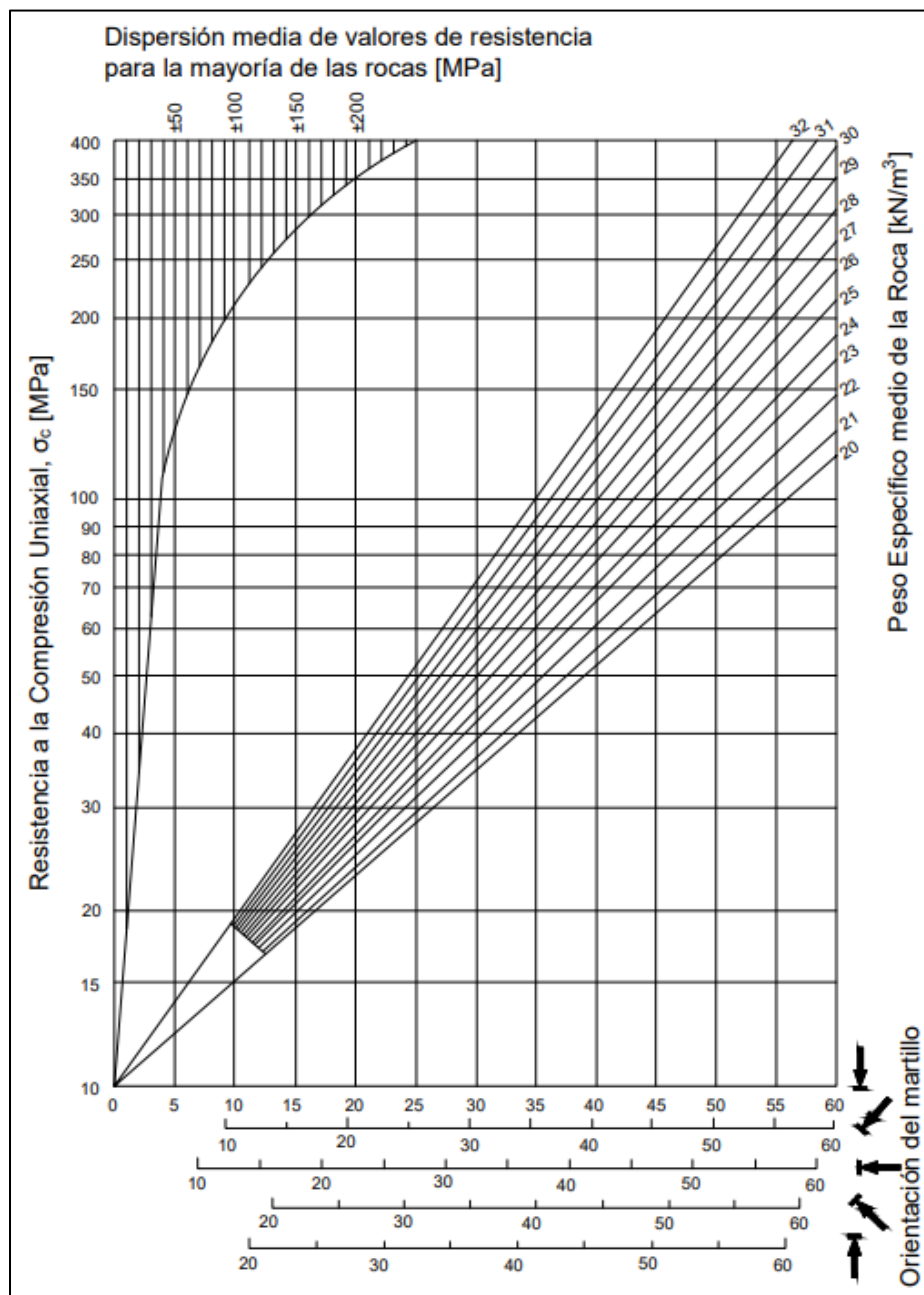


Figura 9. Ábaco de Miller sugerido para el uso del esclerómetro (Martillo de Schmidt tipo L). Modificado de (Alves et al., 2015).

2.5.5 Ensayo de carga puntual o Point Load Test (PLT)

Denominado como ensayo de compresión no confinada (ASTM D2938, 2024), se utiliza para determinar la resistencia a compresión simple de fragmentos de roca irregulares o de testigos de perforación cilíndricos. El ensayo (Figura 10) determina el índice a la carga puntual (Is_{50}) que resulta de la división de la carga de rotura en relación con el diámetro de la probeta o altura de la muestra ensayada entre dos puntas cónicas metálicas accionadas por una prensa y un gato hidráulico manual. La longitud del testigo deber ser, como mínimo, de 1.5 veces el diámetro. La correlación entre el índice Is_{50} y la resistencia a compresión se expresa en la Ecuación 2.3, donde el factor k varía según el diámetro de la muestra por lo que se debe realizar una corrección por tamaño. Para el caso específico de las muestras ensayadas se utilizó un criterio de $K = 7$, debido a que los fragmentos de roca tienen dimensiones entre 30 y 54 mm, además según Galván et al. (2019), el factor K es obtenido de la regresión por grupos de resistencia para rocas de tipo mármol en el que se destaca un criterio de 7 para este grupo litológico.

$$RCS = K \cdot Is_{50} \quad (2.3)$$

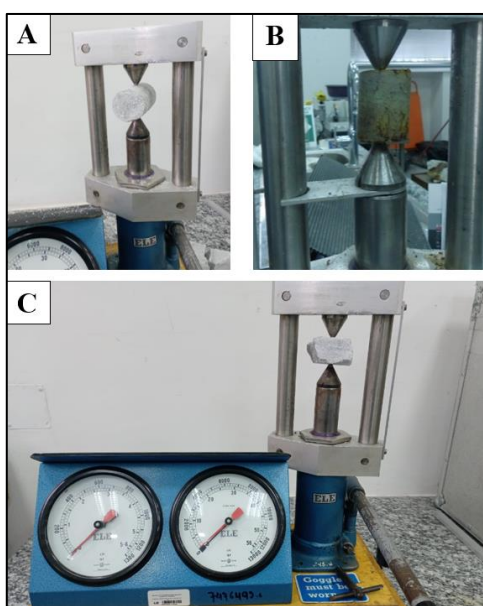


Figura 10. Diferentes fragmentos de roca para la ejecución del ensayo PLT. A) Ensayo PLT tipo diametral en testigo, B) Ensayo PLT tipo axial en testigo. C) Ensayo PLT en muestra irregular.

2.5.6 Láminas delgadas

Las láminas delgadas o secciones delgadas se realizan con la finalidad de obtener una descripción petrográfica de las láminas mediante la observación directa en el microscopio petrográfico, caracterizando así la mineralogía y paragénesis de las diferentes unidades geológicas. Para la elaboración de cada lámina se considera el siguiente procedimiento (Figura 11):

- Cada muestra de roca es colocada individualmente en su respectiva funda previamente codificada.
- Se procede a realizar un corte grueso a lo largo de la línea de corte establecida en campo para la elaboración de la lámina delgada, este corte primario (grueso) se realiza con la finalidad de obtener chips de roca finos y delgados.
- Seguidamente se realiza el corte de precisión en la instrumentación adecuada (que cuenta con un disco de 175 mm de diámetro y filos de diamante (impregnados) de 65 micras) para obtener una muestra prismática de aproximadamente 46 x 20 x 5 mm.
- El prisma obtenido se somete a un pulido complementario, con abrasivos (Carburo de silicio) # 240 μm y #1000 para obtener una cara totalmente lisa y pulida, cabe señalar que la rotación de la pulidora será de velocidades altas aproximadamente unas 320 RPM.
- En la planta de calentamiento se establece una temperatura de $\sim 100^{\circ}\text{C}$. Previamente se alista el portaobjetos puliéndolo con el abrasivo #1000 para obtener una adherencia correcta con la muestra de roca. Se coloca sobre la plancha la muestra de roca - el portaobjetos, para proceder a colocar la resina

termoplástica (marca Buehler, No. 40-8100, punto de fusión a 130 °C) sobre el portaobjetos y la cara pulida de la muestra, evitando la generación de burbujas.

- Se espera que se solidifique la resina termoplástica aproximadamente de 7 a 10 minutos.
- Una vez secada la muestra se procede al devastado de la lámina en un disco de pulido de diamante, para de esta manera obtener un grosor de la muestra de 40-60 μm .
- Cuando se note que la lámina se encuentra muy fina (paso de luz sobre la sección de roca) se procede a un pulido complementario con abrasivo # 600 y bajas revoluciones 90 RPM.
- Se controla el proceso anterior con la observación directa de minerales guía (cuarzo, plagioclasa, feldespatos, calcita), es decir, que se continúa con el procedimiento de pulido hasta obtener las propiedades ópticas adecuadas para los minerales guía.
- Se coloca un cubre objetos (para proteger la sección pulida) mediante la aplicación de un epóxico que tarda en secar de 8 a 10 horas.
- Finalmente se retira el exceso de epóxico, limpiando las superficies del vidrio con alcohol.



Figura 11. Esquema para la elaboración de una lámina delgada. A) Cadena de custodia para el ingreso de las muestras al laboratorio, B) Almacenamiento muestras en fundas plásticas codificadas, C) Corte grueso de la muestra, D) Obtención de prisma regular de muestra, E) Se observa cómo se pule una cara del prisma para dejarla lisa y plana, F) Calentamiento de la resina termoplástica a una temperatura de 130°C, G) Pegado de la muestra al portaobjetos, mediante la goma termoplástica, H) Pulido de precisión, hasta obtener una sección muy lisa, I) Lijado final de la superficie con abrasivo #1000, J) Revisión de las propiedades ópticas de los minerales, se observa colores de birrefringencia altos para minerales como cuarzo, por lo que es necesario continuar el proceso de devaste, K) Propiedades ópticas de los minerales marcadores (cuarzo, plagioclasa, feldespatos) en correcto orden, L) Colocación del cubre objetos para preservar la muestra adecuadamente.

2.6 Ensayos de campo

2.6.1 Levantamiento geológico

Este estudio se realiza con la finalidad mapear los contactos entre las unidades litoestratigráficas a escala de detalle (Esc: 1:1000), para obtener información litológica, estructural representativa, observar las condiciones de estabilidad de las unidades geológicas, distinguir las características geomorfológicas del sector, especialmente en cuanto se refiere a las condiciones de estabilidad de taludes, procesos erosivos y evolución geomorfológica de la zona de estudio.

2.6.2 Análisis estructural

El estudio estructural se realiza para conocer la cinemática de las discontinuidades, con la finalidad de establecer familias de diaclasas que permitan definir el control estructural en la zona de estudio. Los datos de campo fueron tomados en azimuth/buzamiento (Dip direction/Dip) para poder realizar estereodiagramas que faciliten el análisis estructural.

2.6.3 Estaciones Geomecánicas

Se realizó el levantamiento de estaciones geomecánicas con el criterio de Rock Mass Rating (RMR), este criterio fue desarrollado por Bieniawski en 1973 (con modificaciones en los años 1979 y 1989), constituye uno de los sistemas de clasificación empíricos más utilizados que permite determinar la calidad de un macizo rocoso y a su vez relacionar con los parámetros geotécnicos del macizo (Bieniawski, 1989). Esta clasificación considera los siguientes parámetros mecánicos de las rocas:

- i. Resistencia a la compresión simple de la matriz rocosa.
- ii. Grado de fracturación en base al RQD.

- iii. Espaciamiento de las discontinuidades.
- iv. Condiciones físicas de las discontinuidades.
- v. Condiciones hidrológicas e hidrogeológicas.
- vi. Orientación de las discontinuidades con respecto a la obra a implementarse

El impacto de estos factores en el comportamiento geomecánico de un macizo rocoso se refleja a través del índice de calidad RMR, el cual oscila entre 0 a 100. Para emplear esta clasificación, se segmenta sistemáticamente al macizo rocoso en áreas o segmentos con características geológicas relativamente uniformes, en base a las observaciones hechas en campo. El levantamiento sistemático de estaciones geomecánicas fue mediante el uso de fichas pre-establecidas, diseñadas para la toma de datos.

La clasificación RMR divide los macizos en cinco clases principales, asignándoles a cada una, cierta calidad y características geotécnicas específicas. Por ejemplo, un macizo clasificado como Muy Bueno (Clase I), será duro, con pocas fracturas, sin filtraciones significativas y con poca meteorización, lo que sugiere una baja afectación en términos de estabilidad y resistencia. Se espera que tenga una alta capacidad de carga y no necesitará medidas adicionales de estabilización o refuerzo. Su caso extremo (Clase V), será un macizo rocoso de baja resistencia, muy fracturado, con presencia de agua, meteorizado el que presentará problemas de inestabilidad latente. A continuación, se describe como se obtuvo cada uno de los parámetros utilizados para la clasificación RMR.

2.6.3.1 Resistencia de la matriz rocosa

La resistencia de la roca puede ser definida IN SITU, a través de índices de campo, basadas en correlaciones o también por la ejecución de ensayos de laboratorio (Compresión simple, triaxial, esclerómetro, PLT) o de campo (esclerómetro).

Con los valores obtenidos en los diferentes ensayos se puede clasificar la roca en base a criterios de resistencia, como muestra la Tabla 1.

Tabla 1

Clasificación en base a la resistencia de la matriz rocosa. Tomada de González de Vallejo (2012)

RCS (MPa)	Descripción
1 – 5	Muy blanda
5 – 25	Blanda
25 – 50	Moderadamente dura
50 -100	Dura
100 -250	Muy dura
> 250	Extremadamente dura

Los índices de campo posibilitan una aproximación al rango de resistencia de la roca. Los criterios para su reconocimiento están detallados en la Tabla 2 y deben ser utilizados en la roca, después de eliminar cualquier capa de alteración superficial.

La determinación de la resistencia de la matriz, fue mediante la interpretación de ensayos de laboratorio en muestras de núcleos de rocas inalteradas, obtenidas de muestras de afloramientos, este valor fue obtenido de los ensayos de compresión simple y carga puntual. Además, se evaluó la resistencia de la roca con la ayuda de un martillo de Schmidt y el uso de índices de campo.

Tabla 2
Índice de resistencia en campo para rocas. Modificada de ISRM (2014).

Clase	Descripción	Identificación de campo	Aproximación de resistencia a compresión simple [MPa]
R0	Roca extremadamente blanda	Se puede marcar con la uña	0.25 – 1.00
R1	Roca muy blanda	La roca se deshace al golpear suavemente con la punta del martillo	1.00 – 5.00
R2	Roca Blanda	La roca se marca ligeramente al golpear con la punta del martillo	5.00 – 25.00
R3	Roca Moderadamente dura	Puede fracturarse con un golpe de martillo	25.00 – 50.00
R4	Roca dura	Se requieren pocos golpes con el martillo para fracturarla.	50.00 – 100.00
R5	Roca muy dura	Muchos golpes de martillo son requeridos para fracturarla	100.00 – 250.00
R6	Roca extremadamente dura	Al golpearlo con el martillo solo saltan esquirlas.	> 250.00

La determinación de la resistencia de la matriz, fue mediante la interpretación de ensayos de laboratorio en muestras de núcleos de rocas inalteradas, obtenidas de muestras de afloramientos, este valor fue obtenido de los ensayos de compresión simple y carga puntual. Además, se evaluó la resistencia de la roca con la ayuda de un martillo de Schmidt y el uso de índices de campo.

2.6.3.2 Rock Quality Design (RQD)

El índice de calidad de las rocas (Tabla 3), sirve para determinar la calidad de un macizo rocoso (Barton & Bar, 2020):

Tabla 3
Designación de calidad de roca. Modificada de Barton & Bar (2020)

RQD (Designación de calidad de Roca)	(%)
Muy mala (>27 diaclasas por m ³)	0 - 25
Mala (20 – 27 diaclasas por m ³)	25 – 50
Regular (13-19 diaclasas por m ³)	50 -75
Buena (8 – 12 diaclasas por m ³)	75 - 90
Excelente (0 – 7 diaclasas por m ³)	90 -100

2.6.3.3 Espaciado de las discontinuidades

El espaciado hace referencia a la separación entre dos planos de discontinuidad de una misma familia, medida en dirección perpendicular a estos. Se mide utilizando una cinta métrica, cubriendo una longitud que represente adecuadamente la frecuencia de discontinuidades, con una extensión mínima de al menos 3 metros. La longitud de la medición debe ser aproximadamente diez veces mayor que el espaciado. La cinta debe colocarse perpendicularmente a los planos, registrando la distancia entre las discontinuidades adyacentes (Tabla 4).

Tabla 4

Descripción del espaciado de discontinuidades. Modificado de ISRM (2014).

Descripción	Espaciado
Muy junto	< 60 mm
Junto	60 – 200
Moderadamente junto	200 – 600
Separado	600 – 2000
Muy separado	> 2000 mm

2.6.3.4 Condiciones de las discontinuidades

Las discontinuidades determinan de manera crucial las propiedades y el comportamiento resistente de los macizos rocosos. Para la cuantificación de estos parámetros se tomaron mediciones en macizos rocosos y se los comparó con los valores descritos desde la Tabla 5 hasta la Tabla 8 y la Figura 12, asignando una puntuación correspondiente a la observación de campo.

- **Continuidad a lo largo del buzamiento:** La medida de la discontinuidad se realiza con un flexómetro. Si en el afloramiento es posible la observación tridimensional en los planos de discontinuidad, será necesario medir la continuidad a lo largo del buzamiento y la dirección de las diaclasas.

Se midió la longitud de las discontinuidades según la dirección del plano (prolongación de la discontinuidad en vista de planta) y según el buzamiento de las discontinuidades (dimensión de la discontinuidad visto en el afloramiento).

Tabla 5

Descripción de la continuidad de discontinuidades. Modificado de ISRM (2014).

Continuidad	Longitud (m)
Muy Baja	< 1 m
Baja	1 – 3 m
Media	3 – 10 m
Alta	10 -20 m
Muy alta	> 20m

- **Abertura de las discontinuidades:** Representa la distancia perpendicular medida, que separa las caras de la discontinuidad (cuando carece de relleno).

Tabla 6

Descripción de la abertura de las discontinuidades. Modificado de ISRM (2014).

Descripción	Abertura (mm)
Nula	
Muy cerrada	< 1 mm
Parcialmente abierta	1 – 3 mm
Abierta	3 – 10 mm
Moderadamente abierta	10 – 20 mm
Ancha	>20 mm

- **Rugosidad de las discontinuidades:** La descripción y medida de este parámetro tiene como finalidad una evaluación empírica de la resistencia al corte de los planos de discontinuidad. La estimación de este parámetro se realizó comparando visualmente con los perfiles estándar de rugosidad (Figura 12).

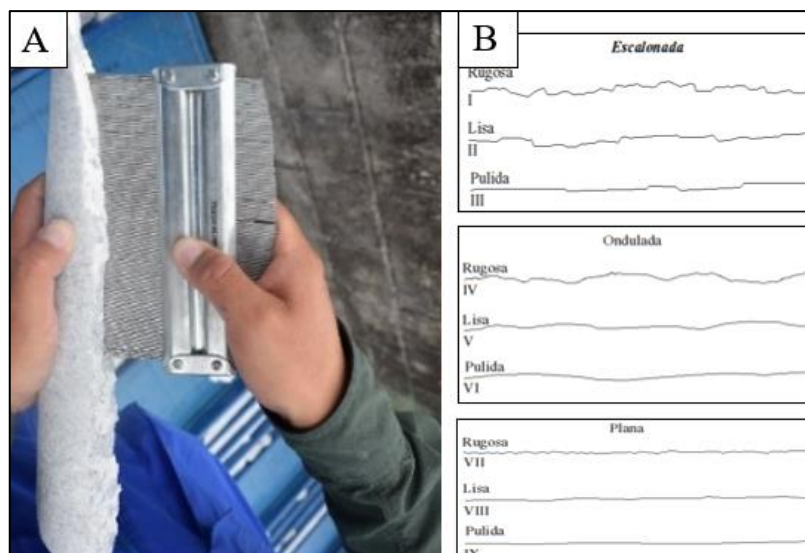


Figura 12. Determinación del perfil de rugosidad. A) Uso del peine de Barton para la definición del perfil de rugosidad. B) Perfiles de rugosidad tipo. Modificado de ISRM (2014).

- **Relleno entre las discontinuidades y agua freática:** Como características principales de este factor se describió en las estaciones geomecánicas: el tipo, naturaleza, espesor, humedad y resistencia del relleno (Tabla 7).

Tabla 7
Clasificación y Descripción de las filtraciones en discontinuidades. Modificado de ISRM (2014).

Discontinuidad sin relleno	Discontinuidad con relleno
Cerrada, seca, no parece posible la circulación	Relleno consolidado y seco, no parece posible la circulación
Seca, no aparecen evidencias de circulación	Relleno húmedo, pero sin agua libre
Seca, hay evidencias de circulación	Relleno mojado con goteo ocasional
Húmeda sin agua libre	Relleno con muestras de lavado, flujo continuo (estimar caudal)
Junta con Rezume, ocasionalmente goteo, sin flujo continuo	Relleno localmente lavado, flujo considerable según canales preferentes (estimar caudal)
Junta con flujo continuo (estimar caudal)	Relleno completamente lavado, presiones de agua elevada.

2.6.3.5 Meteorización

La determinación del grado de meteorización del macizo se realizó por observación directa del afloramiento y comparando con los índices de meteorización mostrados en la Tabla 8.

Tabla 8
Determinación del grado de meteorización del macizo. Modificado de ISRM (2014).

Grado de meteorización	Tipo	Descripción
I	Fresco	No se observan trazas de meteorización.
II	Ligeramente meteorizado	Toda la matriz rocosa está decolorada por la meteorización.
III	Moderadamente meteorizado	Menos del 50% del macizo rocoso se encuentra descompuesto y/o es un suelo residual. La roca fresca se observa como una estructura continua.
IV	Altamente meteorizado	Más del 50% del macizo se encuentra descompuesto y/o es en suelo residual. La roca fresca aparece como núcleos aislados.
V	Completamente meteorizado	Todo el macizo rocoso está descompuesto y/o es un suelo residual. Se observa la estructura original de la roca.
VI	Suelo residual	Todo el macizo rocoso es parte de un suelo residual. Se ha destruido la estructura de la roca y la fábrica del macizo.

De manera resumida se exponen todos los parámetros en la Figura 13.

1	RESISTENCIA A LA MATRIZ ROCOSA (Mpa)	ENSAYO DE CARGA PUNTUAL	> 10	10 - 4	4 - 2	2 - 1	COMPRESIÓN SIMPLE (MPa)		
		COMPRESIÓN SIMPLE	>250	250 - 100	100 - 50	50 - 25	25 - 5	5 - 1	<1
		PUNTUACIÓN	15	12	7	4	2	1	0
2	RQD		90 % - 100 %	75 % - 90 %	50 % - 75 %	25 % - 50 %	< 25 %		
		PUNTUACIÓN	20	17	13	6	3		
3	SEPARACIÓN DE DIACLASA		> 2 m	0.6 - 2 m	0.2 - 0.6 m	0.06 - 0.2 m	< 0.06 m		
		PUNTUACIÓN	20	15	10	8	5		
4	ESTADO DE LAS DISCONTINUIDADES	LONG DE LA DISCONTINUIDAD	< 1 m	1 - 3 m	3 - 10 m	10 - 20 m	> 20 m		
		PUNTUACIÓN	6	4	2	1	0		
		ABERTURA	Nada	< 0.1 mm	0.1 - 1.0 mm	1 - 5 mm	> 5 mm		
		PUNTUACIÓN	6	5	3	1	0		
		RUGOSIDAD	Muy Rugosa	Rugosa	Ligeramente Rugosa	Ondulada	Suave		
		PUNTUACIÓN	6	5	3	1	0		
		RELLENO	Ninguno	Relleno duro < 5 mm	Relleno duro > 5 mm	Relleno blando < 5 mm	Relleno blando > 5 mm		
		PUNTUACIÓN	6	4	2	2	0		
		ALTERACIÓN	Inalterada	Ligeramente Alterada	Moderadamente alterada	Muy alterada	Descompuesta		
		PUNTUACIÓN	6	5	3	1	0		
5	AGUA FREÁTICA	CAUDAL POR 10M DE TUNEL	Nulo	< 10 litros/min	10 - 25 litros/min	25 - 125 litros/min	> 125 litros/min		
		RELACIÓN: PRESIÓN DE AGUA/TENSIÓN PRINCIPAL MAYOR	0	0 - 0.1	0.1 - 0.2	0.2 - 0.5	> 0.5		
		ESTADO GENERAL	Seco	Ligeramente húmedo	Húmedo	Goteando	Agua fluyendo		
		PUNTUACIÓN	15	10	7	4	0		
CLASIFICACIÓN	CLASE	I	II	III	IV	V			
	CALIDAD	Muy Buena	Buena	Media	Mala	Muy Mala			
	PUNTUACIÓN	100 - 81	80 - 61	60 - 41	40 - 21	< 20			

Figura 13. Clasificación geomecánica Rock Mass Rating, RMR Bieniawski (1989)

2.6.4 Esclerómetro *IN SITU*

Se empleó el Martillo de Schmidt con el objeto de estimar la resistencia a compresión simple de la matriz de la roca, por ser de uso rápido y ágil. Para la ejecución del ensayo en laboratorio, se sometió a la matriz rocosa (afloramiento) a 20 golpes (rebotes), seguidamente se empleó el criterio de la ASTM D5873-14 (2023) y Barton (1978), que resumidamente señala que se tomarán 20 datos esclerométricos de los cuales se ordenarán de mayor a menor y se descartarán el 50% de datos más bajos, de los datos resultantes se obtendrá una media aritmética, este valor (R), servirá para obtener la resistencia a la compresión simple mediante el ábaco de Miller (Figura 9) sugerido para el esclerómetro utilizado (Martillo de Schmidt tipo L). El peso específico se obtuvo mediante el método de Arquímedes, con el uso de una balanza y un recipiente graduado de capacidad de 5 litros.

2.7 Análisis estadístico de datos

El análisis estadístico consiste en distinguir la tendencia que tiene una serie de datos (población y muestra), mediante criterios estadísticos como: desviación estándar, coeficiente de variación y selección del método de regresión idóneo.

2.7.1 Población y muestra

La población para el presente estudio son todas las rocas de la Unidad El Laurel, ubicadas en la cantera Mocal, la muestra son un total de 16 rocas en las cuales se ha realizado ensayos de compresión simple, triaxial y PLT.

2.7.2 Desviación estándar

Es una medida estadística que indica cuánto varían los valores de un conjunto de datos con respecto a la media (Ecuación 2.4). Una desviación estándar alta indica que los

datos están más dispersos, mientras que una desviación estándar baja indica que los datos están más concentrados alrededor de la media.

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (2.4)$$

La ecuación 2.4 describe la desviación estándar (s) para una muestra de datos, donde: s es la desviación estándar de la muestra; n es el tamaño de la muestra; x_i son los valores individuales en la muestra. \bar{x} es la media de la muestra.

2.7.3 Coeficiente de variación

Se trata de un indicador estadístico empleado para describir la variabilidad relativa de un conjunto de datos respecto a su media aritmética (Ecuación 2.5), permite comparar la variabilidad relativa entre diferentes conjuntos de datos, especialmente cuando los conjuntos de datos tienen diferentes unidades de medida, como es el caso de los ensayos que se comparan en este estudio.

$$CV = \left(\frac{s}{\bar{x}}\right) \times 100 \quad (2.5)$$

La Ecuación 2.5 describe el cálculo del coeficiente de variación (CV), un coeficiente de variación menor indica una menor variabilidad relativa.

2.7.4 Modelos de regresión

Son herramientas estadísticas utilizadas para investigar y modelar la relación entre una variable dependiente y una o más variables independientes.

2.7.4.1 Regresión Exponencial

Este modelo de regresión suele utilizarse cuando los datos muestran un crecimiento o una disminución exponencial, es decir, cuando la tasa de cambio de la variable dependiente es proporcional a su valor actual. La Ecuación 2.6 describe la forma general de una regresión exponencial, donde “y” es el valor de la función, “a” es el coeficiente factor de escala, “b” es la base de la función exponencial, y “x” es la variable independiente.

$$y = a \cdot b^x \quad (2.6)$$

2.7.4.2 Regresión lineal

Este modelo se utiliza cuando los datos muestran una relación lineal (descritas por una pendiente que domina el comportamiento de la recta) entre la variable dependiente y la variable independiente. La Ecuación 2.7 describe la forma general de una regresión exponencial, donde “y” es el valor de la función, “m” es la pendiente de la línea, que indica la inclinación de la línea en el plano cartesiano. La pendiente determina cuánto cambia “y” por cada unidad de cambio en “x” y “b” es la ordenada al origen, que es el punto donde la línea cruza el eje “y” en el plano cartesiano.

$$y = mx + b \quad (2.7)$$

2.7.4.3 Regresión logarítmica

En un modelo de regresión logarítmica, la relación entre la variable dependiente y la variable independiente se modela utilizando una función logarítmica. La Ecuación 2.8 describe la forma general de una regresión exponencial, donde “y” es el valor de la función, “b” es la base del logaritmo, que debe ser un número real positivo y diferente de 1, “x” es la variable independiente, y debe ser un número real positivo.

$$y = \log_b(x) \quad (2.8)$$

2.7.4.4 Regresión potencial

Este modelo se utiliza cuando los datos muestran una relación en la que una variable cambia en proporción a una potencia de la otra variable. La Ecuación 2.9 describe la forma general de una regresión exponencial, donde “y” es el valor de la función, “a” es el coeficiente, que actúa como un factor de escala; “x” es la variable independiente y “b” es el exponente, que determina la potencia a la cual se eleva la variable “x”.

$$y = a \cdot x^b \quad (2.9)$$

2.7.4.5 Coeficiente de determinación

Conocido como R^2 , en un modelo de regresión es una medida estadística que indica cuánta variabilidad en la variable dependiente puede explicarse por el modelo de regresión. R^2 puede indicar la calidad del ajuste del modelo, pero no proporciona información sobre la validez del modelo en términos de causalidad o la importancia de las variables independientes en la predicción de la variable dependiente. Cuanto más cercano sea R^2 a 1, mejor es el ajuste del modelo a los datos.

3. CAPÍTULO III: MARCO METODOLÓGICO

El estudio es descriptivo, debido a que analiza variables como las propiedades mecánicas-elásticas de macizos rocosos como: módulos de elasticidad (Módulo de Young y coeficiente Poisson), cohesión y ángulo de fricción interna. Temporalmente es transversal, ya que se desarrolló durante los últimos seis meses, además es prospectivo-experimental que solventará a futuro toma de decisiones, gestión y determinación de propiedades geomecánicas en los mármoles de La Unidad El Laurel a través de las correlaciones empíricas que emanen de este estudio.

La metodología empleada se ha enfocado en el análisis de la información obtenida en la campaña de ensayos de laboratorio ejecutada en el 2022 por CECAL, la misma que consta de ensayos: Point Load Test (PLT), peso específico, triaxiales y ensayos de compresión con módulos elásticos; a lo largo de los tres cuerpos mineralizados (mármoles) ubicados en la cantera.

El proceso se realizó en 3 fases (Figura 14), evaluando información del macizo rocoso, generando cartografía, analizando la información de los laboratorios ejecutados en el año 2022 y definiendo las respectivas correlaciones de los parámetros mecánicos-elásticos del macizo rocoso.

3.1 Etapa de preparación

En esta etapa se consideró el análisis de toda la información existente con la que cuenta la mina, donde se destaca toda la información bibliográfica (mapas, informes, bases de datos, etc.), además de la interpretación de sensores remotos, que permitieron obtener un diagnóstico adecuado sobre la situación actual de la mina. Además, durante esta etapa se revisaron los ensayos realizados por la empresa en el año 2022, para poder establecer las

correlaciones. Al fin de esta etapa se obtuvo una cartografía preliminar sobre la cual se actualizó toda la información de las diferentes geo-travesías.

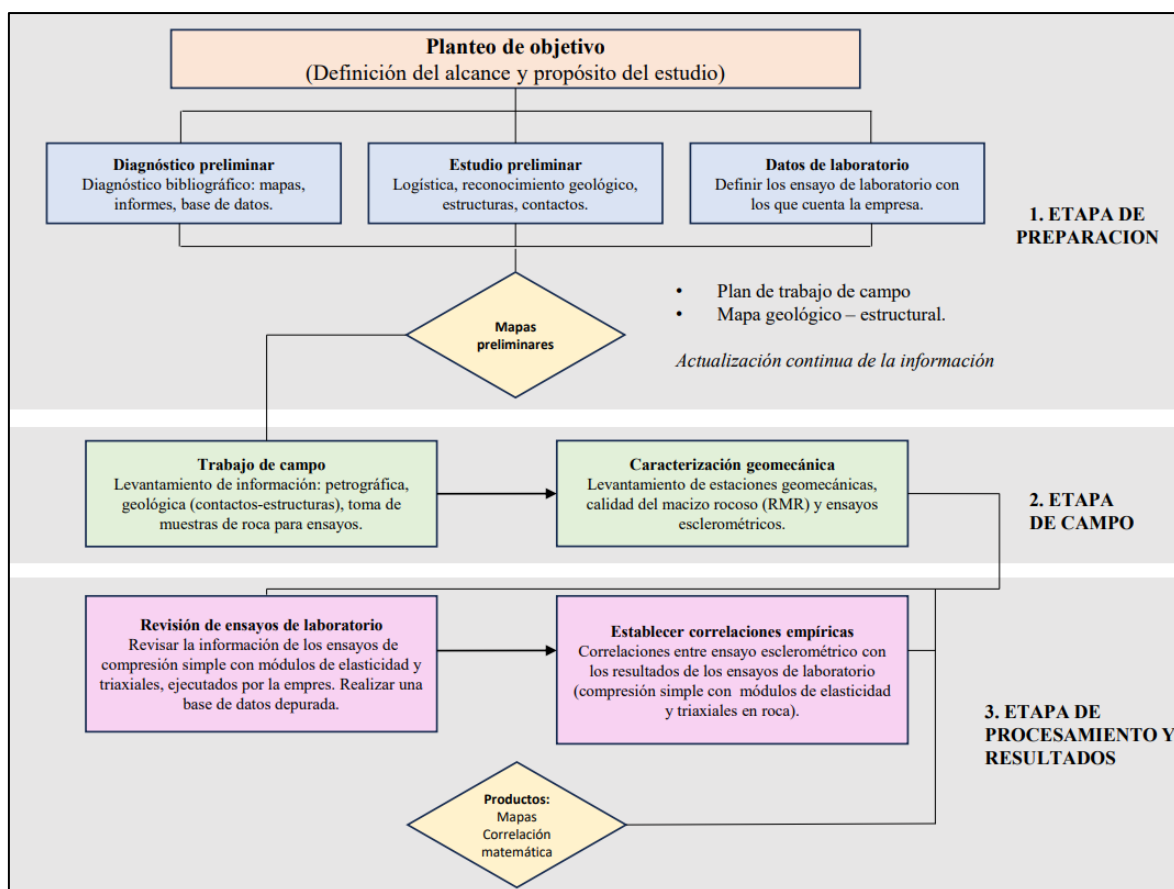


Figura 14. Metodología utilizada para la ejecución del presente estudio.

3.2 Etapa de preparación

En esta etapa se consideró el análisis de toda la información existente con la que cuenta la mina, donde se destaca toda la información bibliográfica (mapas, informes, bases de datos, etc.), además de la interpretación de sensores remotos, que permitieron obtener un diagnóstico adecuado sobre la situación actual de la mina. Además, durante esta etapa se revisaron los ensayos realizados por la empresa CECAL en el año 2022, para poder establecer las correlaciones. Al fin de esta etapa se obtuvo una cartografía preliminar sobre la cual se actualizó toda la información de las diferentes geo-travesías.

3.3 Etapa de campo

Durante la visita de campo se realizó el levantamiento de la siguiente información: análisis petrográficos de las diferentes unidades litológicas, definición de contactos geológicos, mapeo geológico a detalle (Escala: 1:1000) y toma de datos estructurales.

Además, se realizó la caracterización geomecánica mediante el levantamiento de estaciones de control, definidas previamente a lo largo de la mina, donde se levantaron parámetros geomecánicos y la calificación IN-SITU del macizo rocoso en base al RMR, obteniendo así mediciones esclerométricos in situ para cada estación geomecánica y cada macizo rocoso del cual se obtuvieron las muestras de laboratorio en la campaña 2022.

3.4 Etapa de procesamiento y resultados

De los resultados obtenidos de la fase de campo se realizaron los distintos análisis de los parámetros resistentes del ensayo esclerométrico (rebotes y resistencia a la compresión uniaxial no confinada - RCS) en función a los parámetros elásticos, cohesión y ángulo de fricción del macizo rocoso (de ensayos de laboratorio), obteniendo así una correlación matemática entre dichos parámetros.

4. CAPÍTULO IV: DATOS DE CAMPO Y DE LABORATORIO

4.1 Datos de campo

En este acápite se detalla toda la recopilación integral de los estudios realizados durante la fase de campo.

4.1.1 Levantamiento geológico

La descripción de las unidades geológicas es el resultado del procesamiento de datos obtenidos en levantamientos geológicos expeditivos y detallados, realizados por redes de drenaje, senderos y a lo largo de los cuerpos mineralizados (Cantera Mocoral), lugares que permitieron comprobar y/o descartar ciertos rasgos estructurales, geológicos, geomorfológicos y los distintos fenómenos de remoción en masa; trazados previamente con la fotointerpretación y uso de anaglifos.

A continuación, se realiza una descripción sintetizada de las unidades litoestratigráficas rescatando sus características litológicas, texturales, meteorización y estructurales.

El mapa y perfiles geológicos locales a escala 1:1000 (Figura 15 hasta la Figura 18), abarcan el área donde se desarrolla la extracción de mineral (cuerpos mineralizados), la cartografía se basa en la caracterización de los depósitos coluviales, aluviales, roca fresca y meteorizada de las unidades geológicas: Pilatón, El Laurel y los cuerpos intrusivos (Batolito de Apuela) que se distribuyen en su totalidad dentro de la superficie de estudio.

Los perfiles geológicos se complementaron con información geológica y relogueo de los testigos de perforación, para la identificación de contactos litológicos.

4.1.1.1 Unidad Pilatón (KPI)

En la parte superior de los cuerpos mineralizados se expone esta unidad litológica (Figura 15A) en contacto tectónico (320/80) con la Unidad El Laurel, en la zona de contacto se genera un cizallamiento con una cinemática preferentemente dextral. Las observaciones de campo señalan que hacia el Este (quebradas aledañas a la concesión) se encuentra una secuencia volcánica conformada por areniscas y material de tipo andesítico (plagioclasa + vidrio volcánico + anfíbol + clorita \pm epidota).

Petrografía macroscópica: El análisis petrográfico macroscópico unido a las observaciones de campo, han permitido describir de forma general la paragénesis mineral de las rocas con el fin de caracterizar las principales variedades litológicas:

- **Areniscas volcánicas**

Afloran en la parte superior de los cuerpos mineralizados de la cantera Mocoral, también por el sendero que va desde las oficinas hacia el cuerpo mineralizado 1, esta unidad litológica posee una pseudo-estratificación (330/85, Figura 15B), además de pequeños niveles tobáceos incipientes.

De acuerdo a las observaciones macroscópicas las areniscas poseen tonalidades café verdosas (debido a la meteorización) con textura clástica, con un tamaño de grano promedio de 0.5 mm, los clastos son mayormente volcánicos con formas subredondeadas a redondeadas. Petrográficamente, esta unidad se compone principalmente de minerales como cuarzo, plagioclasa, hornblenda \pm piroxeno, además de una fuerte incidencia de fragmentos líticos volcánicos (Figura 15C); como minerales secundarios se identifican: clorita y cuarzo; así mismo se observan minerales accesorios de calcita, epidota, sulfuros diseminados y amplias zonas de oxidación. Con poca frecuencia se encuentra la presencia de sulfuros diseminados entre las caras de las discontinuidades, evidencia de una mineralización post-

sedimentaria relacionada a los fluidos mineralizantes producto del emplazamiento de los cuerpos intrusivos.

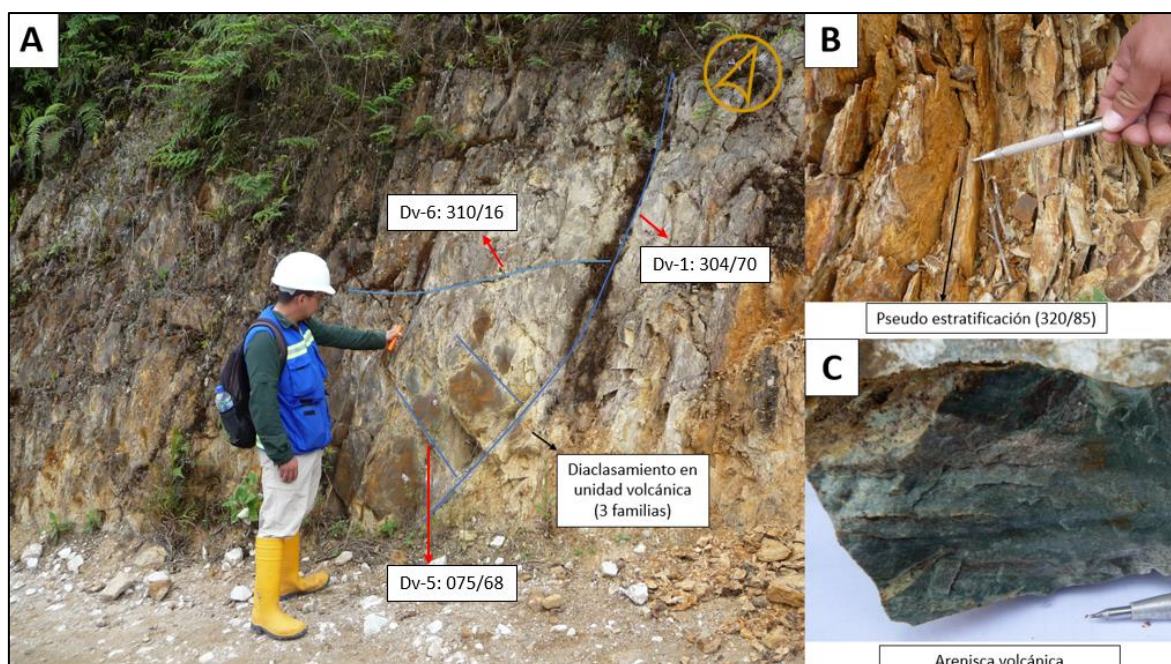


Figura 15. Rocas volcano-sedimentarias de la Unidad Pilatón. A) Se observa la presencia de 3 familias ortogonales de diaclasas en el macizo rocoso ubicado en la parte superior del cuerpo mineralizado 3 (Datum WGS 84, zona 17N: 772144 E; 28517 N). B) Material con alta oxidación y moderada meteorización con pseudo estratificación en las areniscas volcánicas de la Unidad Pilatón (320/85), misma que se correlaciona con el dato estructural entre el contacto de los mármoles con las rocas volcánicas. C) Roca volcanosedimentaria de tonalidad verdosa perteneciente a la Unidad Pilatón posee una textura clástica con líticos volcánicos, plagioclasa y hornblenda.

4.1.1.2 Unidad El Laurel (EL)

La unidad comprende los cuerpos mineralizados (1, 2 y 3; Figura 16A) en los que se realiza las labores de extracción de la cantera Mocoral, se exponen con una forma alargada en dirección preferencial NE-SW. Los principales afloramientos se exhiben en los taludes de liquidación del cuerpo 2 (Figura 16B). Además, las rocas de esta unidad se encuentran fracturadas, ocasionalmente cizalladas y presenta además zonas de disolución (zonas kársticas) de manera puntual (Figura 17C).

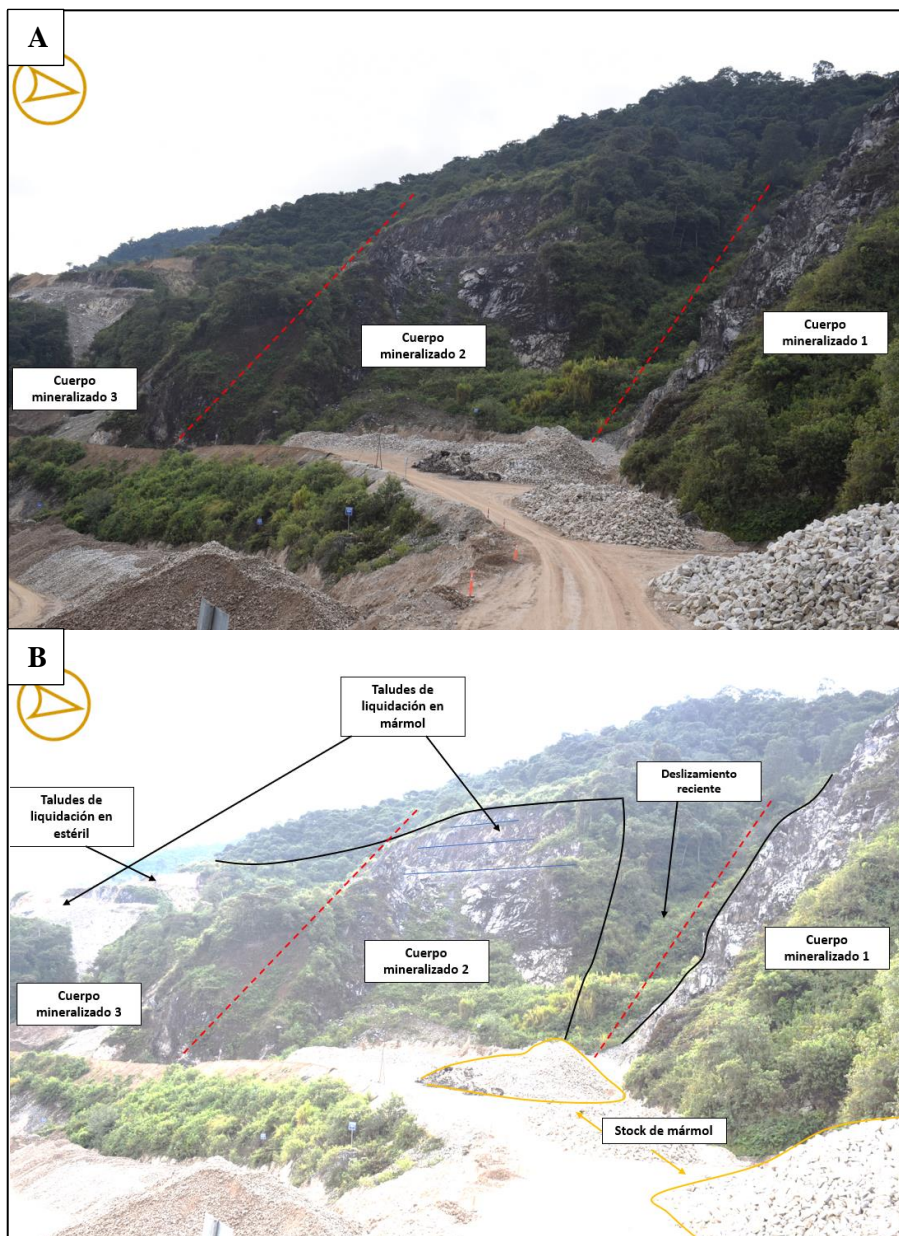


Figura 16. Cuerpos mineralizados presentes en la cantera Mocoral. A) Visualización de los cuerpos mineralizados en la cantera Mocoral. B) Esquema morfológico de los cuerpos mineralizados, donde se observa entre el cuerpo 1 y 2 la presencia de un deslizamiento activo, además de notar la existencia de una capa sobreyacente a los cuerpos mineralizados, misma que litológicamente corresponde a coluviales y regolitos de las unidades litológicas que las suprayacen.

Petrografía macroscópica: Mediante observaciones en planta, la unidad se constituye de rocas calcáreas metamorizadas a mármol con pequeñas zonas de impurezas, representado por mármoles de tonalidades más oscuras.

- **Mármol bandeado**

Mármol de tonalidades gris oscuras a claras y blanquecinas con una textura no foliada, que incluyen cristales de calcita (Figura 17B) de grano medio a grueso (3-6mm), como minerales accesorios se presentan: rodonita, rodocrosita, malaquita y en las caras de las discontinuidades óxidos de hierro de tonalidades anaranjadas. El mármol se encuentra con ligeros bandeamientos continuos, de tonalidades grisáceas, que son macroscópicamente notorios. La orientación de este bandeamiento coincide con el dato estructural del contacto entre las areniscas de la unidad Pilatón y el mármol.

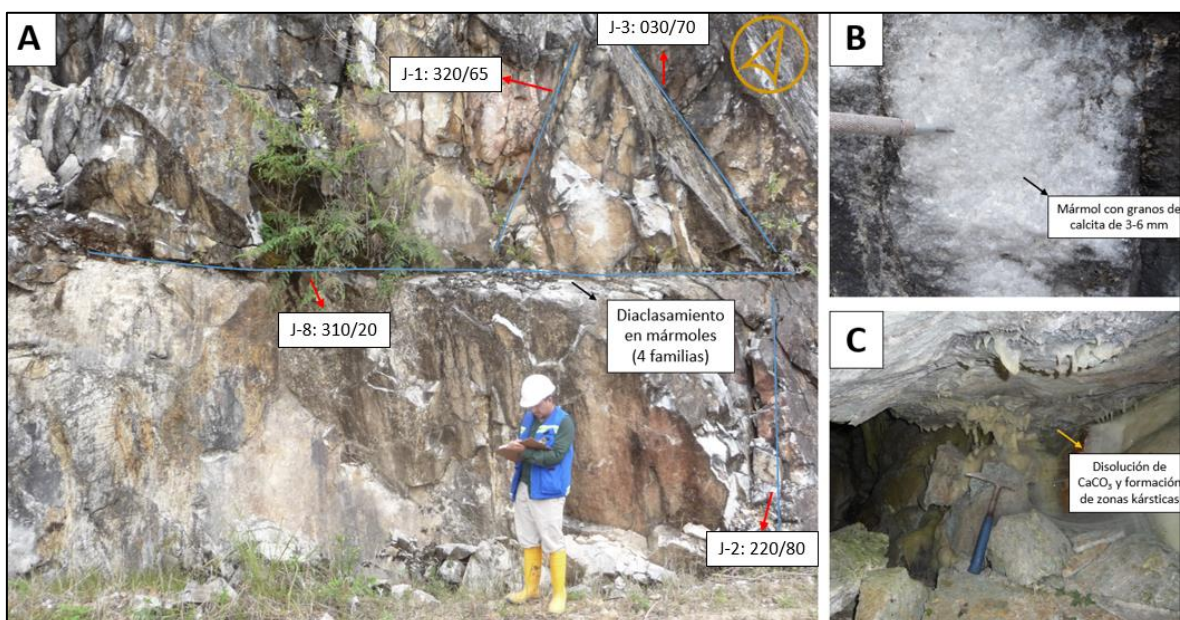


Figura 17. Mármoles pertenecientes a la Unidad El Laurel. A) Se observa la presencia de 4 familias ortogonales de diaclasas que de manera general representan a todo el macizo rocoso perteneciente a esta unidad (Cuerpo 2, datum WGS84, zona 17N: 772014 E; 28420 N). B) Mármol granuloso con cristales de calcita de entre 3-6 mm con alta reacción al Ácido Clorhídrico al 10 % (HCl) y alta pureza. C) Formación de zonas kársticas debido a la disolución del Carbonato de calcio (CaCO_3), poseen una potencia de entre 60-80 cm (Cuerpo 1, datum WGS84, zona 17N: 772015 E; 28536 N).

4.1.1.3 Depósitos coluviales

Estos depósitos se encuentran sobreyaciendo a las unidades: El Laurel y Pilatón, comprende depósitos de tipo matriz soportada; en la cantera Mocoral se observa un gran

coluvial reciente entre los cuerpos mineralizados 2 y 3, mismo que ha generado inestabilidad en bancos superiores (Datum WGS 84, zona 17N: 771908 E; 28322 N) (Figura 18A y B).

Petrografía macroscópica: Mediante observaciones directas en campo, la unidad constituye un nivel sedimentario de tipo matriz soportada. Los clastos son de composición volcánica (35%) y calcárea (65%) de forma redondeada a subredondeada, con un tamaño de clastos promedio de 12 cm. La matriz corresponde a un material de tipo limo arenoso de tonalidades café amarillentas (Figura 18C).

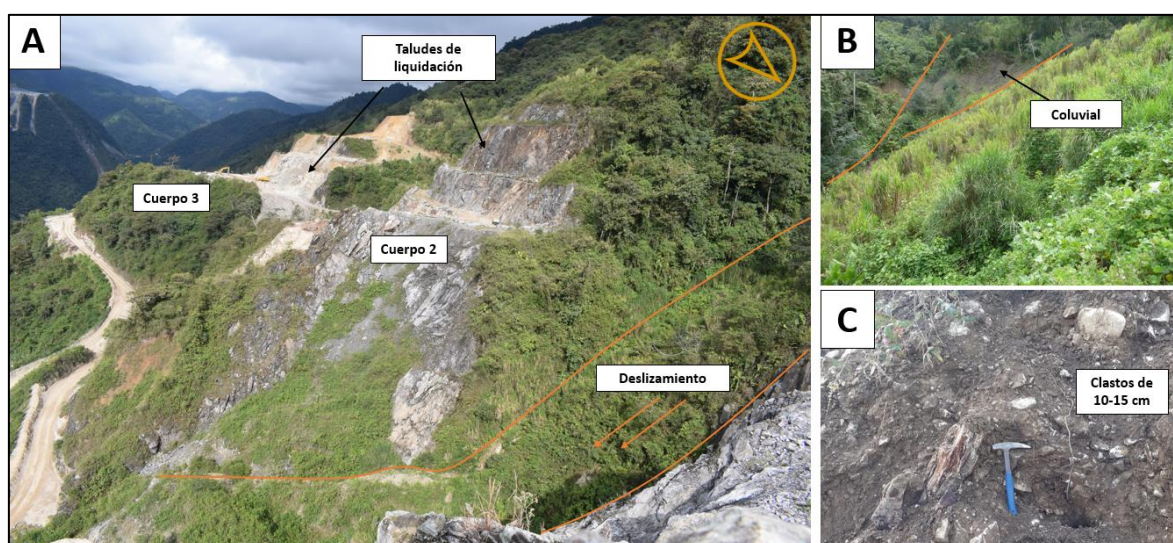


Figura 18. Disposición morfológica de los coluviales. A) El deslizamiento se encuentra en la divisoria de los cuerpos 1 y 2. B) El material coluvial se encuentra en proceso de revegetación. C) El depósito es de tipo matriz soportada con matriz de tipo limo arcillosa y clastos con un tamaño promedio de 10-15cm de composición volcánica y calcárea.

4.1.1.4 Batolito de Apuela

Los principales afloramientos se encuentran al noroeste de la zona de estudio, específicamente bajo el nivel 1720 msnm en el camino que se encuentra bajo los taludes de liquidación de los cuerpos mineralizados. En general en los afloramientos se muestran rocas moderadamente meteorizadas y alteradas con textura granular.

Petrografía macroscópica: En la parte noroeste de la cantera (cerca de las piscinas de sedimentación), en la quebrada SN se exhibe claramente esta unidad litológica (Figura

19A), además en zonas puntuales las granodioritas experimentan alteración a arcillas y óxidos en las discontinuidades. La composición de esta unidad es granodiorítica-diorítica con textura fanerítica, fenocristales subhedrales-anhedrales con tamaños que no superan los 3.5 mm. La paragénesis mineral se compone por plagioclasa, cuarzo, hornblenda y con minerales accesorio de epidota y biotita (Figura 19B).

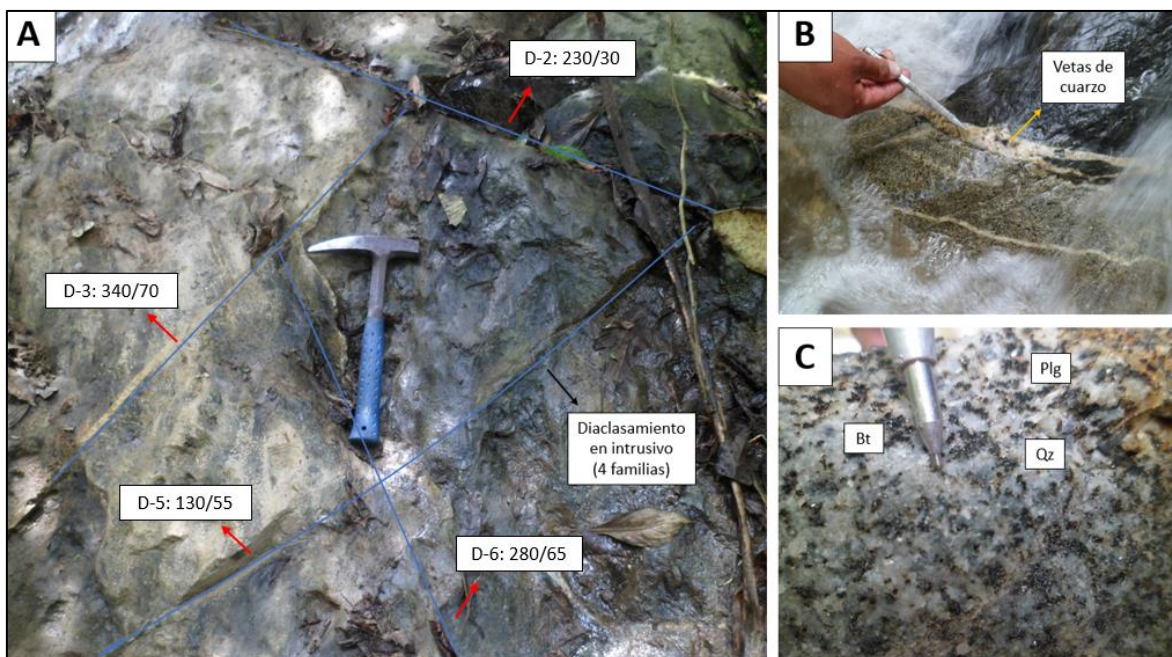


Figura 19. Batolito de Apuela, caracterizado por una roca de tipo granodiorita. A) Se observan 4 familias ortogonales de diaclasas en el macizo rocoso. (Datum WGS84, zona 17N: 771662 E; 29093 N). B) En el lecho de la quebrada SN se observan zonas de relleno de vetas de Qz ocasionadas por pulsaciones graníticas post genéticas. C) La asociación mineral de las rocas se compone por plagioclasa (Plg), cuarzo (Qz), hornblenda y como minerales accesorio epidota y biotita (Bt).

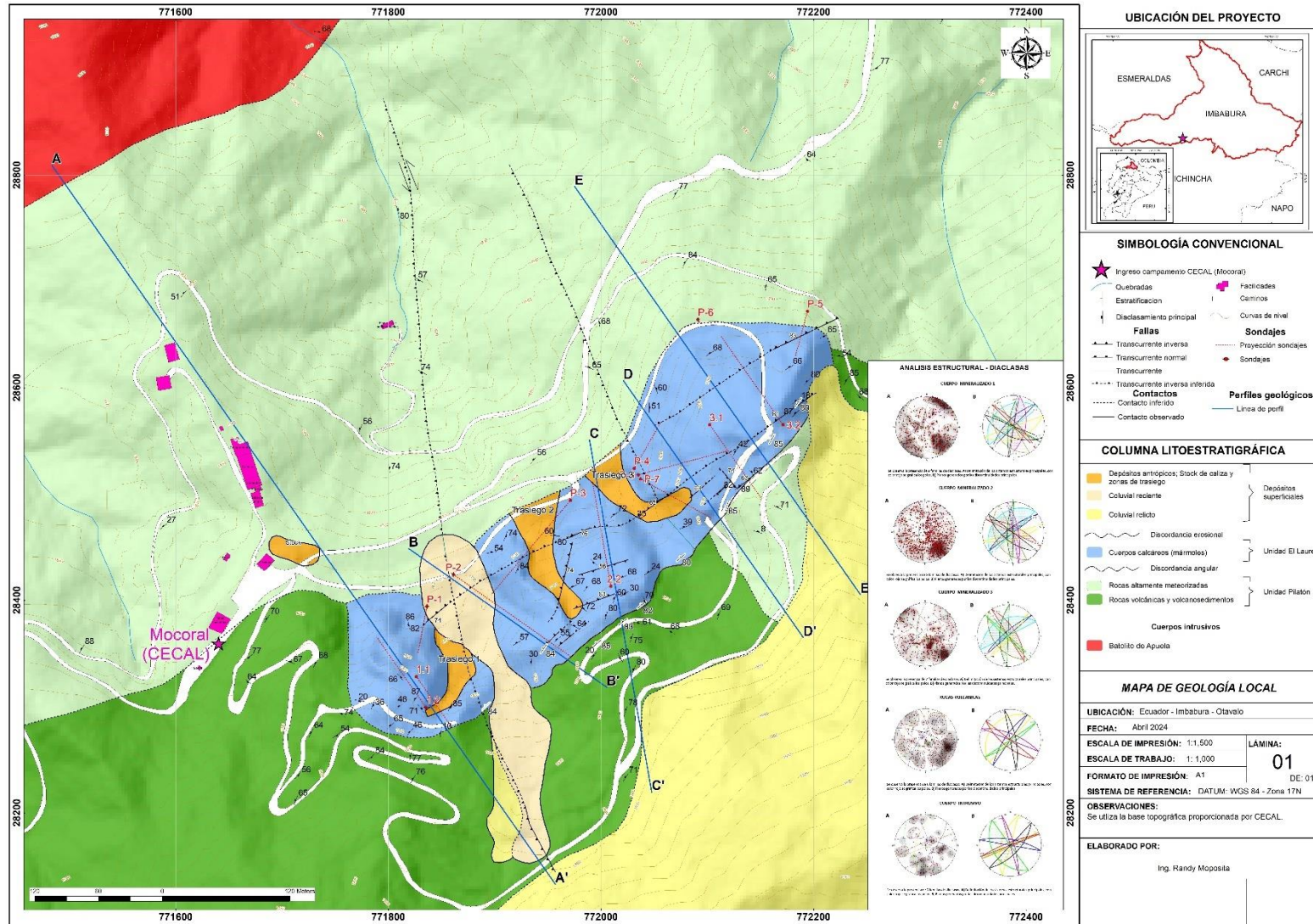


Figura 20. Mapa geológico escala 1:1,000 en las inmediaciones de los cuerpos mineralizados de la cantera Mocoral.

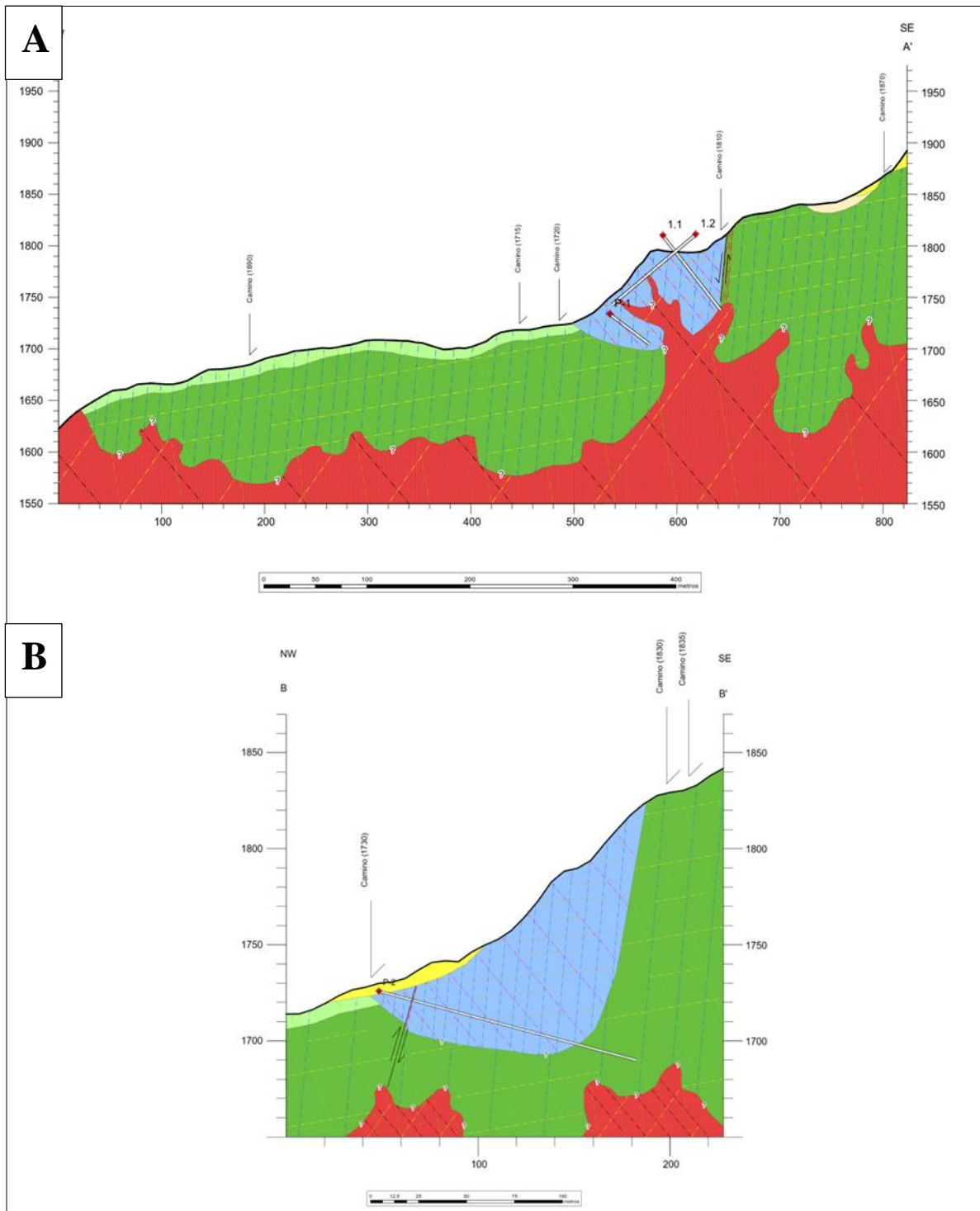


Figura 21. Perfiles geológicos en las líneas de perfil AA' y BB'. A) Se muestra la disposición geológica en base a las interpretaciones de campo (planta) y correlaciones de los sondajes 1.1, 1.2 y P-1. B) Se muestra la disposición geológica en base a las interpretaciones de campo (planta) y correlaciones del sondaje P-2.

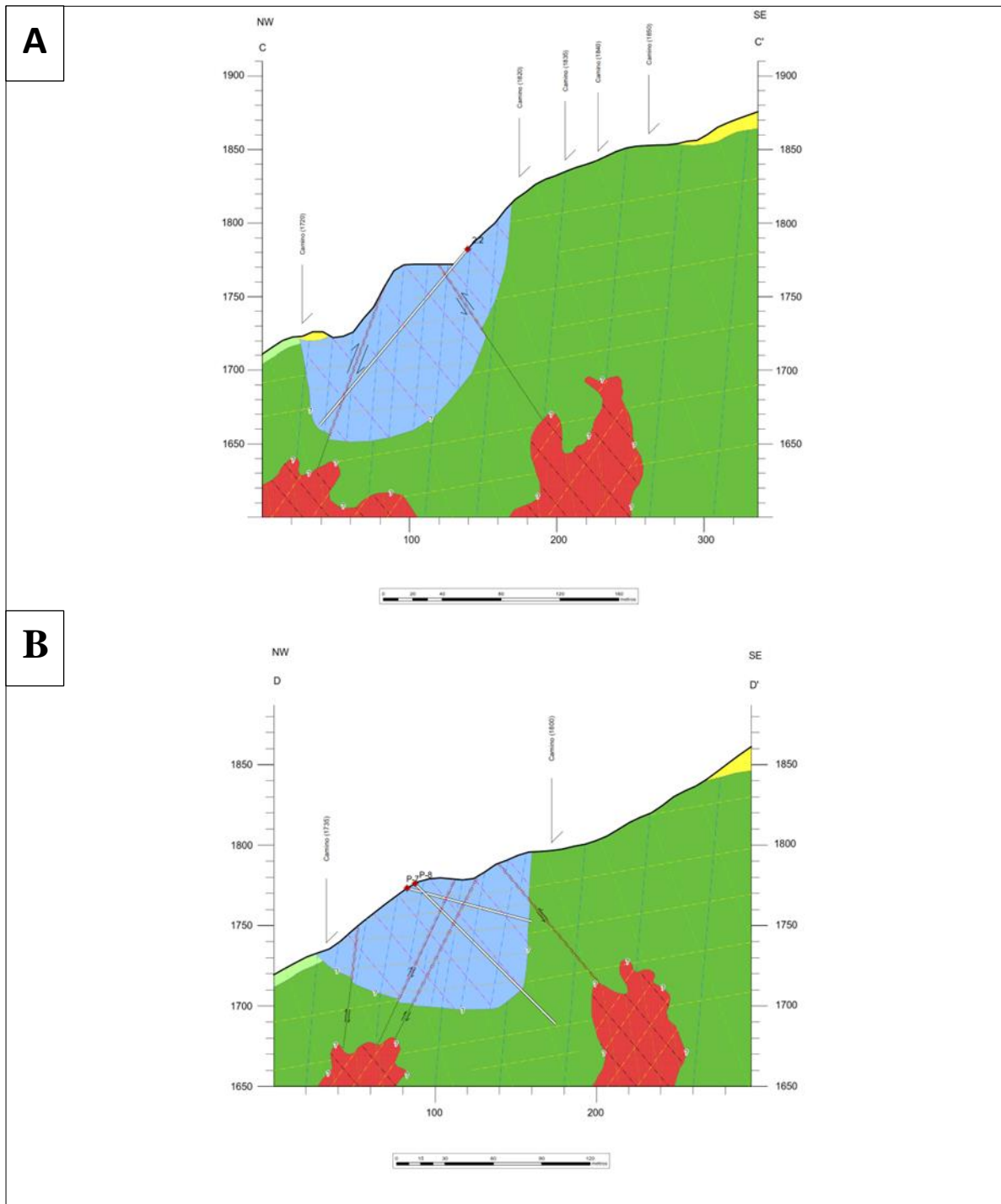


Figura 22. Perfiles geológicos en las líneas de perfil CC' y DD'. A) Se muestra la disposición geológica en base a las interpretaciones de campo (planta) y correlaciones del sondaje 2.2. B) Se muestra la disposición geológica en base a las interpretaciones de campo (planta) y correlaciones de los sondajes P-7 y P-8.

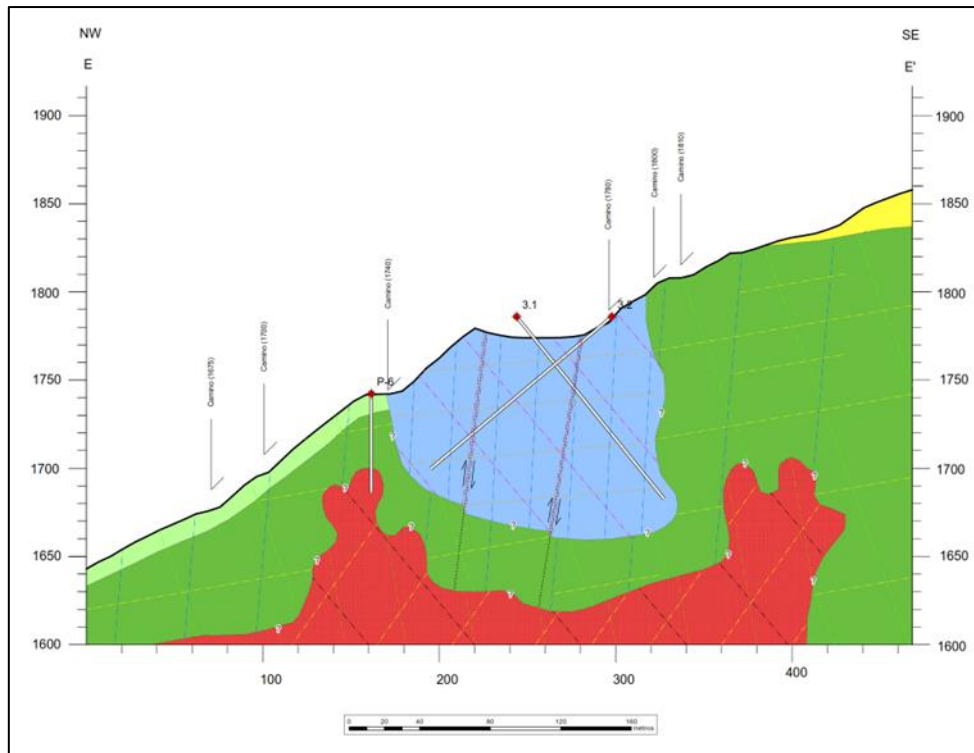


Figura 23. Perfil geológico en la línea de perfil EE'. Se muestra la disposición geológica en base a las interpretaciones de campo (planta) y correlaciones de los sondajes P-6, 3.1 y 3.2.

4.1.2 Análisis estructural

Se ha identificado un fallamiento preferencial en sentido NE-SW con buzamientos moderados a fuertes hacia el NW, estos trazos de falla corresponden a una cinemática tipo inversa. Estas fallas inciden en un diaclasamiento a lo largo de las unidades litoestratigráficas, en los siguientes numerales se detallan los análisis mediante estereodiagramas.

4.1.2.1 Familias de diaclasas en la unidad El Laurel

De manera general en los cuerpos mineralizados se han identificado nueve sistemas importantes visibles en el estereodiagrama (Figura 24). El sistema J-1 presenta un rumbo preferencia N51°E con buzamientos altos de hasta 70° inclinado hacia el NW. La familia J-2, viaja paralela a la J-5 pero con buzamientos altos hacia el SW, de igual forma la familia J-3 mantiene una tendencia N45°W con fuertes inclinaciones hacia el NE. Como componentes

ortogonales se disponen las familias J-4 y J-8 cuya dirección preferencial recorre con tendencia NE con inclinaciones bajas menores a 74° tanto al SE como al NW (Tabla 9).

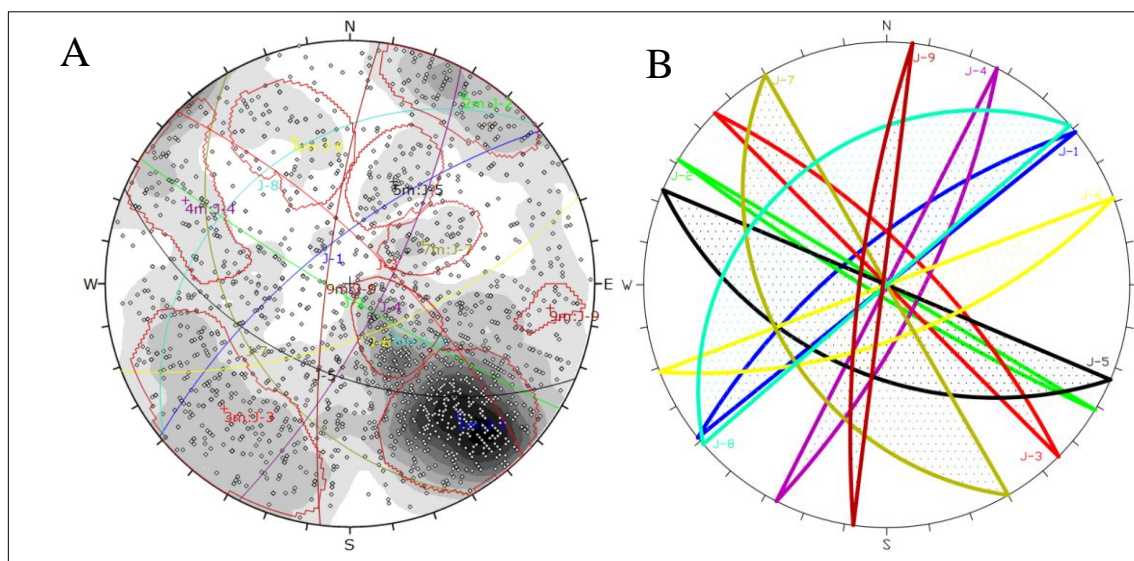


Figura 24. Estereodigramas para los 2279 datos estructurales tomados en los cuerpos mineralizados. A) Se muestra los polos (puntos rojos) de los datos estructurales, además de la concentración de datos, agrupados en 9 familias principales. B) Se muestran los planos que generan las 8 familias principales de diaclasas.

Tabla 9

Familias principales de diaclasas encontradas en los cuerpos mineralizados

ORIENTACIÓN DE DIACLASAS – CUERPOS MINERALIZADOS		
Plano	Rumbo/ Buzamiento	Dip direction / Dip
J-1	N51°E/70°NW	321/70
J-2	N59°W/84°SW	211/84
J-3	N45°W/72°NE	045/72
J-4	N27°E/74°SE	117/74
J-5	N67°W/49°SW	203/49
J-6	N69°E/65°SE	159/65
J-7	N30°W/38°SW	240/38
J-8	N49°E/30°NW	319/30
J-9	N07°E/75°E	277/75
<i>Datos:</i>		2275 polos

4.1.2.1.1 Cuerpo Mineralizado 1

Se identifican nueve sistemas principales, visibles en el estereodiagrama (Figura 25). El primer sistema (J-1), tiene un rumbo preferencial de N44°E con buzamientos altos de hasta 64° inclinado hacia el NW. La familia J-2, viaja paralela a la J-5 pero con buzamientos altos hacia el SW, de igual forma la familia J-3 mantiene una tendencia N45°W con fuertes inclinaciones hacia el NE. Como componentes ortogonales se disponen las familias J-4 y J-8 cuya dirección preferencial recorre con tendencia NE con inclinaciones bajas menores a 45° tanto al SE como al NW (Tabla 10).

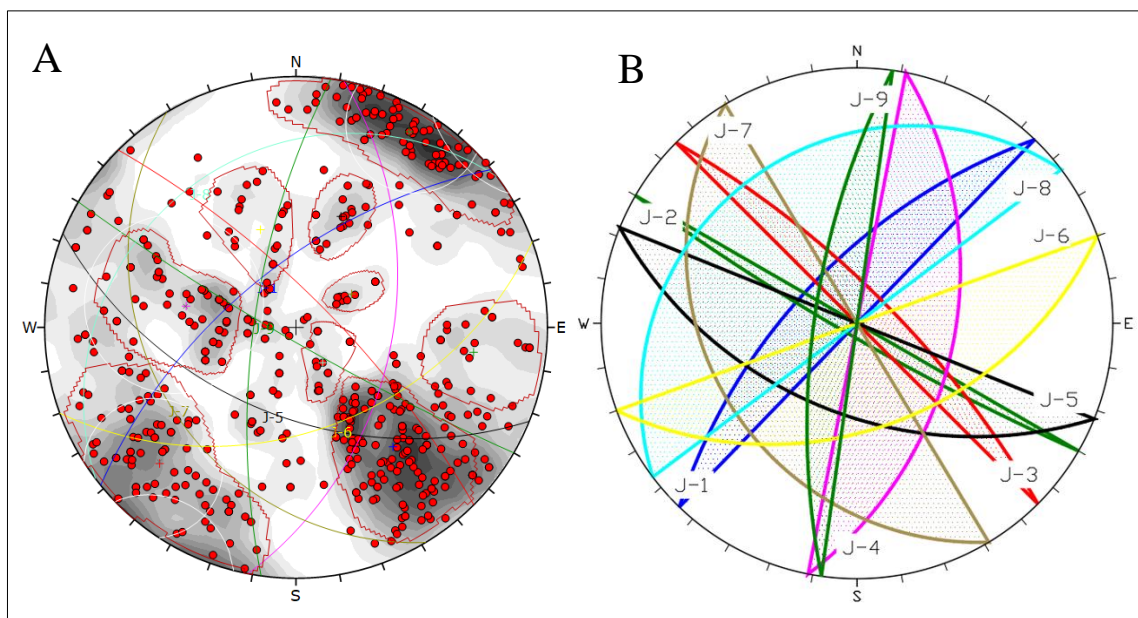


Figura 25. Estereodiagramas para los 569 datos estructurales tomados en el cuerpo mineralizado 1. A) Se muestra los polos (puntos rojos) de los datos estructurales, además de la concentración de datos agrupados en 9 familias principales. B) Se muestran los planos que generan las 9 familias principales de diaclasas.

Se puede observar que existen sistemas de diaclasamiento ortogonales, como es el caso de las familias $J-3 \perp J-8$, $J-5 \perp J-9$, $J-6 \perp J-1$; estas fracturas son generadas por la incidencia del contacto tectónico entre la Unidad El Laurel (material metamórfico - mármol) con la Unidad Pilatón (material volcanoclástico). Desde un punto de vista cinemático se puede observar claramente que existirá intersección entre las diaclasas, lo que generará acuñaamientos en el macizo rocoso, ocasionando inestabilidad en el talud.

Tabla 10

Familias principales de diaclasas encontradas en el cuerpo mineralizado 1

ORIENTACIÓN DE DIACLASAS - CUERPO 1		
Plano	Rumbo/ Buzamiento	Azimut Buz. /Buzamiento
J-1	N44°E/64°NW	314/64
J-2	N60°W/84°SW	210/84
J-3	N45°W/75°NE	045/75
J-4	N11°E/48°SE	101/48
J-5	N68°W/51°SW	202/51
J-6	N70°E/45°SE	160/45
J-7	N31°W/29°SW	239/29
J-8	N53°E/20°NW	323/20
J-9	N08°E/71°E	278/71
<i>Datos:</i>		<i>569 polos</i>

4.1.2.1.2 Cuerpo mineralizado 2

Se identifican ocho sistemas importantes visibles en el estereodiagrama (Figura 26). El sistema J-1 y J-6 presenta un rumbo preferencial entre N50°E a N75°E con buzamientos altos de hasta 70° inclinado hacia el NW y SE. La familia J-2 no se desarrolla en este sector, Las familias J-3 y J-5 mantienen paralelismo con buzamientos altos hacia el NE y SW, de igual forma la familia J-3 mantiene una tendencia N45°W con fuertes inclinaciones hacia el NE. La familia J-4 mantiene un rumbo N-S con buzamientos fuerte al W (Tabla 11).

Se puede observar que existen sistemas de diaclasamiento ortogonales, como es el caso de las familias J-1 \perp J-5, J-7 \perp J-2, J-1 \perp J-3; estas fracturas son generadas por el sistema estructural (fallamiento) del contacto tectónico entre la Unidad El Laurel con la Unidad Pilatón. Desde un punto de vista cinemático se puede observar claramente que existirá intersección entre las familias de diaclasas, lo que generará acuñaamientos en el macizo rocoso, ocasionando inestabilidad en el talud.

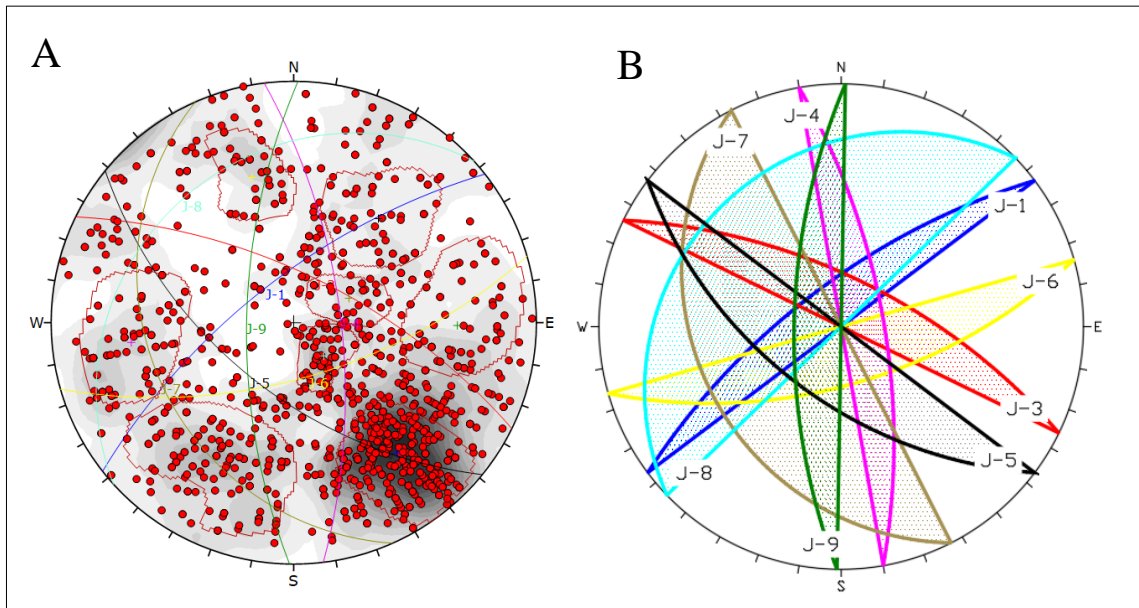


Figura 26. Estereodigramas para los 1227 datos estructurales tomados en el cuerpo mineralizado 2. A) Se muestra los polos (puntos rojos) de los datos estructurales, además de la concentración de datos agrupados en 8 familias principales. B) Se muestran los planos que generan las 8 familias principales de diaclasas.

Tabla 11

Familias principales de diaclasas encontradas en el cuerpo mineralizado 2

ORIENTACIÓN DE DIACLASAS - CUERPO 2		
Plano	Rumbo/ Buzamiento	Azimut Buz. /Buzamiento
J-1	N53°E/70°NW	323/70
-	-	-
J-3	N64°W/67°NE	026/67
J-4	N10°W/70°NE	080/70
J-5	N53°W/57°SW	217/57
J-6	N74°E/63°SE	164/63
J-7	N27°W/28°SW	243/28
J-8	N46°E/20°NW	316/20
J-9	N01°E/68°NW	271/68
<i>Datos:</i>		<i>1227 polos</i>

4.1.2.1.3 Cuerpo mineralizado 3

Se identifican siete sistemas importantes visibles en el estereodiagrama (Figura 27). El sistema J-1 y J-6 presenta un rumbo preferencial entre N40°E a N50°E con buzamientos altos de hasta 70° inclinado hacia el NW y SE. La familia J-2 recorre un rumbo N48°E con inclinación fuerte al SW. Las familias J-3 y J-7 mantienen paralelismo con buzamientos altos hacia el NE y SO, de igual forma la familia J-6 mantiene una tendencia N42°E con fuertes inclinaciones hacia el SE. La familia J-9 mantiene un rumbo N-S con buzamientos fuerte al W (Tabla 12).

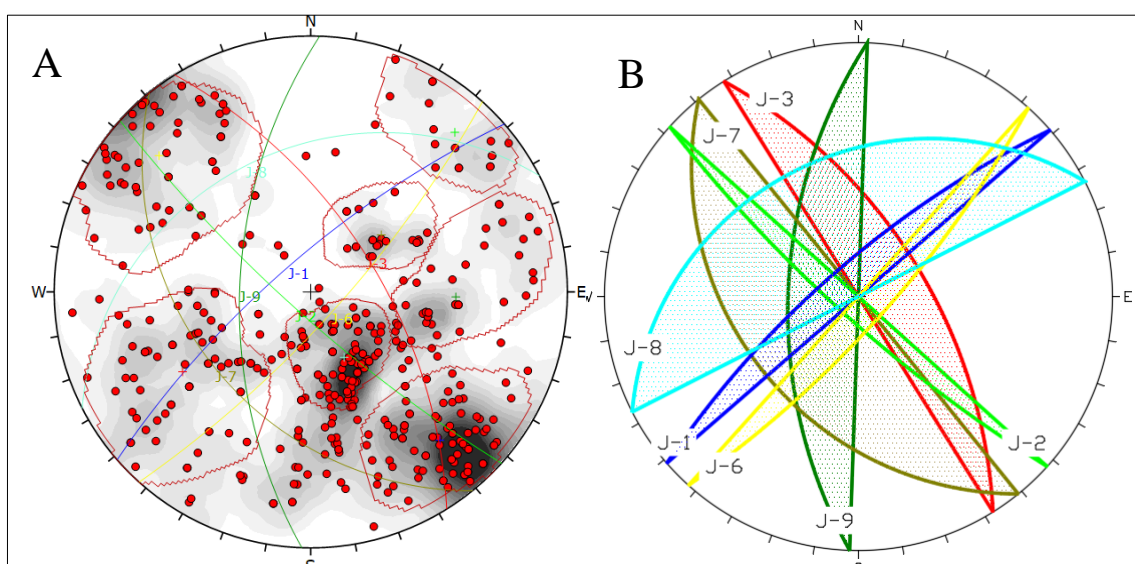


Figura 27. Estereodiagramas para los 483 datos estructurales tomados en el cuerpo mineralizado 3. A) Se muestra los polos (puntos rojos) de los datos estructurales, además de la concentración de datos agrupados en 7 familias principales. B) Se muestran los planos que generan las 7 familias principales de diaclasas.

Se puede observar que existen sistemas de diaclasamiento ortogonales, como es el caso de las familias $J-2 \perp J-1$, $J-2 \perp J-8$, $J-1 \perp J-7$; estas fracturas son generadas por el sistema estructural (fallamiento) del contacto tectónico entre la Unidad El Laurel con la Unidad Pilatón. Desde un punto de vista cinemático se puede observar claramente que existirá intersección entre las familias de diaclasas, lo que generará acuñaamientos en el macizo rocoso, ocasionando inestabilidad en el talud.

Tabla 12

Familias principales de diaclasas encontradas en el cuerpo mineralizado 3

ORIENTACIÓN DE DIACLASAS - CUERPO 3		
Plano	Rumbo/ Buzamiento	Azímüt Buz. /Buzamiento
J-1	N49°E/75°NW	319/75
J-2	N48°W/80°SW	222/80
J-3	N32°W/61°NE	058/61
-	-	-
-	-	-
J-6	N42°E/77°SE	132/77
J-7	N39°W/39°SW	231/39
J-8	N63°E/32°NW	333/32
J-9	N02°E/59°NW	272/59
<i>Datos:</i>		<i>483 Polos</i>

4.1.2.2 Rocas volcánicas

Se identifican seis sistemas importantes visibles en el estereodiagrama (Figura 28). El sistema Dv-1 y Dv-2 presenta un rumbo preferencial entre N34°E a N56°E con buzamientos altos de hasta 77° inclinado hacia el NW y SE respectivamente. El sistema Dv-3 y Dv-4 presenta un rumbo preferencial entre N52°W a N68°W con buzamientos fuertes de hasta 67° inclinado hacia el SW y NE respectivamente. La familia Dv-5 recorre un rumbo N11°W con inclinación fuerte hacia el NE. La familia Dv-6 mantiene un rumbo N43°E con buzamientos bajos hacia el NW (Tabla 13).

Se puede observar que existen sistemas de diaclasamiento ortogonales, como es el caso de las familias Dv-2 \perp Dv -1, Dv -2 \perp Dv -8, Dv -1 \perp Dv -7; estas fracturas son generadas por el sistema estructural (fallamiento) que incide en la zona de estudio, los planos de pseudo estratificación son zonas de debilidad. En un análisis cinemático se puede definir claramente que existe intersección entre las familias de diaclasas, lo que generará acuñaamientos en el

macizo rocoso, ocasionando inestabilidad en el talud, al ser material estéril es recomendable mantener la geometría del talud en las zonas de contacto para evitar inestabilidad de la ladera.

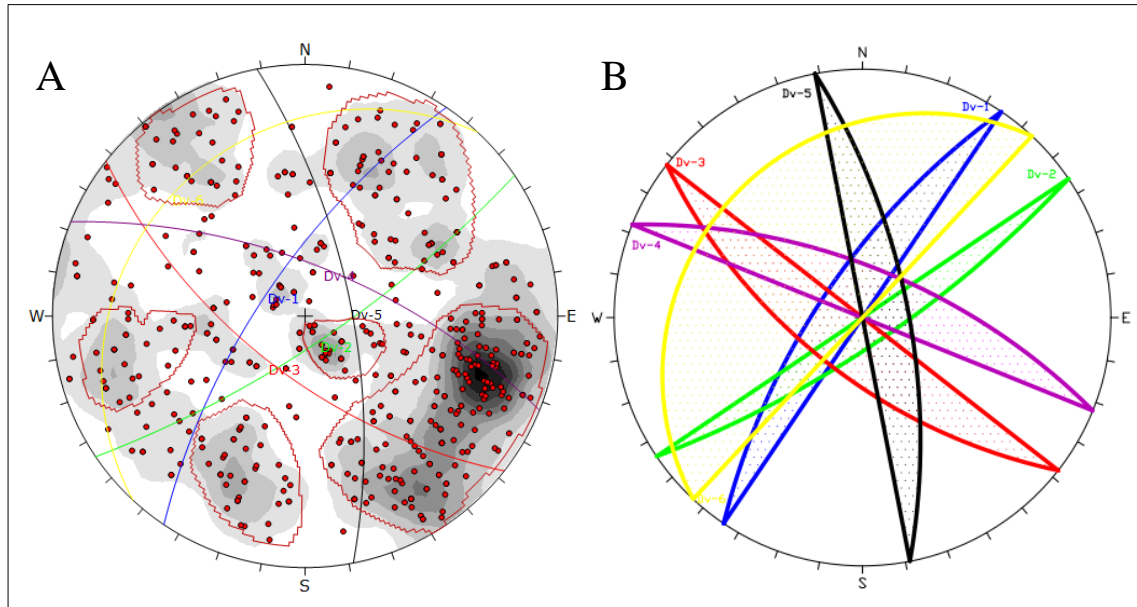


Figura 28. Estereodigramas para los 507 datos estructurales tomados en la unidad volcánica. A) Se muestra los polos (puntos rojos) de los datos estructurales, además de la concentración de datos agrupados en 6 familias principales. B) Se muestran los planos que generan las 6 familias principales de diaclasas.

Tabla 13
Familias principales de diaclasas encontradas en las rocas volcánicas

ORIENTACIÓN DE DIACLASAS – ROCAS VOLCÁNICAS		
Plano	Rumbo/ Buzamiento	Azimut Buz. /Buzamiento
Dv-1	N34°E/70°NW	304/70
Dv-2	N56°E/77°SE	146/77
Dv-3	N52°W/64°SW	218/64
Dv-4	N68°W/67°NE	022/67
Dv-5	N11°W/69°NE	079/69
Dv-6	N43°E/19°NW	313/19
<i>Datos:</i>		<i>507 polos</i>

4.1.2.3 Rocas intrusivas

Se identifican siete sistemas importantes visibles en el estereodiagrama (Figura 29). El sistema D-1 presenta un rumbo preferencial de N80°W con buzamientos altos que buzanan 68° hacia el NE. La familia D-2 recorre un rumbo de N36°W con bajos ángulos de buzamiento hacia el SW. El sistema D3, D5 y D7 posee un rumbo preferencial entre N43°E a N69°E con buzamientos moderados a altos de hasta 85° hacia el SE y NW. Existe también la familia D4 que tiene dirección promedio de N16°W con buzamientos fuertes hacia el NE y finalmente la familia D-7 con dirección N65°E y buzamientos fuertes (85°) hacia el SE (Tabla 14).

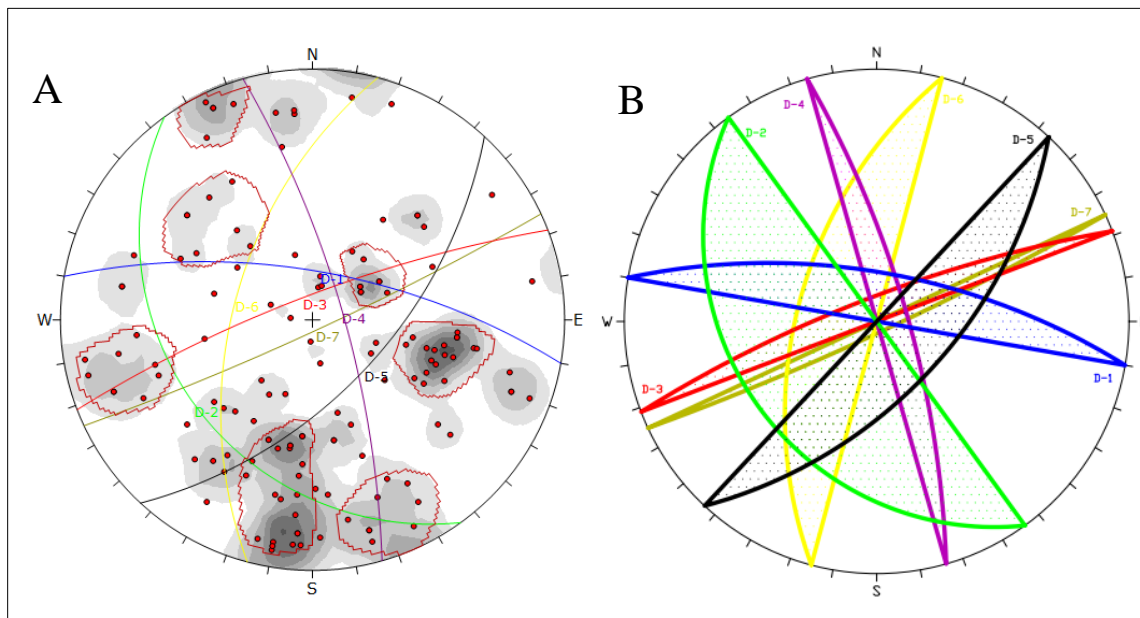


Figura 29. Estereodiagramas para los 139 datos estructurales tomados en el cuerpo intrusivo. A) Se muestra los polos (puntos rojos) de los datos estructurales, además de la concentración de datos agrupados en 7 familias principales. B) Se muestran los planos que generan las 7 familias principales de diaclasas.

Se puede observar que existen sistemas de diaclasamiento ortogonales, como es el caso de las familias $D-3 \perp D-4$, $D-2 \perp D-4$, $D-1 \perp D-6$; estas fracturas son generadas por el emplazamiento post genético de pulsaciones granodioríticas dentro del Batolito de Apuela, evidencia de este fenómeno son las vetas de cuarzo a lo largo del cuerpo plutónico. Este cuerpo intrusivo discordante, al estar en la base y no tener interés mineral no supone inestabilidad a los taludes de liquidación de la cantera.

Tabla 14
Familias principales de diaclasas encontradas en el cuerpo intrusivo

ORIENTACIÓN DE DIACLASAS - CUERPO INTRUSIVO		
Plano	Rumbo/ Buzamiento	Azimut Buz. /Buzamiento
D-1	N80°W/68°NE	010/68
D-2	N36°W/30°SW	234/30
D-3	N69°E/79°NW	339/79
D-4	N16°W/76°NE	074/76
D-5	N43°E/58°SE	133/58
D-6	N15°E/55°NW	285/55
D-7	N65°E/85°SE	155/85
<i>Datos:</i>		<i>139 Polos</i>

Del análisis estructural se puede inferir que es importante tener en cuenta la interacción cinemática de las diferentes familias de diaclasas, es decir, para el plan de minado futuro se deben realizar modelos de estabilidad en condiciones naturales del talud, ya que las modificaciones geométricas de la topografía repercutirán en la estabilidad de los futuros bancos de explotación.

La formación de planos estructurales (diaclasas) ortogonales entre sí, responde a un comportamiento de una cizalla dextral tipo Riedel (Figura 30), debido a que se tienen esfuerzos compresivos actuando con una dirección NW-SE, lo que genera un fallamiento predominante inverso en sentido NE-SW, con un fuerte diaclasamiento ortogonal al plano NE-SW. Además, de presentar fallas normales incipientes en esa misma dirección.

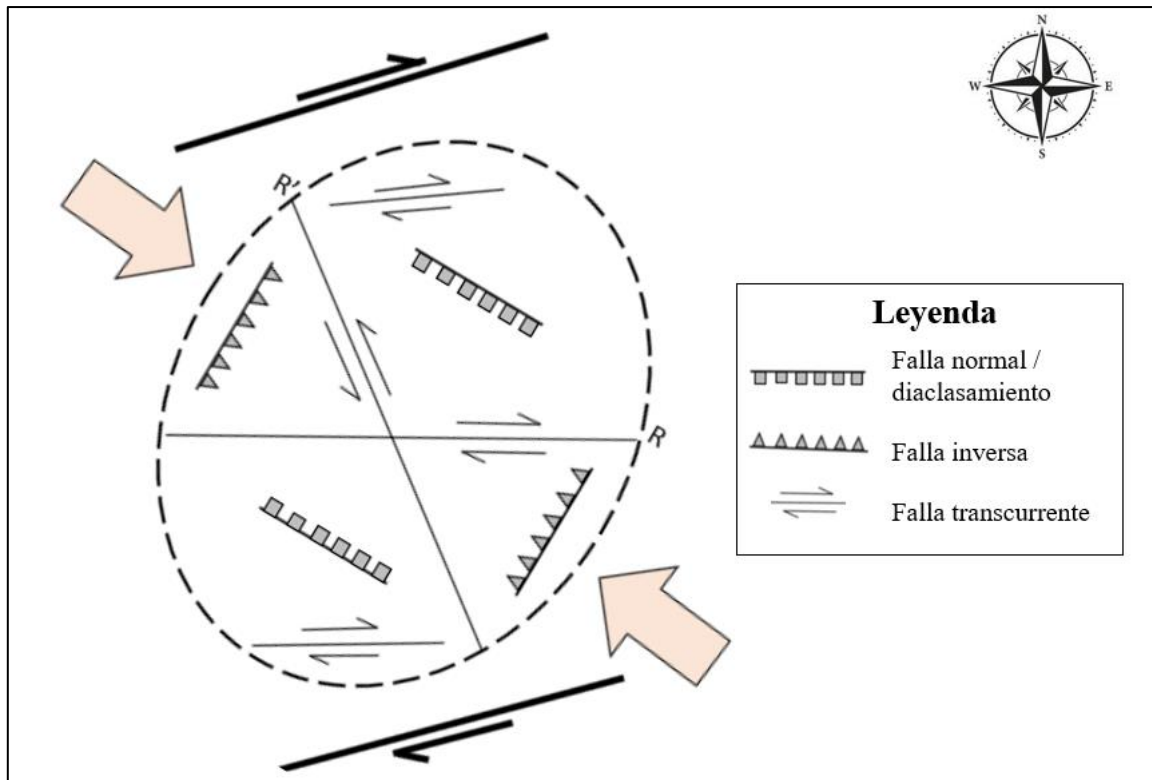


Figura 30. Simplificación en planta del modelo de cizalla Tipo Riedel. Se observa las relaciones geométricas entre los planos de intersección, generados a partir de los planos de Riedel (R). El fallamiento principal genera fallas inversas con dirección preferencial NE-SW, junto con fuertes diaclasamientos y fallas normales dispuestas ortogonalmente a la principal. Modificado de Ramsay (1976).

4.1.3 Estaciones geomecánicas (Clasificación RMR)

El trabajo de campo, referente a la adquisición de datos, fue a través de estaciones geomecánicas que permitieron detallar los parámetros geomecánicos útiles para la caracterización de macizo rocoso (Bieniawski, 1989), en la Tabla 15 hasta la Tabla 19, se sintetiza cada parámetro de las familias de discontinuidades principales y aleatorias para cada Unidad Geotécnica (Cuerpo 1, Cuerpo 2, Cuerpo 3).

4.1.3.1 UNIDAD GEOTÉCNICA: UG-I Cuerpo mineralizado 1

Corresponde a los mármoles de la unidad geológica El Laurel, ubicada al SW del área de estudio, en la Tabla 15 se exponen los parámetros geomecánicos de acuerdo a cada familia de discontinuidades.

Tabla 15

Resumen de los parámetros geomecánicos de las discontinuidades del Cuerpo Mineralizado 1.

Familia J-1	
Azimut de Buz / Buzamiento	314°/64°
Rumbo/Buzamiento	N44°E/64°NW
Espaciamiento	Separado, 600-2.000 mm
Continuidad	Muy alta continuidad, > 20 m
Abertura	Muy ancha, 1-10 cm
Rugosidad	VII Plana Rugosa
Meteorización	Fresca
Relleno	Sin Relleno
Agua	Seco
Familia J-2	
Azimut de Buz / Buzamiento	210°/84°
Rumbo/Buzamiento	N60°O/84°SW
Espaciamiento	Junto, 60-200 mm
Continuidad	Muy alta continuidad, > 20 m
Abertura	Muy ancha, 1-10 cm
Rugosidad	VII Plana Rugosa
Meteorización	Fresca
Relleno	Sin Relleno
Agua	Seco
Familia J-3	
Azimut de Buz / Buzamiento	45°/75°
Rumbo/Buzamiento	N45°W/75°NE
Espaciamiento	Moderadamente junto, 200-600 mm
Continuidad	Alta continuidad, 10 -20 m
Abertura	Muy ancha, 1-10 cm
Rugosidad	VII Plana Rugosa

Meteorización	Fresca
Relleno	Sin Relleno
Agua	Seco

Familia J-4

Azimut de Buz / Buzamiento	101°/48°
Rumbo/Buzamiento	N11°E/48°E
Espaciamiento	Moderadamente junto,200-600 mm
Continuidad	Alta continuidad,10 -20 m
Abertura	Ancha,> 10mm
Rugosidad	VII Plana Rugosa
Meteorización	Fresca
Relleno	Sin Relleno
Agua	Seco

Familia J-5

Azimut de Buz / Buzamiento	202°/51°
Rumbo/Buzamiento	N68°W/51°SW
Espaciamiento	Junto,60-200 mm
Continuidad	Alta continuidad,10 -20 m
Abertura	Muy ancha,1-10 cm
Rugosidad	VII Plana Rugosa
Meteorización	Fresca
Relleno	Sin Relleno
Agua	Seco

Familia J-6

Azimut de Buz / Buzamiento	160°/45°
Rumbo/Buzamiento	N70°E/45°SE
Espaciamiento	Separado,600-2.000 mm
Continuidad	Alta continuidad,10 -20 m
Abertura	Ancha,> 10mm
Rugosidad	VII Plana Rugosa
Meteorización	Fresca
Relleno	Sin Relleno
Agua	Seco

Familia J-7

Azimut de Buz / Buzamiento	239°/29°
Rumbo/Buzamiento	N31°W/29°SW
Espaciamiento	Moderadamente junto,200-600 mm
Continuidad	Muy alta continuidad,> 20 m
Abertura	Muy ancha,1-10 cm
Rugosidad	VII Plana Rugosa
Meteorización	Fresca
Relleno	Sin Relleno
Agua	Seco

Familia J-8

Azimut de Buz / Buzamiento	323°/20°
Rumbo/Buzamiento	N53°E/20°NW
Espaciamiento	Muy separado,2.000-6.000 mm
Continuidad	Alta continuidad,10 -20 m
Abertura	Ancha,> 10mm
Rugosidad	VII Plana Rugosa
Meteorización	Fresca

Relleno	Sin Relleno
Agua	Seco
Familia J-9	
Azimet de Buz / Buzamiento	278°/71°
Rumbo/Buzamiento	N08°E/71°E
Espaciamiento	Moderadamente junto,200-600 mm
Continuidad	Muy alta continuidad,> 20 m
Abertura	Muy ancha,1-10 cm
Rugosidad	VII Plana Rugosa
Meteorización	Fresca
Relleno	Sin Relleno
Agua	Seco

Se puede apreciar que los parámetros geomecánicos son predominantemente moderados – buenos, no existe una incidencia fuerte de agua (escorrentía), las diaclasas se encuentran con una abertura menor a 1cm, de alta a muy alta continuidad, con muy baja meteorización y las caras del macizo presentan preferencialmente superficies rugosas y sin rellenos. Es decir, el material es competente y de moderada a buena calidad (en base a parámetros geomecánicos - RMR).

4.1.3.2 UNIDAD GEOTÉCNICA: UG- I, Cuerpo Mineralizado 2

Corresponde a los mármoles de la unidad geológica El Laurel, ubicada en el área central del área de estudio, en la Tabla 16 se exponen los parámetros geomecánicos de acuerdo a cada familia de discontinuidades.

Tabla 16

Resumen de los parámetros geomecánicos de las discontinuidades del Cuerpo Mineralizado 2.

Familia J-1	
Azimet de Buz / Buzamiento	323°/70°
Rumbo/Buzamiento	N53°E/70°NO
Espaciamiento	Moderadamente junto,200-600 mm
Continuidad	Muy alta continuidad,> 20 m
Abertura	Ancha,> 10mm
Rugosidad	VII Plana Rugosa
Meteorización	Fresca
Relleno	Blando < 5 mm
Agua	Seco

Familia J-3	
Azimut de Buz / Buzamiento	26°/67°
Rumbo/Buzamiento	N64°O/67°NE
Espaciamiento	Separado,600-2.000 mm
Continuidad	Alta continuidad,10 -20 m
Abertura	Muy ancha,1-10 cm
Rugosidad	VII Plana Rugosa
Meteorización	Fresca
Relleno	Blando < 5 mm
Agua	Seco

Familia J-4	
Azimut de Buz / Buzamiento	80°/70°
Rumbo/Buzamiento	N10°O/70°E
Espaciamiento	Moderadamente junto,200-600 mm
Continuidad	Alta continuidad,10 -20 m
Abertura	Muy ancha,1-10 cm
Rugosidad	VII Plana Rugosa
Meteorización	Fresca
Relleno	Sin Relleno
Agua	Seco

Familia J-5	
Azimut de Buz / Buzamiento	217°/57°
Rumbo/Buzamiento	N53°O/57°SO
Espaciamiento	Junto,60-200 mm
Continuidad	Continuidad media,3 -10 m
Abertura	Muy ancha,1-10 cm
Rugosidad	VII Plana Rugosa
Meteorización	Fresca
Relleno	Sin Relleno
Agua	Seco

Familia J-6	
Azimut de Buz / Buzamiento	164°/63°
Rumbo/Buzamiento	N74°E/63°SE
Espaciamiento	Muy separado,2.000-6.000 mm
Continuidad	Muy alta continuidad,> 20 m
Abertura	Muy ancha,1-10 cm
Rugosidad	VII Plana Rugosa
Meteorización	Fresca
Relleno	Sin Relleno
Agua	Seco

Familia J-7	
Azimut de Buz / Buzamiento	243°/28°
Rumbo/Buzamiento	N27°O/28°SO
Espaciamiento	Moderadamente junto,200-600 mm
Continuidad	Muy alta continuidad,> 20 m
Abertura	Ancha,> 10mm

Rugosidad	VII Plana Rugosa
Meteorización	Fresca
Relleno	Sin Relleno
Agua	Seco
Familia J-8	
Azimut de Buz / Buzamiento	316°/20°
Rumbo/Buzamiento	N46°E/20°NO
Espaciamiento	Moderadamente junto,200-600 mm
Continuidad	Muy alta continuidad,> 20 m
Abertura	Muy ancha,1-10 cm
Rugosidad	VII Plana Rugosa
Meteorización	Fresca
Relleno	Sin Relleno
Agua	Seco
Familia J-9	
Azimut de Buz / Buzamiento	271°/68°
Rumbo/Buzamiento	N01°E/68°O
Espaciamiento	Moderadamente junto,200-600 mm
Continuidad	Alta continuidad,10 -20 m
Abertura	Muy ancha,1-10 cm
Rugosidad	VII Plana Rugosa
Meteorización	Fresca
Relleno	Duro (> 5 mm)
Agua	Seco

Se puede apreciar que los parámetros geomecánicos son predominantemente moderados – buenos, no existe una incidencia fuerte de agua (escorrentía), las diaclasas se encuentran con una abertura menor a 1cm, de alta a muy alta continuidad, con muy baja meteorización y las caras del macizo presentan preferencialmente superficies rugosas y sin rellenos. Es decir, el material es competente y de moderada a buena calidad (en base a parámetros geomecánicos - RMR).

4.1.3.3 UNIDAD GEOTÉCNICA: UG-I, Cuerpo Mineralizado 3

Corresponde a los mármoles de la unidad geológica El Laurel, ubicada al NE del área de estudio, en la Tabla 17 se exponen los parámetros geomecánicos de acuerdo a cada familia de discontinuidades.

Tabla 17

Resumen de los parámetros geomecánicos de las discontinuidades del Cuerpo Mineralizado 3.

Familia J-1	
Azimet de Buz / Buzamiento	319°/75°
Rumbo/Buzamiento	N49°E/75°NW
Espaciamiento	Junto,60-200 mm
Continuidad	Muy alta continuidad,> 20 m
Abertura	Moderadamente ancha,2,5-10 mm
Rugosidad	VII Plana Rugosa
Meteorización	Fresca
Relleno	Sin Relleno
Agua	Seco
Familia J-2	
Azimet de Buz / Buzamiento	222°/80
Rumbo/Buzamiento	N48°W/80°SW
Espaciamiento	Junto,60-200 mm
Continuidad	Alta continuidad,10 -20 m
Abertura	Muy ancha,1-10 cm
Rugosidad	VII Plana Rugosa
Meteorización	Fresca
Relleno	Sin Relleno
Agua	Seco
Familia J-3	
Azimet de Buz / Buzamiento	58°/61°
Rumbo/Buzamiento	N32°W/61°NE
Espaciamiento	Moderadamente junto,200-600 mm
Continuidad	Continuidad media,3 -10 m
Abertura	Muy ancha,1-10 cm
Rugosidad	VII Plana Rugosa
Meteorización	Fresca
Relleno	Sin Relleno
Agua	Seco

Familia J-6	
Azimut de Buz / Buzamiento	132°/77°
Rumbo/Buzamiento	N42°E/77°SE
Espaciamiento	Junto,60-200 mm
Continuidad	Alta continuidad,10 -20 m
Abertura	Abierta,0,5-2,5 mm
Rugosidad	VII Plana Rugosa
Meteorización	Fresca
Relleno	Sin Relleno
Agua	Seco
Familia J-7	
Azimut de Buz / Buzamiento	231°/39°
Rumbo/Buzamiento	N39°W/39°SW
Espaciamiento	Junto,60-200 mm
Continuidad	Continuidad media,3 -10 m
Abertura	Extremadamente ancha,10-100 cm
Rugosidad	VII Plana Rugosa
Meteorización	Fresca
Relleno	Sin Relleno
Agua	Seco
Familia J-8	
Azimut de Buz / Buzamiento	333°/32°
Rumbo/Buzamiento	N63°E/32°NW
Espaciamiento	Moderadamente junto,200-600 mm
Continuidad	Alta continuidad,10 -20 m
Abertura	Ancha,> 10mm
Rugosidad	VII Plana Rugosa
Meteorización	Fresca
Relleno	Sin Relleno
Agua	Seco
Familia J-9	
Azimut de Buz / Buzamiento	272°/59°
Rumbo/Buzamiento	N02°E/59°W
Espaciamiento	Junto,60-200 mm
Continuidad	Continuidad media,3 -10 m
Abertura	Ancha,> 10mm
Rugosidad	VII Plana Rugosa
Meteorización	Fresca
Relleno	Sin Relleno
Agua	Seco

Se puede apreciar que los parámetros geomecánicos son predominantemente moderados – buenos, no existe una incidencia fuerte de agua (escorrentía), las diaclasas se encuentran con una abertura menor a 1cm, de alta a muy alta continuidad, con muy baja meteorización y las caras del macizo presentan preferencialmente superficies rugosas y sin rellenos. Es decir, el material es competente y de moderada a buena calidad (en base a parámetros geomecánicos - RMR).

4.1.3.4 UNIDAD GEOTÉCNICA: UG-II, Volcano-sedimento

Corresponde a las rocas volcánicas y volcanosedimentos de la unidad geológica Pilatón, sobreyacida por los mármoles de la unidad El Laurel, en la Tabla 18 se exponen los parámetros geomecánicos de acuerdo a cada familia de discontinuidades.

Tabla 18

Resumen de los parámetros geomecánicos de las discontinuidades de la Unidad Geotécnica II, Volcano-Sedimento.

Familia Dv-1	
Azimut de Buz / Buzamiento	304°/70
Rumbo/Buzamiento	N34°E/70°NW
Espaciamiento	Moderadamente junto, 200-600 mm
Continuidad	Continuidad media, 3 -10 m
Abertura	Parcialmente abierta, 0,25-0,5 mm
Rugosidad	VII Plana Rugosa
Meteorización	Altamente Meteorizada
Relleno	Sin Relleno
Agua	Húmedo
Familia Dv-2	
Azimut de Buz / Buzamiento	146°/77°
Rumbo/Buzamiento	N56°E/77°SE
Espaciamiento	Junto, 60-200 mm
Continuidad	Alta continuidad, 10 -20 m
Abertura	Moderadamente ancha, 2,5-10 mm
Rugosidad	VIII Plana Lisa
Meteorización	Altamente Meteorizada
Relleno	Sin Relleno
Agua	Húmedo
Familia Dv-3	
Azimut de Buz / Buzamiento	218°/64°
Rumbo/Buzamiento	N52°W/64°SW
Espaciamiento	Moderadamente junto, 200-600 mm
Continuidad	Muy baja continuidad, < 1 m
Abertura	Moderadamente ancha, 2,5-10 mm
Rugosidad	VII Plana Rugosa
Meteorización	Altamente Meteorizada
Relleno	Sin Relleno
Agua	Húmedo
Familia Dv-4	
Azimut de Buz / Buzamiento	22°/67°
Rumbo/Buzamiento	N68°W/67°NE
Espaciamiento	Extremadamente junto, < 20 mm
Continuidad	Muy baja continuidad, < 1 m
Abertura	Moderadamente ancha, 2,5-10 mm
Rugosidad	VII Plana Rugosa
Meteorización	Altamente Meteorizada
Relleno	Sin Relleno
Agua	Húmedo

Familia Dv-5	
Azimut de Buz / Buzamiento	79°/69
Rumbo/Buzamiento	N11°W/69°NE
Espaciamiento	Extremadamente junto, < 20 mm
Continuidad	Muy baja continuidad, < 1 m
Abertura	Ancha, > 10mm
Rugosidad	VIII Plana Lisa
Meteorización	Altamente Meteorizada
Relleno	Sin Relleno
Agua	Húmedo

Familia Dv-6	
Azimut de Buz / Buzamiento	313°/19°
Rumbo/Buzamiento	N43°E/19°NW
Espaciamiento	Extremadamente junto, < 20 mm
Continuidad	Alta continuidad, 10 -20 m
Abertura	Moderadamente ancha, 2,5-10 mm
Rugosidad	VII Plana Rugosa
Meteorización	Altamente Meteorizada
Relleno	Sin Relleno
Agua	Seco

Se puede apreciar que los parámetros geomecánicos son predominantemente moderados – malos, no existe una incidencia fuerte de agua (escorrentía), las diaclasas se encuentran con una abertura moderadamente ancha entre 1-3 cm, de alta a muy alta continuidad, el material volcanoclástico está fuertemente meteorizado en superficie, llegando a ser un regolito del material sobreyacido; por lo tanto, en superficie el material tiene muy baja competencia lo que refleja un RMR IV (malo), mientras que por debajo de esta franja de meteorización se encuentra la roca que gradualmente va mejorando en calidad (baja meteorización) con una calidad tipo II y III.

4.1.3.5 UNIDAD GEOTÉCNICA: UG-III, Intrusivo

Representado por una granodiorita perteneciente al batolito de Apuela, en la Tabla 19 se exponen los parámetros geomecánicos de acuerdo a cada familia de discontinuidades.

Tabla 19

Resumen de los parámetros geomecánicos de las discontinuidades de la Unidad Geotécnica III, Intrusivo.

Familia D-1	
Azimut de Buz / Buzamiento	10°/68°
Rumbo/Buzamiento	N80°W/68°NE
Espaciamiento	Junto, 60-200 mm
Continuidad	Muy alta continuidad, > 20 m
Abertura	Muy ancha, 1-10 cm
Rugosidad	VII Plana Rugosa
Meteorización	Mod. Meteorizada
Relleno	Sin relleno
Agua	Seco
Familia D-2	
Azimut de Buz / Buzamiento	234°/30°
Rumbo/Buzamiento	N36°W/30°SW
Espaciamiento	Muy separado, 2.000-6.000 mm
Continuidad	Alta continuidad, 10 -20 m
Abertura	Moderadamente ancha, 2,5-10 mm
Rugosidad	VII Plana Rugosa
Meteorización	Mod. Meteorizada
Relleno	Sin relleno
Agua	Húmedo
Familia D-3	
Azimut de Buz / Buzamiento	339°/79°
Rumbo/Buzamiento	N69°E/79°NW
Espaciamiento	Separado, 600-2.000 mm
Continuidad	Alta continuidad, 10 -20 m
Abertura	Abierta, 0,5-2,5 mm
Rugosidad	VIII Plana Lisa
Meteorización	Mod. Meteorizada
Relleno	Sin relleno
Agua	Húmedo
Familia D-4	
Azimut de Buz / Buzamiento	74°/76°
Rumbo/Buzamiento	N16°W/76°NE
Espaciamiento	Junto, 60-200 mm
Continuidad	Muy alta continuidad, > 20 m
Abertura	Muy cerrada, <0,1 mm
Rugosidad	VII Plana Rugosa
Meteorización	Fresca
Relleno	Sin relleno
Agua	Seco
Familia D-5	
Azimut de Buz / Buzamiento	133°/58°
Rumbo/Buzamiento	N43°E/58°SE
Espaciamiento	Junto, 60-200 mm
Continuidad	Muy alta continuidad, > 20 m

Abertura	Muy cerrada, <0,1 mm
Rugosidad	VII Plana Rugosa
Meteorización	Fresca
Relleno	Sin relleno
Agua	Seco
Familia D-6	
Azimut de Buz / Buzamiento	285°/55°
Rumbo/Buzamiento	N15°E/55°NW
Espaciamiento	Separado,600-2.000 mm
Continuidad	Continuidad media, 3 -10 m
Abertura	Abierta,0,5-2,5 mm
Rugosidad	VII Plana Rugosa
Meteorización	Mod. Meteorizada
Relleno	Sin relleno
Agua	Seco
Familia D-7	
Azimut de Buz / Buzamiento	155°/85°
Rumbo/Buzamiento	N65°E/85°SE
Espaciamiento	Junto,60-200 mm
Continuidad	Alta continuidad,10 -20 m
Abertura	Ancha,> 10mm
Rugosidad	VII Plana Rugosa
Meteorización	Fresca
Relleno	Sin relleno
Agua	Seco

Se puede apreciar que los parámetros geomecánicos son predominantemente moderados – buenos, no existe una incidencia fuerte de agua (escorrentía), las diaclasas se encuentran con una abertura moderadamente ancha menor a 1 cm, de alta a muy alta continuidad, el cuerpo intrusivo está levemente meteorizado en superficie, generalmente es un material muy competente y resistente, dando como resultado rocas de tipo I y II.

En total se levantaron 119 estaciones geomecánicas, que permitieron identificar mediante la aplicación de geoestadística, los planos de las discontinuidades principales (2279 polos) y las características geomecánicas que rigen la estabilidad de un macizo rocoso para cada uno de las Unidades Geotécnicas. Los datos de frecuencias altas (Tabla 15 hasta la Tabla 19) permitieron clasificar el macizo rocoso, usando la clasificación geomecánica empírica de Bieniawski (1989).

4.1.3.6 Calificación del macizo rocoso (RMR) de la unidad geotécnica: UG-I Cuerpo mineralizado 1

En la Tabla 20 se detalla la calificación del macizo rocoso en base al RMR, generalizada para el cuerpo mineralizado 1, para esta clasificación se consideraron todas las familias de diaclasas y las ponderaciones promedio para evaluar al macizo de manera global.

Tabla 20
Calificación del macizo rocoso (UG-I, C1).

Clasificación geomecánica RMR (Bieniawski, 1989)									CALIFICACIÓN										
Parámetros de clasificación									J-1	J-2	J-3	J-4	J-5	J-6	J-7	J-8	J-9		
1	Resistencia de la matriz rocosa (MPa)	Ensayo de carga puntual	> 10	10-4	4-2	2-1	Compresión simple (MPa)			Resistencia de la matriz rocosa (MPa)									
		Compresión simple	> 250	250-100	100-50	50-25	25-5	5-1	< 1										
Puntuación			15	12	7	4	2	1	0	4	4	4	4	4	4	4	4	4	
2	RQD		90% - 100%	75% - 90%	50% - 75%	25% - 50%	< 25%			RQD									
	Puntuación		20	17	13	6	3			13	13	13	13	13	13	13	13	13	
3	Separación entre diaclasas		> 2 m	0.6 - 2 m	0.2 - 0.6 m	0.06 - 0.2 m	< 0.06 m			Separación entre diaclasas (m)									
	Puntuación		20	15	10	8	5			15	8	10	10	8	15	10	20	10	
4	Estado de las diaclasas	Continuidad		< 1 m	1-3 m	3-10 m	10-20 m	>20 m			Continuidad (m)								
		Puntuación		6	4	2	1	0			0	0	1	1	1	1	0	1	0
		Abertura		Nula	< 0.1 mm	0.1-1.0 mm	1-5 mm	>5 mm			Abertura (mm)								
		Puntuación		6	5	3	1	0			0	0	0	0	0	0	0	0	0
		Rugosidad		Muy rugosa	Rugosa	Ligeramente rugosa	Ondulada	Suave			Rugosidad								
		Puntuación		6	5	3	1	0			3	3	3	3	3	3	3	3	3
		Relleno		Ninguno	Duro (<5 mm)	Duro (> 5 mm)	Blando (<5 mm)	Blando (>5 mm)			Relleno (mm)								
		Puntuación		6	4	2	2	0			6	6	6	6	6	6	6	6	6
5	Agua freática	Caudal por 10 m de túnel		Nulo	< 10 litros/min	10-25 litros/min	25-125 litros/min	> 125 litros/min			Agua freática								
		Relación: Presión de agua/Tensión		0	0.0 - 0.1	0.1 - 0.2	0.2 - 0.5	> 0.5											
		Estado general		Seco	Ligeramente húmedo	Húmedo	Goteando	Agua fluyendo											
Puntuación		15	10	7	4	0			15	15	15	15	15	15	15	15	15		
Clasificación del macizo rocoso según RMR									CALIFICACIÓN RMR Básico										
Clase	I		II		III		IV		V		J-1	J-2	J-3	J-4	J-5	J-6	J-7	J-8	J-9
Calidad	Muy buena		Buena		Media		Mala		Muy mala		62	55	58	58	56	63	57	68	57
Puntuación	100 - 81		80 - 61		60 - 41		40 - 21		< 20		RMR min básico: 55		III-MEDIA						
											RMR máx básico: 68		II-BUENA						
											RMR prm. básico: 59		III-MEDIA						

Tabla 21

Calificación del macizo rocoso por cada estación geomecánica (UG-I, C1).

		RMR (Bieniawski, 1989)
Ubicación	Estación	CALIDAD
UG-I, C1	RM-016	III -MEDIA
	RM-017	II-BUENA
	RM-018	II-BUENA
	RM-019	III -MEDIA
	RM-020	III -MEDIA
	RM-021	III -MEDIA
	RM-022	II-BUENA
	RM-023	III -MEDIA
	CM-014	II-BUENA
	CM-015	IV-MALA
Cuerpo 1	CM-016	II-BUENA
	CM-017	II-BUENA
	CM-018	III -MEDIA
	CM-019	III -MEDIA
	CM-020	III -MEDIA
	CM-021	II-BUENA
	CM-J2-068	III -MEDIA
	CM-J2-069	II-BUENA
	CM-J2-070	III -MEDIA
	Mínimo	IV-MALA
Máximo	II-BUENA	
Mediana	III -MEDIA	
Promedio	III -MEDIA	

En la Tabla 21 se observa el resultado de RMR para cada estación geomecánica realizada en el cuerpo mineralizado 1, donde se observa una predominancia de roca tipo III e incipientemente valores de roca mala (Tipo IV). Lo que indica que el macizo rocoso tiene una buena calidad, es estable y de buenos parámetros geomecánicos, lo que facilita el diseño de los taludes de liquidación en este cuerpo.

4.1.3.7 Calificación del macizo rocoso (RMR) de la unidad geotécnica: UG-I Cuerpo mineralizado 2

En la Tabla 22 se detalla la calificación del macizo rocoso en base al RMR, generalizada para el cuerpo mineralizado 2, para esta clasificación se consideraron todas las familias de diaclasas y las ponderaciones promedio para evaluar al macizo de manera global.

Tabla 22
Calificación del macizo rocoso (UG-I, C2).

Clasificación geomecánica RMR (Bieniawski, 1989)									CALIFICACIÓN									
Parámetros de clasificación									J-1	J-3	J-4	J-5	J-6	J-7	J-8	J-9		
1	Resistencia de la matriz rocosa (MPa)	Ensayo de carga puntual	> 10	10-4	4-2	2-1	Compresión simple (MPa)		Resistencia de la matriz rocosa (MPa)									
		Compresión simple	> 250	250-100	100-50	50-25	25-5	5-1									< 1	
Puntuación			15	12	7	4	2	1	0	4	4	4	4	4	4	4	4	4
2	RQD	90% - 100%	75% - 90%	50% - 75%	25% - 50%	< 25%			RQD									
	Puntuación	20	17	13	6	3			13	13	13	13	13	13	13	13	13	
3	Separación entre diaclasas	> 2 m	0.6 - 2 m	0.2 - 0.6 m	0.06 - 0.2 m	< 0.06 m			Separación entre diaclasas (m)									
	Puntuación	20	15	10	8	5			10	15	10	8	20	10	10	10	10	
4	Estado de las diaclasas	Continuidad	< 1 m	1-3 m	3-10 m	10-20 m	>20 m			Continuidad (m)								
		Puntuación	6	4	2	1	0			0	1	1	2	0	0	0	0	1
		Abertura	Nula	< 0.1 mm	0.1-1.0 mm	1-5 mm	>5 mm			Abertura (mm)								
		Puntuación	6	5	3	1	0			0	0	0	0	0	0	0	0	0
		Rugosidad	Muy rugosa	Rugosa	Ligeramente rugosa	Ondulada	Suave			Rugosidad								
		Puntuación	6	5	3	1	0			3	3	3	3	3	3	3	3	3
		Relleno	Ninguno	Duro (<5 mm)	Duro (> 5 mm)	Blando (<5 mm)	Blando (>5 mm)			Relleno (mm)								
		Puntuación	6	4	2	2	0			2	6	6	6	6	6	6	6	6
		Alteración	Inalterada	Ligeramente alterada	Moderadamente alterada	Muy alterada	Descompuesta			Alteración								
		Puntuación	6	5	3	1	0			6	6	6	6	6	6	6	6	6
5	Agua freática	Caudal por 10 m de túnel	Nulo	< 10 litros/min	10-25 litros/min	25-125 litros/min	> 125 litros/min			Agua freática								
		Relación: Presión de agua/Tensión	0	0.0 - 0.1	0.1 - 0.2	0.2 - 0.5	> 0.5											
		Estado general	Seco	Ligeramente húmedo	Húmedo	Goteando	Agua fluyendo											
Puntuación			15	10	7	4	0			15	15	15	15	15	15	15	15	
Clasificación del macizo rocoso según RMR						CALIFICACIÓN RMR Básico												
Clase	I	II	III	IV	V	J-1	J-3	J-4	J-5	J-6	J-7	J-8	J-9					
Calidad	Muy buena	Buena	Media	Mala	Muy mala	53	63	58	57	67	57	57	58					
Puntuación	100 - 81	80 - 61	60 - 41	40 - 21	< 20	R min básic		53		III-MEDIA								
						R máx básic		67		II-BUENA								
						R prom. básic		59		III-MEDIA								

En la Tabla 23 se observa el resultado de RMR para cada estación geomecánica realizada en el cuerpo mineralizado 2, donde se observa una predominancia de roca tipo III y II (Media - buena) e incipientemente valores de roca mala (Tipo IV). Lo que indica que el macizo rocoso tiene una buena calidad, es estable y de mejores parámetros en comparación al cuerpo mineralizado 1, lo que facilita el diseño de los taludes de liquidación en este cuerpo.

Tabla 23

Calificación del macizo rocoso por cada estación geomecánica (UG-I, C2).

Ubicación	Estación	RMR (Bieniawski, 1989)
		CALIDAD
	CM-002	III -MEDIA
	CM-001	IV-MALA
	CM-003	II-BUENA
	CM-004	II-BUENA
	CM-005	IV-MALA
	CM-006	II-BUENA
	CM-007	IV-MALA
	RM-001	II-BUENA
	RM-002	III -MEDIA
	RM-003	III -MEDIA
	RM-004	III -MEDIA
	RM-005	III -MEDIA
	RM-006	III -MEDIA
	RM-007	III -MEDIA
	RM-008	II-BUENA
	RM-009	III -MEDIA
	RM-009	III -MEDIA
	RM-010	III -MEDIA
	RM-011	III -MEDIA
	RM-012	III -MEDIA
	RM-013	II-BUENA
	RM-014	II-BUENA
	RM-015	II-BUENA
	CM-008	II-BUENA
	CM-009	II-BUENA
UG-I, C2	CM-010	IV-MALA
	CM-011	IV-MALA
	CM-012	IV-MALA
Cuerpo 2	CM-013	II-BUENA
	RM-024	III -MEDIA
	RM-024	III -MEDIA
	RM-025	II-BUENA
	RM-026	III -MEDIA
	RM-027	II-BUENA
	RM-028	II-BUENA
	RM-029	II-BUENA
	RM-030	II-BUENA
	CM-022	III -MEDIA
	CM-023	III -MEDIA
	CM-024	III -MEDIA
	CM-025	IV-MALA
	CM-026	II-BUENA
	CM-027	II-BUENA
	CM-040	II-BUENA
	CM-041	II-BUENA
	RM-041	II-BUENA
	CM-042	IV-MALA
	RM-042	III -MEDIA
	CM-043	II-BUENA
PC-02	III -MEDIA	
RM-043	IV-MALA	
CM-044	III -MEDIA	
RM-044	IV-MALA	
CM-045	IV-MALA	
	Mínimo	IV-MALA
	Máximo	II-BUENA
	Mediana	III -MEDIA
	Promedio	III -MEDIA

4.1.3.8 Calificación del macizo rocoso (RMR) de la unidad geotécnica: UG-I Cuerpo mineralizado 3

En la Tabla 24 se detalla la calificación del macizo rocoso en base al RMR, generalizada para el cuerpo mineralizado 3, para esta clasificación se consideraron todas las familias de diaclasas y las ponderaciones promedio para evaluar al macizo de manera global.

Tabla 24
Calificación del macizo rocoso (UG-I, C3).

Clasificación geomecánica RMR (Bieniawski, 1989)									CALIFICACIÓN							
Parámetros de clasificación									J-1	J-2	J-3	J-6	J-7	J-8	J-9	
1	Resistencia de la matriz rocosa (MPa)	Ensayo de carga puntual	> 10	10-4	4-2	2-1	Compresión simple (MPa)			Resistencia de la matriz rocosa (MPa)						
		Compresión simple	> 250	250-100	100-50	50-25	25-5	5-1	< 1							
	Puntuación	15	12	7	4	2	1	0	4	4	4	4	4	4	4	
2	RQD	90% - 100%	75% - 90%	50% - 75%	25% - 50%	< 25%			RQD							
	Puntuación	20	17	13	6	3			6	6	6	6	6	6	6	
3	Separación entre diaclasas	> 2 m	0.6 - 2 m	0.2 - 0.6 m	0.06 - 0.2 m	< 0.06 m			Separación entre diaclasas (m)							
	Puntuación	20	15	10	8	5			8	8	8	8	10	8		
4	Estado de las diaclasas	Continuidad	< 1 m	1-3 m	3-10 m	10-20 m	>20 m			Continuidad (m)						
		Puntuación	6	4	2	1	0			0	1	2	1	2	1	2
		Abertura	Nula	< 0.1 mm	0.1-1.0 mm	1-5 mm	>5 mm			Abertura (mm)						
		Puntuación	6	5	3	1	0			0	0	0	1	0	0	0
		Rugosidad	Muy rugosa	Rugosa	Ligeramente rugosa	Ondulada	Suave			Rugosidad						
		Puntuación	6	5	3	1	0			3	3	3	3	3	3	3
		Relleno	Ninguno	Duro (<5 mm)	Duro (> 5 mm)	Blando (<5 mm)	Blando (>5 mm)			Relleno (mm)						
		Puntuación	6	4	2	2	0			6	6	6	6	6	6	6
		Alteración	Inalterada	Ligeramente alterada	Moderadamente alterada	Muy alterada	Descompuesta			Alteración						
		Puntuación	6	5	3	1	0			6	6	6	6	6	6	6
5	Agua freática	Caudal por 10 m de túnel	Nulo	< 10 litros/min	10-25 litros/min	25-125 litros/min	> 125 litros/min			Agua freática						
		Relación: Presión de agua/Tensión	0	0.0 - 0.1	0.1 - 0.2	0.2 - 0.5	> 0.5									
		Estado general	Seco	Ligeramente húmedo	Húmedo	Goteando	Agua fluyendo									
	Puntuación	15	10	7	4	0			15	15	15	15	15	15	15	
Clasificación del macizo rocoso según RMR									CALIFICACIÓN RMR Básico							
Clase	I	II	III	IV	V	J-1	J-2	J-3	J-6	J-7	J-8	J-9				
Calidad	Muy buena	Buena	Media	Mala	Muy mala	48	49	50	50	50	51	50				
Puntuación	100 - 81	80 - 61	60 - 41	40 - 21	< 20	MR min básica		48		III-MEDIA						
						MR máx básica		51		III-MEDIA						
						R prom. básic		50		III-MEDIA						

En la Tabla 25 se observa el resultado de RMR para cada estación geomecánica realizada en el cuerpo mineralizado 3, donde se observa una predominancia de roca tipo II y III (Buena-media), con pocos valores de roca mala (Tipo IV). Lo que indica que el macizo

rocoso tiene una buena calidad, es estable y de mejores parámetros en comparación al cuerpo mineralizado 1, lo que facilita el diseño de los taludes de liquidación en este cuerpo.

Tabla 25

Calificación del macizo rocoso por cada estación geomecánica (UG-I, C3).

Ubicación	Estación	RMR (Bieniawski, 1989) CALIDAD
UG-I, C3 Cuerpo 3	RM-031	III -MEDIA
	RM-032	III -MEDIA
	RM-033	III -MEDIA
	CM-030	III -MEDIA
	CM-031	III -MEDIA
	CM-032	II-BUENA
	CM-033	II-BUENA
	CM-034	II-BUENA
	CM-035	III -MEDIA
	CM-036	II-BUENA
	CM-037	IV-MALA
	CM-038	IV-MALA
	CM-039	IV-MALA
	RM-034	II-BUENA
	RM-035	II-BUENA
	RM-036	III -MEDIA
RM-037	IV-MALA	
RM-038	III -MEDIA	
RM-045	II-BUENA	
Mínimo	IV-MALA	
Máximo	II-BUENA	
Mediana	III -MEDIA	
Promedio	III -MEDIA	

De manera resumida para la unidad geotécnica I (mármoles de la Unidad El Laurel) se tiene un comportamiento definido espacialmente, es decir, para las familias de discontinuidades: J1, J2, J3, J6, J7, J8 y J9, el RMR decrece hacia el NE, por lo tanto dichas familias de discontinuidades tendrán una calificación RMR más alta hacia el SW e irá decreciendo conforme se avanza a los cuerpos mineralizados (hacia el NE), a diferencia de las familias J4 y J5 que se comportan de manera inversa, es decir tienen un RMR más bajo hacia el NW y se eleva hacia el NE (Figura 31).

De manera general se puede observar que la calidad del macizo rocoso del cuerpo mineralizado 3 es mucho más competente que el cuerpo mineralizado 2 y el cuerpo mineralizado 1. Una razón para este comportamiento, puede ser que en el cuerpo mineralizado 1 está afectado fuertemente por levantamiento ocasionado por el emplazamiento del batolito

de Apuela (Figura 21), evidencia de esto es el mayor diaclasamiento en el sector SW de la zona de estudio.

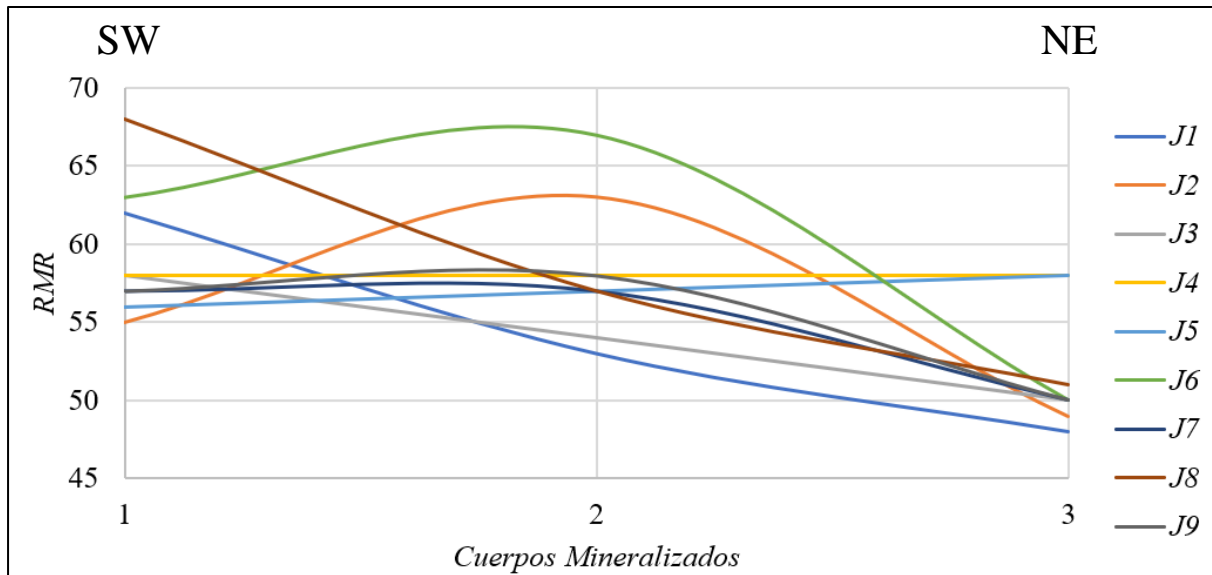


Figura 31. Resumen del comportamiento de las familias de discontinuidades, de acuerdo a su RMR y su ubicación espacial (Cuerpos mineralizado 1, 2 y 3).

4.1.3.9 Calificación del macizo rocoso (RMR) de la unidad geotécnica: UG-II, Volcano-Sedimentos

En la Tabla 26 se detalla la calificación del macizo rocoso en base al RMR, generalizada para las rocas volcanoclásticas, para esta clasificación se consideraron todas las familias de diaclasas y las ponderaciones promedio para evaluar al macizo de manera global.

Tabla 26
Calificación del macizo rocoso (UG-II).

Clasificación geomecánica RMR (Bieniawski, 1989)										CALIFICACIÓN						
Parámetros de clasificación										Dv-1	Dv-2	Dv-3	Dv-4	Dv-5	Dv-6	
1	Resistencia de la matriz rocosa (MPa)	Ensayo de carga puntual	> 10	10-4	4-2	2-1	Compresión simple (MPa)			Resistencia de la matriz rocosa (MPa)						
		Compresión simple	> 250	250-100	100-50	50-25	25-5	5-1	< 1							
Puntuación			15	12	7	4	2	1	0	7	7	7	7	7	7	
2	RQD		90% - 100%	75% - 90%	50% - 75%	25% - 50%	< 25%			RQD						
	Puntuación		20	17	13	6	3			3	3	3	3	3	3	
3	Separación entre diaclasas		> 2 m	0.6 - 2 m	0.2 - 0.6 m	0.06 - 0.2 m	< 0.06 m			Separación entre diaclasas (m)						
	Puntuación		20	15	10	8	5			8	8	5	0	0	0	
4	Estado de las diaclasas	Continuidad		< 1 m	1-3 m	3-10 m	10-20 m	>20 m			Continuidad (m)					
		Puntuación		6	4	2	1	0			2	1	6	6	6	1
		Abertura		Nula	< 0.1 mm	0.1-1.0 mm	1-5 mm	>5 mm			Abertura (mm)					
		Puntuación		6	5	3	1	0			3	0	0	0	0	0
		Rugosidad		Muy rugosa	Rugosa	Ligeramente rugosa	Ondulada	Suave			Rugosidad					
		Puntuación		6	5	3	1	0			3	0	6	3	0	3
		Relleno		Ninguno	Duro (<5 mm)	Duro (> 5 mm)	Blando (<5 mm)	Blando (>5 mm)			Relleno (mm)					
		Puntuación		6	4	2	2	0			6	6	6	6	6	6
		Alteración		Inalterada	Ligeramente alterada	Moderadamente alterada	Muy alterada	Descompuesta			Alteración					
		Puntuación		6	5	3	1	0			0	0	0	0	0	1
5	Agua freática	Caudal por 10 m de túnel	Nulo	< 10 litros/min	10-25 litros/min	25-125 litros/min	> 125 litros/min			Agua freática						
		Relación: Presión de agua/Tensión	0	0.0 - 0.1	0.1 - 0.2	0.2 - 0.5	> 0.5									
		Estado general	Seco	Ligeramente húmedo	Húmedo	Goteando	Agua fluyendo									
Puntuación		15	10	7	4	0			7	7	7	7	7	15		
Clasificación del macizo rocoso según RMR										CALIFICACIÓN RMR Básico						
Clase	I		II		III		IV		V		Dv-1	Dv-2	Dv-3	Dv-4	Dv-5	Dv-6
Calidad	Muy buena		Buena		Media		Mala		Muy mala		39	32	40	32	29	36
Puntuación	100 - 81		80 - 61		60 - 41		40 - 21		< 20		RMR min básico:		29		IV-MALA	
											RMR máx básico:		40		IV-MALA	
											RMR prom. básico:		35		IV-MALA	

En la Tabla 27 se observa el resultado de RMR para cada estación geomecánica realizada en la Unidad Pilatón, donde se observa una predominancia de roca tipo IV (Mala), esto debido a que en superficie la roca está fuertemente meteorizada.

Tabla 27

Calificación del macizo rocoso por cada estación geomecánica (UG-II).

Ubicación	Estación	RMR (Bieniawski, 1989) CALIDAD
UG-II Volcánico	RM-V-001	IV-MALA
	RM-V-002	IV-MALA
	PC-01	IV-MALA
	CM-V-002	III -MEDIA
	CM-V-003	IV-MALA
	CM-V-001	IV-MALA
	CM-028	V-MUY MALA
	CM-029	V-MUY MALA
	CM-J2-071	III -MEDIA
	CM-J2-072	III -MEDIA
	CM-J2-073	IV-MALA
	CM-J2-074	IV-MALA
	CM-J2-019	V-MUY MALA
	CM-J2-023	V-MUY MALA
	CM-J2-028	III -MEDIA
	CM-J2-029	II-BUENA
	CM-J2-031	IV-MALA
	CM-J2-032	III -MEDIA
	CM-J2-035	V-MUY MALA
	Mínimo	V-MUY MALA
Máximo	II-BUENA	
Mediana	IV-MALA	
Promedio	IV-MALA	

En las estaciones que se encuentra material fresco (baja meteorización), se puede evidenciar que es mucho más competente que la capa superficial (regolito), de acuerdo a las observaciones de campo esta superficie de meteorización no es mayor a los 5 metros, lo que refleja que por debajo de este nivel la roca tiene mejor calidad y es mucho más competente. El grado de meteorización se disipa a medida que se avanza en profundidad.

4.1.3.10 Calificación del macizo rocoso (RMR) de la unidad geotécnica: UG-III, Intrusivo

En la Tabla 28 se detalla la calificación del macizo rocoso en base al RMR, generalizada para el cuerpo intrusivo, para esta clasificación se consideraron todas las familias de diaclasas y las ponderaciones promedio para evaluar al macizo de manera global.

Tabla 28
Calificación del macizo rocoso (UG-III).

Clasificación geomecánica RMR (Bieniawski, 1989)								CALIFICACIÓN									
Parámetros de clasificación								D-1	D-2	D-3	D-4	D-5	D-6	D-7			
1	Resistencia de la matriz rocosa (MPa)	Ensayo de carga puntual	> 10	10-4	4-2	2-1	Compresión simple (MPa)		Resistencia de la matriz rocosa (MPa)								
		Compresión simple	> 250	250-100	100-50	50-25	25-5	5-1								< 1	
	Puntuación	15	12	7	4	2	1	0	4	4	4	4	4	4	4		
2	RQD		90% - 100%	75% - 90%	50% - 75%	25% - 50%	< 25%		RQD								
	Puntuación	20	17	13	6	3		13	13	13	13	13	13	13			
3	Separación entre diaclasas		> 2 m	0.6 - 2 m	0.2 - 0.6 m	0.06 - 0.2 m	< 0.06 m		Separación entre diaclasas (m)								
	Puntuación	20	15	10	8	5		8	20	8	8	8	8	8			
4	Estado de las diaclasas	Continuidad		< 1 m	1-3 m	3-10 m	10-20 m	>20 m		Continuidad (m)							
		Puntuación	6	4	2	1	0		0	1	1	0	1	2	1		
		Abertura		Nula	< 0.1 mm	0.1-1.0 mm	1-5 mm	>5 mm		Abertura (mm)							
		Puntuación	6	5	3	1	0		0	0	1	4	3	1	0		
		Rugosidad		Muy rugosa	Rugosa	Ligeramente rugosa	Ondulada	Suave		Rugosidad							
		Puntuación	6	5	3	1	0		3	3	3	3	3	3	3		
		Relleno		Ninguno	Duro (<5 mm)	Duro (> 5 mm)	Blando (<5 mm)	Blando (>5 mm)		Relleno (mm)							
		Puntuación	6	4	2	2	0		6	6	6	6	6	6	6		
		Alteración		Inalterada	Ligeramente alterada	Moderadamente alterada	Muy alterada	Descompuesta		Alteración							
		Puntuación	6	5	3	1	0		3	3	3	6	3	3	6		
5	Agua freática	Caudal por 10 m de túnel	Nulo	< 10 litros/min	10-25 litros/min	25-125 litros/min	> 125 litros/min		Agua freática								
		Relación: Presión de agua/Tensión	0	0.0 - 0.1	0.1 - 0.2	0.2 - 0.5	> 0.5										
		Estado general	Seco	Ligeramente húmedo	Húmedo	Goteando	Agua fluyendo										
Puntuación	15	10	7	4	0		15	7	7	15	7	15	15				
Clasificación del macizo rocoso según RMR								CALIFICACIÓN RMR Básico									
Clase	I		II		III		IV		V		D-1	D-2	D-3	D-4	D-5	D-6	D-7
Calidad	Muy buena		Buena		Media		Mala		Muy mala		52	57	46	59	48	55	56
Puntuación	100 - 81		80 - 61		60 - 41		40 - 21		< 20		RMR min básico:		46		III-MEDIA		
											RMR máx básico:		59		III-MEDIA		
											RMR prom básico:		53		III-MEDIA		

Tabla 29
Calificación del macizo rocoso por cada estación geomecánica (UG-III).

Ubicación	Estación	RMR
		(Bieniawski, 1989)
		CALIDAD
UG-III Intrusivo	CM-J2-025	III -MEDIA
	CM-J2-047	II-BUENA
	CM-J2-051	II-BUENA
	CM-J2-052	II-BUENA
	CM-J2-053	II-BUENA
	CM-J2-062	V-MUY MALA

CM-J2-064	V-MUY MALA
CM-J2-067	V-MUY MALA
Mínimo	V-MUY MALA
Máximo	II-BUENA
Mediana	II-BUENA
Promedio	III -MEDIA

En la Tabla 29 se observa el resultado de RMR para cada estación geomecánica realizada en el cuerpo intrusivo, donde se observa una predominancia de roca tipo II (Buena), donde el macizo rocoso se encuentra fresco y Muy mala (tipo V) en sectores donde los factores exógenos han generado un suelo residual de la roca granodiorítica.

A continuación se resume la calidad de la roca para cada unidad geotécnica, obtenido mediante la clasificación RMR (Bieniawski, 1989):

Tabla 30

Calidad del macizo rocoso para cada Unidad Geotécnica.

Unidad Geotécnica	Ubicación	Nº Est. Geom.	RMR (Bieniawski, 1989)
UG-I-C1	Cuerpo 1	19	59 - Roca Clase III, Media
UG-I-C2	Cuerpo 2	54	59 - Roca Clase III, Media
UG-I-C3	Cuerpo 3	19	50 - Roca Clase III, Media
UG-II	Volcano-Sedimento	19	35 - Roca Clase IV, Mala
UG-III	Intrusivo	8	53- Roca Clase III, Media
Total		119	

Se realizaron un total de 119 estaciones geomecánicas, las mismas que han permitido establecer la variación espacial de la calidad de la roca (RMR) a lo largo de la zona de estudio (Figura 32). De manera general se puede decir que el macizo rocoso perteneciente al mármol es de media calidad (tipo III), mientras que las rocas volcanoclásticas y el intrusivo tienen mejor calidad (Tipo II y I), considerando que estos materiales en superficie tienen alta meteorización, debido a procesos denudativos que contribuyen con su desgaste.

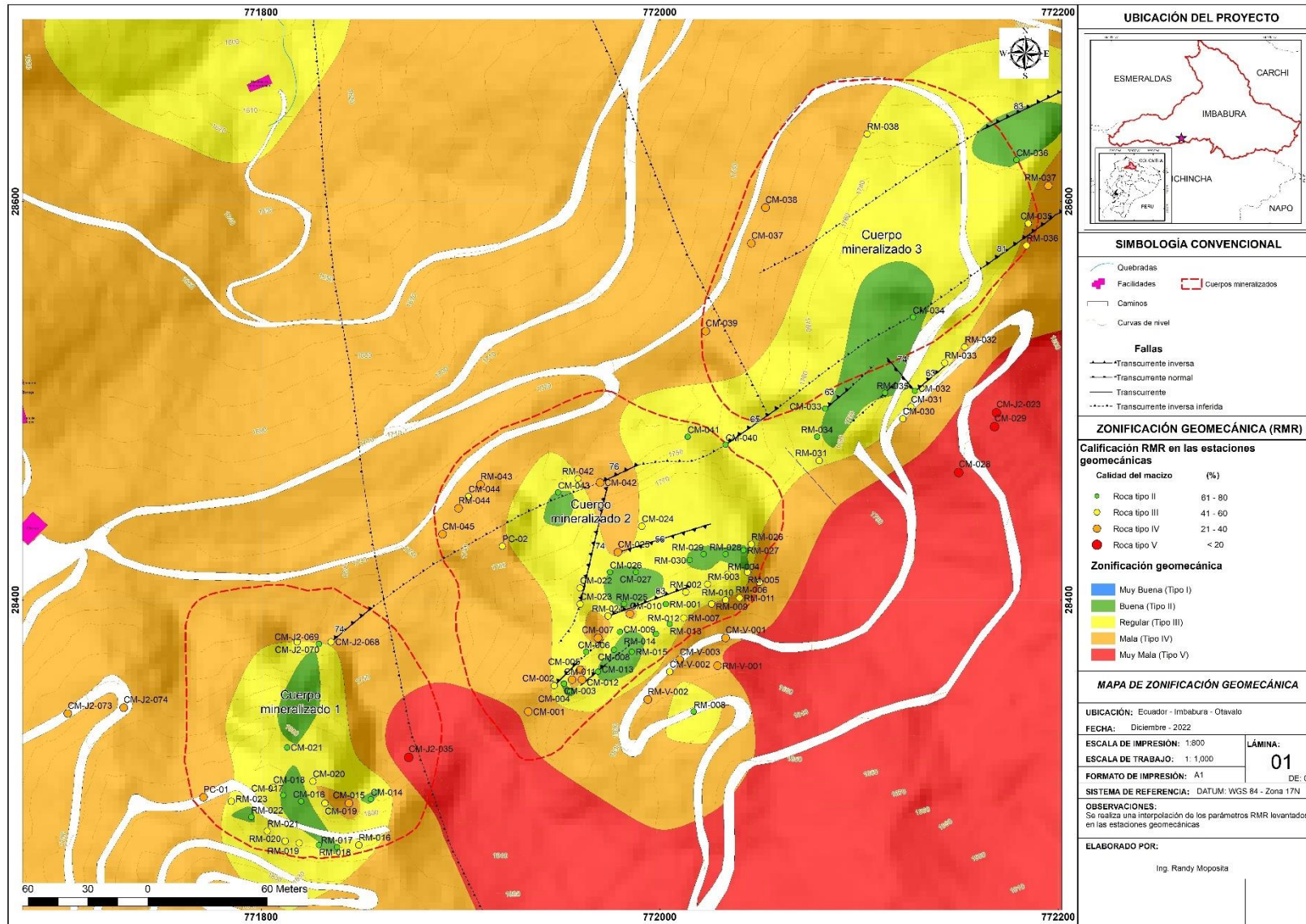


Figura 32. Mapa de zonificación geomecánica del área de estudio, en base a la calificación RMR.

4.1.4 Datos de esclerómetro *IN SITU*

Para la obtención de los parámetros necesarios para el uso del esclerómetro se estableció la densidad en campo, esta densidad fue determinada por principio de Arquímedes, los resultados de se expresan en la Tabla 31, el ensayo esclerométrico (Tabla 32) se realizó en el macizo rocoso del cual se obtuvieron las muestras para los ensayos de laboratorio (Acápite 4.2), para de esta manera asegurar una buena confiabilidad en la estimación de la correlación.

Tabla 31

Resumen de la densidad (peso específico) de campo.

No.	Código	Cuerpo	X	Y	Densidad <i>IN SITU</i>					
					Masa (g)	Masa (kg)	Volumen (ml)	Volumen (m3)	Densidad (kg/m3)	Peso específico (kN/m3)
1	LAB-CM03	2	771938.30	28351.99	1805.5	1.8055	730	0.00073	2473.29	24.26
2	LAB-CM04	3	772105.90	28484.85	1745.6	1.7456	700	0.00070	2493.71	24.46
3	LAB-CM05	3	772118.41	28487.90	1894.7	1.8947	810	0.00081	2339.14	22.95
4	LAB-CM06	2	772014.26	28394.87	1407.8	1.4078	505	0.00051	2787.72	27.35
5	LAB-CM07	2	771970.00	28363.00	1221.5	1.2215	460	0.00046	2655.43	26.05
6	LAB-CM08	3	772135.80	28543.16	1188.8	1.1888	455	0.00046	2612.75	25.63
7	LAB-CM09	2	772027.45	28426.08	1123.7	1.1237	410	0.00041	2740.73	26.89
8	LAB-CM10	2	771988.24	28416.62	1131.4	1.1314	450	0.00045	2514.22	24.66
9	LAB-CM11	3	772180.22	28587.65	1195.2	1.1952	475	0.00048	2516.21	24.68
10	LAB-CM12	3	772076.80	28646.37	1236.9	1.2369	460	0.00046	2688.91	26.38
11	LAB-CM13	2	772011.39	28492.32	1306.6	1.3066	480	0.00048	2722.08	26.70
12	LAB-CM14	2	771898.89	28450.17	1319.4	1.3194	535	0.00054	2466.17	24.19
13	LAB-CM15	1	771807.08	28393.73	1263.3	1.2633	520	0.00052	2429.42	23.83
14	LAB-CM16	1	771789.88	28301.34	1362.5	1.3625	525	0.00053	2595.24	25.46
15	LAB-CM17	1	771851.45	28287.86	1194.8	1.1948	425	0.00043	2811.29	27.58
16	LAB-CM02	2	772036.57	28414.17	1381.3	1.3813	575	0.00058	2402.26	23.57

El peso específico tiene una desviación estándar de 1.4 y un coeficiente de variación de 5.6% lo que indica una baja variabilidad entre los datos. La medición del peso específico se realizó *IN SITU*.

Tabla 32

Estimación de la Resistencia a la compresión uniaxial no confinada RCS por el método del esclerómetro (*IN SITU*)

No.	Código	Cuerpo	Esclerómetro <i>IN SITU</i>												RCS (MPa)
			Posición	Datos											
1	LAB-CM03	2	IA	20	20	22	22	24	24	24	26	26	28	23.6	31.8
2	LAB-CM04	3	IA	22	24	29	30	32	34	34	36	38	40	31.9	48.5
3	LAB-CM05	3	IA	20	20	22	28	34	36	40	40	40	42	32.2	45.4
4	LAB-CM06	2	IA	18	19	19	20	21	22	24	24	28	29	22.4	34.4
5	LAB-CM07	2	H	19	19	20	20	20	22	22	24	24	30	22.0	28.4
6	LAB-CM08	3	A	24	26	26	28	28	30	36	36	36	40	31.0	51.2
7	LAB-CM09	2	IA	19	21	22	23	25	27	27	28	30	30	25.2	39.1
8	LAB-CM10	2	H	27	21	21	22	25	27	29	31	32	34	26.9	34.8
9	LAB-CM11	3	A	20	28	28	30	30	30	36	38	40	40	32.0	50.7
10	LAB-CM12	3	IA	20	22	24	30	30	40	40	42	42	42	33.2	58.4
11	LAB-CM13	2	H	18	18	20	21	21	22	24	24	25	28	22.1	29.2
12	LAB-CM14	2	H	18	20	20	22	24	25	26	26	28	30	23.9	29.0
13	LAB-CM15	1	H	16	16	16	18	18	18	18	20	20	22	18.2	21.5
14	LAB-CM16	1	H	14	14	16	17	20	21	22	24	25	26	19.9	25.1
15	LAB-CM17	1	H	15	16	17	18	19	19	20	21	23	25	19.3	26.0
16	LAB-CM02	2	H	20	24	24	24	24	26	26	26	28	30	25.2	30.0

Posición del esclerómetro: IA – Inclinado hacia abajo, H – Horizontal, A: Vertical hacia abajo

El valor de rebotes *IN SITU* (R_{cam}), tiene una desviación estándar de 5.0, junto un coeficiente de variación del 18.9%. Estos valores indican una baja dispersión entre los datos de entrada con respecto a la media, lo que supone una buena concentración de información, es decir, el resultado de este análisis tiene alta fiabilidad con respecto a la media aritmética. Además, la Resistencia a la Compresión Simple de campo (RCS_{cam}) tiene una desviación estándar de 11.1, junto un coeficiente de variación del 30.4%, lo que supone una dispersión media entre los datos de RCS_{cam} , lo que hace posible realizar análisis estadístico con esta información, obteniendo regresiones de buena confiabilidad.

4.2 Datos de laboratorio

Se obtuvieron 16 muestras representativas dentro de la Unidad El Laurel, distribuidas entre los cuerpos mineralizados 1, 2 y 3 (Figura 33). Sobre estas rocas se realizaron ensayos de peso específico, triaxial, compresión simple con módulos de elasticidad, esclerómetro en laboratorio, PLT y láminas delgadas.

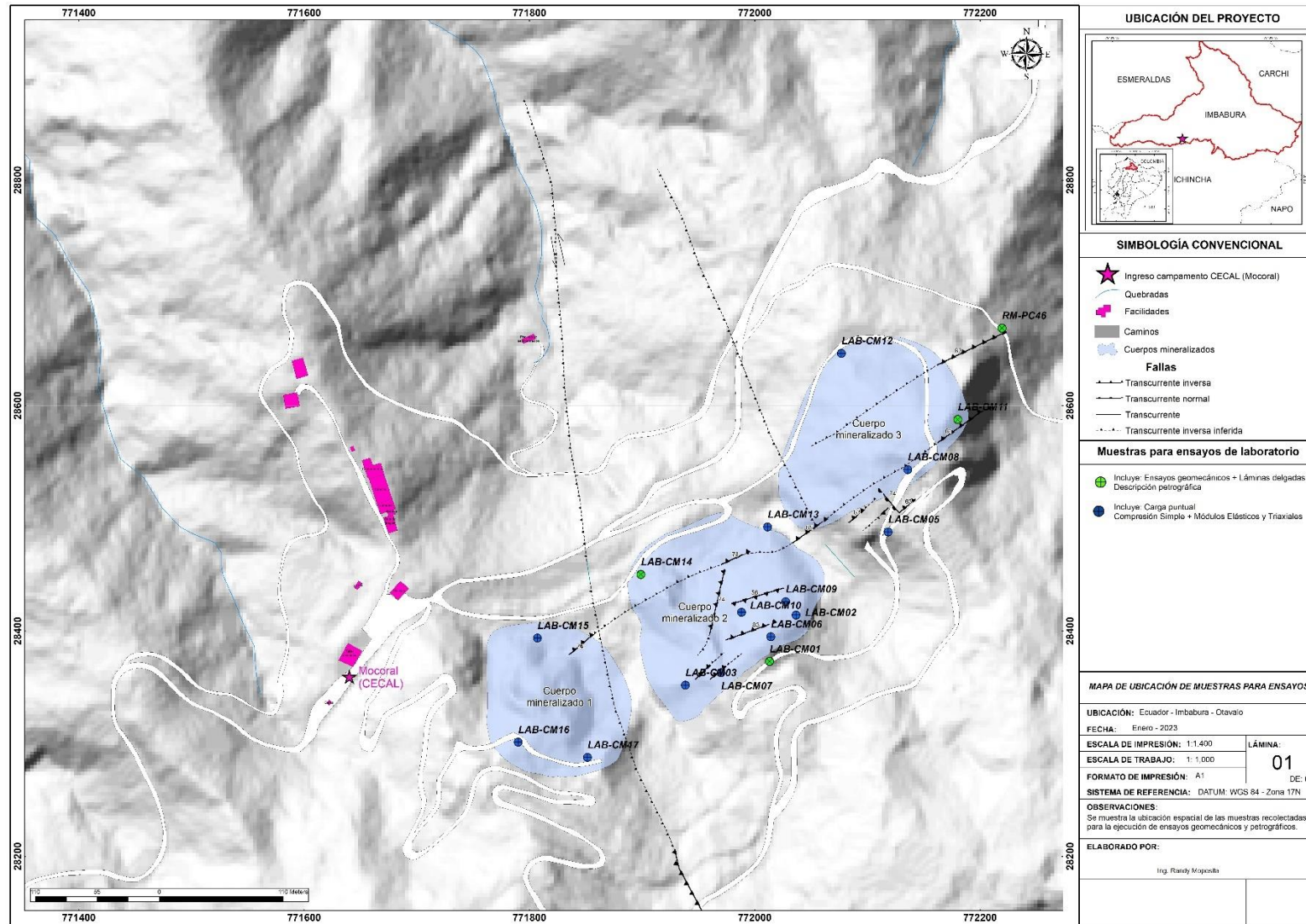


Figura 33. Mapa de ubicación de las muestras para ensayos de laboratorio, de color azul, muestras para ensayos de peso específico, compresión simple, triaxial y PLT. Color verde las muestras para análisis petrográfico (laminas delgadas), además de los ensayos de laboratorio consideradas en las muestras azules.

4.2.1 Peso específico

Los resultados de laboratorio se exponen en el Anexo 1, de manera resumida se expresa los resultados en la Tabla 33.

Tabla 33

Resumen de la densidad (peso específico) de laboratorio

No.	Código	Cuerpo	Densidad laboratorio	
			Densidad (kg/m ³)	Peso específico (kN/m ³)
1	LAB-CM03	2	2506.94	24.59
2	LAB-CM04	3	2470.16	25.18
3	LAB-CM05	3	2363.68	23.19
4	LAB-CM06	2	2699.88	26.49
5	LAB-CM07	2	2694.29	26.43
6	LAB-CM08	3	2705.47	26.54
7	LAB-CM09	2	2689.98	26.39
8	LAB-CM10	2	2668.34	26.18
9	LAB-CM11	3	2641.73	25.92
10	LAB-CM12	3	2611.08	25.61
11	LAB-CM13	2	2679.70	26.29
12	LAB-CM14	2	2332.34	22.88
13	LAB-CM15	1	2496.64	24.49
14	LAB-CM16	1	2517.11	24.69
15	LAB-CM17	1	2750.59	26.98
16	LAB-CM02	2	2147.48	21.07

El valor de Peso Específico en laboratorio (PE_{lab}), tiene una desviación estándar de 1.6, junto un coeficiente de variación del 6.5%, lo que indica una baja dispersión de los datos en relación a la media de los datos.

4.2.2 Ensayos triaxiales

Los resultados de laboratorio se exponen en el Anexo 2, de manera resumida se expresa los resultados en la Tabla 34.

Tabla 34

Resumen de los parámetros de compresión simple, tracción, cohesión y ángulo de fricción interna, obtenidos en laboratorio

No.	Código	Cuerpo	Ensayo triaxial			
			σ_{CS-T} [MPa]	σ_t [MPa]	C [MPa]	ϕ [°]
1	LAB-CM03	2	35.2	-4.9	6.6	48.9
2	LAB-CM04	3	-	-	-	-
3	LAB-CM05	3	74.1	-11.5	14.6	46.9
4	LAB-CM06	2	35.9	-5.3	6.9	48.0
5	LAB-CM07	2	-	-	-	-
6	LAB-CM08	3	80.4	-12.9	16.1	46.4
7	LAB-CM09	2	37.6	-5.6	7.2	47.8
8	LAB-CM10	2	44.5	-6.3	8.3	48.9
9	LAB-CM11	3	100.4	-14.1	18.8	48.9
10	LAB-CM12	3	78.3	-14.8	17.0	42.9
11	LAB-CM13	2	39.1	-5.5	7.3	48.9
12	LAB-CM14	2	37.1	-4.9	6.8	49.7
13	LAB-CM15	1	25.2	-3.3	4.6	49.8
14	LAB-CM16	1	24.6	-3.5	4.7	48.4
15	LAB-CM17	1	26.8	-3.8	5.1	48.5
16	LAB-CM02	2	37.2	-5.2	6.9	48.9

El valor de Resistencia a la Compresión Simple del ensayo (σ_{CS-T}), tiene una desviación estándar de 24.3, junto un coeficiente de variación del 50.2%, lo que indica que la mitad de los datos poseen una dispersión aleatoria, lo cual es aceptable y viable para el análisis estadístico. La tracción (σ_t) tiene una desviación estándar de 4.1, junto un coeficiente de variación del 56.8%, que indica una concentración moderada de los datos con respecto a la media, este valor posibilita un análisis confiable de información. La cohesión (C) tiene una desviación estándar de 4.9, junto un coeficiente de variación del 53.0%, dando como resultado una moderada dispersión de información respecto a la media, estadísticamente es viable realizar análisis con estos datos los cuales tendrán una buena aproximación. Finalmente, el ángulo de fricción interno (ϕ) tiene una desviación estándar de 1.8, junto un coeficiente de variación del 3.7%, este valor indica una concentración muy alta de información con respecto a la media, por lo que el análisis que emane de estos datos tendrá una muy alta confiabilidad. Aunque independientemente del coeficiente de variación, el modelo de regresión depende mayormente del ajuste de la curva de regresión con respecto a los datos de entrada.

4.2.3 Ensayo de compresión simple con cálculo de módulos de elasticidad

Los resultados de laboratorio se exponen en el Anexo 3 y 4, de manera resumida se expresa los resultados en la Tabla 35.

Tabla 35

Resumen de los parámetros elásticos (Modulo de Young y coeficiente de Poisson), obtenidos en laboratorio

No.	Código	Cuerpo	Ensayo de compresión simple con módulos de elasticidad						
			Carga máxima (kN)	σ_{CS-C} [MPa]	Módulo de Young E Axial Secante [GPa]	Módulo de Young E_{10MPa} Axial [GPa]	Módulo de Young $E_{0.2\%}$ Axial [GPa]	Módulo de Young E Axial Promedio [GPa]	Poisson [ν]
1	LAB-CM03	2	32.9	30.6	30.6	37.6	31.8	34.7	0.25
2	LAB-CM04	3	61.2	56.9	29.4	115.2	106.9	111.1	0.18
3	LAB-CM05	3	78.3	72.9	7.5	158.8	119.6	139.2	0.15
4	LAB-CM06	2	17.9	16.7	49.3	30.3	30.3	30.3	0.25
5	LAB-CM07	2	28.9	26.9	9.9	32.1	31.4	31.8	0.25
6	LAB-CM08	3	44.9	41.7	35.7	65.4	57.3	61.3	0.18
7	LAB-CM09	2	28.7	25.4	41.6	31.6	31.5	31.5	0.27
8	LAB-CM10	2	42.7	39.7	7.3	52.2	51.8	52.0	0.19
9	LAB-CM11	3	59.9	55.7	4.2	94.7	60.0	77.4	0.16
10	LAB-CM12	3	47.4	44.1	8.1	79.7	63.9	71.8	0.12
11	LAB-CM13	2	25.7	23.9	74.1	31.1	31.1	31.1	0.26
12	LAB-CM14	2	33.3	30.9	7.5	43.4	39.5	41.5	0.18
13	LAB-CM15	1	16.5	15.3	10.9	16.7	16.1	16.4	0.26
14	LAB-CM16	1	17.9	16.6	32.7	21.7	15.1	18.4	0.27
15	LAB-CM17	1	23.3	21.7	15.8	31.8	31.6	31.7	0.28
16	LAB-CM02	2	30.6	28.5	48.2	33.0	32.1	32.6	0.19

El valor de Resistencia a la Compresión Simple del ensayo (σ_{CS-C}), tiene una desviación estándar de 16.5, junto un coeficiente de variación del 48.2%. El módulo de Young (E) tiene una desviación estándar de 54.4, junto un coeficiente de variación del 10.9%. Finalmente, el coeficiente de Poisson (ν) tiene una desviación estándar de 0.1, junto un coeficiente de variación del 23.8%. Para el caso de “E” existe una dispersión de datos moderada y para “ ν ” una dispersión con respecto a la media baja.

4.2.4 Ensayo esclerométrico en laboratorio

El ensayo esclerométrico se realizó sobre las muestras de laboratorio (Tabla 36), utilizando la densidad de laboratorio.

Tabla 36

Estimación de la Resistencia a la compresión uniaxial no confinada RCS por el método del esclerómetro (muestras de laboratorio)

No.	Código	Cuerpo	Esclerómetro laboratorio												R_{lab} (prom)	RCS _{lab} (MPa)
			Posición		Datos											
1	LAB-CM03	2	H	24	26	26	30	30	30	30	32	32	34	29.4	39.2	
2	LAB-CM04	3	IA	18	18	20	22	22	24	28	28	28	28	23.6	32.4	
3	LAB-CM05	3	IA	20	22	22	22	22	24	24	24	26	28	23.4	30.0	
4	LAB-CM06	2	H	15	16	16	16	16	16	20	20	21	24	18.0	23.3	
5	LAB-CM07	2	IA	18	18	18	18	18	20	20	20	20	22	19.2	27.8	
6	LAB-CM08	3	A	24	26	26	28	30	32	32	34	34	34	30.0	51.2	
7	LAB-CM09	2	H	18	20	20	22	22	24	26	26	26	28	23.2	30.5	
8	LAB-CM10	2	H	12	12	14	14	16	22	22	22	24	24	18.2	23.3	
9	LAB-CM11	3	H	20	20	20	22	22	24	24	26	26	26	23.0	29.7	
10	LAB-CM12	3	IA	18	18	20	20	24	24	28	28	28	32	24.0	34.8	
11	LAB-CM13	2	A	20	20	20	20	24	24	24	24	26	26	22.8	34.8	
12	LAB-CM14	2	IA	14	14	14	16	16	16	16	16	18	18	15.8	20.6	
13	LAB-CM15	1	H	14	16	16	16	18	18	18	20	20	22	17.8	21.5	
14	LAB-CM16	1	A	10	12	12	14	14	14	14	14	16	16	13.6	20.1	
15	LAB-CM17	1	A	12	12	14	14	14	16	18	18	18	20	15.6	24.3	
16	LAB-CM02	2	IA	16	18	18	18	18	20	20	22	22	24	19.6	23.1	

Posición del esclerómetro: IA – Inclinado hacia abajo, H – Horizontal, A: Vertical hacia abajo

El valor de Resistencia a la Compresión Simple del ensayo en condicione de laboratorio (RCS_{lab}), tiene una desviación estándar de 8.2, junto un coeficiente de variación del 28.1%. Además, el rebote en condiciones de laboratorio (R_{lab}) tiene una desviación estándar de 4.7, junto un coeficiente de variación del 22.2%, lo que supone una baja dispersión de los datos con respecto a la media.

4.2.5 Ensayo de carga puntual (PLT)

Los resultados de laboratorio se exponen en el Anexo 5, de manera resumida se expresa los resultados en la Tabla 37.

El valor del índice a la carga puntual (I_{s50}), tiene una desviación estándar de 1.2, junto un coeficiente de variación del 26.5%, que indica una baja dispersión de la información con respecto a la media.

Tabla 37

Estimación de la Resistencia a la compresión uniaxial no confinada RCS por el PLT

No.	Código	Cuerpo	PLT		
			Carga [kN]	$I_{s(50)}$ [MPa]	σ_c [MPa]
1	LAB-CM03	2	4.5	2.9	20.1
2	LAB-CM04	3	-	-	-
3	LAB-CM05	3	7.5	6.4	44.7
4	LAB-CM06	2	6.6	4.2	29.2
5	LAB-CM07	2	7.2	5.2	36.1
6	LAB-CM08	3	7.1	4.4	30.9
7	LAB-CM09	2	7.2	4.6	32.2
8	LAB-CM10	2	5.2	4.4	30.7
9	LAB-CM11	3	4.4	6.8	47.3
10	LAB-CM12	3	8.6	5.2	36.3
11	LAB-CM13	2	7.8	4.9	34.1
12	LAB-CM14	2	4.3	5.3	37.1
13	LAB-CM15	1	4.1	2.9	20.4
14	LAB-CM16	1	4.4	3.0	21.2
15	LAB-CM17	1	3.1	3.2	22.6
16	LAB-CM02	2	6.9	4.2	29.6

4.2.6 Láminas delgadas

Se realizó la descripción de las láminas delgadas con la observación directa en el microscopio petrográfico (Figura 34), caracterizando así la mineralogía, paragénesis y genética de las diferentes unidades geológicas.



Figura 34. Observación en el microscopio petrográfico, para la descripción petrográfica de las muestras de roca.

4.2.6.1 Muestra LAB-CM-11

Macroscópicamente se destaca una roca de tonalidad gris clara con textura no foliada, tiene granos de calcita de grano medio a grueso (2-6 mm). Se observa a la calcita como mineral predominante en vista macroscópica. El análisis microscópico se detalla en la Tabla 38.

Tabla 38

Análisis microscópico de la lámina delgada LAB-CM-11

Descripción microscópica			
Coordenadas (Datum WGS 84 – Zona 17N): N: 772180.22 m ; E: 28587.65 m (Cuerpo Mineralizado 3)			
Textura		Granoblástica	
Componente	% Total	Minerales	%
Minerales de metamorfismo	98	Calcita	96
		Dolomita	3
		Diópsido	1
Minerales post-metamorfismo	-	-	-
Minerales opacos	2	Opacos	2
Facie metamórfica		Hornfels	
Protolito		Caliza	
Nombre de la Roca		Mármol	

Este análisis se lo realiza con la finalidad de determinar las características petrográficas y mineralógicas que inciden en la resistencia de la roca, además de proporcionar información sobre la genética del depósito.

La muestra LAB-CM-11 es una roca con textura granoblástica, se caracteriza por el alto contenido de minerales calcáreos: Calcita y dolomita, con menor frecuencia se hallan incipientes granos de diópsido. Se puede apreciar los bordes de recristalización en los minerales calcáreos, lo que resulta en una mayor resistencia de la roca. Las características ópticas de los minerales (Figura 35) se describen a continuación:

- **Calcita:** En luz natural es incolora, nulo pleocroísmo, de formas subhedrales a anhedrales, alto relieve y clivaje en 3 direcciones. En luz polarizada posee una extinción simétrica, colores de interferencia de alto orden.
- **Dolomita:** En luz natural es incolora, nulo pleocroísmo, aunque se nota un falso pleocroísmo de relieve, de formas anhedrales a subhedrales. Relieve bajo a medio. En luz polarizada posee una extinción simétrica, colores de interferencia de alto orden.

- **Diópsido:** En luz natural es incoloro, pleocroísmo en ligeros tonos verdes, relieve alto, de formas anhedrales. En luz polarizada posee un ángulo de extinción de 40-45 y birrefringencia baja.
- **Opacos:** Minerales isótropos de forma subhedral.

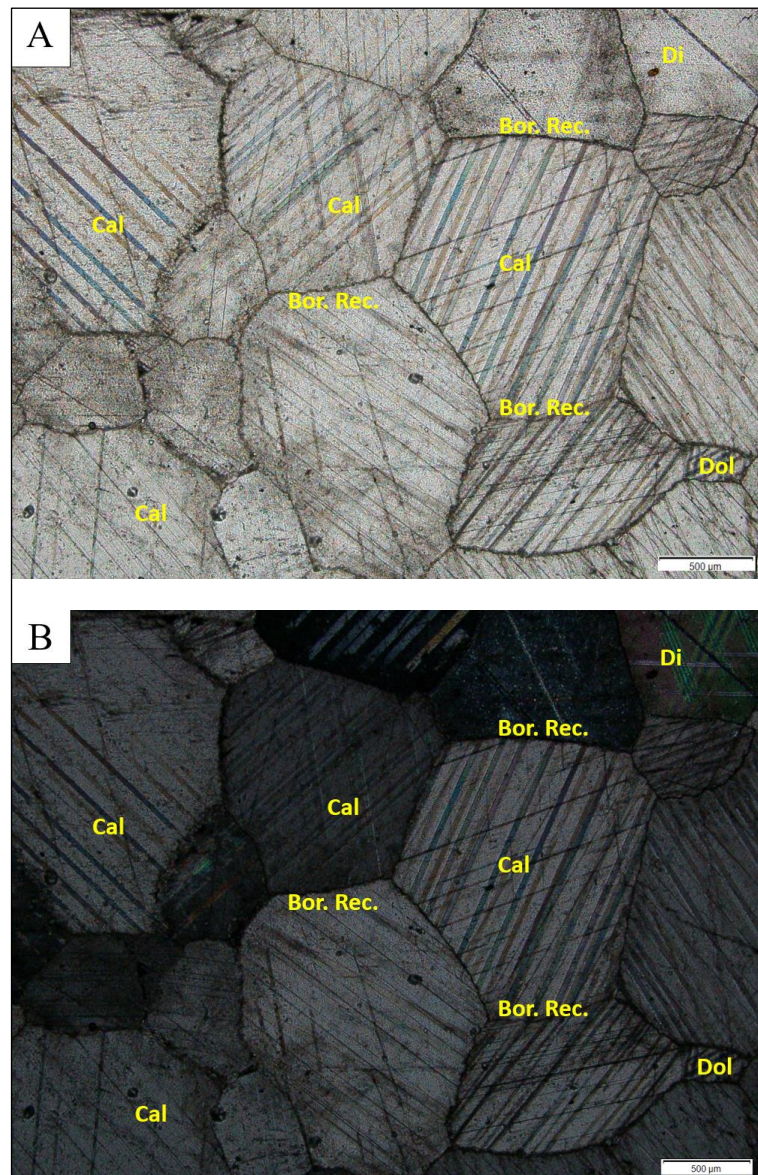


Figura 35. Muestra de la lámina delgada LAB-CM-11 (lente 10X). Mármol con textura granoblástica, asociada a la unidad El Laurel. A) Luz natural, B) Luz polarizada. Abreviatura mineralógica: Calcita (Cal), dolomita (Dol), borde de recristalización (Bor. Rec.) y diópsido (Di).

Los bordes de recristalización son evidencia de los pulsos post genéticos existentes en el área de estudio, que indican un metamorfismo de bajo grado de tipo metasomatismo.

4.2.6.2 Muestra LAB-CM-14

Macroscópicamente se destaca una roca de tonalidad gris clara con textura no foliada, tiene granos de calcita de grano medio a grueso (1-4 mm). Se observa a la calcita como mineral predominante en vista macroscópica. El análisis microscópico se detalla en la Tabla 39.

Tabla 39

Análisis microscópico de la lámina delgada LAB-CM-14

Descripción microscópica			
Coordenadas (Datum WGS 84 – Zona 17N): N: 771898.89 m ; E: 28450.17 m (Cuerpo Mineralizado 2)			
Textura		Granoblástica	
Componente	% Total	Minerales	%
Minerales de metamorfismo	97	Calcita	94
		Dolomita	4
		Diópsido	2
Minerales post-metamorfismo	2	Arcillas	2
Minerales opacos	1	Opacos	1
Facie metamórfica		Hornfels	
Protolito		Caliza	
Nombre de la roca		Mármol	

Este análisis se lo realiza con la finalidad de determinar las características petrológicas y mineralógicas que inciden en la resistencia de la roca, además de proporcionar información sobre la genética del depósito.

La muestra LAB-CM-14 es una roca con textura granoblástica, se caracteriza por el alto contenido de minerales calcáreos: Calcita y dolomita, con menor frecuencia se hallan incipientes granos de diópsido. Las características ópticas (Figura 36) se describen a continuación:

- **Calcita:** En luz natural es incolora, nulo pleocroísmo, de formas subhedrales a anhedrales, alto relieve y clivaje en 3 direcciones. En luz polarizada posee una extinción simétrica, colores de interferencia de alto orden.
- **Dolomita:** En luz natural es incolora, nulo pleocroísmo, aunque se nota un falso pleocroísmo de relieve, de formas anhedrales a subhedrales. Relieve bajo a medio. En luz polarizada posee una extinción simétrica, colores de interferencia de alto orden.

- **Diópsido:** En luz natural es incoloro, pleocroísmo en ligeros tonos verdes, relieve alto, de formas anhedrales. En luz polarizada posee un ángulo de extinción de 40-45 y birrefringencia baja.
- **Arcillas:** Minerales producto de la alteración, en el caso particular de esta roca gran parte de la formación de arcillas se debe a la descomposición de la materia orgánica pre existente en la roca.
- **Opacos:** Minerales isótropos de forma subhedral.

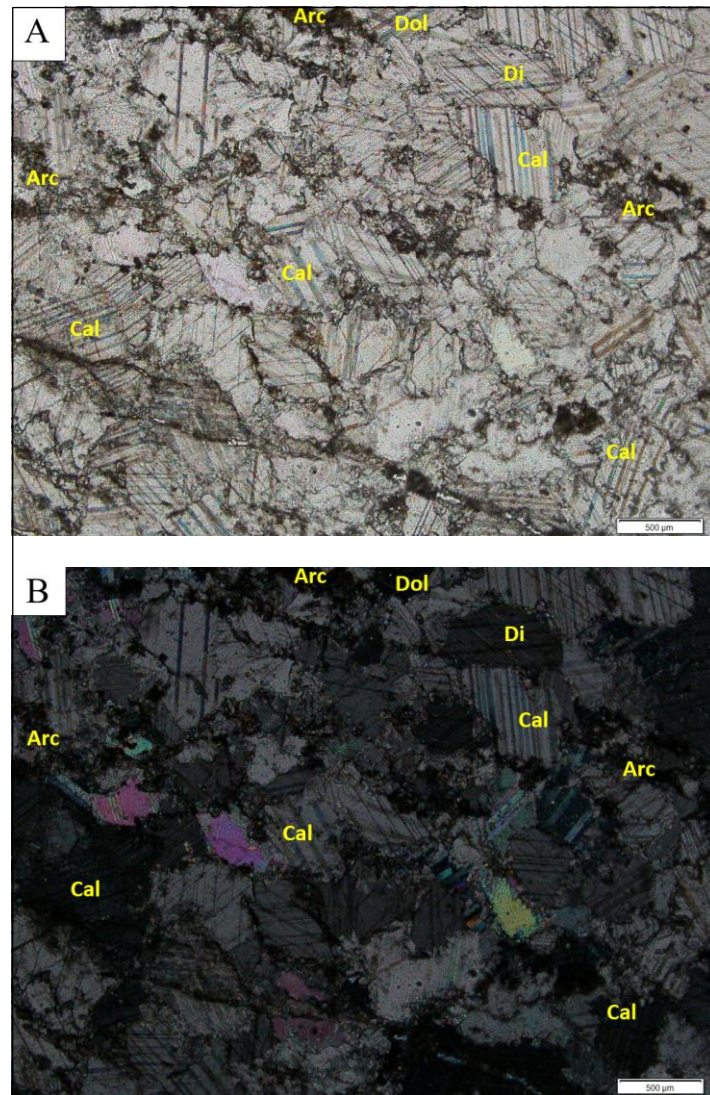


Figura 36. Muestra de la lámina delgada LAB-CM-14 (lente 10X). Mármol con textura granoblástica, asociada a la unidad El Laurel. A) Luz natural, B) Luz polarizada. Abreviatura mineralógica: Calcita (Cal), dolomita (Dol), arcillas (Arc) y diópsido (Di).

La presencia de arcillas indica la alta contaminación de materiales pelágicos en la zona de estudio, que pueden ser relacionados con materiales syn genéticos de características orgánicas, en razón que, en muestra de mano, la roca desprende un marcado olor a materia descompuesta. Lo que confirma un origen bioclástico en las calizas pre existentes, previas a la intrusión del cuerpo intrusivo.

4.2.6.3 Muestra LAB-CM-18

Macroscópicamente se destaca una roca de tonalidades blanquecinas con textura granular, tiene granos subredondeados de cuarzo, plagioclasa, biotita. El análisis microscópico se detalla en la Tabla 40.

Tabla 40

Análisis microscópico de la lámina delgada LAB-CM-18

Descripción microscópica			
Coordenadas (Datum WGS 84 – Zona 17N): N: 771665.00 m ; E: 29092.00 m (Batolito de Apuela)			
Textura		Microcristalina	
Componente	% Total	Minerales	%
Fenocristales	77	Plagioclasa	42
		Cuarzo	20
		Feldespato potásico	15
Minerales accesorios	18	Biotita	10
		Hornblenda	8
Minerales secundarios	3	Clorita	2
		Epidota	1
Minerales opacos	2	Opacos	2
Nombre de la roca		Granodiorita	

Este análisis se lo realiza con la finalidad de determinar las características petrológicas y mineralógicas del batolito de Apuela, además de proporcionar información sobre la genética del depósito (cuerpo intrusivo).

La muestra LAB-CM-18 es una roca con textura microcristalina, se caracteriza por el alto contenido de minerales de plagioclasa, cuarzo y feldespato potásico (Figura 37), escasamente se hallan minerales como clorita y epidota. Las características ópticas se describen a continuación:

- **Plagioclasas:** Fenocristales incoloros, subhedrales y birrefringencia débil distintivo de estos minerales. Muestran maclado polisintético y zonados. Su extinción es oblicua aproximada de 30° y figura de interferencia biaxial (+).

- **Cuarzo:** Cristales de forma subhedral – anhedral, relieve muy bajo, birrefringencia débil y uniaxial.
- **Feldespato potásico:** Incoloro, relieve bajo con extinción paralela y figura de interferencia biaxial.
- **Biotita:** Mineral color marrón - verdoso, subhedral. Su relieve es moderado, birrefringencia fuerte. Se caracteriza por su extinción paralela.
- **Hornblenda:** Mineral de color verde, relieve alto, birrefringencia moderada, de forma subhedral.
- **Clorita:** Color verde pálido, de forma tabular y de escamas, colores de interferencia del 1º orden, se lo identifica con extinción paralela. Producto de la alteración de minerales máficos.
- **Epidota:** Mineral secundario producto de la alteración de plagioclasas y minerales máficos, se presenta incoloro- verde en luz natural, forma columnar, de relieve alto, birrefringencia moderada a fuerte y extinción paralela.
- **Opacos:** Mineral isótropo de forma subhedral a anhedral.

El resultado del análisis de esta lámina indica que el cuerpo intrusivo de mayor extensión en la zona de estudio tiene afinidad granodiorítica, a pesar de que existen relictos de dioritas en campo, lo que sugiere un evento magmático con varias pulsaciones.

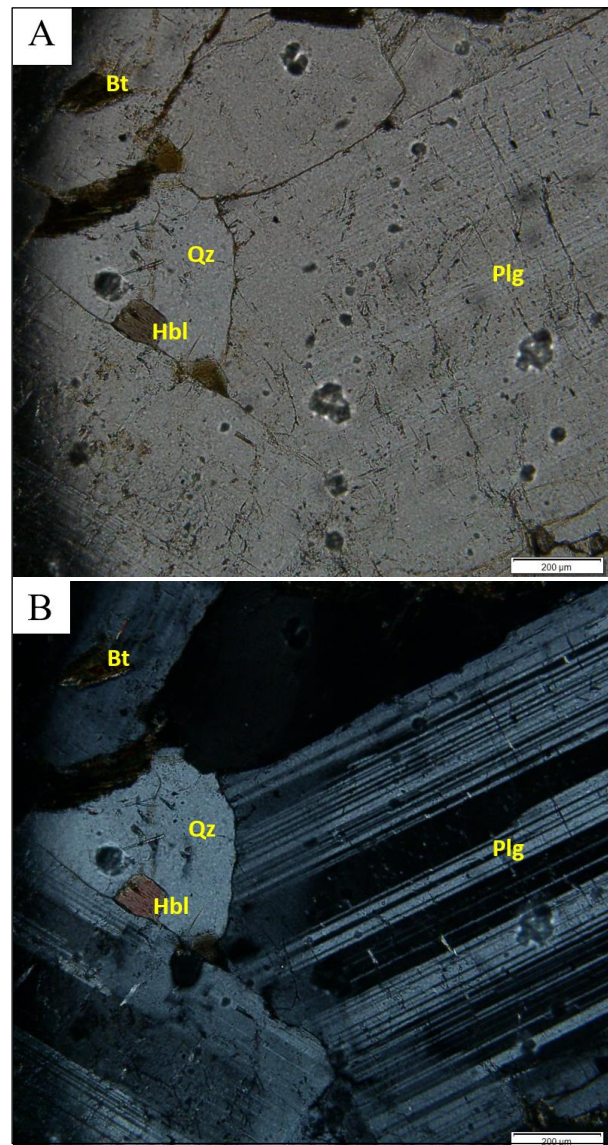


Figura 37. Muestra de la lámina delgada LAB-CM-18 (lente 4X). Granodiorita con textura microcristalina, asociada al batolito de Apuela. A) Luz natural, B) Luz polarizada. Abreviatura mineralógica: Biotita (Bt), cuarzo (Qz), plagioclasa (Plg) y hornblenda (Hbl)

4.2.6.4 Muestra LAB-CM-01

Macroscópicamente se destaca una roca de tonalidades gris verdosas con trazas de oxidación de textura clástica, tiene líticos de tamaños inferiores a 1mm. El análisis microscópico se detalla en la Tabla 41.

Tabla 41

Análisis microscópico de la lámina delgada LAB-CM-01

Descripción microscópica			
Coordenadas (Datum WGS 84 – Zona 17N): N: 772013.13 m ; E: 28372.92 m (Unidad Pilatón)			
Textura		Clástica	
Componente	% Total	Minerales	%
Minerales principales	74	Plagioclasa	17
		Cuarzo	12
		Líticos	45
Minerales accesorios	7	Hornblenda	7
		Arcillas	4
Minerales secundarios	7	Clorita	2
		Epidota	1
		Cuarzo	10
Cemento/matriz	10	Opacos	2
Opacos	2		
Nombre de la roca		Arenisca tobácea silicificada	

Este análisis se lo realiza con la finalidad de determinar las características mineralógicas y asociación litológica de la Unidad Pilatón, además de proporcionar información sobre la genética del depósito (facie volcánica).

Roca con textura volcanoclástica, se caracteriza por el alto contenido de minerales de plagioclasa, cuarzo y líticos (Figura 38), escasamente se hallan minerales como clorita y epidota. Las características ópticas se describen a continuación:

- **Plagioclasas:** Fenocristales incoloros, subhedrales y birrefringencia débil distintivo de estos minerales. Muestran maclado polisintético y zonados. Su extinción es oblicua aproximada de 30° y figura de interferencia biaxial (+).
- **Cuarzo:** Cristales de forma subhedral – anhedral, relieve muy bajo, birrefringencia débil y uniaxial.
- **Líticos:** Fragmentos subangulares – angulares de roca volcánica de composición intermedia a básica. Se presentan en su mayoría alterados
- **Hornblenda:** Mineral de color verde, relieve alto, birrefringencia moderada, de forma subhedral.
- **Arcillas:** Minerales producto de la alteración de plagioclasas, en el caso particular de esta roca gran parte de la formación de arcillas se debe a la alteración de los minerales que forman parte de los líticos existentes.

- **Clorita:** Color verde pálido, de forma tabular y de escamas, colores de interferencia del 1º orden, se lo identifica con extinción paralela. Producto de la alteración de minerales máficos.
- **Epidota:** Mineral secundario producto de la alteración de plagioclasas y minerales máficos, se presenta incoloro- verde en luz natural, forma columnar, de relieve alto, birrefringencia moderada a fuerte y extinción paralela.
- **Opacos:** Mineral isótropo de forma subhedral a anhedral.

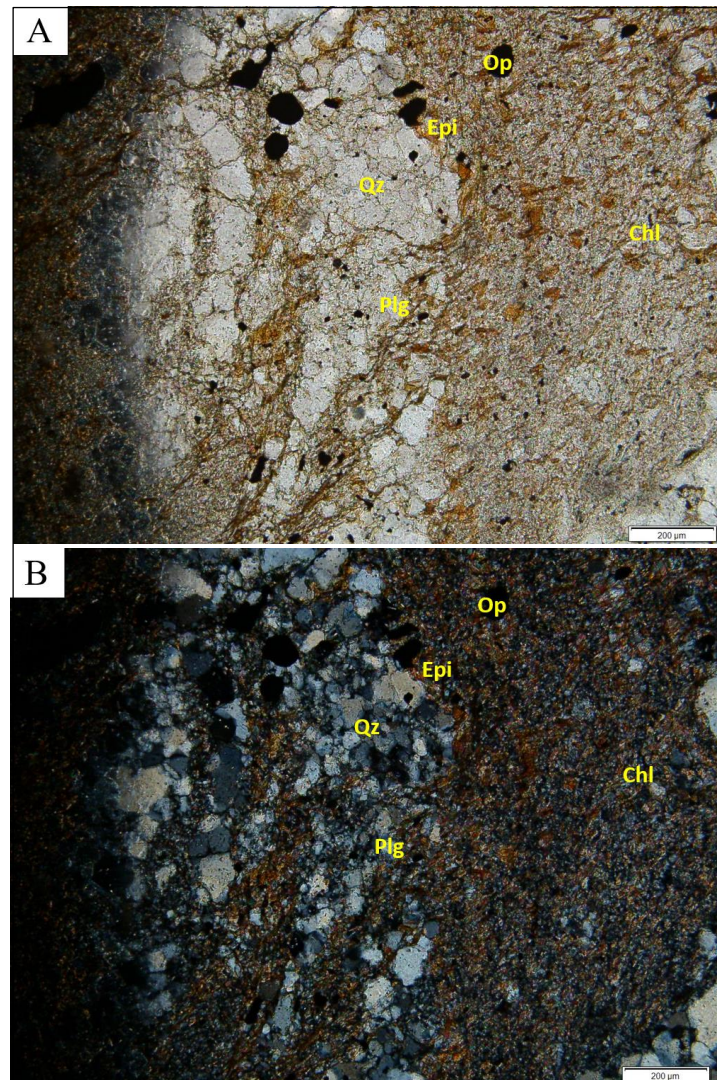


Figura 38. Muestra de la lámina delgada LAB-CM-01 (lente 4X). Arenisca tobácea con textura clástica, asociada a la Unidad Pilatón. A) Luz natural, B) Luz polarizada. Abreviatura mineralógica: Clorita (Chl), cuarzo (Qz), plagioclasa (Plg), Epidota (Epi) y opacos (Op).

El análisis de esta lámina refleja un alto contenido terrígeno en la formación syn genética de la Unidad Pilatón, es decir, había un alto aporte de materiales gruesos en la deposición de esta unidad; además, el contenido de tobas indica un volcanismo activo durante la sedimentación.

4.2.6.5 Muestra CM-J2-28

Macroscópicamente se destaca una roca de tonalidades gris verdosas de tipo volcanoclástica, tiene líticos de tamaños inferiores a 1mm de composición volcánica. El análisis microscópico se detalla en la Tabla 42.

Tabla 42

Análisis microscópico de la lámina delgada CM-J2-28

Descripción microscópica			
Coordenadas (Datum WGS 84 – Zona 17N): N: 772302.69 m ; E: 28578.98 m (Unidad Pilatón)			
Textura		Clástica	
Componente	% Total	Minerales	%
Minerales principales	70	Plagioclasa	15
		Cuarzo	14
		Líticos	41
Minerales accesorios	6	Hornblenda	6
		Arcillas	2
Minerales secundarios	11	Clorita	7
		Epidota	2
		Cuarzo	9
Cemento/matriz	10	Cuarzo	9
Opacos	3	Opacos	3
Nombre de la roca		Toba silicificada	

Este análisis se lo realiza con la finalidad de determinar las características mineralógicas y asociación litológica de la Unidad Pilatón, además de proporcionar información sobre la genética del depósito (facie volcánica).

Roca con textura volcanoclástica, se caracteriza por el alto contenido de minerales de plagioclasa, cuarzo y líticos (Figura 39), escasamente se hallan minerales como clorita y epidota. Las características ópticas se describen a continuación:

- **Plagioclasas:** Fenocristales incoloros, subhedrales y birrefringencia débil distintivo de estos minerales. Muestran maclado polisintético y zonados. Su extinción es oblicua aproximada de 30° y figura de interferencia biaxial (+).

- **Cuarzo:** Cristales de forma subhedral – anhedral, relieve muy bajo, birrefringencia débil y uniaxial.
- **Líticos:** Fragmentos subangulares – angulares de roca volcánica de composición intermedia a básica. Se presentan en su mayoría alterados
- **Hornblenda:** Mineral de color verde, relieve alto, birrefringencia moderada, de forma subhedral.
- **Arcillas:** Minerales producto de la alteración de plagioclasas, en el caso particular de esta roca gran parte de la formación de arcillas se debe a la alteración de los minerales que forman parte de los líticos existentes.
- **Clorita:** Color verde pálido, de forma tabular y de escamas, colores de interferencia del 1º orden, se lo identifica con extinción paralela. Producto de la alteración de minerales máficos.
- **Epidota:** Mineral secundario producto de la alteración de plagioclasas y minerales máficos, se presenta incoloro- verde en luz natural, forma columnar, de relieve alto, birrefringencia moderada a fuerte y extinción paralela.
- **Opacos:** Mineral isótropo de forma subhedral a anhedral.

El análisis de esta lamina refleja un alto contenido terrígeno en la formación sin genética (alto aporte de materiales gruesos durante la deposición de los materiales clásticos) de la Unidad Pilatón. Además, el contenido de tobas indica un volcanismo activo durante la sedimentación, muy similar a LAB-CM-01.

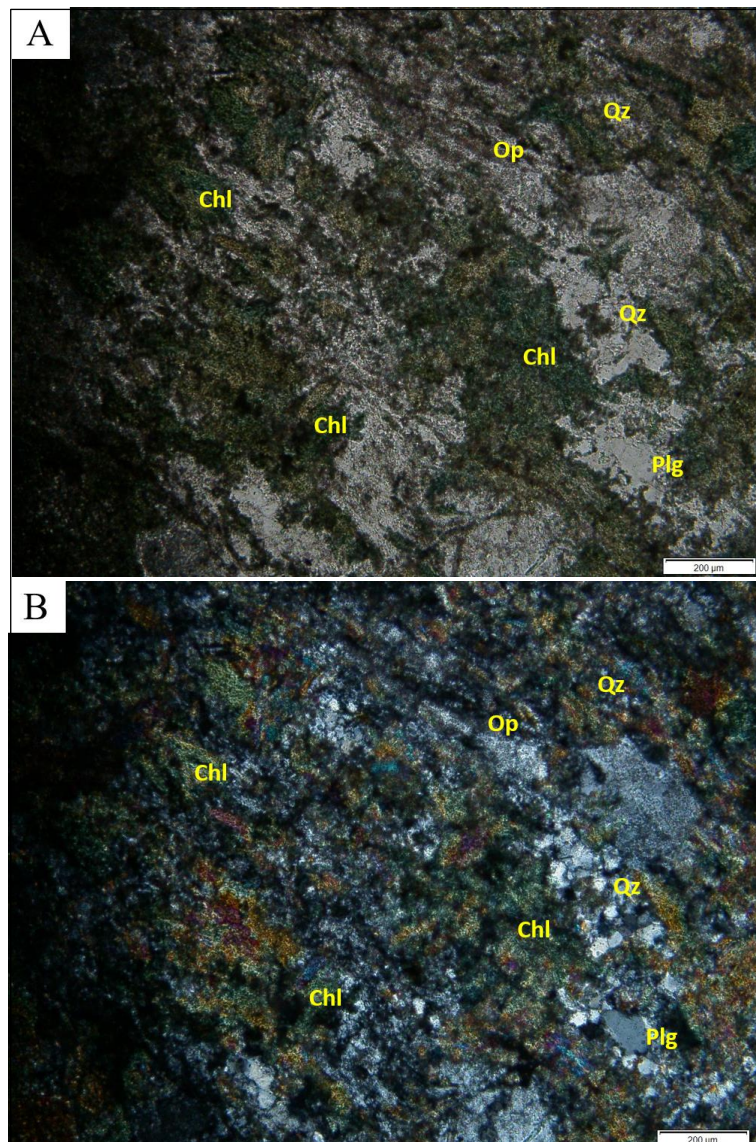


Figura 39. Muestra de la lámina delgada CM-J2-28 (lente 4X). Toba silicificada con textura clástica, asociada a la Unidad Pilatón. A) Luz natural, B) Luz polarizada. Abreviatura mineralógica: Clorita (Chl), cuarzo (Qz), plagioclasa (Plg) y opacos (Op).

4.2.6.6 Muestra RM-PC-46

Macroscópicamente se destaca una roca de tonalidades gris verdosas de tipo volcanoclástica, tiene líticos de tamaños inferiores a 1mm de composición volcánica. El análisis microscópico se detalla en la Tabla 43.

Tabla 43

Análisis microscópico de la lámina delgada RM-PC-46

Descripción microscópica			
Coordenadas (Datum WGS 84 – Zona 17N): N: 772219.45 m ; E: 28668.65 m (Unidad Pilatón)			
Textura		Porfídica	
Componente	% Total	Minerales	%
Matriz	84	Plagioclasa	80
		Arcillas (plg alteradas)	4
Minerales accesorios	3	Hornblenda	3
Minerales secundarios	7	Clorita	7
Minerales opacos	6	Opacos (Pirita)	6
Nombre de la roca		Andesita fuertemente alterada	

Este análisis se lo realiza con la finalidad de determinar las características mineralógicas y asociación litológica de la Unidad Pilatón, además de proporcionar información sobre la genética del depósito (facie volcánica).

Roca con textura volcanoclástica, se caracteriza por el alto contenido de minerales de plagioclasa, cuarzo y líticos (Figura 40), escasamente se hallan minerales arcillosos y opacos.

Las características ópticas se describen a continuación:

- **Plagioclasas:** Fenocristales incoloros, subhedrales y birrefringencia débil distintivo de estos minerales. Muestran maclado polisintético y zonados. Su extinción es oblicua aproximada de 30° y figura de interferencia biaxial (+).
- **Arcillas:** Minerales producto de la alteración de plagioclasas, en el caso particular de esta roca gran parte de la formación de arcillas se debe a la alteración de los minerales que forman parte de los minerales de plagioclasas existentes.
- **Hornblenda:** Mineral de color verde, relieve alto, birrefringencia moderada, de forma subhedral.
- **Clorita:** Color verde pálido, de forma tabular y de escamas, colores de interferencia del 1° orden, se lo identifica con extinción paralela. Producto de la alteración de minerales máficos.
- **Opacos:** Mineral isótropo de forma subhedral a euhedral (pirita).

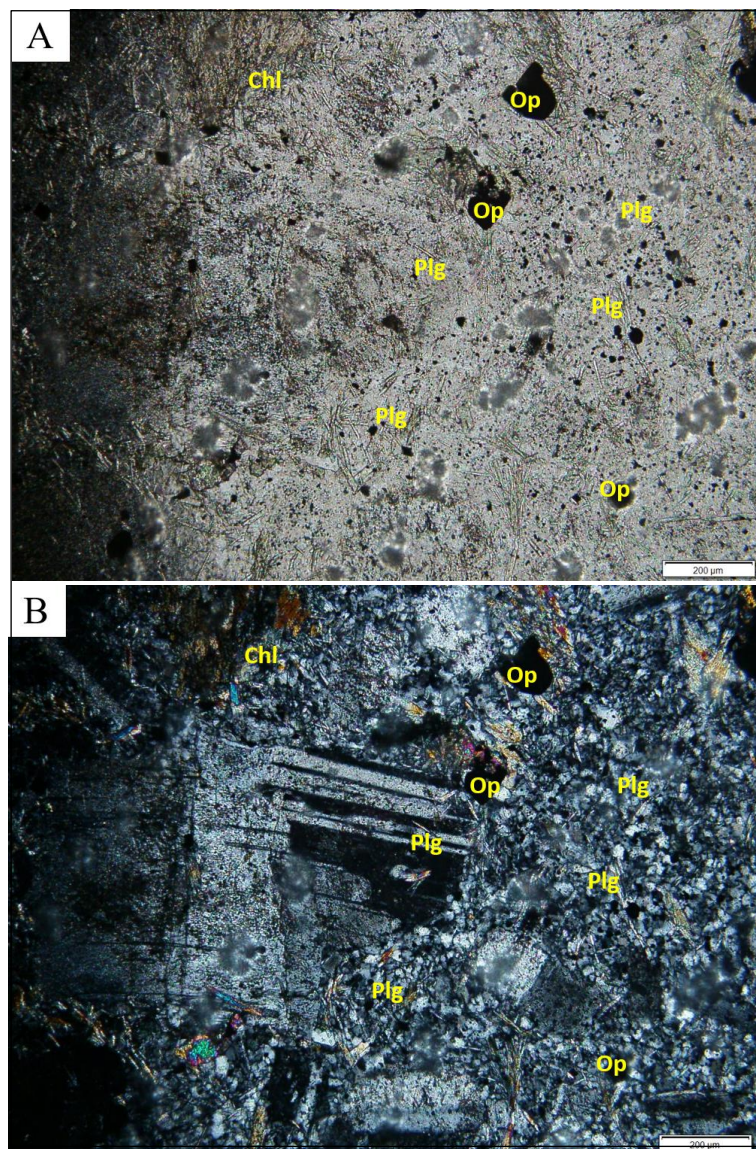


Figura 40. Muestra de la lámina delgada RM-PC-46 (lente 4X). Andesita altamente alterada con textura porfídica, asociada a la Unidad Pilatón. A) Luz natural, B) Luz polarizada. Abreviatura mineralógica: Clorita (Chl), plagioclasa (Plg) y opacos (Op).

Esta roca indica una facie volcánica extrusiva dentro del ambiente de formación de la Unidad Pilatón, existía un volcanismo activo de afinidad andesítica.

5. CAPÍTULO V: ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1 Geología

Mediante el levantamiento geológico a detalle (Escala: 1:1000) realizado (Figura 20), se ha podido identificar la distribución espacial de los cuerpos litológicos, donde el material de interés para la cantera Mocoral son los cuerpos mineralizados (1,2 y 3), que se encuentran en una distribución preferencial en sentido NE-SW con presencia de fallas puntuales de cinemática inversa con algunas fallas de rumbo de tipo dextral. Adicional mediante el análisis petrográfico de las secciones delgadas se ha podido inferir que las rocas que presentan mayor resistencia, son aquellas que tienen una mejor recristalización (LAB-CM-11, Figura 35), que indica que el metamorfismo de contacto fue pausado, con al menos dos pulsaciones (una de afinidad diorítica y otra granodiorítica) a diferencia de las rocas que presentan mayor contenido de arcillas (LAB-CM-14, Figura 36) y débil recristalización, debido a que su ubicación fue distal con respecto a la intrusión, lo que dejó impurezas, como remanentes del metamorfismo. Adicionalmente, se puede indicar que históricamente existió un arco volcánico con alto contenido de material terrígeno (Unidad Pilatón), sobre el cual se depositaron materiales calcáreos (Unidad El Laurel), los cuales fueron intruídos por el batolito de Apuela, ocasionando de esta manera un metamorfismo de bajo grado de tipo metasomático.

5.2 Estaciones geomecánicas (RMR)

Dentro de la clasificación RMR del macizo rocoso correspondiente a la Unidad El Laurel (cuerpos mineralizados), se define claramente en la Figura 32, que estos macizos tienen una preferencia superficial a ser roca tipo III, teniendo también sectores más competentes, en los que la meteorización es leve, tienen baja abertura entre discontinuidades, dando como resultado una mejor calidad de roca (tipo II) e incipientes sectores con clasificación de roca

tipo IV, siendo estos los macizos rocosos que se encuentran mayormente diaclasados y meteorizados.

De manera general se puede observar que la calidad del macizo rocoso aumenta en dirección NE, es decir el cuerpo mineralizado 3 posee mejor calidad (RMR) que el cuerpo mineralizado 2 y el cuerpo mineralizado 1, siendo este último el que presenta mayor fracturamiento y grado de meteorización. Una razón para este comportamiento, puede ser que en el cuerpo mineralizado 1 está afectado fuertemente por emplazamiento del batolito de Apuela, lo que se corrobora en los perfiles geológicos, donde el cuerpo mineralizado 1 es el que presenta mayor afectación del cuerpo intrusivo. Lo que indica que dentro de la cuantificación de la calidad del macizo rocoso no incide únicamente la resistencia de la roca sino más bien depende en gran medida la meteorización de la roca, el RQD y estado de las diaclasas (continuidad, abertura, rugosidad, relleno y alteración).

5.3 Correlaciones empíricas en base al esclerómetro

Se conoce que la resistencia a la compresión simple por el método del esclerómetro (martillo de Schmidt tipo L) está en función de los rebotes (R) y del peso específico que tenga el material ensayado, por lo que para este análisis se normaliza este valor, obteniendo un parámetro consolidado como se muestra en la Tabla 44.

Tabla 44

Resultados de los ensayos esclerométricos, realizados en campo y en laboratorio

No.	Código	Cuerpo	Esclerómetro laboratorio				Esclerómetro campo			
			Peso específico (PE _{lab}) [kN/m ³]	Rebotes (R _{lab})	RCS _{lab} [MPa]	$\frac{PE_{lab}}{R_{lab}}$ (normalizado) [kN/m ³]	Peso específico (PE _{cam}) [kN/m ³]	Rebotes (R _{cam})	RCS _{cam} (MPa)	$\frac{PE_{cam}}{R_{cam}}$ (normalizado) [kN/m ³]
1	LAB-CM03	2	24.6	29.4	39.2	0.8	24.3	23.6	31.8	1.0
2	LAB-CM04	3	25.2	23.6	32.4	1.1	24.5	31.9	48.5	0.8
3	LAB-CM05	3	23.2	23.4	29.9	0.9	22.9	32.2	45.4	0.7
4	LAB-CM06	2	26.5	18.0	23.3	1.5	27.4	22.4	34.4	1.2
5	LAB-CM07	2	26.4	19.2	27.8	1.4	26.1	22.0	28.4	1.2
6	LAB-CM08	3	26.5	30.0	51.2	0.9	25.6	31.0	51.2	0.8
7	LAB-CM09	2	26.4	23.2	30.6	1.1	26.9	25.2	39.1	1.1
8	LAB-CM10	2	26.2	18.2	23.3	1.4	24.7	26.9	34.8	0.9
9	LAB-CM11	3	25.9	23.0	29.7	1.1	24.7	32.0	50.7	0.8
10	LAB-CM12	3	25.6	24.0	34.8	1.1	26.4	33.2	58.4	0.7
11	LAB-CM13	2	26.3	22.8	34.8	1.2	26.7	22.1	29.2	1.2
12	LAB-CM14	2	22.9	15.8	20.6	1.5	24.2	23.9	29.0	1.0
13	LAB-CM15	1	24.5	17.8	21.5	1.4	23.8	18.2	21.5	1.3
14	LAB-CM16	1	24.7	13.6	20.1	1.8	25.5	19.9	25.1	1.3
15	LAB-CM17	1	26.9	15.6	24.3	1.7	27.6	19.3	26.0	1.4
16	LAB-CM02	2	21.1	19.6	23.2	1.1	23.6	25.2	30.0	0.9

Se normaliza el parámetro de Peso Específico (PE) / Rebotes (R).

Con estos valores se realizan varias gráficas para definir la tendencia de los datos y tener una idea clara de su distribución espacial, para generar correlaciones mucho más precisas.

En la Figura 41 se puede apreciar la dispersión existente entre el peso específico determinado IN SITU (PE_{cam}) y el peso específico de laboratorio (PE_{lab}), además la media aritmética de PE_{cam} es 25.3 kN/m³, mientras que el PE_{lab} es de 25.2 kN/m³, lo que supone una baja dispersión entre ambos valores.

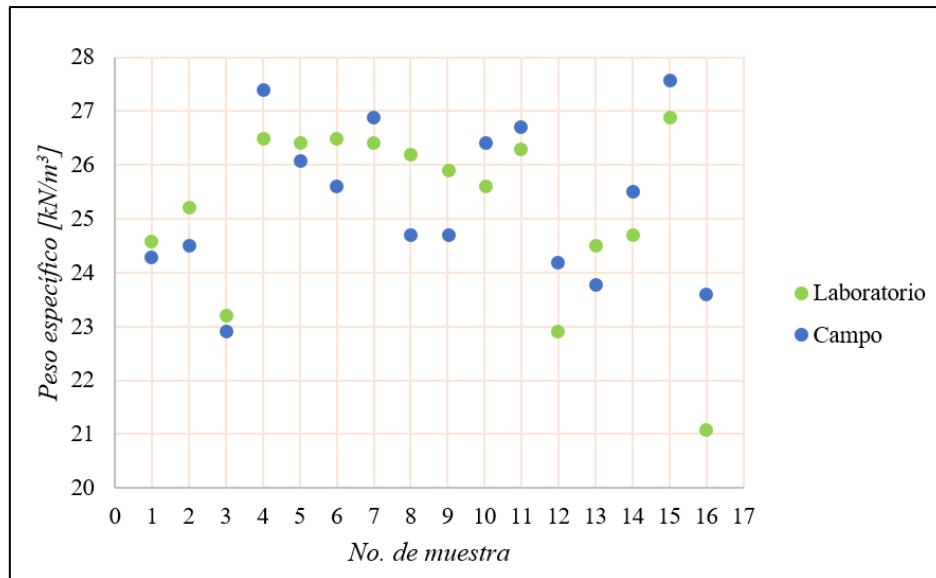


Figura 41. Distribución de los datos de peso específico en función de su tipología (IN SITU y laboratorio). Se nota una baja dispersión entre ambos datos.

En la Figura 42, se puede observar la tendencia inversamente proporcional de los datos de laboratorio (RCS_{lab}) en función del valor normalizado $\left[\frac{PE_{lab}}{R_{lab}}\right]$. De igual forma se establece varias ecuaciones (Tabla 45) que describen los diferentes criterios de regresión entre ambos parámetros.

El valor normalizado $\left[\frac{PE}{R}\right]$ establece una relación directamente proporcional con respecto al peso específico e inversamente proporcional con el rebote, es decir que con valores de altos de rebote la relación va a tender a 0, mientras que con valores bajos de rebote esta relación será mayor a 1.

Donde, PE_{lab} : Peso específico de laboratorio, R_{lab} : Rebotes del esclerómetro en laboratorio (Schmidt hardness) y RCS_{lab} : Resistencia a la compresión simple por método de esclerómetro. Es decir, ya se cuenta con varias ecuaciones para la RCS para los mármoles de la Unidad geológica El Laurel, en condiciones de laboratorio, que facilitarían el cálculo de la RCS sin el uso del ábaco de Miller.

Para la selección del mejor modelo de regresión se consideró lo expuesto por Cohen et al., (2013) donde se señala que para la selección óptima del modelo de regresión se debe escoger la curva, cuyo valor R^2 sea lo más próximo a 1, lo que supone el elegir la curva con mayor ajuste de la información, donde la tendencia responda de mejor manera a la variabilidad de la concentración de los datos. En tal virtud, se observa que el criterio con mayor frecuencia entre las variables y que considera una correcta concentración de datos es el análisis con regresión potencial.

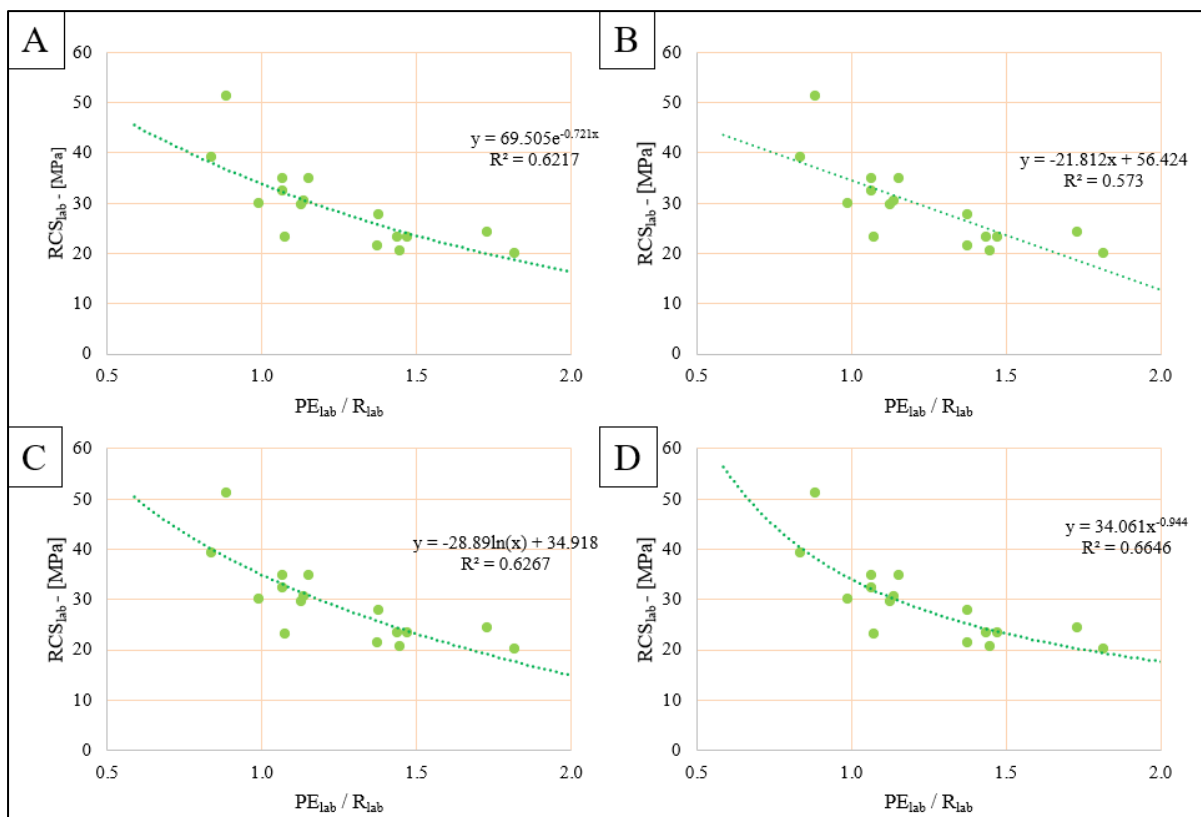


Figura 42. Distribución de los resultados de los datos de esclerómetro obtenidos en laboratorio. A) Análisis de datos con una línea de tendencia tipo exponencial. B) Análisis de datos con una línea de tendencia tipo lineal. C) Análisis de datos con una línea de tendencia tipo logarítmica. D) Análisis de datos con una línea de tendencia tipo potencial.

De la Figura 42 se puede establecer que, con valores altos de rebote, la relación $\left[\frac{PE_{lab}}{R_{lab}}\right]$ tiende a 0, es decir, los valores de resistencia más altos se obtendrán cuando la relación $\left[\frac{PE_{lab}}{R_{lab}}\right]$ sea cercana a 0, lo que equivale a señalar que, a mayor valor de rebote, mejor será la resistencia de la roca.

Tabla 45

Resultados de los diferentes criterios de regresión para la obtención de la ecuación empírica de RCS_{lab} en función de $\frac{PE_{lab}}{R_{lab}}$.

Análisis	Criterio de línea de tendencia	Ecuación	R ²
A	Exponencial	$RCS_{lab} = 69.5 \cdot e^{-0.72\left(\frac{PE_{lab}}{R_{lab}}\right)}$	0.62
B	Lineal	$RCS_{lab} = 56.4 - 21.8\left(\frac{PE_{lab}}{R_{lab}}\right)$	0.57
C	Logarítmica	$RCS_{lab} = 34.9 - 28.9 \ln\left(\frac{PE_{lab}}{R_{lab}}\right)$	0.63
D	Potencial	$RCS_{lab} = 36.1\left(\frac{R_{lab}}{PE_{lab}}\right)^{0.94}$	0.66

El valor de R² expresa la concentración de los datos, un valor cercano a 1 indica una muy buena correlación.

En la Figura 43, se puede observar la tendencia inversamente proporcional de los datos de campo (RCS_{cam}) en función del valor normalizado $\left[\frac{PE_{cam}}{R_{cam}}\right]$. De igual forma se establece la

Tabla 46 que describe las ecuaciones de regresión entre ambos parámetros.

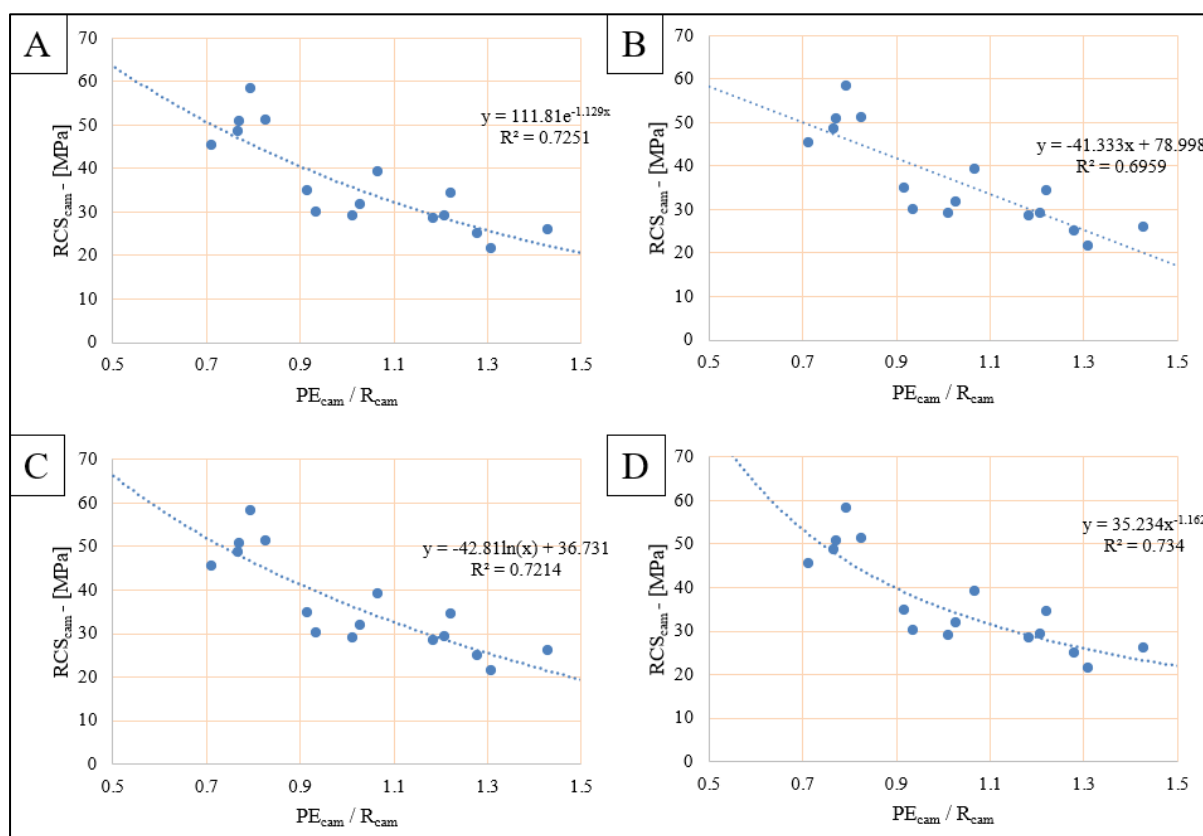


Figura 43. Distribución de los resultados de los datos de esclerómetro obtenidos en campo (PE_{cam} / R_{cam}). A) Análisis de datos con una línea de tendencia tipo exponencial. B) Análisis de datos con una línea de tendencia tipo lineal. C) Análisis de datos con una línea de tendencia tipo logarítmica. D) Análisis de datos con una línea de tendencia tipo potencial.

Tabla 46

Resultados de los diferentes criterios de regresión para la obtención de la ecuación empírica de RCS_{cam} en función de PE_{cam} / R_{cam} .

Análisis	Criterio de línea de tendencia	Ecuación	R ²
A	Exponencial	$RCS_{cam} = 111.8 \cdot e^{-1.13 \left(\frac{PE_{cam}}{R_{cam}} \right)}$	0.73
B	Lineal	$RCS_{cam} = 78.9 - 41.3 \left(\frac{PE_{cam}}{R_{cam}} \right)$	0.70
C	Logarítmica	$RCS_{cam} = 36.7 - 42.8 \ln \left(\frac{PE_{cam}}{R_{cam}} \right)$	0.72
D	Potencial	$RCS_{cam} = 35.2 \left(\frac{R_{cam}}{PE_{cam}} \right)^{1.16}$	0.73

El valor de R² expresa la concentración de los datos, un valor cercano a 1 indica una muy buena correlación.

Donde, PE_{cam} : Peso específico de campo, R_{cam} : Rebotes del esclerómetro en campo (Schmidt hardness) y RCS_{cam} : Resistencia a la compresión simple por método de esclerómetro. Es decir, ya se cuenta con una ecuación para la RCS para los mármoles de la Unidad geológica El Laurel, en condiciones de campo (in situ), que facilitaría el cálculo de la RCS sin el uso del ábaco de Miller.

De la Figura 43 se puede establecer que, con valores altos de rebote, la relación $\left[\frac{PE_{cam}}{R_{cam}} \right]$ tiende a 0, es decir, los valores de resistencia más altos se obtendrán cuando la relación $\left[\frac{PE_{cam}}{R_{cam}} \right]$ sea cercana a 0, lo que equivale a señalar que, a mayor valor de rebote, mejor será la resistencia de la roca.

Además, se plantea en la Figura 44 una gráfica del valor de RCS global (datos de campo y laboratorio) en función de los valores normalizados globales $\left[\frac{PE_{lab}}{R_{lab}} \right]$ y $\left[\frac{PE_{cam}}{R_{cam}} \right]$. De igual forma se establece la Tabla 47 que describe las ecuaciones de regresión entre ambos parámetros.

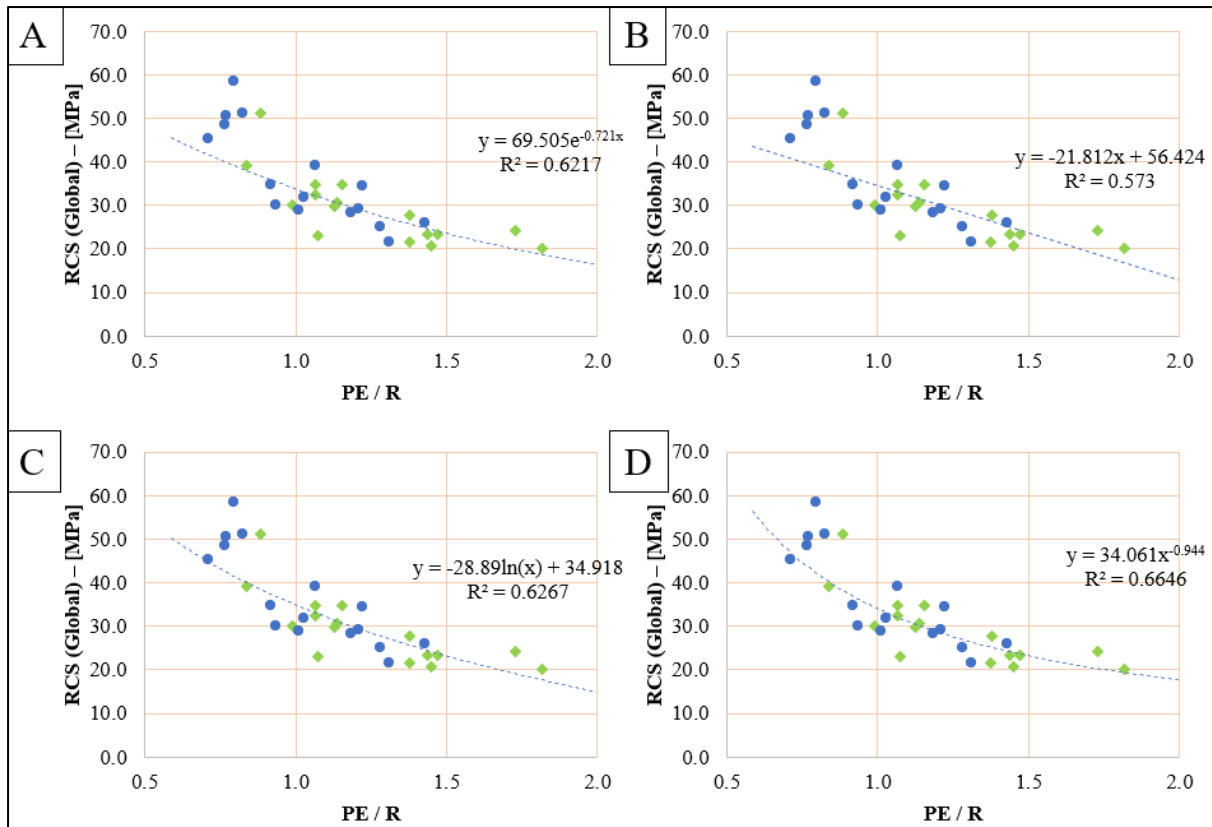


Figura 44. Distribución de todos los resultados de los datos de esclerómetro. De color verde los datos de laboratorio y azul los datos de campo. A) Análisis de datos con una línea de tendencia tipo exponencial. B) Análisis de datos con una línea de tendencia tipo lineal. C) Análisis de datos con una línea de tendencia tipo logarítmica. D) Análisis de datos con una línea de tendencia tipo potencial.

Tabla 47

Resultados de los diferentes criterios de regresión para la obtención de la ecuación empírica de RCS (global) en función de $\frac{PE}{R}$ (global).

Análisis	Criterio de línea de tendencia	Ecuación	R ²
A	Exponencial	$RCS = 69.5 \cdot e^{-0.72\left(\frac{PE}{R}\right)}$	0.62
B	Lineal	$RCS = 56.4 - 21.8\left(\frac{PE}{R}\right)$	0.70
C	Logarítmica	$RCS = 34.9 - 28.9 \ln\left(\frac{PE}{R}\right)$	0.57
D	Potencial	$RCS = 34.06\left(\frac{R}{PE}\right)^{0.94}$	0.66

El valor de R² expresa la concentración de los datos, un valor cercano a 1 indica una muy buena correlación.

Finalmente, se plantea en la Figura 45 una gráfica del valor normalizado de laboratorio en función del valor normalizado de campo, para de esta manera ver la tendencia entre ambas metodologías; en la Tabla 48 se muestran las ecuaciones que relacionan ambos valores normalizados, $\left[\frac{PE_{lab}}{R_{lab}}\right]$ y $\left[\frac{PE_{cam}}{R_{cam}}\right]$.

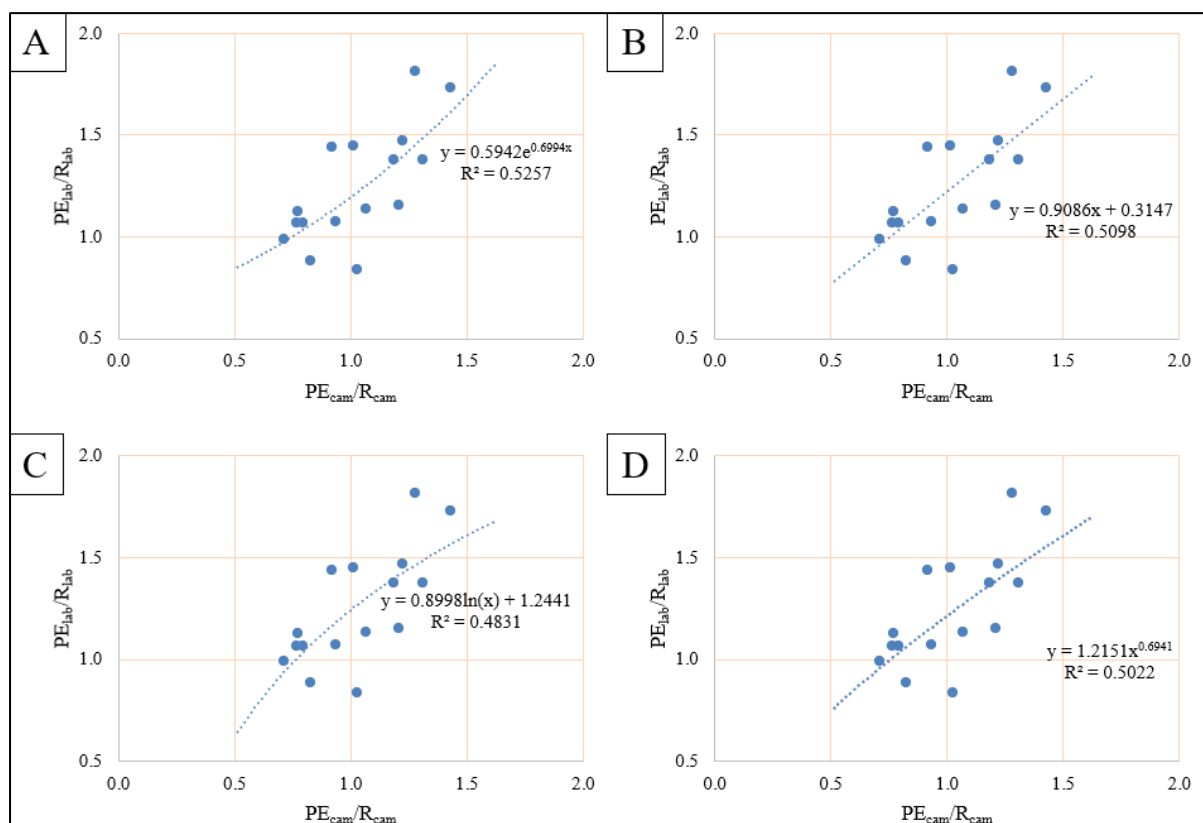


Figura 45. Distribución de los resultados en función de los valores normalizados, PE_{lab} / R_{lab} y PE_{cam} / R_{cam} . A) Análisis de datos con una línea de tendencia tipo exponencial. B) Análisis de datos con una línea de tendencia tipo lineal. C) Análisis de datos con una línea de tendencia tipo logarítmica. D) Análisis de datos con una línea de tendencia tipo potencial.

Tabla 48

Resultados de los diferentes criterios de regresión para la obtención de la ecuación empírica de RCS (global) en función de $\frac{PE_{cam}}{R_{cam}}$ y $\frac{PE_{lab}}{R_{lab}}$.

Análisis	Criterio de línea de tendencia	Ecuación	R ²
A	Exponencial	$\frac{PE_{lab}}{R_{lab}} = 0.59 \cdot e^{0.69\left(\frac{PE_{cam}}{R_{cam}}\right)}$	0.53
B	Lineal	$\frac{PE_{lab}}{R_{lab}} = 0.31 - 0.91\left(\frac{PE_{cam}}{R_{cam}}\right)$	0.51
C	Logarítmica	$\frac{PE_{lab}}{R_{lab}} = 1.2 + 0.89 \ln\left(\frac{PE_{cam}}{R_{cam}}\right)$	0.48
D	Potencial	$\frac{PE_{lab}}{R_{lab}} = 1.22\left(\frac{PE_{cam}}{R_{cam}}\right)^{0.69}$	0.50

El valor de R² expresa la concentración de los datos, un valor cercano a 1 indica una muy buena correlación.

En la Tabla 48 se plantea una ecuación de transferencia, es decir, sirve para llevar la representatividad de los datos de campo a datos de laboratorio, para de esta manera poder aplicar sin inconvenientes los posteriores modelos matemáticos propuestos.

5.3.1 Correlación empírica del ensayo esclerométrico con parámetros obtenidos del ensayo de compresión simple con módulos de elasticidad

El ensayo de compresión simple con cálculo de parámetros elásticos, proporciona valores de parámetros resistentes de la matriz rocosa tales como: Modulo de Young (E), coeficiente de Poisson (ν), resistencia a la compresión simple no confinada. En la Tabla 49 se exponen los valores obtenidos en las muestras ensayadas, tanto con esclerómetro como por Ensayo de compresión simple con bandas extensométricas para lectura de deformaciones axiales y radiales.

Tabla 49

Resultados del ensayo esclerométrico realizado en campo y el ensayo de compresión simple con cálculo de los módulos de elasticidad

No.	Código	Esclerómetro		Ensayo de compresión simple con módulos de elasticidad					
		PE _{cam} / R _{cam} [kN/m ³]	Carga máxima [kN]	Resistencia a la compresión simple (σ_c) [MPa]	Módulo de Young E Axial Secante [GPa]	Módulo de Young E _{10MPa} Axial [GPa]	Módulo de Young E _{0.2%} Axial [GPa]	Módulo de Young E Axial Promedio [GPa]	Coefficiente de Poisson (ν)
1	LAB-CM03	1.0	32.9	30.6	30.6	37.6	31.8	34.7	0.25
2	LAB-CM04	0.8	61.2	56.9	29.4	115.2	106.9	111.1	0.18
3	LAB-CM05	0.7	78.3	72.9	7.5	158.8	119.6	139.2	0.15
4	LAB-CM06	1.2	17.9	16.7	49.3	30.3	30.3	30.3	0.25
5	LAB-CM07	1.2	28.9	26.9	9.9	32.1	31.4	31.8	0.25
6	LAB-CM08	0.8	44.9	41.7	35.7	65.4	57.3	61.3	0.18
7	LAB-CM09	1.1	28.7	25.4	41.6	31.6	31.5	31.5	0.27
8	LAB-CM10	0.9	42.7	39.7	7.3	52.2	51.8	52.0	0.19
9	LAB-CM11	0.8	59.9	55.7	4.2	94.7	60.0	77.4	0.16
10	LAB-CM12	0.7	47.4	44.1	8.1	79.7	63.9	71.8	0.12
11	LAB-CM13	1.2	25.7	23.9	74.1	31.1	31.1	31.1	0.26
12	LAB-CM14	1.0	33.3	30.9	7.5	43.4	39.5	41.5	0.18
13	LAB-CM15	1.3	16.5	15.3	10.9	16.7	16.1	16.4	0.26
14	LAB-CM16	1.3	17.9	16.6	32.7	21.7	15.1	18.4	0.27
15	LAB-CM17	1.4	23.3	21.7	15.8	31.8	31.6	31.7	0.28
16	LAB-CM02	0.9	30.6	28.5	48.2	33.0	32.1	32.6	0.19

5.3.1.1 Correlación empírica del valor normalizado de esclerómetro (campo) con la resistencia a la compresión simple del ensayo de compresión simple

En la Figura 46 se presenta la gráfica que relaciona la resistencia a la compresión simple en función del valor normalizado del esclerómetro de campo, de esta relación se puede establecer una regresión (Tabla 50) que relaciona correctamente ambos parámetros.

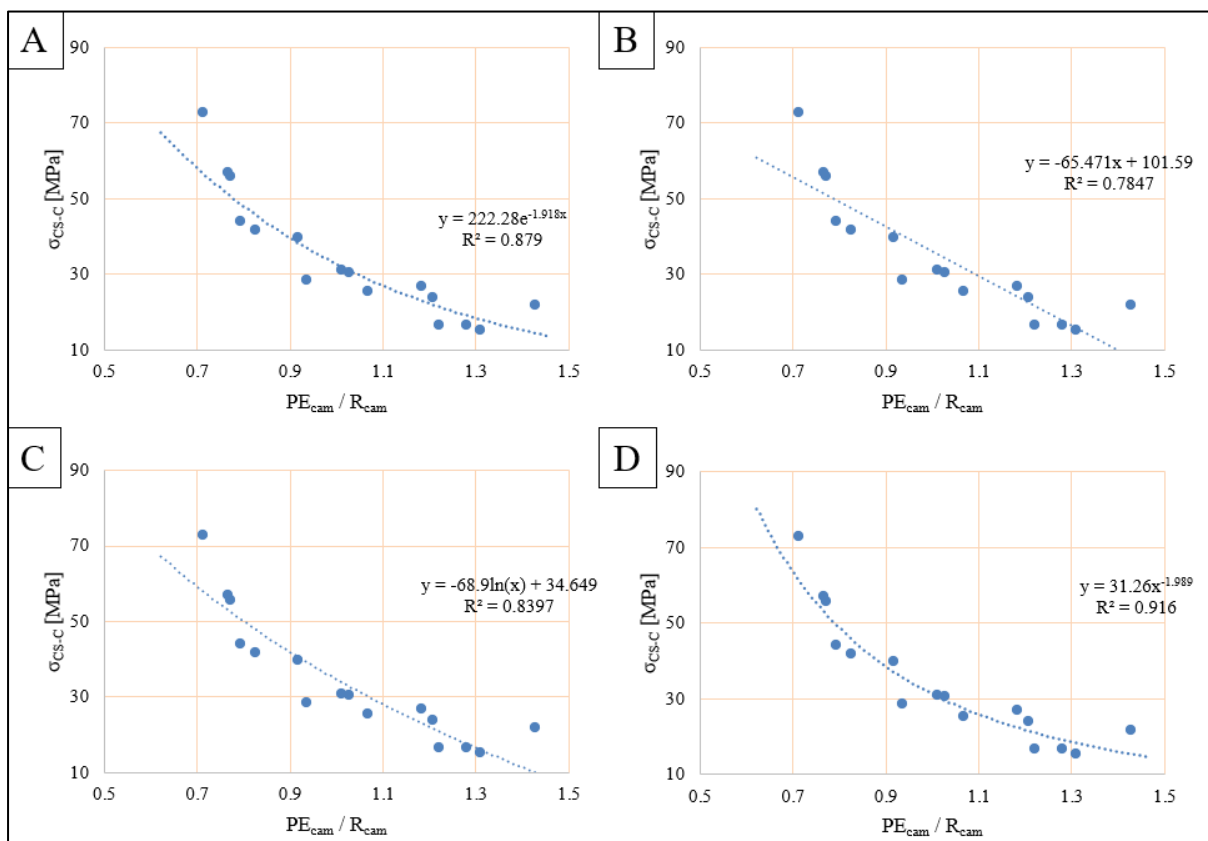


Figura 46. Distribución de los resultados de resistencia a la compresión simple del ensayo de compresión simple con módulos de elasticidad ($\sigma_{cs.c}$) en función de los valores normalizados, PE_{cam} / R_{cam} . A) Análisis de datos con una línea de tendencia tipo exponencial. B) Análisis de datos con una línea de tendencia tipo lineal. C) Análisis de datos con una línea de tendencia tipo logarítmica. D) Análisis de datos con una línea de tendencia tipo potencial.

De la Figura 46 se puede establecer que, a mayor valor de rebote, mejor será la resistencia de la roca en el ensayo de compresión simple.

Tabla 50

Resultados de los diferentes criterios de regresión para la obtención de la ecuación empírica de σ_{CS-C} (resistencia a la compresión simple del ensayo de compresión simple con cálculo de módulos elásticos) en función de $\frac{PE_{cam}}{R_{cam}}$.

Análisis	Criterio de línea de tendencia	Ecuación	R ²
A	Exponencial	$\sigma_{CS-C} = 222.3 \cdot e^{1.9\left(\frac{R_{cam}}{PE_{cam}}\right)}$	0.88
B	Lineal	$\sigma_{CS-C} = 101.6 - 65.5 \left(\frac{PE_{cam}}{R_{cam}}\right)$	0.78
C	Logarítmica	$\sigma_{CS-C} = 34.6 - 68.9 \ln\left(\frac{PE_{cam}}{R_{cam}}\right)$	0.84
D	Potencial	$\sigma_{CS-C} = 31.26 \cdot \left(\frac{R_{cam}}{PE_{cam}}\right)^{1.9}$	0.92

El valor de R² expresa la concentración de los datos, un valor cercano a 1 indica una muy buena correlación.

5.3.1.2 Correlación empírica del valor normalizado de esclerómetro (campo) con el módulo de Young del ensayo de compresión simple

En la Figura 47 se presenta la gráfica que relaciona el módulo de Young (E_{prom}) en función del valor normalizado del esclerómetro de campo, de esta relación se puede establecer una regresión (Tabla 51) que relaciona correctamente ambos parámetros.

Tabla 51

Resultados de los diferentes criterios de regresión para la obtención de la ecuación empírica del módulo de Young (E_{prom}) del ensayo de compresión simple con cálculo de módulos elásticos en función de $\frac{PE_{cam}}{R_{cam}}$.

Análisis	Criterio de línea de tendencia	Ecuación	R ²
A	Exponencial	$E_{prom} = 469.8 \cdot e^{-2.3\left(\frac{PE_{cam}}{R_{cam}}\right)}$	0.79
B	Lineal	$E_{prom} = 177.9 - 123.5 \left(\frac{PE_{cam}}{R_{cam}}\right)$	0.65
C	Logarítmica	$E_{prom} = 51.6 - 132 \ln\left(\frac{PE_{cam}}{R_{cam}}\right)$	0.72
D	Potencial	$E_{prom} = 43.2 \cdot \left(\frac{PE_{cam}}{R_{cam}}\right)^{-2.4}$	0.85

El valor de R² expresa la concentración de los datos, un valor cercano a 1 indica una muy buena correlación.

De la Figura 47 se puede establecer que, a mayor valor de rebote la roca presentará menor rigidez, es decir, se tendrán mayores valores de resistencia experimentando bajas deformaciones, mientras que, si la resistencia es menor, la roca presentará deformaciones altas.

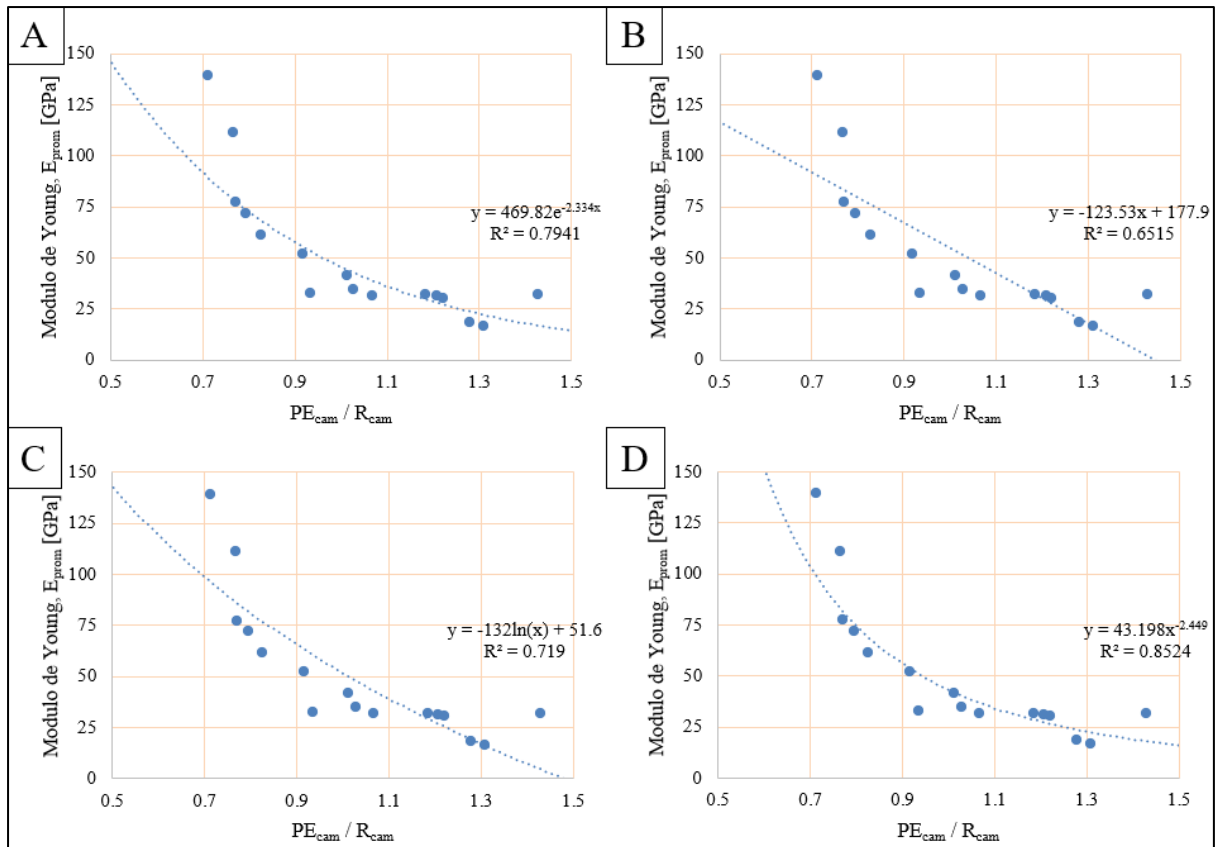


Figura 47. Distribución de los resultados de Módulo de Young (E_{prom}) en función de los valores normalizados, PE_{cam} / R_{cam} . A) Análisis de datos con una línea de tendencia tipo exponencial. B) Análisis de datos con una línea de tendencia tipo lineal. C) Análisis de datos con una línea de tendencia tipo logarítmica. D) Análisis de datos con una línea de tendencia tipo potencial.

5.3.1.3 Correlación empírica del valor normalizado de esclerómetro (campo) con el coeficiente de Poisson del ensayo de compresión simple

En la Figura 48 se presenta la gráfica que relaciona el coeficiente de Poisson (ν) en función del valor normalizado del esclerómetro de campo, de esta relación se puede establecer una regresión (Tabla 52) que relaciona correctamente ambos parámetros. Además, se establece una relación inversamente proporcional entre el rebote y el coeficiente de Poisson.

Tabla 52

Resultados de los diferentes criterios de regresión para la obtención de la ecuación empírica del coeficiente de Poisson (ν) del ensayo de compresión simple con cálculo de módulos elásticos en función de $\frac{PE_{cam}}{R_{cam}}$.

Análisis	Criterio de línea de tendencia	Ecuación	R ²
A	Exponencial	$\nu = 0.07 \cdot e^{\left(\frac{PE_{cam}}{R_{cam}}\right)}$	0.77
B	Lineal	$\nu = 0.004 + 0.2 \left(\frac{PE_{cam}}{R_{cam}}\right) - 159.6$	0.80
C	Logarítmica	$\nu = 0.2 + 0.2 \ln\left(\frac{PE_{cam}}{R_{cam}}\right)$	0.82
D	Potencial	$\nu = 0.2 \cdot \left(\frac{PE_{cam}}{R_{cam}}\right)^{1.03}$	0.80

El valor de R² expresa la concentración de los datos, un valor cercano a 1 indica una muy buena correlación.

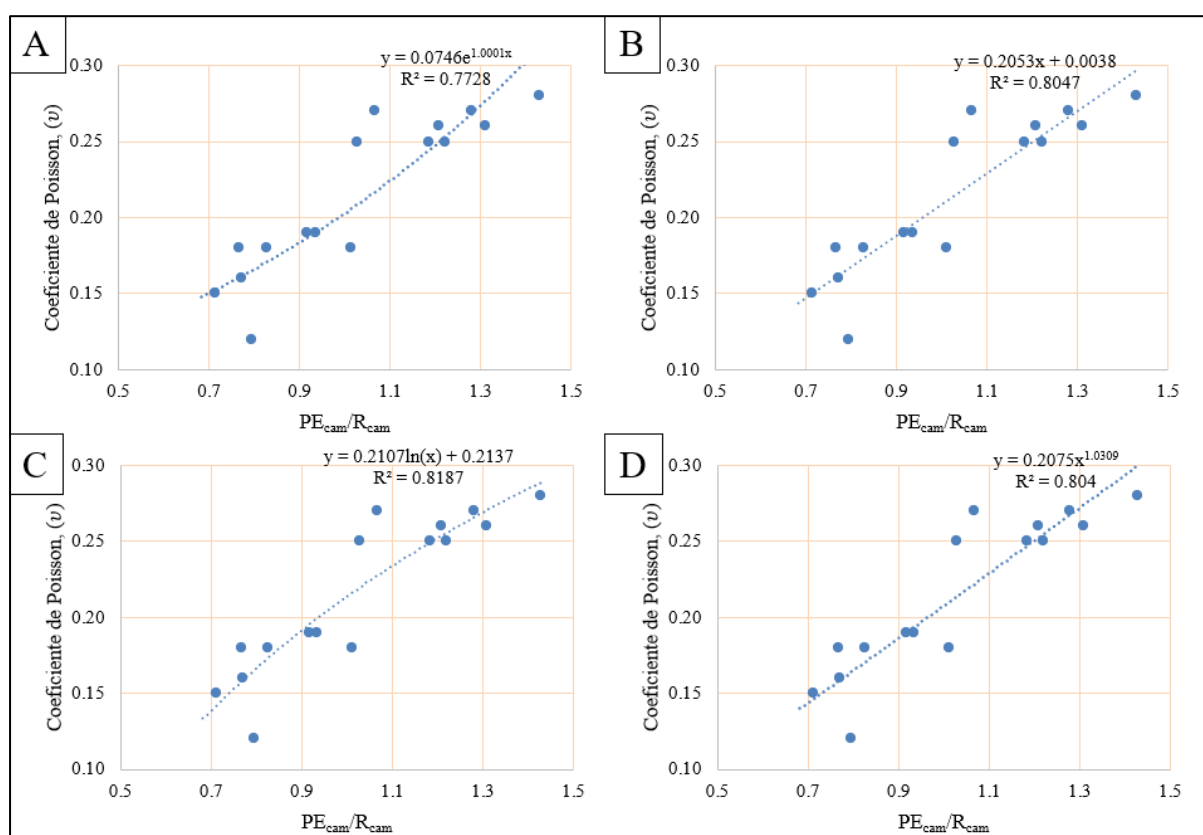


Figura 48. Distribución de los resultados de coeficiente de Poisson (ν) en función de los valores normalizados, PE_{cam} / R_{cam} . A) Análisis de datos con una línea de tendencia tipo exponencial. B) Análisis de datos con una línea de tendencia tipo lineal. C) Análisis de datos con una línea de tendencia tipo logarítmica. D) Análisis de datos con una línea de tendencia tipo potencial.

5.3.2 Correlación empírica del ensayo esclerométrico con parámetros obtenidos del ensayo triaxial

El ensayo triaxial, proporciona valores de parámetros resistentes de la matriz rocosa tales como: resistencia a la compresión (σ_{CS-T}), tracción (σ_t), cohesión (c) y ángulo de fricción interna (θ). En la Tabla 53 se exponen los valores obtenidos en las muestras ensayadas, tanto con esclerómetro como por ensayo triaxial.

Tabla 53
Resultados del ensayo esclerométrico realizado en campo y el ensayo triaxial

No.	Cód.	Esclerómetro PE _{cam} / R _{cam} (normalizado) [kN/m ³]	Ensayo triaxial									
			Confinamiento [MPa]			Stress principal [MPa]			Resistencia a la compresión σ_{CS-T} [MPa]	Tracción σ_t [MPa]	Cohesión C [MPa]	Angulo de fricción interna ϕ [°]
			σ_3 (A)	σ_3 (B)	σ_3 (C)	σ_1 (A)	σ_1 (B)	σ_1 (C)				
1	LAB-CM03	1.03	1.0	2.0	4.0	45.1	45.2	65.0	35.2	-4.9	6.6	48.9
2	LAB-CM04	0.77	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	LAB-CM05	0.71	1.0	2.0	4.0	75.3	94.7	97.2	74.1	-11.5	14.6	46.9
4	LAB-CM06	1.22	1.0	2.0	4.0	43.9	51.1	62.5	35.9	-5.3	6.9	48.0
5	LAB-CM07	1.18	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	LAB-CM08	0.83	1.0	2.0	4.0	80.8	101.8	102.4	80.4	-12.9	16.1	46.4
7	LAB-CM09	1.07	1.0	2.0	4.0	45.6	53.6	63.7	37.6	-5.6	7.2	47.9
8	LAB-CM10	0.92	1.0	2.0	4.0	48.5	63.3	71.4	44.5	-6.3	8.3	48.9
9	LAB-CM11	0.77	1.0	2.0	4.0	101.4	123.9	125.9	100.4	-14.1	18.8	48.9
10	LAB-CM12	0.79	1.0	2.0	4.0	78.9	95.7	97.1	78.3	-14.8	17.1	42.9
11	LAB-CM13	1.21	1.0	2.0	4.0	44.2	56.4	66.5	39.1	-5.5	7.3	48.9
12	LAB-CM14	1.01	1.0	2.0	4.0	60.3	67.7	98.2	37.1	-4.9	6.8	49.7
13	LAB-CM15	1.31	1.0	2.0	4.0	32.1	41.1	54.9	25.2	-3.4	4.6	49.8
14	LAB-CM16	1.28	1.0	2.0	4.0	27.2	44.8	50.1	24.6	-3.6	4.7	48.4
15	LAB-CM17	1.43	1.0	2.0	4.0	33.9	43.0	57.3	26.8	-3.8	5.1	48.5
16	LAB-CM02	0.94	1.0	3.0	6.0	45.2	61.2	87.5	37.2	-5.2	6.9	48.9

5.3.2.1 Correlación empírica del valor normalizado de esclerómetro (campo) con la resistencia a la compresión simple del ensayo triaxial

En la Figura 49 se presenta la gráfica que relaciona la resistencia a la compresión simple en función del valor normalizado del esclerómetro de campo, de esta relación se puede establecer una regresión (Tabla 54) que relaciona correctamente ambos parámetros. Además, se puede que, a mayor valor de rebote, mejor será la resistencia de la roca en el ensayo triaxial.

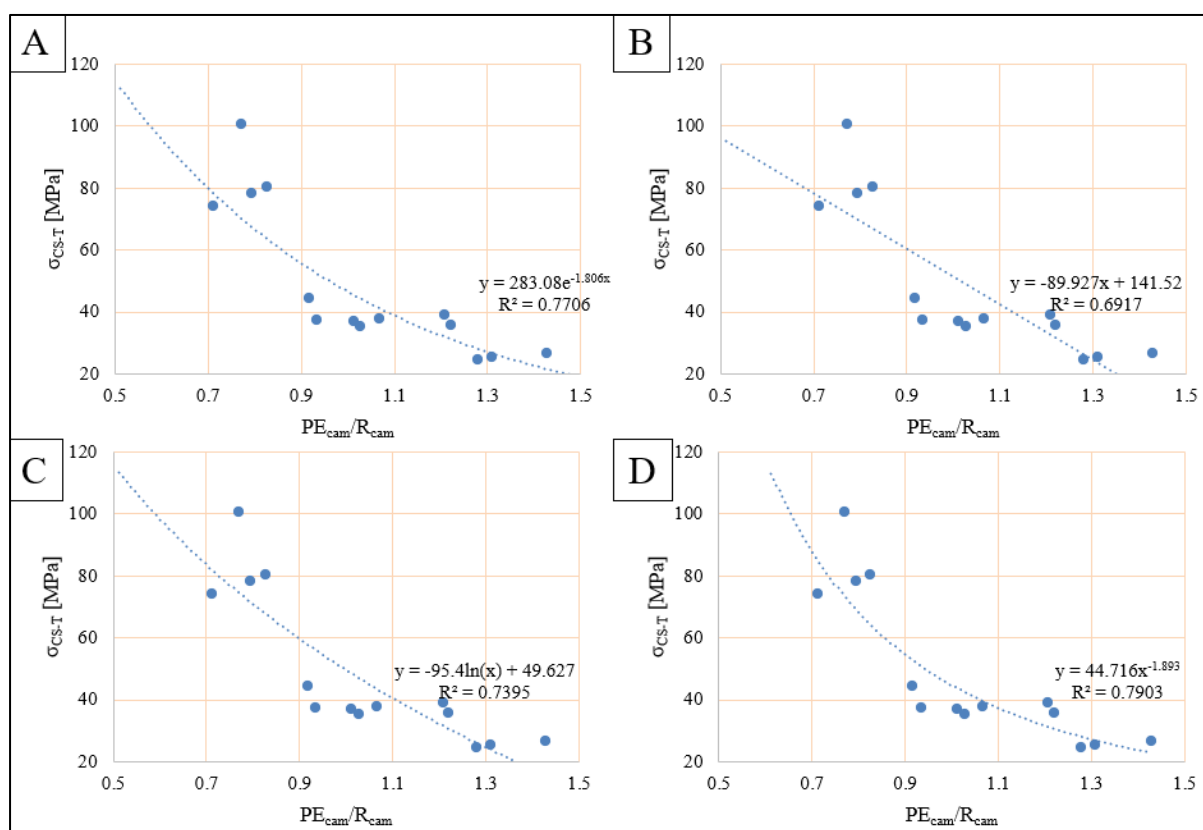


Figura 49. Distribución de los resultados de la resistencia a la compresión simple, obtenida del ensayo triaxial (σ_{CS-T}) en función de los valores normalizados, PE_{cam}/R_{cam} . A) Análisis de datos con una línea de tendencia tipo exponencial. B) Análisis de datos con una línea de tendencia tipo lineal. C) Análisis de datos con una línea de tendencia tipo logarítmica. D) Análisis de datos con una línea de tendencia tipo potencial.

Tabla 54

Resultados de los diferentes criterios de regresión para la obtención de la ecuación empírica de σ_{CS-T} (resistencia a la compresión simple del ensayo triaxial) en función de $\frac{PE_{cam}}{R_{cam}}$.

Análisis	Criterio de línea de tendencia	Ecuación	R^2
A	Exponencial	$\sigma_{CS-T} = 283.1 \cdot e^{\left(\frac{R_{cam}}{PE_{cam}}\right)}$	0.77
B	Lineal	$\sigma_{CS-T} = 141.5 - 89.9 \left(\frac{PE_{cam}}{R_{cam}}\right) - 159.6$	0.69
C	Logarítmica	$\sigma_{CS-T} = 49.6 - 95.4 \ln\left(\frac{PE_{cam}}{R_{cam}}\right)$	0.74
D	Potencial	$\sigma_{CS-T} = 44.7 \cdot \left(\frac{R_{cam}}{PE_{cam}}\right)^{1.9}$	0.79

El valor de R^2 expresa la concentración de los datos, un valor cercano a 1 indica una muy buena correlación.

5.3.2.2 Correlación empírica del valor normalizado de esclerómetro (campo) con la tracción calculada del ensayo triaxial

En la Figura 50 se presenta la gráfica que relaciona la tracción, calculada a partir del ensayo triaxial, en función del valor normalizado del esclerómetro de campo, de esta relación se puede establecer una regresión (Tabla 55) que relaciona correctamente ambos parámetros. Además, se puede describir un comportamiento directamente proporcional entre la resistencia y la tracción.

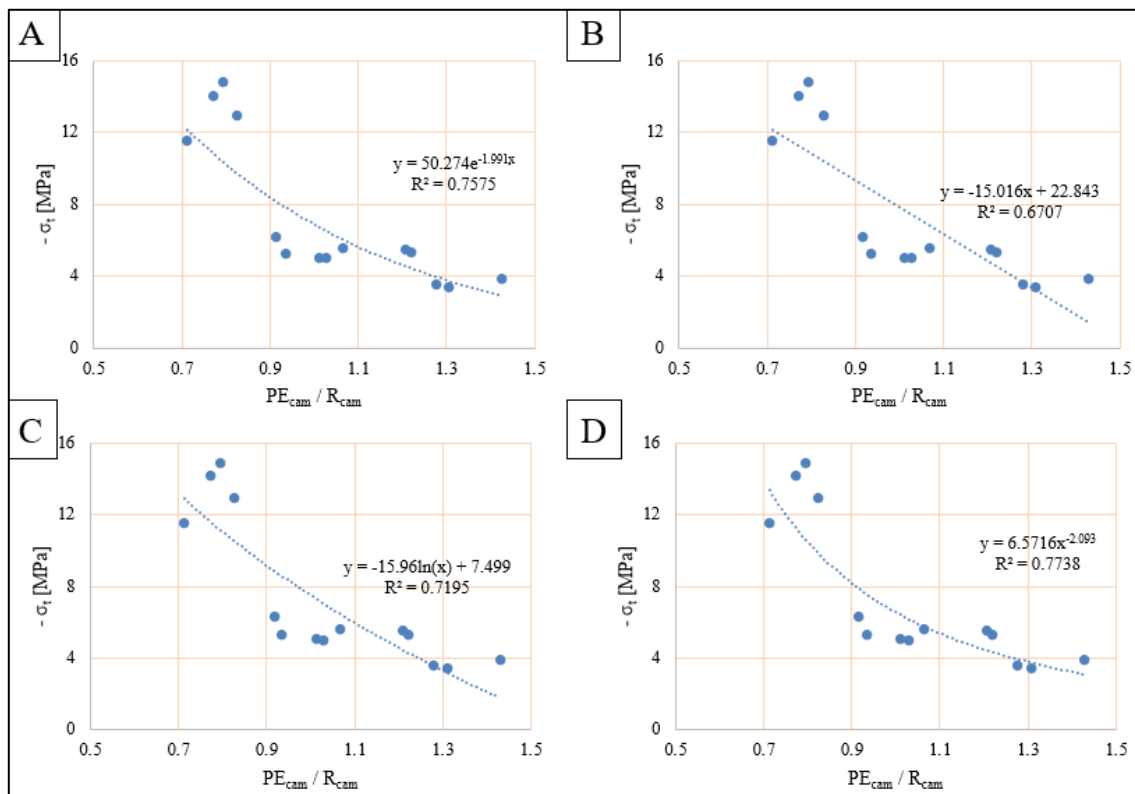


Figura 50. Distribución de los resultados de la tracción (σ_t), calculada del ensayo triaxial, en función de los valores normalizados, PE_{cam} / R_{cam} . A) Análisis de datos con una línea de tendencia tipo exponencial. B) Análisis de datos con una línea de tendencia tipo lineal. C) Análisis de datos con una línea de tendencia tipo logarítmica. D) Análisis de datos con una línea de tendencia tipo potencial.

Tabla 55

Resultados de los diferentes criterios de regresión para la obtención de la ecuación empírica de σ_t (Resistencia a la tracción calculada a partir del ensayo triaxial) en función de $\frac{PE_{cam}}{R_{cam}}$.

Análisis	Criterio de línea de tendencia	Ecuación	R ²
A	Exponencial	$-\sigma_t = 50.3 \cdot e^{1.99 \cdot \left(\frac{R_{cam}}{PE_{cam}}\right)}$	0.76
B	Lineal	$-\sigma_t = 22.8 - 15 \left(\frac{PE_{cam}}{R_{cam}}\right)$	0.67
C	Logarítmica	$-\sigma_t = 7.5 - 16 \ln\left(\frac{PE_{cam}}{R_{cam}}\right)$	0.72
D	Potencial	$-\sigma_t = 6.6 \cdot \left(\frac{PE_{cam}}{R_{cam}}\right)^{-2.1}$	0.77

El valor de R² expresa la concentración de los datos, un valor cercano a 1 indica una muy buena correlación.

5.3.2.3 Correlación empírica del valor normalizado de esclerómetro (campo) con la cohesión

En la Figura 51 se presenta la gráfica que relaciona la cohesión en función del valor normalizado del esclerómetro de campo, de esta relación se puede establecer una regresión (Tabla 56) que relaciona correctamente ambos parámetros. La razón de la tendencia inversa es que a medida que se aumenta el valor de rebote, mayor será la resistencia de la roca, por lo que la cohesión mantendrá una relación directamente proporcional con respecto a R.

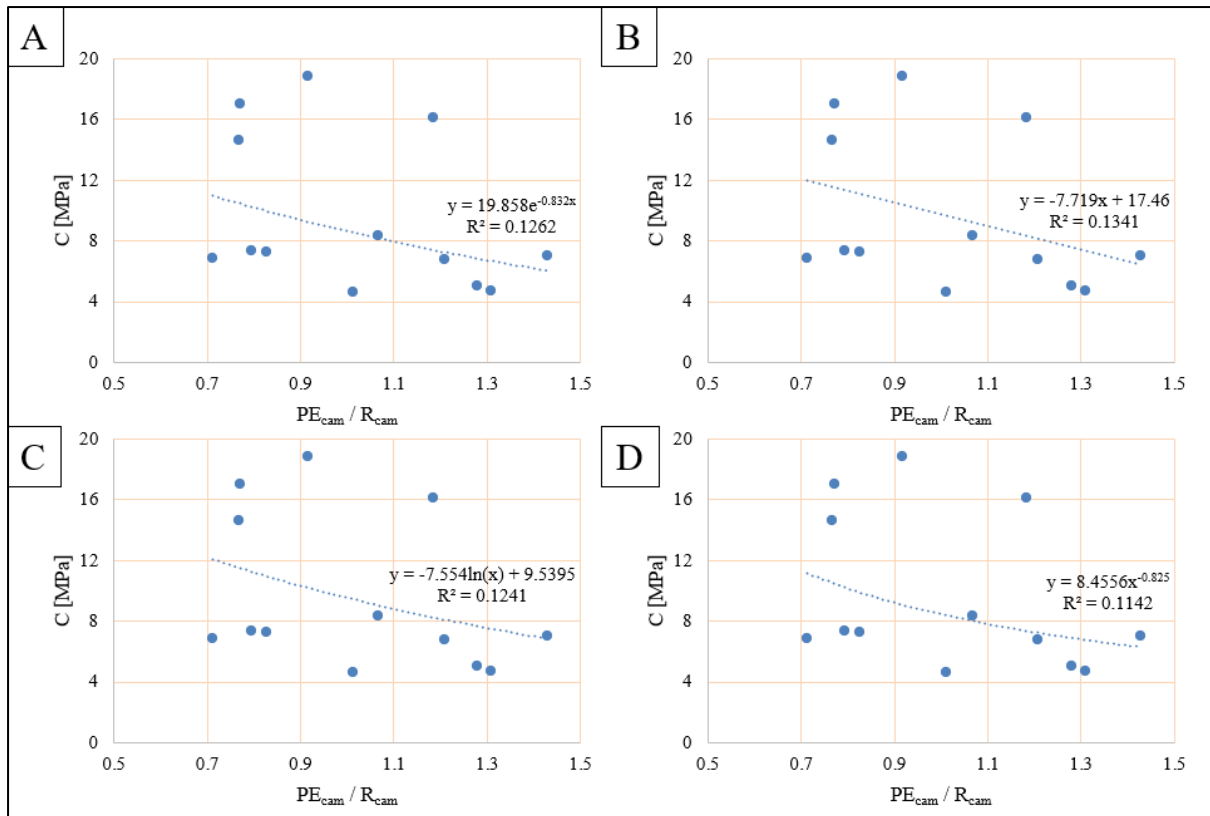


Figura 51. Distribución de los resultados de la cohesión (C), en función de los valores normalizados, PE_{cam} / R_{cam}. A) Análisis de datos con una línea de tendencia tipo exponencial. B) Análisis de datos con una línea de tendencia tipo lineal. C) Análisis de datos con una línea de tendencia tipo logarítmica. D) Análisis de datos con una línea de tendencia tipo potencial.

En la Tabla 56 se puede observar valores de R² bajos, lo que indica que el modelo de regresión tiene 11% de confiabilidad, debido a que los datos no se ajustan adecuadamente con un modelo de regresión, por lo que es recomendable densificar la información para establecer un criterio mucho más aproximado a la curva de regresión.

Tabla 56

Resultados de los diferentes criterios de regresión para la obtención de la ecuación empírica de la cohesión (calculada a partir del ensayo triaxial) en función de $\frac{PE_{cam}}{R_{cam}}$.

Análisis	Criterio de línea de tendencia	Ecuación	R ²
A	Exponencial	$C = 19.9 \cdot e^{0.8 \left(\frac{R_{cam}}{PE_{cam}} \right)}$	0.13
B	Lineal	$C = 17.5 - 7.7 \left(\frac{PE_{cam}}{R_{cam}} \right)$	0.13
C	Logarítmica	$C = 9.5 + 7.6 \ln \left(\frac{PE_{cam}}{R_{cam}} \right)$	0.12
D	Potencial	$C = 8.5 \cdot \left(\frac{R_{cam}}{PE_{cam}} \right)^{0.8}$	0.11

El valor de R² expresa la concentración de los datos, un valor cercano a 1 indica una muy buena correlación.

5.3.2.4 Correlación empírica del valor normalizado de esclerómetro (campo) con el ángulo de fricción interno

En la Figura 52 se presenta la gráfica que relaciona la cohesión en función del valor normalizado del esclerómetro de campo, de esta relación se puede establecer una regresión (Tabla 57) que relaciona correctamente ambos parámetros. Además, se puede observar un comportamiento inversamente entre el valor de rebote y el ángulo de fricción interno, lo que permite deducir que a mayor valor de ángulo de fricción menor será la cohesión y viceversa.

Tabla 57

Resultados de los diferentes criterios de regresión para la obtención de la ecuación empírica del ángulo de fricción interna (calculada a partir del ensayo triaxial) en función de $\frac{PE_{cam}}{R_{cam}}$.

Análisis	Criterio de línea de tendencia	Ecuación	R ²
A	Exponencial	$\phi = 45.2 \cdot e^{0.06 \left(\frac{PE_{cam}}{R_{cam}} \right)}$	0.14
B	Lineal	$\phi = 2.8 \left(\frac{PE_{cam}}{R_{cam}} \right) + 45.2$	0.14
C	Logarítmica	$\phi = 2.9 \ln \left(\frac{PE_{cam}}{R_{cam}} \right) + 48$	0.15
D	Potencial	$\phi = 48 \cdot \left(\frac{R_{cam}}{PE_{cam}} \right)^{0.06}$	0.15

El valor de R² expresa la concentración de los datos, un valor cercano a 1 indica una muy buena correlación.

En la Tabla 57 se puede observar valores de R² bajos, lo que indica que el modelo de regresión tiene 14-15% de confiabilidad, debido a que los datos no se ajustan adecuadamente

con un modelo de regresión, por lo que es recomendable densificar la información para establecer un criterio mucho más aproximado a la curva de regresión.

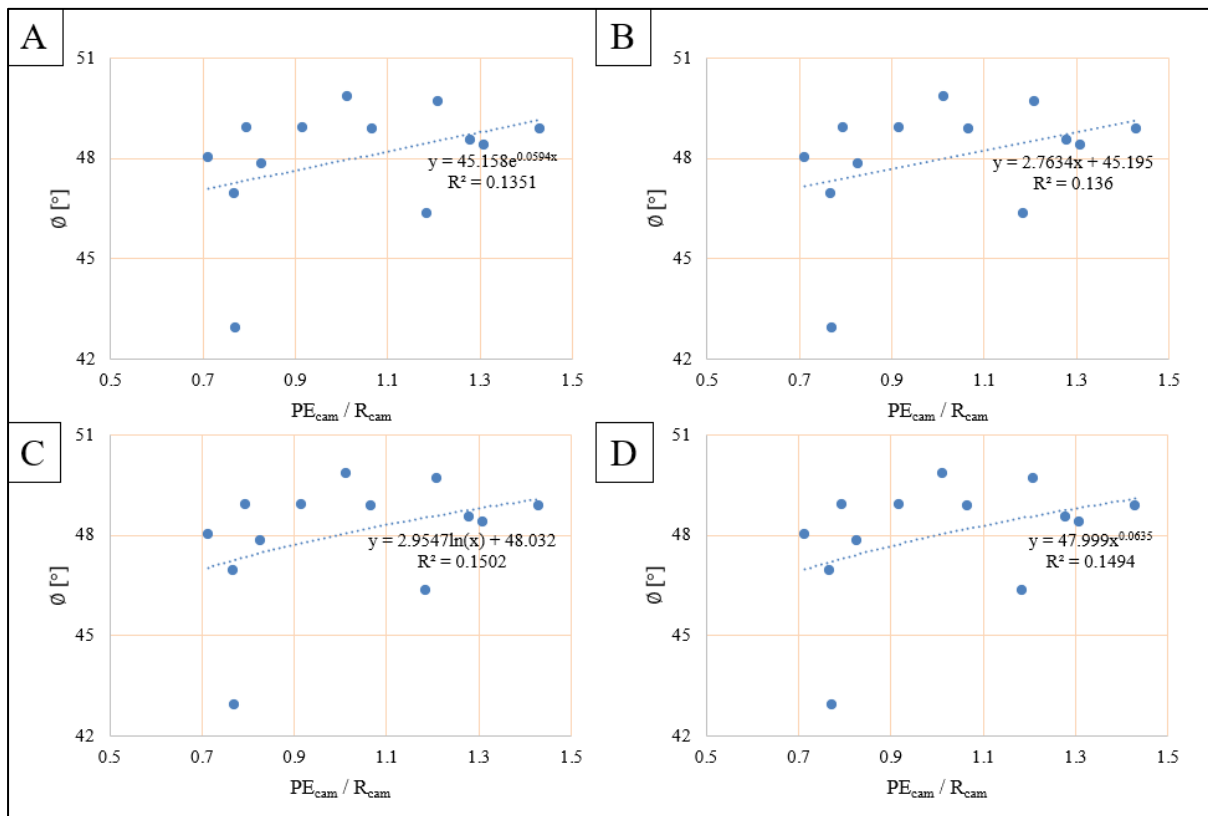


Figura 52. Distribución de los resultados de ángulo de fricción interna (ϕ), en función de los valores normalizados, PE_{cam} / R_{cam} . A) Análisis de datos con una línea de tendencia tipo exponencial. B) Análisis de datos con una línea de tendencia tipo lineal. C) Análisis de datos con una línea de tendencia tipo logarítmica. D) Análisis de datos con una línea de tendencia tipo potencial.

5.3.3 Correlación empírica del ensayo esclerométrico con parámetros obtenidos del PLT

El ensayo de carga puntual, proporciona valores de parámetros resistentes de la matriz rocosa tales como: resistencia a la compresión (σ_c), mediante la obtención del I_{S50} . En la Tabla 58 se exponen los valores obtenidos en las muestras ensayadas, tanto con esclerómetro como por ensayo PLT.

Tabla 58
Resultados del ensayo esclerométrico realizado en campo y el ensayo de carga puntual

No.	Código	Esclerómetro		PLT	
		PE_{cam} / R_{cam} (normalizado) [kN/m ³]	Carga [kN]	I_{S50} [MPa]	σ_c [MPa]
1	LAB-CM03	1.0	4.5	2.9	20.1
2	LAB-CM04	0.8	-	-	-
3	LAB-CM05	0.7	7.5	6.4	44.7
4	LAB-CM06	1.2	6.6	4.2	29.2
5	LAB-CM07	1.2	7.2	5.2	36.1
6	LAB-CM08	0.8	7.1	4.4	30.9
7	LAB-CM09	1.1	7.2	4.6	32.2
8	LAB-CM10	0.9	5.2	4.4	30.7
9	LAB-CM11	0.8	4.4	6.8	47.3
10	LAB-CM12	0.8	8.6	5.2	36.3
11	LAB-CM13	1.2	7.8	4.9	34.1
12	LAB-CM14	1.0	4.3	5.3	37.1
13	LAB-CM15	1.3	4.1	2.9	20.4
14	LAB-CM16	1.3	4.4	3.0	21.2
15	LAB-CM17	1.4	3.1	3.2	22.6
16	LAB-CM02	0.9	6.9	4.2	29.6

En la Figura 53 se presenta la gráfica que relaciona el índice de carga puntual (I_{S50}) en función del valor normalizado del esclerómetro de campo, de esta relación se puede establecer una regresión (Tabla 59) que relaciona correctamente ambos parámetros.

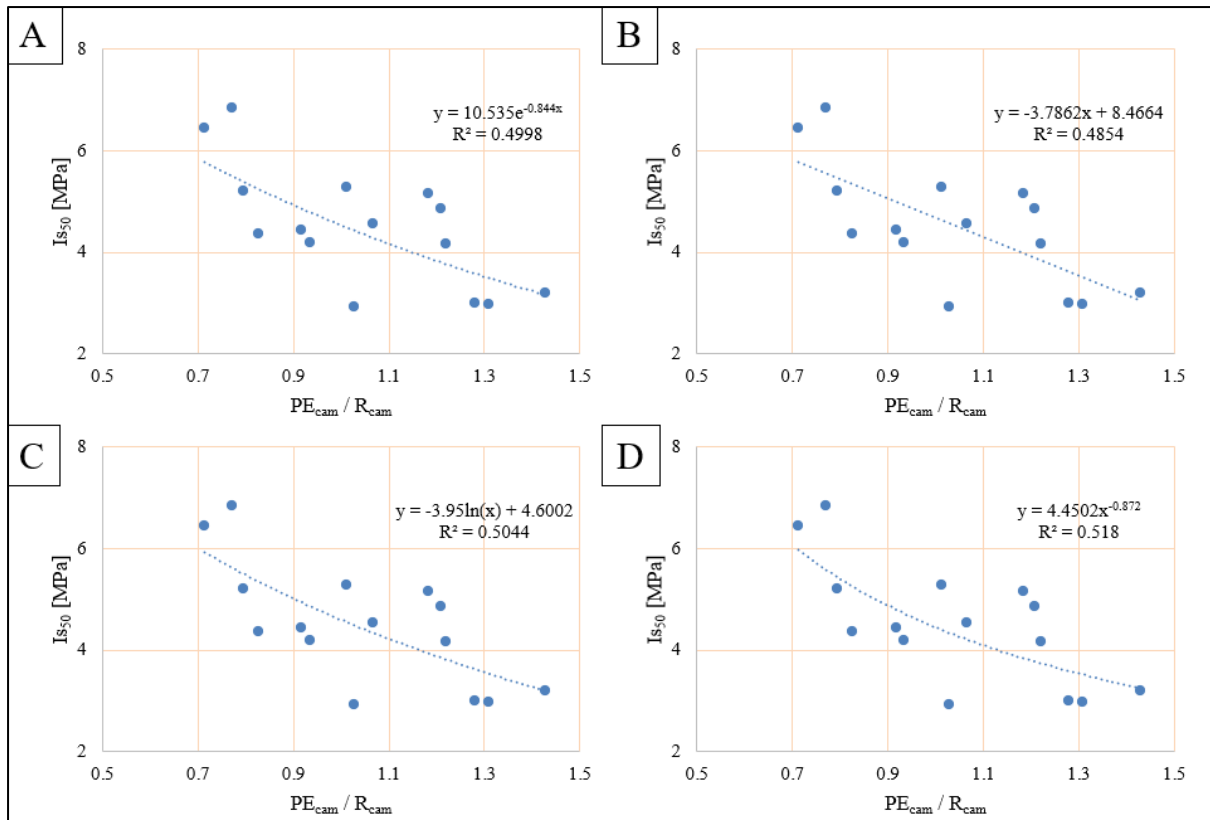


Figura 53. Distribución de los resultados del índice de carga puntual (IS_{50}), en función de los valores normalizados, PE_{cam}/R_{cam} . A) Análisis de datos con una línea de tendencia tipo exponencial. B) Análisis de datos con una línea de tendencia tipo lineal. C) Análisis de datos con una línea de tendencia tipo logarítmica. D) Análisis de datos con una línea de tendencia tipo potencial.

Tabla 59

Resultados de los diferentes criterios de regresión para la obtención de la ecuación empírica del IS_{50} (calculado del ensayo PLT) en función de $\frac{PE_{cam}}{R_{cam}}$.

Análisis	Criterio de línea de tendencia	Ecuación	R^2
A	Exponencial	$IS_{50} = 10.5 \cdot e^{0.8 \left(\frac{R_{cam}}{PE_{cam}}\right)}$	0.50
B	Lineal	$IS_{50} = 8.5 - 3.8 \left(\frac{PE_{cam}}{R_{cam}}\right)$	0.49
C	Logarítmica	$IS_{50} = 4.6 - 3.9 \ln\left(\frac{PE_{cam}}{R_{cam}}\right)$	0.50
D	Potencial	$IS_{50} = 4.5 \cdot \left(\frac{R_{cam}}{PE_{cam}}\right)^{0.06}$	0.52

El valor de R^2 expresa la concentración de los datos, un valor cercano a 1 indica una muy buena correlación.

5.4 Selección de los modelos óptimos de regresión

En el acápite 5.3 se realizan los análisis estadísticos y se establecen modelos de regresión, a través de correlaciones en los datos obtenidos por el ensayo esclerométrico en función de los parámetros obtenidos por ensayos de compresión simple con módulos de elasticidad, triaxial y PLT. Lo que se puede evidenciar en los criterios de regresión, es que la curva de tipo potencial genera valores altos de R^2 , lo que indica una buena proximidad de los datos y por ende una buena correlación. Por lo tanto, en los acápites posteriores se establecen los mejores criterios de regresión para los parámetros analizados.

5.4.1 Modelos empíricos que relacionan los datos de esclerómetro *IN SITU* con los datos de laboratorio

La Ecuación 5.1 establece una relación en función de los datos de esclerómetro (peso específico y rebotes) en condiciones de laboratorio (Tabla 45), para obtener la RCS sin necesidad del uso del ábaco de Miller.

$$RCS_{lab} = 36.1 \left(\frac{R_{lab}}{PE_{lab}} \right)^{0.94} \quad [MPa] \quad (5.1)$$

La Ecuación 5.2 establece una relación en función de los datos de esclerómetro (peso específico y rebotes) en condiciones de campo (Tabla 46), para obtener la RCS sin necesidad del uso del ábaco de Miller.

$$RCS_{cam} = 35.2 \left(\frac{R_{cam}}{PE_{cam}} \right)^{1.16} \quad [MPa] \quad (5.2)$$

Si por algún motivo no se tomaran los datos de esclerómetro en condiciones de campo, ya sea por la obtención de testigos de perforación a través de sondajes o debido a que no existieran las condiciones favorables (clima desfavorable o condiciones logísticas en la cantera,

que imposibiliten el acceso al afloramiento), se establece en la Ecuación 5.3, una relación entre los parámetros de campo con los de laboratorio (Tabla 48).

$$\frac{PE_{lab}}{R_{lab}} = 1.22 \left(\frac{PE_{cam}}{R_{cam}} \right)^{0.69} \quad (5.3)$$

De igual manera se establece una relación (Ecuación 5.4), colocando todos los valores de RCS (condiciones de laboratorio y campo, Tabla 47), obteniendo así una mayor densificación en la información, lo que permite establecer una relación mucho más generalizada, es decir independiente de ambas condiciones.

$$RCS = 34.06 \left(\frac{R}{PE} \right)^{0.94} \quad [MPa] \quad (5.4)$$

5.4.2 Modelos empíricos que relacionan los datos de esclerómetro *IN SITU* con los parámetros obtenidos del ensayo de compresión simple con módulos de elasticidad

La Ecuación 5.5 establece una relación en función de los datos de esclerómetro (peso específico y rebotes) en condiciones de campo, relacionados con el valor de RCS (Tabla 50) obtenida del ensayo de compresión simple con módulos de elasticidad (σ_{CS-C}).

$$\sigma_{CS-C} = 31.26 \cdot \left(\frac{R_{cam}}{PE_{cam}} \right)^{1.9} \quad [MPa] \quad (5.5)$$

La Ecuación 5.6 establece una relación en función de los datos de esclerómetro en condiciones de campo, relacionados con el Módulo de Young (E_{prom}) (Tabla 51) obtenida del ensayo de compresión simple con módulos de elasticidad.

$$E_{prom} = 43.2 \cdot \left(\frac{R_{cam}}{PE_{cam}} \right)^{2.4} \quad [GPa] \quad (5.6)$$

La Ecuación 5.7 establece una relación en función de los datos de esclerómetro en condiciones de campo, relacionados con el coeficiente de Poisson (ν) (Tabla 52) obtenida del ensayo de compresión simple con módulos de elasticidad.

$$\nu = 0.2 \cdot \left(\frac{PE_{cam}}{R_{cam}} \right)^{1.03} \quad (5.7)$$

5.4.3 Modelos empíricos que relacionan los datos de esclerómetro *IN SITU* con los parámetros obtenidos del ensayo triaxial

La Ecuación 5.8 establece una relación en función de los datos de esclerómetro en condiciones de campo, relacionados con la RCS del ensayo triaxial (σ_{CS-T}) (Tabla 54).

$$\sigma_{CS-T} = 44.7 \cdot \left(\frac{R_{cam}}{PE_{cam}} \right)^{1.9} \quad [MPa] \quad (5.8)$$

La Ecuación 5.9 establece una relación en función de los datos de esclerómetro en condiciones de campo, relacionados con la resistencia a la tracción, obtenida del ensayo triaxial (σ_t) (Tabla 55).

$$-\sigma_t = 6.6 \cdot \left(\frac{PE_{cam}}{R_{cam}} \right)^{-2.1} \quad [MPa] \quad (5.9)$$

La Ecuación 5.10 establece una relación en función de los datos de esclerómetro en condiciones de campo, relacionados con la cohesión obtenida del ensayo triaxial (C) (Tabla 56).

$$C = 8.5 \cdot \left(\frac{R_{cam}}{PE_{cam}} \right)^{0.8} \quad [MPa] \quad (5.10)$$

La Ecuación 5.11 establece una relación en función de los datos de esclerómetro en condiciones de campo, relacionados con el ángulo de fricción interno, obtenido del ensayo triaxial (C) (Tabla 57).

$$\phi = 48 \cdot \left(\frac{R_{cam}}{PE_{cam}} \right)^{0.06} \quad [^\circ] \quad (5.11)$$

5.4.4 Modelos empíricos que relacionan los datos de esclerómetro *IN SITU* con los parámetros obtenidos del PLT

La Ecuación 5.12 establece una relación en función de los datos de esclerómetro en condiciones de campo, relacionados con el IS_{50} del PLT (Tabla 59).

$$IS_{50} = 4.5 \cdot \left(\frac{R_{cam}}{PE_{cam}} \right)^{0.06} \quad (5.12)$$

5.5 Validez del modelo empírico

Se ejecutaron ensayos de esclerómetro *IN SITU* (Tabla 60 y Tabla 61), para posteriormente realizar el muestreo de las 4 mármoles de la Unidad El Laurel (Figura 54) a lo largo de los cuerpos mineralizados (Figura 56), para ejecutar 2 ensayos de compresión simple con módulos de elasticidad (Muestras: C-M1B y C-M2) y 2 ensayos de compresión simple (Muestras: C-M1A y C-M3), con la finalidad de evaluar la dispersión de los datos y su variación con el uso de las ecuaciones empíricas.

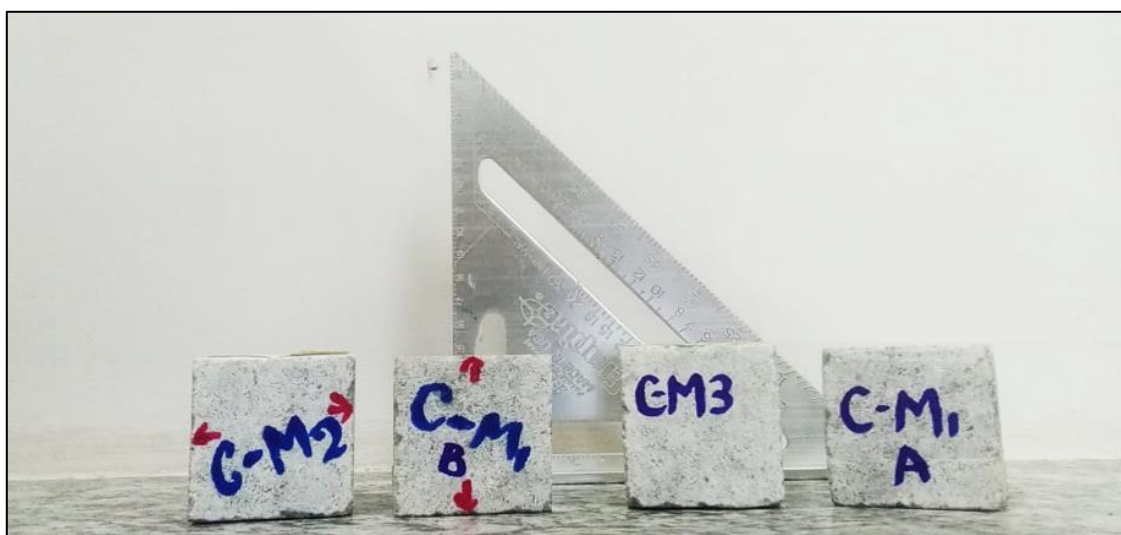


Figura 54. Muestras de mármol (preparadas para los ensayos), recolectadas a lo largo de los cuerpos mineralizados: 1, 2 y 3. Las muestras tienen dimensiones de 50 x 50 x50 mm, para realizar ensayos de compresión simple. La finalidad del muestreo es definir la validez de las ecuaciones empíricas propuestas.

Tabla 60

Peso específico de las muestras para la validez del modelo empírico

No.	Código	Cuerpo	X	Y	Densidad campo					
					Masa (g)	Masa (kg)	Volumen (ml)	Volumen (m3)	Densidad (kg/m ³)	Peso específico (kN/m ³)
1	C-M1A	1	771824.6	28272.9	1612.5	1.6125	620	0.0006	2600.8	25.5
2	C-M1B	1	771813.7	28294.6	1745.6	1.7456	680	0.0007	2567.1	25.2
3	C-M2	2	771942.5	28394.5	1482.7	1.4827	550	0.0006	2695.8	26.5
4	C-M3	3	772044.0	28584.1	1217.2	1.2172	435	0.0004	2798.2	27.5

Tabla 61

Registro de valores de rebotes con el esclerómetro en condiciones de campo

No	Cuerpo	Peso específico [kN/m ³]	Posición	Datos Esclerómetro <i>IN SITU</i>										R	PE _{cam} /R _{cam} [kN/m ³]	RCS - ábaco [MPa]	RCS - Ec. 5.2 [MPa]
				Datos													
1	C-M1A	25.51	IB	18	18	20	24	24	24	25	26	26	26	23.1	1.10	30.9	31.4
2	C-M1B	25.18	IB	16	16	20	22	22	24	26	28	30	30	23.4	1.08	30.2	32.3
3	C-M2	26.45	H	18	20	20	20	21	22	24	30	30	32	23.7	1.12	32.2	31.0
4	C-M3	27.53	IB	24	24	26	26	28	31	32	32	38	38	29.9	0.92	49.1	38.7

Se puede observar la cercanía de los datos obtenidos *IN SITU* (RCS - ábaco) con los valores obtenidos de la ecuación propuesta (RCS - Ec. 5.2).

De acuerdo a las observaciones registradas se puede deducir que existe una pequeña dispersión entre los datos de entrada para el modelo, con los datos obtenidos del ensayo *IN SITU* (Figura 55), por lo que se evidencia una buena correlación entre ambos parámetros, lo que a su vez se traduce en una buena aplicabilidad de la ecuación y sus resultados.

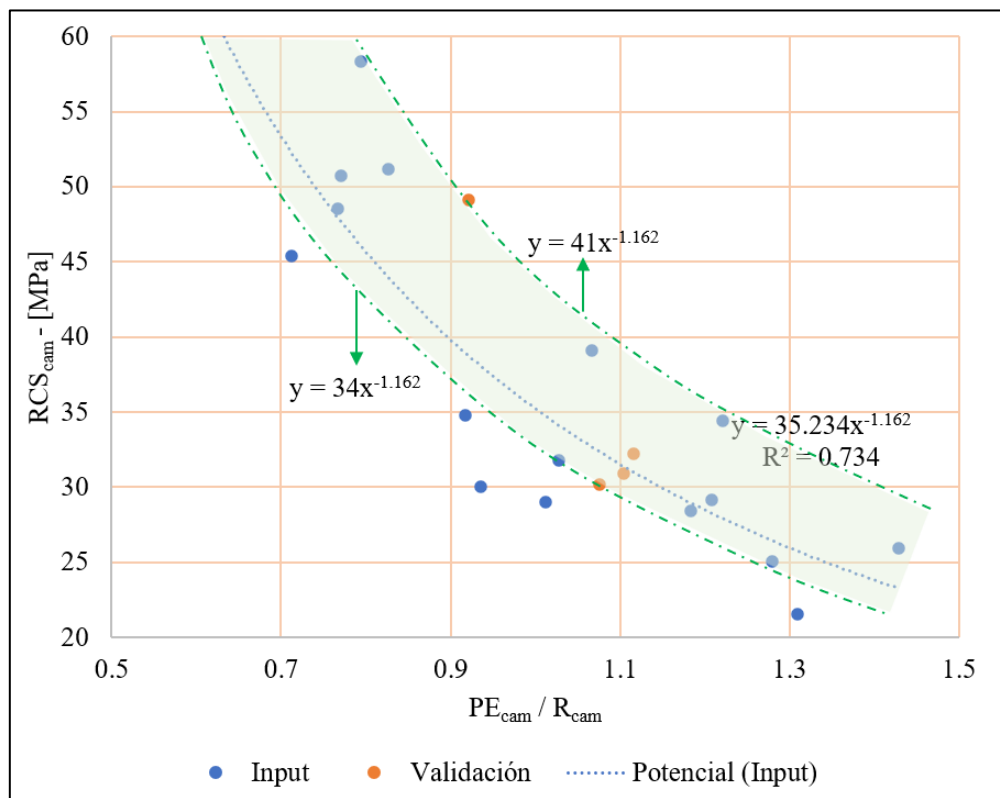


Figura 55. Comprobación y validez del modelo empírico (Ecuación 5.2). Se puede observar claramente que el área (polígono verde) se encuentra dentro de los datos de entrada (input), además se puede observar una menor dispersión entre los puntos de verificación y la línea de tendencia.

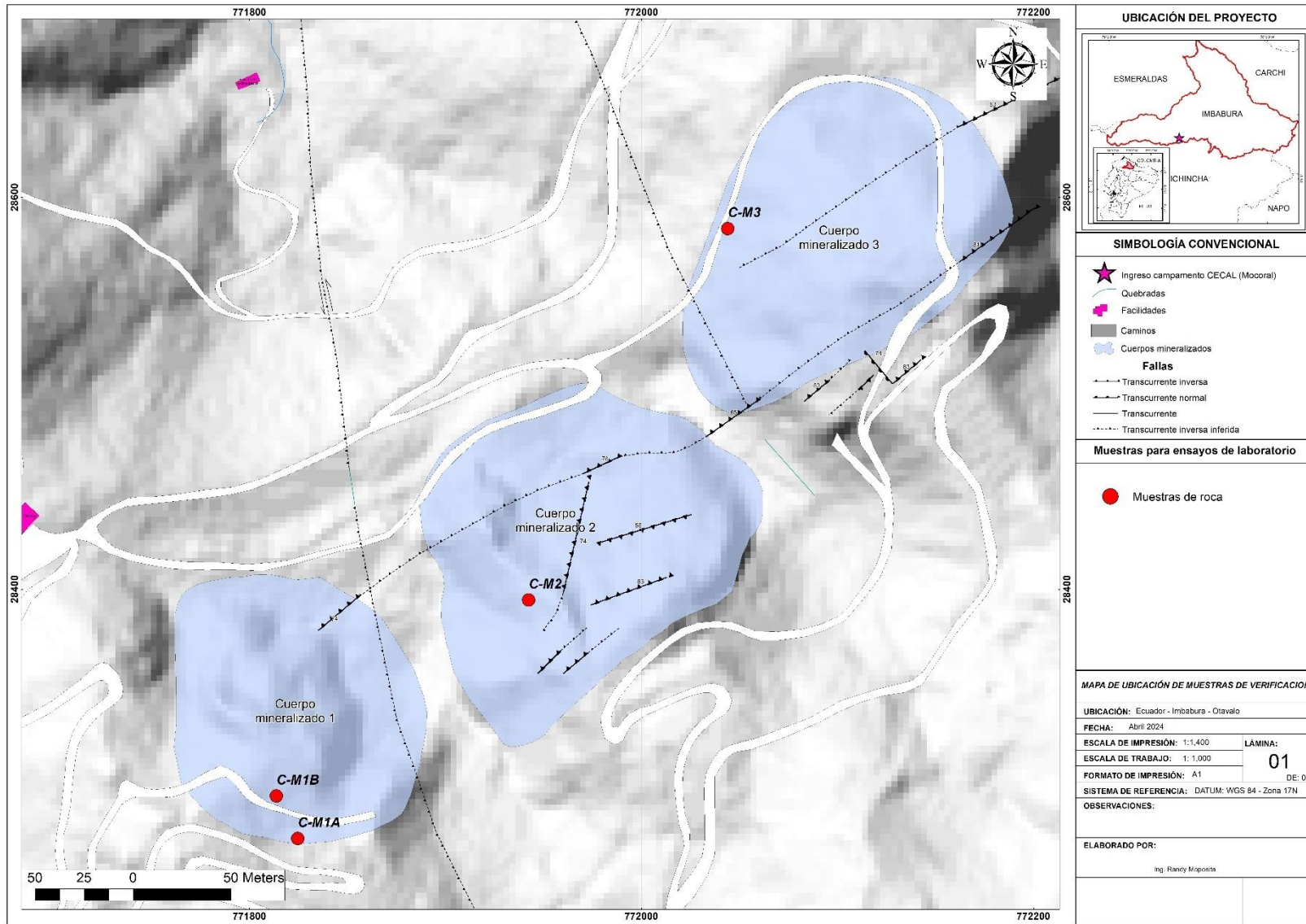


Figura 56. Mapa de ubicación de las muestras recolectadas para la verificación y validez de las ecuaciones empíricas.

En las muestras C-M1B y C-M2 se ejecutaron ensayos de compresión simple con módulos de elasticidad, en las muestras C-M3 y C-M1A se realizaron ensayos de compresión simple, la Tabla 62 y Tabla 63, se muestra los resultados obtenidos en estos ensayos, en el Anexo 6 y 7 se puede ver el detalle de los ensayos ejecutados.

Tabla 62

Registro de datos de esclerómetro y Compresión Simple con módulos de elasticidad

No.	Código	PE_{cam} / R_{cam} (normalizado) [kN/m ³]	Carga máxima [kN]	Resistencia a la compresión simple (σ_c) [MPa]	Resistencia a la compresión simple (Ec. 5.5) [MPa]	Módulo de Young E Axial Secante [GPa]	Módulo de Young E_{10MPa} Axial [GPa]	Módulo de Young $E_{0.2\%}$ Axial [GPa]	Módulo de Young E Axial Promedio [GPa]	Módulo de Young E Axial Promedio - Ec. 5.6 [GPa]
1	C-M1A	1.10	56.0	22.4	25.9	36.1	30.6	37.3	34.0	34.4
2	C-M1B	1.08	71.2	28.5	27.2	36.7	40.6	39.9	40.2	35.9
3	C-M2	1.12	65.3	26.1	25.4	39.1	37.5	40.5	39.0	32.9
4	C-M3	0.92	85.8	34.3	36.6	17.7	59.0	41.2	50.1	52.7

De acuerdo al análisis de los resultados obtenidos con la correlación empírica con la RCS del ensayo de compresión simple (Ecuación 5.5) y los resultados de los ensayos ejecutados, se puede observar que existe una dispersión baja entre los datos de entrada para el modelo, con los datos obtenidos del ensayo *IN SITU* (Figura 57).

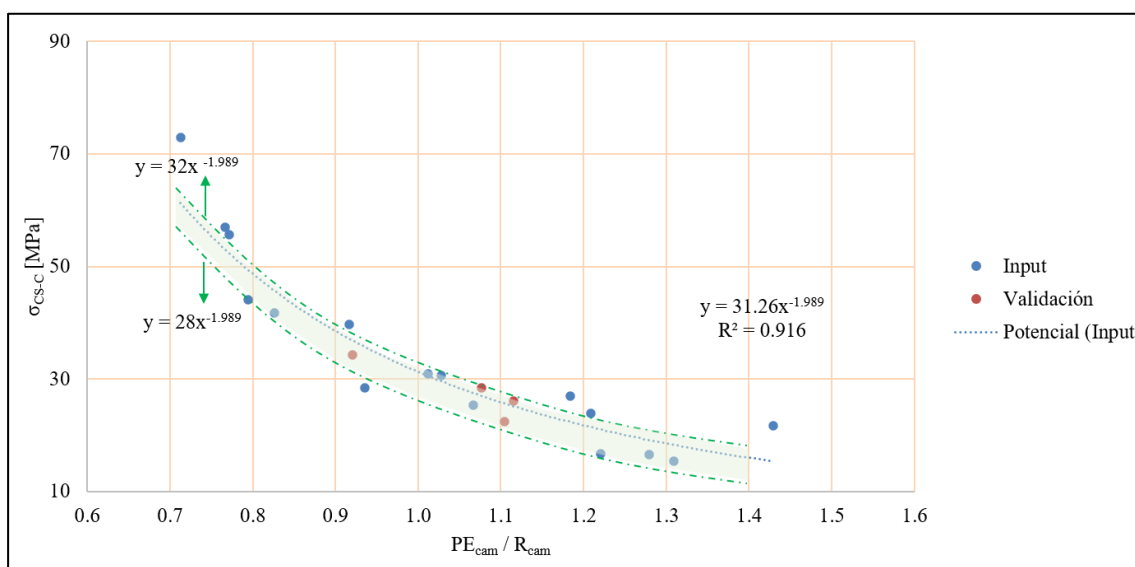


Figura 57. Comprobación y validez del modelo empírico (Ecuación 5.5). Se puede observar claramente que el área (polígono verde) se encuentra dentro de los datos de entrada (input), además se puede observar una menor dispersión entre los puntos de verificación y la línea de tendencia.

En cuanto a los parámetros elásticos de la roca: Módulo de Young (Figura 58) y Coeficiente Poisson (Tabla 63 y Figura 59) se tiene también una buena correlación, con una baja variación entre la curva de regresión y los datos obtenidos en los ensayos de verificación.

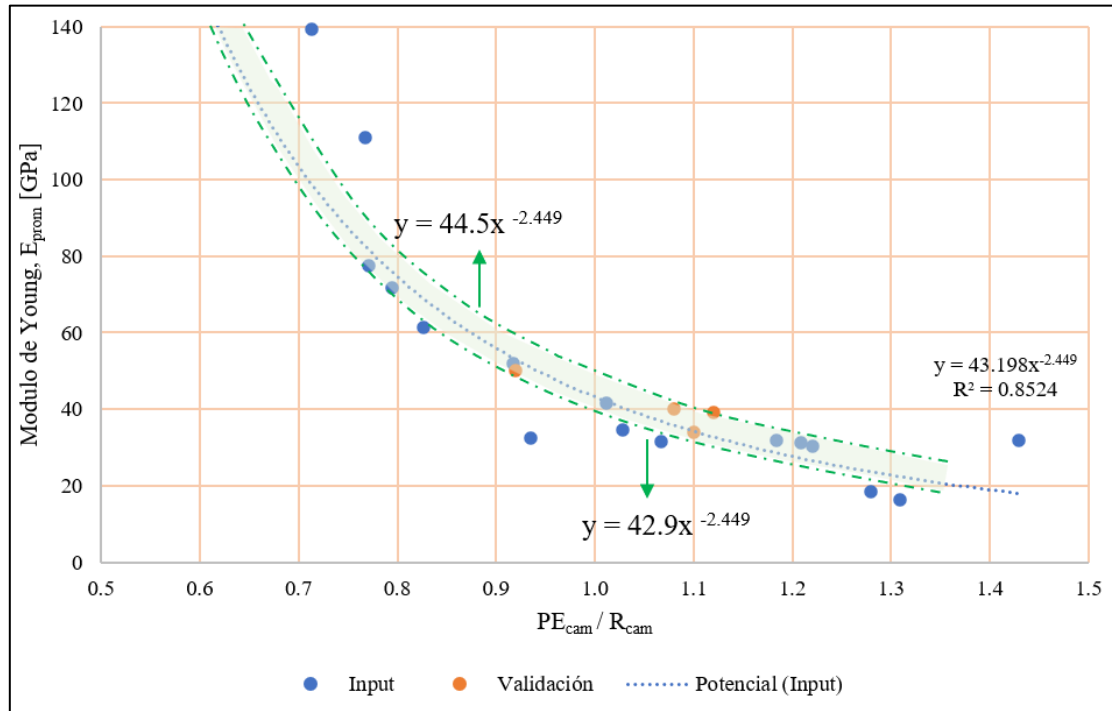


Figura 58. Comprobación y validez del modelo empírico (Ecuación 5.6). Se puede observar claramente que el las muestras ensayadas tienden a la curva de regresión, es decir poseen una muy baja variación.

Tabla 63

Registro de datos de esclerómetro y Compresión Simple con módulos de elasticidad

No.	Código	PE_{cam} / R_{cam} (normalizado) [kN/m ³]	Carga máxima [kN]	Resistencia a la compresión simple (σ_{cs}) [MPa]	Coefficiente de Poisson (ν)	Coefficiente de Poisson (ν) – Ec. 5.7
2	C-M1B	1.08	71.2	28.5	0.23	0.22
3	C-M2	1.12	65.3	26.1	0.21	0.22

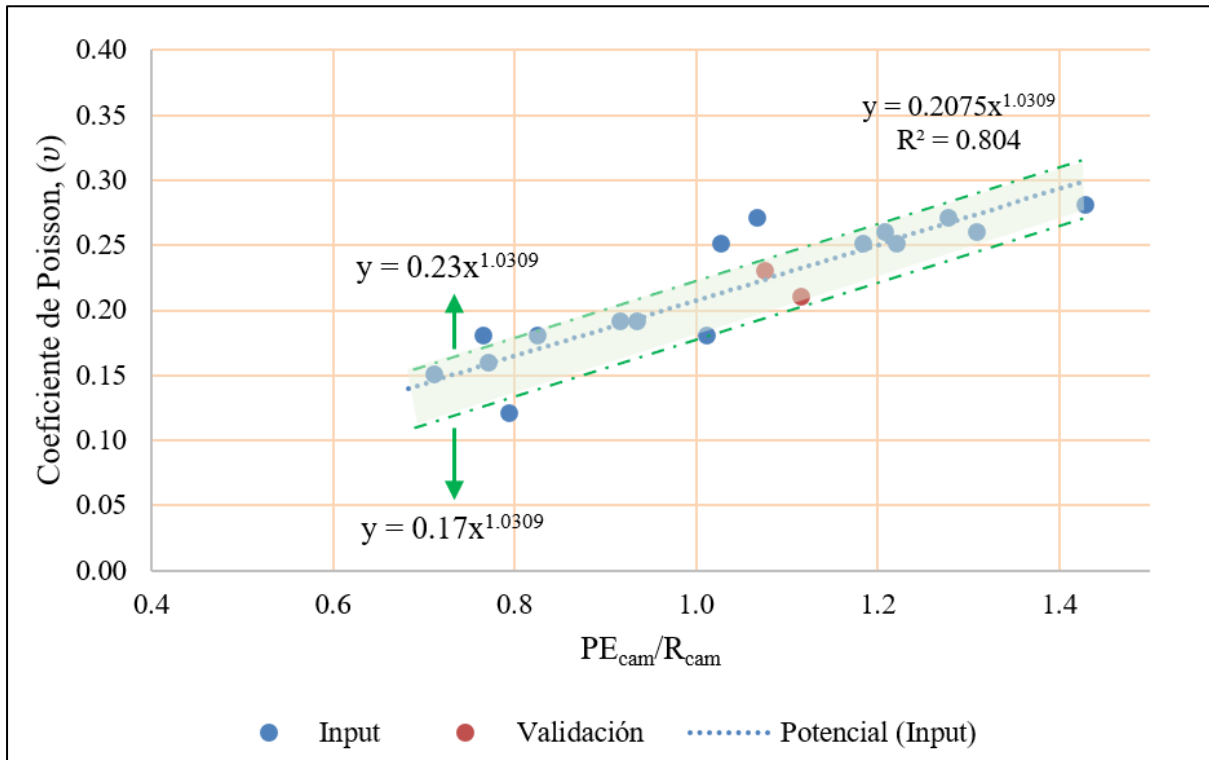


Figura 59. Comprobación y validez del modelo empírico (Ecuación 5.7). Se puede observar claramente que el área (polígono verde) se encuentra dentro de los datos de entrada (input), además se puede observar una baja dispersión entre los puntos de verificación y la línea de tendencia.

En la validación de las ecuaciones empíricas para el ensayo de compresión simple con módulos de elasticidad se puede establecer una buena correlación con las ecuaciones empíricas, ya que los valores obtenidos por los nuevos ensayos se encuentran en regiones muy cercanas a la curva de regresión teórica propuesta.

Finalmente se realiza la comparación integral de los valores de Resistencia a la Compresión Simple (Figura 60) de los siguientes ensayos: Ensayo de Compresión Simple con Módulos de elasticidad, esclerómetro (campo) y ensayos de compresión simple realizados para la validación del modelo.

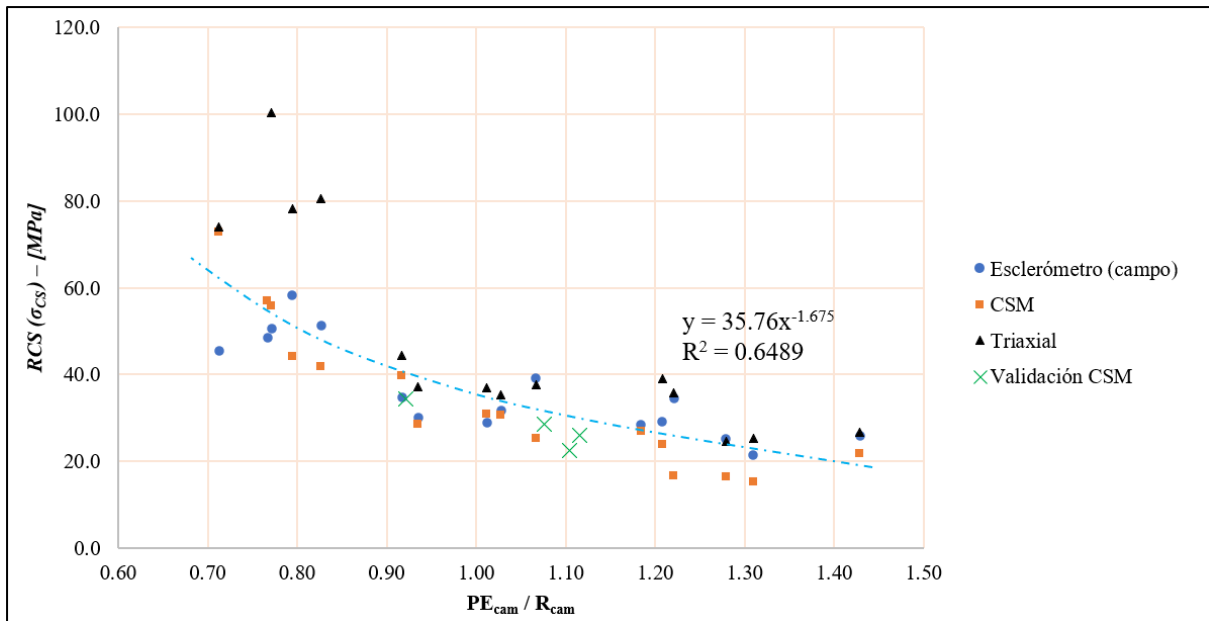


Figura 60. Modelo de regresión generalizado que relaciona la Resistencia a la Compresión Simple (σ_{CS}) de los ensayos de Compresión Simple con módulos de elasticidad, triaxial y esclerométrico. La línea azul señala la línea de tendencia generalizada para todos los datos, se puede observar un coeficiente de determinación (R^2) del 64.9 % lo que indica una buena fiabilidad del modelo de regresión aplicado a la variable dependiente.

En este modelo generalizado se puede establecer una ecuación mucho más abierta que incluye toda la base de datos de los valores de resistencia a la compresión simple (Ecuación 5.13), misma que tiene un R^2 igual a 65.9%, lo que indica una buena fiabilidad en el uso del modelo. Los datos tienen una desviación estándar de 17.97 y un coeficiente de variación de 46.81% lo que indica una buena agrupación de los datos y marca una tendencia de tipo potencial.

$$\sigma_{CS} = 35.8 \cdot \left(\frac{R_{cam}}{PE_{cam}} \right)^{1.7} \quad [MPa] \quad (5.13)$$

Lo que indica claramente que la Resistencia a la Compresión Simple es directamente proporcional al rebote que se obtiene del ensayo esclerométrico.

6. CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

- Geológicamente se tiene que el material aprovechable para la cantera Mocoral, es el mármol (Unidad El Laurel), misma que sobreyace en contacto tectónico con la Unidad Pilatón, el batolito de Apuela es el encargado de realizar un metamorfismo de bajo grado de tipo metasomático, lo que recristaliza el protolito calcáreo (calizas), haciendo que ciertas zonas tengan un buen ensamble mineral (recristalización) lo que aumenta su resistencia a la compresión. Debido al intemperismo, las rocas dispuestas en la parte superficial se desgastan por los procesos denudativos y exógenos como la acción del aire y lluvia, lo que se resulta en suelos residuales o poco competentes.
- La distribución espacial de los cuerpos mineralizados sigue una dirección preferencial NE-SW, sobreyaciendo a la unidad volcanoclástica Pilatón, donde mediante la clasificación RMR se ha podido definir que la Unidad El Laurel presente predominantemente una roca tipo III. De manera general se puede observar que la calidad del macizo rocoso del cuerpo mineralizado 3 es mucho más competente que el cuerpo mineralizado 2 y el cuerpo mineralizado 1. Una razón para este comportamiento, puede ser que el cuerpo mineralizado 1 está afectado directamente por el emplazamiento del batolito de Apuela, lo que hace que presente mayor diaclasamiento, en relación a los cuerpos mineralizados 2 y 3, es decir hacia el NE del cuerpo 1, el material presenta menor diaclasamiento.
- De manera resumida para la unidad geotécnica I (mármoles Unidad El Laurel) se tiene un comportamiento espacialmente definido, es decir, para las familias de discontinuidades: J1, J2, J3, J6, J7, J8 y J9, el RMR decrece hacia el NE, por

lo tanto dichas familias de discontinuidades tendrán una calificación RMR más alta hacia el SW e irá decreciendo conforme se avanza a los cuerpos mineralizados (hacia el NE), a diferencia de las familias J4 y J5 que se comportan de manera inversa, es decir tienen un RMR más bajo hacia el NW y se eleva hacia el NE, lo que a su vez se asemeja a un sistema tipo Riedel, donde debido a los sistemas compresivos existen fallas inversas y ortogonalmente a estas fallas de rumbo y diaclasamientos.

- Se ha podido relacionar 8 ecuaciones empíricas (Ec.5.5 – Ec.5.11) que describen el comportamiento del parámetro normalizado del ensayo esclerométrico PE_{cam} / R_{cam} , en función de los diferentes parámetros mecánicos de la roca como lo son:
 - i. Resistencia a la compresión, módulo de Young y coeficiente de Poisson (Ensayo de compresión simple con cálculo de módulos de elasticidad),
 - ii. Resistencia a la compresión, tracción, cohesión y ángulo de fricción interna (Ensayo triaxial); y,
 - iii. Índice a la carga puntual (PLT). Donde todas las regresiones satisfacen a la tendencia marcada de cada uno de los parámetros. Los valores de R^2 son altos para los parámetros como: Resistencia a la compresión simple, Módulo de Young y Coeficiente de Poisson del Ensayo de compresión simple. Al igual que los parámetros de Resistencia a la compresión simple y tracción del ensayo Triaxial; lo que de igual manera sucede con el índice a la carga puntual del PLT, es decir, los modelos matemáticos describen correctamente la tendencia que presentan los datos, lo que a su vez se traduce en una buena aplicabilidad de la ecuación y sus resultados. Por otro lado, los parámetros de cohesión y ángulo de fricción interna poseen un bajo valor de R^2 , lo que indica una alta dispersión del modelo con los datos de entrada.

- La relación PE_{cam} / R_{cam} describe valores bajos cuando el valor de rebote (R) es alto y valores mayores cuando el rebote es bajo, lo que hace que la relación del parámetro del esclerómetro normalizado sea inversamente proporcional para los siguientes parámetros: i. Ensayo de compresión simple: Resistencia a la compresión simple (σ_{CS-C}) y Módulo de Young (E_{prom}); ii. Ensayo triaxial: Resistencia a la compresión simple (σ_{CS-T}), el inverso de la tracción ($-\sigma_t$) y cohesión (C); iii. PLT: Índice a la carga puntual (I_{s50}). Lo que indica que materiales más densos y competentes, estarán más cohesionados y tendrán un mejor comportamiento, descritos por altos valores en los parámetros geomecánicos y elásticos.
- Del análisis de los modelos de regresión para los parámetros de cohesión y ángulo de fricción interna se podría sugerir valores constantes de 8-12 [MPa] para la cohesión y 46 – 48 [°], debido a la baja variabilidad entre los datos de entrada.
- De los datos de laboratorio se puede concluir que la resistencia a la compresión simple aumenta hacia el NE, es decir los valores reportados con menor resistencia a la compresión simple son registrados en el cuerpo mineralizado 1, mientras que los más altos se reportan hacia el NE en el cuerpo mineralizado 3. Esto se debe a que el material del cuerpo mineralizado se encuentra bien cristalizado, evidencia de esto se expone en el análisis petrográfico de la muestra LAB-CM-11, que registra una mejor recristalización y mayor resistencia que, por ejemplo, la muestra LAB-CM-14 que microscópicamente posee menor cristalización y mayor presencia de minerales de blandos (arcillas).

- De acuerdo a la validación de los modelos de regresión, se puede deducir que existe una pequeña dispersión entre los datos de entrada para el modelo óptimo, con los datos obtenidos del ensayo *IN SITU*, por lo que se evidencia una buena correlación entre ambos parámetros (valores obtenidos por ensayos de laboratorio y los obtenidos por las ecuaciones empíricas), lo que brinda confiabilidad a los modelos empíricos, lo que pudo evidenciar en el modelo generalizado de la Ecuación 5.13.

6.2 Recomendaciones

Se recomienda:

- Identificar el módulo de Young que reporta el laboratorio, ya que siempre es necesario un análisis posterior para obtener datos idóneos para los estudios o diseños que se pretendan implementar.
- Aplicar las ecuaciones empíricas como un valor aproximado, que sirva para hacer cálculos rápidos o estudios de prefactibilidad de manera rápida, que permitan tener una idea de los parámetros resistentes del macizo rocoso en la zona de estudio.
- Densificar la base de datos de ensayos para afinar de manera más precisa las ecuaciones empíricas expuestas en este estudio.
- Realizar un estudio similar en la cantera UNACEM, para confirmar el comportamiento de los parámetros mecánicos de la roca encontrados en este estudio, para de esta manera definir un modelo matemático altamente certero, de baja dispersión, para la unidad geológica El Laurel.

- Implementar esta metodología de correlación de parámetros resistentes de la roca en otras unidades geológicas del país, para validar la eficiencia de los modelos y aumentar el vacío investigativo en caracterizaciones de esta índole.

7. BIBLIOGRAFÍA

- Aceves, A., Anguas, P., & Salazar, A. (2003). *Evaluación indirecta de los módulos elásticos de rigidez in situ y la relación entre V_p/V_s y el ángulo de fricción interna*.
- Aguiar, R. (2017). *Probabilistic seismic hazard analysis of muisne hospital*. 19(4), 413-430.
- Alves, F., Almeida, L., Zingano, A., Pimenta, M., Nogueira, R., & Souza, N. (2015, enero 1). *Esclerômetro de Schmidt em Basalto: Comparação com Ensaio de Compressão Uniaxial*. <https://doi.org/10.20906/CPS/SBMR-02-0011>
- ASTM. (2024). *Standard Test Methods for Compressive Strength and Elastic Moduli of Intact Rock Core Specimens under Varying States of Stress and Temperatures*. <https://www.astm.org/d7012-23.html>
- ASTM D1480-21. (2024). *Standard Test Method for Density and Relative Density (Specific Gravity) of Viscous Materials by Bingham Pycnometer*. <https://www.astm.org/d1480-21.html>
- ASTM D2938. (2024). *Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Intact Rock Core Specimens*. <https://www.astm.org/d2938-95r02.html>
- ASTM D3148-02. (2024). *Standard Test Method for Elastic Moduli of Intact Rock Core Specimens in Uniaxial Compression*. <https://www.astm.org/d3148-02.html>
- ASTM D5873-14. (2023). *Standard Test Method for Determination of Rock Hardness by Rebound Hammer Method (Withdrawn 2023)*. <https://www.astm.org/d5873-14.html>
- Barton, N. (1978). Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses: International Society for Rock Mechanics. *Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr*, 15, 319-368.
- Barton, N. & Bar, N. (2020). *The Q-slope method for rock slope engineering in faulted rocks and fault zones*. 1, 9.

- Bejarano, M. (2013). *Variación de los parámetros de resistencia de una roca blanda degradada en un talud en la vía Bogotá-Tunja*.
- Bieniawski, Z. T. (1989). *Engineering rock mass classifications: A complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering*. Wiley.
- Boland, M., Pilatasig, L., Ibadango, C., McCourt, W., Aspden, J., Hughes, R., & Beate, B. (2000). *Geology of the Western Cordillera between 0°—1° N (No. 10)*. Quito—Ecuador: *Proyecto de Desarrollo Minero y Control Ambiental*.
- Burns, Estrada, J., & McAlpine, S. (2014). *Project Picapiedra Due Diligence Report*.
- Ceballos, M. & Restrepo, I. (2016). Resistance correlation with compression uniaxial effective humidity and porous rocks. *Dyna*, 83(198), 9-15.
- Cohen, J., Cohen, P., West, S., & Aiken, L. (2013). *Applied Multiple Regression/Correlation Analysis for the Behavioral Sciences* (3.^a ed.). Routledge.
<https://doi.org/10.4324/9780203774441>
- Egüez, A., Cajas, M., & Davila, F. (1986). *Distribución de Terrenos oceánicos alóctonos y de terrenos continentales en la Cordillera Occidental del Ecuador: Evidencias en las geotravesías Otavalo – Selva Alegre y Cañar – La Troncal*. Politécnica, Monografía de Geología.
- Feijoo, P. & Román, M. (2019). *Correlación entre la deformación y la resistencia a la compresión en rocas*. Universidad Ciencia y Tecnología.
- Galván, M., Serón, J., & Preciado, J. (2019). *Correlation between the unconfined compressive strenght and the point load index $I_s(50)$ in limestone of the Comunidad Valenciana (Spain)*. 1(45), 10.
- González de Vallejo, L. I. (2012). *Ingeniería geológica*. Pearson Educación.
- Google Maps. (2024). *Mapa de Relieve*.

- IG-EPN. (2022). *Instituto Geofísico, Escuela Politécnica Nacional. Base de datos sismos históricos.*
- IIGE. (2000). *Instituto de Investigación Geológico y Energético. Base de datos hojas geológicas, Esc: 1:250,000.*
- IIGE. (2020). *Instituto de Investigación Geológico y Energético. Base de datos estructural zona Norte.*
- ISRM. (2014). *The ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 2007-2014.* Springer.
- PRODEMINCA. (2000). *Evaluación de Distritos Mineros del Ecuador: Depósitos porfídicos y epi-mesotermales relacionados con intrusiones de las Cordilleras Occidental y Real.*
- Ramsay, J. G. (1976). *Folding and fracturing of rocks* ([7th print.]). McGraw-Hill.
- Vallejo, C. (2007). *Evolution of the Western Cordillera in the Andes of Ecuador (Late Cretaceous – Paleogene).* Ph.D. thesis, Institute of Geology.
- Van Thournout, F. (1991). *Stratigraphy, magmatism and tectonism in the Ecuadorian northwestern cordillera: Metallogenic and Geodynamic implications (Doctoral Thesis).* Katholieke Universiteit Leuven, 150.



8. ANEXOS

Anexo 1: Peso específico laboratorio

	RESULTADOS DE PESO ESPECIFICO LABORATORIO DE MECANICA DE ROCAS Y PETROGRAFIA - FIGEMPA Resumen Ejecutivo		Código: SpC-PE-001	
	Universidad Central del Ecuador Facultad de Ingeniería en Geología, Minas, Petróleos y Ambiental		Fecha: 2022-10-24 Estado: Entregado	

ENSAYO DE PESO ESPECIFICO


No.	Código	Método	Densidad laboratorio	
			Densidad (kg/m ³)	Peso específico (kN/m ³)
1	LAB-CM03	Interno – picnómetro	2506.94	24.59
2	LAB-CM04	Interno – picnómetro	2470.16	25.18
3	LAB-CM05	Interno – picnómetro	2363.68	23.19
4	LAB-CM06	Interno – picnómetro	2699.88	26.49
5	LAB-CM07	Interno – picnómetro	2694.29	26.43
6	LAB-CM08	Interno – picnómetro	2705.47	26.54
7	LAB-CM09	Interno – picnómetro	2689.98	26.39
8	LAB-CM10	Interno – picnómetro	2668.34	26.18
9	LAB-CM11	Interno – picnómetro	2641.73	25.92
10	LAB-CM12	Interno – picnómetro	2611.08	25.61
11	LAB-CM13	Interno – picnómetro	2679.70	26.29
12	LAB-CM14	Interno – picnómetro	2332.34	22.88
13	LAB-CM15	Interno – picnómetro	2496.64	24.49
14	LAB-CM16	Interno – picnómetro	2517.11	24.69
15	LAB-CM17	Interno – picnómetro	2750.59	26.98
16	LAB-CM02	Interno – picnómetro	2147.48	21.07

Elaborado por:	Aprobado por:
	
Ing. Jessica Reinoso Técnico Docente	Ing. Danny Burbano MSc. Director de Carrera de Ingeniería de Minas



Página 1 | 1

Anexo 2: Ensayos triaxiales en roca

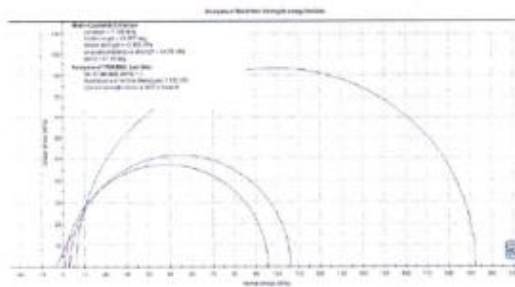
	RESULTADOS DE ENSAYOS TRIAXIALES EN ROCA LABORATORIO DE MECANICA DE ROCAS Y PETROGRAFIA - FIGEMPA Resumen Ejecutivo Universidad Central del Ecuador Facultad de Ingeniería en Geología, Minas, Petróleos y Ambiental	Código: SpC-ETx-001 Fecha: 2022-11-03 Estado: Entregado

ENSAYO TRIAXIAL EN ROCA No. 1

Código: LAB-CM-01
 Coordenadas UTM: 772013, 28373, 1831
 Ubicación: Zona de Contacto (Unidad El Laurel/ Unidad Pilatón), Talud Vía al Cuerpo 1
 Litología: Arenisca – Unidad Pilatón
 Número de muestras: 3
 Densidad media de la roca: 28.3 kN/m³
RESULTADOS:

Mohr-Coulomb Criterion		
cohesion	7.168 MPa	
friction angle	64.867 degrees	
tensile strength	-3.196 MPa	
uniaxial compressive strength	64.31 MPa	
alpha	87.16 degrees	
Failure Envelope Range		
Application	Slopes	
sig3max	0.2966 MPa	
Unit Weight	0,025 MN/m ³	
Tunnel Depth	10 m	
Lab Data		
Number of Tests	3	
sum square of errors (Residuals)	523.251	
Current fit method = LINEAR REGRESSION		
Number	Minor principal stress (MPa)	Mayor principal stress (MPa)
1	1	95.573
2	3	106.136
3	6	192.485

GRÁFICO: ENVOLVENTE MOHR-COULOMB



FOTOGRAFÍA ROTURA



M1: Rotura por matriz
 M2: Rotura por matriz
 M3: Rotura por matriz

Elaborado por:




Ing. Jessica Reinoso
 Técnico Docente

Aprobado por:



Ing. Danny Burbano MSc.
 Director de Carrera de Ingeniería de Minas



	RESULTADOS DE ENSAYOS TRIAXIALES EN ROCA LABORATORIO DE MECANICA DE ROCAS Y PETROGRAFIA - FIGEMPA Resumen Ejecutivo	Código: SpC-ETx-001
	Universidad Central del Ecuador Facultad de Ingeniería en Geología, Minas, Petróleos y Ambiental	Fecha: 2022-11-03 Estado: Entregado

ENSAYO TRIAXIAL EN ROCA No. 2

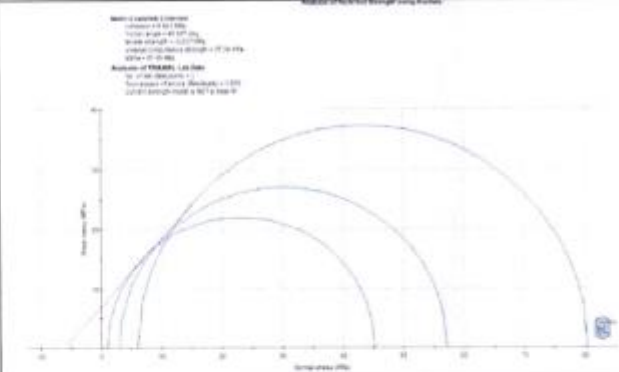



Código: LAB-CM-02
Coordenadas UTM: 772037, 28414, 1798
Ubicación: Cuerpo 2
Litología: Mármol – Unidad Laurel
Número de muestras: 3
Densidad media de la roca: 21.07 kN/m³

RESULTADOS:


Mohr-Coulomb Criterion		
cohesion		6.983 MPa
friction angle		48.887 degrees
tensile strength		-5.237 MPa
uniaxial compressive strength		37.24 MPa
alpha		81.99 degrees

Lab Data		
Number of Tests		3
sum square of errors (Residuals)		3.029
Current fit method = LINEAR REGRESSION		

Number	Minor principal stress (MPa)	Major principal stress (MPa)
1	1	45.199
2	3	61.162
3	6	87.471

<p>GRÁFICO: ENVOLVENTE MOHR-COULOMB</p> 	<p>FOTOGRAFÍA ROTURA</p>  <p> M1: Rotura por matriz M2: Rotura por matriz M3: Rotura por matriz </p>
<p>Elaborado por:</p> 	<p>Aprobado por:</p> 
<p>Ing. Jessica Reinoso Técnico Docente</p>	<p>Ing. Danny Barbano MSc. Director de Carrera de Ingeniería de Minas</p>



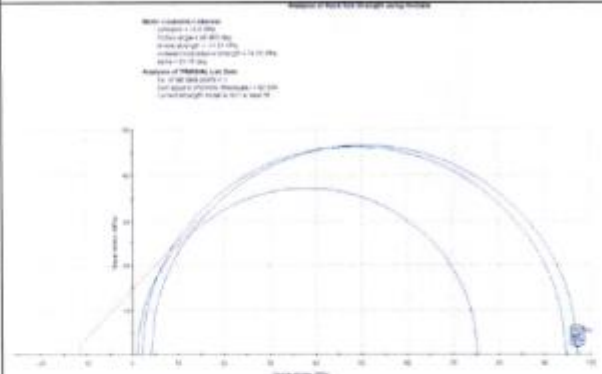



	RESULTADOS DE ENSAYOS TRIAXIALES EN ROCA LABORATORIO DE MECANICA DE ROCAS Y PETROGRAFIA - FIGEMPA Resumen Ejecutivo Universidad Central del Ecuador Facultad de Ingeniería en Geología, Minas, Petróleos y Ambiental	Código: SpC-ETx-001 Fecha: 2022-11-03 Estado: Entregado


ENSAYO TRIAXIAL EN ROCA No. 3

Código: LAB-CM-05
 Coordenadas UTM: 772118, 28488, 1804
 Ubicación: Cuerpo 3
 Litología: Mármol - Unidad Laurel
 Número de muestras: 3
 Densidad media de la roca: 23.19 kN/m³

RESULTADOS:

Mohr-Coulomb Criterion		
cohesion		14.6 MPa
friction angle		46.961 degrees
tensile strength		-11.51 MPa
uniaxial compressive strength		74.05 MPa
alpha		81.16 degrees
Lab Data		
Number of Tests		3
sum square of errors (Residuals)		92.988
Current fit method = LINEAR REGRESSION		
Number	Minor principal stress (MPa)	Major principal stress (MPa)
1	1	75.332
2	2	94.650
3	4	97.205

GRÁFICO: ENVOLVENTE MOHR-COULOMB	FOTOGRAFIA ROTURA
	 <p> M1: Rotura por matriz M2: Rotura por discontinuidad M3: Rotura por discontinuidad </p>
Elaborado por:	Aprobado por:
 Ing. Jessica Reinoso Técnico Docente	 Ing. Danny Burbano MSc Director de Carrera de Ingeniería de Minas

	RESULTADOS DE ENSAYOS TRIAXIALES EN ROCA LABORATORIO DE MECANICA DE ROCAS Y PETROGRAFIA - FIGEMPA Resúmen Ejecutivo Universidad Central del Ecuador	Código: SpC-ETx-001
	Facultad de Ingeniería en Geología, Minas, Petróleos y Ambiental	Fecha: 2022-11-03 Estado: Entregado

ENSAYO TRIAXIAL EN ROCA No. 4


Código: LAB-CM-06
 Coordenadas UTM: 772014, 28395, 1808
 Ubicación: Cuerpo 2
 Litología: Mármol - Unidad Laurel
 Número de muestras: 4
 Densidad media de la roca: 26.49 kN/m³

RESULTADOS:

Mohr-Coulomb Criterion		
cohesion		6.879 MPa
friction angle		48.028 degrees
tensile strength		-5.277 MPa
uniaxial compressive strength		35.87 MPa
alpha		81.63 degrees
Lab Data		
Number of Tests		4
sum square of errors (Residuals)		10.286
Current fit method = LINEAR REGRESSION		
Number	Minor principal stress (MPa)	Major principal stress (MPa)
1	1	43.92
2	2	51.133
3	4	62.498
4	1	40.297

<p>GRÁFICO: ENVOLVENTE MOHR-COULOMB</p> 	<p>FOTOGRAFÍA ROTURA</p>  <p> M1: Rotura por matriz M2: Rotura por matriz M3: Rotura por matriz M4: Rotura por matriz </p>
Elaborado por:  Ing. Jessica Reinoso Técnico Docente	Aprobado por:  Ing. Danny Burbano MSc. Director de Carrera de Ingeniería de Minas



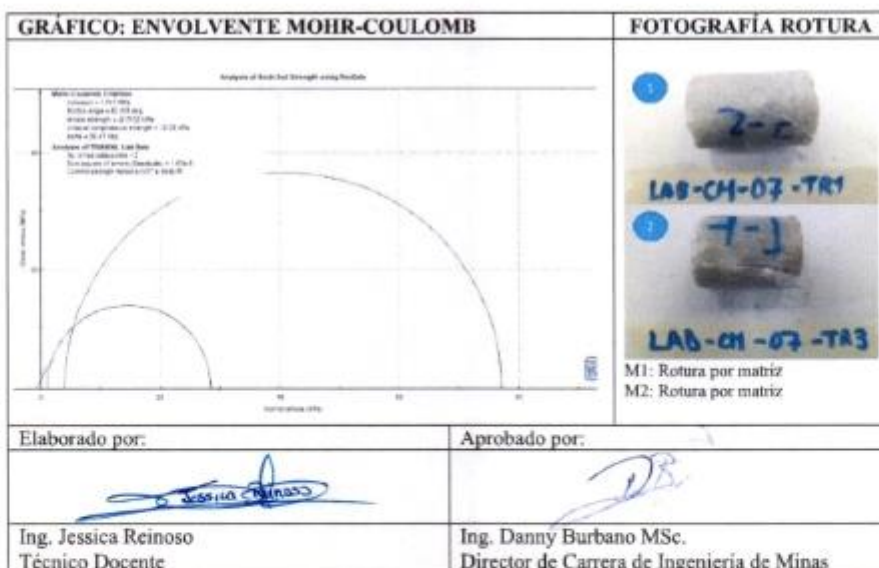
	RESULTADOS DE ENSAYOS TRIAXIALES EN ROCA LABORATORIO DE MECANICA DE ROCAS Y PETROGRAFIA - FIGEMPA Resumen Ejecutivo Universidad Central del Ecuador	Código: SpC-ETx-001
	Facultad de Ingeniería en Geología, Minas, Petróleos y Ambiental	Fecha: 2022-11-03 Estado: Entregado


ENSAYO TRIAXIAL EN ROCA No. 5

Código: LAB-CM-07
 Coordenadas UTM: 771970, 28363, 1807
 Ubicación: Cuerpo 2
 Litología: Mármol - Unidad Laurel
 Número de muestras: 2
 Densidad media de la roca: 26.43 kN/m³

RESULTADOS:

Mohr-Coulomb Criterion		
cohesion		1.517 MPa
friction angle		62.115 degrees
tensile strength		-0.7532 MPa
uniaxial compressive strength		12.22 MPa
alpha		86.47 degrees
Lab Data		
Number of Tests		2
sum square of errors (Residuals)		1.67e-6
Current fit method - LINEAR REGRESSION		
Number	Minor principal stress (MPa)	Major principal stress (MPa)
1	1	28.477
2	4	77.12



	RESULTADOS DE ENSAYOS TRIAXIALES EN ROCA LABORATORIO DE MECANICA DE ROCAS Y PETROGRAFIA - FIGEMPA Resumen Ejecutivo Universidad Central del Ecuador	Código: SpC-ETx-001
	Facultad de Ingeniería en Geología, Minas, Petróleos y Ambiental	Fecha: 2022-11-03 Estado: Entregado

ENSAYO TRIAXIAL EN ROCA No. 6

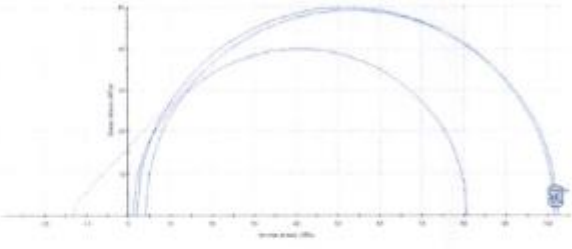

Código: LAB-CM-08
 Coordenadas UTM: 772136,28543,1778
 Ubicación: Cuerpo 3
 Litología: Mármol – Unidad Laurel
 Número de muestras: 3
 Densidad media de la roca: 26.54 kN/m³



RESULTADOS:

Mohr-Coulomb Criterion		
cohesion		16.103 MPa
friction angle		46.356 degrees
tensile strength		-12.9 MPa
uniaxial compressive strength		80.43 MPa
alpha		80.89 degrees


Lab Data		
Number of Tests		3
sum square of errors (Residuals)		110.197
Current fit method = LINEAR REGRESSION		

Number	Minor principal stress (MPa)	Major principal stress (MPa)
1	1	80.772
2	2	101.751
3	4	102.431

<p>GRÁFICO: ENVOLVENTE MOHR-COULOMB</p>  <p> Mohr-Coulomb Criterion cohesion = 16.103 MPa friction angle = 46.356 deg tensile strength = -12.9 MPa uniaxial compressive strength = 80.43 MPa alpha = 80.89 deg Method of Mohr-Coulomb No. of Tests = 3 Sum Square of Errors (Residuals) = 110.197 Current Fit Method = LINEAR REGRESSION </p>	<p>FOTOGRAFÍA ROTURA</p>  <p> M1: Rotura por matriz M2: Rotura por matriz M3: Rotura por matriz </p>
--	---

Elaborado por: 	Aprobado por: 
Ing. Jessica Reinoso Técnico Docente	Ing. Danny Burbano MSc. Director de Carrera de Ingeniería de Minas



	RESULTADOS DE ENSAYOS TRIAXIALES EN ROCA LABORATORIO DE MECANICA DE ROCAS Y PETROGRAFIA - FIGEMPA Resumen Ejecutivo Universidad Central del Ecuador Facultad de Ingeniería en Geología, Minas, Petróleos y Ambiental	Código: SpC-ETx-001 Fecha: 2022-11-03 Estado: Entregado



ENSAYO TRIAXIAL EN ROCA No. 7

Código: LAB-CM-09
 Coordenadas UTM: 772027, 28426, 1767
 Ubicación: Cuerpo 2
 Litología: Mármol - Unidad Laurel
 Número de muestras: 3
 Densidad media de la roca: 26.39 kN/m³

RESULTADOS:

Mohr-Coulomb Criterion		
cohesion		7.243 MPa
friction angle		47.845 degrees
tensile strength		-5.583 MPa
uniaxial compressive strength		37.59 MPa
alpha		81.55 degrees
Lab Data		
Number of Tests		3
sum square of errors (Residuals)		10.403
Current fit method = LINEAR REGRESSION		
Number	Minor principal stress (MPa)	Major principal stress (MPa)
1	1	42.591
2	2	53.633
3	4	63.649

<p>GRÁFICO: ENVOLVENTE MOHR-COULOMB</p> <p><small>Mohr-Coulomb Criterion cohesion = 7.243 MPa friction angle = 47.845 deg tensile strength = -5.583 MPa uniaxial compressive strength = 37.59 MPa alpha = 81.55 deg Mohr-Coulomb Lab Data No. of Tests = 3 sum square of errors (Residuals) = 10.403 Current fit method = LINEAR REGRESSION</small></p>	<p>FOTOGRAFÍA ROTURA</p> <p>M1: Rotura por matriz M2: Rotura por discontinuidad M3: Rotura por matriz</p>
---	--

Elaborado por:	Aprobado por:
	
Ing. Jessica Reinoso Técnico Docente	Ing. Danny Burbano MSc. Director de Carrera de Ingeniería de Minas



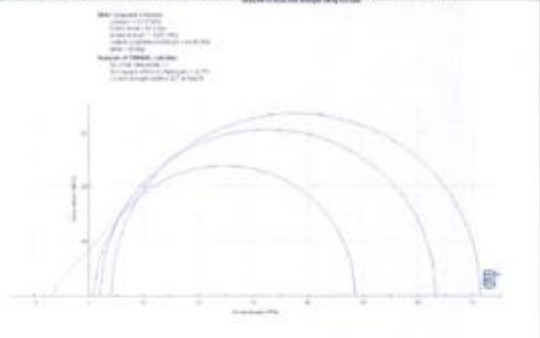



	RESULTADOS DE ENSAYOS TRIAXIALES EN ROCA LABORATORIO DE MECANICA DE ROCAS Y PETROGRAFIA - FIGEMPA Resumen Ejecutivo Universidad Central del Ecuador	Código: SpC-ETx-001
	Facultad de Ingeniería en Geología, Minas, Petróleos y Ambiental	Fecha: 2022-11-03 Estado: Entregado

ENSAYO TRIAXIAL EN ROCA No. 8


Código: LAB-CM-10
 Coordenadas UTM: 771988,28417, 1778
 Ubicación: Cuerpo 2
 Litología: Mármol – Unidad Laurel
 Número de muestras: 4
 Densidad media de la roca: 26,18 kN/m³

RESULTADOS:

Mohr-Coulomb Criterion		
cohesion		8.337 MPa
friction angle		48.9 degrees
tensile strength		-6.251 MPa
uniaxial compressive strength		44.48 MPa
alpha		82 degrees
Lab Data		
Number of Tests		3
sum square of errors (Residuals)		32.751
Current fit method = LINEAR REGRESSION		
Number	Minor principal stress (MPa)	Major principal stress (MPa)
1	1	48.535
2	2	63.298
3	4	71.411

<p>GRÁFICO: ENVOLVENTE MOHR-COULOMB</p> 	<p>FOTOGRAFÍA ROTURA</p>  <p>M1: Rotura por matriz M2: Rotura por matriz M3: Rotura por matriz M4: Rotura por matriz</p>
Elaborado por:	Aprobado por:
	
Ing. Jessica Reinoso Técnico Docente	Ing. Danny Burbano MSc. Director de Carrera de Ingeniería de Minas



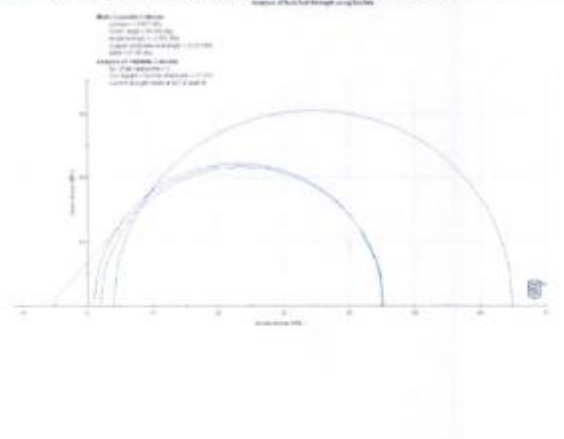

	RESULTADOS DE ENSAYOS TRIAXIALES EN ROCA LABORATORIO DE MECANICA DE ROCAS Y PETROGRAFIA - FIGEMPA Resumen Ejecutivo Universidad Central del Ecuador Facultad de Ingeniería en Geología, Minas, Petróleos y Ambiental	Código: SpC-ETx-001 Fecha: 2022-11-03 Estado: Entregado


ENSAYO TRIAXIAL EN ROCA No. 9

Código: LAB-CM-03
 Coordenadas UTM: 771938, 28352, 1799
 Ubicación: Cuerpo 2
 Litología: Mármol - Unidad Laurel
 Número de muestras: 3
 Densidad media de la roca: 24.59 kN/m³


RESULTADOS:

Mohr-Coulomb Criterion		
cohesion		6.607 MPa
friction angle		48.858 degrees
tensile strength		-4.959 MPa
uniaxial compressive strength		35.21 MPa
alpha		81.98 degrees
Lab Data		
Number of Tests		3
sum square of errors (Residuals)		27.250
Current fit method = LINEAR REGRESSION		
Number	Minor principal stress (MPa)	Major principal stress (MPa)
1	1	45.097
2	2	45.221
3	4	65.001

<p>GRÁFICO: ENVOLVENTE MOHR-COULOMB</p> 	<p>FOTOGRAFÍA ROTURA</p>  <p> M1: Rotura por matriz M2: Rotura por matriz M3: Rotura por matriz </p>
--	---

Elaborado por:	Aprobado por:
	
Ing. Jessica Reinoso Técnico Docente	Ing. Danny Burbano MSc. Director de Carrera de Ingeniería de Minas



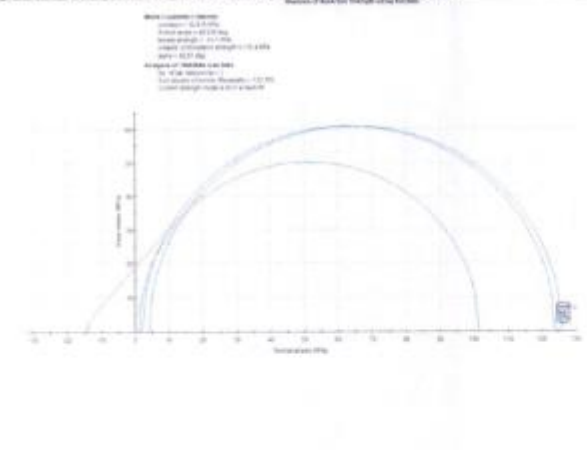



	RESULTADOS DE ENSAYOS TRIAXIALES EN ROCA LABORATORIO DE MECANICA DE ROCAS Y PETROGRAFIA - FIGEMPA Restamen Ejecutivo Universidad Central del Ecuador	Código: SpC-ETx-001 Fecha: 2022-11-03 Estado: Entregado
	Facultad de Ingeniería en Geología, Minas, Petróleos y Ambiental	

ENSAYO TRIAXIAL EN ROCA No. 10


Código: LAB-CM-011
 Coordenadas UTM: 772180, 28588, 1782
 Ubicación: Cuerpo 3
 Litología: Mármol – Unidad Laurel
 Número de muestras: 3
 Densidad media de la roca: 25.92 kN/m³

RESULTADOS:

Mohr-Coulomb Criterion		
cohesion		18.82 MPa
friction angle		48.918 degrees
tensile strength		-14.1 MPa
uniaxial compressive strength		100.4 MPa
alpha		82.01 degrees
Lab Data		
Number of Tests		3
sum square of errors (Residuals)		132.182
Current fit method = LINEAR REGRESSION		
Number	Minor principal stress (MPa)	Major principal stress (MPa)
1	1	101.424
2	2	123.91
3	4	125.864

<p>GRÁFICO: ENVOLVENTE MOHR-COULOMB</p> 	<p>FOTOGRAFÍA ROTURA</p>  <p> M1: Rotura por matriz M2: Rotura por matriz M3: Rotura por matriz </p>
Elaborado por:  Ing. Jessica Reinoso Técnico Docente	Aprobado por:  Ing. Danny Burbano MSc. Director de Carrera de Ingeniería de Minas



	RESULTADOS DE ENSAYOS TRIAXIALES EN ROCA LABORATORIO DE MECANICA DE ROCAS Y PETROGRAFIA - FIGEMPA Resumen Ejecutivo Universidad Central del Ecuador	Código: SpC-ETx-001
	Facultad de Ingeniería en Geología, Minas, Petróleos y Ambiental	Fecha: 2022-11-03 Estado: Entregado

ENSAYO TRIAXIAL EN ROCA No. 11

Código: LAB-CM-012
 Coordenadas UTM: 772077, 28646, 1756
 Ubicación: Cuerpo 3
 Litología: Mármol – Unidad Laurel
 Número de muestras: 4
 Densidad media de la roca: 25.61 kN/m³

RESULTADOS:


Mohr-Coulomb Criterion		
cohesion		17.046 MPa
friction angle		42.94 degrees
tensile strength		-14.84 MPa
uniaxial compressive strength		78.29 MPa
alpha		79.26 degrees

Lab Data		
Number of Tests		3
sum square of errors (Residuals)		189.887
Current fit method = LINEAR REGRESSION		

Number	Minor principal stress (MPa)	Major principal stress (MPa)
1	1	78.968
2	2	95.741
3	4	97.09

<p>GRÁFICO: ENVOLVENTE MOHR-COULOMB</p> 	<p>FOTOGRAFÍA ROTURA</p>  <p> M1: Rotura por matriz M2: Rotura por matriz M3: Rotura por matriz M4: Rotura por matriz </p>
Elaborado por:  Ing. Jessica Reinoso Técnico Docente	Aprobado por:  Ing. Danny Burbano MSc. Director de Carrera de Ingeniería de Minas



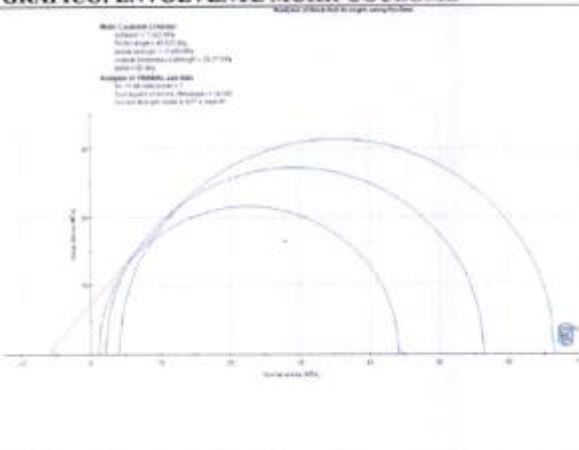



	RESULTADOS DE ENSAYOS TRIAXIALES EN ROCA LABORATORIO DE MECANICA DE ROCAS Y PETROGRAFIA - FIGEMPA Resumen Ejecutivo Universidad Central del Ecuador Facultad de Ingeniería en Geología, Minas, Petróleos y Ambiental	Código: SpC-ETx-001 Fecha: 2022-11-03 Estado: Entregado

ENSAYO TRIAXIAL EN ROCA No. 12


Código: LAB-CM-013
 Coordenadas UTM: 772011, 28492, 1744
 Ubicación: Cuerpo 2
 Litología: Mármol - Unidad Laurel
 Número de muestras: 3
 Densidad media de la roca: 26.29 kN/m³

RESULTADOS:

Mohr-Coulomb Criterion		
cohesion		7.332 MPa
friction angle		48.905 degrees
tensile strength		-5.489 MPa
uniaxial compressive strength		39.07 MPa
alpha		82.00 degrees
Lab Data		
Number of Tests		3
sum square of errors (Residuals)		14.545
Current fit method = LINEAR REGRESSION		
Number	Minor principal stress (MPa)	Major principal stress (MPa)
1	1	44.149
2	2	56.363
3	4	66.521

<p>GRÁFICO: ENVOLVENTE MOHR-COULOMB</p> 	<p>FOTOGRAFÍA ROTURA</p>  <p> M1: Rotura por matriz M2: Rotura por discontinuidad M3: Rotura por matriz </p>
Elaborado por:	Aprobado por:
	
Ing. Jessica Reinoso Técnico Docente	Ing. Danny Burbano MSc. Director de Carrera de Ingeniería de Minas



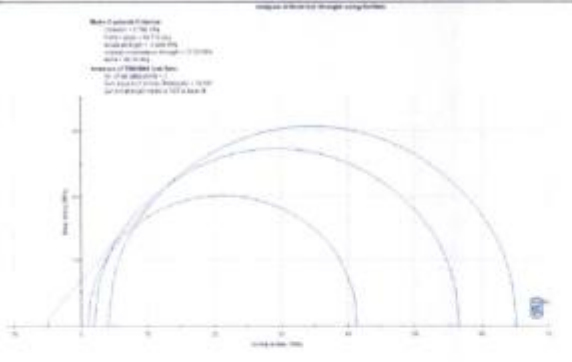
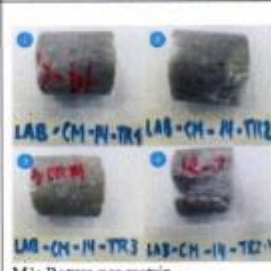
	RESULTADOS DE ENSAYOS TRIAXIALES EN ROCA LABORATORIO DE MECANICA DE ROCAS Y PETROGRAFIA - FIGEMPA Resumen Ejecutivo Universidad Central del Ecuador Facultad de Ingeniería en Geología, Minas, Petróleos y Ambiental	Código: SpC-ETx-001 Fecha: 2022-11-03 Estado: Entregado



ENSAYO TRIAXIAL EN ROCA No. 13

Código: LAB-CM-014
 Coordenadas UTM: 771899, 28450, 1746
 Ubicación: Cuerpo 2
 Litología: Mármol – Unidad Laurel
 Número de muestras: 4
 Densidad media de la roca: 22.88 kN/m³


RESULTADOS:

Mohr-Coulomb Criterion		
cohesion		6.796 MPa
friction angle		49.712 degrees
tensile strength		-4.986 MPa
uniaxial compressive strength		37.05 MPa
alpha		82.34 degrees
Lab Data		
Number of Tests		3
sum square of errors (Residuals)		34.845
Current fit method = LINEAR REGRESSION		
Number	Minor principal stress (MPa)	Major principal stress (MPa)
1	1	60.332
2	2	67.652
3	4	98.205

<p>GRÁFICO: ENVOLVENTE MOHR-COULOMB</p> 	<p>FOTOGRAFÍA ROTURA</p>  <p>M1: Rotura por matriz M2: Rotura por matriz M3: Rotura por matriz M4: Rotura por matriz</p>
--	--

Elaborado por:  Ing. Jessica Reinoso Técnico Docente	Aprobado por:  Ing. Danny Burbano MSc. Director de Carrera de Ingeniería de Minas
--	--



	RESULTADOS DE ENSAYOS TRIAXIALES EN ROCA LABORATORIO DE MECANICA DE ROCAS Y PETROGRAFIA - FIGEMPA Resumen Ejecutivo Universidad Central del Ecuador	Código: SpC-ETx-001
	Facultad de Ingeniería en Geología, Minas, Petróleos y Ambiental	Fecha: 2022-11-03 Estado: Entregado

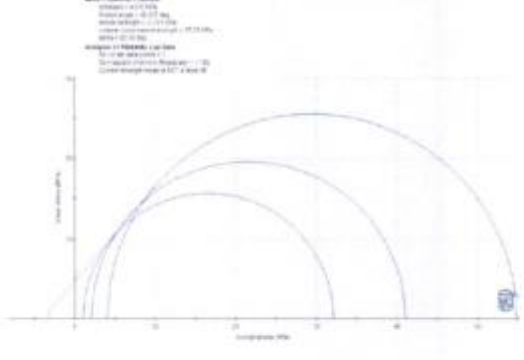
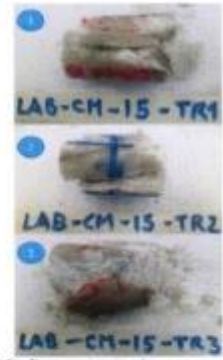
ENSAYO TRIAXIAL EN ROCA No. 14



Código: LAB-CM-015
Coordenadas UTM: 771807, 28394, 1738
Ubicación: Cuerpo 1
Litología: Mármol - Unidad Laurel
Número de muestras: 3
Densidad media de la roca: 24.49 kN/m³
RESULTADOS:

Mohr-Coulomb Criterion		
cohesion		4.611 MPa
friction angle		49.837 degrees
tensile strength		-3.371 MPa
uniaxial compressive strength		25.23 MPa
alpha		82.39 degrees


Lab Data		
Number of Tests		3
sum square of errors (Residuals)		1.182
Current fit method - LINEAR REGRESSION		

Number	Minor principal stress (MPa)	Major principal stress (MPa)
1	1	32.129
2	2	41.064
3	4	54.866

<p>GRÁFICO: ENVOLVENTE MOHR-COULOMB</p> 	<p>FOTOGRAFÍA ROTURA</p>  <p> M1: Rotura por matriz M2: Rotura por matriz M3: Rotura por matriz </p>
--	---

Elaborado por:	Aprobado por:
	
Ing. Jessica Reinoso Técnico Docente	Ing. Danny Burbano MSc. Director de Carrera de Ingeniería de Minas

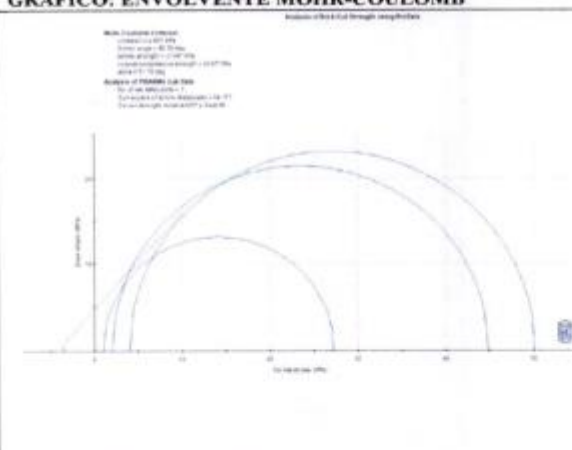
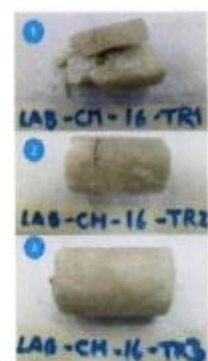

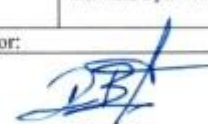


	RESULTADOS DE ENSAYOS TRIAXIALES EN ROCA LABORATORIO DE MECANICA DE ROCAS Y PETROGRAFIA - FIGEMPA Resumen Ejecutivo Universidad Central del Ecuador Facultad de Ingeniería en Geología, Minas, Petróleos y Ambiental	Código: SpC-ETx-001 Fecha: 2023-11-03 Estado: Entregado


ENSAYO TRIAXIAL EN ROCA No. 15

Código: LAB-CM-016
 Coordenadas UTM: 771790, 28301, 1813
 Ubicación: Cuerpo 1
 Litología: Mármol - Unidad Laurel
 Número de muestras: 3
 Densidad media de la roca: 24.69 kN/m³
RESULTADOS:

Mohr-Coulomb Criterion		
cohesion		4.667 MPa
friction angle		48.39 degrees
tensile strength		-3.547 MPa
uniaxial compressive strength		24.57 MPa
alpha		84.16 degrees
Lab Data		
Number of Tests		3
sum square of errors (Residuals)		34.477
Current fit method - LINEAR REGRESSION		
Number	Minor principal stress (MPa)	Major principal stress (MPa)
1	1	27.21
2	2	44.84
3	4	50.13

GRÁFICO: ENVOLVENTE MOHR-COULOMB	FOTOGRAFÍA ROTURA
	 <p> M1: Rotura por matriz M2: Rotura por matriz M3: Rotura por matriz </p>
Elaborado por:  Ing. Jessica Reinoso Técnico Docente	Aprobado por:  Ing. Danny Burbano MSc. Director de Carrera de Ingeniería de Minas



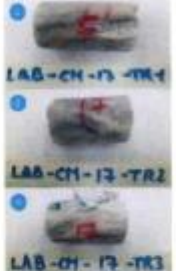


	RESULTADOS DE ENSAYOS TRIAXIALES EN ROCA LABORATORIO DE MECANICA DE ROCAS Y PETROGRAFIA - FIGEMPA Resumen Ejecutivo Universidad Central del Ecuador	Código: SpC-ETx-001
	Facultad de Ingeniería en Geología, Minas, Petróleos y Ambiental	Fecha: 2022-11-03 Estado: Entregado

ENSAYO TRIAXIAL EN ROCA No. 16

Código: LAB-CM-017
 Coordenadas UTM: 771851, 28288, 1807
 Ubicación: Cuerpo 1
 Litología: Mármol – Unidad Laurel
 Número de muestras: 3
 Densidad media de la roca: 26.98 kN/m³

RESULTADOS:

Mohr-Coulomb Criterion		
cohesion		5.081 MPa
friction angle		48.481 degrees
tensile strength		-5.11 MPa
uniaxial compressive strength		26.75 MPa
alpha		48.61 degrees
Lab Data		
Number of Tests		3
sum square of errors (Residuals)		1.086
Current fit method = LINEAR REGRESSION		
Number	Minor principal stress (MPa)	Major principal stress (MPa)
1	1	13.936
2	2	23.018
3	4	37.305

GRÁFICO: ENVOLVENTE MOHR-COULOMB	FOTOGRAFÍA ROTURA
 <p> Mohr-Coulomb Criterion cohesion = 5.081 MPa friction angle = 48.481 deg tensile strength = -5.11 MPa uniaxial compressive strength = 26.75 MPa alpha = 48.61 deg Analysis of TRIAXIAL LAB DATA No. of test data points = 3 Fit method = Linear Regression Current strength index = 3.07 to base 10 </p>	 <p> M1: Rotura por discontinuidad M2: Rotura por matriz M3: Rotura por matriz </p>
Elaborado por: 	Aprobado por: 
Ing. Jessica Reinoso Técnico Docente	Ing. Danny Burbano Msc. Director de Carrera de Ingeniería de Minas



Anexo 3: Ensayos de Compresión Simple con Módulos de elasticidad

	RESULTADOS DE COMPRESION SIMPLE CON MODULOS ELASTICOS LABORATORIO DE MECANICA DE ROCAS Y PETROGRAFIA - FIGEMPA Resumen Ejecutivo	Código: SpC-CSM-001
	Universidad Central del Ecuador Facultad de Ingeniería en Geología, Minas, Petróleos y Ambiental	Fecha: 2022-11-10 Estado: Entregado

ENSAYO DE COMPRESIÓN SIMPLE CON MÓDULOS ELÁSTICOS EN ROCA NO. 1

Código: LAB-CM-02
 Coordenadas UTM: 772037, 28414, 1798
 Ubicación: Cuerpo 2
 Litología: Mármol - Unidad Laurel
 Densidad media de la roca: 21.07 kN/m³

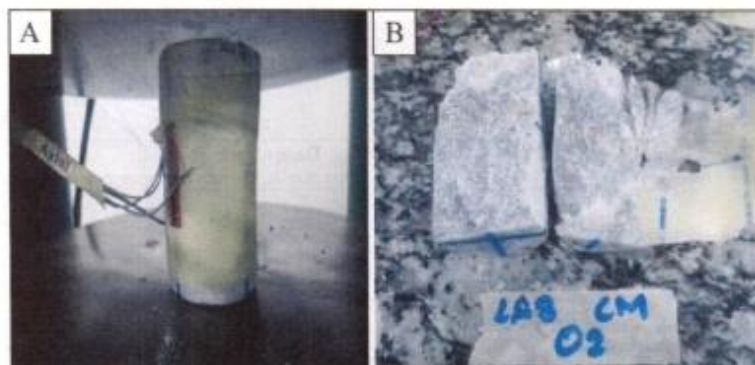
RESULTADOS:

Parámetro	Valor	Unidades
Gradiente	0.139	[MPa/s]
Diámetro (D)	37.00	[mm]
Altura (L)	82.00	[mm]
Área	1075.21	[mm ²]
Carga Máxima	30.621	[kN]
Resistencia Máxima	28.479	[MPa]
Módulo de Young secante	48.226	[GPa]
Coefficiente de Poisson	0.19	

CURVA ESFUERZO VS DEFORMACIÓN UNITARIA


CARGA [kN]	Esfuerzo [MPa]	Def. Axial [μm]	Def. Lateral [μm]
0.00	0.00	0.00	0.00
5.00	4.65	140.00	-28.65
10.00	9.30	281.49	-54.47
15.00	13.95	450.55	-67.85
20.00	18.60	470.56	-74.98
25.00	23.25	493.44	-81.57
30.62	28.48	590.51	-114.05
29.65	27.58	642.56	-150.03

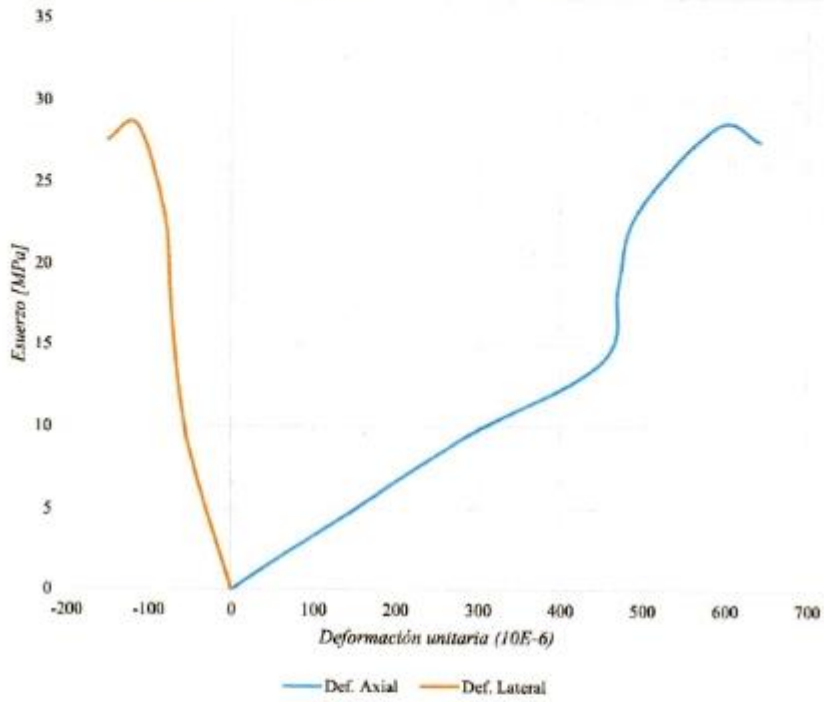
REGISTRO FOTOGRÁFICO:





A) Muestra antes de la rotura


B) Muestra después de la rotura

	RESULTADOS DE COMPRESION SIMPLE CON MODULOS ELASTICOS LABORATORIO DE MECANICA DE ROCAS Y PETROGRAFIA - FIGEMPA Resumen Ejecutivo	Código: SpC-CSM-001
	Universidad Central del Ecuador Facultad de Ingeniería en Geología, Minas, Petróleos y Ambiental	Fecha: 2022-11-10 Estado: Entregado



Elaborado por:	Aprobado por:
	
Ing. Jessica Reinoso Técnico Docente	Ing. Danny Burbano MSc. Director de Carrera de Ingeniería de Minas



	RESULTADOS DE COMPRESIÓN SIMPLE CON MÓDULOS ELÁSTICOS LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS Y PETROGRAFÍA - FIGEMPA Resumen Ejecutivo	Código: SpC-CSM-001
	Universidad Central del Ecuador Facultad de Ingeniería en Geología, Minas, Petróleos y Ambiental	Fecha: 2022-11-10 Estado: Entregado

ENSAYO DE COMPRESIÓN SIMPLE CON MÓDULOS ELÁSTICOS EN ROCA NO. 2

Código: LAB-CM-03

Coordenadas UTM: 771938, 28352, 1799

Ubicación: Cuerpo 2

Litología: Mármol – Unidad Laurel

Densidad media de la roca: 24.59 kN/m³

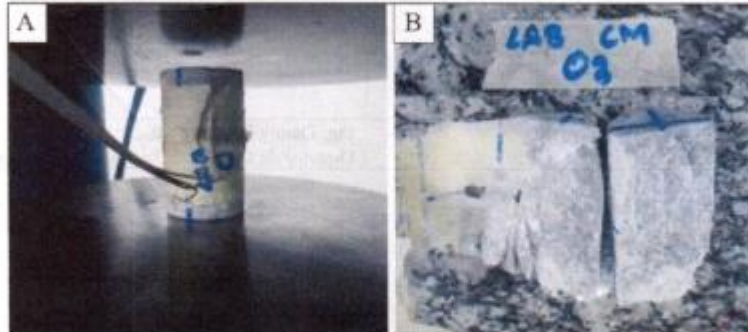
RESULTADOS:

Parámetro	Valor	Unidades
Gradiente	0.139	[MPa/s]
Diámetro (D)	37.00	[mm]
Altura (L)	82.00	[mm]
Área	1075.21	[mm ²]
Carga Máxima	32.931	[kN]
Resistencia Máxima	30.627	[MPa]
Módulo de Young secante	30.617	[GPa]
Coefficiente de Poisson	0.25	

CURVA ESFUERZO VS DEFORMACIÓN UNITARIA

CARGA [kN]	Esfuerzo [MPa]	Def. Axial [µε]	Def. Lateral [µε]
0.00	0.00	0.00	0.00
5.00	4.65	131.21	-60.21
10.00	9.30	247.65	-80.46
15.00	13.95	356.48	-100.37
20.00	18.60	450.47	-150.00
25.00	23.25	650.25	-200.00
30.00	27.90	800.20	-210.00
32.93	30.63	1000.33	-250.08
30.74	28.59	1500.11	-574.89

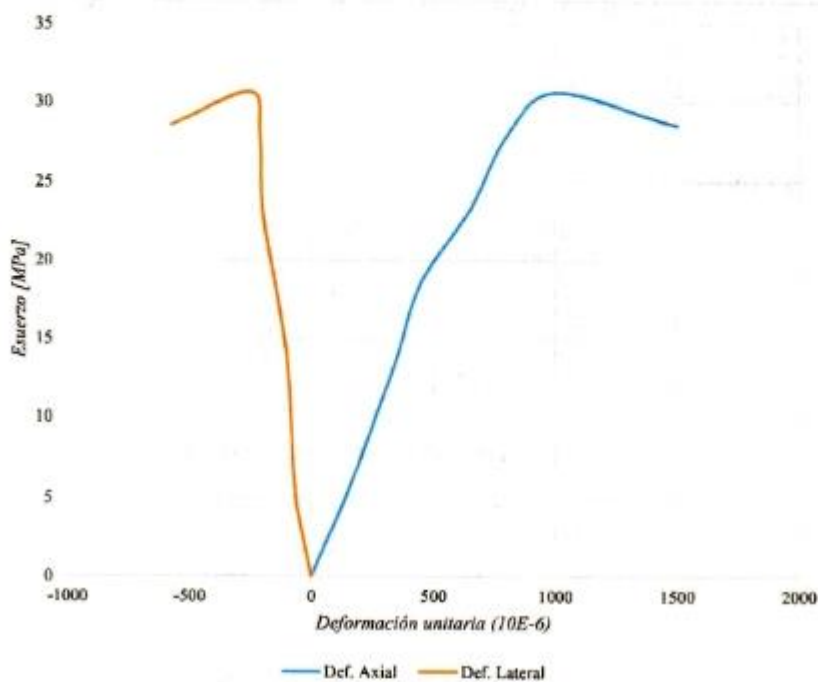
REGISTRO FOTOGRÁFICO:





A) Muestra antes de la rotura

B) Muestra después de la rotura

	RESULTADOS DE COMPRESION SIMPLE CON MODULOS ELASTICOS LABORATORIO DE MECANICA DE ROCAS Y PETROGRAFIA - FIGEMPA Resumen Ejecutivo	Código: SpC-CSM-001
	Universidad Central del Ecuador Facultad de Ingeniería en Geología, Minas, Petróleos y Ambiental	Fecha: 2022-11-10 Estado: Entregado



Elaborado por:	Aprobado por:
	
Ing. Jessica Reinoso Técnico Docente	Ing. Danny Burbano MSc. Director de Carrera de Ingeniería de Minas



	RESULTADOS DE COMPRESIÓN SIMPLE CON MÓDULOS ELÁSTICOS LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS Y PETROGRAFÍA - FIGEMPA Resumen Ejecutivo	Código: SpC-CSM-001
	Universidad Central del Ecuador Facultad de Ingeniería en Geología, Minas, Petróleos y Ambiental	Fecha: 2022-11-10 Estado: Entregado

ENSAYO DE COMPRESIÓN SIMPLE CON MÓDULOS ELÁSTICOS EN ROCA NO. 3

Código: LAB-CM-04

Coordenadas UTM: 772106, 28485

Ubicación: Cuerpo 3

Litología: Mármol – Unidad Laurel

Densidad media de la roca: 25.21 kN/m³

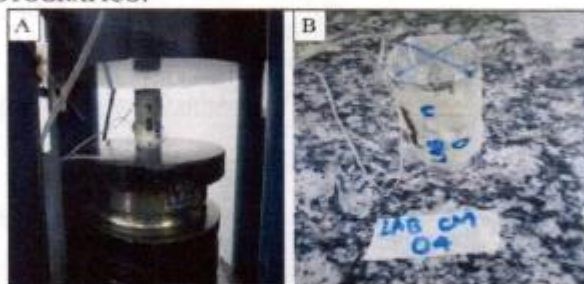
RESULTADOS:

Parámetro	Valor	Unidades
Gradiente	0.139	[MPa/s]
Diámetro (D)	37.00	[mm]
Altura (L)	82.00	[mm]
Área	1075.21	[mm ²]
Carga Máxima	61.161	[kN]
Resistencia Máxima	56.876	[MPa]
Módulo de Young secante	29.431	[GPa]
Coefficiente de Poisson	0.18	

CURVA ESFUERZO VS DEFORMACIÓN UNITARIA

CARGA [kN]	Esfuerzo [MPa]	Def. Axial [μs]	Def. Lateral [μs]
0.00	0.00	0.00	0.00
5.00	4.65	37.81	-6.50
10.00	9.30	80.74	-14.25
15.00	13.95	130.14	-30.37
20.00	18.60	209.98	-65.37
25.00	23.25	319.91	-110.13
30.00	27.90	500.30	-160.37
35.00	32.55	710.87	-200.54
40.00	37.20	1049.88	-209.87
45.00	41.85	1200.41	-219.90
50.00	46.50	1400.60	-228.21
55.00	51.15	1600.54	-250.08
61.16	56.88	1932.64	-347.88
51.00	47.43	2400.02	-600.19

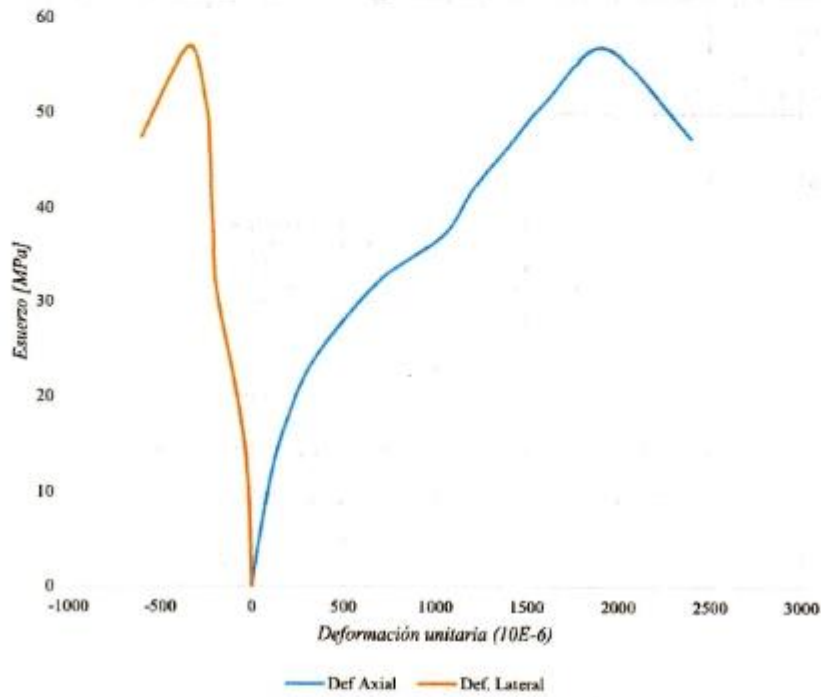
REGISTRO FOTOGRÁFICO:


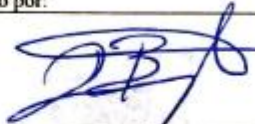


A) Muestra antes de la rotura

B) Muestra después de la rotura

	RESULTADOS DE COMPRESIÓN SIMPLE CON MODULOS ELASTICOS LABORATORIO DE MECANICA DE ROCAS Y PETROGRAFIA - FIGEMPA Resumen Ejecutivo	Código: SpC-CSM-001
	Universidad Central del Ecuador Facultad de Ingeniería en Geología, Minas, Petróleos y Ambiental	Fecha: 2022-11-10 Estado: Entregado



Elaborado por:	Aprobado por:
	
Ing. Jessica Reinoso Técnico Docente	Ing. Danny Burbano MSc Director de Carrera de Ingeniería de Minas



	RESULTADOS DE COMPRESIÓN SIMPLE CON MÓDULOS ELÁSTICOS LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS Y PETROGRAFÍA - FIGEMPA Resumen Ejecutivo Universidad Central del Ecuador	Código: SpC-CSM-001
	Facultad de Ingeniería en Geología, Minas, Petróleos y Ambiental	Fecha: 2022-11-10 Estado: Entregado

ENSAYO DE COMPRESIÓN SIMPLE CON MÓDULOS ELÁSTICOS EN ROCA NO. 4

Código: LAB-CM-05

Coordenadas UTM: 772118, 28488, 1804

Ubicación: Cuerpo 3

Litología: Mármol - Unidad Laurel

Densidad media de la roca: 23.19 kN/m³

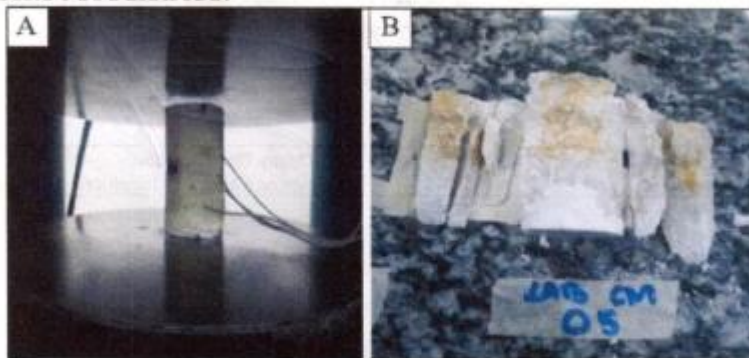
RESULTADOS:

Parámetro	Valor	Unidades
Gradiente	0.139	[MPa/s]
Diámetro (D)	37.00	[mm]
Altura (L)	82.00	[mm]
Área	1075.21	[mm ²]
Carga Máxima	78.324	[kN]
Resistencia Máxima	72.845	[MPa]
Módulo de Young secante	7.515	[GPa]
Coefficiente de Poisson	0.15	

CURVA ESFUERZO VS DEFORMACIÓN UNITARIA

CARGA [kN]	Esfuerzo [MPa]	Def. Axial [µε]	Def. Lateral [µε]
0.00	0.00	0.00	0.00
10.00	9.30	58.55	-8.99
20.00	18.60	152.69	-20.69
30.00	27.90	451.70	-30.62
40.00	37.20	998.46	-80.61
50.00	46.50	1702.70	-240.04
60.00	55.80	2798.68	-557.93
70.00	65.10	4703.69	-896.74
78.32	72.85	9693.28	-1453.99
66.69	62.03	11654.99	-2500.98

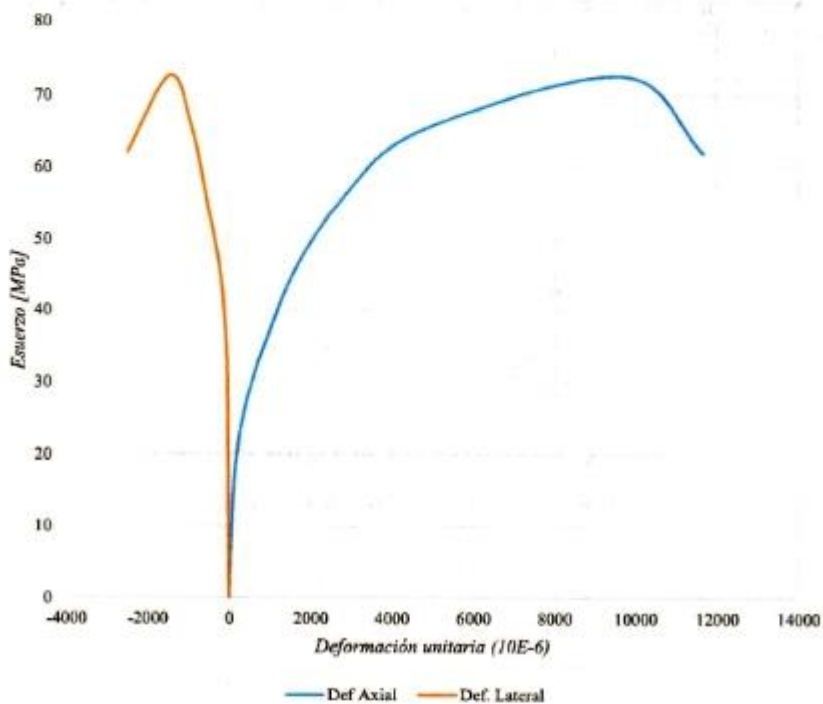
REGISTRO FOTOGRÁFICO:


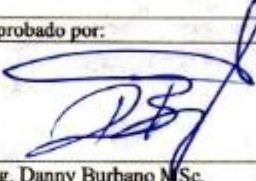


A) Muestra antes de la rotura

B) Muestra después de la rotura

	RESULTADOS DE COMPRESION SIMPLE CON MODULOS ELASTICOS LABORATORIO DE MECANICA DE ROCAS Y PETROGRAFIA - FIGEMPA Resumen Ejecutivo	Código: SpC-CSM-001
	Universidad Central del Ecuador Facultad de Ingeniería en Geología, Minas, Petróleos y Ambiental	Fecha: 2022-11-10 Estado: Entregado



Elaborado por: 	Aprobado por: 
Ing. Jessica Reinoso Técnico Docente	Ing. Danny Burbano M.Sc. Director de Carrera de Ingeniería de Minas



	RESULTADOS DE COMPRESIÓN SIMPLE CON MÓDULOS ELÁSTICOS LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS Y PETROGRAFÍA - FIGEMPA Resumen Ejecutivo Universidad Central del Ecuador	Código: SpC-CSM-001
	Facultad de Ingeniería en Geología, Minas, Petróleos y Ambiental	Fecha: 2022-11-10 Estado: Entregado

ENSAYO DE COMPRESIÓN SIMPLE CON MÓDULOS ELÁSTICOS EN ROCA NO. 5

Código: LAB-CM-06

Coordenadas UTM: 772014, 28395, 1808

Ubicación: Cuerpo 2

Litología: Mármol - Unidad Laurel

Densidad media de la roca: 26,49 kN/m³

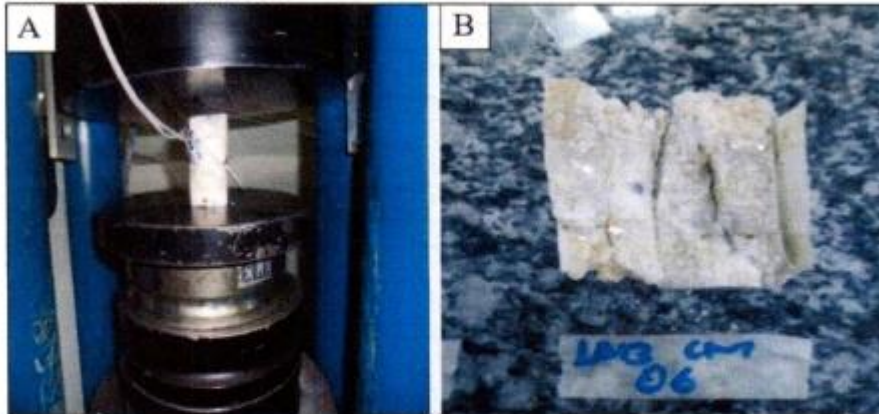
RESULTADOS:

Parámetro	Valor	Unidades
Gradiente	0.139	[MPa/s]
Diámetro (D)	37.00	[mm]
Altura (L)	82.00	[mm]
Área	1075.21	[mm ²]
Carga Máxima	17.971	[kN]
Resistencia Máxima	16.715	[MPa]
Módulo de Young secante	49.304	[GPa]
Coefficiente de Poisson	0.25	

CURVA ESFUERZO VS DEFORMACIÓN UNITARIA

CARGA [kN]	Esfuerzo [MPa]	Def. Axial [με]	Def. Lateral [με]
0.00	0.00	0.00	0.00
5.00	4.65	158.36	-38.85
10.00	9.30	306.54	-75.12
15.00	13.95	325.87	-78.41
17.97	16.72	339.02	-84.75
16.00	14.88	445.69	-197.54

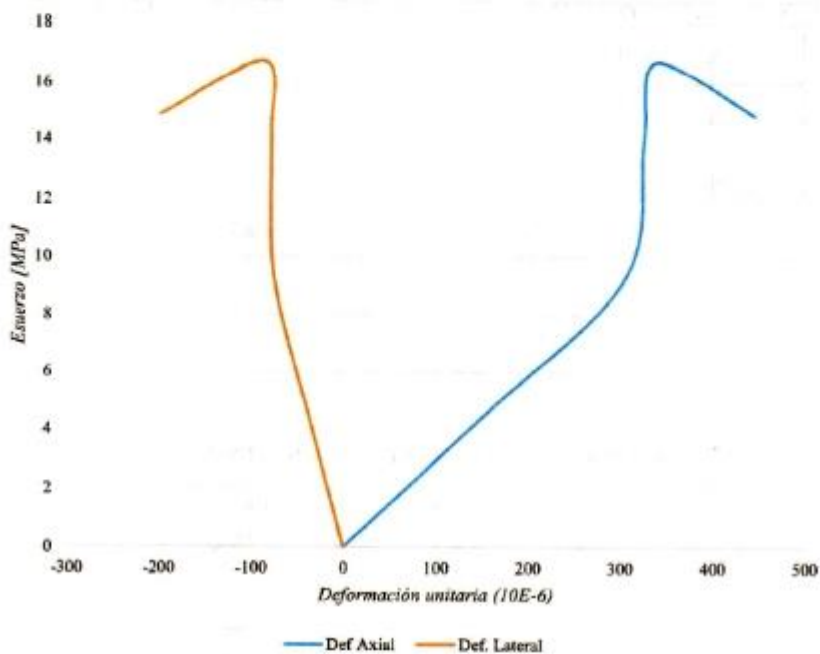
REGISTRO FOTOGRÁFICO:



A) Muestra antes de la rotura

B) Muestra después de la rotura

	RESULTADOS DE COMPRESION SIMPLE CON MODULOS ELASTICOS LABORATORIO DE MECANICA DE ROCAS Y PETROGRAFIA - FIGEMPA Resumen Ejecutivo	Código: SpC-CSM-001
	Universidad Central del Ecuador Facultad de Ingeniería en Geología, Minas, Petróleos y Ambiental	Fecha: 2022-11-10 Estado: Entregado



Elaborado por:	Aprobado por:
	
Ing. Jessica Reinoso Técnico Docente	Ing. Danny Burbano MSc. Director de Carrera de Ingeniería de Minas



	RESULTADOS DE COMPRESIÓN SIMPLE CON MÓDULOS ELÁSTICOS LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS Y PETROGRAFÍA - FIGEMPA Resumen Ejecutivo	Código: SpC-CSM-001
	Universidad Central del Ecuador Facultad de Ingeniería en Geología, Minas, Petróleos y Ambiental	Fecha: 2022-11-10 Estado: Entregado

ENSAYO DE COMPRESIÓN SIMPLE CON MÓDULOS ELÁSTICOS EN ROCA NO. 6

Código: LAB-CM-07

Coordenadas UTM: 771970, 28363, 1807

Ubicación: Cuerpo 2

Litología: Mármol - Unidad Laurel

Densidad media de la roca: 26.43 kN/m³

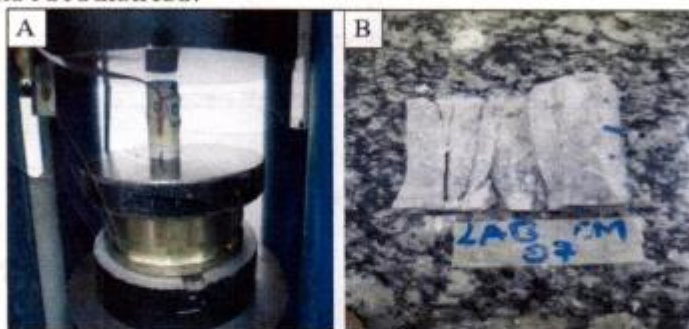
RESULTADOS:

Parámetro	Valor	Unidades
Gradiente	0.139	[MPa/s]
Diámetro (D)	37.00	[mm]
Altura (L)	82.00	[mm]
Área	1075.21	[mm ²]
Carga Máxima	28.938	[kN]
Resistencia Máxima	26.914	[MPa]
Módulo de Young secante	9.896	[GPa]
Coefficiente de Poisson	0.25	

CURVA ESFUERZO VS DEFORMACIÓN UNITARIA

CARGA [kN]	Esfuerzo [MPa]	Def. Axial [μe]	Def. Lateral [μe]
0.00	0.00	0.00	0.00
5.00	4.65	105.74	-27.65
10.00	9.30	289.29	-71.47
15.00	13.95	599.65	-208.86
20.00	18.60	1105.75	-356.95
28.94	26.91	2721.34	-670.34
26.00	24.18	3100.42	-1000.05

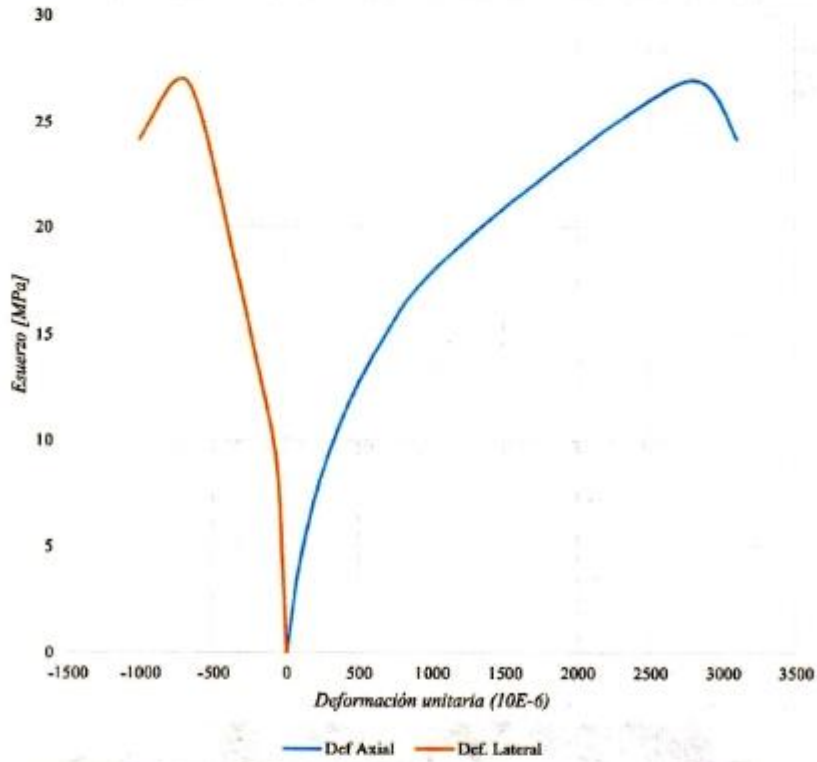
REGISTRO FOTOGRÁFICO:





A) Muestra antes de la rotura

B) Muestra después de la rotura

	RESULTADOS DE COMPRESION SIMPLE CON MODULOS ELASTICOS LABORATORIO DE MECANICA DE ROCAS Y PETROGRAFIA - FIGEMPA Resumen Ejecutivo	Código: SpC-CSM-001
	Universidad Central del Ecuador Facultad de Ingeniería en Geología, Minas, Petróleos y Ambiental	Fecha: 2023-11-10 Estado: Entregado



Elaborado por:	Aprobado por:
	
Ing. Jessica Reinoso Técnico Docente	Ing. Danny Burbano MSc. Director de Carrera de Ingeniería de Minas



	RESULTADOS DE COMPRESIÓN SIMPLE CON MÓDULOS ELÁSTICOS LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS Y PETROGRAFÍA - FIGEMPA Resumen Ejecutivo Universidad Central del Ecuador	Código: SpC-CSM-001 Fecha: 2022-11-10 Estado: Entregado
	Facultad de Ingeniería en Geología, Minas, Petróleos y Ambiental	

ENSAYO DE COMPRESIÓN SIMPLE CON MÓDULOS ELÁSTICOS EN ROCA NO. 7

Código: LAB-CM-08

Coordenadas UTM: 772136,28543,1778

Litología: Mármol - Unidad Laurel

Densidad media de la roca: 26.54 kN/m³

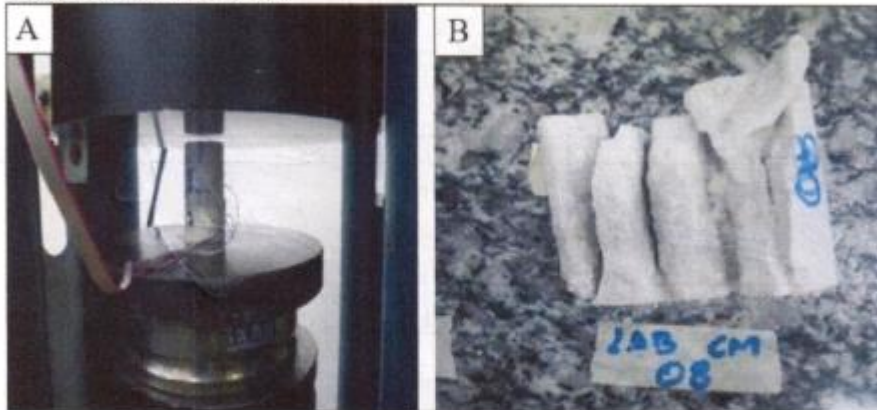
RESULTADOS:

Parámetro	Valor	Unidades
Gradiente	0.139	[MPa/s]
Diámetro (D)	37.00	[mm]
Altura (L)	82.00	[mm]
Área	1075.21	[mm ²]
Carga Máxima	44.855	[kN]
Resistencia Máxima	41.718	[MPa]
Módulo de Young secante	35.749	[GPa]
Coefficiente de Poisson	0.18	

CURVA ESFUERZO VS DEFORMACIÓN UNITARIA


CARGA [kN]	Esfuerzo [MPa]	Def. Axial [µε]	Def. Lateral [µε]
0.00	0.00	0.00	0.00
10.00	9.30	142.11	-25.25
20.00	18.60	323.29	-96.48
30.00	27.90	579.65	-144.36
44.86	41.72	1166.97	-210.05
40.00	37.20	1748.58	-412.15

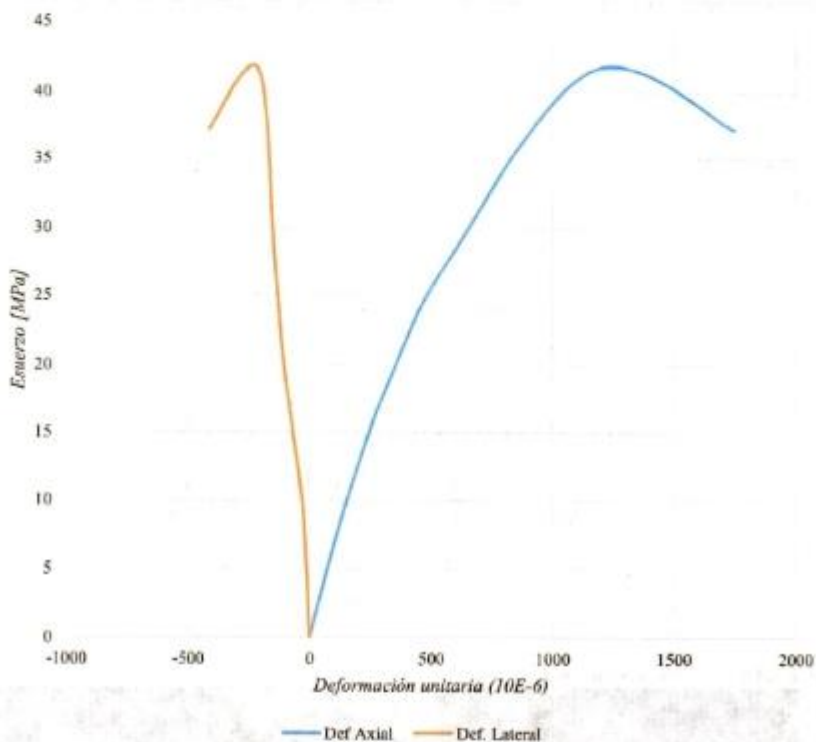
REGISTRO FOTOGRÁFICO:





A) Muestra antes de la rotura

B) Muestra después de la rotura

	RESULTADOS DE COMPRESION SIMPLE CON MODULOS ELASTICOS LABORATORIO DE MECANICA DE ROCAS Y PETROGRAFIA - FIGEMPA Resumen Ejecutivo	Código: SpC-CSM-001
	Universidad Central del Ecuador Facultad de Ingeniería en Geología, Minas, Petróleos y Ambiental	Fecha: 2022-11-10 Estado: Entregado



Elaborado por:	Aprobado por:
	
Ing. Jessica Reinoso Técnico Docente	Ing. Danny Burbano MSc. Director de Carrera de Ingeniería de Minas



	RESULTADOS DE COMPRESIÓN SIMPLE CON MÓDULOS ELÁSTICOS LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS Y PETROGRAFÍA - FIGEMPA Resumen Ejecutivo	Código: SpC-CSM-001
	Universidad Central del Ecuador Facultad de Ingeniería en Geología, Minas, Petróleos y Ambiental	Fecha: 2022-11-10 Estado: Entregado

ENSAYO DE COMPRESIÓN SIMPLE CON MÓDULOS ELÁSTICOS EN ROCA NO. 8

Código: LAB-CM-09
 Coordenadas UTM: 772027, 28426, 1767
 Ubicación: Cuerpo 2
 Litología: Mármol - Unidad Laurel
 Densidad media de la roca: 26.39 kN/m³

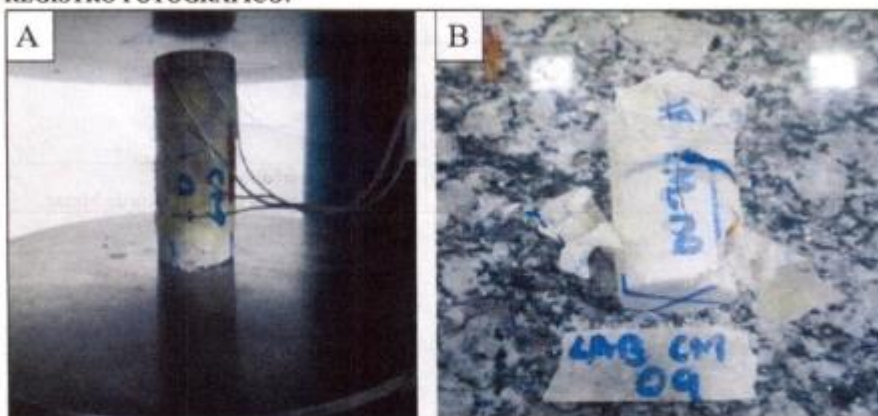
RESULTADOS:

Parámetro	Valor	Unidades
Gradiente	0.139	[MPa/s]
Diámetro (D)	37.00	[mm]
Altura (L)	82.00	[mm]
Área	1075.21	[mm ²]
Carga Máxima	28.701	[kN]
Resistencia Máxima	25.447	[MPa]
Módulo de Young secante	41.628	[GPa]
Coefficiente de Poisson	0.27	

CURVA ESFUERZO VS DEFORMACIÓN UNITARIA

CARGA [kN]	Esfuerzo [MPa]	Def. Axial [µm]	Def. Lateral [µm]
0.00	0.00	0.00	0.00
5.00	4.65	154.36	-46.74
10.00	9.30	294.69	-79.85
15.00	13.95	416.35	-96.77
20.00	18.60	496.41	-114.87
28.70	26.69	641.15	-173.11
26.69	24.82	896.48	-208.59

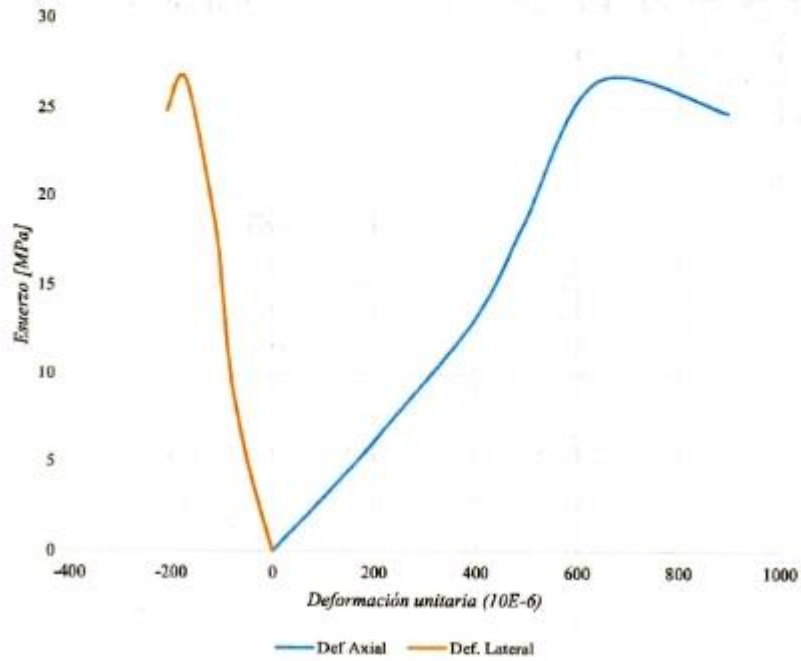
REGISTRO FOTOGRÁFICO:





A) Muestra antes de la rotura

B) Muestra después de la rotura

	RESULTADOS DE COMPRESION SIMPLE CON MODULOS ELASTICOS LABORATORIO DE MECANICA DE ROCAS Y PETROGRAFIA - FIGEMPA Resumen Ejecutivo	Código: SpC-CSM-001
	Universidad Central del Ecuador Facultad de Ingeniería en Geología, Minas, Petróleos y Ambiental	Fecha: 2022-11-10 Estado: Entregado



Elaborado por:	Aprobado por:
	
Ing. Jessica Reinoso Técnico Docente	Ing. Danny Burbano MSc. Director de Carrera de Ingeniería de Minas



	RESULTADOS DE COMPRESIÓN SIMPLE CON MÓDULOS ELÁSTICOS LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS Y PETROGRAFÍA - FIGEMPA Resumen Ejecutivo	Código: SpC-CSM-001
	Universidad Central del Ecuador Facultad de Ingeniería en Geología, Minas, Petróleos y Ambiental	Fecha: 2022-11-10 Estado: Entregado

ENSAYO DE COMPRESIÓN SIMPLE CON MÓDULOS ELÁSTICOS EN ROCA NO. 9

Código: LAB-CM-10

Coordenadas UTM: 771988,28417, 1778

Ubicación: Cuerpo 2

Litología: Mármol - Unidad Laurel

Densidad media de la roca: 26.18 kN/m³

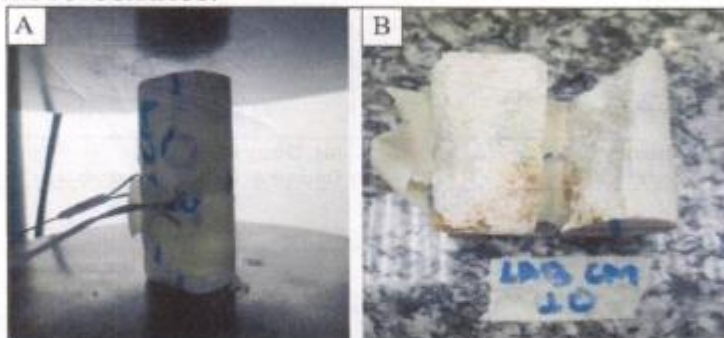
RESULTADOS:

Parámetro	Valor	Unidades
Gradiente	0.139	[MPa/s]
Diámetro (D)	37.00	[mm]
Altura (L)	82.00	[mm]
Área	1075.21	[mm ²]
Carga Máxima	42.731	[kN]
Resistencia Máxima	39.741	[MPa]
Módulo de Young secante	7.267	[GPa]
Coefficiente de Poisson	0.19	

CURVA ESFUERZO VS DEFORMACIÓN UNITARIA


CARGA [kN]	Esfuerzo [MPa]	Def. Axial [µε]	Def. Lateral [µε]
0.00	0.00	0.00	0.00
5.00	4.65	75.25	-18.25
10.00	9.30	178.23	-33.48
15.00	13.95	354.70	-74.36
20.00	18.60	674.37	-110.05
25.00	23.25	1168.31	-221.55
30.00	27.90	1842.82	-298.38
35.00	32.55	2745.93	-450.93
42.73	39.74	5468.40	-1047.36
35.00	32.55	6649.27	-1847.35

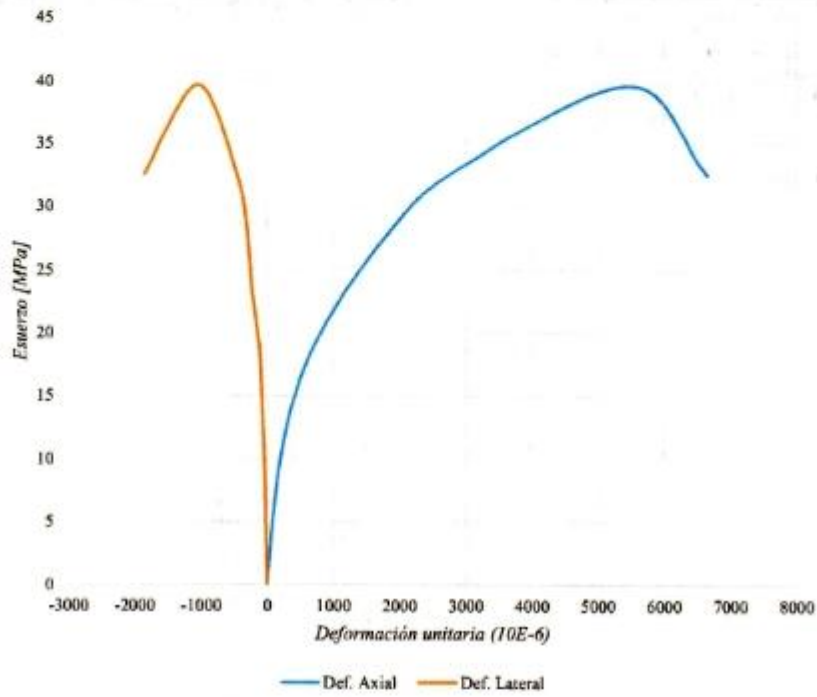
REGISTRO FOTOGRÁFICO:





A) Muestra antes de la rotura

B) Muestra después de la rotura

	RESULTADOS DE COMPRESION SIMPLE CON MODULOS ELASTICOS LABORATORIO DE MECANICA DE ROCAS Y PETROGRAFIA - FIGEMPA Resumen Ejecutivo	Código: SpC-CSM-001
	Universidad Central del Ecuador Facultad de Ingeniería en Geología, Minas, Petróleos y Ambiental	Fecha: 2022-11-10 Estado: Entregado



Elaborado por:	Aprobado por:
	
Ing. Jessica Reinoso Técnico Docente	Ing. Danny Burbano MSc. Director de Carrera de Ingeniería de Minas



	RESULTADOS DE COMPRESIÓN SIMPLE CON MÓDULOS ELÁSTICOS LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS Y PETROGRAFÍA - FIGEMPA Resumen Ejecutivo	Código: SpC-CSM-001
	Universidad Central del Ecuador Facultad de Ingeniería en Geología, Minas, Petróleos y Ambiental	Fecha: 2022-11-10 Estado: Entregado

ENSAYO DE COMPRESIÓN SIMPLE CON MÓDULOS ELÁSTICOS EN ROCA NO. 10

Código: LAB-CM-011

Coordenadas UTM: 772180, 28588, 1782

Ubicación: Cuerpo 3

Litología: Mármol - Unidad Laurel

Densidad media de la roca: 25.92 kN/m³

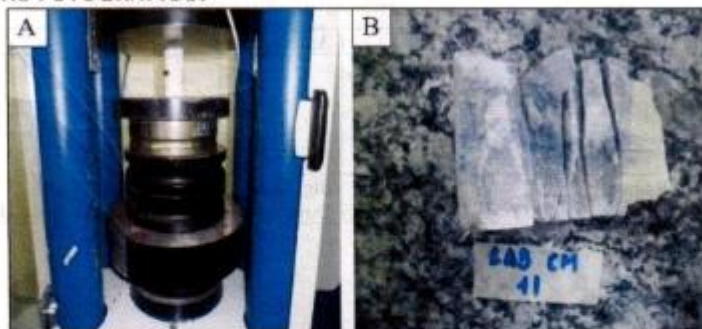
RESULTADOS:

Parámetro	Valor	Unidades
Gradiente	0.139	[MPa/s]
Diámetro (D)	37.00	[mm]
Altura (L)	82.00	[mm]
Área	1075.21	[mm ²]
Carga Máxima	59.904	[kN]
Resistencia Máxima	55.706	[MPa]
Módulo de Young secante	4.206	[GPa]
Coefficiente de Poisson	0.16	

CURVA ESFUERZO VS DEFORMACIÓN UNITARIA

CARGA [kN]	Esfuerzo [MPa]	Def. Axial [μe]	Def. Lateral [μe]
0.00	0.00	0.00	0.00
10.00	9.30	98.23	-15.74
20.00	18.60	298.23	-26.54
30.00	27.90	845.52	-231.85
40.00	37.20	2484.36	-465.84
50.00	46.50	5769.27	-874.12
59.90	55.71	13244.44	-2119.11
47.00	43.71	15034.50	-950.93

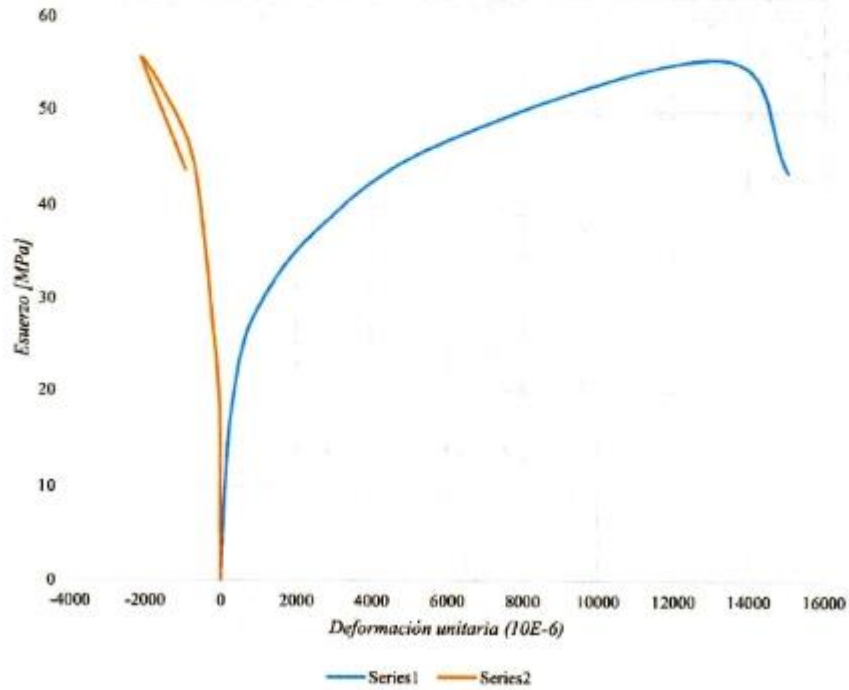
REGISTRO FOTOGRÁFICO:





A) Muestra antes de la rotura

B) Muestra después de la rotura

	RESULTADOS DE COMPRESION SIMPLE CON MODULOS ELASTICOS LABORATORIO DE MECANICA DE ROCAS Y PETROGRAFIA - FIGEMPA Resumen Ejecutivo	Código: SpC-CSM-001
	Universidad Central del Ecuador Facultad de Ingeniería en Geología, Minas, Petróleos y Ambiental	Fecha: 2022-11-10 Estado: Entregado



Elaborado por:	Aprobado por:
	
Ing. Jessica Reinoso Técnico Docente	Ing. Danny Burbano M.Sc. Director de Carrera de Ingeniería de Minas



	RESULTADOS DE COMPRESIÓN SIMPLE CON MÓDULOS ELÁSTICOS LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS Y PETROGRAFÍA - FIGEMPA Resumen Ejecutivo	Código: SpC-CSM-001
	Universidad Central del Ecuador Facultad de Ingeniería en Geología, Minas, Petróleos y Ambiental	Fecha: 2022-11-10 Estado: Entregado

ENSAYO DE COMPRESIÓN SIMPLE CON MÓDULOS ELÁSTICOS EN ROCA NO. 11

Código: LAB-CM-012

Coordenadas UTM: 772077, 28646, 1756

Ubicación: Cuerpo 3

Litología: Mármol - Unidad Laurel

Densidad media de la roca: 25.61 kN/m³

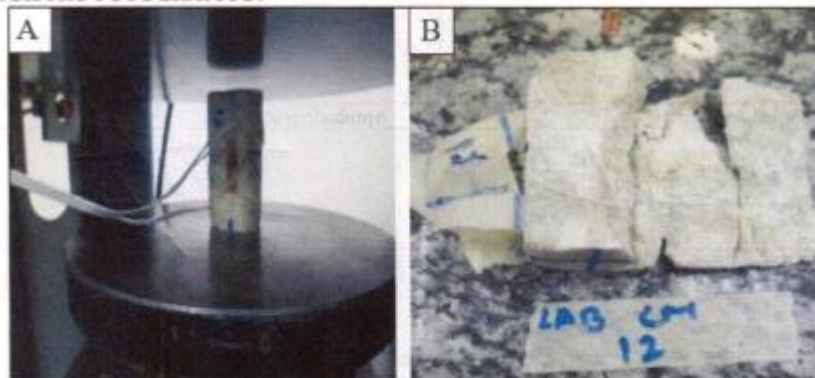
RESULTADOS:

Parámetro	Valor	Unidades
Gradiente	0.139	[MPa/s]
Diámetro (D)	37.00	[mm]
Altura (L)	82.00	[mm]
Área	1075.21	[mm ²]
Carga Máxima	47.446	[kN]
Resistencia Máxima	44.127	[MPa]
Módulo de Young secante	8.148	[GPa]
Coefficiente de Poisson	0.12	

CURVA ESFUERZO VS DEFORMACIÓN UNITARIA

CARGA [kN]	Esfuerzo [MPa]	Def. Axial [με]	Def. Lateral [με]
0.00	0.00	0.00	0.00
10.00	9.30	116.74	-13.65
20.00	18.60	287.56	-99.23
30.00	27.90	697.51	-247.65
40.00	37.20	1710.99	-465.84
47.45	44.13	5415.68	-649.88
45.00	41.85	5158.94	-919.11

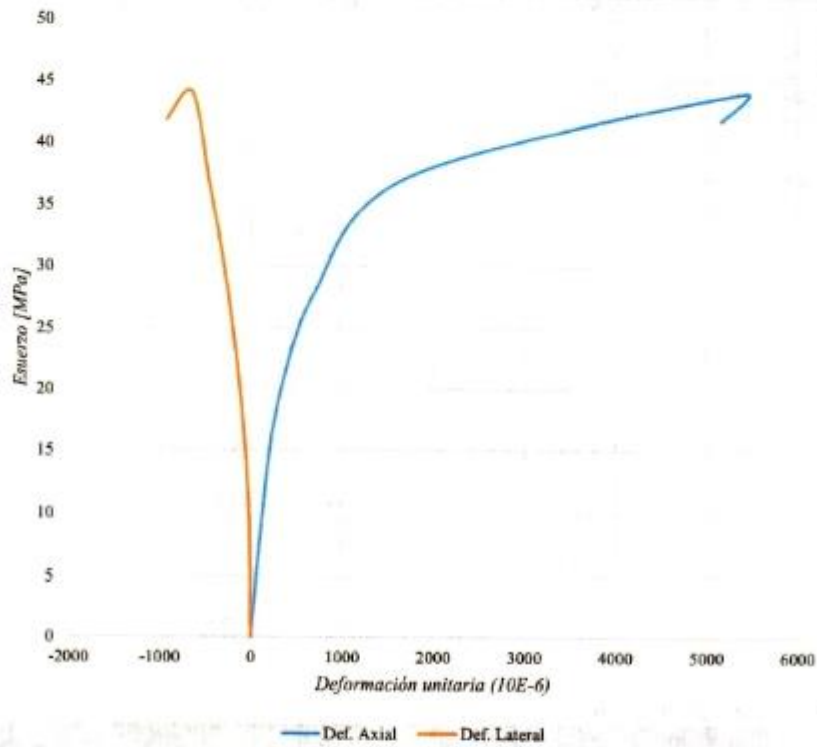
REGISTRO FOTOGRÁFICO:





A) Muestra antes de la rotura

B) Muestra después de la rotura

	RESULTADOS DE COMPRESION SIMPLE CON MODULOS ELASTICOS LABORATORIO DE MECANICA DE ROCAS Y PETROGRAFIA - FIGEMPA Resumen Ejecutivo	Código: SpC-CSM-001
	Universidad Central del Ecuador Facultad de Ingeniería en Geología, Minas, Petróleos y Ambiental	Fecha: 2022-11-10 Estado: Entregado



Elaborado por:	Aprobado por:
	
Ing. Jessica Reinoso Técnico Docente	Ing. Danny Burbano MSc. Director de Carrera de Ingeniería de Minas



	RESULTADOS DE COMPRESIÓN SIMPLE CON MÓDULOS ELÁSTICOS LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS Y PETROGRAFÍA - FIGEMPA Resumen Ejecutivo	Código: SpC-CSM-001
	Universidad Central del Ecuador Facultad de Ingeniería en Geología, Minas, Petróleos y Ambiental	Fecha: 2022-11-10 Estado: Entregado

ENSAYO DE COMPRESIÓN SIMPLE CON MÓDULOS ELÁSTICOS EN ROCA NO. 12

Código: LAB-CM-013

Coordenadas UTM: 772011, 28492, 1744

Ubicación: Cuerpo 2

Litología: Mármol - Unidad Laurel

Densidad media de la roca: 26.29 kN/m³

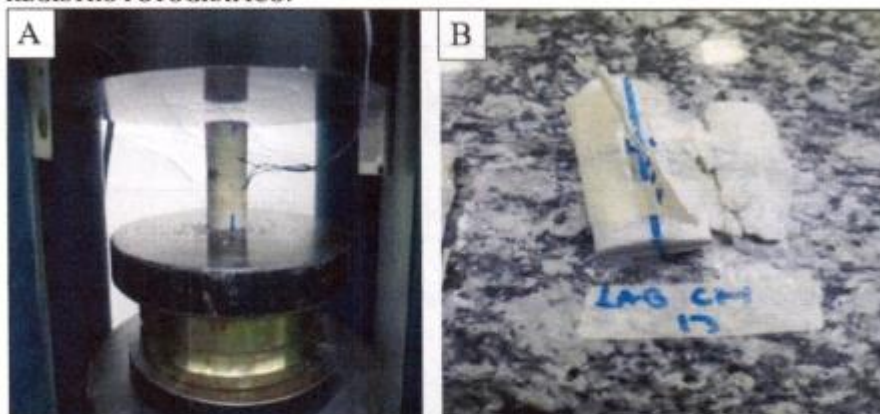
RESULTADOS:

Parámetro	Valor	Unidades
Gradiente	0.139	[MPa/s]
Diámetro (D)	37.00	[mm]
Altura (L)	82.00	[mm]
Área	1075.21	[mm ²]
Carga Máxima	25.706	[kN]
Resistencia Máxima	23.908	[MPa]
Módulo de Young secante	74.110	[GPa]
Coefficiente de Poisson	0.26	

CURVA ESFUERZO VS DEFORMACIÓN UNITARIA

CARGA [kN]	Esfuerzo [MPa]	Def. Axial [μm]	Def. Lateral [μm]
0.00	0.00	0.00	0.00
5.00	4.65	138.55	-36.55
10.00	9.30	298.80	-78.65
15.00	13.95	308.65	-80.50
20.00	18.60	312.36	-82.70
25.71	23.91	322.60	-82.94
22.41	20.84	397.16	-96.65

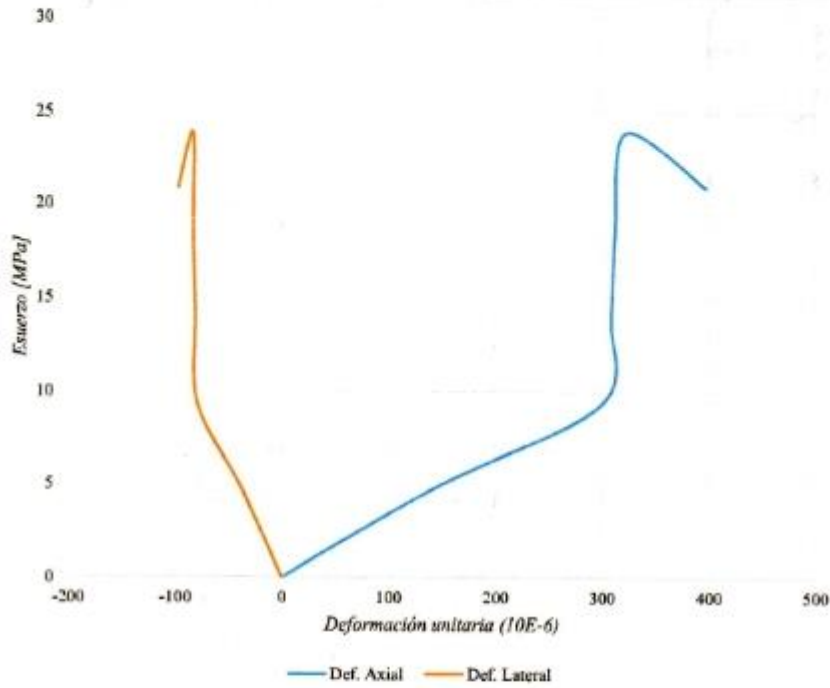
REGISTRO FOTOGRÁFICO:





A) Muestra antes de la rotura

B) Muestra después de la rotura

	RESULTADOS DE COMPRESION SIMPLE CON MODULOS ELASTICOS LABORATORIO DE MECANICA DE ROCAS Y PETROGRAFIA - FIGEMPA Resumen Ejecutivo	Código: SpC-CSM-001
	Universidad Central del Ecuador Facultad de Ingeniería en Geología, Minas, Petróleos y Ambiental	Fecha: 2023-11-10 Estado: Entregado



Elaborado por:	Aprobado por:
	
Ing. Jessica Reinoso Técnico Docente	Ing. Danny Burbano MSc. Director de Carrera de Ingeniería de Minas



	RESULTADOS DE COMPRESIÓN SIMPLE CON MÓDULOS ELÁSTICOS LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS Y PETROGRAFÍA - FIGEMPA Resumen Ejecutivo Universidad Central del Ecuador	Código: SpC-CSM-001 Fecha: 2022-11-10 Estado: Entregado
	Facultad de Ingeniería en Geología, Minas, Petróleos y Ambiental	

ENSAYO DE COMPRESIÓN SIMPLE CON MÓDULOS ELÁSTICOS EN ROCA NO. 13

Código: LAB-CM-014

Coordenadas UTM: 771899, 28450, 1746

Ubicación: Cuerpo 2

Litología: Mármol – Unidad Laurel

Densidad media de la roca: 22.88 kN/m³

RESULTADOS:

Parámetro	Valor	Unidades
Gradiente	0.139	[MPa/s]
Diámetro (D)	37.00	[mm]
Altura (L)	82.00	[mm]
Área	1075.21	[mm ²]
Carga Máxima	33.274	[kN]
Resistencia Máxima	30.947	[MPa]
Módulo de Young secante	7.536	[GPa]
Coefficiente de Poisson	0.18	

CURVA ESFUERZO VS DEFORMACIÓN UNITARIA

CARGA [kN]	Esfuerzo [MPa]	Def. Axial [μs]	Def. Lateral [μs]
0.00	0.00	0.00	0.00
5.00	4.65	49.21	-14.58
10.00	9.30	214.37	-38.74
15.00	13.95	668.74	-144.84
20.00	18.60	1396.65	-290.87
25.00	23.25	2965.98	-535.06
33.27	30.95	4106.56	-739.18
27.17	25.27	4835.21	-834.98

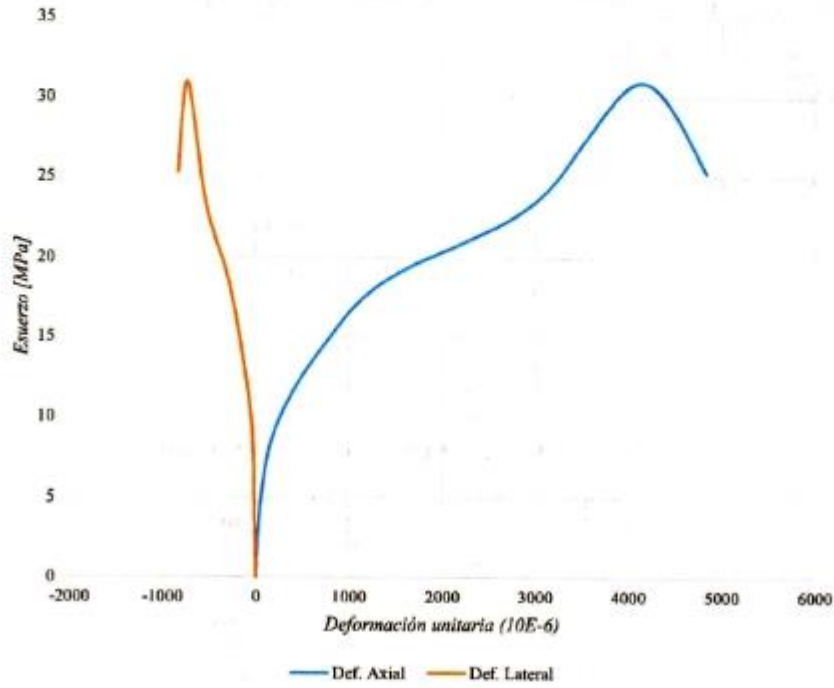
REGISTRO FOTOGRÁFICO:





A) Muestra antes de la rotura

B) Muestra después de la rotura

	RESULTADOS DE COMPRESION SIMPLE CON MODULOS ELASTICOS LABORATORIO DE MECANICA DE ROCAS Y PETROGRAFIA - FIGEMPA Resumen Ejecutivo	Código: SpC-CSM-001
	Universidad Central del Ecuador Facultad de Ingeniería en Geología, Minas, Petróleos y Ambiental	Fecha: 2022-11-10 Estado: Entregado



Elaborado por:	Aprobado por:
	
Ing. Jessica Reinoso Técnico Docente	Ing. Danny Burbano MSc. Director de Carrera de Ingeniería de Minas



	RESULTADOS DE COMPRESIÓN SIMPLE CON MÓDULOS ELÁSTICOS LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS Y PETROGRAFÍA - FIGEMPA Resumen Ejecutivo	Código: SpC-CSM-001
	Universidad Central del Ecuador Facultad de Ingeniería en Geología, Minas, Petróleos y Ambiental	Fecha: 2022-11-10 Estado: Entregado

ENSAYO DE COMPRESIÓN SIMPLE CON MÓDULOS ELÁSTICOS EN ROCA NO. 14

Código: LAB-CM-015

Coordenadas UTM: 771807, 28394, 1738

Ubicación: Cuerpo 1

Litología: Mármol - Unidad Laurel

Densidad media de la roca: 24.49 kN/m³

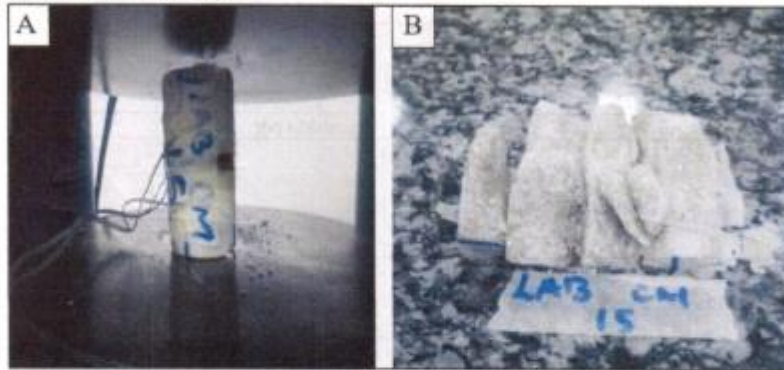
RESULTADOS:

Parámetro	Valor	Unidades
Gradiente	0.139	[MPa/s]
Diámetro (D)	37.00	[mm]
Altura (L)	82.00	[mm]
Área	1075.21	[mm ²]
Carga Máxima	16.496	[kN]
Resistencia Máxima	15.342	[MPa]
Módulo de Young secante	10.892	[GPa]
Coefficiente de Poisson	0.26	

CURVA ESFUERZO VS DEFORMACIÓN UNITARIA

CARGA [kN]	Esfuerzo [MPa]	Def. Axial [µε]	Def. Lateral [µε]
0.00	0.00	0.00	0.00
5.00	4.65	188.46	-48.90
10.00	9.30	558.21	-143.95
16.50	15.34	1408.50	-366.62
12.69	11.80	1669.69	-475.21

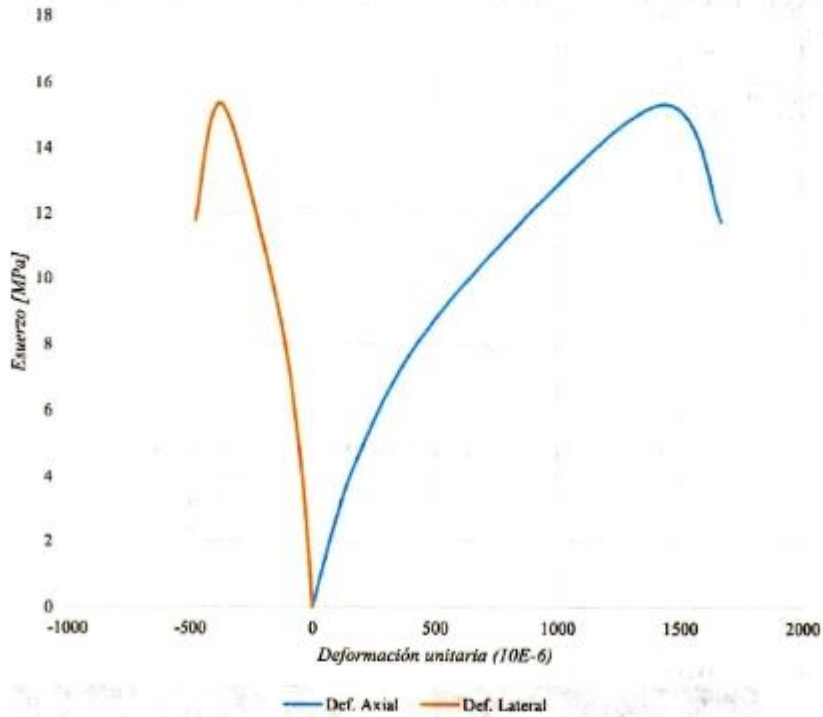
REGISTRO FOTOGRÁFICO:





A) Muestra antes de la rotura

B) Muestra después de la rotura

	RESULTADOS DE COMPRESION SIMPLE CON MODULOS ELASTICOS LABORATORIO DE MECANICA DE ROCAS Y PETROGRAFIA - FIGEMPA Resumen Ejecutivo	Código: SpC-CSM-001
	Universidad Central del Ecuador Facultad de Ingeniería en Geología, Minas, Petróleos y Ambiental	Fecha: 2022-11-10 Estado: Entregado



Elaborado por: 	Aprobado por: 
Ing. Jessica Reinoso Técnico Docente	Ing. Danny Burbano, MSc. Director de Carrera de Ingeniería de Minas



	RESULTADOS DE COMPRESIÓN SIMPLE CON MÓDULOS ELÁSTICOS LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS Y PETROGRAFÍA - FIGEMPA Resumen Ejecutivo	Código: SpC-CSM-001
	Universidad Central del Ecuador Facultad de Ingeniería en Geología, Minas, Petróleos y Ambiental	Fecha: 2022-11-10 Estado: Entregado

ENSAYO DE COMPRESIÓN SIMPLE CON MÓDULOS ELÁSTICOS EN ROCA NO. 15

Código: LAB-CM-016

Coordenadas UTM: 771790, 28301, 1813

Ubicación: Cuerpo 1

Litología: Mármol - Unidad Laurel

Densidad media de la roca: 24,69 kN/m³

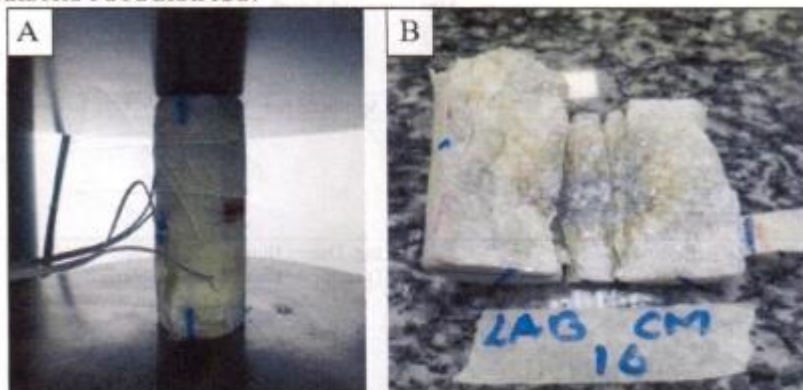
RESULTADOS:

Parámetro	Valor	Unidades
Gradiente	0.139	[MPa/s]
Diámetro (D)	37.00	[mm]
Altura (L)	82.00	[mm]
Área	1075.21	[mm ²]
Carga Máxima	17,876	[kN]
Resistencia Máxima	16.626	[MPa]
Módulo de Young secante	32.694	[GPa]
Coefficiente de Poisson	0.27	

CURVA ESFUERZO VS DEFORMACIÓN UNITARIA

CARGA [kN]	Esfuerzo [MPa]	Def. Axial [με]	Def. Lateral [με]
0.00	0.00	0.00	0.00
5.00	4.65	308.65	-100.99
10.00	9.30	428.65	-134.74
17.88	16.63	508.53	-137.30
12.69	11.80	583.99	-187.65

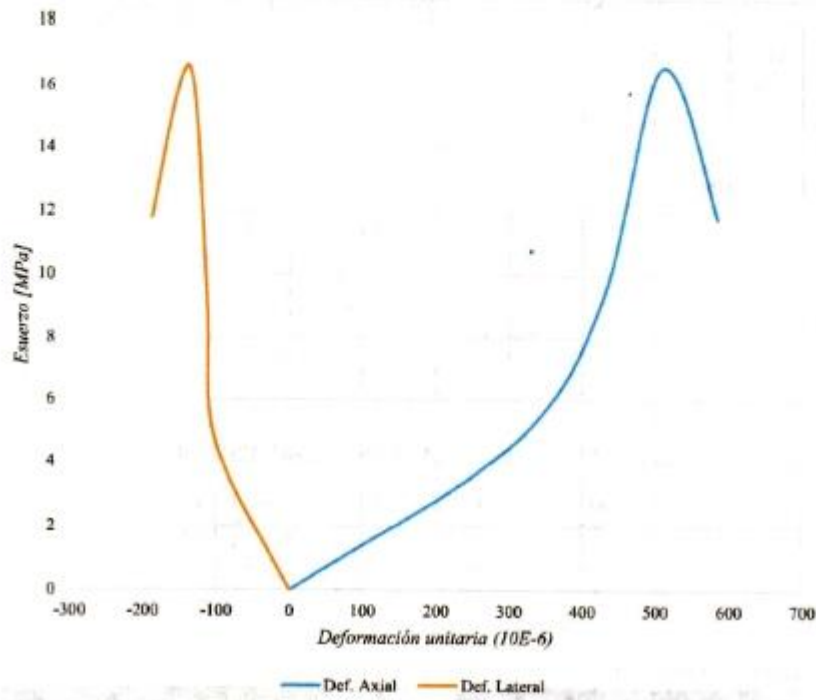
REGISTRO FOTOGRÁFICO:





A) Muestra antes de la rotura

B) Muestra después de la rotura

	RESULTADOS DE COMPRESION SIMPLE CON MODULOS ELASTICOS LABORATORIO DE MECANICA DE ROCAS Y PETROGRAFIA - FIGEMPA Resumen Ejecutivo	Código: SpC-CSM-001
	Universidad Central del Ecuador Facultad de Ingeniería en Geología, Minas, Petróleos y Ambiental	Fecha: 2022-11-10 Estado: Entregado



Elaborado por:	Aprobado por:
	
Ing. Jessica Reinoso Técnico Docente	Ing. Danny Burbano MSc. Director de Carrera de Ingeniería de Minas



	RESULTADOS DE COMPRESIÓN SIMPLE CON MÓDULOS ELÁSTICOS LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS Y PETROGRAFÍA - FIGEMPA Resumen Ejecutivo	Código: SpC-CSM-001
	Universidad Central del Ecuador Facultad de Ingeniería en Geología, Minas, Petróleos y Ambiental	Fecha: 2022-11-10 Estado: Entregado

ENSAYO DE COMPRESIÓN SIMPLE CON MÓDULOS ELÁSTICOS EN ROCA NO. 16

Código: LAB-CM-017

Coordenadas UTM: 771851, 28288, 1807

Ubicación: Cuerpo 1

Litología: Mármol – Unidad Laurel

Densidad media de la roca: 26.98 kN/m³

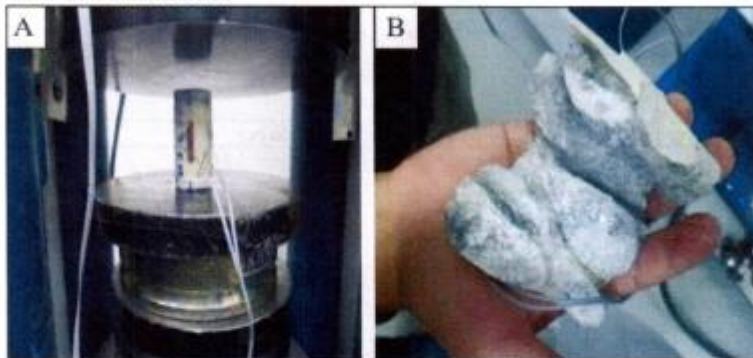
RESULTADOS:

Parámetro	Valor	Unidades
Gradiente	0.139	[MPa/s]
Diámetro (D)	37.00	[mm]
Altura (L)	82.00	[mm]
Área	1075.21	[mm ²]
Carga Máxima	23.330	[kN]
Resistencia Máxima	21.698	[MPa]
Módulo de Young secante	15.803	[GPa]
Coefficiente de Poisson	0.28	

CURVA ESFUERZO VS DEFORMACIÓN UNITARIA

CARGA [kN]	Esfuerzo [MPa]	Def. Axial [με]	Def. Lateral [με]
0.00	0.00	0.00	0.00
5.00	4.65	165.75	-41.56
10.00	9.30	292.12	-81.65
15.00	13.95	501.56	-137.36
23.33	21.70	1373.04	-384.45
18.29	17.01	1528.98	-582.54

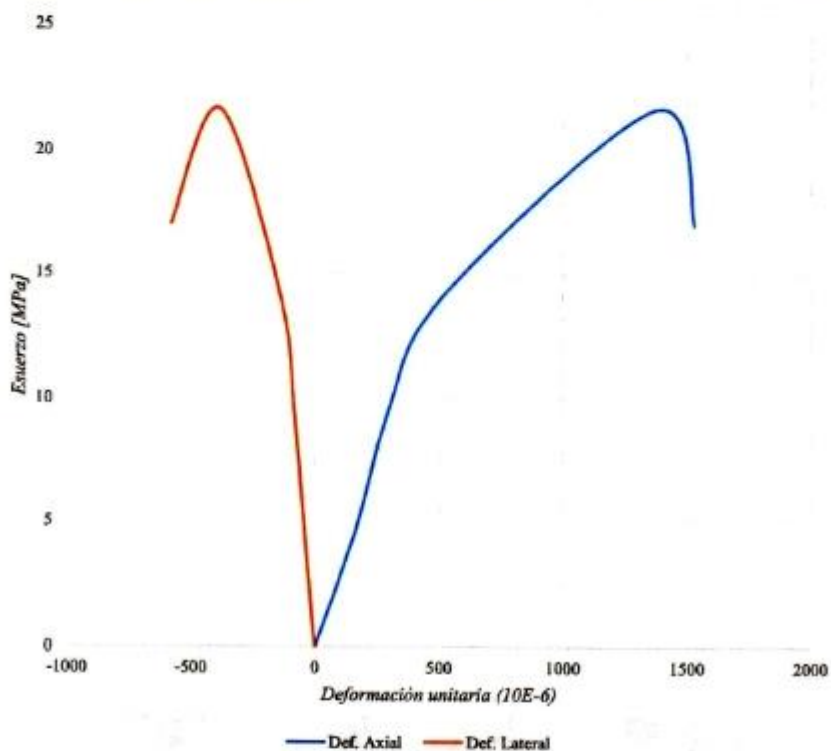
REGISTRO FOTOGRÁFICO:





A) Muestra antes de la rotura

B) Muestra después de la rotura

	RESULTADOS DE COMPRESION SIMPLE CON MODULOS ELASTICOS LABORATORIO DE MECANICA DE ROCAS Y PETROGRAFIA - FIGEMPA Resumen Ejecutivo	Código: SpC-CSM-001
	Universidad Central del Ecuador Facultad de Ingeniería en Geología, Minas, Petróleos y Ambiental	Fecha: 2022-11-10 Estado: Entregado



Elaborado por:	Aprobado por:
	
Ing. Jessica Reinoso Técnico Docente	Ing. Danny Burbano MSc. Director de Carrera de Ingeniería de Minas



Anexo 4: Análisis de los Ensayos de Compresión Simple con Módulos de elasticidad

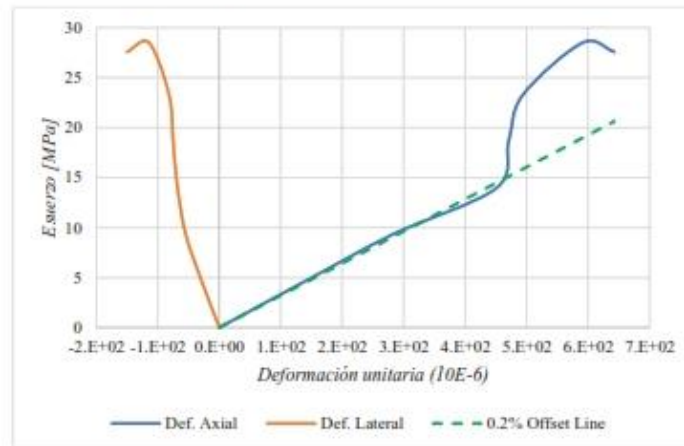
Análisis de resultados del ensayo de compresión simple con módulos de elasticidad en roca No. 1

Código: LAB-CM-02

RESULTADOS:

CARGA [kN]	Esfuerzo [MPa]	Def. Axial [μe]	Def. Lateral [μe]	Strain 0.2%	Stress 0.2%
0.00	0.00	0.00	0.00	0.002	0.00
5.00	4.65	140.00	-28.65	140.002	4.50
10.00	9.30	281.49	-54.47	281.492	9.04
15.00	13.95	450.55	-67.85	450.552	14.47
20.00	18.60	470.56	-74.98	470.562	15.11
25.00	23.25	493.44	-81.57	493.442	15.84
30.62	28.48	590.51	-114.05	590.512	18.96
29.65	27.58	642.56	-150.03	642.562	20.63

STRESS VERSUS STRAIN GRAPH:



RESULTADOS:

Parámetro	Valor	Unidades
$E_{10MT\%}$	33.0	GPa
$E_{0.2\%}$	32.1	GPa
$E_{secante}$	48.2	GPa
Coefficiente de Poisson	0.19	

Para el E_{prom} se considera la media aritmética entre los parámetros $E_{10MT\%}$ y $E_{0.2\%}$, que son los valores que describen de mejor manera el comportamiento elástico del material, además de no presentar mucha dispersión entre sí.

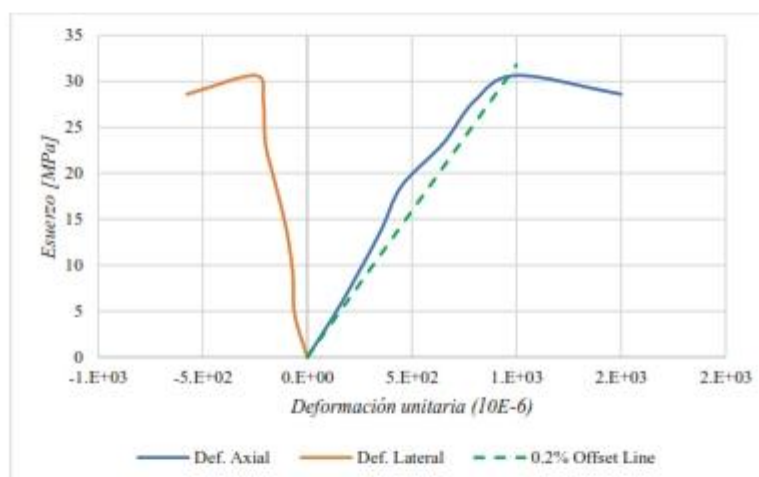
Análisis de resultados del ensayo de compresión simple con módulos de elasticidad en roca No. 2

Código: LAB-CM-03

RESULTADOS:

CARGA [kN]	Esfuerzo [MPa]	Def. Axial [μe]	Def. Lateral [μe]	Strain 0.2%	Stress 0.2%
0.00	0.00	0.00	0.00	0.002	0.00
5.00	4.65	131.21	-60.21	131.212	4.17
10.00	9.30	247.65	-70.00	247.652	7.87
15.00	13.95	356.48	-100.37	356.482	11.33
20.00	18.60	450.47	-150.00	450.472	14.32
25.00	23.25	650.25	-200.00	650.252	20.67
30.00	27.90	800.20	-210.00	800.202	25.43
32.93	30.63	1000.33	-250.08	1000.332	31.79
30.74	28.59	1500.11	-574.89	1500.112	47.67

STRESS VERSUS STRAIN GRAPH:



RESULTADOS:

Parámetro	Valor	Unidades
E_{10MPa}	37.6	GPa
$E_{0.2\%}$	31.8	GPa
$E_{elástico}$	30.6	GPa
Coefficiente de Poisson	0.25	

Para el E_{prom} se considera la media aritmética entre los parámetros E_{10MPa} y $E_{0.2\%}$, que son los valores que describen de mejor manera el comportamiento elástico del material, además de no presentar mucha dispersión entre sí.

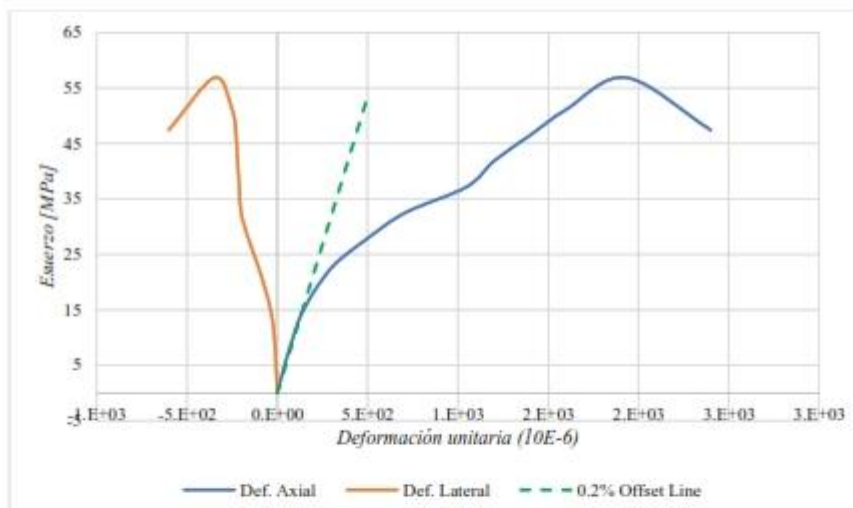
Análisis de resultados del ensayo de compresión simple con módulos de elasticidad en roca No. 3

Código: LAB-CM-04

RESULTADOS:

CARGA [kN]	Esfuerzo [MPa]	Def. Axial [μe]	Def. Lateral [μe]	Strain 0.2%	Stress 0.2%
0.00	0.00	0.00	0.00	0.002	0.00
5.00	4.65	37.81	-6.50	37.812	4.04
10.00	9.30	80.74	-14.25	80.742	8.63
15.00	13.95	130.14	-30.37	130.142	13.91
20.00	18.60	209.98	-65.37	209.982	22.45
25.00	23.25	319.91	-110.13	319.912	34.20
30.00	27.90	500.30	-160.37	500.302	53.49
35.00	32.55	710.87	-200.54	710.872	76.01
40.00	37.20	1049.88	-209.87	1049.882	112.25
45.00	41.85	1200.41	-219.90	1200.412	128.35
50.00	46.50	1400.60	-228.21	1400.602	149.75
55.00	51.15	1600.54	-250.08	1600.542	171.13
61.16	56.88	1932.64	-347.88	1932.642	206.64
51.00	47.43	2400.02	-600.19	2400.022	256.61

STRESS VERSUS STRAIN GRAPH:



RESULTADOS:

Parámetro	Valor	Unidades
E_{10MPa}	115.2	GPa
$E_{0.2\%}$	106.9	GPa
$E_{elástico}$	29.4	GPa
Coefficiente de Poisson	0.18	

Para el E_{prom} se considera la media aritmética entre los parámetros E_{10MPa} y $E_{0.2\%}$, que son los valores que describen de mejor manera el comportamiento elástico del material, además de no presentar mucha dispersión entre sí.

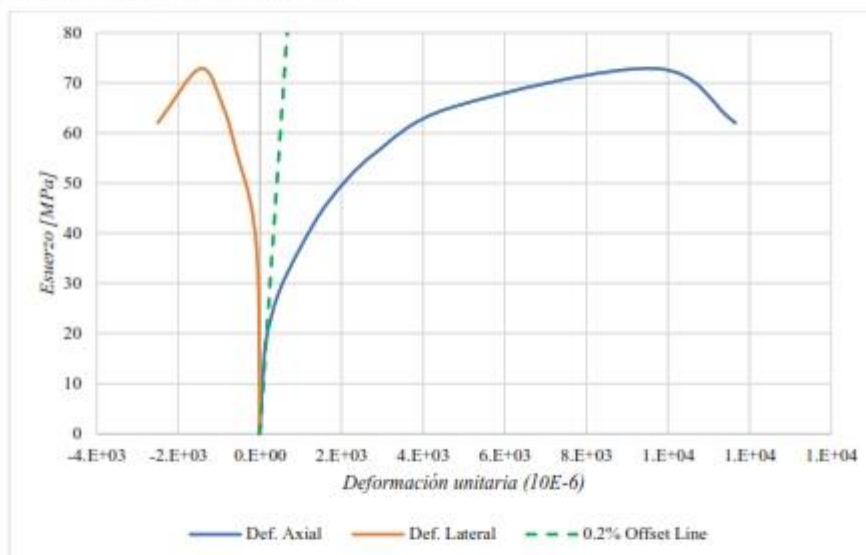
Análisis de resultados del ensayo de compresión simple con módulos de elasticidad en roca No. 4

Código: LAB-CM-05

RESULTADOS:

CARGA [kN]	Esfuerzo [MPa]	Def. Axial [μe]	Def. Lateral [μe]	Strain 0.2%	Stress 0.2%
0.00	0.00	0.00	0.00	0.002	0.00
10.00	9.30	58.55	-8.99	58.552	7.01
20.00	18.60	152.69	-20.69	152.692	18.27
30.00	27.90	451.70	-30.62	451.702	54.05
40.00	37.20	998.46	-80.61	998.462	119.46
50.00	46.50	1702.70	-240.04	1702.702	203.73
60.00	55.80	2798.68	-557.93	2798.682	334.86
70.00	65.10	4703.69	-896.74	4703.692	562.79
78.32	72.85	9693.28	-1453.99	9693.282	1159.79
66.69	62.03	11654.99	-2500.98	11654.992	1394.50

STRESS VERSUS STRAIN GRAPH:



RESULTADOS:

Parámetro	Valor	Unidades
E_{10MPa}	158.84	GPa
$E_{0.2\%}$	119.65	GPa
E_{escala}	7.52	GPa
Coefficiente de Poisson	0.15	

Para el E_{prom} se considera la media aritmética entre los parámetros E_{10MPa} y $E_{0.2\%}$, que son los valores que describen de mejor manera el comportamiento elástico del material, además de no presentar mucha dispersión entre sí.

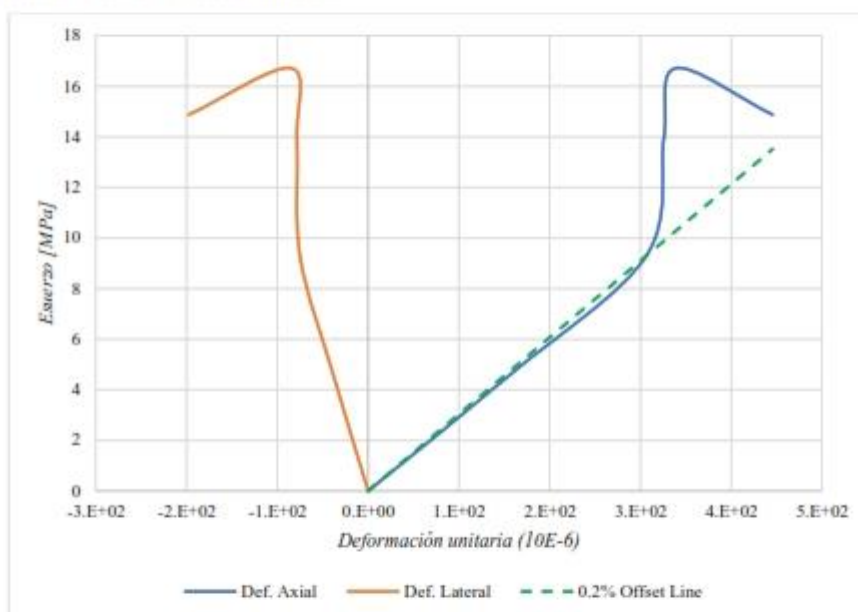
Análisis de resultados del ensayo de compresión simple con módulos de elasticidad en roca No. 5

Código: LAB-CM-06

RESULTADOS:

CARGA [kN]	Esfuerzo [MPa]	Def. Axial [μe]	Def. Lateral [μe]	Strain 0.2%	Stress 0.2%
0.00	0.00	0	0	0.002	0.00
5.00	4.65	158.36	-38.85	158.362	4.80
10.00	9.30	306.54	-75.12	306.542	9.30
15.00	13.95	325.87	-78.41	325.872	9.88
17.97	16.72	339.02	-84.75	339.022	10.28
16.00	14.88	445.69	-197.54	445.692	13.52

STRESS VERSUS STRAIN GRAPH:



RESULTADOS:

Parámetro	Valor	Unidades
E_{10MPa}	30.3	GPa
$E_{0.2\%}$	30.3	GPa
$E_{secante}$	49.3	GPa
Coefficiente de Poisson	0.25	

Para el E_{pmes} se considera la media aritmética entre los parámetros E_{10MPa} y $E_{0.2\%}$, que son los valores que describen de mejor manera el comportamiento elástico del material, además de no presentar mucha dispersión entre sí.

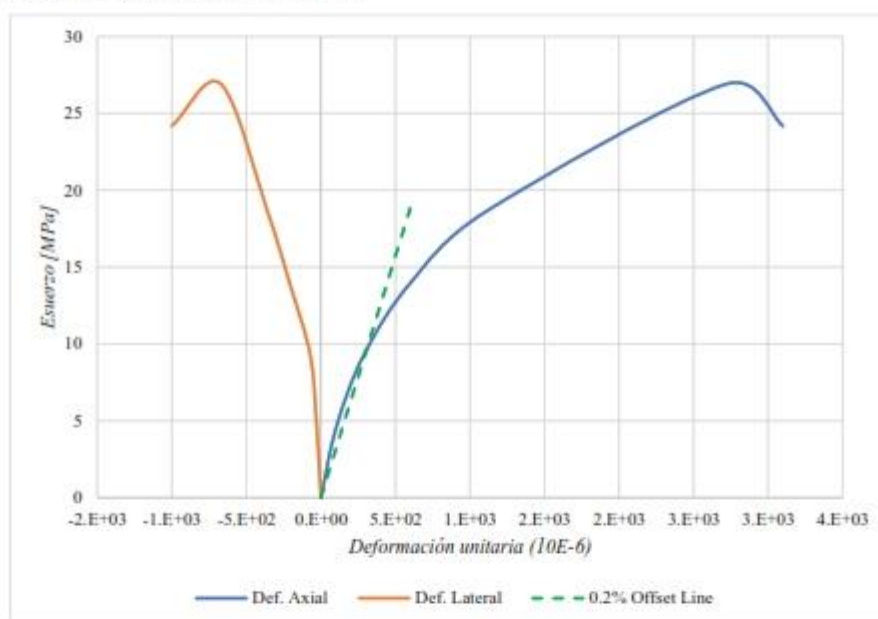
Análisis de resultados del ensayo de compresión simple con módulos de elasticidad en roca No. 6

Código: LAB-CM-07

RESULTADOS:

CARGA [kN]	Esfuerzo [MPa]	Def. Axial [μe]	Def. Lateral [μe]	Strain 0.2%	Stress 0.2%
0.00	0.00	0.00	0.00	0.002	0.00
5.00	4.65	105.74	-27.65	105.742	3.32
10.00	9.30	289.29	-71.47	289.292	9.08
15.00	13.95	599.65	-208.86	599.652	18.82
20.00	18.60	1105.75	-356.95	1105.752	34.71
28.94	26.91	2721.34	-670.34	2721.342	85.42
26.00	24.18	3100.42	-1000.05	3100.422	97.32

STRESS VERSUS STRAIN GRAPH:



RESULTADOS:

Parámetro	Valor	Unidades
E_{10MPa}	32.1	GPa
$E_{0.2\%}$	31.4	GPa
E_{cont}	16.8	GPa
Coefficiente de Poisson	0.25	

Para el E_{prom} se considera la media aritmética entre los parámetros E_{10MPa} y $E_{0.2\%}$, que son los valores que describen de mejor manera el comportamiento elástico del material, además de no presentar mucha dispersión entre sí.

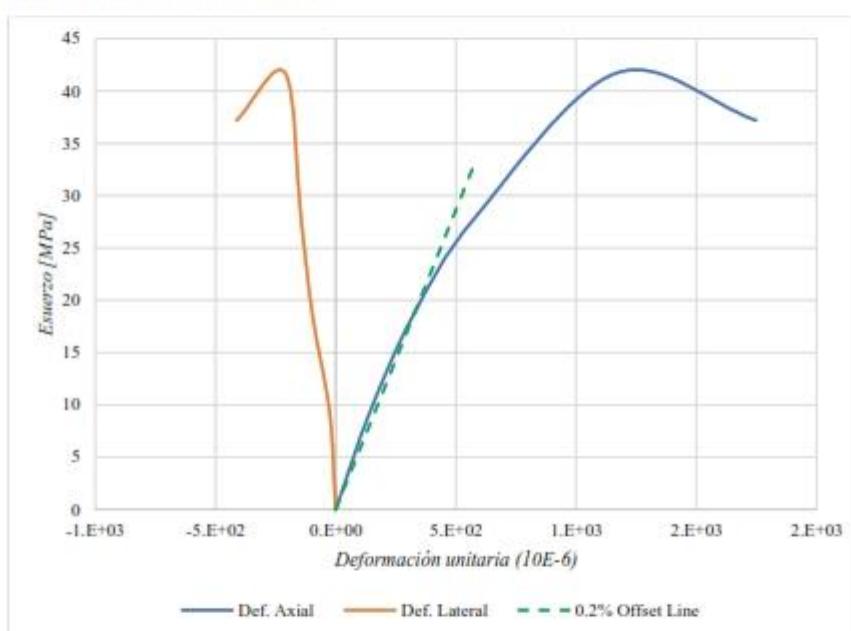
Análisis de resultados del ensayo de compresión simple con módulos de elasticidad en roca No. 7

Código: LAB-CM-08

RESULTADOS:

CARGA [kN]	Esfuerzo [MPa]	Def. Axial [μe]	Def. Lateral [μe]	Strain 0.2%	Stress 0.2%
0.00	0.00	0.00	0.00	0.002	0.00
10.00	9.30	142.11	-25.25	142.112	8.14
20.00	18.60	323.29	-96.48	323.292	18.51
30.00	27.90	579.65	-144.36	579.652	33.19
44.86	41.72	1166.97	-210.05	1166.972	66.81
40.00	37.20	1748.58	-412.15	1748.582	100.11

STRESS VERSUS STRAIN GRAPH:



RESULTADOS:

Parámetro	Valor	Unidades
E_{10MPa}	65.4	GPa
$E_{0.2\%}$	57.3	GPa
$E_{secante}$	35.8	GPa
Coefficiente de Poisson	0.18	

Para el E_{pm} se considera la media aritmética entre los parámetros E_{10MPa} y $E_{0.2\%}$, que son los valores que describen de mejor manera el comportamiento elástico del material, además de no presentar mucha dispersión.

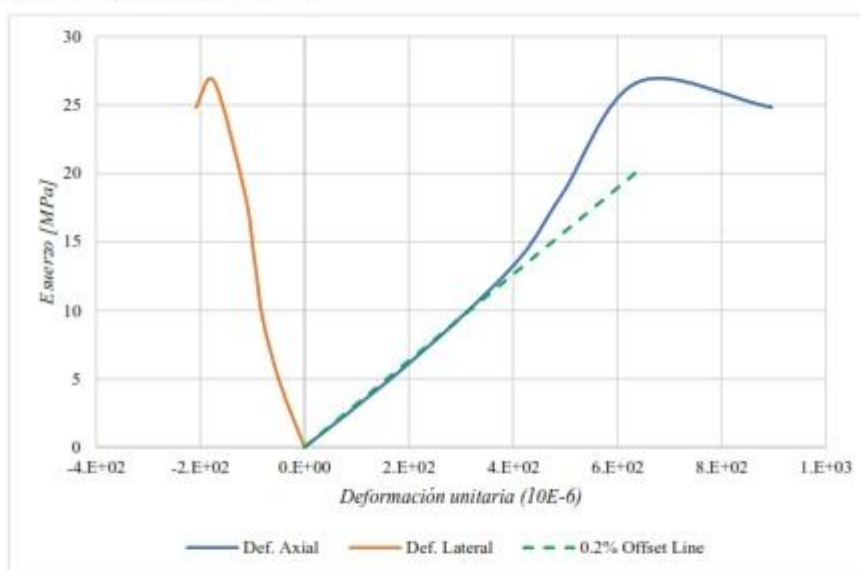
Análisis de resultados del ensayo de compresión simple con módulos de elasticidad en roca No. 8

Código: LAB-CM-09

RESULTADOS:

CARGA [kN]	Esfuerzo [MPa]	Def. Axial [μe]	Def. Lateral [μe]	Strain 0.2%	Stress 0.2%
0.00	0.00	0.00	0.00	0.002	0.00
5.00	4.65	154.36	-46.74	154.362	4.87
10.00	9.30	294.69	-79.85	294.692	9.29
15.00	13.95	416.35	-96.77	416.352	13.13
20.00	18.60	496.41	-114.87	496.412	15.65
28.70	26.69	641.15	-173.11	641.152	20.22
26.69	24.82	896.48	-208.59	896.482	28.27

STRESS VERSUS STRAIN GRAPH:



RESULTADOS:

Parámetro	Valor	Unidades
E_{10MPa}	31.6	GPa
$E_{0.2\%}$	31.5	GPa
$E_{secante}$	41.6	GPa
Coefficiente de Poisson	0.27	

Para el E_{prom} se considera la media aritmética entre los parámetros E_{10MPa} y $E_{0.2\%}$, que son los valores que describen de mejor manera el comportamiento elástico del material, además de no presentar mucha dispersión.

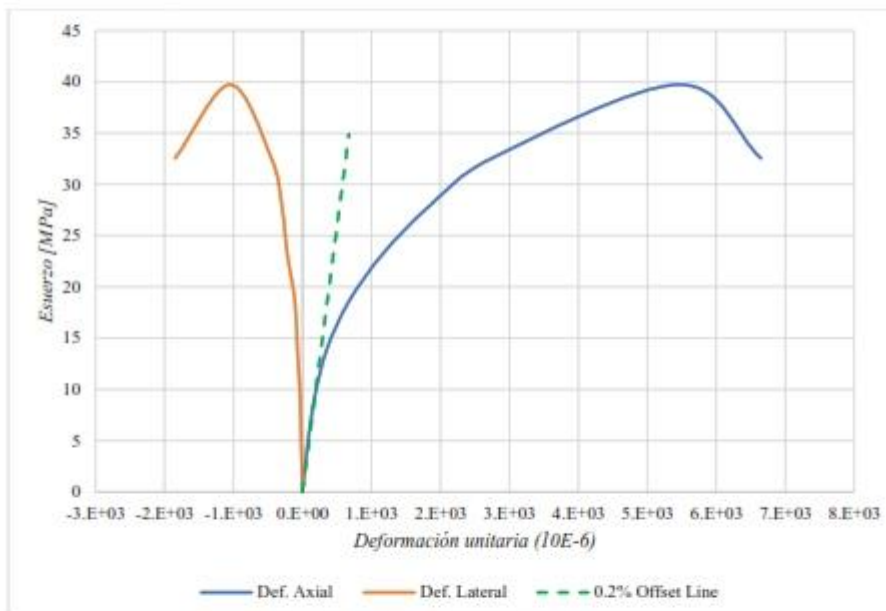
Análisis de resultados del ensayo de compresión simple con módulos de elasticidad en roca No. 9

Código: LAB-CM-10

RESULTADOS:

CARGA [kN]	Esfuerzo [MPa]	Def. Axial [μe]	Def. Lateral [μe]	Strain 0.2%	Stress 0.2%
0.00	0.00	0.00	0.00	0.002	0.00
5.00	4.65	75.25	-18.25	75.252	3.90
10.00	9.30	178.23	-33.48	178.232	9.23
15.00	13.95	354.70	-74.36	354.702	18.36
20.00	18.60	674.37	-110.05	674.372	34.91
25.00	23.25	1168.31	-221.55	1168.312	60.47
30.00	27.90	1842.82	-298.38	1842.822	95.39
35.00	32.55	2745.93	-450.93	2745.932	142.14
42.73	39.74	5468.40	-1047.36	5468.402	283.06
35.00	32.55	6649.27	-1847.35	6649.272	344.18

STRESS VERSUS STRAIN GRAPH:



RESULTADOS:

Parámetro	Valor	Unidades
E_{10MPa}	52.2	GPa
$E_{0.2\%}$	51.8	GPa
$E_{secante}$	7.3	GPa
Coefficiente de Poisson	0.19	

Para el E_{prom} se considera la media aritmética entre los parámetros E_{10MPa} y $E_{0.2\%}$, que son los valores que describen de mejor manera el comportamiento elástico del material, además de no presentar mucha dispersión.

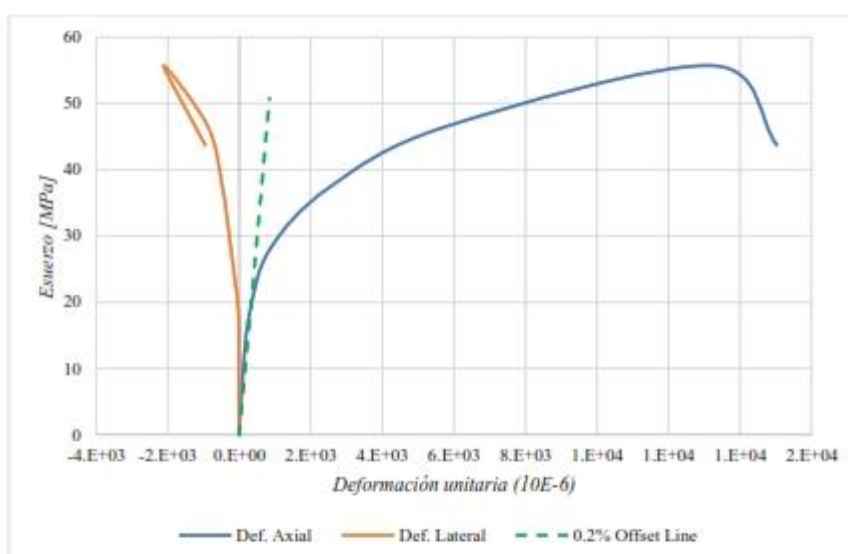
Análisis de resultados del ensayo de compresión simple con módulos de elasticidad en roca No. 10

Código: LAB-CM-11

RESULTADOS:

CARGA [kN]	Esfuerzo [MPa]	Def. Axial [μe]	Def. Lateral [μe]	Strain 0.2%	Stress 0.2%
0.00	0.00	0.00	0.00	0.002	0.00
10.00	9.30	98.23	-15.74	98.232	5.90
20.00	18.60	298.23	-26.54	298.232	17.90
30.00	27.90	845.52	-231.85	845.522	50.76
40.00	37.20	2484.36	-465.84	2484.362	149.15
50.00	46.50	5769.27	-874.12	5769.272	346.37
59.90	55.71	13244.44	-2119.11	13244.442	795.16
47.00	43.71	15034.50	-950.93	15034.502	902.63

STRESS VERSUS STRAIN GRAPH:



RESULTADOS:

Parámetro	Valor	Unidades
E_{10MPa}	94.7	GPa
$E_{0.2\%}$	60.0	GPa
$E_{resante}$	4.2	GPa
Coefficiente de Poisson	0.16	

Para el E_{pm} se considera la media aritmética entre los parámetros E_{10MPa} y $E_{0.2\%}$, que son los valores que describen de mejor manera el comportamiento elástico del material, además de no presentar mucha dispersión.

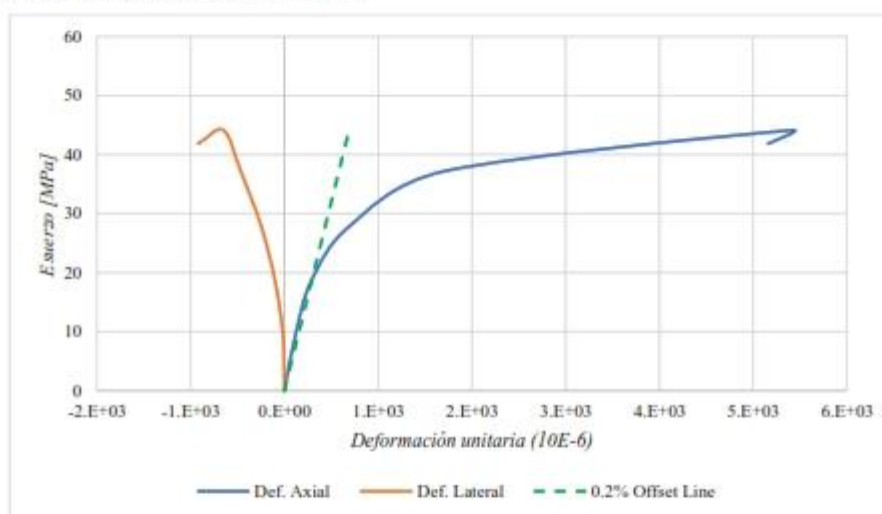
Análisis de resultados del ensayo de compresión simple con módulos de elasticidad en roca No. 11

Código: LAB-CM-12

RESULTADOS:

CARGA [kN]	Esfuerzo [MPa]	Def. Axial [μe]	Def. Lateral [μe]	Strain 0.2%	Stress 0.2%
0.00	0.00	0.00	0.00	0.002	0.00
10.00	9.30	116.74	-13.65	116.742	7.46
20.00	18.60	287.56	-99.23	287.562	18.38
30.00	27.90	697.51	-247.65	697.512	44.59
40.00	37.20	1710.99	-465.84	1710.992	109.38
47.45	44.13	5415.68	-649.88	5415.682	346.22
45.00	41.85	5158.94	-919.11	5158.942	329.80

STRESS VERSUS STRAIN GRAPH:



RESULTADOS:

Parámetro	Valor	Unidades
E_{10MPa}	79.7	GPa
$E_{0.2\%}$	63.9	GPa
$E_{secante}$	8.1	GPa
Coefficiente de Poisson	0.12	

Para el E_{pm} se considera la media aritmética entre los parámetros E_{10MPa} y $E_{0.2\%}$, que son los valores que describen de mejor manera el comportamiento elástico del material, además de no presentar mucha dispersión.

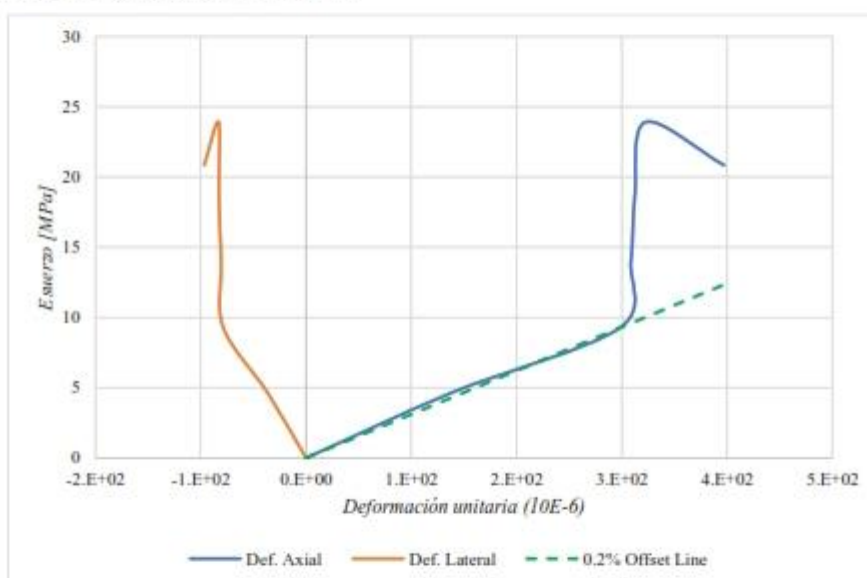
Análisis de resultados del ensayo de compresión simple con módulos de elasticidad en roca No. 12

Código: LAB-CM-13

RESULTADOS:

CARGA [kN]	Esfuerzo [MPa]	Def. Axial [μe]	Def. Lateral [μe]	Strain 0.2%	Stress 0.2%
0.00	0.00	0.00	0.00	0.002	0.00
5.00	4.65	138.55	-36.55	138.552	4.30
10.00	9.30	298.80	-78.65	298.802	9.28
15.00	13.95	308.65	-80.50	308.652	9.59
20.00	18.60	312.36	-82.70	312.362	9.70
25.71	23.91	322.60	-82.94	322.602	10.02
22.41	20.84	397.16	-96.65	397.162	12.34

STRESS VERSUS STRAIN GRAPH:



RESULTADOS:

Parámetro	Valor	Unidades
E_{10MPa}	31.1	GPa
$E_{0.2\%}$	31.1	GPa
E_{const}	74.1	GPa
Coefficiente de Poisson	0.26	

Para el E_{prom} se considera la media aritmética entre los parámetros E_{10MPa} y $E_{0.2\%}$, que son los valores que describen de mejor manera el comportamiento elástico del material, además de no presentar mucha dispersión.

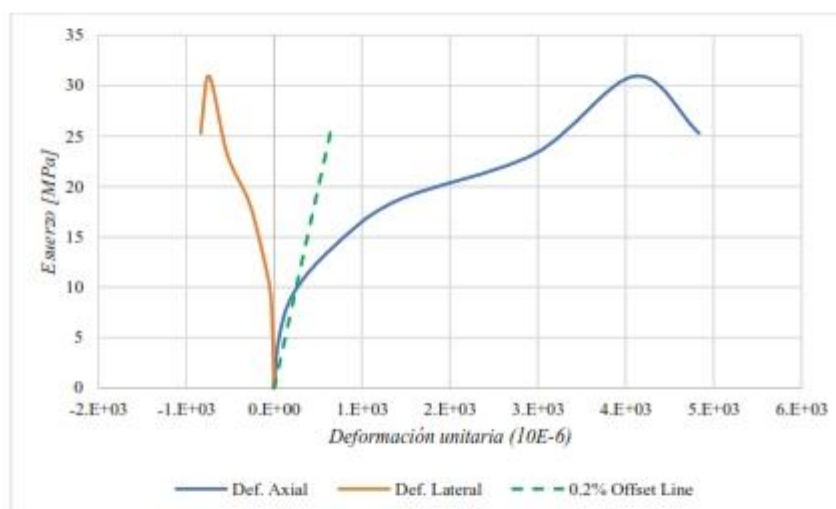
Análisis de resultados del ensayo de compresión simple con módulos de elasticidad en roca No. 13

Código: LAB-CM-14

RESULTADOS:

CARGA [kN]	Esfuerzo [MPa]	Def. Axial [μe]	Def. Lateral [μe]	Strain 0.2%	Stress 0.2%
0.00	0.00	0.00	0.00	0.002	0.00
5.00	4.65	49.21	-14.58	49.212	1.95
10.00	9.30	214.37	-38.74	214.372	8.47
15.00	13.95	668.74	-144.84	668.742	26.43
20.00	18.60	1396.65	-290.87	1396.652	55.21
25.00	23.25	2965.98	-535.06	2965.982	117.24
33.27	30.95	4106.56	-739.18	4106.562	162.32
27.17	25.27	4835.21	-834.98	4835.212	191.13

STRESS VERSUS STRAIN GRAPH:



RESULTADOS:

Parámetro	Valor	Unidades
E_{10MPa}	43.4	GPa
$E_{0.2\%}$	39.5	GPa
$E_{elastic}$	7.8	GPa
Coefficiente de Poisson	0.18	

Para el E_{prom} se considera la media aritmética entre los parámetros E_{10MPa} y $E_{0.2\%}$, que son los valores que describen de mejor manera el comportamiento elástico del material, además de no presentar mucha dispersión.

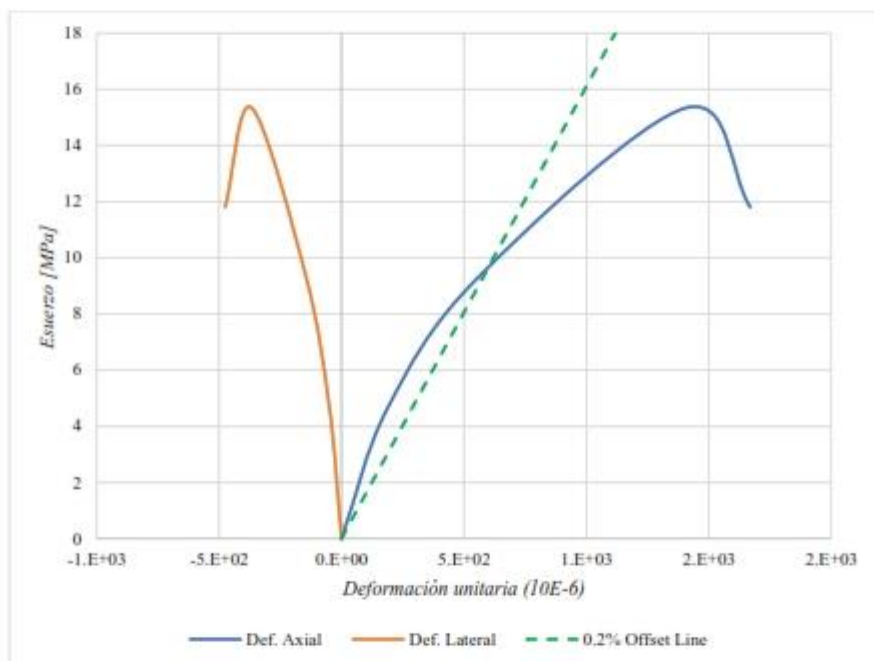
Análisis de resultados del ensayo de compresión simple con módulos de elasticidad en roca No. 14

Código: LAB-CM-15

RESULTADOS:

CARGA [kN]	Esfuerzo [MPa]	Def. Axial [μe]	Def. Lateral [μe]	Strain 0.2%	Stress 0.2%
0.00	0.00	0.00	0.00	0.002	0.00
5.00	4.65	188.46	-48.90	188.462	3.03
10.00	9.30	558.21	-143.95	558.212	8.98
16.50	15.34	1408.50	-366.62	1408.502	22.67
12.69	11.80	1669.69	-475.21	1669.692	26.87

STRESS VERSUS STRAIN GRAPH:



RESULTADOS:

Parámetro	Valor	Unidades
E_{10MPa}	16.7	GPa
$E_{0.2\%}$	16.1	GPa
$E_{secante}$	10.9	GPa
Coefficiente de Poisson	0.26	

Para el E_{prom} se considera la media aritmética entre los parámetros E_{10MPa} y $E_{0.2\%}$, que son los valores que describen de mejor manera el comportamiento elástico del material, además de no presentar mucha dispersión.

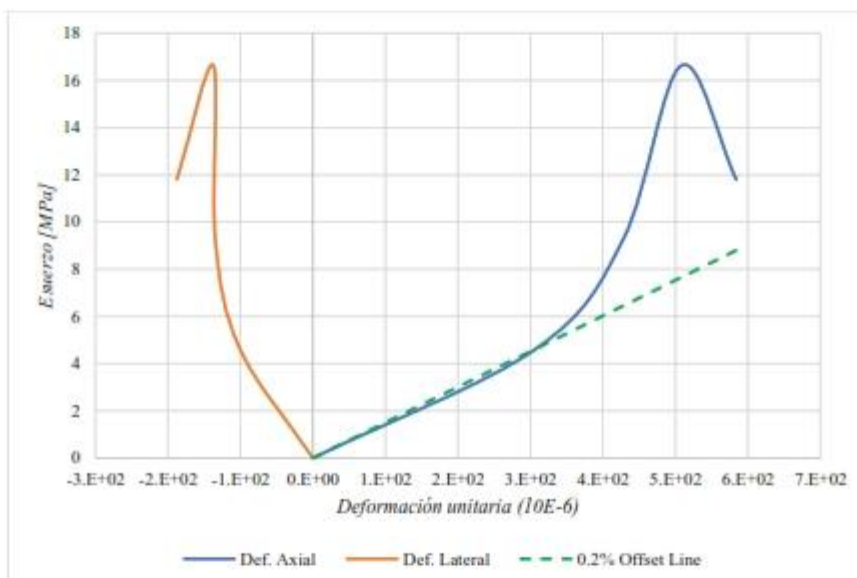
Análisis de resultados del ensayo de compresión simple con módulos de elasticidad en roca No. 15

Código: LAB-CM-16

RESULTADOS:

CARGA [kN]	Esfuerzo [MPa]	Def. Axial [μe]	Def. Lateral [μe]	Strain 0.2%	Stress 0.2%
0.00	0.00	0.00	0.00	0.002	0.00
5.00	4.65	308.65	-100.99	308.652	4.65
10.00	9.30	428.65	-134.74	428.652	6.46
17.88	16.63	508.53	-137.30	508.532	7.66
12.69	11.80	583.99	-187.65	583.992	8.80

STRESS VERSUS STRAIN GRAPH:



RESULTADOS:

Parámetro	Valor	Unidades
E_{10MPa}	21.7	GPa
$E_{0.2\%}$	15.1	GPa
E_{secant}	32.7	GPa
Coefficiente de Poisson	0.27	

Para el E_{pm} se considera la media aritmética entre los parámetros E_{10MPa} y $E_{0.2\%}$, que son los valores que describen de mejor manera el comportamiento elástico del material, además de no presentar mucha dispersión.

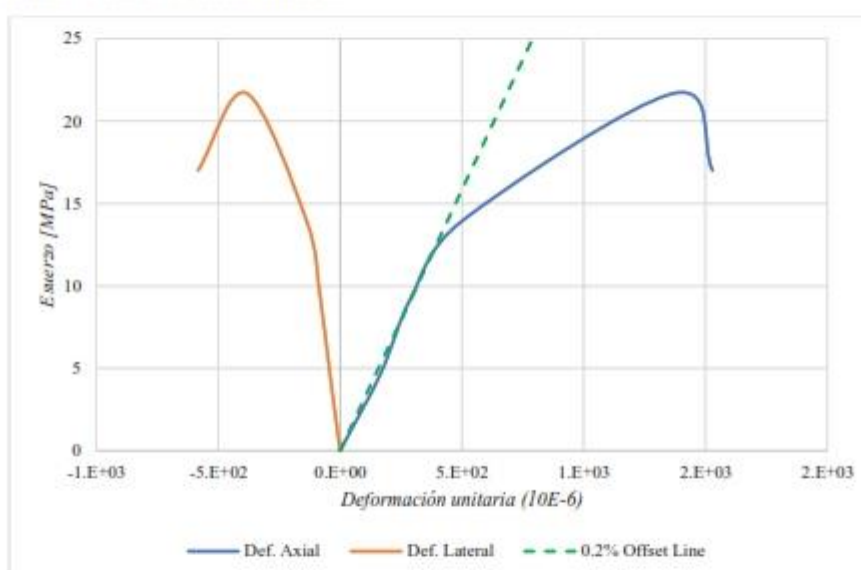
Análisis de resultados del ensayo de compresión simple con módulos de elasticidad en roca No. 16

Código: LAB-CM-17

RESULTADOS:

CARGA [kN]	Esfuerzo [MPa]	Def. Axial [μe]	Def. Lateral [μe]	Strain 0.2%	Stress 0.2%
0.00	0.00	0.00	0.00	0.002	0.00
5.00	4.65	165.75	-41.56	165.752	5.25
10.00	9.30	292.12	-81.65	292.122	9.24
15.00	13.95	501.56	-137.36	501.562	15.87
23.33	21.70	1373.04	-384.45	1373.042	43.45
18.29	17.01	1528.98	-582.54	1528.982	48.38

STRESS VERSUS STRAIN GRAPH:



RESULTADOS:

Parámetro	Valor	Unidades
E_{10MPa}	31.8	GPa
$E_{0.2\%}$	31.6	GPa
$E_{elastic}$	15.8	GPa
Coefficiente de Poisson	0.28	

Para el E_{pm} se considera la media aritmética entre los parámetros E_{10MPa} y $E_{0.2\%}$, que son los valores que describen de mejor manera el comportamiento elástico del material, además de no presentar mucha dispersión.

Anexo 5: Ensayo de Carga Puntual (PLT)



IGEMPA

RESULTADOS DE ENSAYO DE CARGA PUNTUAL
LABORATORIO DE MECANICA DE ROCAS Y PETROGRAFIA - FIGEMPA
Resumen Ejecutivo

Universidad Central del Ecuador

Facultad de Ingeniería en Geología, Minas, Petróleos y Ambiental

Código:
SPC-PLT-001

Fecha:
2022-11-22

Estado:
Energado

ENSAYO DE CARGA PUNTUAL (POINT LOAD TEST)

Ubicación: Moxoral
 Litología: Mármol – Unidad Laurel

RESULTADOS:

No.	Código	Tipo Muestra	Tipo Ensayo	L [mm]	W ₁ [mm]	W ₂ [mm]	W [mm]	D [mm]	A [mm ²]	DW	Carga [kN]	Dp ² [mm ²]	I _a [MPa]	F	I _{c(50)} [MPa]	σ _c [MPa]	Litología
1	LAB-CM03	Núcleo	Diámetro	20.0	33.0	45.0	39.0	37.0	1443.0	0.95	4.50	1369.0	3.29	0.87	2.877	20.09	Mármol
2	LAB-CM04	Núcleo	Axial	20.0	44.0	30.0	37.0	38.0	1406.0	1.03	-	-	-	-	-	-	Mármol
3	LAB-CM05	Núcleo	Axial	18.0	37.0	37.0	37.0	20.0	740.0	0.54	7.50	942.2	7.96	0.80	6.397	44.74	Mármol
4	LAB-CM06	Núcleo	Diámetro	30.0	57.0	60.0	58.5	37.0	2104.5	0.63	6.55	1369.0	4.78	0.87	4.178	29.25	Mármol
5	LAB-CM07	Núcleo	Axial	18.0	37.0	37.0	37.0	25.0	925.0	0.68	7.20	1177.7	6.11	0.84	5.161	36.13	Mármol
6	LAB-CM08	Núcleo	Axial	18.0	37.0	37.0	37.0	30.0	1110.0	0.81	7.10	1413.3	5.02	0.88	4.479	30.93	Mármol
7	LAB-CM09	Núcleo	Diámetro	20.0	42.0	42.0	42.0	37.0	1554.0	0.88	7.20	1369.0	5.26	0.87	4.593	32.15	Mármol
8	LAB-CM10	Núcleo	Axial	18.0	37.0	37.0	37.0	20.0	740.0	0.54	5.15	942.2	5.47	0.80	4.388	30.72	Mármol
9	LAB-CM11	Núcleo	Diámetro	21.0	37.0	37.0	37.0	21.0	777.0	0.57	4.40	441.0	9.98	0.68	6.753	47.27	Mármol
10	LAB-CM12	Núcleo	Axial	19.0	50.0	55.0	52.5	23.0	1155.0	0.42	8.60	470.6	5.85	0.89	5.190	36.33	Mármol
11	LAB-CM13	Núcleo	Axial	16.0	45.0	51.0	48.0	22.0	1104.0	0.48	7.80	1405.7	5.55	0.88	4.875	34.12	Mármol
12	LAB-CM14	Núcleo	Diámetro	15.0	37.0	37.0	37.0	24.0	888.0	0.65	4.25	576.0	7.38	0.72	5.303	37.12	Mármol
13	LAB-CM15	Núcleo	Axial	14.0	35.0	40.0	37.5	25.0	937.5	0.67	4.10	1193.7	3.43	0.85	2.908	20.36	Mármol
14	LAB-CM16	Núcleo	Axial	16.0	34.0	41.0	37.5	26.0	975.0	0.69	4.40	1241.4	3.54	0.85	3.628	21.19	Mármol
15	LAB-CM17	Núcleo	Diámetro	17.0	37.0	37.0	37.0	27.0	909.0	0.73	3.10	729.0	4.25	0.76	3.223	22.56	Mármol
16	LAB-CM02	Núcleo	Axial	16.0	38.0	43.0	40.5	28.0	1134.0	0.69	6.90	1443.9	4.78	0.88	4.224	29.57	Mármol

Observaciones: La constante para el cálculo de la resistencia uniaxial no confinada es de 7.

Elaborado por:



Ing. Jessica Reinoso
Técnico Docente


Aprobado por:



Ing. Daibny Burbano MSc.
Director de Carrera de Ingeniería de Minas



Anexo 6: Ensayos de Compresión Simple para la validación de los modelos de regresión



**LABORATORIO DE
MECÁNICA DE ROCAS Y PETROGRAFÍA**

ENSAYO DE COMPRESIÓN SIMPLE EN ROCA

Cliente: Ransly Moposita Fecha: 27-03-2024
 Código: C-MIA
 Coordenadas UTM: 771824.6; 28272.9
 Ubicación: Otavalo – Selva Alegre - Cuerpo 1
 Litología: Mármol – Unidad Laurel
 Densidad media de la roca: 25.51 kN/m³

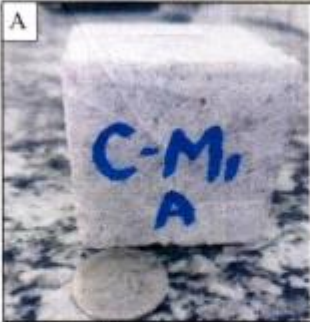
RESULTADOS:

Parámetro	Valor	Unidades
Gradiente	0.067	[MPa/s]
Largo (L)	25.00	[mm]
Ancho (A)	25.00	[mm]
Área	2500	[mm ²]
Carga Máxima	56.0	[kN]
Resistencia Máxima	22.4	[MPa]
Módulo de Young secante	36.100	[GPa]


CURVA ESFUERZO VS DEFORMACIÓN UNITARIA

CARGA [kN]	Esfuerzo [MPa]	Def. Axial [µε]
0.00	0.00	0.00
10.00	4.00	130.85
20.00	8.00	244.07
30.00	12.00	312.98
40.00	16.00	396.65
50.00	20.00	498.62
56.00	22.40	620.50
50.00	20.00	740.11
45.00	18.00	760.00


REGISTRO FOTOGRÁFICO:





A) Muestra antes de la rotura



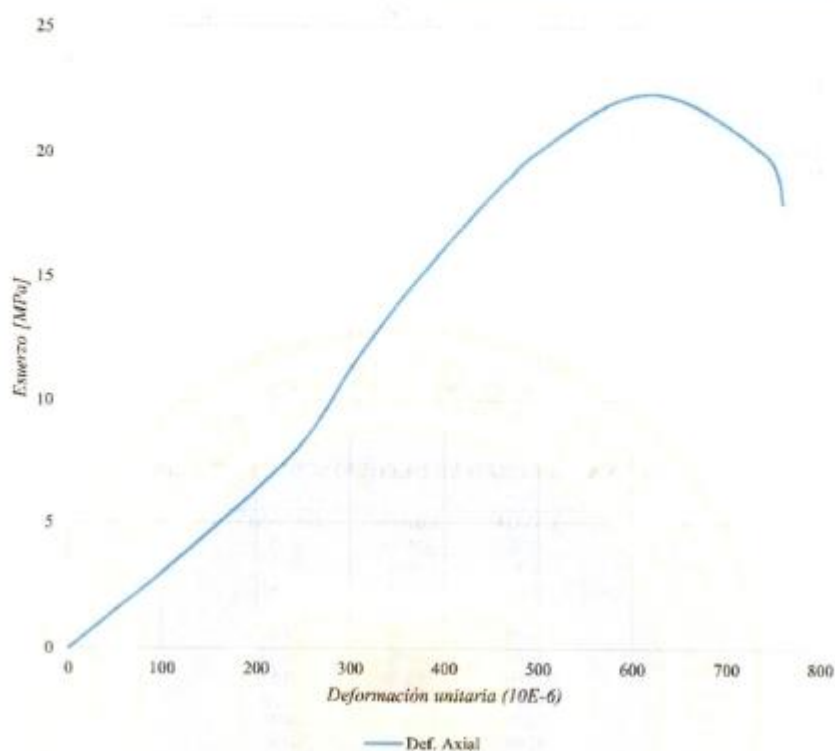
B) Muestra después de la rotura

 Dirección: Universidad Central del Ecuador
 Ciudadela Universitaria, calle Gallo Sobral y Jerónimo Leiton
 Facultad de Ingeniería en Geología, Minas, Petróleos y Ambiental
 Planta Baja, Quito-Ecuador

 2550-588 – 2566-726, ext. 113, 114.
 escuela.minas.igempa@uce.edu.ec



LABORATORIO DE
MECÁNICA DE ROCAS Y PETROGRAFÍA



Elaborado por:	Aprobado por:
Ing. Jessica Reinoso Técnico Docente	Ing. Danny Burbano MSc. Director de Carrera de Ingeniería de Minas



Dirección: Universidad Central del Ecuador
Ciudadela Universitaria, calle Carillo Sobral y Jerónimo León
Facultad de Ingeniería en Geología, Minas, Petróleos y Ambiental
Planta Baja, Quito-Ecuador



2550-588 – 2566-726 ext. 113, 114.



escuela.minas.figempa@uce.edu.ec



LABORATORIO DE
MECÁNICA DE ROCAS Y PETROGRAFÍA

ENSAYO DE COMPRESIÓN SIMPLE CON MÓDULOS ELÁSTICOS EN ROCA

Cliente: Randy Moposita

Fecha: 27-03-2024

Código: C-M1B

Coordenadas UTM: 771813.7; 28294.6

Ubicación: Otavalo – Selva Alegre - Cuerpo 1

Litología: Mármol – Unidad Laurel

Densidad media de la roca: 25.18 kN/m³

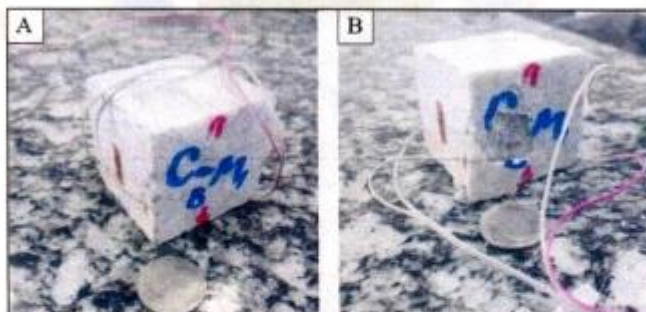
RESULTADOS:

Parámetro	Valor	Unidades
Gradiente	0.067	[MPa/s]
Largo (L)	25.00	[mm]
Ancho (A)	25.00	[mm]
Área	2500	[mm ²]
Carga Máxima	71.15	[kN]
Resistencia Máxima	28.46	[MPa]
Módulo de Young secante	36.690	[GPa]
Cociente Poisson	0.23	

CURVA ESFUERZO VS DEFORMACIÓN UNITARIA

CARGA [kN]	Esfuerzo [MPa]	Def. Axial [με]	Def. Lateral [με]
0.00	0.00	0.00	0.00
10.00	4.00	98.55	-22.34
20.00	8.00	187.69	-43.54
30.00	12.00	303.75	-78.81
40.00	16.00	395.68	-106.98
50.00	20.00	498.62	-135.32
60.00	24.00	607.41	-161.20
71.15	28.46	775.69	-178.41
65.00	26.00	784.35	-180.65
62.00	24.80	911.65	-165.35

REGISTRO FOTOGRÁFICO:



A) Muestra antes de la rotura

B) Muestra después de la rotura



Dirección: Universidad Central del Ecuador
Ciudadela Universitaria, calle Gatto Sobral y Jerónimo Leiton
Facultad de Ingeniería en Geología, Minas, Petróleos y Ambiental
Planta Baja, Quito-Ecuador



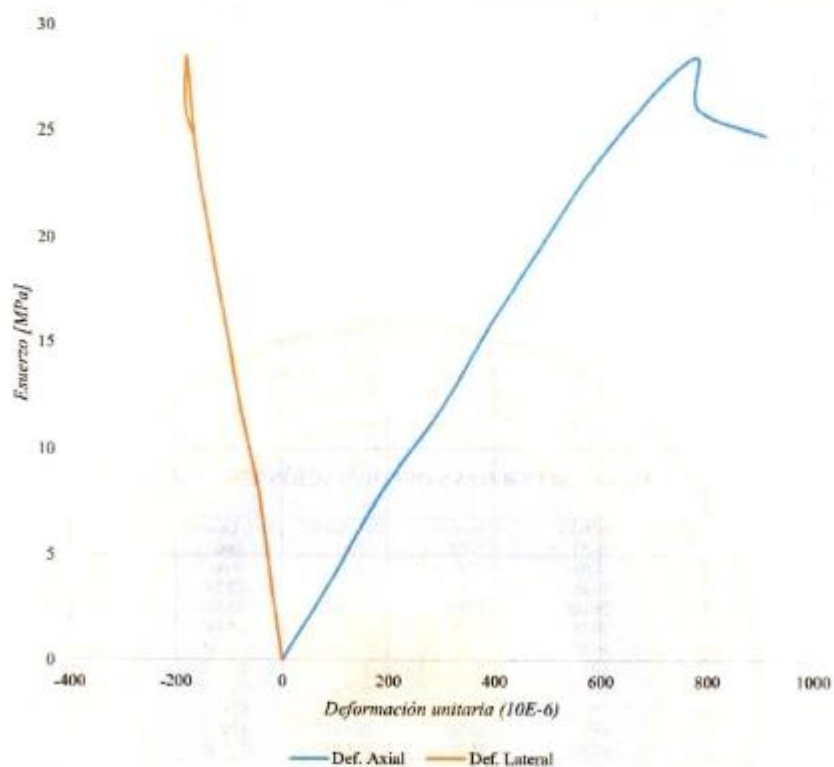
2550-588 – 2566-726, ext. 113, 114



escuela.minas.igmpa@uce.edu.ec



LABORATORIO DE
MECÁNICA DE ROCAS Y PETROGRAFÍA



Elaborado por:	Aprobado por:
Ing. Jessica Reinoso Técnico Docente	Ing. Danny Burbano MSc. Director de Carrera de Ingeniería de Minas



Dirección: Universidad Central del Ecuador
Ciudadela Universitaria, calle Gallo Sobral y Jerónimo Leiton
Facultad de Ingeniería en Geología, Minas, Petróleos y Ambiente
Planta Roja, Quito-Ecuador



2550-588 – 2566-726, ext. 113, 114.



escuela.minas.igempa@uce.edu.ec



LABORATORIO DE
MECÁNICA DE ROCAS Y PETROGRAFÍA

ENSAYO DE COMPRESIÓN SIMPLE CON MÓDULOS ELÁSTICOS EN ROCA

Cliente: Randy Moposita

Fecha: 27-03-2024

Código: C-M2

Coordenadas UTM: 771942.5; 28394.5

Ubicación: Otavalo – Selva Alegre – Cuerpo 2

Litología: Mármol – Unidad Laurel

Densidad media de la roca: 26.45 kN/m³

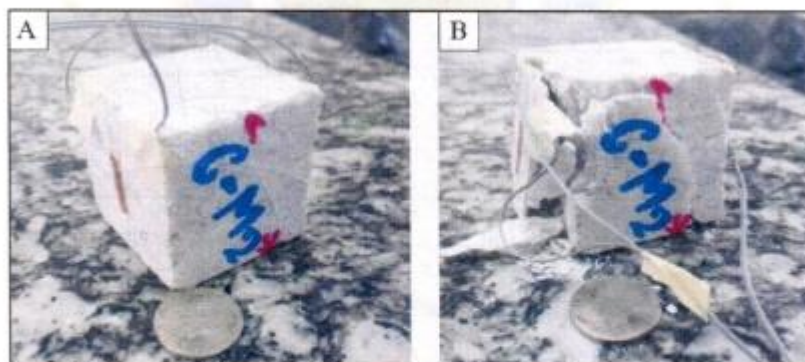
RESULTADOS:

Parámetro	Valor	Unidades
Gradiente	0.067	[MPa/s]
Largo (L)	25.00	[mm]
Ancho (A)	25.00	[mm]
Área	2500	[mm ²]
Carga Máxima	65.28	[kN]
Resistencia Máxima	26.11	[MPa]
Módulo de Young secante	39.111	[GPa]
Coefficiente Poisson	0.21	

CURVA ESFUERZO VS DEFORMACIÓN UNITARIA

CARGA [kN]	Esfuerzo [MPa]	Def. Axial [μm]	Def. Lateral [μm]
0.00	0.00	0.00	0.00
10.00	4.00	106.54	-22.65
20.00	8.00	197.61	-46.65
30.00	12.00	298.40	-67.53
40.00	16.00	401.56	-87.07
50.00	20.00	496.05	-107.14
60.00	24.00	596.22	-124.33
65.28	26.11	667.59	-140.19
60.00	24.00	683.11	-150.64
58.00	23.20	703.87	-145.65

REGISTRO FOTOGRÁFICO:



A) Muestra antes de la rotura

B) Muestra después de la rotura



Dirección: Universidad Central del Ecuador
Ciudadela Universitaria, calle Gallo Sobral y Jerónimo Leifón
Facultad de Ingeniería en Geología, Minas, Petróleos y Ambiental
Planta Baja, Quito-Ecuador



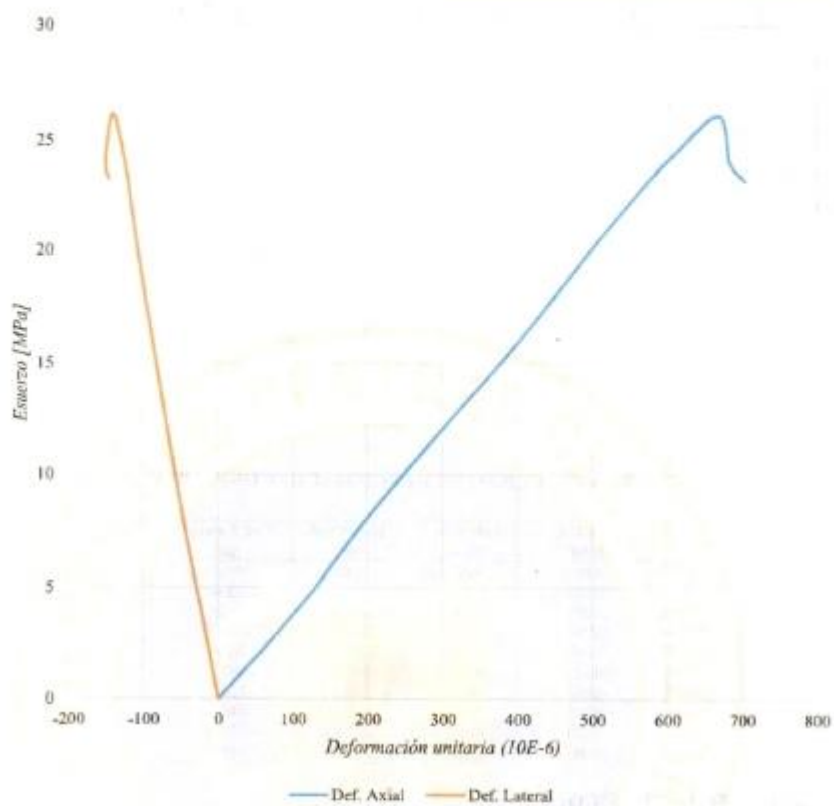
2550-588 – 2566-726, ext. 113, 114



escuela.minas.igmpa@uce.edu.ec



LABORATORIO DE
MECÁNICA DE ROCAS Y PETROGRAFÍA



Elaborado por:	Aprobado por:
Ing. Jessica Reinoso Técnico Docente	Ing. Danny Burbano MSc. Director de Carrera de Ingeniería de Minas



Dirección: Universidad Central del Ecuador,
Ciudadela Universitaria, calle Gaffo Sobral y Jerónimo Leiton,
Facultad de Ingeniería en Geología, Minas, Petróleos y Ambiental
Planta Baja, Quito-Ecuador



2550-588 – 2566-726, ext. 113, 114.



escuela.minas.figempa@uce.edu.ec



LABORATORIO DE
MECÁNICA DE ROCAS Y PETROGRAFÍA

ENSAYO DE COMPRESIÓN SIMPLE EN ROCA

Cliente: Randy Mezosita

Fecha: 27-03-2024

Código: C-M3

Coordenadas UTM: 772044.0; 28584.1

Ubicación: Otavalo – Selva Alegre - Cuerpo 3

Litología: Mármol – Unidad Laurel

Densidad media de la roca: 27.45 kN/m³

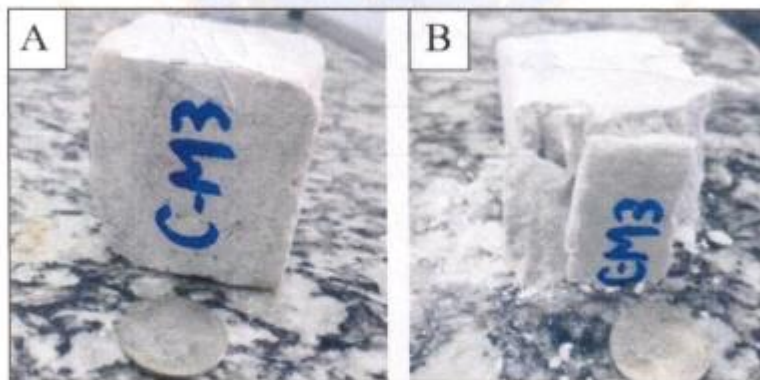
RESULTADOS:

Parámetro	Valor	Unidades
Gradiente	0.967	[MPa/s]
Largo (L)	25.00	[mm]
Ancho (A)	25.00	[mm]
Área	2500	[mm ²]
Carga Máxima	85.75	[kN]
Resistencia Máxima	34.30	[MPa]
Módulo de Young secante	17.665	[GPa]

CURVA ESFUERZO VS DEFORMACIÓN UNITARIA

CARGA [kN]	Esfuerzo [MPa]	Def. Axial [μ]
0.00	0.00	0.00
10.00	4.00	67.82
20.00	8.00	136.11
30.00	12.00	238.18
40.00	16.00	385.08
50.00	20.00	663.36
60.00	24.00	1225.53
70.00	28.00	1525.51
85.75	34.30	1937.79
75.00	30.00	2000.54
73.00	29.20	2100.74

REGISTRO FOTOGRÁFICO:



A) Muestra antes de la rotura

B) Muestra después de la rotura



Dirección: Universidad Central del Ecuador
Ciudadela Universitaria, calle Gallo Sobral y Jerónimo Laitón
Facultad de Ingeniería en Geología, Minas, Petróleos y Ambiental
Planta Baja, Quito-Ecuador



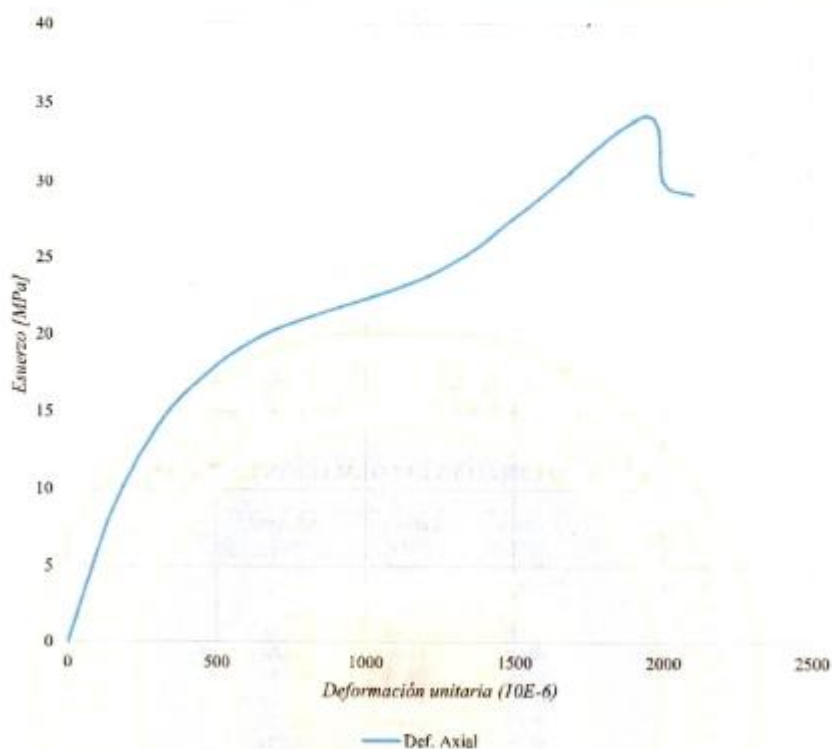
2650-588 – 2566-726, ext. 113, 114.



escuela.minas.figempa@uce.edu.ec



LABORATORIO DE
MECÁNICA DE ROCAS Y PETROGRAFÍA



Elaborado por:	Aprobado por:
Ing. Jessica Reinoso Técnico Docente	Ing. Danny Burbano MSc. Director de Carrera de Ingeniería de Minas



Dirección: Universidad Central del Ecuador
Ciudadela Universitaria, calle Gallo Sobral y Jerónimo León
Facultad de Ingeniería en Geología, Minas, Petróleos y Ambiental
Planta Baja, Quito-Ecuador



2550-588 – 2566-726 ext. 113, 114.



escuela.minas.igempa@uce.edu.ec

Anexo 7: Análisis de los Ensayos de Compresión Simple para la validación de los modelos de regresión

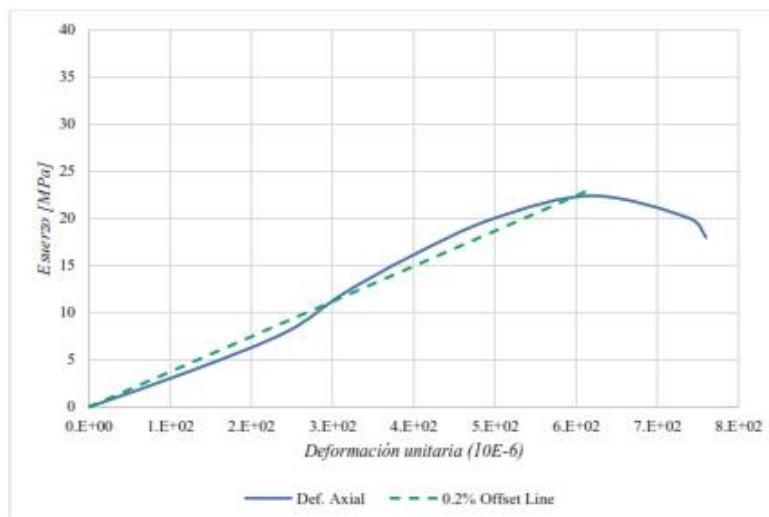
Análisis de resultados del ensayo de compresión simple en roca No. 1

Código: C-MIA

RESULTADOS:

CARGA [kN]	Esfuerzo [MPa]	Def. Axial [μe]	Strain 0.2%	Stress 0.2%
0.00	0.00	0.00	0.002	0.00
10.00	4.00	130.85	130.852	4.89
20.00	8.00	244.07	244.072	9.12
30.00	12.00	312.98	312.982	11.69
40.00	16.00	396.65	396.652	14.81
50.00	20.00	498.62	498.622	18.62
56.00	22.40	620.50	620.502	23.17
50.00	20.00	740.11	740.112	27.64
45.00	18.00	760.00	760.002	28.38

STRESS VERSUS STRAIN GRAPH:



RESULTADOS:

Parámetro	Valor	Unidades
E_{10MPa}	30.6	GPa
$E_{0.2\%}$	37.3	GPa
$E_{secante}$	36.1	GPa

Para el E_{pm} se considera la media aritmética entre los parámetros E_{10MPa} y $E_{0.2\%}$, que son los valores que describen de mejor manera el comportamiento elástico del material, además de no presentar mucha dispersión entre sí.

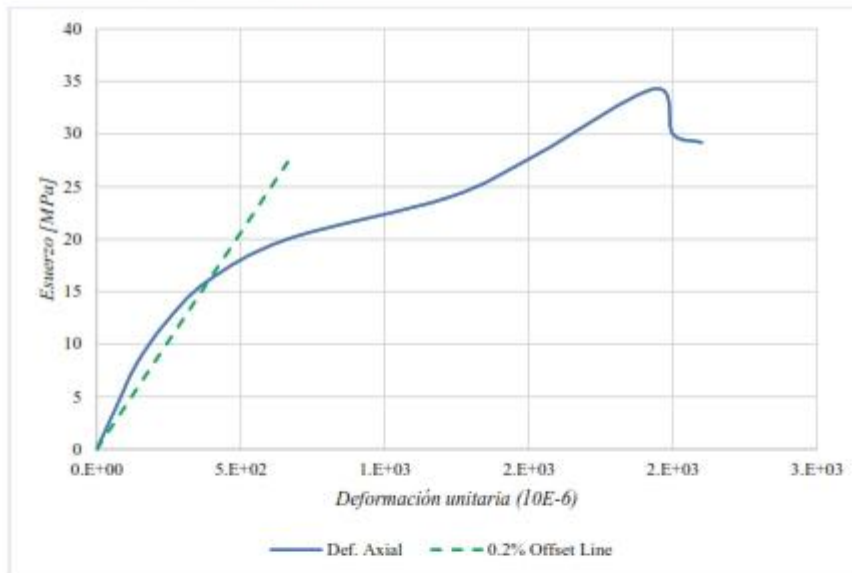
Análisis de resultados del ensayo de compresión simple en roca No. 2

Código: C-M3

RESULTADOS:

CARGA [kN]	Esfuerzo [MPa]	Def. Axial [με]	Strain 0.2% [με]	Stress 0.2% [MPa]
0.00	0.00	0.00	0.002	0.00
10.00	4.00	67.82	67.822	2.79
20.00	8.00	136.11	136.112	5.61
30.00	12.00	238.18	238.182	9.82
40.00	16.00	385.08	385.082	15.87
50.00	20.00	663.36	663.362	27.34
60.00	24.00	1225.53	1225.532	50.50
70.00	28.00	1525.51	1525.512	62.86
85.75	34.30	1937.79	1937.792	79.85
75.00	30.00	2000.54	2000.542	82.44
73.00	29.20	2100.74	2100.742	86.57

STRESS VERSUS STRAIN GRAPH:



RESULTADOS:

Parámetro	Valor	Unidades
E_{10MR_2}	59.0	GPa
$E_{0.2\%}$	41.2	GPa
E_{escate}	17.7	GPa

Para el E_{pmin} se considera la media aritmética entre los parámetros E_{10MR_2} y $E_{0.2\%}$ que son los valores que describen de mejor manera el comportamiento elástico del material, además de no presentar mucha dispersión entre sí.

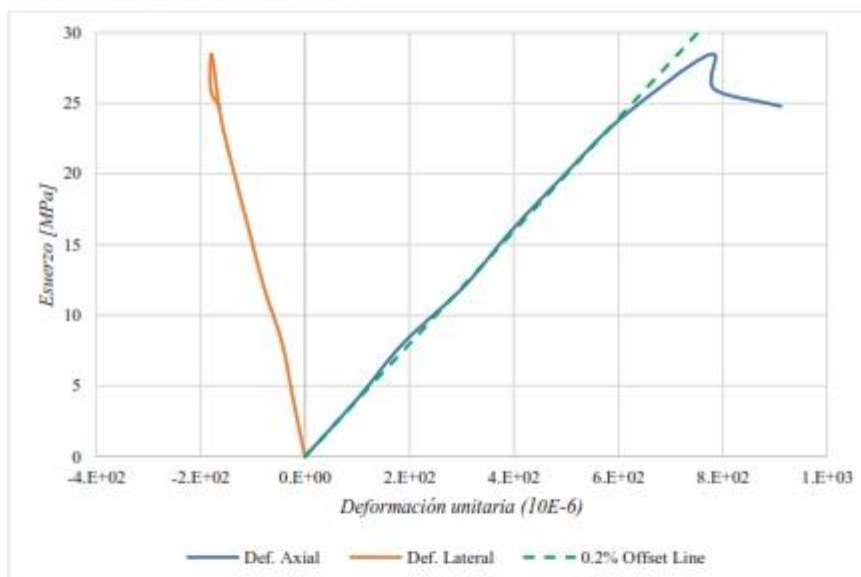
Análisis de resultados del ensayo de compresión simple con módulos de elasticidad en roca No. 3

Código: C-MIB

RESULTADOS:

CARGA [kN]	Esfuerzo [MPa]	Def. Axial [μe]	Def. Lateral [μe]	Strain 0.2%	Stress 0.2%
0.00	0.00	0.00	0.00	0.002	0.00
10.00	4.00	98.55	-22.34	98.552	3.93
20.00	8.00	187.69	-43.54	187.692	7.48
30.00	12.00	303.75	-78.81	303.752	12.11
40.00	16.00	395.68	-106.98	395.682	15.78
50.00	20.00	498.62	-135.32	498.622	19.88
60.00	24.00	607.41	-161.20	607.412	24.22
71.15	28.46	775.69	-178.41	775.692	30.93
65.00	26.00	784.35	-180.65	784.352	31.27
62.00	24.80	911.65	-165.35	911.652	36.35

STRESS VERSUS STRAIN GRAPH:



RESULTADOS:

Parámetro	Valor	Unidades
E_{10MPa}	40.6	GPa
$E_{0.2\%}$	39.9	GPa
E_{corte}	36.7	GPa
Coefficiente de Poisson	0.23	

Para el $E_{0.2\%}$ se considera la media aritmética entre los parámetros E_{10MPa} y $E_{0.2\%}$, que son los valores que describen de mejor manera el comportamiento elástico del material, además de no presentar mucha dispersión entre sí.

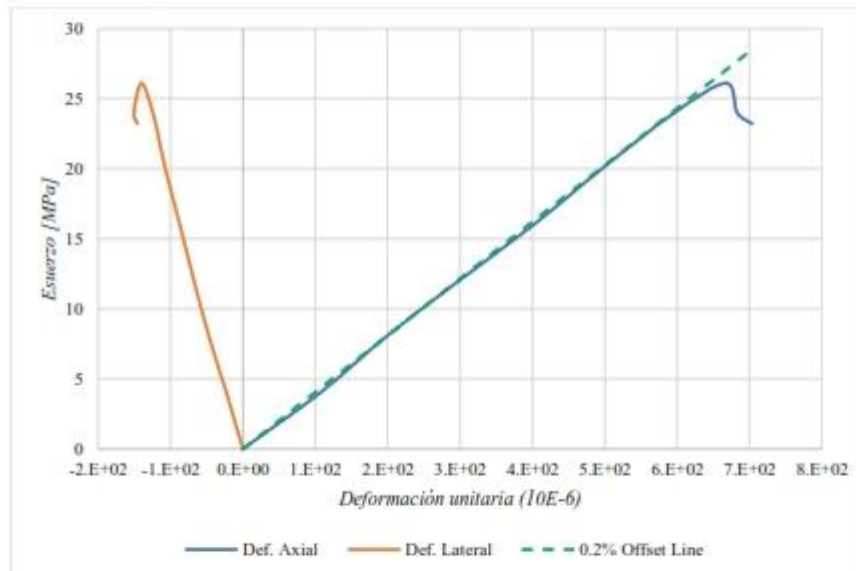
Análisis de resultados del ensayo de compresión simple con módulos de elasticidad en roca No. 4

Código: C-M2

RESULTADOS:

CARGA [kN]	Esfuerzo [MPa]	Def. Axial [μe]	Def. Lateral [μe]	Strain 0.2%	Stress 0.2%
0.00	0.00	0.00	0.00	0.002	0.00
10.00	4.00	106.54	-22.65	106.542	4.32
20.00	8.00	197.61	-46.65	197.612	8.01
30.00	12.00	298.40	-67.53	298.402	12.09
40.00	16.00	401.56	-87.07	401.562	16.27
50.00	20.00	496.05	-107.14	496.052	20.10
60.00	24.00	596.22	-124.33	596.222	24.16
65.28	26.11	667.59	-140.19	667.592	27.05
60.00	24.00	683.11	-150.64	683.112	27.68
58.00	23.20	703.87	-145.65	703.872	28.52

STRESS VERSUS STRAIN GRAPH:



RESULTADOS:

Parámetro	Valor	Unidades
E_{100MPa}	37.5	GPa
$E_{0.2\%}$	40.5	GPa
E_{acento}	39.1	GPa
Coefficiente de Poisson	0.21	

Para el E_{prom} se considera la media aritmética entre los parámetros E_{100MPa} y $E_{0.2\%}$, que son los valores que describen de mejor manera el comportamiento elástico del material, además de no presentar mucha dispersión entre sí.