UNIVERSIDAD NACIONAL DE MOQUEGUA

FACULTAD DE INGENIERÍAS

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS

TESIS

"ESTIMACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN UNIAXIAL (UCS) A PARTIR DEL ÍNDICE DE CARGA PUNTUAL ($IS_{(50)}$) PARA EL ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES ROCOSOS A NIVEL DE BANCO-BERMA EN UNA MINA A CIELO ABIERTO"

PRESENTADO POR:

BACH. OLIVER HUARACHI LAURA

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO DE MINAS

MOQUEGUA - PERÚ

2025

UNAM
UNIVERSIDAD NACIONAL DE MOQUEGUA

ESCUELA PROFESIONAL DE
INGENIERÍA DE MINAS

Folio N° 073

ACTA DE SUSTENTACIÓN

I. Modalidad:

Tesis : [X]

Trabajo de Suficiencia Profesional : [ ]

Otro: ..... : [ ]

II. Documento de aprobación para la sustentación:
Resolución de Consejo de Facultad Nº 314-2025-CF-FAIN-UNAM

Fecha: 17.12.2025

III. El Jurado ha dictaminado la (el) TESIS, TITULADO:
ESTIMACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN UNIAXIAL (UCS) A PARTIR DEL ÍNDICE DE CARGA PUNTUAL ($Is_{(50)}$) PARA EL ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES ROCOSOS A NIVEL DE BANCO-BERMA EN UNA MINA A CIELO ABIERTO

Bachiller: Oliver HUARACHI LAURA

Asesor Principal: Christ Jesus BARRIGA PARIA

Co-Asesor : .....

IV. Se dictamina:

Como: APROBADO por UNANIMIDAD la sustentación de manera:

Presencial [X] Virtual [ ]

Con nota: Quince (15) por lo que; Sí [X] No [ ]

Opta el Título Profesional de INGENIERO DE MINAS.

Siendo las 12:00 horas, del 18 de diciembre del año 2025 se procede con la firma en conformidad de lo dictaminado por el Jurado.

Presidente
Dr. Arquímedes León VARGAS LUQUE
(Nombres y Apellidos)

Primer Miembro
Bertha Silvana VERA BARRIOS
(Nombres y Apellidos)

Segundo Miembro
Dr. Jorge Luis Tomas FLOREZ SALAS
(Nombres y Apellidos)

Bachiller
Oliver HUARACHI LAURA
(Nombres y Apellidos)

DEDICATORIA

A mis padres, por su esfuerzo incondicional, su ejemplo de perseverancia y por enseñarme que la educación es el camino más seguro hacia un futuro mejor.
A mi familia, que con su apoyo constante y palabras de ánimo me sostuvieron en los momentos más desafiantes de este proceso académico.
A quienes creyeron en mí incluso cuando las dificultades parecían mayores, dedico este logro con profundo agradecimiento y cariño.

AGRADECIMIENTOS

Expreso mi sincero agradecimiento a la Universidad Nacional de Moquegua, a la Escuela Profesional de Ingeniería de Minas y a todos los docentes que, con profesionalismo y dedicación, formaron en mí las bases del conocimiento que hoy sostienen este trabajo de investigación.

Agradezco especialmente a mi asesor Dr. Christ Jesus Barriga Paria, por su guía, paciencia, observaciones oportunas y por compartir su experiencia para fortalecer el rigor científico de esta investigación.

Mi gratitud al equipo técnico y profesionales de la unidad minera donde se desarrolló este estudio, quienes brindaron facilidades, orientación y acceso a la información necesaria para la elaboración de esta tesis.

Finalmente, a mis amigos y familiares que me acompañaron en este camino con su apoyo moral y motivación constante, les debo parte fundamental de este logro académico.

RESUMEN

El presente estudio tuvo como objetivo estimar la resistencia a la compresión uniaxial (UCS) a partir del índice de carga puntual Is_{50}, mediante factores de correlación ajustados por litología, para su aplicación en el análisis de estabilidad de taludes banco-berma en una mina a cielo abierto ubicada en la región Moquegua. Para ello, se emplearon ensayos Is_{50} y UCS obtenidos de campañas geotécnicas, los cuales fueron depurados considerando únicamente fallas por matriz con el fin de representar la resistencia intacta del macizo rocoso. Se determinaron correlaciones UCS - Is_{50} específicas para cuatro litologías representativas: Pórfido Temprano, Pórfido Tardío, Granodiorita e Ignimbrita, obteniendo modelos lineales forzados al origen con alta significancia estadística ($p < 0.001$) y coeficientes de determinación entre 0.58 y 0.93. Los factores K derivados (15.82 - 22.75) fueron consistentes con la literatura internacional y permitieron estimar valores de UCS confiables para las condiciones geomecánicas del yacimiento. Posteriormente, la UCS estimada fue incorporada en modelos de estabilidad elaborados en el software Slide, evaluando escenarios estáticos y pseudoestáticos mediante los métodos de equilibrio límite Morgenstern-Price y Bishop Simplificado. Los resultados evidenciaron que el uso de factores K ajustados por litología reduce de manera sistemática los factores de seguridad respecto a los obtenidos con valores generalizados de literatura, mostrando reducciones más marcadas en litologías volcánicas como la Ignimbrita. Esto demuestra que la calibración local de la resistencia intacta mejora la precisión del modelamiento geotécnico y evita sobreestimaciones de estabilidad en taludes operativos. En conjunto, la investigación confirma que el índice de carga puntual constituye una herramienta eficaz para estimar la resistencia intacta del macizo rocoso y que su integración en análisis banco-berma aporta parámetros más representativos para la toma de decisiones en diseño y operación minera.

Palabras clave: resistencia a la compresión uniaxial, índice de carga puntual, correlaciones UCS - Is_{50}, estabilidad de taludes, equilibrio límite.

ABSTRACT

This study aimed to estimate uniaxial compressive strength (UCS) from the point load index Is_{50}, using lithology-adjusted measurement factors, for application in bench-berm slope stability analysis at an open-pit mine located in the Moquegua region. Is_{50} and UCS test results obtained from geotechnical campaigns were used, which were refined by considering only matrix failures to represent the intact strength of the Rock mass. Specific UCS - Is_{50} correlations were determined for four representative lithologies: Early Porphyry, Late Porphyry, Granodiorite, and Ignimbrite, yielding linear models forced to the origin with high statistical significance ($p < 0.001$) and coefficients of determination between 0.58 and 0.93. The derived K factors (15.82-22.75) were consistent with international literature and allowed for the estimation of reliable UCS values for the geomechanical conditions of the deposit. Subsequently, the estimated UCS was incorporated into stability models developed using the Slide software, evaluating static and pseudo-static scenarios using the Morgenstern-Price and Simplified Bishop limit equilibrium methods. The results showed that the use of lithology-adjusted K factors systematically reduces the safety factors compared to those obtained with generalized values from the literature, with more pronounced reductions in volcanic lithologies such as Ignimbrite. This demonstrates that local calibration of intact strength improves the accuracy of geotechnical modeling and avoids overestimations of stability in operational slopes. Overall, the research confirms that the point load index is an effective tool for estimating the intact strength of the Rock mass and that its integration into bench-berm analysis provides more representative parameters for decision-making in mine design and operation.

Keywords: uniaxial compressive strength, point load index, UCS - Is_{50} correlations, slope stability, limit equilibrium.

Índice

I. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN 15

1.1. Descripción y formulación del problema 15
1.1.1. Formulación del problema de investigación 16
1.1.2. Interrogante General 16
1.1.3. Interrogantes Específicas 16
1.2. Justificación 16
1.2.1. Justificación Práctica 17
1.2.2. Justificación Metodológica 17
1.2.3. Justificación Económica 18
1.2.4. Justificación Social 18
1.2.5. Justificación Ambiental 18
1.2.6. Justificación Teórica 19
1.3. Objetivos de la Investigación 19
1.3.1. Objetivo General 19
1.3.2. Objetivos Específicos 19
1.4. Hipótesis de la Investigación 20
1.4.1. Hipótesis General 20
1.4.2. Hipótesis Específicas 20
1.5. Variables 20
1.5.1. Variable Independiente 20
1.5.2. Variable Dependiente 20

II. MARCO TEÓRICO 23

2.1. Antecedentes del problema 23
2.1.1. Antecedentes Internacionales 23
2.1.2. Antecedentes Nacionales 34
2.1.3. Antecedentes Locales 39
2.2. Bases Teóricas 41
2.2.1. Mecánica de rocas 41
2.2.2. Resistencia a la compresión uniaxial (UCS) 42
2.2.2.1. Importancia de la UCS 43
2.2.2.2. Desventajas de la obtención directa de la UCS 44

2.2.2.3. Determinación indirecta de la UCS 44
2.2.3. Índice de carga puntual Is_{50} 46
2.2.3.1. Relación de esbeltez (L/D) 47
2.2.3.2. Determinación del índice de carga puntual 48
2.2.3.3. Modos de rotura en el ensayo de carga puntual 50
2.2.3.4. Limitaciones de la determinación indirecta de la UCS 50
2.2.4. Estabilidad de taludes 52
2.2.4.1. Análisis de estabilidad 53
2.2.4.2. Factor de seguridad 54
2.2.4.3. Equilibrio Limite 55
2.2.4.4. Método de Bishop simplificado 56
2.2.4.5. Método de Morgenstern-Price 56
2.3. Definición de Términos 57

III. MÉTODO 61

3.1. Tipo y Nivel de Investigación 61
3.1.1. Diseño de la Investigación 61
3.2. Ámbito espacial y temporal 62
3.2.1. Ámbito espacial 62
3.2.2. Ámbito temporal 63
3.3. Población y Muestra 64
3.3.1. Población 64
3.3.2. Muestra 64
3.4. Instrumentos 65
3.4.1. Equipo de Ensayo de Carga Puntual (Point Load Tester) 65
3.4.2. Prensa de Ensayo de Compresión Uniaxial 66
3.4.3. Herramientas de procesamiento y análisis estadístico 66
3.4.4. Software Slide para el análisis de estabilidad de taludes 67
3.4.5. Técnicas para la Recolección de Datos 68
3.5. Procedimientos 69
3.6. Análisis de datos 72

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN 74

4.1. Resultados descriptivos de los ensayos Is_{50} y UCS 74
4.2. Correlaciones por litología 77

4.2.1. Correlación para la litología Granodiorita 77
4.2.2. Correlación para la litología Ignimbrita 79
4.2.3. Correlación para la litología Pórfido Temprano 80
4.2.4. Correlación para la litología Pórfido Tardío 81
4.3. Estimación de la resistencia a la compresión uniaxial (UCS) a partir del Is_{50} 83
4.3.1. Validación de la estimación de la UCS 83
4.3.2. Comparación con factores de correlación utilizados en la operación .. 84
4.3.3. Estimación de la UCS para las ventanas geotécnicas seleccionadas 85
4.4. Análisis de estabilidad de taludes 86
4.4.1. Geometría del talud y condiciones de modelamiento 86
4.4.2. Escenarios de análisis 89
4.4.3. Resultados del análisis de estabilidad 90
4.5. Discusión 92
V. CONCLUSIONES 95
VI. RECOMENDACIONES 96
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 98
VIII. ANEXOS 103

Índice de Tablas

TABLA 1 OPERACIONALIZACIÓN DE LAS VARIABLES DE INVESTIGACIÓN 22
TABLA 2 COORDENADAS DEL ÁREA DE ESTUDIO DE LA UNIDAD MINERA 63
TABLA 3 ESTADÍSTICOS DESCRIPTIVOS DEL ÍNDICE DE CARGA PUNTUAL Is_{50} POR LITOLOGÍA 75
TABLA 4 ESTADÍSTICOS DESCRIPTIVOS DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN UNIAXIAL (UCS) POR LITOLOGÍA. 75
TABLA 5 RESULTADOS DE LA CORRELACIÓN UCS - Is_{50} PARA LA LITOLOGÍA GRANODIORITA 78
TABLA 6 RESULTADOS DE LA CORRELACIÓN UCS - Is_{50} PARA LA LITOLOGÍA IGNIMBRITA 79
TABLA 7 RESULTADOS DE LA CORRELACIÓN UCS - Is_{50} PARA LA LITOLOGÍA PÓRFIDO TEMPRANO 80
TABLA 8 RESULTADOS DE LA CORRELACIÓN UCS - Is_{50} PARA LA LITOLOGÍA PÓRFIDO TARDÍO 81
TABLA 9 RESUMEN DE LOS PARÁMETROS DE CORRELACIÓN UCS - Is_{50} POR LITOLOGÍA 82
TABLA 10 RESUMEN DE LA DIFERENCIA PORCENTUAL ENTRE UCS ESTIMADA Y UCS DE LABORATORIO POR LITOLOGÍA 83
TABLA 11 COMPARACIÓN DEL ERROR PORCENTUAL MEDIO USANDO KLITERATURA Y K AJUSTADO POR LITOLOGÍA. 84
TABLA 12 RESULTADOS DE LA ESTIMACIÓN DE UCS A PARTIR DE Is_{50} UTILIZANDO FACTORES K DE LITERATURA Y AJUSTADOS, POR VENTANA. 85
TABLA 13 VALORES PROMEDIO DE LA UCS ESTIMADA PARA CADA VENTANA GEOTÉCNICA SELECCIONADA 86
TABLA 14 PARÁMETROS GEOTÉCNICOS DE LAS UNIDADES LITOLÓGICAS EMPLEADAS EN EL MODELAMIENTO 87
TABLA 15 FACTORES DE SEGURIDAD EN CONDICIÓN ESTÁTICA PARA LAS TRES VENTANAS ANALIZADAS. 90
TABLA 16 FACTORES DE SEGURIDAD EN CONDICIÓN PSEUDOESTÁTICA PARA LAS TRES VENTANAS ANALIZADAS. 91

Índice de Figuras

FIGURA 1 REQUISITOS DE GEOMETRÍA DE LAS PROBETAS PARA EL ENSAYO DE CARGA PUNTUAL..... 48
FIGURA 2 MODOS DE ROTURA TÍPICOS EN EL ENSAYO DE CARGA PUNTUAL. 50
FIGURA 3 ESCALAS DE DISEÑO Y ANÁLISIS DE ESTABILIDAD EN UN TAJO ABIERTO 53
FIGURA 4 INTERPRETACIÓN DEL MÉTODO SIMPLIFICADO DE BISHOP PARA EL ANÁLISIS DE ESTABILIDAD 56
FIGURA 5 LOCALIZACIÓN DE LA UNIDAD MINERA A CIELO ABIERTO..... 63
FIGURA 6 EQUIPO DE ENSAYO DE CARGA PUNTUAL..... 65
FIGURA 7 PRENSA DE COMPRESIÓN UNIAXIAL UTILIZADA PARA LA DETERMINACIÓN DE LA UCS..... 66
FIGURA 8 DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LOS ENSAYOS Is_{50} Y UCS. 70
FIGURA 9 UBICACIÓN DE LAS SECCIONES GEOTÉCNICAS SELECCIONADAS. 72
FIGURA 10 DISTRIBUCIÓN DEL ÍNDICE DE CARGA PUNTUAL Is_{50} POR LITOLOGÍA. .. 76
FIGURA 11 DISTRIBUCIÓN DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN UNIAXIAL (UCS) POR LITOLOGÍA. 76
FIGURA 12 RELACIÓN ENTRE Is_{50} Y UCS PARA LAS LITOLOGÍAS ANALIZADAS..... 77
FIGURA 13 DISPERSIÓN UCS - Is_{50} PARA LA LITOLOGÍA GRANODIORITA 78
FIGURA 14 DISPERSIÓN UCS - Is_{50} PARA LA LITOLOGÍA IGNIMBRITA. 79
FIGURA 15 DISPERSIÓN UCS - Is_{50} PARA LA LITOLOGÍA PÓRFIDO TEMPRANO..... 80
FIGURA 16 DISPERSIÓN UCS - Is_{50} PARA LA LITOLOGÍA PÓRFIDO TARDÍO. 82
FIGURA 17 MODELO GEOMÉTRICO INICIAL DE LA VENTANA F2N_3630_6C (PÓRFIDO TEMPRANO)..... 88
FIGURA 18 MODELO GEOMÉTRICO INICIAL DE LA VENTANA F2N_3630_6C (GRANODIORITA)..... 88
FIGURA 19 MODELO GEOMÉTRICO INICIAL DE LA VENTANA F2N_3630_6C (IGNIMBRITA) 89
FIGURA 20 COMPARACIÓN DEL FS ESTÁTICO USANDO K DE LITERATURA Y K AJUSTADO. 91
FIGURA 21 COMPARACIÓN DEL FS PSEUDOESTÁTICO USANDO K DE LITERATURA Y K AJUSTADO. 92
FIGURA 22 REDUCCIÓN PORCENTUAL DEL FS AL EMPLEAR K AJUSTADO EN LUGAR DE K DE LITERATURA..... 92

LISTA DE ACRÓNIMOS

Acrónimo	Significado en inglés	Traducción al español
ASTM	American Society for Testing and Materials	Sociedad Americana de Pruebas y Materiales
BTS	Brazilian Tensile Strength	Resistencia a la Tracción Indirecta
FS / FOS	Factor of Safety	Factor de Seguridad
GSI	Geological Strength Index	Índice de Resistencia Geológica
ICP	Índice de Carga Puntual	Índice de Carga Puntual
Is_{50}	Point Load Index (corrected to 50 mm)	Índice de Carga Puntual corregido a 50 mm
ISRM	International Society for Rock Mechanics	Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas
MPa	Mega Pascal	Megapascal (unidad de presión)
NX	Core size designation (54 mm diameter)	Diámetro estándar de núcleo (54 mm)
PLT	Point Load Test	Ensayo de Carga Puntual
UCS	Resistencia a la Compresión Uniaxial	Resistencia a la Compresión Uniaxial
RMR	Rock Mass Rating	Clasificación del Macizo Rocoso
SPT	Standard Penetration Test	Ensayo de Penetración Estándar
UCS	Uniaxial Compressive Strength	Resistencia a la Compresión Uniaxial

LISTA DE ABREVIATURAS

Abreviatura	Significado
e.g.	por ejemplo (del latín *exempli gratia*)
i.e.	es decir (del latín *id est*)
etc.	etcétera
fig.	figura
figs.	figuras
cm	centímetros
mm	milímetros
L/D	Relación esbeltez: longitud / diámetro
p	valor p (nivel de significancia estadística)
R^2	Coeficiente de determinación
r	Coeficiente de correlación de Pearson
kN	kilonewton
K	Factor de correlación UCS–Is_{50}
FS	Factor de Seguridad
Eq.	Ecuación
%	Porcentaje

INTRODUCCIÓN

La caracterización geomecánica del macizo rocoso constituye uno de los pilares fundamentales en el diseño y evaluación de estabilidad de taludes en minería a cielo abierto. Entre los parámetros más determinantes para describir el comportamiento resistente de la roca intacta se encuentra la resistencia a la compresión uniaxial (UCS), la cual influye en la definición de la envolvente resistente y en la estimación del factor de seguridad de los taludes banco-berma. Sin embargo, la obtención de valores confiables de UCS exige la recuperación de testigos íntegros y la realización de ensayos de laboratorio especializados, procesos que no siempre son viables debido a limitaciones operativas, costos elevados, baja recuperación de testigos o altos niveles de fracturamiento en el macizo.

Frente a estas restricciones, el índice de carga puntual Is_{50} se ha consolidado como una alternativa práctica para estimar de manera indirecta la resistencia intacta de la roca. Este ensayo destaca por su simplicidad, bajo costo y capacidad para generar una base de datos considerable durante las campañas de mapeo y perforación diamantina. Estudios clásicos, como los de Broch y Franklin (1972), demostraron la existencia de una relación proporcional entre Is_{50} y la UCS; no obstante, los factores de correlación propuestos en la literatura presentan variaciones significativas según la litología, el grado de alteración y las características geológicas del yacimiento. En consecuencia, el uso de factores K genéricos puede conducir a sobreestimaciones o subestimaciones de la resistencia real del macizo rocoso.

La compleja variabilidad litológica presente en operaciones mineras de la región Moquegua que incluye unidades intrusivas como pórfidos y granodioritas, así como rocas volcánicas como ignimbritas hace necesaria la calibración local de correlaciones UCS - Is_{50} basadas en datos experimentales propios del yacimiento. Una correlación no ajustada puede alterar significativamente los parámetros resistentes del modelo geotécnico y, por tanto, modificar los resultados del análisis de estabilidad de taludes, afectando la confiabilidad del diseño y la toma de decisiones operativas.

En este contexto, el presente estudio tiene por finalidad estimar la resistencia a la compresión uniaxial (UCS) a partir del índice de carga puntual Is_{50} mediante

factores de correlación ajustados por litología, obtenidos siguiendo los lineamientos de la International Society for Rock Mechanics (ISRM, 1985). Asimismo, la UCS estimada es integrada en modelos de estabilidad banco-berma, evaluados mediante los métodos de equilibrio límite Morgenstern-Price y Bishop Simplificado, a fin de analizar cómo la calibración del factor K influye en los factores de seguridad bajo condiciones estáticas y pseudoestáticas.

De esta manera, la estabilidad de taludes constituye la etapa de validación y aplicabilidad de las correlaciones desarrolladas, permitiendo demostrar en qué medida los factores K ajustados representan de manera más realista la resistencia intacta del macizo rocoso. En conjunto, los resultados de esta investigación buscan aportar una herramienta técnica que mejore la caracterización geomecánica del yacimiento, optimice la estimación del UCS y fortalezca la confiabilidad de los análisis de estabilidad en la operación minera.

I. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1. Descripción y formulación del problema

La resistencia a la compresión uniaxial (UCS) es uno de los parámetros que permite caracterizar la resistencia del macizo rocoso intacto y sirve como base para el diseño y análisis estructural de obras mineras. En particular, este parámetro es uno de los más importantes en la evaluación de la estabilidad de taludes en explotaciones a cielo abierto, ya que es un insumo crítico para los sistemas de clasificación de macizos rocosos y los criterios de rotura. Sin embargo, la obtención de este parámetro mediante ensayos de laboratorio, según las normas internacionales, requiere muestras cilíndricas de alta calidad, las cuales no siempre son factibles de obtener debido a limitaciones logísticas, altos costos, mala calidad de los testigos de perforación o a la naturaleza misma de las rocas que pueden ser rocas altamente meteorizadas o de estratificación delgada.

La situación descrita es muy difícil en etapas tempranas de exploración o en proyectos donde la información sobre la resistencia a la compresión uniaxial no está disponible o puede carecer de representativa del macizo rocoso. Así mismo, los ensayos directos implican costos elevados, complejos y que demandan mucho tiempo, lo cual obstaculiza la toma de decisiones oportuna y precisa en la planificación minera.

Esto lleva a la necesidad de encontrar una solución práctica y efectiva como la de calcular la resistencia a la compresión uniaxial basada en el índice de carga puntual con la ayuda de correlaciones empíricas en forma de parámetros particularmente significativos para cada formación litológica. De esta manera, se obtiene un parámetro más accesible y representativo del macizo rocoso, lo que permite mejorar la caracterización geotécnica del depósito y contribuir a la mitigación de riesgos en taludes, de manera más sencilla y económica. Sin embargo, en este caso, la implementación de fórmulas generales está cargada de inestabilidades y desviaciones de varias magnitudes; esto se debe a que la roca no es un mineral simple que consiste en un solo tipo litológico.

Este estudio se centra en analizar y encontrar una relación estadística entre el índic e de carga puntual y la resistencia a la compresión uniaxial de la roca en una mina de cobre a cielo abierto en la región de Moquegua. Se quiere incluir estos

resultados en el estudio de la estabilidad de los taludes en el banco-berma. El objetivo es mejorar la seguridad y la estabilidad durante las operaciones mineras. Con ello se estaría contribuyendo a que la planificación de operaciones mineras sea más seguras, eficientes y sostenible.

1.1.1. Formulación del problema de investigación

1.1.2. Interrogante General

¿De qué manera el índice de carga puntual (Is_{50}) permite estimar la resistencia a la compresión uniaxial (UCS) para aplicarla en el análisis de estabilidad de taludes rocosos a escala de banco - berma en una mina a cielo abierto?

1.1.3. Interrogantes Específicas

¿Cuál es la relación estadística entre el índice de carga puntual (Is_{50}) y la resistencia a la compresión uniaxial (UCS) por litología en una mina a cielo abierto?

¿Cómo influye la resistencia a la compresión uniaxial (UCS) estimada a partir del Is_{50} en el análisis de estabilidad de taludes rocosos a escala de banco - berma en una mina a cielo abierto?

1.2. Justificación

Conocer a fondo cómo está compuesta la roca en un área es vital antes de empezar cualquier operación minera; esa ficha geotécnica orienta cada paso del proyecto. Sirve como piedra de toque para examinar si los taludes, túneles y otras obras permanecerán en pie o si, por el contrario, corren el riesgo de colapsar. Dentro de esos datos, la resistencia a la compresión uniaxial ocupa un lugar destacado. Ese número indica cuánta presión puede soportar un bloque de roca y se convierte en la clave para evaluar la seguridad de las pendientes que veremos en las canteras. Obtener mediciones fiables, sin embargo, no resulta sencillo. Las pruebas directas en el laboratorio presentan una serie de inconvenientes. Se requieren testigos de perforación limpios y enteros, cilindros sin fisuras y aparatos calibrados capaz de realizar la carga axial. Todo eso supone un gasto elevado, un proceso lento y, además, diversas limitaciones técnicas que a menudo impiden recoger muestras realmente representativas. La estimación indirecta de la UCS mediante el índice de carga puntual es una alternativa técnica viable, eficiente y económica, especialmente en etapas tempranas de los proyectos mineros o en zonas con acceso

limitado a muestras de calidad. Esta metodología permitirá obtener resultados rápidos en campo o en laboratorio con equipos más simples y sobre muestras que no requieren una geometría estricta. Además, al utilizar coeficientes de correlación específicos para cada litología, es posible que se pueda mejorar significativamente la precisión de las estimaciones y ajustarlas a las condiciones geológicas particulares del sitio de estudio.

La presente investigación tiene como objetivo principal validar esta metodología en un contexto aplicado y se espera establecer un modelo confiable de estimación que permita ser utilizado como insumo directo en el análisis de estabilidad de taludes banco-berma. Esto contribuirá a mejorar la estabilidad y seguridad de las operaciones, optimizando al mismo tiempo los recursos económicos y logísticos del proyecto.

1.2.1. Justificación Práctica

Esta investigación se fundamenta prácticamente porque resuelve un problema tangible dentro de la ingeniería geotécnica minera. Se busca resolver la necesidad de contar con valores de UCS en áreas donde no es posible obtener muestras adecuadas para ensayos convencionales. La creación de una correlación confiable y localmente ajustada entre Is_{50} y UCS facilitará a los ingenieros a tomar decisiones más informadas y rápidas en el diseño y análisis de estabilidad de taludes a escala de banco-berma, aumentando la eficiencia operativa y reduciendo riesgos asociados.

1.2.2. Justificación Metodológica

Se pretende establecer una relación estadística entre el índice de carga puntual y la resistencia a la compresión uniaxial. Al no manipular las variables de manera deliberada y trabajar con datos obtenidos de campo y laboratorio, se busca validar un método que permita extraer patrones predictivos mediante análisis estadísticos confiables. Este enfoque metodológico también facilita la validación de correlaciones empíricas de la ASTM, adaptándolas a la litología de un proyecto minero en Moquegua, permitiendo su aplicación directa en modelos de estabilidad de taludes a nivel de toda la unidad minera y otros proyectos con similares características.

1.2.3. Justificación Económica

La estimación indirecta de la resistencia a la compresión uniaxial (UCS) mediante el índice de carga puntual Is_{50} ofrece una alternativa de menor costo y mayor alcance frente a los ensayos UCS, que requieren probetas estrictas, equipos especializados y tiempos de procesamiento elevados. Además, los resultados de esta investigación aportan un beneficio económico directo para la operación minera, ya que el uso de factores K calibrados por litología evita sobreestimar la resistencia intacta y reduce la probabilidad de sobrediseños, sostenimientos innecesarios o fallas de talud que podrían generar costos adicionales y pérdidas de producción. De esta manera, las correlaciones UCS - Is_{50} ajustadas contribuyen a una gestión geotécnica más eficiente y económicamente favorable.

1.2.4. Justificación Social

Esta investigación contribuye también indirectamente a la seguridad laboral y ambiental dentro de las operaciones mineras. Con ella se busca mejorar la precisión del análisis de estabilidad de taludes a través de una estimación confiable de la UCS para fortalecer la prevención de fallas geotécnicas que pueden provocar accidentes, pérdidas humanas o impactos ecológicos. Una operación minera más eficiente y segura siempre va a fortalecer la economía local y las relaciones empresa-comunidad.

1.2.5. Justificación Ambiental

Desde el enfoque de sostenibilidad, esta investigación se enmarca dentro del Objetivo de Desarrollo Sostenible número 9 (Industria, innovación e infraestructura), el cual busca fomentar una industria más segura, innovadora y resiliente. En este contexto, se propone una mejora técnica en la caracterización geomecánica de macizos rocosos, mediante la estimación de la resistencia a la compresión uniaxial (UCS) a partir del índice de carga puntual Is_{50}, utilizando factores de correlación ajustados según la litología. Esta metodología permite afinar el análisis de estabilidad en taludes banco–berma, reduciendo la incertidumbre que suele acompañar al uso de parámetros genéricos, y aportando así a un diseño de infraestructura minera más ajustado a las condiciones geológicas reales.

Por otro lado, el estudio también se vincula con el ODS 12 (Producción y consumo responsables), al promover el uso eficiente de recursos y prácticas más sostenibles. Al emplear el índice Is_{50} como alternativa indirecta para estimar la UCS, se minimiza la necesidad de ensayos tradicionales, que generalmente implican mayores costos, tiempos prolongados y un mayor uso de recursos. Asimismo, la aplicación de factores de correlación específicos por litología evita sobreestimar la resistencia de la roca intacta, lo que ayuda a prevenir sobredimensionamientos en el diseño geotécnico y retrabajos innecesarios. En conjunto, estos aportes permiten una gestión geotécnica más eficiente, racional y sustentable en el ámbito de la minería.

1.2.6. Justificación Teórica

Teóricamente, esta investigación amplía todo el conocimiento existente sobre correlaciones empíricas entre los parámetros geomecánicos aplicados en minería. Aunque existen muchos estudios internacionales sobre la relación entre Is_{50} y UCS, esta tesis valida y ajusta dichas correlaciones para las litologías específicas del batolito de la costa en la región de Moquegua, contribuyendo con un modelo empírico más preciso y contextualizado. Por lo tanto, se debe reforzar el uso del Is_{50} como un parámetro predictivo en estudios geotécnicos, aportando al cuerpo teórico de la ingeniería de rocas con evidencia empírica.

1.3. Objetivos de la Investigación

1.3.1. Objetivo General

Estimar la resistencia a la compresión uniaxial (UCS) a partir del índice de carga puntual (Is_{50}) mediante un factor de correlación ajustado para el análisis de estabilidad de taludes rocosos a escala de banco - berma en una mina a cielo abierto.

1.3.2. Objetivos Específicos

Determinar la relación estadística entre el índice de carga puntual (Is_{50}) y la resistencia a la compresión uniaxial (UCS) por litología en una mina a cielo abierto.

Aplicar los valores de la resistencia a la compresión uniaxial (UCS) estimada a partir del índice de carga puntual (Is_{50}) en el análisis de estabilidad de taludes rocosos a escala de banco - berma en una mina a cielo abierto.

1.4. Hipótesis de la Investigación

1.4.1. Hipótesis General

La estimación de la resistencia a la compresión uniaxial (UCS) a partir del índice de carga puntual (Is_{50}) mediante un factor de correlación ajustado permite obtener valores representativos para el análisis de estabilidad de taludes rocosos a escala de banco-berma en una mina a cielo abierto.

1.4.2. Hipótesis Específicas

a) Existe una correlación positiva entre la resistencia a la compresión uniaxial (UCS) y el índice de carga puntual (Is_{50}) por litología en la mina a cielo abierto estudiada.
b) La aplicación de los valores de la resistencia a la compresión uniaxial (UCS) estimada a partir del índice de carga puntual (Is_{50}) influye en los factores de seguridad obtenidos en el análisis de estabilidad de taludes rocosos en la mina a cielo abierto estudiada.

1.5. Variables

1.5.1. Variable Independiente

Índice de carga puntual (Is_{50})

- Dimensión: Resistencia puntual de la roca
- Indicador: Fuerza máxima P (kN)
- Indicador: Is (MPa)
- Indicador: Is_{50} (MPa)

1.5.2. Variable Dependiente

Resistencia a la compresión uniaxial (UCS)

- Dimensión: Resistencia a la compresión uniaxial (UCS) de laboratorio
- Indicador: Resistencia a la compresión uniaxial (UCS) de laboratorio (MPa)
- Dimensión: Resistencia a la compresión uniaxial (UCS) estimada
- Indicador: Resistencia a la compresión uniaxial (UCS) estimada mediante correlación Is_{50} - UCS (MPa)

Las variables consideradas en este estudio permiten establecer la relación entre las

propiedades mecánicas de la roca intacta y los valores de resistencia requeridos para la evaluación geotécnica en un entorno minero. La variable independiente corresponde al Índice de Carga Puntual (Is_{50}), obtenido mediante ensayos específicos y corregido a un diámetro equivalente de 50 mm, el cual actúa como un parámetro indirecto de resistencia de la roca. La variable dependiente es la Resistencia a la Compresión Uniaxial (UCS), determinada tanto a partir de ensayos de laboratorio como mediante estimaciones derivadas del Is_{50} mediante factores de correlación ajustados por litología.

La Tabla 1 muestra la operacionalización de las variables consideradas en la investigación, detallando sus dimensiones, indicadores y técnicas de medición empleadas.

Tabla 1

Operacionalización de las variables de investigación

Variable	Definición Operacional	Dimensiones	Indicadores	Instrumento
Variable independiente: Índice de carga puntual (Is_{50})	Valor del índice de carga puntual corregido al diámetro equivalente de 50 mm, obtenido procesando la fuerza máxima (P) registrada por el equipo de carga puntual sobre muestras de roca de diferentes litologías de la unidad minera. Expresa la resistencia puntual de la roca intacta.	Resistencia puntual de la roca	- Fuerza máxima P (kN) - Is (MPa) - Is_{50} (MPa)	Equipo de carga puntual (ISRM, 1985; ASTM D5731-20
Variable dependiente: Resistencia a la compresión uniaxial (UCS)	Valores de resistencia a la compresión uniaxial obtenidos: (1) por ensayo directo de compresión simple sobre probetas de roca, y (2) por estimación utilizando el índice de carga puntual (Is_{50}) mediante factores de correlación ajustados por litología. Se expresan en MPa y son utilizados como parámetro de entrada en el análisis de estabilidad de taludes.	Resistencia a la compresión uniaxial (UCS) de laboratorio	Resistencia a la compresión uniaxial (UCS) de laboratorio (MPa)	Prensa de compresión uniaxial (ASTM D7012-14)
		Resistencia a la compresión uniaxial (UCS) estimada	Resistencia a la compresión uniaxial (UCS) estimada mediante correlación Is_{50} - UCS (MPa)	Ecuaciones empíricas UCS - Is_{50} Software estadístico

Nota: Elaboración propia

II. MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes del problema

2.1.1. Antecedentes Internacionales

Choco y Peláez (2022) mencionan que realizaron una investigación con el fin de conocer la resistencia a la compresión de las rocas por medio del ensayo de la compresión uniaxial y posterior aplicar el ensayo del Índice de Carga Puntual como herramienta para clasificar el macizo rocoso al oeste de la ciudad de Azogues, provincia de Cañar, Ecuador. Para la recolección de datos se utilizó el calibrador o Pie de Rey y el medidor de presión hidráulica. La metodología tuvo un enfoque cuantitativo correlacional y constó de ensayos de carga puntual a tres grupos de muestras de roca andesítica arrojando un total de noventa probetas tomando en cuenta su dimensión: 10x10x5 cm, 10x10x7 cm y 10x10x9 cm, más diez probetas extras para aleatoriedades. Los resultados arrojaron un índice de resistencia a la carga puntual dentro del rango de 3.36 MPa a 3.99 MPa correspondiendo a valores de UCS aproximados de 50 MPa a 60 MPa. Esta relación demuestra que la UCS puede ser determinada de manera rápida, económica y eficiente valiéndose del índice de carga puntual y la relación D/W

Feijoo (2022) realizó un estudio con el fin de evaluar el índice de carga puntual, Is_{50}, a partir de la resistencia a la compresión simple, USC, y las dimensiones de las probetas de roca utilizadas durante los ensayos. El trabajo fue realizado en el sector Cojitambo, ubicado en la provincia de Cañar, en Ecuador. La instrumentación utilizada como equipos en el proceso fueron la cortadora Covington, empleada para la preparación de las muestras, y un equipo de ensayo de carga puntual. Fueron ensayadas un total de 90 probetas de roca en óptimas condiciones para el mismo, las cuales fueron distribuidas en tres grupos de treinta muestras cada uno, denominadas P5, P7 y P9, con dimensiones de 10x10x5 cm, 10x10x7 cm y 10x10x9 cm, respectivamente. En una última etapa del trabajo fue medido con precisión las dimensiones de cada probeta y fue sometida a ensayo de carga puntual. Los datos demuestran que el valor de Is_{50} o índice de carga puntual corregido. Es decir, un valor obtenido mediante una prueba diametral con probetas de 50 mm es más fiable con el uso de muestras con un diámetro cercano a la cantidad mencionada. Por otro lado, a medida que D/W está más cerca de 1, la dispersión en los valores recogidos

demande, de nuevo, una mayor consistencia. En conclusión, el estudio identificó que hay una relación directa entre la relación D/W de las probetas y el valor de Is_{50} de la roca analizada, por lo que es una propuesta rápida, directa y económica para hacer una estimación de la resistencia a la compresión simple. Asimismo, se afirmó que la relación entre la resistencia a la compresión simple y el índice de carga puntual en núcleos de 50 mm de diámetro estudio nos arroja un valor de 24 que es atribuido a la K entre ambos.

Mohamad et al. (2022) realizaron un estudio en Malasia cuyo objeto consistió en encontrar la correlación de resistencia a la compresión uniaxial y el índice de carga puntual Is_{50} en las rocas graníticas de la isla de Penang, utilizando la prueba de carga puntual. Los datos recopilados provenían de cincuenta puntos de investigación del suelo Si, dispersos principalmente de la costa este de la isla. El estudio se abordó desde un enfoque cuantitativo siendo experimental, de modo que los resultados obtenidos se pusieron en correlación para predecir los valores de UCS y evaluar los de ISRM queda propuesto por una correlación universal (UCS = 20-25 Is_{50}) para todo tipo de rocas Los resultados permitieron clasificar los granitos de la isla de Penang según los valores de UCS e Is_{50} utilizando los criterios de la norma BS5930: 2015. Desde esta perspectiva, se indica que los resultados clasifican los granitos de la isla de como de débiles a muy fuerte, con valores de UCS entre 24.76 y 156.82 MPa. Por otro lado, los granitos del Plutón Norte fueron clasificados como de resistencia media a muy fuerte, con valores de UCS entre 37.11 y 156.82 MPa. Por último, propusieron correlaciones para la estimación de la UCS a partir de Is_{50} : en general, UCS = 8.385 Is_{50} + 30.016; para el Plutón Norte, UCS = 7.93 Is_{50} + 35.606; y para el Plutón Sur, UCS = 9.03 Is_{50} + 20.138. Por lo tanto, estas ecuaciones proporcionan una aproximación más precisa a las propias peculiaridades de los granitos en esta región.

El estudio llevado a cabo por la ASTM (2020) tuvo como objetivo determinar la resistencia a la compresión uniaxial (UCS) a partir del índice de resistencia puntual de diferentes tipos de roca a partir de la en especímenes con un diámetro de prueba específico. Esta investigación se realizó en muestras de roca como arenisca, cuarcita, norita de Marikana y norita de Belfast, utilizando el aparato de prueba de carga puntual como instrumento principal. La metodología consistió en someter un espécimen de roca a una carga concentrada creciente hasta que ocurriera la falla por

división del espécimen. Esta carga se aplicó mediante platinas cónicas truncadas coaxiales, y una vez alcanzada la ruptura, se utilizó la carga de falla para calcular el índice de resistencia puntual. Este índice permite, además, clasificar las rocas, comúnmente mediante la estimación de la resistencia a la compresión uniaxial.

Los resultados del estudio revelaron que los especímenes con una relación longitud/diámetro mayor a uno son adecuados para pruebas diametrales. Sin embargo, debido a la naturaleza heterogénea de los materiales rocosos, no se pudieron producir múltiples especímenes con propiedades físicas uniformes para las pruebas. Esto implicó que los valores promedio de Is_{50} debían utilizarse al clasificar las muestras respecto a su resistencia puntual y a sus índices de anisotropía. Además, se estableció que, si algún espécimen de un tipo de roca arroja un valor 20 % inferior al promedio, debe ser examinado por posibles defectos y evaluarse la validez de dicho resultado. En cuanto a las conclusiones, el estudio indicó que es posible estimar la resistencia a la compresión uniaxial utilizando la fórmula $s_c = K*I_s$. En caso de no contar con un factor de correlación específico del sitio "K", se pueden emplear valores generalizados para dicho propósito.

El estudio llevado a cabo por Alitalesh et al. (2016) en Irán, buscó en realidad establecer un vínculo entre los registros de la prueba del punto de carga y la tradicional compresión uniaxial, usando muestras recolectadas de tres canteras distintas. La investigación sigue un diseño cuantitativo y no experimental, así que carece de manipulaciones en campo. Para ello, los autores aplicaron las técnicas PLT y UCT a un total de 34 núcleos, que incluyen rocas israelitas y sus derivados, las lutitas y margas. Las pruebas fueron ejecutadas a distintas profundidades, comenzando desde la superficie y llegando hasta unos 30 metros máximo. El preparado de los cilindros se realizó según la norma ASTM D4543-08, que exige medidas, tolerancias y un pulido preciso en los extremos para reducir la fricción en el UCT. A pesar de que los datos resultaron algo dispersos, los resultados generales se alinearon con las conclusiones de estudios previos en la misma zona. Además, la relación entre la resistencia compresiva uniaxial y el primer parámetro coincidió casi exactamente con las ecuaciones de correlación desarrolladas anteriormente para las lutitas.

Según Affam et al., (2019), en su estudio de los depósitos Tarkwaian de Ghana,

solo se correlacionaron factores a través del análisis de regresión para diferentes grupos de resistencia en conglomerados Banket; por lo tanto, de acuerdo con un enfoque cuantitativo correlacional de diseño no experimental, las pruebas de resistencia a la compresión uniaxial y las pruebas de carga puntual se utilizaron como herramientas primarias. La clasificación de masas rocosas se puede clasificar en tres categorías de resistencia: fuerte, media y débil. Los límites se encuentran en la clasificación del sistema modificado considerando la propuesta de Bieniawski de 1989, se halló que las clasificaciones UCS de fuerte son >80.00 MPa, de medios desde 40.00 MPa hasta 79.99 MPa, y de débil es <40.00 MPa. Cuantitativamente, encontré que a mayor valor de resistencia, mayor es el factor de correlación. Se descubrió una correlación lineal robusta entre los bancos de resistencia definidos. Los factores de correlación lineal se describen, respectivamente, a partir de fuerte 20.71 - medio 18.1 - débil 13.72; lo que se puede observar en la figura 2. por lo tanto, el análisis estadístico es efectivo para la caracterización mecánica de conglomerados Banket en esta región.

En un trabajo publicado por Fener et al. (2016), se examinaron varios ensayos indirectos que medían la resistencia a compresión uniaxial (UCS) de rocas usando métodos más accesibles, con el propósito de elaborar ecuaciones predictivas sólidas. El estudio se llevó a cabo en la zona de Ni de, en Turquía, donde los autores recolectaron muestras de once litologías distintas, extraídas tanto de canteras activas como de afloramientos naturales. Las piezas fueron elegidas con cuidado y se rechazaron aquellas que presentaban fracturas, alteraciones o defectos visibles que pudieran sesgar los datos finales. Se emplearon el martillo Schmidt clase N, la prueba de carga puntual y la prueba de resistencia al impacto. Como estándar primordial, se realizaron ensayos de compresión uniaxial convencionales para tener un punto de referencia fiable. La estrategia experimental siguió las guías de la ISRM, repitió las mediciones y las sometió a análisis estadístico, principalmente regresiones, que relacionaron los valores indirectos con la UCS obtenida directamente.

Los resultados justificaron la existencia de una correlación significativa entre la UCS y los valores correlacionados adquiridas en los ensayos indirectos. Se encontró una relación lineal entre la UCS y qu vs. el índice de carga puntual qu = 9.08Is + 39.32, r = 0.85; exponencial-con el valor de Schmidt martillo qu = 4.24e^0.059Rn,

r = 0.81 y con la dependencia lineal del índice de resistencia al impacto qu = 4.26ISI + 204.33, r = 0.72. La correlación es aún más fuerte para rocas ígneas r = 0.88. Las pruebas estadísticas t y F.., confirmaron la validez y la significación del hallazgo. Se descubrió que las ecuaciones desarrolladas poseen un poder predictivo razonable y comparable con los modelos presentados por otros autores, aunque también se notó en varios estudios que las divergencias entre las correlaciones arrojadas pueden estar relacionado con la variabilidad en la naturaleza de la roca, su microestructura y las condiciones del test.

Galván et al. (2014) realizaron un estudio en la Comunidad Valenciana, España, con el objetivo de analizar la relación entre la resistencia a compresión simple (UCS) y el índice de carga puntual Is_{50} en calizas, con el fin de establecer una correlación que permita estimar la resistencia mecánica de estas rocas mediante métodos indirectos. Para ello, se extrajeron muestras de calizas de cuatro ubicaciones distintas: las excavaciones de la carretera CV-13 (tramo Torreblanca - Aeropuerto de Castellón), los sondeos para el proyecto del Túnel de Cullera, la carretera de acceso al Embalse de Loriguilla y la carretera N-332 (tramo Xeresa - Gandía).

Se llevaron a cabo 44 ensayos en laboratorio utilizando testigos tallados tanto en forma de bloque como cilíndricos, con diámetros de 45 y 54 mm, aplicando carga axial y diametral. Además, se realizaron 10 ensayos de UCS, cinco de ellos con galgas extensiométricas. La metodología se centró en evaluar experimentalmente los parámetros de esfuerzo de las rocas a través de la comparación entre resultados de ensayos directos de compresión y ensayos de carga puntual. Se observó que la correlación lineal entre la UCS y el Is_{50}, representada por la ecuación $\sigma c = \beta \times Is_{50}$, puede ofrecer resultados representativos, pero no existe un único valor universal para el coeficiente β. De hecho, este coeficiente varió entre 7 y 26 en las calizas estudiadas, a diferencia del valor de referencia β=24 propuesto originalmente por Broch y Franklin (1985). Las conclusiones del estudio resaltan que, al determinar un valor específico de β para cada litología (grupos A, B, C y D de calizas), el coeficiente de correlación obtenido supera el 98%, lo que demuestra la eficacia del método cuando se calibra adecuadamente. Para un uso generalizado en las calizas de la Comunidad Valenciana, los autores proponen un valor promedio de β = 12,5. Asimismo, sugieren que en futuras investigaciones se considere el control de la

humedad en los ensayos, dado su posible impacto en los resultados.

Vera y León (s.f.) efectuaron un estudio en las instalaciones de una faena minera en la zona central de Chile, el cual tuvo por finalidad determinar la relación entre el Índice de Carga Puntual y los ensayos de resistencia a la compresión uniaxial no confinada y de resistencia a la tracción indirecta. Se ejecutaron ensayos sobre muestras de roca en condición de seco aplicando una máquina de ensayos de carga puntual y una prensa de compresión destinada para el ensayo BTS. Se utilizó el estándar ASTM D7012-14 para el primero de los ensayos y se recurrió al procedimiento clásico del ensayo brasileño para el ensayo BTS, por medio del cual se evalúa la resistencia a tracción a través del ensayo de compresión diametral de discos de roca. Se ejecutaron once ensayos de UCS y BTS en muestras de roca de la misma litología, además de ensayos triaxiales bajo distintos niveles de confinamiento. Se calcularon un valor para la constante resultante de los ensayos de 12.48, y el cociente UCS/BTS alcanzó un promedio de 12.34, lo que representó un margen de error de solo 1.11% respecto al resultado arrojado en los ensayos triaxiales. Tras el análisis de más de 60 muestras litológicas, sobresale la alta correlación existente entre UCS y PLT, la cual aportó un coeficiente de determinación R^2 de 0.97, y una correlación significativa entre PLT-BTS, que arrojó un R^2 de 0.93. Estos hallazgos empíricos respaldan la utilidad del ensayo de carga puntual como herramienta eficaz para estimar la resistencia de las rocas, gracias a su sencilla preparación de muestras, bajo costo y facilidad de ejecución.

Ricci (2018) desarrolló una investigación en la región de Antofagasta, Chile, con el objetivo de analizar la estabilidad de los taludes globales y banco-berma. La metodología adoptada fue de tipo aplicada con un enfoque cuantitativo y diseño no experimental. Se recolectaron 144 muestras provenientes de 15 sondajes. Para el procesamiento de datos y la obtención de propiedades geomecánicas como cohesión y ángulo de fricción, se empleó el software RocLab, y herramientas como Dips, RocData, RocPlane y Swedge. Se detectó que las zonas de menor resistencia al corte se encontraban en la unidad geológica GRAVA, con una altura máxima de 54 metros y un factor de seguridad (F.S.) de 1,46, superando el umbral de aceptabilidad para sismos máximos, el cual es de 1,10. Además, mediante una curva de regresión con un coeficiente de determinación (R^2) de 0,9, se estimó que la altura máxima admisible para un talud en GRAVA es de 60,8 metros. El autor recomienda

modificar los ángulos de diseño en los rajos Tailandia 1 (pared noreste, aumento de 6°), Japón 2 (pared suroeste, aumento de 11°) y Japón Norte (pared norte, aumento de 5°).

Se describe una nueva prueba índice destinada a la clasificación de la resistencia de materiales rocosos en un estudio diferente realizado por BRock y Franklin en 1972, en Noruega; judge by: true-test. El "point-load strength test" se realizó con la intención de desarrollar un método práctico y eficiente para estimar la resistencia de las rocas a través de un equipo portátil, tomando en cuenta que las metas fáciles de utilizar eran necesarias para la obtención de datos en aplicaciones geológicas. La simplicidad de la nueva metodología consideró que las muestras debían ser usinadas y que podían ser núcleos de roca o fragmentos irregulares, siempre enmarcados bajo ciertas limitaciones de forma y el requerimiento de una corrección de tamaño. Los resultados obtenidos demostraron que era posible obtener un solo índice de resistencia a la carga puntual independientemente de la forma de la probeta; y que dicho índice ofrece estrecha correlación a los resultados de ensayos de resistencia a la compresión simple uniaxial, llegando a alta linealidad y falta de dispersión en el caso, particular, de la prueba diametral de carga puntual. Se describió la maquinaria de ensayo portátil desarrollada para ello al igual que las principales conclusiones de influencia esencial del tamaño y la forma; influencia anisotrópica y del contenido de agua, además de proponer un procedimiento estándar de prueba en un apéndice del estudio.

ISMR (2016) presentó un protocolo simple para evaluar la dureza de las rocas, fijando el índice Is_{50} como clave. Con él, también se pueden anticipar otras resistencias, ya sea la compresión o la tracción máxima. El trabajo, realizado en Lisboa, utilizó tanto equipos ligeros de mano como prensas de laboratorio, además de un sistema que aplica y mide la carga P que quiebra la muestra. En esencia, el método consiste en ejercer una presión puntual a una probeta mediante dos puntas cónicas hasta que esta se fractura. Con este enfoque, se obtiene de forma fiable la resistencia uniaxial (UCS) incluso cuando no se dispone de cilindros estándar, un gran avance en campañas de campo o lugares difíciles. Entre las conclusiones destaca que el procedimiento es ágil, barato y tolera muestras imperfectas, por lo que sirve tanto en el laboratorio como sobre el terreno.

La investigación de Burbano y García (2016) tuvo como objetivo establecer nuevas correlaciones empíricas entre la resistencia a compresión simple (UCS) y el índice de carga puntual Is_{50} en rocas anisotrópas, con especial atención en esquistos y pizarras. Esta investigación se llevó a cabo en el sureste de Ecuador, específicamente en las estribaciones orientales de la cordillera de los Andes septentrionales, en el proyecto hidroeléctrico Paute-Cardenillo. Para la recolección de datos, se empleó una prensa Franklin de fabricación italiana marca TECNOTEST, con la cual se realizaron un total de 2.015 ensayos de carga puntual y 229 ensayos de resistencia a compresión uniaxial en muestras de rocas anisotrópas. La metodología consistió en analizar estos datos con base en la orientación de los planos de anisotropía presentes en las muestras.

Se identificaron cinco litotipos de esquistos y pizarras, para los cuales se determinaron valores promedio tanto de resistencia a compresión simple como del índice de carga puntual. Los resultados demostraron que no existe una relación directa entre la UCS y el Is_{50}, lo que pone en duda la validez de los modelos empíricos tradicionales de regresión lineal que no consideran los efectos de la anisotropía en la resistencia de la roca. En consecuencia, los autores proponen tres nuevas relaciones empíricas que permiten una mejor estimación de la UCS a partir del Is_{50} en rocas anisotrópas, considerando las particularidades estructurales del material analizado.

ASTM (2014) publicó en Estados Unidos el estándar que reúne pasos claros para medir la resistencia en compresión, tanto uniaxial como triaxial, de núcleos de roca intacta. El texto explica cómo obtener valores básicos, como la resistencia máxima, el módulo de elasticidad E y el coeficiente de Poisson, datos que los geólogos e ingenieros civiles, mineros o geotécnicos usan a diario. Para las pruebas se emplea una prensa hidráulica que controla a la vez la carga y el desplazamiento. El ensayo se aplica a cilindros de roca con relación longitud-diámetro de 2:1 y diámetros habituales de 38 mm o 50 mm. Las muestras deben llegar enteras y pueden estar secas o saturadas, según lo que requiera cada protocolo. El documento divide el trabajo en cuatro métodos que permiten captar con exactitud la resistencia mecánica y las propiedades elásticas bajo diferentes tensiones y temperaturas. En resumen, este estándar se convierte en una herramienta esencial para caracterizar mecánicamente las formaciones rocosas y ofrece procedimientos confiables que

respaldan el diseño seguro de obras, tanto bajo tierra como en superficie.

Basu y Kamran (2010) llevaron a cabo una investigación con la finalidad de testar si el ensayo de carga puntual podría anticipar la resistencia a compresión uniaxial (UCS) en esquistos, aun cuando esta técnica se ha reservado, hasta ahora, casi solo para rocas isotrópicas. Las pruebas se realizaron en el yacimiento de uranio de Jaduguda, en India. Para ello tomaron núcleos de esquisto muy cuarzoso, que fueron sometidos a ambos ensayos: el puntual y el de compresión uniaxial. En el laboratorio utilizaron un sistema de carga puntual GCTS PLT-100, dotado de sensor de deformación, y, para la UCS, una prensa automática AIM 314-FA. El trabajo se organizó en dos fases: en la primera se ensayaron 19 muestras solo con carga puntual, cuyo rendimiento y modos de fallo fueron observados; y en la segunda se probó 15 pares equivalentes, uno en cada técnica (SP1-SP15 y SU1-SU15), para comparar directamente las dos resistencias. Aunque la mayoría de los cuerpos se quiebran sobre los planos de foliación y esa forma de falla se declara inválida según las normas ISRM y ASTM, los autores sostienen que, aun así, esas rupturas reflejan el patrón mecánico propio del esquisto de la zona. Los resultados mostraron que, aunque la mayoría de las muestras fallaron en modos considerados inválidos según los estándares ISRM y ASTM al romperse a lo largo de planos de foliación, estas fallas reflejan el comportamiento mecánico característico de las rocas anisotrópicas. Además, se observó una correlación significativa (R=0.86) entre la resistencia a compresión uniaxial y la resistencia a la carga puntual, incluso en presencia de fallas consideradas inválidas por los estándares actuales.

Hormazabal et al. (2019) desarrollaron una investigación en Chile con el objetivo de proponer una metodología para el diseño de taludes a escala banco-berma, mediante la aplicación de un análisis probabilístico que permite incorporar múltiples bloques generados a partir del arreglo estructural de la roca. La investigación, de enfoque cuantitativo y diseño no experimental, se llevó a cabo utilizando el programa SBLOCK, el cual permite evaluar la estabilidad de bloques formados por hasta seis sets estructurales simultáneamente. Para ello, se consideraron variables como la geometría, persistencia, espaciamiento y propiedades de resistencia al corte de las discontinuidades presentes, evaluando la estabilidad a través del factor de seguridad y la probabilidad de falla. La metodología desarrollada permite una adecuada correlación entre los parámetros

geométricos y geotécnicos obtenidos en terreno y los resultados de estabilidad arrojados por el programa.

Las estimaciones permiten identificar bloques críticos y los sistemas estructurales que los controlan, lo que facilita calcular parámetros como la probabilidad de falla, la berma efectiva y requerida, y evaluar el desempeño general del diseño del banco. La confiabilidad del diseño también puede estimarse a partir del análisis del descreste y los anchos de derrame esperados. Para que este proceso sea eficaz, se subraya la importancia de definir criterios de aceptabilidad según el tipo de obra y sus condiciones particulares, y se destaca la relevancia de una caracterización estructural precisa, especialmente en cuanto a persistencia y espaciamiento.

Feeijoo y Padrón (2020) llevaron a cabo una investigación en Cojitambo, en la provincia ecuatoriana de Cañar, con la meta de diseñar un procedimiento práctico que una en el campo los valores de resistencia a compresión simple (UCS) y resistividad eléctrica de las rocas. Para ello recolectaron bloques sanos de volcán y los cortaron a un tamaño aproximado de 5 cm x 4 cm x 10 cm. Primero, sumergieron cada pieza en agua durante media hora, midieron la resistencia con un multímetro común y, usando la fórmula clásica, obtuvieron la resistividad. Después, las probetas pasaron por un ensayo de compresión en una prensa Humboldt, que registró carga y deformación hasta que el material rompió.

Los resultados obtenidos mostraron que existe una correlación significativa entre la resistividad y la UCS de las rocas, estableciendo límites máximos y mínimos en los valores de resistividad que permiten estimar la resistencia a compresión simple con ecuaciones lineales que presentan coeficientes de determinación (R^2) de 0.63 y 0.83 para los valores máximos y mínimos respectivamente. Esta correlación permite determinar de manera rápida y económica la UCS en campo, lo cual es especialmente valioso dado que los ensayos tradicionales requieren tiempo, muestras cuidadosas y costos elevados.

Aladejare (2019) llevó a cabo un estudio en Finlandia para comprobar cuán esas ecuaciones empíricas logran predecir la resistencia a la compresión uniaxial y a partir de mediciones de ensayos índice y propiedades físicas. La investigación, de enfoque cuantitativo y correlacional, utilizó datos de resistencia a la carga puntual Is_{50}, dureza de rebote Schmidt (SRH), índice de punzonado de bloque (BPI),

porosidad efectiva (n) y densidad (ρ) para estimar la UCS mediante fórmulas empíricas. Estas estimaciones se compararon estadísticamente con valores de UCS obtenidos experimentalmente. La muestra se conformó por 60 datos provenientes de ensayos de compresión uniaxial realizados en tres sitios de proyecto en India, distribuidos equitativamente entre rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias. Los resultados revelaron que los ensayos de compresión uniaxial, si bien precisos, son costosos, prolongados y complejos, lo cual justifica el uso de estimaciones empíricas.

Sin embargo, se evidenció que dichas ecuaciones pueden sobrestimar o subestimar la UCS debido a la variabilidad propia del tipo de roca y a las características específicas del sitio y los datos empleados en su desarrollo. De las veintisiete fórmulas que se revisaron, solo cinco lograron un rendimiento aceptable y, entre esas, la resistencia a la carga puntual Is_{50} fue la que mejor estimó la resistencia a la compresión no confinada (UCS) de las cinco pruebas examinadas. Las conclusiones del trabajo señalan que la fiabilidad de los pronósticos empíricos depende, sobre todo, de la calidad de la información que alimenta cada ecuación y del tipo de datos que se introduce en el modelo. Por eso, se sugiere limitar el uso de estas relaciones a las litologías para las que fueron creadas, de modo que el ajuste predictivo se mantenga dentro de márgenes razonables.

Santander (2019) desarrolló un estudio en una mina a cielo abierto en Chile con el objetivo de emplear el método Rock Engineering System (RES), para inferir la respuesta del macizo rocoso dentro del sistema banco-berma y establecer medidas de mitigación que permitan cumplir con los planes de producción y diseño minero. El enfoque de esta investigación fue de tipo aplicada, con un enfoque cuantitativo y un diseño no experimental. La implementación de la metodología se basó en la elaboración de un índice de estabilidad geomecánica a nivel de banco, utilizando la matriz de interacción del sistema RES, en la cual se consideran diez parámetros clave que representan la interacción causa-efecto entre diferentes variables geomecánicas del sistema. Para validar este índice, se evaluaron 5.993 metros de paredes construidas con geometría banco-berma, abarcando cinco unidades litológicas distintas. Se utilizaron como instrumentos tanto el índice de estabilidad banco-berma como el índice desarrollado mediante la metodología RES. Los resultados arrojaron una alta consistencia entre ambas metodologías, siendo la

mayor diferencia observada del 11% en la litología Intrusivo (1.374 metros evaluados), mientras que la diferencia más baja fue del 1% en la litología Brecha Tobácea (2.150 metros evaluados). Los análisis realizados sobre la matriz de interacción permitieron identificar que los parámetros más dominantes del sistema fueron las propiedades de la roca intacta (P1) y las vibraciones de tronaduras (P9), debido a su alto valor de influencia (C-E). Asimismo, los parámetros con mayor nivel de interacción dentro del sistema, es decir, aquellos con mayores valores causa-efecto (C+E), correspondieron a la clasificación del macizo rocoso GSI (P4) y las voladuras a línea de diseño (P8), con ponderaciones del 13,3% y 13,6% respectivamente.

Guerrero (2021) llevó a cabo un estudio en Ecuador, en las inmediaciones del río Coca, de San Rafael, con el objetivo de determinar modelos matemáticos que correlacionen los resultados de los ensayos de carga puntual (PLT), martillo de Schmidt y compresión uniaxial, a fin de estimar la resistencia máxima a la compresión simple (UCS) de las rocas andesíticas muestreadas en el área. Para ello, se analizaron 34 muestras de roca con dimensiones comprendidas entre 150 mm y 350 mm, recolectadas en afloramientos rocosos de la región. Las pruebas se realizaron utilizando los instrumentos correspondientes a los ensayos PLT y de martillo de Schmidt. La metodología consistió en preparar cubos de 50 mm a partir de las muestras recolectadas, sobre los cuales se aplicó el ensayo de compresión uniaxial. Como resultado, se generaron dos ecuaciones empíricas: la primera, que relaciona la UCS con el índice de carga puntual Is_{50}, arrojó un alto coeficiente de determinación ($R^2 = 0.7349$), lo cual indica una buena correlación lineal; la segunda, que vincula la UCS con el número de rebote de Schmidt (R), presentó un coeficiente moderado ($R^2 = 0.632$).

2.1.2. Antecedentes Nacionales

Marcelo (2024) llevó a cabo una investigación cuyo objetivo fue: Aplicar los resultados de la evaluación geomecánica para lograr la estabilidad de taludes del proyecto óxidos in situ de Volcan Compañía Minera S.A.A. El referido trabajo se realizó en la mina a cielo abierto “San Cristóbal’ de Volcan Compañía Minera S.A.A. La mina está ubicada en el distrito de Simón Bolívar, en la provincia de Pasco del departamento de Pasco. Los instrumentos utilizados fueron el mapa

geomecánico-geotécnico, cartillas geomecánicas y los formatos de resultados del laboratorio. Asimismo, la metodología que utilizó fue de tipo aplicada, diseño descriptivo no experimental y transversal. La población del estudio estuvo conformada por todos los dominios geomecánicos del tajo Santa Rosa, mientras que la muestra consistió en los datos del logueo geomecánico de 2050.85 metros correspondientes a 36 sondajes realizados en campañas de los años 2005, 2006 y 2013. Además, se tomaron datos en 28 estaciones de mapeo por celdas para valorar el macizo rocoso.

El análisis de estabilidad, que se basó en el método de equilibrio límite, indicó que las secciones geomecánicas presentaban factores de seguridad en condiciones estáticas entre 1.238 y 1.519, y en condiciones pseudo-estáticas entre 0.911 y 1.169. Se determinó que las secciones 1, 5, 7 y 8 eran inestables bajo condiciones pseudo-estáticas, debido a la presencia de material con baja calidad geomecánica y geotécnica. Para mejorar la estabilidad, se propusieron nuevos parámetros de diseño como el ángulo de talud de 45°, ángulo global de 33°, altura de banco de 5 m y ancho de berma de 3 m. Con estos ajustes, los factores de seguridad en las secciones críticas superaron el valor de 1 en condiciones pseudo-estáticas, alcanzando valores entre 1.207 y 1.348. Asimismo, en condiciones estáticas los factores oscilaron entre 1.569 y 1.825, lo que evidencia una mejora significativa. Además, la inexistencia de una napa freática en la zona del proyecto hasta la cota 4260 msnm fue confirmada por una evaluación hidrogeológica

Vera (2024) desarrolló un estudio titulado Evaluación de las condiciones geotécnicas para la construcción de la Central Hidroeléctrica Chontayacu Alto y Bajo, cuyo objetivo principal fue determinar las propiedades estructurales del macizo rocoso y la capacidad portante de los suelos del área del proyecto, a partir de la resistencia a la compresión uniaxial en muestras obtenidas mediante perforación. Este estudio se realizó en el distrito de Cholón, provincia de Marañón, en la región Huánuco, y se apoyó en instrumentos como guías de observación y formatos de muestreo. Se adoptó un enfoque metodológico descriptivo-comparativo, fundamentado en el análisis geotécnico de datos recogidos mediante ensayos tanto in situ como de laboratorio, según lo establecido por la norma ASTM D5731. Para ello, se realizaron 18 perforaciones geotécnicas diamantinas y 35 calicatas distribuidas en las zonas de Chontayacu Alto y Bajo, con el fin de

recolectar muestras que permitieran una caracterización detallada del terreno.

Los resultados obtenidos en las áreas con comportamiento de suelo incluyeron ensayos de penetración estándar (SPT), los cuales consisten en medir la resistencia del terreno a la penetración mediante la hinca dinámica de un muestreo normalizado. Asimismo, los ensayos de carga puntual en las muestras de perforación permitieron aplicar la fórmula sc = K * Is para estimar la resistencia a la compresión uniaxial, incluso en ausencia de un valor específico del sitio para el factor de correlación K. Finalmente, se concluyó que la relación entre la resistencia a la compresión simple y el índice de carga puntual es cercana a 24, valor que concuerda con la constante definida en la norma ASTM D5731, lo que valida el uso de esta proyección para fines de evaluación geotécnica en el área del proyecto.

Espinoza (2023) llevó a cabo una investigación con el objetivo de determinar los parámetros geométricos óptimos del talud para garantizar la estabilidad del tajo superficial Raúl Rojas, ubicado en la unidad minera Cerro de Pasco, perteneciente a la Compañía Minera Volcan S.A.A. El estudio se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo, con un diseño cuasi experimental y un nivel descriptivo, la investigación fue de tipo aplicada. Para la recolección de datos se emplearon instrumentos como cartillas de clasificación de suelos, guías de observación y fichas técnicas de laboratorio. La metodología contempló ensayos granulométricos y de corte directo, los cuales permitieron analizar el comportamiento del suelo en condiciones reales de operación minera. Los resultados obtenidos revelaron que el ángulo óptimo de banco para el tajo superficial es de 42°, valor que asegura la estabilidad estructural del talud. Asimismo, se concluyó que la evaluación de los parámetros geométricos influye de manera directa en la estabilidad global del tajo, y que, de acuerdo con la normativa peruana y los criterios de geometría recomendada, los parámetros ideales para el diseño del talud incluyen una altura de banco de 5 metros, un ancho de berma de 3 metros, una altura total de talud de 10 metros, un ángulo de banco de 42°, un ángulo interrampa de 30.3° y un ángulo global de 35.3°.

Castro (2022) realizó un estudio con el objetivo de determinar la relación entre el nivel de estabilidad de los taludes de la desmontera Excélsior y el factor de seguridad en las condiciones actuales. Esta investigación se llevó a cabo en el

distrito de Simón Bolívar de Rancas, ubicado en Cerro de Pasco, una zona de gran actividad minera. Para la recolección de datos, se emplearon formatos para el registro de características geotécnicas del material de relleno y para la clasificación ASTM. La metodología adoptada fue de tipo aplicada, con un nivel de investigación descriptivo y un enfoque cuantitativo de diseño no experimental. La población estuvo conformada por todos los taludes de la desmontera Excélsior, y se utilizó un muestreo por conveniencia que permitió seleccionar los ocho taludes con mayor evidencia de inestabilidad. El estudio señala que, para garantizar la estabilidad de los taludes, se deben adoptar parámetros geométricos específicos: un talud superior con inclinación H:V (2:1), una altura de interbancos de 20 metros y anchos de berma de 5 metros. En estas condiciones, los factores de seguridad calculados fueron mayores a 1.5, situándose entre 1.62 y 2.63 en condiciones estáticas y entre 1.11 y 1.76 en condiciones pseudoestáticas. Asimismo, se concluyó que los bancos presentan pendientes de medio a alto ángulo, entre 60° y 75°.

Puma (2019) llevó a cabo un estudio en el proyecto Maricielo, ubicado en Puno, con el objetivo de determinar las características geotécnicas que permitan evaluar la estabilidad del talud del Tajo 1, correspondiente al proyecto Maricielo 2003 de óxido de hierro. Esta investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo, con un diseño no experimental y de tipo aplicada. La muestra estuvo constituida específicamente por el Tajo 1, el cual abarca un área de 0.854 hectáreas y un perímetro de 504.84 metros. Para el desarrollo del estudio se utilizaron equipos topográficos de relleno y el software AutoCAD Civil, así como pruebas de laboratorio sobre muestras recolectadas en campo. Estas pruebas permitieron determinar las propiedades físicas y mecánicas de la roca, sus condiciones intactas, su resistencia y su proceso de desintegración, complementándose con la caracterización del suelo. El estudio reveló que los macizos rocosos del área, compuestos principalmente por pórfido diorítico y limolita, presentan condiciones geomecánicas regulares según las clasificaciones RMR y GSI. En el análisis de estabilidad se aplicó el método estereográfico o cinemático, mediante el uso del software Dips, identificándose en las zonas 2 y 3 una mayor incidencia de fallas tipo cuña. Asimismo, mediante el análisis por el método de equilibrio límite utilizando los programas RocPlane y Swedge, se identificaron los taludes estables e inestables tanto en condiciones estáticas como pseudoestáticas. Se estableció un

factor de seguridad mínimo de 1.5 en condiciones estáticas para la etapa de cierre de mina. Los resultados indicaron que la zona 3 resultó inestable, recomendándose una pendiente final del talud con un ángulo de 53° para estabilizarla.

Hizarra et al. (2021) llevaron a cabo un estudio en la región de Huancavelica con el objetivo de establecer los resultados de la evaluación geomecánica del macizo rocoso y determinar el ángulo de reposo del talud en la carretera tramo San Antonio - Puente Chiquiacc. La investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo, con un tipo de estudio aplicado, diseño no experimental y de nivel descriptivo. Para la recolección de información se utilizaron instrumentos como cartillas de clasificación geomecánica y fichas técnicas que permitieron registrar y sistematizar los datos de campo.

La clasificación geomecánica de Bieniawski arrojó una puntuación de 69, lo cual permitió categorizar al macizo rocoso como de calidad "Buena - IIb". Según esta clasificación, el macizo presenta una cohesión estimada entre 300 y 400 kPa, así como un ángulo de fricción que oscila entre 35° y 45°. Por otro lado, aplicando la clasificación de Romana, y considerando la condición más desfavorable con una pendiente de talud de 10/1 (V/H), equivalente a 84.3°, se obtuvo un valor de 55.48, clasificando al macizo como roca normal o parcialmente inestable. Esta condición sugiere la posibilidad de roturas tipo cuña, tal como se evidenció en el análisis estereográfico, donde se identificaron roturas planas a lo largo de ciertas juntas que configuran la formación de dichas cuñas. El macizo rocoso evaluado posee una estabilidad relativa que permite inferir una necesidad de reforzamiento. En escenarios moderados se recomienda la instalación de bulones o anclajes, mientras que en condiciones más críticas sería necesario recurrir al uso de gunita o incluso hormigón proyectado para asegurar la estabilidad del talud.

Santa María y Chegne (2023) llevaron a cabo un estudio con el objetivo de realizar una evaluación geomecánica y geotécnica orientada al diseño y la estabilidad de los taludes en la cantera El Gavilán, ubicada en el departamento de Cajamarca. La investigación fue de tipo aplicada, con un diseño no experimental, cuantitativa correlacional y de nivel descriptivo. La población del estudio estuvo constituida por el macizo rocoso de la mencionada cantera, mientras que la muestra fue representada por cinco estaciones geomecánicas distribuidas dentro de la misma.

Se emplearon el cuaderno de campo y fichas de observación geomecánica, mediante los cuales se obtuvieron datos sobre la condición del macizo rocoso. Asimismo, se utilizaron herramientas especializadas de análisis como ROCPLANE, SWEDGE y DIPS, que permitieron realizar simulaciones y evaluaciones precisas de la estabilidad de los taludes bajo diferentes condiciones.

El diseño del talud, basado en un modelo de bancos, consideró siete niveles con una altura de banco de 10 metros, un ángulo de banco de 60 grados, un ancho de berma de 3.5 metros y un ancho de rampa de 5 metros. Estos parámetros estructurales permitieron lograr condiciones de estabilidad adecuadas. Los factores de seguridad calculados para distintos modos de falla (rotura planar, rotura en cuña, y vuelco), utilizando modelos como Barton-Bandis y Mohr-Coulomb, así como métodos de equilibrio límite como Spencer y Morgenstern-Price, arrojaron valores que, en su mayoría, superan el umbral mínimo de seguridad en condiciones estáticas y pseudoestáticas, tanto secas como saturadas. Por ejemplo, en el análisis de rotura planar se obtuvieron factores de seguridad de hasta 1.70 en condiciones estáticas secas y 1.27 en condiciones pseudoestáticas saturadas; en rotura en cuña, los valores alcanzaron 2.304 en condiciones estáticas secas y 1.464 en condiciones pseudoestáticas saturadas.

2.1.3. Antecedentes Locales

Romero (2022) llevó a cabo un estudio con el objetivo de analizar la estabilidad de los taludes a nivel de banco-berma en la Concesión Minera Camila III, que se encuentra ubicada en la quebrada San Antonio, en la Región Moquegua. Esta investigación fue de tipo aplicada con un enfoque cuantitativo y nivel descriptivo correlacional. Para el desarrollo del estudio, se realizaron trabajos de campo de recolección de muestras del terreno, las cuales fueron posteriormente analizadas en laboratorio con el fin de determinar sus características físicas, geomecánicas, hidráulicas y dinámicas.

La investigación empleó diversos métodos de cálculo de estabilidad tales como Fellenius ordinario, Bishop simplificado, Janbu simplificado, Spencer y Morgenstern-Price. Estos análisis fueron desarrollados mediante el uso del software Slide 6.0, herramienta especializada que permitió simular y evaluar el comportamiento del talud. Los resultados obtenidos revelaron que, bajo un análisis

estático, los valores del factor de seguridad son superiores al umbral de 1.2, lo que muestra una condición de estabilidad aceptable según los parámetros normativos vigentes. Se concluye que los taludes de la concesión minera presentan condiciones estables. Los valores obtenidos no difieren significativamente entre los cinco métodos aplicados, presentando una variación de apenas un decimal, lo cual refuerza la confiabilidad del análisis. Asimismo, la identificación del plano de rotura y el cálculo del factor de seguridad han permitido predecir el comportamiento del talud frente a posibles fallamientos, aportando información valiosa para establecer criterios de seguridad en el proceso de cierre de operaciones de la unidad minera.

Catari (2024) llevó a cabo un estudio cuyo objetivo principal fue analizar y valorar la estabilidad del talud noroeste de la Mina Cuajone, ubicada en el distrito de Torata, región Moquegua, por medio del método de elementos finitos, con el propósito de determinar un diseño final que garantice su estabilización. La investigación se desarrolló bajo un enfoque descriptivo y del tipo no experimental. La población del estudio estuvo constituida por el Tajo Cuajone en su totalidad, mientras que la muestra se delimitó al Deslizamiento 53 localizado en la fase 07 del talud noroeste. Para el análisis se emplearon como instrumentos los softwares Dips V.7.0, Slide V.6.0 y Phase2 V.8.0, herramientas especializadas en geotecnia y estabilidad de taludes.

El diseño propuesto por la ingeniería en el sector sur presentaba un ángulo de incidencia de 49°, arrojando un factor de seguridad (FOS) de 0.92, lo cual lo clasifica como inestable. En contraste, el sector norte, con un ángulo de incidencia de 38°, mostró un FOS de 1.57, indicando condiciones de estabilidad. En base a estos resultados, se concluyó que era necesario modificar el diseño del talud sur para mejorar su estabilidad. Se propuso un nuevo ángulo de incidencia de 43°, con el cual se alcanzaría un FOS de 1.1 y una ocurrencia de rotura planar del 25%, reduciendo además el ancho de la plataforma de desacople a 52 metros. Para asegurar la estabilidad global del talud noroeste, se recomienda mantener los ángulos de incidencia en 43° para el sector sur y 41° para el sector norte. Esta reconfiguración permitiría eliminar las condiciones inseguras existentes, viabilizar el minado en niveles inferiores y facilitar la extracción de 2.2 millones de toneladas de mineral con una ley de 0.596% de cobre, lo que representa un aporte significativo

al plan de explotación de la mina Cuajone.

2.2. Bases Teóricas

2.2.1. Mecánica de rocas

La mecánica de rocas, entendida como la ciencia que explica cómo responden la roca y el macizo rocoso frente a los esfuerzos que actúan sobre ellos, constituye la base para interpretar el comportamiento del terreno en excavaciones y obras mineras. Más que un conjunto de definiciones formales, esta disciplina busca comprender cómo un medio geológico aparentemente rígido y estable puede deformarse, fracturarse o incluso colapsar cuando se modifica su estado tensional. Este enfoque integrador es señalado por Brady y Brown (2004), quienes destacan que el estudio del macizo rocoso requiere considerar simultáneamente su rigidez, su capacidad resistente y la manera en que la excavación altera las tensiones internas.

En ese mismo sentido, González de Vallejo (2002) enfatiza que la mecánica de rocas no solo describe propiedades físicas o numéricas, sino que surge de la necesidad práctica de anticipar cómo se comportará la roca ante la construcción de túneles, taludes, cimentaciones o excavaciones mineras. Es decir, se trata de una disciplina que combina teoría, observación y experiencia para interpretar escenarios reales donde la estabilidad depende de cambios en las condiciones naturales del macizo.

Además, es indispensable reconocer que el macizo rocoso no es un material continuo, sino un sistema formado por bloques de matriz rocosa separados por discontinuidades. Esta característica que incluye juntas, fallas, estratificación o superficies de esquistosidad condiciona de manera directa los patrones de deformación y rotura. Hudson y Harrison (1997) explican que estas discontinuidades pueden modificar la resistencia y la deformabilidad del macizo incluso más que las propiedades de la propia roca intacta.

A todo ello se suma la naturaleza heterogénea y anisótropa del macizo. Las propiedades pueden variar de un punto a otro por cambios en la litología, la mineralogía, el grado de alteración o el contenido de agua; y, al mismo tiempo, pueden diferir según la dirección en que se midan debido a estructuras internas

como la laminación o la foliación. González de Vallejo (2002) señala que estas variaciones no solo complican el estudio, sino que obligan a interpretar el macizo como un medio complejo donde la resistencia depende de múltiples factores que interactúan.

En conjunto, estas perspectivas demuestran que la mecánica de rocas no es simplemente una colección de ensayos o parámetros, sino una disciplina que busca entender cómo se comporta un material natural, discontinuo y variable. Esta comprensión constituye el punto de partida para cualquier evaluación de estabilidad en minería a cielo abierto y la base conceptual que justifica el uso de correlaciones de resistencia cuando la recuperación del testigo o la calidad de la muestra es limitada.

2.2.2. Resistencia a la compresión uniaxial (UCS)

La resistencia a la compresión uniaxial (UCS) es una de las propiedades más relevantes de las rocas en el contexto de ingeniería de minas y obras civiles. Esta propiedad describe el esfuerzo máximo que una roca puede soportar bajo carga axial sin confinamiento lateral antes de fracturarse (Feijoo et al., 2022), y es esencial en el análisis de la estabilidad de la mayoría de los proyectos de ingeniería minera y geotécnica

La medición estándar de la resistencia a la compresión uniaxial (UCS) se encuentra regulada por normas internacionales como la ASTM D7012, la cual establece los procedimientos para determinar la resistencia, el módulo de elasticidad y otros parámetros mecánicos de rocas sometidas a carga axial sin confinamiento lateral. Esta norma detalla los requisitos para la preparación de las probetas, las dimensiones adecuadas, la velocidad de aplicación de carga y los criterios de falla, garantizando la reproducibilidad y comparabilidad de los resultados. De acuerdo con ASTM D7012 (2014), la UCS representa el esfuerzo máximo que una muestra de roca intacta puede soportar antes de fallar bajo carga axial directa, constituyendo así uno de los parámetros fundamentales para la caracterización geomecánica del macizo rocoso.

La UCS sirve para estimar la capacidad portante del macizo rocoso y también es necesaria para calcular el módulo de deformación y realizar clasificaciones geomecánicas como el sistema de calificación del macizo rocoso (RMR)

(Aladejare, 2019). Además, su influencia se extiende a prácticas comunes como la perforación, voladura y diseño de sostenimiento en excavaciones subterráneas y a cielo abierto. De esta manera, una estimación incorrecta o insuficiente de la UCS podría comprometer seriamente la estabilidad de estructuras mineras, ocasionando fallas inesperadas con consecuencias económicas y de seguridad.

2.2.2.1. Importancia de la UCS

La UCS es otro valor clave y fundamental de la ingeniería de minas y de las obras geotécnicas, pues su correcta evaluación conlleva a la anticipación de riesgos y la optimización de los diseños, con la consiguiente seguridad de las estructuras realizadas sobre roca. Este parámetro es fundamental para determinar la estabilidad estructural de excavaciones, túneles, taludes y galerías mineras, y de éste dependen la elección de un método de excavación, sistemas de sostenimiento, así como de procedimientos de voladura. Adicionalmente, el conocimiento de este parámetro es necesario para la estimación del módulo de deformación del macizo rocoso y para la aplicación de sistemas de clasificación geomecánica comunes tales como el sistema RMR (Rock Mass Rating), que caracteriza la calidad del macizo rocoso y en consecuencia ayuda en la toma de decisiones en el diseño de obras e instalaciones (Aladejare, 2019).

Bieniawski (1989) destaca que la resistencia a la compresión uniaxial (UCS) es uno de los parámetros fundamentales en la evaluación del macizo rocosa, ya que constituye la base para cuantificar la resistencia de la roca intacta y forma parte de los sistemas clásicos de clasificación geomecánica, como el Rock Mass Rating (RMR). Según este autor, variaciones relativamente pequeñas en la UCS pueden influir significativamente en el comportamiento del macizo, afectando la estabilidad de excavaciones y taludes, así como la selección de métodos de sostenimiento. Por ello, su correcta estimación ya sea mediante ensayos directos o correlaciones indirectas es esencial para obtener parámetros representativos que permitan realizar diseños geotécnicos seguros y confiables.

La UCS actúa como un parámetro predictor del comportamiento general de las rocas frente a distintos tipos de solicitación mecánica. En minería, su valor es decisivo desde la etapa de exploración hasta la explotación y cierre de un proyecto. Durante las operaciones, la resistencia a la compresión uniaxial permite anticipar

problemas de estabilidad en taludes, identificar zonas críticas en túneles y diseñar sistemas de soporte eficientes. Una subestimación o ausencia de información sobre este parámetro puede conllevar fallas estructurales no previstas, afectando tanto la seguridad operativa como la rentabilidad del proyecto.

2.2.2.2. Desventajas de la obtención directa de la UCS

No obstante, a pesar de su importancia, la obtención directa de la UCS en laboratorio presenta múltiples dificultades. El ensayo estándar para determinar esta propiedad implica el uso de equipos especializados y preparación cuidadosa de las muestras, lo cual demanda tiempo y recursos considerables (ASTM, 2020).

Esta situación se agrava cuando el acceso a laboratorios es limitado o cuando se deben procesar numerosas muestras. Además, extraer núcleos de alta calidad puede resultar complicado o incluso inviable, especialmente en rocas débiles, fuertemente meteorizadas o con estructuras laminadas delgadas (Aladejare, 2019).

A menudo, la logística asociada al ensayo uniaxial se vuelve un obstáculo porque requiere tiempo, preparación técnica minuciosa, y los resultados pueden demorar en estar disponibles, afectando los tiempos de ejecución en proyectos de pequeña o mediana envergadura. Por estas razones, en muchos casos se busca estimar la UCS mediante correlaciones empíricas con otras propiedades físicas o geomecánicas de las rocas, como la carga puntual, velocidad de onda ultrasónica, la densidad o la esclerometría, aunque estas estimaciones indirectas también conllevan incertidumbre.

2.2.2.3. Determinación indirecta de la UCS

La resistencia a la compresión uniaxial por métodos indirectos es una herramienta esencial para el reconocimiento de los materiales rocosos, y es especialmente útil en caso de no disponer de los medios logísticos o presupuestarios, o de tiempo de realizar los ensayos directos. Sin embargo, su uso requiere de criterio técnico, validación empírica, y una interpretación cautelosa de los resultados que se obtienen con ellas.

La resistencia a la compresión uniaxial, UCS, es una propiedad geotécnica cuya determinación indirecta es sumamente útil y en la práctica casi necesaria en múltiples campos de la ingeniería, especialmente los relacionados a la geotecnia y

minería en las fases tempranas o proyectos de pequeña o mediana escala en los que no siempre se dispone de la respuesta al ensayo de compresión uniaxial. Como consecuencia de su comportamiento mecánico lineal o no lineal, las rocas ofrecen diferentes tipos de curvas de tensión-deformación en función de su tipo, ante las fuerzas aplicadas (Freijoo et al. 2022). su complejidad requiere métodos prácticos y eficaces para la estimación de sus propiedades mecánicas esenciales.

Ante la falta de datos experimentales directos sobre la UCS (Resistencia a la compresión Uniaxial), se recurre frecuentemente a métodos indirectos basados en ensayos de índice o propiedades físicas más fáciles y rápidas de obtener. Estos métodos permiten estimar la UCS mediante relaciones empíricas desarrolladas a partir de estudios experimentales, reduciendo significativamente el tiempo y los costos asociados al ensayo convencional. Así, ingenieros y geólogos pueden tomar decisiones más informadas y oportunas durante las fases de exploración, optimizando la selección de muestras para posteriores análisis más detallados y costosos (ASTM, 2020).

Entre los métodos indirectos más utilizados destaca el ensayo de carga puntual (Point Load Test), en el cual se aplica una carga concentrada sobre una muestra de roca hasta su fractura. El resultado de este ensayo, el Índice de Carga Puntual (Is), se correlaciona empíricamente con la UCS, permitiendo su estimación con un esfuerzo experimental mínimo. Otro ensayo común es el ensayo brasileño de tracción indirecta, que, aunque concebido para medir la resistencia a la tracción, también ha demostrado utilidad para inferir la resistencia a compresión mediante correlaciones adecuadas.

Asimismo, la esclerometría o uso del martillo de Schmidt es una técnica extendida en trabajos de campo. Este método evalúa la dureza superficial del material mediante el rebote de un émbolo, y se ha verificado que existe una relación empírica entre este rebote y la UCS, particularmente en rocas homogéneas o materiales cementados.

Adicionalmente estas metodologías son de fácil aplicación, de bajo costo y aptas para una aplicación directa en campo, sin apenas preparación de la muestra. Estos métodos, no obstante, no deben olvidar ser un sustituto del ensayo uniaxial convencional. Son fiables si están bien calibrados localmente y se tiene un buen

conocimiento de sus limitaciones, puesto que en gran medida las correlaciones dependen de la litología, de la existencia y sentido de las discontinuidades, de la humedad y de que el material sea anisotrópico.

En conjunto, la resistencia a la compresión uniaxial constituye el parámetro mecánico más representativo del comportamiento resistente de la roca intacta y un elemento central en cualquier evaluación geotécnica. Su influencia directa en la estabilidad de taludes, el diseño de excavaciones y la selección de sistemas de sostenimiento justifica la necesidad de contar con valores confiables de UCS, ya sea mediante ensayos directos o estimaciones indirectas. Por ello, comprender sus fundamentos, limitaciones y métodos alternativos de obtención no solo fortalece la caracterización geomecánica, sino que también permite integrar de manera consistente este parámetro dentro de modelos de estabilidad y estrategias de diseño, lo cual es esencial para la toma de decisiones seguras y eficientes en proyectos mineros.

En el presente estudio, la UCS adquiere un rol central, ya que constituye el parámetro resistente que se busca estimar de manera confiable a partir del índice de carga puntual Is_{50}. Esta correlación resulta especialmente relevante para el análisis de estabilidad de taludes a escala banco-berma dentro de la operación minera considerada, donde las condiciones de fracturamiento, variabilidad litológica y disponibilidad de testigos íntegros dificultan la obtención sistemática de valores UCS por métodos directos.

2.2.3. Índice de carga puntual Is_{50}

El índice de carga puntual, Is_{50}, es un parámetro mecánico fundamental para la caracterización resistente de las rocas y constituye uno de los ensayos índice más difundidos en geotecnia y minería. De acuerdo con las Suggested Methods de la International Society for Rock Mechanics (ISRM, 1985, 2007), el ensayo de carga puntual permite estimar de manera sencilla y económica la resistencia de una muestra sometida a una carga concentrada entre dos puntas cónicas, pudiendo realizarse sobre núcleos cilíndricos, bloques o fragmentos irregulares tanto en laboratorio como en campo. De forma complementaria, la norma ASTM D5731-16 establece los lineamientos para su ejecución y el cálculo del índice (ASTM, 2020).

El procedimiento consiste en aplicar una carga creciente hasta la fractura de la

muestra; la carga máxima registrada permite calcular el índice Is. Debido a que este valor depende del tamaño de la probeta, se estandariza mediante el diámetro equivalente de 50 mm, obteniéndose el índice corregido Is_{50}. Para núcleos con diámetros cercanos a 50 mm (como los NX de 54 mm), la corrección no es necesaria.

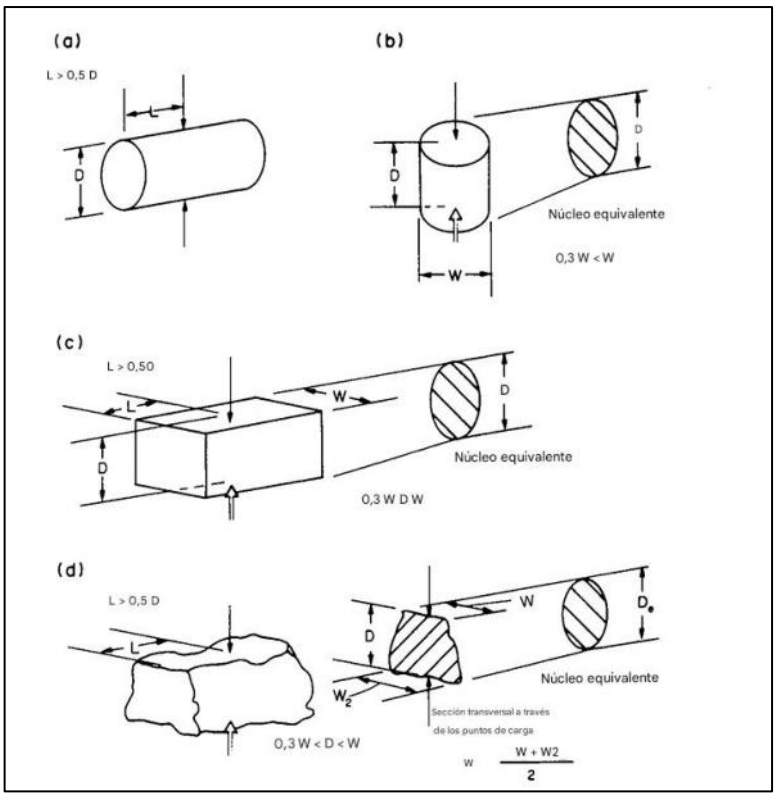
En términos físicos, el Is_{50} representa la resistencia de la roca frente a una carga altamente localizada, reflejando su cohesión interna y su comportamiento frágil bajo esfuerzos puntuales. Por esta razón, es un indicador práctico de competencia del material y una herramienta útil en clasificación geomecánica y reconocimiento en campo.

No obstante, el índice de carga puntual no equivale a la resistencia a compresión uniaxial (UCS). Mientras que la UCS mide la resistencia bajo una carga distribuida sobre toda la sección transversal, el ensayo de carga puntual actúa sobre una zona muy reducida. Por ello, Is_{50} solo puede emplearse como estimador indirecto de la UCS mediante correlaciones empíricas que dependen del tipo de roca, su anisotropía, grado de fracturamiento y estado de alteración (Broch & Franklin, 1972; ISRM, 1985). En consecuencia, Is_{50} debe interpretarse como un índice complementario y no como sustituto de un ensayo UCS directo.

2.2.3.1. Relación de esbeltez (L/D)

La razón de esbeltez (L/D) es un parámetro fundamental en el ensayo de carga puntual, pues garantiza que la geometría de la muestra permita una distribución adecuada de esfuerzos durante la aplicación de la carga. Según las recomendaciones del ISRM (1985), la longitud efectiva de la probeta debe ser al menos 0.5 veces su diámetro equivalente ($L > 0.5D$) para ensayos diametrales, axiales, cúbicos o con fragmentos irregulares. Este criterio busca evitar fallas prematuras o modos de rotura no representativos que puedan sesgar el cálculo del índice Is. La relación L/D, por tanto, asegura que el fallo ocurra por partición típica y no por pandeo, confinamiento insuficiente o contactos inestables, manteniendo así la validez del resultado obtenido.

Figura 1
Requisitos de geometría de las probetas para el ensayo de carga puntual



Nota. La figura muestra los criterios de forma y esbeltez requeridos para probetas cilíndricas, axiales, cúbicas y fragmentos irregulares en el ensayo de carga puntual. Adaptado de (ISRM, 1985).

2.2.3.2. Determinación del índice de carga puntual

Para determinar el índice de carga puntual "Is", se utiliza un método en el cual una probeta de roca, irregular, cúbica o de núcleo cilíndrico, se somete a carga progresiva mediante dos puntas cónicas de acero, las cuales son dispuestas contrapuestas y en contacto con las caras opuestas de la probeta de roca, presionando las puntas sobre el material hasta el punto de resistencia máximo de la roca, en este punto la probeta se romperá y el valor de la fuerza aplicada es la que se registra como la carga puntual "P". A continuación, se presenta la ecuación del Índice de Carga Puntual sin corregir:

$$Is = \frac{P}{De^2}$$

Donde:

Is : Índice de carga puntual

P : Valor de la carga puntual

De : Diámetro equivalente de las probetas cilíndricas

Este valor de carga puntual P sirve como base para calcular el índice de carga puntual (Is), un parámetro que permite clasificar y caracterizar mecánicamente distintos tipos de roca. El procedimiento tiene como objetivo principal evaluar la resistencia a compresión de la muestra, proporcionando un dato que puede utilizarse posteriormente en estudios geotécnicos, diseño de excavaciones o análisis de estabilidad de taludes, entre otros (Choco y Peláez, 2022).

El Índice Is, no obstante, es susceptible a depender del tamaño y de la geometría de la muestra. Por esta razón se suele efectuar una corrección, estandarizando el diámetro efectivo de la probeta a 50 mm y se obtiene el índice de carga puntual corregido, Is_{50}. Este valor es el que tendría el mismo índice de la misma muestra de diámetro 50 mm; de esta manera se facilita la comparación entre materiales distintos.

A continuación, se presenta la ecuación del factor de corrección del Índice de Carga puntual corregido:

$$F = \left(\frac{De}{50}\right)^{0.45}$$

Donde:

F : Factor de corrección resultante para IS_{50}.

De : Diámetro equivalente de las probetas cilíndricas

Por tanto, la ecuación del Índice de Carga puntual corregido sería:

$$IS_{50} = F * Is$$

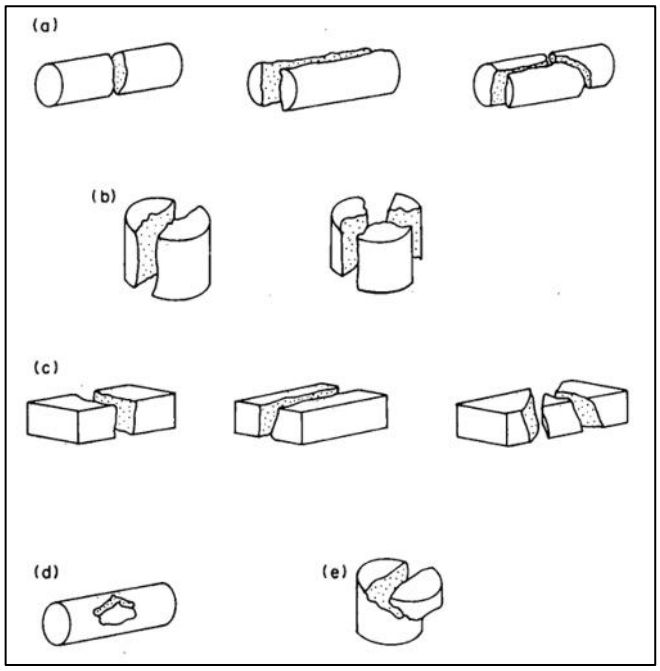
Una de las ventajas significativas de este ensayo es la flexibilidad en la preparación de las muestras. A diferencia de otros métodos que requieren superficies perfectamente planas o dimensiones estrictamente controladas, el ensayo de carga puntual permite el uso de fragmentos de roca sin una forma perfectamente definida, facilitando su aplicación tanto en campo como en laboratorio. La única consideración técnica esencial es medir con precisión la distancia entre los puntos de aplicación de la carga (D), ya que este dato permite normalizar el resultado del

ensayo y obtener el valor del índice con fiabilidad.

2.2.3.3. Modos de rotura en el ensayo de carga puntual

Durante el ensayo de carga puntual, la fractura de la muestra puede manifestarse mediante distintos patrones de rotura, los cuales dependen de la geometría de la probeta, la orientación de las microfracturas internas y la forma en que la carga es transferida a través de las puntas de aplicación. La ISRM (1985) describe varios modos típicos de falla, como rotura diametral, rotura axial, rotura en cuña, rotura irregular o fallas combinadas. Reconocer estos patrones permite validar que la fractura es representativa y que la carga aplicada realmente moviliza la resistencia intrínseca de la roca, evitando interpretar resultados afectados por fallas anómalas o no estándar.

Figura 2
Modos de rotura típicos en el ensayo de carga puntual.



Nota. Modos de fractura observados en probetas sometidas al ensayo de carga puntual, que incluyen roturas diametrales, axiales, en bloques e irregulares. Imagen adaptada de (ISRM, 1985).

2.2.3.4. Limitaciones de la determinación indirecta de la UCS

La determinación indirecta de la resistencia a la compresión uniaxial (UCS) a partir del índice de carga puntual Is_{50} presenta diversas limitaciones que deben ser cuidadosamente consideradas al interpretar los resultados obtenidos mediante esta

metodología. Aunque es una técnica de gran utilidad, especialmente en campañas de exploración donde no es posible extraer muestras cilíndricas intactas para realizar ensayos UCS estándar, su carácter empírico introduce incertidumbres significativas.

Uno de los principales problemas radica en que el uso de ecuaciones empíricas para estimar propiedades geotécnicas siempre implica un cierto grado de incertidumbre, ya que estas ecuaciones se derivan básicamente mediante ajustes de datos experimentales. Por ello, puede existir una disparidad considerable entre un UCS medido directamente y uno estimado indirectamente, derivada de una representación imperfecta de la realidad. Esta situación puede deberse a simplificaciones o idealizaciones realizadas durante el desarrollo de dichas ecuaciones, así como a la falta de conocimiento suficiente (Aladejare, 2019).

Además, la variabilidad del coeficiente de correlación (K) entre el Is_{50} y la UCS constituye otra limitación relevante. Este coeficiente no es un valor universal, sino que puede variar considerablemente dependiendo del tipo de roca, su grado de fracturamiento, contenido de humedad, nivel de alteración y la orientación de estructuras internas como planos de foliación o estratificación, entre otros factores. Emplear un valor genérico de K sin considerar estas variables puede llevar a estimaciones poco fiables de la resistencia real del material. Dado que la naturaleza de la roca varía de un lugar a otro, la confiabilidad de los modelos de regresión debe evaluarse cuidadosamente. En este sentido, es importante analizar cómo las propiedades físicas e índices se comportan en la estimación empírica del UCS, ya que son datos disponibles y comúnmente usados para este propósito.

Otra limitación importante está en el principio mismo del ensayo de carga puntual, que mide la resistencia bajo condiciones de carga muy localizadas. Esto no representa fielmente el estado de esfuerzo que ocurre en un ensayo de compresión uniaxial, donde la carga se aplica de manera distribuida y homogénea sobre toda la muestra. Esta diferencia puede generar discrepancias significativas, especialmente en rocas heterogéneas o anisotrópicas.

Es importante considerar que la estimación indirecta se basa en un solo parámetro mecánico el Is_{50}, sin considerar otros factores geotécnicos que influyen en el comportamiento de la roca. Por tanto, las correlaciones empíricas deben utilizarse

únicamente como herramientas complementarias y no como sustitutos del ensayo UCS directo cuando se requiere una caracterización mecánica precisa y confiable.

Finalmente, la exactitud de la estimación indirecta depende en gran medida del número y representatividad de las muestras ensayadas. Realizar pruebas sobre un número reducido de fragmentos o muestras que no representen adecuadamente el macizo rocoso puede inducir sesgos significativos en el análisis. Por ello, los experimentos para obtener datos de roca destinados al desarrollo de ecuaciones empíricas deben realizarse con extremo cuidado y precaución, con el fin de minimizar errores experimentales y de medición que se propaguen y afecten la calidad de las correlaciones resultantes.

En síntesis, el índice de carga puntual I_{s50} constituye una herramienta robusta para caracterizar la resistencia de rocas cuando no se dispone de testigos íntegros ni de ensayos UCS directos. Su integración dentro de modelos geomecánicos permite mejorar la estimación de parámetros resistentes en contextos operativos como la minería a cielo abierto, en especial en la definición de taludes a escala banco-berma donde la variabilidad litológica y el fracturamiento reducen la disponibilidad de muestras de calidad.

2.2.4. Estabilidad de taludes

La estabilidad de taludes constituye uno de los aspectos geotécnicos más importantes en minería a cielo abierto, ya que determina la seguridad de la excavación, el rendimiento operativo y la continuidad del proceso extractivo. Por ello, es fundamental comprender los factores que gobiernan el comportamiento del macizo y los métodos utilizados para su evaluación.

Los taludes constituyen superficies inclinadas generadas durante el proceso de excavación y conformación del terreno, y representan uno de los elementos más críticos en el diseño de una mina a cielo abierto. Tal como señala González de Vallejo (2002), la pendiente de un talud debe establecerse en función de la resistencia del material y de las condiciones geológicas que lo afectan, dado que su estabilidad depende tanto de las propiedades de la roca intacta como de la presencia de discontinuidades, agua o procesos de meteorización. En un tajo abierto, estos factores determinan el comportamiento del macizo frente a los cambios de tensión producidos por la extracción progresiva, por lo que una geometría inadecuada

puede comprometer la seguridad, la operatividad del pit y la continuidad de la explotación.

La estabilidad de un talud se entiende como la capacidad de una masa de suelo o roca para mantenerse en equilibrio sin experimentar fallas o desplazamientos significativos. Como señalan Escobar Chanalata y Flores Carvajal (2017), los criterios de estabilidad buscan determinar, en un momento dado, cuál es la inclinación adecuada que puede adoptar un corte para mantenerse durante el tiempo requerido sin colapsar, procurando siempre que dicha pendiente sea lo más inclinada posible sin comprometer la seguridad.

En minería a cielo abierto, el diseño de taludes se organiza en tres escalas principales: escala de banco, que corresponde a la pendiente individual de cada banco y sus bermas de seguridad; escala inter-rampa, que agrupa varios bancos y las rampas de acarreo; y escala global, que integra desde el piso del tajo hasta la cresta. Cada una de estas escalas presenta mecanismos de falla distintos y requiere un análisis independiente, ya que un colapso a nivel de banco suele tener impacto operativo limitado, mientras que una falla inter-ramp o global puede comprometer el acceso, la producción e incluso la continuidad de la mina. Por ello, los análisis geotécnicos suelen iniciar en la escala banco-berma y progresar hacia las escalas superiores para asegurar la estabilidad general del tajo (Obregón, 2020).

Figura 3
Escalas de diseño y análisis de estabilidad en un tajo abierto



Nota. Las tres escalas de análisis, banco, inter-rampa y global, representan diferentes niveles de detalle para evaluar la estabilidad de taludes en minería a cielo abierto. Adaptado de Obregón (2020),

2.2.4.1. Análisis de estabilidad

El análisis de estabilidad de taludes permite evaluar si una pendiente excavada

puede mantenerse en equilibrio frente a las fuerzas actuantes y determinar la geometría segura del corte. Como explica González de Vallejo (2002), estos análisis pueden realizarse mediante enfoques determinísticos, que emplean valores fijos de los parámetros resistentes para calcular un factor de seguridad, o mediante enfoques probabilísticos, que incorporan la variabilidad de los parámetros geomecánicos y estiman la probabilidad de falla asociada a diferentes condiciones del talud. Mientras el análisis determinístico ofrece una evaluación puntual de la estabilidad, el probabilístico permite valorar el riesgo y la incertidumbre inherente al macizo rocoso, lo que resulta especialmente útil en proyectos donde la variabilidad de datos es significativa.

En el análisis de estabilidad de taludes también es fundamental distinguir entre los enfoques estático y pseudoestático. El análisis estático evalúa la estabilidad considerando únicamente las fuerzas gravitacionales y las condiciones geomecánicas del macizo en estado no perturbado, siendo el procedimiento base para taludes en operación normal. Por su parte, el análisis pseudoestático incorpora los efectos sísmicos mediante la aplicación de fuerzas horizontales equivalentes definidas por coeficientes sísmicos, con el fin de modelar de manera simplificada la acción de los terremotos sobre el talud. Este enfoque permite estimar una reducción del factor de seguridad bajo condiciones dinámicas y es ampliamente utilizado en ingeniería geotécnica en regiones sísmicamente activas como el Perú (HoeK & Bray, 1981).

Las fallas en taludes pueden presentarse como roturas circulares, planas, en cuña o por vuelco, dependiendo de la orientación de las discontinuidades y de la geometría del macizo. Cada uno de estos mecanismos responde a condiciones estructurales específicas y determina el tipo de análisis adecuado para evaluar la estabilidad del talud. En particular, las roturas circulares suelen darse en materiales homogéneos o fuertemente meteorizados, mientras que las fallas planas, en cuña y por vuelco están asociadas al control estructural ejercido por planos de debilidad y familias de discontinuidades (Wyllie, 2017).

2.2.4.2. Factor de seguridad

El factor de seguridad (FS) es un parámetro fundamental en el análisis de estabilidad de taludes, ya que expresa la relación entre la capacidad resistente del

macizo rocoso y las fuerzas que tienden a generar el deslizamiento. Según Wyllie (2017), su determinación compara la resistencia al corte disponible, controlada por la cohesión y el ángulo de fricción del material, con el esfuerzo cortante movilizado, el cual depende del peso del bloque, la orientación del plano potencial de falla y la geometría del talud.

Cuando la resistencia supera a las fuerzas actuantes, el FS adquiere valores mayores que uno y se interpreta que el talud presenta condiciones de estabilidad. Por el contrario, valores próximos a la unidad o inferiores indican que el macizo no cuenta con suficiente resistencia para contrarrestar las fuerzas desestabilizadoras, situación que puede derivar en falla incipiente o colapso. Este cociente permite juzgar de manera directa si un talud puede mantenerse en equilibrio bajo las condiciones geomecánicas existentes.

En términos generales, el factor de seguridad se expresa como:

$$FS = \frac{\sum Resistencia\ al\ corte}{\sum Esfuerzo\ cortante}$$

En el caso de superficies circulares, donde el análisis considera un centro de rotación y la comparación entre momentos resistentes y actuantes, el FS se define como:

$$FS = \frac{\sum Momento\ resistente}{\sum Momento\ actuante}$$

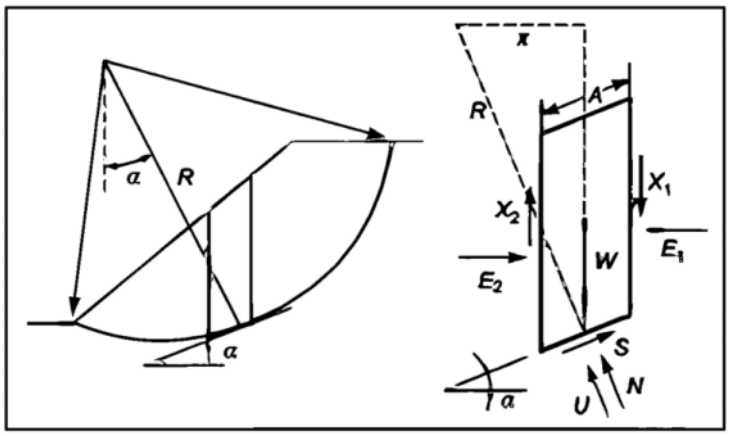
2.2.4.3. Equilibrio Limite

El método de equilibrio límite (LEM) es una de las técnicas más utilizadas en el análisis de estabilidad de taludes y se basa en evaluar si una masa de suelo o roca puede mantenerse en equilibrio frente a las fuerzas actuantes. Este método divide el talud en una serie de rebanadas y aplica las ecuaciones de equilibrio de fuerzas y momentos para comparar las fuerzas resistentes con las fuerzas movilizadoras. Su resultado principal es el Factor de Seguridad, que expresa la relación entre resistencia y solicitación en el plano de falla. Como explican Matthews, FarooK y Helm (2014), el LEM constituye el enfoque tradicional en geotecnia debido a su simplicidad conceptual y a su efectividad para estimar la estabilidad, aunque no modela deformaciones sino únicamente condiciones de equilibrio global.

2.2.4.4. Método de Bishop simplificado

El método simplificado de Bishop es una técnica de equilibrio límite utilizada para determinar el factor de seguridad en taludes que presentan superficies de falla circulares. Este método divide la masa inestable en rebanadas verticales y evalúa las fuerzas actuantes asumiendo que los esfuerzos laterales entre rebanadas son horizontales. El análisis satisface el equilibrio vertical y el equilibrio global de momentos, lo que permite estimar el factor de seguridad con buena precisión para taludes en materiales donde la superficie potencial de rotura es aproximadamente circular. Debido a su simplicidad y fiabilidad, el método de Bishop es uno de los enfoques más utilizados en ingeniería geotécnica para el análisis de estabilidad de taludes (Wyllie, 2017).

Figura 4
Interpretación del método simplificado de Bishop para el análisis de estabilidad



Nota. Esquema del método simplificado de Bishop. Imagen adaptada de González de Vallejo (2002).

2.2.4.5. Método de Morgenstern-Price

El método de Morgenstern-Price es un procedimiento avanzado de equilibrio límite utilizado para analizar la estabilidad de taludes mediante la división del macizo en múltiples rebanadas verticales. A diferencia de métodos simplificados, este enfoque satisface simultáneamente las ecuaciones de equilibrio de fuerzas y momentos para toda la masa deslizante, incorporando además las fuerzas normales y tangenciales entre rebanadas mediante una función de distribución generalizada. Gracias a esta formulación, el método permite evaluar superficies de falla de geometría arbitraria y proporciona un cálculo riguroso del factor de seguridad, por lo que es considerado uno de los métodos más completos y confiables para el análisis de estabilidad de

pendientes en suelos y macizos rocosos (Morgenstern & Price, 1965).

En conjunto, las definiciones, escalas de análisis y métodos de evaluación descritos permiten comprender los fundamentos geotécnicos necesarios para estimar la estabilidad de taludes en minería a cielo abierto, así como para seleccionar el método más adecuado según la geometría, el tipo de material y la calidad de información disponible.

2.3. Definición de Términos

Índice de carga puntual Is

Es un parámetro obtenido a partir del ensayo de carga puntual, que representa la resistencia de una muestra de roca frente a una carga concentrada aplicada entre dos puntas cónicas. Se calcula como la relación entre la carga de rotura y el cuadrado del diámetro equivalente de la probeta, y constituye un ensayo índice utilizado para clasificar rocas por resistencia (ISRM, 1985; ASTM, 2020).

Índice de carga puntual Is_{50}

Es la forma normalizada del índice de carga puntual, ajustada a un diámetro equivalente estándar de 50 mm. Esta corrección permite comparar resultados obtenidos en probetas de diferentes tamaños y utilizar el parámetro como base para correlaciones empíricas con la resistencia a la compresión uniaxial UCS (ISRM, 1985; Broch & Franklin, 1972).

Ensayo de carga puntual (Ensayo Franklin)

Es un ensayo índice en el que una muestra de roca núcleo cilíndrico, bloque o fragmento irregular se somete a una carga creciente aplicada entre dos puntas cónicas hasta la rotura. El procedimiento está normalizado por la ISRM y por la norma ASTM D5731, y se emplea de manera amplia en campo y laboratorio por su sencillez y bajo costo (ISRM, 1985; ASTM, 2020).

Relación de esbeltez L/D

Es la razón entre la longitud efectiva de la probeta (L) y su diámetro equivalente (D) en el ensayo de carga puntual. Las Suggested Methods de la ISRM recomiendan que L sea mayor a 0.5D para asegurar un modo de rotura representativo y evitar fallas inestables o no estándar (ISRM, 1985).

Resistencia a la compresión uniaxial (UCS)

Es el esfuerzo máximo que puede soportar una muestra de roca intacta bajo carga axial sin confinamiento lateral antes de fracturarse. Su determinación está regulada por normas como ASTM D7012 y constituye uno de los parámetros mecánicos fundamentales en la caracterización geotécnica de rocas (ASTM, 2014).

Macizo rocoso

Es el conjunto de roca en su estado natural, constituido por la matriz rocosa intacta y por el sistema de discontinuidades que la afectan, tales como juntas, fallas, planos de estratificación y superficies de esquistosidad. Se caracteriza por ser un medio discontinuo, heterogéneo y anisótropo (González de Vallejo, 2002).

Heterogeneidad

La heterogeneidad del macizo rocoso se refiere a la variación espacial de sus propiedades físicas y mecánicas, las cuales pueden cambiar significativamente debido a diferencias en la litología, la mineralogía, el grado de alteración o la densidad de discontinuidades presentes en el material. Esta variabilidad hace que el macizo no pueda considerarse uniforme ni constante en su comportamiento. (González de Vallejo, 2002).

Discontinuidad

Las discontinuidades son planos de debilidad que interrumpen la continuidad del macizo rocoso, tales como juntas, fallas, fracturas, diaclasas o planos de estratificación. Estos elementos controlan la deformación, la permeabilidad y los mecanismos de rotura del macizo, influyendo de manera decisiva en su estabilidad. (González de Vallejo, 2002).

Anisotropía

La anisotropía describe la propiedad por la cual el macizo rocoso presenta comportamientos mecánicos diferentes según la dirección de la carga aplicada, debido a la orientación preferencial de estructuras internas como foliaciones, laminaciones o estratificación. Esto provoca que la resistencia o deformabilidad no sea igual en todas las direcciones. (González de Vallejo, 2002).

Talud

Es una superficie inclinada generada por excavación o conformación del terreno, cuya pendiente se define en función de la resistencia del material y de las condiciones geológicas y geomecánicas. En minería a cielo abierto, los taludes constituyen uno de los elementos más críticos del diseño del tajo (González de Vallejo, 2002).

Factor de seguridad (FS)

Es la relación entre las fuerzas o momentos resistentes y las fuerzas o momentos que tienden a producir la falla a lo largo de una superficie potencial de deslizamiento. Valores de FS mayores que uno indican condiciones de estabilidad, mientras que valores cercanos o inferiores a uno reflejan estados críticos o inestables (Wyllie, 2017).

Método de equilibrio límite (LEM)

Es una familia de métodos para el análisis de estabilidad de taludes que divide la masa potencialmente inestable en rebanadas y aplica las ecuaciones de equilibrio de fuerzas y momentos para calcular el factor de seguridad. Estos métodos constituyen el enfoque tradicional en geotecnia para evaluar la estabilidad global de pendientes (Matthews, FarooK & Helm, 2014).

Método simplificado de Bishop

Es un método de equilibrio límite que supone una superficie de falla circular y divide la masa deslizante en rebanadas verticales, satisfaciendo el equilibrio de momentos global y el equilibrio vertical. Proporciona factores de seguridad confiables para taludes con superficies de rotura aproximadamente circulares (Wyllie, 2017).

Método de Morgenstern-Price

Es un método avanzado de equilibrio límite que satisface simultáneamente el equilibrio de fuerzas y momentos en toda la masa deslizante, considerando explícitamente las fuerzas normales y tangenciales entre rebanadas. Permite analizar superficies de falla de geometría arbitraria y se considera uno de los métodos más rigurosos para evaluar la estabilidad de taludes (Morgenstern & Price,

1965).

Equipo de carga puntual (Point Load Tester)

El point load tester es un equipo compuesto por un sistema de carga que incluye un bastidor de carga, platinas, un sistema de medición de la carga aplicada, P, que es necesaria para romper la muestra, y un dispositivo para medir la distancia, D, entre los puntos de contacto de las platinas al inicio y al final del ensayo. El equipo debe ser resistente a impactos y vibraciones para garantizar la precisión de las lecturas en múltiples pruebas. Además, debe seguir las instrucciones específicas del fabricante respecto a operación, mantenimiento y calibración.

III. MÉTODO

3.1. Tipo y Nivel de Investigación

Esta investigación es de tipo aplicada porque busca resolver problemas prácticos y concretos mediante la aplicación de conocimientos teóricos y metodológicos. Así mismo, tiene como objetivo resolver un problema práctico en la ingeniería geotécnica minera al estimar un parámetro difícil y costoso de obtener como la resistencia a la compresión uniaxial, UCS mediante otro más accesible que es el índice de carga puntual, Is_{50}, con el fin de mejorar la estabilidad de taludes en la unidad minera estudiada. Se orienta a una utilidad práctica en las operaciones mineras en la línea de investigación de Planificación de las Operaciones Mineras.

La investigación es descriptiva y correlacional. Descriptivo porque la investigación se enfoca en observar, describir y analizar fenómenos, identificando sus características y relaciones sin necesariamente intervenir en ellos. A su vez, es correlacional porque busca describir y cuantificar la relación entre Is_{50} y UCS por litología mediante análisis estadísticos. No se manipulan variables en un entorno experimental controlado, sino que caracteriza y analiza relaciones que existen, cumpliendo con los criterios de investigación descriptiva.

Para establecer patrones y relaciones entre variables se utilizará la medición numérica y el análisis estadístico. La investigación propone una correlación estadística entre dos variables cuantificables (Is_{50} y UCS), con el objetivo de generar un modelo predictivo confiable y aplicarlo al contexto de análisis de taludes rocosos a nivel de banco-berma.

3.1.1. Diseño de la Investigación

Esta investigación corresponde a un diseño no experimental, dado que el investigador no manipula deliberadamente la variable independiente, sino que observa los fenómenos tal como ocurren en su contexto natural. En este caso, no se realizan intervenciones directas ni se controlan variables externas, ya que el propósito es analizar datos reales del macizo rocoso para evaluar su comportamiento bajo condiciones existentes.

Asimismo, la investigación presenta un diseño de corte transversal, pues el análisis se basa en un conjunto de datos recopilados en un único periodo de tiempo, sin

realizar seguimiento longitudinal. La información proviene de campañas de muestreo concluidas, cuyos resultados representan el estado geomecánico del macizo rocoso en el momento del ensayo. Este tipo de diseño es habitual en investigaciones que buscan caracterizar propiedades o relaciones estáticas entre variables, ya que permiten obtener conclusiones válidas a partir de una "fotografía" del fenómeno sin necesidad de observar su evolución temporal.

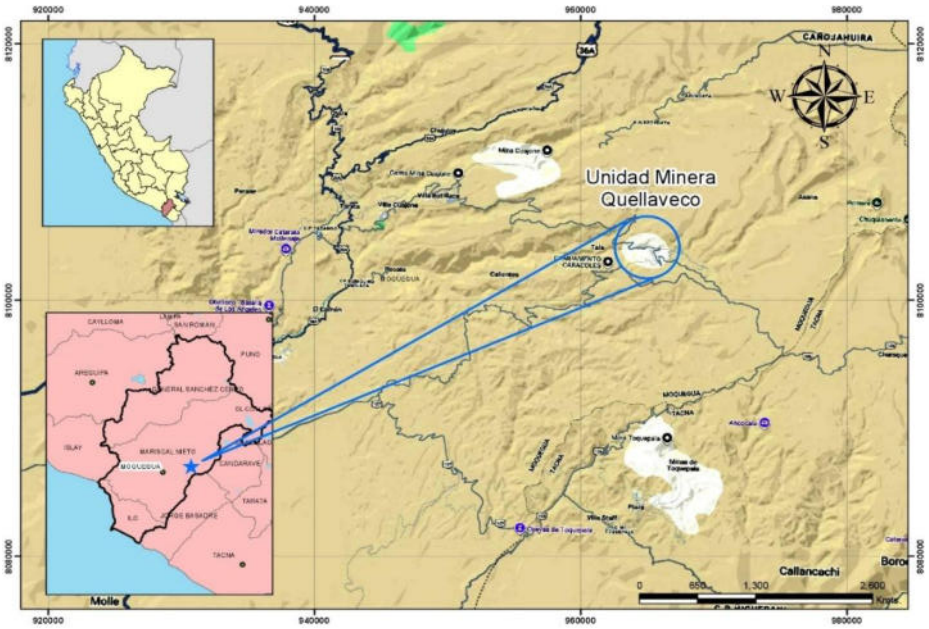
Finalmente, el estudio se desarrolla bajo un enfoque cuantitativo, en la medida en que se fundamenta en la medición objetiva de parámetros numéricos obtenidos mediante ensayos de laboratorio y registros técnicos. El análisis se apoya en herramientas estadísticas para evaluar el comportamiento de las variables, determinar la fortaleza de la relación entre Is_{50} y UCS y sustentar la construcción de un modelo de estimación. Este enfoque permite procesar la información de manera estructurada, reducir la subjetividad, y garantizar que las conclusiones se basen en evidencia verificable.Ámbito espacial y temporal

3.1.2. Ámbito espacial

La investigación se desarrolló en la unidad minera a cielo abierto Quellaveco, ubicada en la región Moquegua, en la zona sur del Perú. El estudio se concentró en sectores específicos del tajo donde se ejecutaron campañas de perforación diamantina y mapeo geotécnico, permitiendo evaluar el comportamiento mecánico del macizo rocoso en condiciones reales de explotación. El análisis se llevó a cabo sobre ventanas geotécnicas a escala de banco–berma, correspondientes a litologías representativas del yacimiento, principalmente Pórfido Temprano, Pórfido Tardío, Granodiorita e Ignimbrita.

En estas áreas se recopilaron los datos de campo y de laboratorio utilizados para el cálculo del índice de carga puntual Is_{50}, la obtención de valores de resistencia a la compresión uniaxial (UCS), así como la información geométrica necesaria para el análisis de estabilidad de taludes. Este ámbito espacial permitió integrar la caracterización geomecánica con la aplicación directa de los parámetros obtenidos en los modelos de estabilidad banco–berma.

Figura 5
Localización de la unidad minera a cielo abierto



Nota. Elaboración propia en base a Google Maps, consultado el 10 de junio de 2025. Sistema de coordenadas UTM.

Tabla 2
Coordenadas del área de estudio de la unidad minera

Vértice	Norte	Este
Vértice NW	8109504.419	326258.481
Vértice NE	8109504.419	328560.361
Vértice SW	8107500.196	326258.481
Vértice SE	8107500.196	328560.361

Nota. Elaboración propia. Sistema de coordenadas UTM.

3.1.3. Ámbito temporal

El estudio se desarrolló durante el periodo comprendido entre enero y agosto de 2025, etapa en la cual se recopiló la información geotécnica proveniente del campo, incluyendo la selección de muestras en las ventanas geotécnicas y los resultados de los ensayos de carga puntual Is_{50} y de compresión uniaxial (UCS) realizados por el laboratorio externo. Durante este mismo periodo se consolidó y organizó la base de datos necesaria para el análisis correlacional.

Posteriormente, entre agosto y diciembre de 2025, se efectuaron el procesamiento estadístico de los datos, la construcción de las correlaciones UCS–Is_{50} por litología y el cálculo de los parámetros ajustados. En ese mismo intervalo se desarrollaron

los modelamientos de estabilidad de taludes y la validación de los factores de seguridad obtenidos. Todas las actividades analíticas y de interpretación de resultados se realizaron dentro del año 2025, conforme al cronograma establecido para la investigación.

3.2. Población y Muestra

3.2.1. Población

La población está constituida por el macizo rocoso de los bancos de la unidad minera a cielo abierto ubicada en la región sur del Perú, correspondiente a una mina metálica en operación. Se consideran como parte de esta población todas las litologías predominantes del área de estudio, en particular aquellas donde se ha ejecutado perforación diamantina geotécnica y ensayos de carga puntual (Is_{50}), en el marco del diseño y análisis de estabilidad de taludes a escala de banco.

3.2.2. Muestra

La muestra de esta investigación estuvo conformada por 82 pares de valores UCS - Is_{50} obtenidos de testigos de perforación diamantina de la unidad minera. Estos datos corresponden a cuatro litologías representativas del yacimiento: Pórfido Temprano (27 pares), Pórfido Tardío (21 pares), Ignimbrita (17 pares) y Granodiorita (17 pares), reflejando la disponibilidad real de ensayos realizados durante las campañas geotécnicas.

La selección se realizó mediante un muestreo no probabilístico intencional, dado que los intervalos debían cumplir criterios técnicos específicos. Solo se incluyeron muestras pertenecientes a la misma litología y cuya distancia entre el ensayo Is_{50} y el UCS no superara los dos metros, con el fin de minimizar la heterogeneidad natural del macizo rocoso. Asimismo, se consideraron únicamente ensayos válidos: para Is_{50}, aquellos con rotura por matriz; y para UCS, probetas preparadas según la ISRM (1985) sin discontinuidades visibles ni alteración severa.

Este proceso de selección garantizó una muestra técnicamente representativa y depurada, apta para desarrollar correlaciones UCS - Is_{50} por litología y para su posterior aplicación en los análisis de estabilidad de taludes.

3.3. Instrumentos

3.3.1. Equipo de Ensayo de Carga Puntual (Point Load Tester)

El equipo de ensayo de carga puntual (Point Load Tester) fue utilizado para obtener los valores del índice de carga puntual Is_{50}, constituyendo el instrumento principal para la medición de la variable independiente. Este dispositivo está compuesto por dos puntas cónicas de acero templado, un sistema mecánico de aplicación de carga mediante una bomba hidráulica manual y un sensor digital integrado que registra la carga máxima aplicada al momento de la rotura de la muestra.

El equipo permite ensayar fragmentos irregulares, testigos cilíndricos o trozos de roca, y posteriormente corregir los resultados a un diámetro equivalente de 50 mm según las recomendaciones de la International Society for Rock Mechanics (ISRM, 1985). La estructura metálica de confinamiento evita proyecciones de fragmentos durante la rotura, garantizando la seguridad del operador.

Los valores obtenidos con este instrumento constituyen la base para el cálculo del Is_{50} por litología, parámetro que posteriormente fue utilizado para estimar la resistencia a la compresión uniaxial (UCS) mediante ecuaciones de correlación empírica. La imagen presentada a continuación corresponde al equipo empleado en la fase de ensayos:

Figura 6
Equipo de ensayo de carga puntual



Nota. Fotografía del equipo real utilizado para los ensayos de carga puntual en la presente investigación.

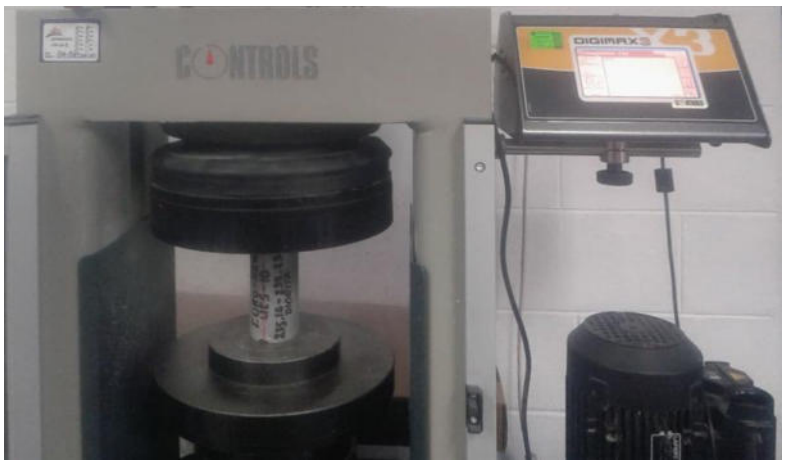
3.3.2. Prensa de Ensayo de Compresión Uniaxial

La resistencia a la compresión uniaxial (UCS) de las muestras de roca se determinó mediante una prensa hidráulica de compresión simple, equipo estándar utilizado en laboratorios geotécnicos para ensayar probetas de roca intacta bajo esfuerzos axiales. Esta máquina está compuesta por un bastidor rígido, platinas paralelas de acero endurecido, un sistema hidráulico de aplicación de carga y un módulo de lectura digital que registra la carga máxima alcanzada durante el ensayo.

El equipo permite aplicar la carga axial de manera controlada y progresiva hasta la rotura de la probeta, garantizando la alineación vertical entre las platinas y el correcto confinamiento geométrico de la muestra. Las probetas sometidas al ensayo fueron preparadas y dimensionadas conforme a los lineamientos de la International Society for Rock Mechanics (ISRM, 2007), asegurando relaciones altura-diámetro adecuadas, extremos planos y paralelos y ausencia de fisuras visibles.

Aunque los ensayos fueron realizados en un laboratorio externo especializado, la información obtenida mediante esta prensa constituye un instrumento fundamental para la investigación, dada la confiabilidad y trazabilidad de los valores de UCS registrados.

Figura 7
Prensa de compresión uniaxial utilizada para la determinación de la UCS



Nota. Fotografía del equipo real utilizado en el laboratorio externo para los ensayos de resistencia a la compresión uniaxial (UCS).

3.3.3. Herramientas de procesamiento y análisis estadístico

Para el procesamiento, organización y análisis estadístico de los datos obtenidos en

los ensayos de carga puntual (Is_{50}) y de compresión uniaxial (UCS), se emplearon herramientas digitales especializadas. Entre ellas destacan Microsoft Excel y el entorno de programación Python, los cuales permitieron realizar cálculos de correlación, estimaciones de resistencia y análisis comparativos con precisión y trazabilidad.

En Microsoft Excel se efectuó la depuración de datos, consolidación de resultados por litología, cálculo de valores medios y representación gráfica preliminar. Esta herramienta fue utilizada también para aplicar ecuaciones empíricas iniciales, organizar matrices de correlación y obtener tendencias exploratorias entre Is_{50} y UCS.

El entorno Python, mediante bibliotecas como NumPy, Pandas y Matplotlib, permitió ejecutar análisis estadísticos más robustos, incluyendo la generación del factor K por litología, el cálculo de coeficientes de correlación (R) y del coeficiente de determinación (R^2), fundamentales para la validación de la relación UCS - Is_{50}. Asimismo, Python facilitó la automatización de cálculos repetitivos, la creación de gráficos comparativos y la verificación del ajuste entre valores medidos y estimados.

El uso combinado de estas herramientas garantizó un manejo eficiente, reproducible y confiable de los datos, permitiendo obtener estimaciones de UCS coherentes con los resultados de laboratorio y adecuadas para su aplicación en el análisis de estabilidad de taludes.

3.3.4. Software Slide para el análisis de estabilidad de taludes

El software Slide, fue utilizado como herramienta especializada para el análisis de estabilidad de taludes a escala de banco-berma. Slide es un programa basado en los métodos de equilibrio límite (LEM), ampliamente empleado en ingeniería geotécnica para evaluar la estabilidad de macizos rocosos y suelos bajo distintas condiciones geométricas y parámetros de resistencia.

Este software permite modelar perfiles geotécnicos de manera precisa, incorporando factores como la geometría del talud (ángulo, altura y longitud de berma), peso específico del material, presencia de agua subterránea y propiedades mecánicas del macizo rocoso. Para esta investigación, se ingresaron como

parámetros principales los valores de UCS estimada (UCS_lit y UCS_corr), obtenidos previamente mediante la correlación UCS - Is_{50}, lo que permitió evaluar su efecto sobre los factores de seguridad resultantes.

Slide ofrece múltiples métodos de cálculo, entre ellos Bishop Simplificado, Janbu, Spencer y Morgenstern-Price, siendo este último uno de los más utilizados por su equilibrio simultáneo de fuerzas y momentos. La herramienta genera superficies potenciales de falla y calcula el factor de seguridad (FS) asociado a cada condición, permitiendo comparar escenarios mediante la modificación de un parámetro clave: la resistencia del material.

En este estudio, Slide fue fundamental para la aplicación práctica de los valores de UCS estimados, permitiendo observar cómo varía la estabilidad del talud al emplear factores K de literatura frente a factores K ajustados por litología. Esto facilitó la evaluación del impacto geotécnico de contar con valores de resistencia más representativos del macizo rocoso, generando resultados cuantitativos esenciales para el análisis de diseño.

3.3.5. Técnicas para la Recolección de Datos

Para el desarrollo de la investigación se emplearon técnicas de recolección de datos de naturaleza experimental, documental y analítica, orientadas a obtener y procesar los parámetros geomecánicos necesarios para el estudio.

En primer lugar, se utilizó la técnica experimental para la obtención del índice de carga puntual Is_{50} mediante ensayos directos realizados con el equipo de carga puntual (Point Load Tester), siguiendo las recomendaciones establecidas por la International Society for Rock Mechanics (ISRM). Asimismo, la resistencia a la compresión uniaxial (UCS) se obtuvo mediante ensayos de compresión simple efectuados en un laboratorio externo especializado, constituyendo también parte de la técnica experimental, al basarse en la aplicación controlada de esfuerzos sobre probetas normalizadas.

Complementariamente, se aplicó la técnica documental, mediante la revisión de estándares geotécnicos, protocolos de ensayo, reportes de laboratorio y bibliografía técnica que sustenta las ecuaciones empíricas utilizadas para la correlación entre Is_{50} y UCS, así como los factores K provenientes de estudios previos.

Finalmente, se empleó la técnica analítica y estadística, mediante el procesamiento de los datos obtenidos en los ensayos. Esta técnica permitió calcular promedios, curvas de ajuste, factores de correlación por litología, coeficientes estadísticos (R y R^2) y valores estimados de UCS, los cuales son esenciales para la validación del modelo UCS - Is_{50} y para su implementación en el análisis de estabilidad de taludes.

En conjunto, estas técnicas garantizaron la obtención de datos confiables y el procesamiento adecuado de la información, permitiendo establecer relaciones cuantitativas entre los parámetros geomecánicos y su aplicación en la evaluación de taludes rocosos.

3.4. Procedimientos

El desarrollo de la investigación siguió un conjunto de procedimientos secuenciales orientados a obtener, procesar y aplicar los parámetros geomecánicos necesarios para establecer la relación entre el índice de carga puntual Is_{50} y la resistencia a la compresión uniaxial (UCS), así como para evaluar su incidencia en el análisis de estabilidad de taludes. La descripción que se presenta a continuación tiene un propósito explicativo y organiza las actividades de forma cronológica, sin constituir una estructura rígida para la presentación de resultados.

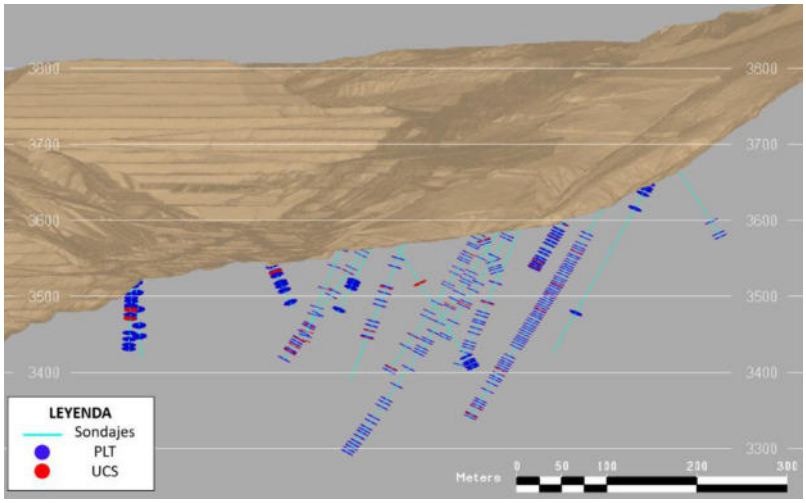
En primer lugar, se realizó la selección y preparación de las muestras de roca provenientes de testigos de perforación diamantina obtenidos en campañas geotécnicas de la unidad minera. Este proceso se llevó a cabo en la sala de logueo geotécnico, un espacio acondicionado con mesas de trabajo, buena iluminación y las herramientas necesarias para la manipulación de testigos de diámetro HQ. La selección se efectuó siguiendo los lineamientos de la ISRM y normas ASTM, privilegiando probetas y fragmentos con homogeneidad litológica, sin fisuras abiertas, alteración severa o discontinuidades visibles. Para ello se emplearon herramientas de campo como martillo de geólogo, flexómetro, vernier, cámara fotográfica y fichas de registro, documentándose la litología, longitud y estado de cada muestra.

Para el ensayo de carga puntual Is_{50}, la selección de fragmentos se realizó de manera sistemática manteniendo un espaciamiento mínimo de 3 metros entre intervalos a lo largo del testigo. Este criterio permitió obtener una base de datos representativa de toda la columna de sondaje y caracterizar estadísticamente la variación del Is_{50}

según la litología, asegurando la cobertura necesaria para el análisis correlacional. Asimismo, las muestras destinadas a la comparación entre Is_{50} y UCS se seleccionaron aplicando un criterio espacial adicional: solo se consideraron pares de testigos cuya separación no excediera los 2 metros, pertenecientes a la misma litología y ubicados dentro de un mismo intervalo geológico continuo. Este criterio permitió minimizar los efectos de la anisotropía y heterogeneidad del macizo rocoso, garantizando que los pares UCS - Is_{50} representaran de manera más consistente la resistencia real del material intacto.

La Figura 8 muestra la distribución espacial de los ensayos Is_{50} y UCS a lo largo de los sondajes geotécnicos, evidenciando que el muestreo para Is_{50} es más abundante, mientras que los ensayos UCS presentan menor disponibilidad debido a las restricciones de calidad exigidas por la ISRM.

Figura 8
Distribución espacial de los ensayos Is_{50} y UCS.



Nota. La figura muestra la distribución de muestras Is_{50} (azul) y UCS (rojo) a lo largo de los sondajes

Posteriormente, se procedió a la obtención del índice de carga puntual Is_{50} mediante ensayos directos realizados con el equipo de ensayo de carga puntual. Cada muestra fue ubicada entre las puntas cónicas del dispositivo, aplicándose carga axial progresiva hasta la rotura. Con los valores registrados de carga máxima y geometría de la muestra, se calcularon los valores de Is_{50} y se corrigieron a un diámetro equivalente de 50 mm según la metodología ISRM (1985). Los resultados fueron consolidados y organizados por litología.

Durante los ensayos, el equipo de carga puntual registró la carga máxima de rotura

en unidades de fuerza (kN), por lo que fue necesario convertir estos valores a presión para el cálculo del índice Is. Siguiendo las recomendaciones de la ISRM (1985), la carga registrada se transformó a mega pascales (MPa) mediante la relación $Is = P / De^2$, donde P es la carga aplicada y De, el diámetro equivalente de la probeta. Esta conversión garantizó la compatibilidad dimensional con los parámetros mecánicos empleados posteriormente y permitió aplicar correctamente el factor de corrección para obtener el índice de carga puntual normalizado Is_{50}.

De manera complementaria, se obtuvo la resistencia a la compresión uniaxial (UCS) mediante ensayos de compresión simple efectuados en un laboratorio externo acreditado. Las probetas fueron preparadas y ensayadas conforme a las recomendaciones de la ISRM (1985), registrándose la carga máxima de rotura y las dimensiones de cada espécimen. Los valores obtenidos de UCS de laboratorio sirvieron para el cálculo del factor K por litología.

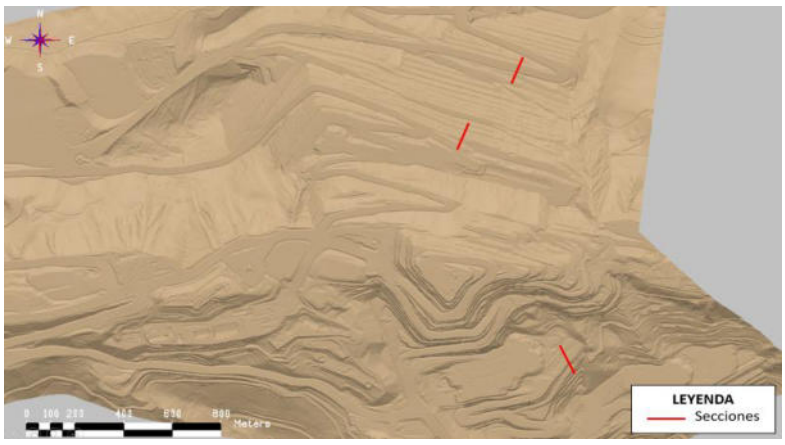
Con los datos de Is_{50} y UCS de laboratorio se desarrolló el proceso de estimación estadística de la resistencia a la compresión uniaxial. Para ello se utilizaron herramientas digitales como Microsoft Excel y Python, mediante las cuales se aplicaron ecuaciones empíricas de correlación UCS - Is_{50}, se obtuvieron valores de UCS estimada (UCS_lit y UCS_corr), y se calcularon coeficientes estadísticos como el coeficiente de correlación (K) y el coeficiente de determinación (R^2). Este procesamiento permitió evaluar la consistencia del ajuste entre los valores medidos y estimados.

Para el análisis de estabilidad de taludes rocosos se utilizó el software Slide, desarrollado por Rocscience, ampliamente reconocido en la ingeniería geotécnica y minera por su capacidad para aplicar métodos de equilibrio límite como Morgenstern–Price (GLE) y Bishop Simplificado. Esta herramienta permitió modelar taludes a escala banco - berma integrando geometrías reales obtenidas del mapeo geotécnico, condiciones hidrogeológicas, parámetros del macizo rocoso y distintos escenarios de carga, en coherencia con los objetivos de la presente investigación. Además, posibilitó la evaluación del Factor de Seguridad (FS) bajo condiciones estáticas y pseudoestáticas, Esta capacidad resulta fundamental para comparar de manera directa el comportamiento del talud al emplear valores de UCS estimados mediante factores K de literatura frente a aquellos obtenidos a partir de

correlaciones UCS - Is_{50} ajustadas por litología. Adicionalmente, el software facilita el análisis de la sensibilidad del FS frente a variaciones en los parámetros resistentes de la roca intacta, permitiendo evaluar de forma consistente la influencia de la estimación de la UCS a partir del índice de carga puntual Is_{50} dentro de un entorno de modelamiento reconocido y confiable en la práctica minera.

Por ello, se definieron tres ventanas geotécnicas en sectores donde se proyectaban futuras plataformas de perforación, representando condiciones reales de operación en la zona norte del tajo. En cada ventana se recolectaron cinco muestras irregulares de roca, representativas de la litología dominante, y se realizaron ensayos de carga puntual Is_{50} según la metodología establecida por la ISRM. A partir del mapeo se obtuvo la geometría de los taludes (altura de banco, ángulo de inclinación, entre otros), mientras que las propiedades del macizo rocoso fueron proporcionadas por el área de Geotecnia. Con esta información se desarrollaron los análisis de estabilidad empleando los métodos mencionados, integrando los valores de UCS estimados a partir del índice Is_{50} para evaluar su influencia en los factores de seguridad calculados.

Figura 9
Ubicación de las secciones geotécnicas seleccionadas.



Nota. Se muestra la ubicación de las tres ventanas geotécnicas seleccionadas para el análisis de estabilidad de taludes.

3.5. Análisis de datos

El análisis de datos se desarrolló mediante un conjunto de procedimientos estadísticos orientados a evaluar la relación entre el índice de carga puntual Is_{50} y la resistencia a la compresión uniaxial (UCS), así como a validar la aplicación de

los valores estimados en los modelos de estabilidad de taludes. En primer lugar, se realizó una depuración de los valores obtenidos en los ensayos, eliminando aquellos que presentaban roturas controladas por discontinuidades o geometrías que no cumplían los criterios dimensionales establecidos por la ISRM. Esta depuración permitió trabajar únicamente con datos que representaran con fidelidad la resistencia intacta del material rocoso.

A continuación, se aplicaron técnicas de estadística descriptiva por litología, calculando medidas de tendencia central y dispersión (media, mediana, desviación estándar y rango). Este análisis permitió caracterizar la variabilidad interna de las cuatro litologías evaluadas y evidenciar diferencias en su comportamiento mecánico, necesarias para justificar la correlación específica por tipo de roca.

Posteriormente, se ajustó un modelo de regresión lineal simple forzado al origen de la forma $UCS = K \cdot Is_{50}$, siguiendo el criterio de Broch y Franklin (1972), quienes establecen que la relación debe pasar por el punto (0,0) debido a la naturaleza física de ambos parámetros de resistencia. Para cada litología se obtuvieron el factor de correlación k, el coeficiente de correlación r, el coeficiente de determinación R^2 y el p-valor, indicadores empleados para evaluar la fuerza, consistencia y significancia estadística de la relación UCS - Is_{50}.

Con el propósito de verificar la confiabilidad del modelo, se compararon los valores de UCS estimada con los valores de laboratorio UCS, mediante el cálculo del error porcentual por muestra y el promedio de error por litología. Asimismo, se contrastaron estos valores con los obtenidos aplicando factores K de literatura (K = 24 para rocas ígneas y K = 20 para rocas volcánicas), a fin de evaluar la mejora alcanzada mediante la calibración local del factor k.

Finalmente, los valores de UCS estimados y validados fueron integrados como parámetros resistentes en los modelos de estabilidad de taludes elaborados en el software Slide, empleando la geometría real obtenida del mapeo geotécnico (ángulo del talud, altura de banco y longitud de berma) y considerando los parámetros mecánicos complementarios proporcionados por el área de Geotecnia. Los análisis se ejecutaron en condiciones estáticas y pseudoestáticas utilizando los métodos de equilibrio límite de Morgenstern-Price y Bishop Simplificado, permitiendo evaluar la influencia del factor K ajustado en los factores de seguridad (FS) obtenidos.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se presentan los principales resultados obtenidos en la investigación, abarcando el análisis estadístico de los ensayos de carga puntual Is_{50} y de resistencia a la compresión uniaxial (UCS), así como la correlación establecida entre ambos parámetros por litología. Asimismo, se muestran los valores de UCS estimada a partir del factor de correlación obtenido experimentalmente y su comparación con los valores comúnmente utilizados en la práctica geotécnica. Posteriormente, se exponen los resultados del análisis de estabilidad de taludes realizado mediante el software Slide, evaluando el comportamiento del talud al emplear tanto parámetros provenientes de la literatura como los valores de UCS estimados. Finalmente, se discuten los hallazgos más relevantes y su implicancia en la representación geomecánica del macizo rocoso.

4.1. Resultados descriptivos de los ensayos Is_{50} y UCS

Antes de aplicar el análisis estadístico descriptivo, los valores obtenidos en los ensayos Is_{50} y UCS fueron depurados considerando únicamente aquellos cuya rotura correspondió a falla por matriz, descartando los ensayos influenciados por discontinuidades o planos de debilidad. Esta depuración asegura que los valores utilizados reflejen la resistencia intacta del material y permitan establecer correlaciones consistentes.

Si bien en la unidad geológica del yacimiento se identifican diversas litologías; sin embargo, no todas cuentan con un volumen suficiente de muestras para realizar un análisis estadístico confiable. En unidades como el Conglomerado y el Cuaternario-aluvial no se ejecutaron ensayos de resistencia debido a su comportamiento tipo suelo, mientras que en litologías como el Pórfido Intermineral, el Pórfido Granodiorítico y las brechas magmáticas e hidrotermales el número de muestras disponibles es limitado. Por ello, el análisis se centra en las litologías con información representativa: Granodiorita, Ignimbrita, Pórfido Tardío y Pórfido Temprano.

Las Tablas 3 y 4 presentan las medidas descriptivas obtenidas a partir de los ensayos depurados de Is_{50} y UCS, respectivamente, considerando únicamente las litologías con un número representativo de muestras. Dichas estadísticas media, mediana, desviación estándar y rango permiten caracterizar la variabilidad interna de cada

unidad litológica y constituyen la base para establecer las correlaciones UCS - Is_{50} desarrolladas en la siguiente sección.

Tabla 3
Estadísticos descriptivos del índice de carga puntual Is_{50} por litología

Litología	N°	Media (MPa)	Mediana (MPa)	Desv. Est.	Rango
Granodiorita	17	5.29	5.84	1.366	4.676
Ignimbrita	17	4.22	4.44	1.209	3.737
Pórfido Tardío	27	6.94	7.59	2.395	7.374
Pórfido Temprano	21	7.28	6.27	2.77	9.814

Nota. La tabla presenta las estadísticas descriptivas de los valores depurados del ensayo Is_{50}.

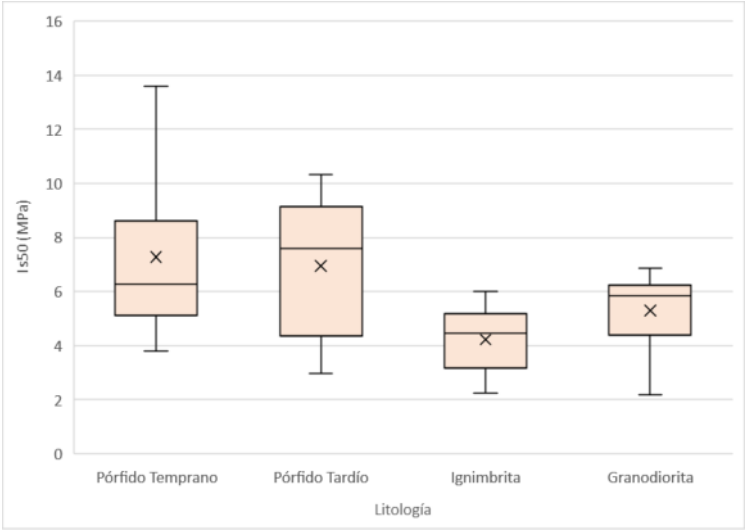
Tabla 4
Estadísticos descriptivos de la resistencia a la compresión uniaxial (UCS) por litología.

Litología	N°	Media (Mpa)	Mediana (Mpa)	Desv. Est.	Rango
Granodiorita	**17**	114.66	121.03	46.23	149.6
Ignimbrita	**17**	67.8	65.8	19.3	69.37
Pórfido Tardío	**27**	141.28	128.86	49.02	139.82
Pórfido Temprano	**21**	161.48	131.35	80.34	272.96

Nota. La tabla presenta los estadísticos descriptivos de los valores depurados del ensayo UCS.

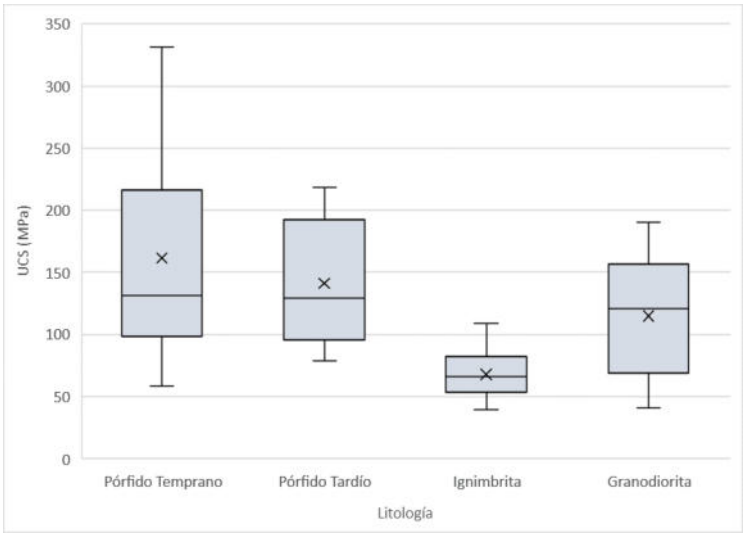
Con el propósito de complementar los estadísticos presentados y visualizar la dispersión de los datos para cada litología, a continuación se muestran los diagramas boxplot correspondientes a los ensayos Is_{50} y UCS. Estas representaciones permiten observar de manera comparativa el rango, la variabilidad y la presencia de valores extremos en cada unidad geológica.

Figura 10
Distribución del índice de carga puntual Is_{50} por litología.



Nota. El gráfico boxplot muestra la variabilidad del ensayo Is_{50} para cada litología

Figura 11
Distribución de la resistencia a la compresión uniaxial (UCS) por litología.



Nota. El gráfico boxplot representa la distribución de valores UCS obtenidos en laboratorio para cada litología.

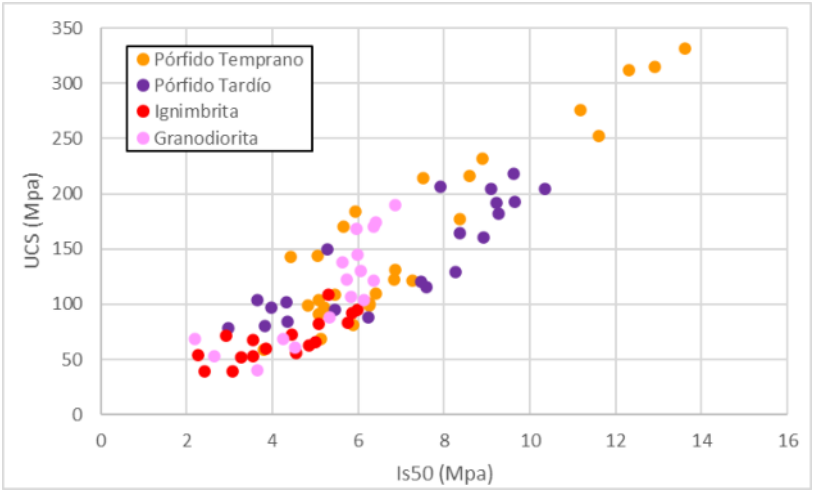
Los resultados numéricos y las distribuciones graficadas muestran diferencias claras entre las litologías evaluadas. El Pórfido Temprano y el Pórfido Tardío presentan los valores más altos tanto de Is_{50} como de UCS, evidenciando una mayor competencia del macizo rocoso. En contraste, la Ignimbrita concentra los valores más bajos en ambos ensayos, con un rango reducido y menor variabilidad interna. La Granodiorita exhibe un comportamiento intermedio, con dispersión moderada de los valores.

Estas variaciones reflejan que cada litología posee un comportamiento mecánico diferenciado, lo que confirma la necesidad de analizar la relación UCS - Is_{50} de manera independiente por litología. En la siguiente sección se desarrollan las correlaciones específicas para cada unidad geológica.

4.2. Correlaciones por litología

La relación entre el índice de carga puntual Is_{50} y la resistencia a la compresión uniaxial (UCS) se evaluó empleando un modelo de regresión lineal de la forma $UCS = k \cdot Is_{50}$, siguiendo los lineamientos establecidos en la metodología. Dado que el macizo rocoso presenta variaciones significativas en competencia según la litología, la correlación se realizó de manera independiente para cada unidad geológica, con el fin de obtener factores de correlación K representativos y estadísticamente consistentes. Para cada litología se estimaron los coeficientes k, r y R^2, valores que permiten evaluar la fuerza y confiabilidad de la correlación obtenida.

Figura 12
Relación entre Is_{50} y UCS para las litologías analizadas



Nota. La figura muestra la distribución conjunta de los valores Is_{50} y UCS diferenciados por litología, evidenciando la tendencia positiva entre ambas variables y la separación natural entre unidades geológicas.

4.2.1. Correlación para la litología Granodiorita

Para la litología Granodiorita se evaluó la relación entre la resistencia a la compresión uniaxial (UCS) y el índice de carga puntual Is_{50}, considerando diecisiete muestras cuya rotura correspondió a falla por matriz. Siguiendo la metodología

establecida, se aplicó un modelo de regresión lineal forzado al origen (UCS = k·Is_{50}), obteniéndose los resultados resumidos en la Tabla 5.

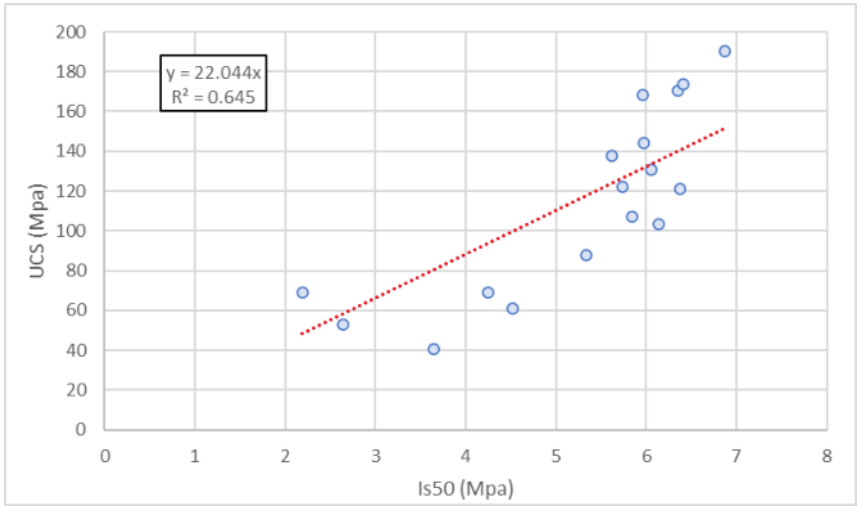
Tabla 5
Resultados de la correlación UCS - Is_{50} para la litología Granodiorita

Litología	N°	K	r	R^2	p-valor
Granodiorita	17	22.044	0.803	0.645	< 0.001

Nota. Parámetros obtenidos de la regresión UCS - Is_{50}.

La ecuación obtenida fue UCS = 22.04·Is_{50}, con un coeficiente de correlación r = 0.803 y un coeficiente de determinación R^2 = 0.645, lo que indica una correlación positiva fuerte y estadísticamente significativa ($p < 0.001$). Según los criterios de Evans (1996), estos valores representan una relación sólida entre ambas variables, respaldando la pertinencia del modelo lineal adoptado. Además, la magnitud del factor K = 22.04 es coherente con los rangos reportados para rocas ígneas intermedias en la literatura, lo que refuerza la validez geotécnica del resultado.

Figura 13
Dispersión UCS - Is_{50} para la litología Granodiorita



Nota. Diagrama de dispersión UCS - Is_{50} con recta ajustada.

En la Figura 13 se observa una tendencia lineal ascendente con una distribución uniforme de los puntos alrededor de la recta ajustada, lo que confirma que el ensayo Is_{50} constituye un predictor adecuado de la resistencia uniaxial en esta litología. En consecuencia, el factor K = 22.04 se considera representativo para la Granodiorita y puede emplearse para la estimación indirecta de la UCS en situaciones donde solo se dispone de resultados del ensayo de carga puntual.

4.2.2. Correlación para la litología Ignimbrita

Para la litología Ignimbrita se evaluó la relación entre la resistencia a la compresión uniaxial (UCS) y el índice de carga puntual Is_{50}, considerando diecisiete muestras depuradas según los criterios establecidos en la metodología. Se aplicó un modelo de regresión lineal forzado al origen ($UCS = k \cdot Is_{50}$), obteniéndose los resultados presentados en la Tabla 6.

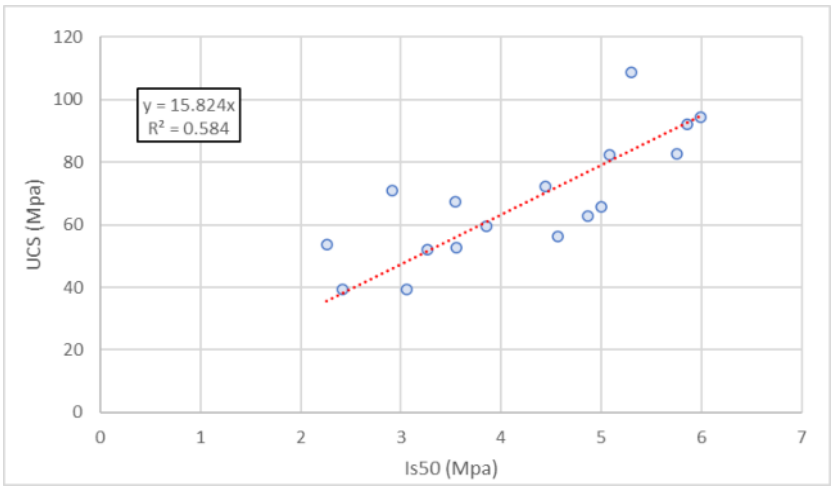
Tabla 6
Resultados de la correlación UCS - Is_{50} para la litología Ignimbrita

Litología	N°	K	r	R^2	p-valor
Ignimbrita	17	15.824	0.764	0.584	< 0.001

Nota. Parámetros obtenidos de la regresión UCS - Is_{50}.

La ecuación ajustada fue $UCS = 15.84 \cdot Is_{50}$, con un coeficiente de correlación r = 0.764 y un coeficiente de determinación $R^2 = 0.584$, lo que indica una correlación moderada y estadísticamente significativa ($p < 0.001$). Esta menor fuerza de correlación es coherente con el comportamiento más heterogéneo y la mayor susceptibilidad a la alteración típica de las ignimbritas, lo cual genera una mayor dispersión en los resultados.

Figura 14
Dispersión UCS - Is_{50} para la litología Ignimbrita.



Nota. Diagrama de dispersión UCS - Is_{50} con recta ajustada.

La figura 14 muestra una tendencia lineal ascendente, aunque con mayor dispersión en torno a la recta, confirmando que la ignimbrita presenta una relación UCS - Is_{50} menos consistente que las litologías pórfidas. Aun así, el factor K = 15.84 se

considera adecuado para estimaciones indirectas de la resistencia en zonas donde no se disponga de ensayos UCS directos.

4.2.3. Correlación para la litología Pórfido Temprano

Para la litología Pórfido Temprano se evaluó la relación entre la resistencia a la compresión uniaxial (UCS) y el índice de carga puntual Is_{50}, utilizando veintisiete muestras que cumplían con los criterios de depuración establecidos en la metodología. Se aplicó un modelo de regresión lineal forzado al origen ($UCS = k \cdot Is_{50}$), obteniéndose los resultados que se presentan en la Tabla 7.

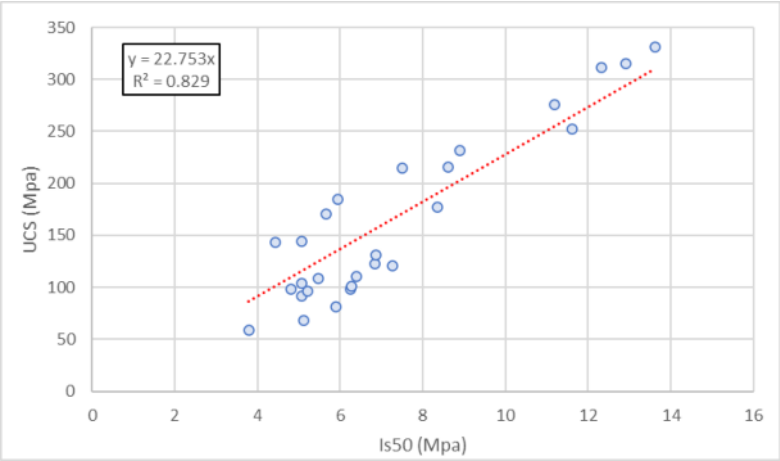
Tabla 7
Resultados de la correlación UCS - Is_{50} para la litología Pórfido Temprano

Litología	N°	K	r	R^2	p-valor
Pórfido Temprano	27	22.753	0.922	0.829	< 0.001

Nota. Parámetros obtenidos de la regresión UCS - Is_{50}.

La ecuación ajustada fue $UCS = 22.75 \cdot Is_{50}$, con un coeficiente de correlación $r = 0.922$ y un coeficiente de determinación $R^2 = 0.851$, lo que indica una correlación muy fuerte y altamente significativa ($p < 0.001$). Estos valores reflejan una relación clara y consistente entre ambos parámetros, lo cual es coherente con el comportamiento mecánico esperado para rocas pórfidas de alta competencia.

Figura 15
Dispersión UCS - Is_{50} para la litología Pórfido Temprano.



Nota. Diagrama de dispersión UCS - Is_{50} con recta ajustada.

La Figura 15 muestra una tendencia lineal marcada, con la mayoría de los puntos

distribuidos de manera cercana a la recta ajustada, lo que confirma que el ensayo Is_{50} es un predictor confiable de la resistencia uniaxial en esta litología. El valor del factor K = 22.75 es consistente con rangos típicos reportados para rocas ígneas intermedias, respaldando su uso como parámetro de estimación de la UCS en contextos donde no se cuente con ensayos directos.

4.2.4. Correlación para la litología Pórfido Tardío

Para la litología Pórfido Tardío se evaluó la relación entre la resistencia a la compresión uniaxial (UCS) y el índice de carga puntual Is_{50}, considerando veintiún muestras que cumplieron con los criterios de depuración establecidos en la metodología. Se aplicó un modelo de regresión lineal forzado al origen ($UCS = k \cdot Is_{50}$) y los resultados se presentan en la Tabla 8.

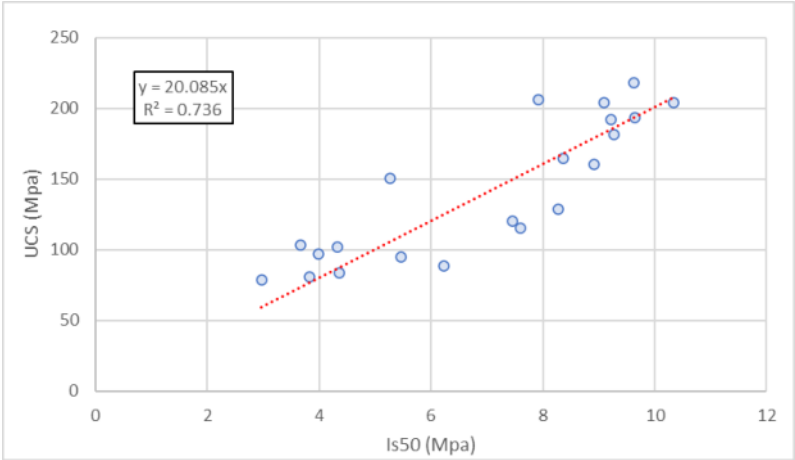
Tabla 8
Resultados de la correlación UCS - Is_{50} para la litología Pórfido Tardío

Litología	N°	K	r	R^2	p-valor
Pórfido Tardío	21	20.085	0.866	0.736	< 0.001

Nota. Parámetros obtenidos de la regresión UCS - Is_{50}.

La ecuación ajustada fue $UCS = 20.09 \cdot Is_{50}$, con un coeficiente de correlación r = 0.866 y un coeficiente de determinación $R^2 = 0.736$, lo que indica una correlación fuerte y estadísticamente significativa ($p < 0.001$). Estos resultados muestran que el ensayo Is_{50} explica cerca del 74 % de la variabilidad de la resistencia uniaxial para esta litología, lo que evidencia un comportamiento mecánico consistente dentro del pórfido tardío.

Figura 16
Dispersión UCS - Is_{50} para la litología Pórfido Tardío.



Nota. Diagrama de dispersión UCS - Is_{50} con recta ajustada.

La Figura 16 presenta un patrón de dispersión alineado con una tendencia lineal ascendente, lo que confirma que el valor de Is_{50} constituye un predictor adecuado de la UCS en esta litología. El factor K = 20.09 se considera representativo para estimaciones indirectas de la resistencia en zonas donde solo se dispone del ensayo de carga puntual.

Tabla 9
Resumen de los parámetros de correlación UCS - Is_{50} por litología

Litología	N°	K	r	R^2	p-valor
Granodiorita	17	22.043	0.803	0.645	< 0.001
Ignimbrita	17	15.824	0.764	0.584	< 0.001
Pórfido Temprano	27	22.753	0.922	0.829	< 0.001
Pórfido Tardío	21	20.085	0.866	0.736	< 0.001

Nota. Parámetros obtenidos de la regresión UCS - Is_{50}.

Los resultados sintetizados en la Tabla 9 muestran las correlaciones UCS - Is_{50} obtenidas para las cuatro litologías muestran comportamientos diferenciados que reflejan la variabilidad geomecánica del macizo rocoso. Los pórfidos presentan las correlaciones más fuertes, seguidos por la Granodiorita con una relación moderada y la Ignimbrita con una mayor dispersión, consistente con su menor competencia. Estas diferencias confirman que no es adecuado emplear un único factor de correlación para todo el yacimiento, por lo que resulta necesario utilizar valores de K específicos por litología. Con estos resultados, en la siguiente sección se

presentan las estimaciones de la resistencia a la compresión uniaxial (UCS) derivadas de dichos factores, así como su aplicación en el análisis de estabilidad de taludes.

4.3. Estimación de la resistencia a la compresión uniaxial (UCS) a partir del Is_{50}

La estimación de la resistencia a la compresión uniaxial (UCS) se realizó aplicando la ecuación $UCS = k \cdot Is_{50}$, empleando los factores de correlación K determinados previamente para cada litología. Este procedimiento permite evaluar qué tan cercana es la resistencia estimada respecto a los valores de laboratorio y verificar la confiabilidad del modelo para su aplicación en el análisis de estabilidad de taludes.

4.3.1. Validación de la estimación de la UCS

Para validar el modelo propuesto, se compararon los valores de UCS obtenidos en laboratorio con aquellos estimados mediante los factores K ajustados por litología. La Tabla 10 presenta el resumen de la diferencia porcentual absoluta entre ambos valores, mientras que el detalle completo incluyendo el cálculo muestra por muestra se incluye en el Anexo 2, dado su volumen.

Tabla 10
Resumen de la diferencia porcentual entre UCS estimada y UCS de laboratorio por litología

Litología	N°	Error mínimo (%)	Error máximo (%)	Error promedio (%)	Error mediano (%)
Granodiorita	17	2.31	97.7	25.96	20.37
Ignimbrita	17	0.41	35.05	13.54	9.9
Pórfido Temprano	27	4.6	70.61	24.27	20.32
Pórfido Tardío	21	0.24	41.51	15.89	14.57

Nota. Resumen de la diferencia porcentual absoluta entre la UCS estimada y la obtenida en laboratorio. La tabla completa se presenta en el Anexo 2.

Los resultados indican que el modelo $UCS = k \cdot Is_{50}$ presenta un desempeño adecuado y acorde con la respuesta mecánica esperada para cada litología. En las litologías pórfidas, los errores promedio se mantienen dentro de rangos aceptables,

reflejando una buena correspondencia entre la UCS estimada y la medida en laboratorio. En la Granodiorita, si bien se observa una mayor dispersión asociada a variaciones internas del macizo, el comportamiento general sigue siendo consistente. La Ignimbrita presenta errores más moderados, pero con dispersión típica de litologías volcánicas heterogéneas. En conjunto, estos resultados demuestran que el modelo ofrece una estimación representativa de la resistencia intacta del macizo rocoso y valida la pertinencia del uso de factores K ajustados por litología.

4.3.2. Comparación con factores de correlación utilizados en la operación

En la operación minera se ha utilizado históricamente un factor K = 24 para rocas ígneas (granodioritas y pórfidos) y K = 20 para rocas volcánicas como ignimbritas. Estos valores provienen del rango general K = 20 - 25 propuesto en la literatura clásica (Broch & Franklin, 1972; revisiones ISRM), donde se menciona que rocas volcánicas y heterogéneas tienden a factores más cercanos a 20.

Para evaluar si estos valores representan adecuadamente al yacimiento, se comparó su desempeño frente a los factores K ajustados obtenidos en esta investigación. La Tabla 11 resume el error porcentual medio obtenido al estimar la UCS con ambos enfoques.

Tabla 11
Comparación del error porcentual medio usando Kliteratura y K ajustado por litología

Litología	N	Error medio K literatura (%)	Error medio K ajustado (%)
Granodiorita	17	29.84	25.96
Pórfido Temprano	27	26.61	24.27
Pórfido Tardío	21	24.09	15.89
Ignimbrita	17	30.47	13.54

Nota. K = 24 para rocas ígneas y K = 20 para rocas volcánicas, según criterio histórico de la operación.

El uso de factores globales (K = 24 y K = 20) genera errores mayores en todas las litologías, especialmente en rocas heterogéneas como la Ignimbrita y en el Pórfido Tardío. En contraste, los factores K ajustados por litología reducen

significativamente el error, demostrando una mejor adecuación a las condiciones reales del yacimiento. Esto confirma que la variabilidad litológica del macizo rocoso no puede representarse mediante un único factor y que la estimación basada en K específicos es más precisa y confiable para su uso en análisis geotécnicos.

Los resultados obtenidos validan que los valores de UCS estimados mediante los factores K específicos por litología ofrecen una representación más realista de la resistencia intacta del macizo rocoso que los valores generalizados utilizados previamente en la operación. En consecuencia, estos valores serán empleados en la siguiente sección para evaluar el comportamiento del talud en los modelos de estabilidad elaborados en el software Slide, comparando el desempeño del talud al usar parámetros de literatura frente a los parámetros ajustados obtenidos en esta investigación.

4.3.3. Estimación de la UCS para las ventanas geotécnicas seleccionadas

Para aplicar la correlación UCS - Is_{50} en los análisis de estabilidad de taludes, se seleccionaron tres ventanas de mapeo geotécnico correspondientes a zonas donde se proyectaban futuras plataformas de perforación. En cada ventana se recolectaron cinco muestras de roca para ensayo de carga puntual, representativas de la litología dominante. Con los valores de Is_{50} obtenidos en campo se estimó la UCS empleando tanto el factor K de literatura/operación (K = 24 para rocas ígneas y K = 20 para rocas volcánicas) como los factores K ajustados por litología determinados en esta investigación.

Tabla 12

Resultados de la estimación de UCS a partir de Is_{50} utilizando factores K de literatura y ajustados, por ventana.

Ventana	Litologia	Is_{50} (Mpa)	UCS Estimado (K literatura)	UCS Estimado (K ajustado)
F2N_3630_6C	Pórfido Temprano	1.100	26.396	25.024
	Pórfido Temprano	1.601	38.416	36.420
	Pórfido Temprano	2.046	49.092	46.541
	Pórfido Temprano	1.281	30.743	29.146

	Pórfido Temprano	1.577	37.850	35.883
	Granodiorita	2.691	64.591	59.324
	Granodiorita	3.104	74.489	68.415
F3S_3780_1B	Granodiorita	3.496	83.913	77.071
	Granodiorita	3.342	80.209	73.668
	Granodiorita	2.784	66.821	61.372
	Ignimbrita	0.669	13.371	10.579
	Ignimbrita	3.209	64.186	50.784
F2N_3690_8C	Ignimbrita	0.597	11.948	9.453
	Ignimbrita	2.824	56.473	44.681
	Ignimbrita	3.716	74.322	58.803

Nota. Las UCS fueron estimadas utilizando K = 24 para las litologías de pórfido temprano y granodiorita y K = 20 para la ignimbrita, mientras que los valores ajustados corresponden a los factores K calculados para cada litología en la sección previa.

A partir de los valores de Is_{50} obtenidos en campo y aplicando tanto los factores K de literatura/operación como los factores K ajustados por litología, se obtuvo la UCS representativa para cada una de las ventanas seleccionadas. Los valores promedio de la UCS estimada que serán utilizados como parámetros de resistencia en los modelos de estabilidad se muestran en la Tabla 13.

Tabla 13
Valores promedio de la UCS estimada para cada ventana geotécnica seleccionada

Ventana	**Litología**	**UCS (MPa) K literatura**	**UCS (MPa) K ajustado**
F2N_3630_6C	Pórfido Temprano	36.499	34.603
F3S_3780_1B	Granodiorita	74.004	67.97
F2N_3690_8C	Ignimbrita	44.06	34.86

Nota. UCS promedio calculada a partir de las cinco muestras por ventana. Se utilizará tanto el valor derivado de los factores K de literatura como el obtenido mediante los factores K ajustados según la litología.

4.4. Análisis de estabilidad de taludes

4.4.1. Geometría del talud y condiciones de modelamiento

Para el análisis de estabilidad se seleccionaron tres ventanas geotécnicas representativas del sector norte del tajo: F2N_3630_6C, F3S_3780_1B y

F2N_3690_8C. Cada una corresponde a una litología distinta y presenta condiciones geométricas propias que influyen directamente en el comportamiento del talud.

Las propiedades mecánicas del macizo rocoso fueron proporcionadas por el área de Geotecnia e incluyen la densidad, el peso unitario, la cohesión, el ángulo de fricción y el parámetro mi. Estos valores se muestran en la Tabla 14, que resume los parámetros empleados en cada litología dentro de las ventanas seleccionadas.

Tabla 14
Parámetros geotécnicos de las unidades litológicas empleadas en el modelamiento

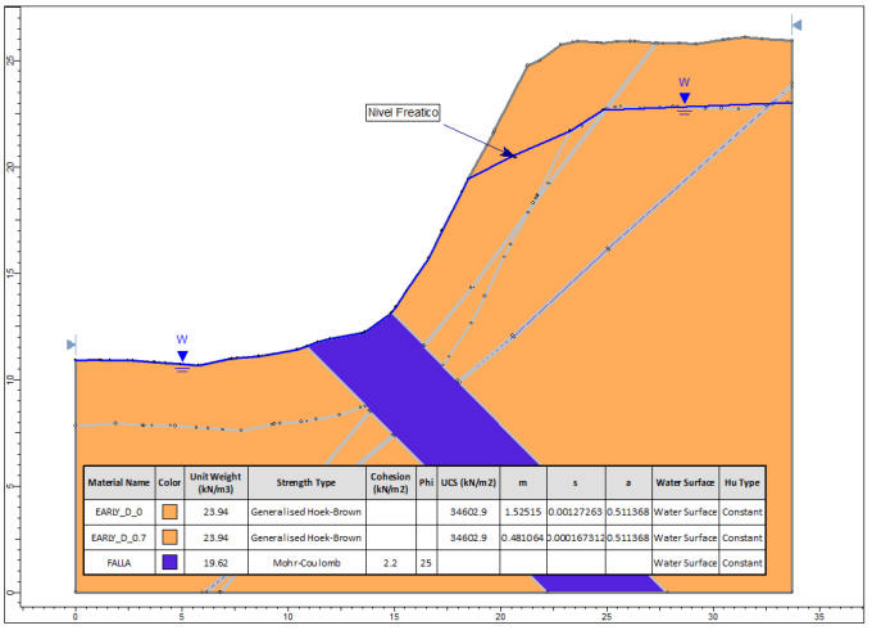
Código	Litología	Densidad (g/cm3)	Peso Unitario (kN/m3)	Phi (deg)	Cohesión	mi
1	Granodiorita	2.40	23.54	-	-	13
2	Porfido Temprano	2.44	23.94	-	-	29
3	Porfido Intermineral	2.49	24.43	-	-	16
4	Porfido Tardio	2.66	26.09	-	-	16
6	Brecha Hidrotermal	2.63	25.80	-	-	19
7	Ignimbrita	2.21	21.68	-	-	23
8	Conglomerado	2.00	19.62	-	-	
9	Brecha Magmatica	2.62	25.70	-	-	19
11	Cuaternario Aluvial	2.00	19.62	25	2.2	-
12	Porfido Granodioritico	2.63	25.80	-	-	29
	Falla	2.00	19.62	25	2.2	-

Nota. Valores proporcionados por el área de Geotecnia de la operación minera.

Con los parámetros definidos, se generaron los modelos geométricos iniciales para cada sección, los cuales integran la geometría real del talud, los límites de las unidades litológicas y la superficie freática. Estas configuraciones constituyen la

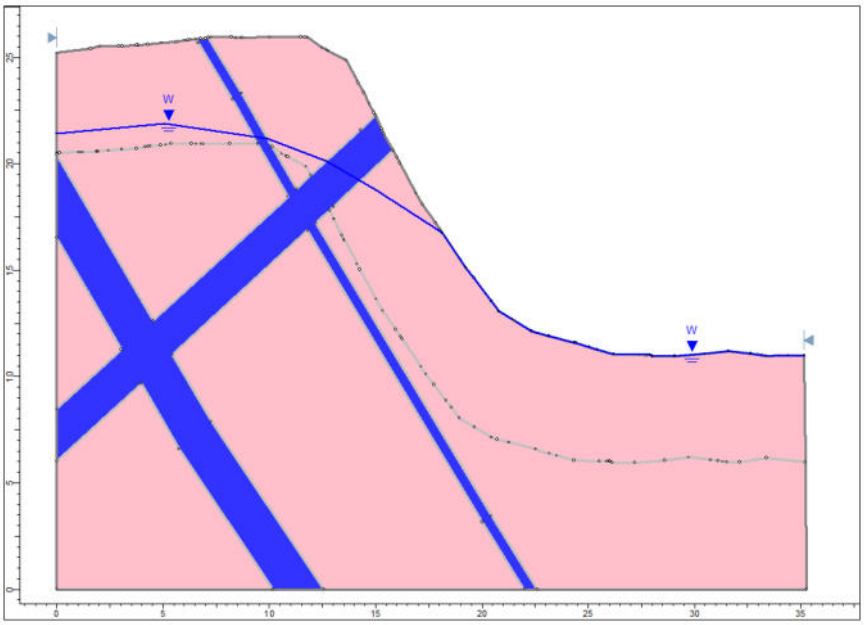
base para evaluar la variación del Factor de Seguridad en los distintos escenarios analizados.

Figura 17
Modelo Geométrico Inicial de la Ventana F2N_3630_6C (Pórfido Temprano)



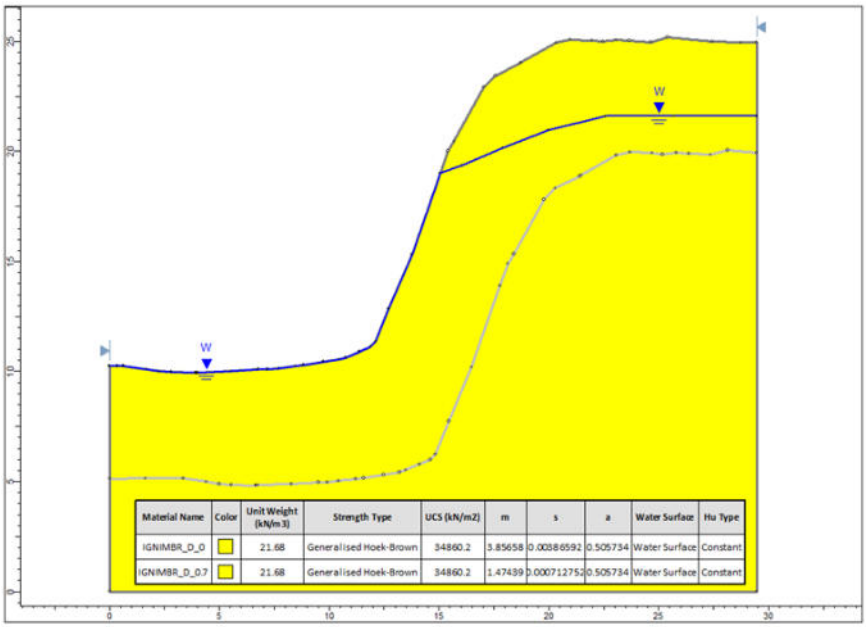
Nota. El modelo muestra la geometría base y los parámetros asignados para la litología Pórfido Temprano.

Figura 18
Modelo Geométrico Inicial de la Ventana F2N_3630_6C (Granodiorita)



Nota. La figura presenta la sección F3S_3780_1B con parámetros geotécnicos para Granodiorita.

Figura 19
Modelo Geométrico Inicial de la Ventana F2N_3630_6C (Ignimbrita)



Nota. La figura presenta la sección F3S_3780_1B con parámetros geotécnicos para la Ignimbrita.

4.4.2. Escenarios de análisis

Con el propósito de evaluar la sensibilidad del talud frente a variaciones en la resistencia de la roca y ante condiciones de carga estática y sísmica, se establecieron cuatro escenarios. Los escenarios consideran tanto los factores K de literatura como los factores K ajustados obtenidos en esta investigación:

- El Escenario 1 - Estático (K literatura) corresponde a la condición puramente gravitacional, usando la UCS estimada mediante los factores K reportados en la literatura para rocas de características similares.
- El Escenario 2 - Pseudoestático (K literatura) mantiene los mismos parámetros resistentes, pero incorpora un coeficiente de sismicidad, lo que permite simular la respuesta del talud bajo un evento sísmico.
- El Escenario 3 - Estático (K ajustado) utiliza la UCS obtenida mediante los factores K derivados de la correlación UCS-Is_{50}, representando la condición calibrada localmente.
- Escenario 4 - Pseudoestático (K ajustado) combina los parámetros ajustados con la acción sísmica, constituyendo el escenario más

crítico y representativo de la condición de diseño para taludes en operación minera.

En todos los casos, la estabilidad se evaluó mediante los métodos de equilibrio límite Morgenstern-Price (GLE) y Bishop Simplified, lo que permitió comparar la sensibilidad del Factor de Seguridad (FS) frente a variaciones en la resistencia intacta y ante la acción sísmica.

4.4.3. Resultados del análisis de estabilidad

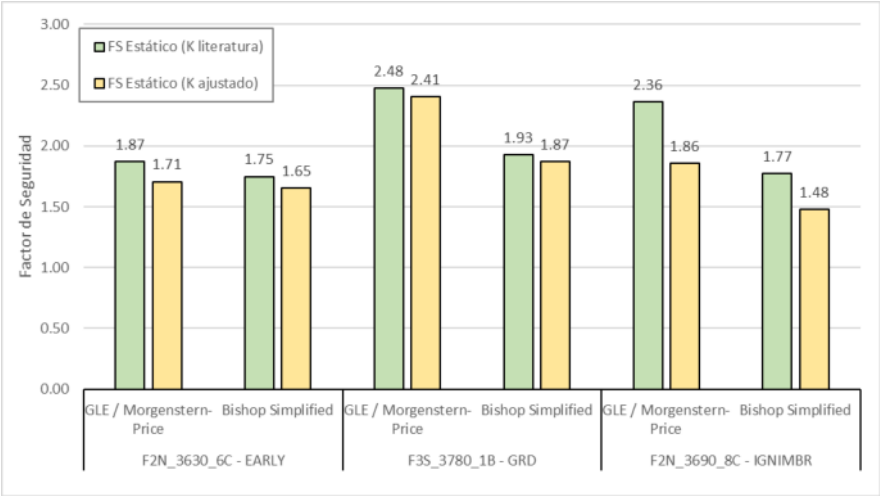
La Tabla 15 presenta los factores de seguridad (FS) obtenidos en condición estática para las tres ventanas evaluadas, utilizando la UCS estimada tanto con los factores K de literatura como con los factores K ajustados por litología. Estos resultados permiten identificar la influencia directa de la calibración de la resistencia intacta en la estabilidad del talud bajo cargas gravitacionales.

Tabla 15
Factores de seguridad en condición estática para las tres ventanas analizadas.

Ventana	Metodo de analisis	FS Estático (K literatura)	FS Estático (K ajustado)
F2N_3630_6C	GLE / Morgenstern-Price	1.87	1.71
	Bishop Simplified	1.75	1.65
F3S_3780_1B	GLE / Morgenstern-Price	2.48	2.41
	Bishop Simplified	1.93	1.87
F2N_3690_8C	GLE / Morgenstern-Price	2.36	1.86
	Bishop Simplified	1.77	1.48

la Figura 20 sintetiza visualmente la variación del FS estático entre ambos enfoques. En todos los casos, el FS obtenido con los factores K ajustados es menor que el calculado con los valores de literatura, lo que indica que los parámetros generalizados tienden a sobreestimar la resistencia del macizo rocoso.

Figura 20
Comparación del FS estático usando K de literatura y K ajustado.



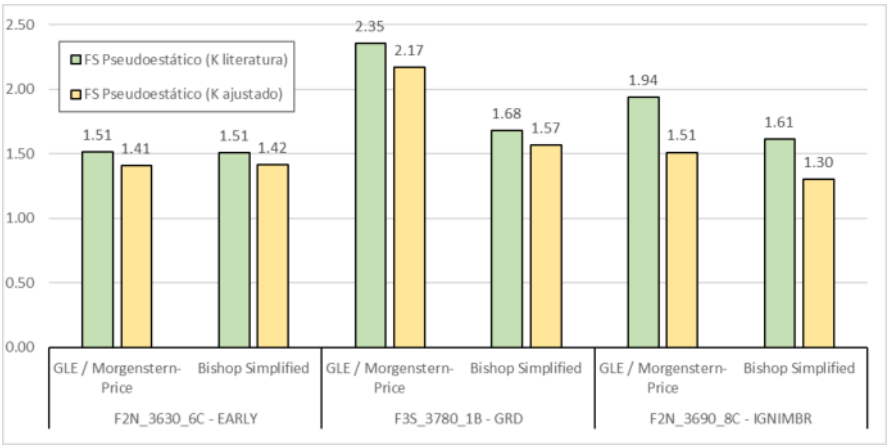
En condición pseudoestática, la Tabla 16 muestra los resultados considerando un coeficiente sísmico. Tal como se observa, la reducción del FS es más pronunciada cuando se emplean los factores K ajustados, especialmente en la litología Ignimbrita, lo que evidencia su alta sensibilidad a variaciones en la resistencia intacta.

Tabla 16
Factores de seguridad en condición pseudoestática para las tres ventanas analizadas.

Ventana	**Metodo de analisis**	**FS Pseudoestático (K literatura)**	**FS Pseudoestático (K ajustado)**
F2N_3630_6C	GLE / Morgenstern-Price	1.51	1.41
	Bishop Simplified	1.51	1.42
F3S_3780_1B	GLE / Morgenstern-Price	2.35	2.17
	Bishop Simplified	1.68	1.57
F2N_3690_8C	GLE / Morgenstern-Price	1.94	1.51
	Bishop Simplified	1.61	1.30

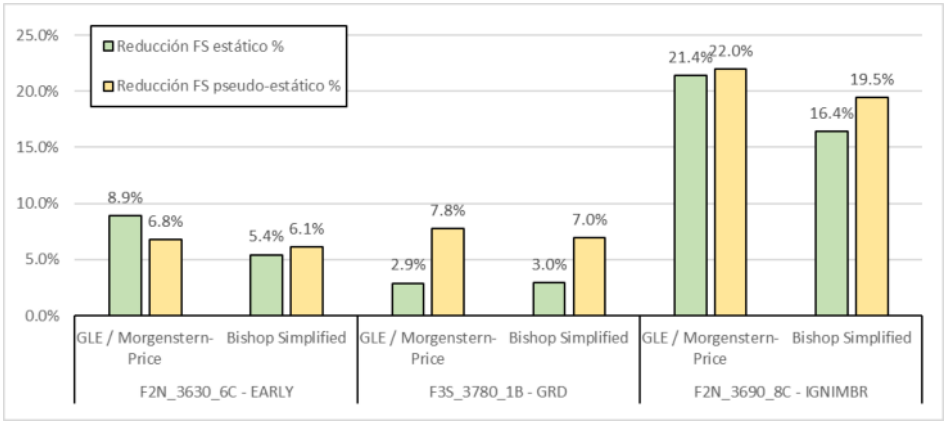
La Figura 21 complementa estos resultados para los tres taludes evaluados, mostrando una disminución sistemática del FS al emplear la UCS derivada del factor K ajustado.

Figura 21
Comparación del FS pseudoestático usando K de literatura y K ajustado.



Finalmente, la Figura 22 presenta la reducción porcentual del FS entre ambos métodos de estimación. La ignimbrita muestra las mayores variaciones (hasta 20-27%), seguida del pórfido temprano, mientras que la granodiorita presenta cambios mínimos debido a su mayor homogeneidad mecánica.

Figura 22
Reducción porcentual del FS al emplear K ajustado en lugar de K de literatura.



En conjunto, los resultados indican que el uso de parámetros ajustados localmente proporciona una evaluación más realista del comportamiento del talud, evitando sobreestimar su estabilidad, especialmente bajo solicitación sísmica. Esto confirma la relevancia de utilizar factores K calibrados en lugar de valores generalizados de literatura.

4.5. Discusión

Los resultados obtenidos muestran que la relación entre el índice de carga puntual Is_{50} y la resistencia a la compresión uniaxial (UCS) presenta un comportamiento

claramente dependiente de la litología, confirmando lo establecido por Broch y Franklin (1972), quienes demostraron que la correlación UCS - Is_{50} es válida, pero su pendiente (factor K) varía ampliamente según el tipo de roca y su grado de alteración. En las litologías más homogéneas, como la granodiorita, los valores de K obtenidos en esta investigación se enmarcan dentro del rango sugerido por la literatura (20 - 25), lo que coincide con la buena consistencia observada en la dispersión de datos y con la estabilidad mecánica mostrada en los análisis de taludes.

Además, los resultados de esta investigación guardan coherencia con los antecedentes recientes revisados. Choco y Peláez (2022) sostienen que la confiabilidad del Is_{50} depende fuertemente de la geometría de las probetas y de la homogeneidad litológica, lo cual coincide con la mayor consistencia observada en la granodiorita de este estudio. Asimismo, Feijoo (2022) reporta que litologías con alta variación en la relación D/W tienden a generar valores de Is_{50} más dispersos, situación que se refleja en la ignimbrita analizada, donde la dispersión del índice incrementó la variabilidad del factor k. De igual forma, los hallazgos concuerdan con Mohamad et al. (2022), quienes demostraron que incluso rocas ígneas relativamente competentes presentan variaciones significativas en el factor de correlación cuando existen cambios mineralógicos o microestructurales relevantes. Por su parte, Galván et al. (2014) también reportaron un rango amplio de valores de K en calizas (7 - 26), lo cual respalda que este coeficiente no es universal, sino litología-dependiente, tal como se evidencia en este estudio para pórfido temprano, granodiorita e ignimbrita. Finalmente, los altos coeficientes de correlación obtenidos en granodiorita coinciden con lo descrito por Vera y León, quienes encontraron R^2 superiores a 0.90 en litologías relativamente homogéneas, lo que refuerza que la variabilidad interna del macizo rocoso es el factor que más controla la confiabilidad de las correlaciones UCS - Is_{50}.

Asimismo, los resultados confirman lo discutido por Bieniawski (1989), quien resalta que la resistencia de la roca intacta es uno de los parámetros que más influye en el desempeño del macizo rocoso en las clasificaciones y análisis de estabilidad. En este estudio, la reducción sistemática del FS tanto en condiciones estáticas como pseudoestáticas al utilizar la UCS estimada con el factor K ajustado demuestra que pequeños cambios en la resistencia intacta pueden tener efectos significativos en la

respuesta global del talud. Este hallazgo es especialmente relevante en contextos donde los factores de seguridad son cercanos al mínimo operativo permitido.

Los escenarios pseudoestáticos mostraron reducciones adicionales del FS, lo que es consistente con los postulados de HoeK y Bray (1981), quienes indican que la acción sísmica exacerba los efectos de las zonas débiles dentro de las litologías volcánicas y de las variaciones en la resistencia intacta. En este sentido, los valores de FS más críticos obtenidos en la ignimbrita reflejan su naturaleza mecánica menos competente y subrayan la importancia de emplear parámetros calibrados para evitar interpretaciones no conservadoras del comportamiento del talud.

Finalmente, el análisis integrado confirma que el uso de factores K ajustados por litología representa una mejora significativa frente al uso de valores genéricos de literatura. La estimación de la UCS calibrada para cada unidad litológica permite obtener factores de seguridad más realistas y técnicamente consistentes, lo cual constituye un aporte aplicable directamente a la operación minera. De esta manera, los resultados fortalecen la idea de que la caracterización geomecánica debe ser específica del yacimiento y basada en datos experimentales propios, en concordancia con las recomendaciones de la ISRM (1985).

V. CONCLUSIONES

Se cumplió el objetivo general de estimar la resistencia a la compresión uniaxial (UCS) a partir del índice de carga puntual Is_{50} mediante factores de correlación ajustados por litología. Las ecuaciones obtenidas permitieron estimar valores de UCS consistentes con los resultados de laboratorio y lo suficientemente confiables para su aplicación en el análisis de estabilidad de taludes banco-berma. La reducción sistemática del factor de seguridad (FS) al emplear UCS estimada con factores K calibrados demuestra que estas correlaciones describen de manera más realista la resistencia intacta del macizo rocoso, mejorando la precisión del modelamiento geotécnico frente al uso de valores genéricos de literatura.

Se determinó la relación estadística entre Is_{50} y UCS para cada litología evaluada, obteniendo modelos lineales forzados al origen con significancia estadística ($p < 0.001$) y coeficientes de determinación entre 0.58 y 0.93. Estos resultados confirman que el índice de carga puntual es un estimador válido de la resistencia intacta y permiten establecer factores K diferenciados por litología: Pórfido Temprano (K = 22.75), Granodiorita (K = 22.04), Pórfido Tardío (K = 20.09) e Ignimbrita (K = 15.82). La coherencia de estos factores con los rangos propuestos por Broch & Franklin (1972), valida físicamente las correlaciones obtenidas y demuestra la pertinencia de realizar calibraciones litológicas específicas.

La aplicación de los valores de UCS estimada en los modelos de estabilidad evidenció una reducción sistemática del Factor de Seguridad (FS) respecto a los valores obtenidos con los factores K de literatura. Las litologías ígneas intrusivas mostraron variaciones moderadas: en Pórfido Temprano, la reducción osciló entre 5.4% y 8.9% en condiciones estáticas, y entre 6.1% y 6.8% en pseudoestáticas; mientras que en Granodiorita las variaciones fueron menores, entre 2.9% y 3.0% en estático y 7.0%–7.8% en pseudoestático. En contraste, la Ignimbrita presentó la mayor sensibilidad, con reducciones que alcanzaron valores entre 16.4% y 21.4% en estático y 19.5%–22.0% en pseudoestático. Estos resultados confirman que el uso de parámetros no calibrados sobrestima la estabilidad real del talud, y que la UCS estimada a partir del índice Is_{50} proporciona parámetros más representativos del macizo rocoso. En consecuencia, el empleo de factores K ajustados mejora de manera significativa la confiabilidad del diseño geotécnico banco-berma.

VI. RECOMENDACIONES

El ensayo de carga puntual Is_{50} ha demostrado en esta investigación ser un estimador eficiente y confiable para estimar la resistencia intacta de la roca, Por ello, se recomienda implementarlo de forma continua en las campañas perforaciones diamantinas posteriores. Esta práctica permitirá aumentar notablemente el volumen de datos mecánicos disponibles, fortalecer la base de datos litológica del yacimiento y mejorar la representatividad de los parámetros utilizados en los modelos geotécnicos. Integrar el Is_{50} como herramienta estándar optimiza los tiempos de caracterización y reduce la dependencia exclusiva de ensayos UCS, sin comprometer la calidad de la información obtenida.

Las correlaciones obtenidas en este estudio son válidas para las litologías analizadas; sin embargo, el macizo rocoso puede presentar variaciones naturales asociadas al avance del tajo, cambios litológicos, alteración hidrotermal o incremento del fracturamiento. Por ello, se recomienda recalibrar las correlaciones UCS - Is_{50} de manera periódica a medida que se incorporen nuevos datos. Asimismo, es importante ampliar la base experimental en litologías que actualmente cuentan con poca información como brechas, pórfidos granodioríticos, pórfidos inter-mineral con el objetivo de desarrollar correlaciones propias para estas unidades y reducir la incertidumbre geotécnica en sectores que actualmente no pueden ser caracterizados con suficiente detalle.

Los resultados demostraron que el uso de factores K ajustados por litología reduce la sobreestimación de la resistencia intacta y, en consecuencia, produce factores de seguridad (FS) más realistas tanto en condiciones estáticas como pseudoestáticas. Por ello, se recomienda utilizar prioritariamente los valores de UCS calibrados para cada litología en los análisis banco-berma. Además, se sugiere realizar retroanálisis periódicos en taludes en operación, comparando el comportamiento observado con los modelos generados con parámetros ajustados. Esta práctica permitirá validar continuamente los parámetros geomecánicos, detectar cambios en la respuesta del macizo rocoso y mejorar la confiabilidad del diseño geotécnico en los distintos sectores del tajo.

Asimismo, se recomienda considerar la implementación de un laboratorio geotécnico propio dentro de la unidad minera, enfocado en la realización de ensayos

mecánicos básicos como carga puntual, compresión uniaxial y pruebas complementarias para la caracterización de la roca intacta. La actual dependencia de laboratorios externos puede ocasionar retrasos en la obtención de resultados, mayores costos logísticos y limitaciones para tomar decisiones geotécnicas oportunas, especialmente en etapas críticas del diseño y operación del tajo. Contar con un laboratorio in situ permitiría reducir significativamente los tiempos de respuesta, aumentar la frecuencia de ensayos, mejorar el control de calidad de las muestras y reforzar la calibración de los parámetros geomecánicos utilizados en los análisis de estabilidad, favoreciendo así una gestión minera más eficiente, segura y sostenible.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Affam, N, Asare, E. y Aikins, D. (2019). *Correlation analysis of uniaxial compressive strength (UCS) and point load index (Is_{50}) of banket conglomerate within Tarkwaian Deposits of Ghana*. International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET). Volume 10, Issue 6, June 2019, pp. 418-434. ISSN 0976-6316.

Aladejare, A. (2019) *Evaluation of empirical estimation of uniaxial compressive strength of Rock using measurements from index and physical tests*. https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2019.08.001

Alitalesh, M., Yazdani, M. y Mollaali, M. (2016). *Correlation between uniaxial strength and point load index of Rocks*. Japanese Geotechnical Society Special Publication. DOI: 10.3208/jgssp.IRN-08

ASTM International. (2008). *ASTM D5731-08: Standard test method for determination of the point load strength index of rock and application to rock strength classification*. ASTM International.

ASTM International. (2014). *ASTM D7012-14: Standard test method for compressive strength and elastic moduli of intact rock core specimens under varying states of stress and temperatures*. ASTM International. https://doi.org/10.1520/D7012-14

ASTM International. (2020). *ASTM D5731-20: Standard test method for determination of the point load strength index of rock*. ASTM International. https://doi.org/10.1520/D5731-20

Basu. A. y Khamran M. (2010) *Point load test on schistose Rocks and its applicability in predicting uniaxial compressive strength.* International journal of Rock mechanics and mining science. *DOI: 10.1016/j.ijrmms.2010.04.006*

Bieniawski, Z. T. (1989). *Engineering Rock mass classifications: A complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering*. John Wiley & Sons.

Brady, B. H. G., & Brown, E. T. (2004). *Rock mechanics for underground mining*

(3rd ed.). Kluwer Academic Publishers.

Broch, E., y Franklin, J. A. D. (1972). *The point-load strength test. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 9(6), 669-697. https://doi.org/10.1016/0148-9062(72)90030-7

Broch, E., y Franklin, J. A. D. (1985*).* ISRM *Suggested Method for Determining Point Load Strength*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*,* ISRM Commission on Testing.

Burbano, D., y García, T. (2016*). Estimación empírica de la resistencia a compresión simple a partir del ensayo de carga puntual en rocas anisótropas (esquistos y pizarras).* https://doi.org/10.29166/revfig.v1i2.862

Castro, L. (2022). *Análisis de estabilidad de talud por el Método Bishop en depósitos de desmonte Minero Excélsior, Cerro de Pasco - 2021*. Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión.

Catari, P. (2024). *Análisis de estabilidad del talud noroeste de la mina Cuajone mediante el método de elementos finitos - 2023*. Universidad Nacional de Moquegua.

Choco, C. y Peláez, G. (2022). *Valoración del Índice de Carga Puntual en rocas y su relación con el diámetro equivalente de probetas.* Universidad del Azuay.

Escobar Chanalata, S. H., & Flores Carvajal, M. D. (2017). Estudio de estabilidad de taludes del paso lateral de la ciudad de Macas. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. http://dspace.espoch.edu.ec/handle/123456789/7671

Espinoza, A. (2023). *Evaluación de los parámetros geométricos del talud, para garantizar la estabilidad del tajo superficial raúl rojas en la unidad minera cerro de pasco Compañía Minera Volcan S.A.A. 2022.* Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga.

Feijoo, E., Choco, E., Peláez, G. y Feijoo, B. (2022). *Índice de carga puntual y su relación con dimensiones en bloque regular de roca*.

https://doi.org/10.37815/rte.v34n2.886

Feijoo, E. y Padrón, J. (2020). *La Resistividad de rocas y su relación con la resistencia a compresión simple en Mina.* https://uctunexpo.autanabooks.com/index.php/uct/article/download/296/526

Feijoo, E., Feijoo, B. y Vásquez, E. (2022). *Evaluación de la correlación entre la UCS e Is_{50} en base a dimensiones de probetas*. CEDAMAZ, Vol. 12, No. 2, pp. 197-202. DOI: 10.54753/cedamaz.v12i2.1712

Fener, M., S. Kahraman, A. Bilgil, y O. Gunaydin. (2005). *A Comparative Evaluation of Indirect Methods to Estimate the Compressive Strength of Rocks.* Rock Mechanics and Rock Engineering. DOI: 10.1007/s00603-005-0061-8

Galván, M., Sertón, J. y Preciado, J. (2014). *Correlación entre la resistencia a compresión simple y el índice de carga puntual Is_{50} en Calizas de la Comunidad Valenciana (España).* Acta geotechnica slovenica 11(2):34-45

González de Vallejo, L. I. (2002). *Ingeniería geológica*. Prentice Hall.

Guerrero, P. (2021). *Estimación de la resistencia uniaxial a partir de ensayos PLT y martillo de Schmidt en rocas cercanas a la antigua cascada de San Rafael, ubicada en el límite provincial Napo-Sucumbíos*. Universidad Central del Ecuador.

Hizarra, J., Lopez, J. y Navarro, J. (2021). *Evaluación geomecánica del macizo rocoso para determinar el ángulo de reposo del talud, carretera tramo San Antonio puente Chiquiacc, Huancavelica-2021*. Universidad Continental.

Hoek, E., & Bray, J. W. (1981). *Rock slope engineering* (3rd ed.). The Institution of Mining and Metallurgy.

Hormazabal, E., Prudencio, M. y Cofre, M. (2019). Diseño y desempeño de taludes en roca a escala banco-berma. 1er Congreso boliviano de mecánica de rocas. Conbolmer I 2019.

Hudson, J. A., & Harrison, J. P. (1997). *Engineering Rock mechanics: An*

introduction to principles (Vol. 1). Elsevier.

ISRM. (1985). Suggested methods for determining point load strength. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 22, 51–60.

International Society for Rock Mechanics (2016). *ISRM: Point Load Test. Suggested Method for determining Point Load Strength*. Portugal.

Jaeger, J. C., Cook, N. G. W., & Zimmerman, R. W. (2007). *Fundamentals of Rock mechanics* (4th ed.). Blackwell Publishing.

Marcelo, S. (2024). *Evaluación geomecánica en la estabilidad de taludes del proyecto óxidos in situ de Volcan Compañía Minera S.A.A., 2023.* Universidad Nacional Daniel Alcidez Carrión.

Matthews, C., Farook, Z., & Helm, P. R. (2014). *Slope stability analysis: Limit equilibrium or the finite element method?* Ground Engineering, 48(5), 22-28.

Mohamad, J., Abang, D., Mohd, A., Dan, M., Jusoh, K. y Mat, K. (2022). *Correlation between Uniaxial Compressive Strength and Point Load Strength of Penang Island Granites*. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 971 (2022) 012025. doi:10.1088/1755-1315/971/1/012025

Morgenstern, N. R., & Price, V. E. (1965). The analysis of the stability of general slip surfaces. Géotechnique, 15(1), 79-93.

Obregon, C. A. (2020). *Slope stability analysis of open pit mines under geomechanical uncertainty* (Master's thesis). McGill University.

Puma, M. (2019). *Estabilidad de taludes y revegetación en el cierre final del tajo 1 del proyecto Maricielo 2003 de óxido de hierro - puno 2019*. Universidad Nacional del Altiplano.

Ricci, M. (2018). *Caracterización geotécnica y análisis de estabilidad de "Proyecto Continuidad Mina Gabriela*". Universidad de Talca, Chile.

Romero, M. (2022). *Análisis de la estabilidad del talud del botadero de la concesión minera Camila III en la provincia de Mariscal Nieto del*

departamento de Moquegua. Universidad Tecnológica del Perú.

Santa Maria, M. y Chegne, J. (2023). *Evaluación geomecánica - geotécnica para el diseño y estabilidad de taludes en la cantera el Gavilan - Cajamarca 2023.* Universidad Privada del Norte.

Vera, J. (2024). Evaluación de las condiciones geotécnicas para la construcción de la Central Hidroeléctrica Chontayacu Alto y Bajo, 2020. Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión

Vera, M. y León, R. (s.f). *Correlaciones empíricas entre ensayos de compresión uniaxial no confinado (UCS), resistencia a la tracción indirecta (BTS) y ensayos de carga puntual (PLT).* Universidad de Santiago de Chile.

VIII. ANEXOS

ANEXO 01. Matriz de Consistencia

PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES E INDICADORES	METODOLOGÍA
PROBLEMA GENERAL ¿De qué manera el índice de carga puntual (Is_{50}) permite estimar la resistencia a la compresión uniaxial (UCS) para aplicarla en el análisis de estabilidad de taludes rocosos a escala de banco - berma en una mina a cielo abierto? **PROBLEMAS ESPECÍFICOS** (1) ¿Cuál es la relación estadística entre el índice de carga puntual (Is_{50}) y la resistencia a la compresión uniaxial (UCS) por litología en una mina a cielo abierto? (2) ¿Cómo influye la resistencia a la compresión uniaxial (UCS) estimada a partir del Is_{50} en el análisis de estabilidad de taludes rocosos a escala de banco - berma en una mina a cielo abierto?	**OBJETIVO GENERAL** Estimar la resistencia a la compresión uniaxial (UCS) a partir del índice de carga puntual (Is_{50}) mediante un factor de correlación ajustado para el análisis de estabilidad de taludes rocosos a escala de banco - berma en una mina a cielo abierto. **OBJETIVOS ESPECÍFICOS** (1) Determinar la relación estadística entre el índice de carga puntual (Is_{50}) y la resistencia a la compresión uniaxial (UCS) por litología en una mina a cielo abierto. (2) Aplicar los valores de la resistencia a la compresión uniaxial (UCS) estimada a partir del índice de carga puntual (Is_{50}) en el análisis de estabilidad de taludes rocosos a escala de banco - berma en una mina a cielo abierto.	**HIPOTESIS GENERAL** La estimación de la resistencia a la compresión uniaxial (UCS) a partir del índice de carga puntual (Is_{50}) mediante un factor de correlación ajustado permite obtener valores representativos para el análisis de estabilidad de taludes rocosos a escala de banco-berma en una mina a cielo abierto. **HIPÓTESIS ESPECÍFICAS** (1) Existe una correlación positiva entre la resistencia a la compresión uniaxial (UCS) y el índice de carga puntual (Is_{50}) por litología en la mina a cielo abierto estudiada. (2) La aplicación de los valores de la resistencia a la compresión uniaxial (UCS) estimada a partir del índice de carga puntual (Is_{50}) influye en los factores de seguridad obtenidos en el análisis de estabilidad de taludes rocosos en la mina a cielo abierto estudiada.	**VARIABLE INDEPENDIENTE** X= Índice de carga puntual (Is_{50}) **Indicadores** X1: Fuerza máxima P (kN) X2: Is (MPa) X3: Is_{50} (MPa) **VARIABLE DEPENDIENTE:** Y: Resistencia a la compresión uniaxial (UCS) **Indicadores** Y1: Resistencia a la compresión uniaxial (UCS) de laboratorio (MPa) Y2: Resistencia a la compresión uniaxial (UCS) estimada mediante correlación Is_{50} - UCS (MPa)	**TIPO DE INVESTIGACION** Investigación Aplicada **ENFOQUE** Cuantitativo **NIVEL** Descriptivo y Correlacional **DISEÑO DE INVESTIGACION:** No experimental, Transversal. **JUSTIFICACIÓN** La medición directa del valor de UCS de las rocas requiere testigos intactos con una calidad y geometría específica, lo cual requiere de equipos especializados, ensayos costosos y tiempos prolongados. Las ecuaciones empíricas que estiman una correlación estadística de la resistencia de la roca con otro parámetro se vuelven una herramienta práctica y confiable que puede ser utilizada para la predicción de UCS

ANEXO 02. Cálculo detallado del error porcentual entre UCS estimada y UCS obtenida en laboratorio

Litología	Is50 Mpa	UCS Mpa laboratorio	K Literatura	Error K literatura (%)	K ajustada	Error K ajustado (%)
Granodiorita	6.35	170.59	24.00	10.69%	22.04	17.97%
Granodiorita	6.37	121.03	24.00	26.28%	22.04	15.98%
Granodiorita	5.96	168.07	24.00	14.92%	22.04	21.86%
Granodiorita	5.98	144.38	24.00	0.64%	22.04	8.74%
Granodiorita	3.64	40.63	24.00	115.25%	22.04	97.70%
Granodiorita	5.62	137.94	24.00	2.19%	22.04	10.16%
Granodiorita	6.87	190.23	24.00	13.37%	22.04	20.43%
Granodiorita	6.41	173.72	24.00	11.42%	22.04	18.64%
Granodiorita	6.14	103.31	24.00	42.70%	22.04	31.06%
Granodiorita	4.25	68.86	24.00	48.18%	22.04	36.09%
Granodiorita	4.52	60.95	24.00	77.91%	22.04	63.41%
Granodiorita	2.64	53.19	24.00	19.34%	22.04	9.61%
Granodiorita	5.73	122.01	24.00	12.81%	22.04	3.61%
Granodiorita	5.33	88.01	24.00	45.44%	22.04	33.58%
Granodiorita	5.84	106.93	24.00	31.06%	22.04	20.37%
Granodiorita	6.06	130.55	24.00	11.39%	22.04	2.31%
Granodiorita	2.19	68.86	24.00	23.64%	22.04	29.86%
Ignimbrita	4.44	72.10	20.00	23.15%	15.82	2.56%
Ignimbrita	5.09	82.21	20.00	23.77%	15.82	2.08%
Ignimbrita	3.85	59.68	20.00	29.11%	15.82	2.15%
Ignimbrita	5.75	82.82	20.00	38.90%	15.82	9.90%
Ignimbrita	3.54	67.27	20.00	5.29%	15.82	16.69%
Ignimbrita	5.86	92.23	20.00	27.02%	15.82	0.50%
Ignimbrita	5.31	108.65	20.00	2.35%	15.82	22.74%
Ignimbrita	2.92	71.05	20.00	17.91%	15.82	35.05%
Ignimbrita	5.00	65.80	20.00	51.93%	15.82	20.21%
Ignimbrita	3.27	52.19	20.00	25.24%	15.82	0.91%
Ignimbrita	4.86	62.96	20.00	54.42%	15.82	22.18%
Ignimbrita	2.42	39.32	20.00	22.87%	15.82	2.79%
Ignimbrita	3.06	39.28	20.00	55.86%	15.82	23.32%
Ignimbrita	5.99	94.47	20.00	26.91%	15.82	0.41%
Ignimbrita	4.56	56.18	20.00	62.41%	15.82	28.50%
Ignimbrita	2.26	53.70	20.00	15.91%	15.82	33.47%
Ignimbrita	3.56	52.76	20.00	34.91%	15.82	6.74%
Pórfido Temprano	5.89	80.92	24.00	74.81%	22.75	65.73%
Pórfido Temprano	5.07	91.31	24.00	33.23%	22.75	26.31%
Pórfido Temprano	8.36	177.06	24.00	13.26%	22.75	7.38%
Pórfido Temprano	5.94	184.23	24.00	22.61%	22.75	26.63%
Pórfido Temprano	5.20	96.63	24.00	29.25%	22.75	22.54%
Pórfido Temprano	6.25	98.64	24.00	52.09%	22.75	44.19%
Pórfido Temprano	5.12	68.32	24.00	79.96%	22.75	70.61%
Pórfido Temprano	3.80	58.64	24.00	55.36%	22.75	47.29%
Pórfido Temprano	4.82	98.63	24.00	17.19%	22.75	11.10%
Pórfido Temprano	6.83	122.67	24.00	33.67%	22.75	26.72%
Pórfido Temprano	7.27	121.25	24.00	43.92%	22.75	36.44%
Pórfido Temprano	5.08	103.67	24.00	17.56%	22.75	11.45%
Pórfido Temprano	6.27	101.04	24.00	48.95%	22.75	41.22%

Pórfido Temprano	5.07	143.88	24.00	15.50%	22.75	19.89%
Pórfido Temprano	6.41	110.05	24.00	39.68%	22.75	32.42%
Pórfido Temprano	5.47	109.04	24.00	20.33%	22.75	14.08%
Pórfido Temprano	7.51	214.56	24.00	15.95%	22.75	20.32%
Pórfido Temprano	6.87	131.35	24.00	25.60%	22.75	19.07%
Pórfido Temprano	11.61	252.49	24.00	10.34%	22.75	4.60%
Pórfido Temprano	8.60	215.96	24.00	4.39%	22.75	9.36%
Pórfido Temprano	13.61	331.60	24.00	1.50%	22.75	6.61%
Pórfido Temprano	4.43	143.11	24.00	25.71%	22.75	29.57%
Pórfido Temprano	11.18	275.54	24.00	2.59%	22.75	7.65%
Pórfido Temprano	5.66	170.68	24.00	20.40%	22.75	24.53%
Pórfido Temprano	8.90	231.80	24.00	7.90%	22.75	12.69%
Pórfido Temprano	12.32	311.90	24.00	5.18%	22.75	10.11%
Pórfido Temprano	12.91	314.96	24.00	1.63%	22.75	6.74%
Pórfido Tardío	4.32	101.64	24.00	2.08%	20.09	14.57%
Pórfido Tardío	3.82	80.62	24.00	13.75%	20.09	4.81%
Pórfido Tardío	7.46	120.20	24.00	48.93%	20.09	24.64%
Pórfido Tardío	8.92	160.50	24.00	33.40%	20.09	11.64%
Pórfido Tardío	7.92	206.10	24.00	7.76%	20.09	22.81%
Pórfido Tardío	9.10	204.04	24.00	7.01%	20.09	10.44%
Pórfido Tardío	9.21	191.90	24.00	15.22%	20.09	3.57%
Pórfido Tardío	10.34	204.16	24.00	21.55%	20.09	1.72%
Pórfido Tardío	6.23	88.38	24.00	69.10%	20.09	41.51%
Pórfido Tardío	2.97	78.54	24.00	9.37%	20.09	24.15%
Pórfido Tardío	3.66	103.48	24.00	15.14%	20.09	28.98%
Pórfido Tardío	9.64	193.08	24.00	19.78%	20.09	0.24%
Pórfido Tardío	8.37	164.77	24.00	21.87%	20.09	1.99%
Pórfido Tardío	5.27	150.10	24.00	15.69%	20.09	29.44%
Pórfido Tardío	7.59	115.33	24.00	58.03%	20.09	32.25%
Pórfido Tardío	4.36	83.76	24.00	24.84%	20.09	4.48%
Pórfido Tardío	9.27	181.61	24.00	22.54%	20.09	2.55%
Pórfido Tardío	3.98	96.95	24.00	1.50%	20.09	17.57%
Pórfido Tardío	8.27	128.86	24.00	53.97%	20.09	28.86%
Pórfido Tardío	9.62	218.36	24.00	5.78%	20.09	11.48%
Pórfido Tardío	5.46	94.54	24.00	38.58%	20.09	15.98%

Nota. La tabla muestra todos los pares Is(50) - UCS empleados para las correlaciones, junto con las estimaciones calculadas mediante K de literatura y K ajustado, permitiendo visualizar los errores porcentuales individuales y la variabilidad por litología.

"UNIVERSIDAD NACIONAL DE MOQUEGUA"

VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN

FORMATO DE AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL UNAM

Formulario de autorización para la publicación electrónica en la página web del Repositorio Institucional de la Universidad Nacional de Moquegua. de conformidad con la Ley N° 30035 Ley que regula el Repositorio Nacional Digital de Ciencia. Tecnología e Innovación de Acceso Abierto y Resolución de Comisión Organizadora N° 041-2022-UNAM que aprueba el Reglamento que regula el Repositorio Institucional Digital de la UNAM.

1. DATOS DEL AUTOR

Nombres y Apellidos : .....Oliver Huarachi Laura.....
DNI/Carnet de Extranjería/Pasaporte N° : .....73214527.....
Correo electrónico : .....oliver456hl@gmail.com.....
Teléfono/Celular : .....975250609.....

2. GRADO, TITULO O ESPECIALIZACIÓN (Marque con una X)

Bachiller	Título Profesional	Magister	Doctor	Segunda Especialidad
	x			

3. TIPO DE PUBLICACIÓN (Marque con una X)

a) Articulo ( )
b) Tesis de pregrado (x)
c) Tesis de Maestría ( )
d) Tesis de Doctorado ( )
e) Monografía ( )
f) Reporte de caso científico o hallazgos ( )
g) Libro ( )
h) Parte de un libro ( )
i) Revisión ( )
j) Conferencia ( )
k) Presentación ( )
l) Artículo preliminar ( )
m) Articulo antes de ser publicado ( )
n) Artículo de prensa ( )
o) Documentos internos ( )
p) Imagen ( )
q) Documentos técnicos ( )
r) Ponencias presentadas en eventos científicos (Jornada. Congreso. Simposio Conferencias. etc.) ( )
s) Informes de suficiencia profesional ( )
t) Patentes producidas por académicos/as ( )

4. TIPO DE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN (Marque con una X)

a) Tesis (x)
b) Trabajo de Investigación ( )
c) Trabajo de suficiencia profesional ( )
d) Trabajo académico ( )

5. DATOS DE LA PUBLICACION

a) Título : ESTIMACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN UNIAXIAL (UCS) A PARTIR DEL ÍNDICE DE CARGA PUNTUAL (IS(50)) PARA EL ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES ROCOSOS A NIVEL DE BANCO-BERMA EN UNA MINA A CIELO ABIERTO.....
b) Campo del conocimiento OCDE (Indicar el código de clasificación OCDE de la obra : https://catalogos.concytec.gob.pe/vocabulario/ocde_ford.html) : ...2.07.02.....
c) Fecha de publicación : .....18 de Diciembre del 2025.....

6. DATOS DEL ASESOR:

a) Nombres y Apellidos : .....Christ Jesus Barriga Paria .....
b) DNI/Pasaporte/Cédula : .....44331713.....
c) ORCID : .....0000-0002-7130-9297.....

FIRMA : .....

DOCUMENTO DE IDENTIDAD : .....73214527.....
NOMBRES Y APELLIDOS : .....Oliver Huarachi Laura.....

LICENCIAS

Licencia Estándar

Bajo los siguientes términos. autorizo el depósito de mi trabajo de investigación en el Repositorio Institucional Digital de la UNAM.
Con la autorización de depósito da mi trabajo de investigación. otorgo a la Universidad Nacional de Moquegua. una Licencia No Exclusiva para reproducir. distribuir. comunicar al público. transformar (únicamente mediante su traducción a otros idiomas) y poner a disposición del público mi trabajo de investigación (incluido el resumen). en formato físico o digital. en cualquier medio. conocido o por conocerse. a través de los diversos servicios provistos por la Universidad. creados o por crearse. tales como el Repositorio Institucional Digital de la UNAM. Colección de Tesis. entre otros. en el Perú y en el extranjero. por el tiempo y veces que considere necesarias. y libre de remuneraciones.
En virtud de dicha Licencia. la UNIVERSIDAD NACIONAL DE MOQUEGUA. podrá reproducir mi trabajo de investigación en cualquier tipo de soporte y en más de un ejemplar. sin modificar su contenido. solo con los propósitos de seguridad. respaldo y preservación.
Declaro que el trabajo de investigación es una creación de mi autoría y exclusiva titularidad. o coautoría con titularidad compartida. y me encuentro facultado a conceder la presente licencia y. asimismo. garantizo que dicho trabajo de investigación no infringe derechos de autor de terceras personas.
La UNIVERSIDAD NACIONAL DE MOQUEGUA consignara el nombre del/los autor/es del trabajo de investigación. y no le hará ninguna modificación más de la permitida en la presente licencia.

Autorizo el depósito (marque con una X).
(__x__) **SI autorizo que se deposite inmediatamente.**

FIRMA : .....

DOCUMENTO DE IDENTIDAD : ...73214527.....
NOMBRES Y APELLIDOS : ...Oliver Huarachi Laura.....
FECHA : .....22 de Diciembre del 2025.....

UNIVERSIDAD NACIONAL DE MOQUEGUA

DECLARACIÓN JURADA DE ORIGINALIDAD DE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN / TESIS / TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL

Yo. .....Oliver Huarachi Laura..... bachiller de la Escuela Profesional de :.....Ingeniería de Minas..... de la Universidad Nacional de Moquegua. identificado (a) con DNI: N°.....73214527..... autor(a) de la Tesis / Trabajo de suficiencia profesional titulado "ESTIMACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN UNIAXIAL (UCS) A PARTIR DEL ÍNDICE DE CARGA PUNTUAL ($IS_{(50)}$) PARA EL ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES ROCOSOS A NIVEL DE BANCO-BERMA EN UNA MINA A CIELO ABIERTO".

Declaro bajo juramento que:

1. El trabajo de investigación es auténtico. siendo resultado de mi trabajo personal. que no se ha copiado. que no se ha utilizado ideas. formulaciones. citas integrales e ilustraciones diversas. sacadas de cualquier tesis. obra. artículo. memoria. etc.. (en versión digital o impresa). sin mencionar de forma clara y exacta su origen o autor. tanto en el cuerpo del texto. figuras. cuadros. tablas u otros que tengan derechos de autor. Por tanto. el trabajo de investigación no ha sido plagiado total ni parcialmente.
2. El trabajo de investigación no ha sido autoplagiada. es decir. no ha sido publicada ni presentada anteriormente para obtener algún grado académico previo o título profesional.
3. Los datos presentados en los resultados son reales. no han sido falseados. ni duplicados. ni copiados y por tanto los resultados que se presentan en el trabajo de investigación constituirán aporte a la realidad investigada.

Soy consciente de que el hecho de no respetar los derechos de autor y hacer plagio. es objeto de sanciones universitarias y/o legales. por lo que asumo cualquier responsabilidad que pudiera derivarse de irregularidades en el trabajo de investigación. así como de los derechos sobre la obra presentada.

Moquegua. .....22 de Diciembre del 2025.....



Huella digital

Nombres y Apellidos: Oliver Huarachi Laura
DNI: 73214527

Base legal: RESOLUCIÓN DIRECTORAL N° 194-2020-SUNEDU-02-15

OLIVER HUARACHI LAURA

TESIS

TESIS

CONFORMIDAD DE TESIS FINAL

Universidad Nacional de Moquegua

Detalles del documento

Identificador de la entrega
trn:oid:::1:3449945586

Fecha de entrega
22 dic 2025, 8:34 a.m. GMT-5

Fecha de descarga
22 dic 2025, 9:26 a.m. GMT-5

Nombre del archivo
Tesis-OliverV18.pdf

Tamaño del archivo
1.6 MB

105 páginas

29.813 palabras

172.348 caracteres

Firmado digitalmente por BARRIGA PARIA Christ Jesus FAU 20449347448 soft
Motivo: Soy el autor del documento
Fecha: 22.12.2025 09:26:43 -05:00

14% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- Trabajos entregados
- Fuentes de Internet

Fuentes principales

0% Fuentes de Internet
14% Publicaciones
0% Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

Fuentes principales

0% Fuentes de Internet
14% Publicaciones
0% Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Fuentes principales

Las fuentes con el mayor número de coincidencias dentro de la entrega. Las fuentes superpuestas no se mostrarán.

1	Publicación	Manolo Adolfo Galván Ceballos. "Estudio del ensayo a carga puntual en materiale... 2%
2	Publicación	Pozo Garcia, Raul Rodolfo. "Modificación del Sistema GSI en función de la Escala d... 2%
3	Publicación	M. Navarrete, W. Martínez Molina, E. M. Alonso-Guzmán, C. Lara-Gómez et al. "Ca... <1%
4	Publicación	Valeriano Nina, Fredy Alonso. "Caracterización del dominio geomecánico para la ... <1%
5	Publicación	Ernesto Feijoo. "Characterization of Rock Material Through Point Load Test Index,... <1%
6	Publicación	SCHLUMBERGER DEL PERU S.A.. "Actualización del Plan de Cierre de Minas de la U... <1%
7	Publicación	Calla Fernandez, Juan Fredy. "Efectos de la disolución del mineral calcita en el co... <1%
8	Publicación	PROYECTOS Y ESTUDIOS MUNDIALES DE INVERSION SOCIEDAD ANONIMA CERRA... <1%
9	Publicación	SNC LAVALIN PERU S.A.. "Modificación del Plan de Cierre de Minas de la Unidad M... <1%
10	Publicación	Pozo Masana, Felix del. "Modelo Geo-Mecanico Distrital Ajustado a Yacimientos: C... <1%
11	Publicación	Moreno Rondoy, Rita Clara. "Evaluación de riesgos en la estabilidad de taludes de... <1%

12 Publicación
Chura Cahuana, Heinz Miguel. "Determinación de las condiciones de altos esfuerz... <1%

13 Publicación
Torres, Jonathan Fernando Tobar. "Estudo da escavabilidade de maciços rochosos... <1%

14 Publicación
Patricio Feijoo Calle, Bernardo Feijoo Guevara. "EVALUACIÓN DEL ÍNDICE DE CAR... <1%

15 Publicación
Z.M. Yusof, W.S. Farn, C.S. Leow, J.C. Lee. "Rock point load test (PLT index) and its ... <1%

16 Publicación
Quea Gutierrez, Lucio. "Diseño de estabilidad de taludes para el nivel de resistenc... <1%

17 Publicación
FERNANDO GARRIGÓS SANCHIS. "Estudios de degradación y alterabilidad de roca... <1%

18 Publicación
Wilson F. Espinoza, Randy Moposita, Anthony Torres, Carlos Moro. "Characterizin... <1%

19 Publicación
Tania Peralta, Melanie Menoscal, Gianella Bravo, Victoria Rosado et al. "Rock Slop... <1%

20 Publicación
JCI INGENIERIA & SERVICIOS AMBIENTALES S.A.C.. "Tercer ITS de la Unidad Miner... <1%

21 Publicación
Quispe Aliaga, Adelina. "Herramientas virtuales y el aprendizaje a distancia en es... <1%

22 Publicación
Richard A. Schultz. "Relative scale and the strength and deformability of rock mas... <1%

23 Publicación
Hayat Abdela, Bayisa Regassa, Tola Garo, Addisu Bekele. "Evaluation of Rock Slop... <1%

24 Publicación
Tondo, Vinícius Pereira. "Análise Paramétrica de Muros de Gabiões.", Instituto P... <1%

25 Publicación
Gonzales Torres, Arturo Manuel. "Comparativo de problemáticas de la cultura tri... <1%

26	Publicación	Elvio Tintaya Zegarra, Yony Farfan Robles, Antonio Coronel Molina, Rosa Evangeli... <1%
27	Publicación	Pfeiffer Leon, Ann Kathrin. "Habitos de Comunicacion y Organizacion de la Infor... <1%
28	Publicación	Robert Aro Aro, Edwin Pino Vargas. "Determinación del talud de una presa de enr... <1%
29	Publicación	Ligeti Rojas, Felipe Janos. "Simulación Computacional del Impacto de Perforadore... <1%
30	Publicación	Reyes Mauricio, Edgar Saul. "Estrategias de aprendizaje y su relación con las habil... <1%
31	Publicación	Amine el Mahdi Safhi, Hicham Amar, Yahya El Berdai, Mustapha El Ghorfi et al. "C... <1%
32	Publicación	Pariona Ninanya, Gladys Ruth. "Relación de las políticas de créditos, cobranzas y ... <1%
33	Publicación	C SANHUEZA PLAZA, L RODRÍGUEZ CIFUENTES. "Análisis Comparativo de métodos... <1%
34	Publicación	Lekan Olatayo Afolagboye, Damilola Emmanuel Ajayi, Inioluwa Opeyemi Afolabi. ... <1%
35	Publicación	Giraldo Botero, Diana Marcela. "Analisis Del Comportamiento De Tuneles Construu... <1%
36	Publicación	Jijo James, Ebenezer Paul Billy Graham David, Mahalakshmi Nagarathinam, Moha... <1%
37	Publicación	Mamani Gómez, Virginia Marisol. "Relacion de estilos de vida de recreación con fa... <1%
38	Publicación	Brideau, M.A.. "Structural and engineering geology of the East Gate Landslide, Pu... <1%
39	Publicación	Pingkuang Luo, Xugang Fang, Diyuan Li, Yisong Yu, Huahua Li, Peng Cui, Jinyin M... <1%

40 Publicación
"Alofonía sociolectal del fonema “ch” del español hablado en Santiago de Chile : u... <1%

41 Publicación
"Creencias de las y los profesores sobre la evaluación de estudiantes inmigrantes... <1%

42 Publicación
Carrera Cutipa, Martha Roxana. "Nivel de cumplimiento de normatividad en el re... <1%

43 Publicación
Laso, Maria Soledad Riquelme. "Estudio de la Relacion Entre el Nivel de Integracio... <1%

44 Publicación
Abdimaulen, Dias. "A Near-Wellbore Numerical Model to Analyze Hydraulic Fract... <1%

45 Publicación
Mishra, D.A., and A. Basu. "Estimation of uniaxial compressive strength of rock m... <1%

46 Publicación
Ramón García-Cedeño, José Álvarez-Pérez, Milena Mesa-Lavista, Franco A Carpio-... <1%

47 Publicación
del Potro, R.. "Geotechnical classification and characterisation of materials for ... <1%

48 Publicación
Md Shayan Sabri, Amit Kumar Verma, T.N. Singh. "Direct and indirect methods fo... <1%

49 Publicación
Nicoletti, P.G.. "Inconsistent patterns of historical seismicity and earthquake-trig... <1%

50 Publicación
S. M. Dassanayake, A. Mousa. "Probabilistic stability evaluation for wildlife-dama... <1%

51 Publicación
Fura Vizcarra, Hugo David. "La motivación y el rendimiento académico del idioma... <1%

52 Publicación
Gurocak, Z.. "Rock slope stability and excavatability assessment of rocks at the ... <1%

53 Publicación
J. L. Mantari, J. C. Gutarra. "Regulatory gaps in the design and operation of minin... <1%

54	Publicación	ECSA INGENIEROS. "EIA del Proyecto Afianzamiento Hídrico de la Central Hidroelé... <1%
55	Publicación	HIDROSAT Y MEDIO AMBIENTE S.A.C HIDMEDAM S.A.C. "EIA-SD del Proyecto de Cu... <1%
56	Publicación	Callejon, Gador Callejon. "Resultados Negativos Asociados A la Medicacion (RNM) ... <1%
57	Publicación	Horna Ferro, Pamela de Jesus|Leon Ramirez, Fernando Martin|Martinez Loayza, ... <1%
58	Publicación	Gòmez Rosado, Juan Humberto. "Programa de estrategias de estudio de casos ba... <1%
59	Publicación	M.M. Othman, R. Hen-Jones, C. Zapata, E. Jiménez, F. De Luca, E.A. Holcombe, P.J. ... <1%
60	Publicación	Santos Méndez, Bernice. "Relación entre el estilo de liderazgo y el éxito administr... <1%
61	Publicación	Fener, M., and I. Ince. "Influence of orthoclase phenocrysts on point load strengt... <1%
62	Publicación	Joan Romero Clausell. "Estabilización de revestimientos de tierra usando Ceratoni... <1%
63	Publicación	TECNOLOGIA XXI S A. "MEIA de la Planta de Beneficio Explorador para el Recreci... <1%
64	Publicación	Vergara Quezada, Maximiliano. "Efectos De La Fluencia Lenta En La variacion De ... <1%
65	Publicación	Assis, Diogo Miguel Gomes. "Classificações Geomecânicas Aplicadas a Taludes Ro... <1%
66	Publicación	Carbonell Marques, angela. "Brechas de las Politicas Publicas y la Intervencion Pr... <1%
67	Publicación	Harrison de la Rosa Ramírez. "Desarrollo de formulaciones de ácido poliláctico (P... <1%

68 Publicación
Sergio Morell Monzó. "Desarrollo de procedimientos para la deteccion del aband... <1%

69 Publicación
Teresa Isabel Espinel Granda. "Modern music subject to the impulse of rationaliz... <1%

70 Publicación
Ventura Ricce, Nelo Homero. "Inaplicación del Artículo 93° del Código Penal en el ... <1%

71 Publicación
"Advances in Manufacturing, Production Management and Process Control", Spri... <1%

72 Publicación
Andreas Beer. "Correlation of insertion torques with bone mineral density from d... <1%

73 Publicación
Gottreux Vollet, Ismael David. "Pre acondicionamiento con el uso de debilitamien... <1%

74 Publicación
Jennifer L. McCoy. "Challenges for the Collective Defense of Democracy on the Te... <1%

75 Publicación
WALSH PERU S.A. "EIA del Proyecto Ampliación de la Concentradora Toquepala y ... <1%

76 Publicación
da Silva, Gustavo Daniel Gomes. "Comparação dos modelos de Coulomb e de Bart... <1%

77 Publicación
A. Tanna, Y. Dave, E. Byiringiro, A. Kakkad. "Effectiveness of physiotherapy in lum... <1%

78 Publicación
Carsten Sinner. "El castellano de Cataluña", Walter de Gruyter GmbH, 2004 <1%

79 Publicación
Diyuan Li, Louis Ngai Yuen Wong. "Point Load Test on Meta-Sedimentary Rocks a... <1%

80 Publicación
DÉBORA TAZINASSO DE OLIVEIRA, ANTONIO GONÇALVES DE OLIVEIRA. "Municipa... <1%

81 Publicación
J D Mohamad, D Z Abang Hasbollah, A Mohd Taib, M F Dan, S N Jusoh, K N Mat Sai... <1%

82 Publicación
Julian Apaza Chino, Lucio Quea Gutierrez, Ruth Lucy Quispe Sandoval, Juan Carlos... <1%

83 Publicación
Keddy-Hector, Isabel. "Water-Borne Arsenic in Mining Communities: Policy Implic... <1%

84 Publicación
Keita, Alpha Mamoudou Talibe. "Analyse numérique Des mécanismes De Rupture... <1%

85 Publicación
Lachira Rimaycuna, Sara Janet. "Paradigmas de enfermería en cuidado del pacien... <1%

86 Publicación
Luis Antonio Andrade Rosas, Carlos Alberto Jiménez-Bandala. "El desempleo y la p... <1%

87 Publicación
Luna, Patricia, and Caori Patricia Takeuchi. "Experimental Analysis of Frames Ma... <1%

88 Publicación
Patricia Batista Grau. "Desarrollo de nanoestructuras de ZnO mediante anodizad... <1%

89 Publicación
Patricia Navascués Vega, Urtzi Llano Castresana. "Sustainability in project risk m... <1%

90 Publicación
Reyes, Esmila Calderón. "Estrategias de Comunicación en la Prevención del Vih/Si... <1%

91 Publicación
Salas Apaza, Alex Mario. "Contenido de metales pesados e índices de biodegrada... <1%

92 Publicación
CLB TECNO LOGICA S.A.C.. "EIA-SD del Proyecto RLP-21 Adecuación a Nuevas Espe... <1%

93 Publicación
M. Fakir, M. Ferentinou, S. Misra. "An Investigation into the Rock Properties Influ... <1%

94 Publicación
Maher Omar. "Empirical correlations for predicting strength properties of rocks –... <1%

95 Publicación
Martelli, Patricio Ignacio Faúndez. "Valorización de Sistemas Mineralizados en Eta... <1%

96 Publicación

Akdag, Selahattin. "Determination of Optimum Overall Slope Angle for an Open P... <1%

97 Publicación

Espiritu Martinez, Yeni Nancy. "Nivel de uso de las laptop XO en la practica pedag... <1%

98 Publicación

Falcón, William Percy Pulido. "Aplicación del software learn english daily como es... <1%

RESOLUCIÓN DE CONSEJO UNIVERSITARIO
N° 277-2026-CU

Moquegua, 23 de abril de 2026

VISTOS:

El Proveído N° 1459-2026-R de fecha 26 de marzo de 2026 emitido por el Rectorado, Informe N° D0173-2026-UNAM-R-SG de fecha 24 de marzo de 2026 emitido por el Secretario General, Informe Técnico N° D0040-2026-SG-GT de Grados y Títulos, Resolución de Consejo de Facultad N° 040-2026-CF-FAIN-UNAM de fecha 13 de marzo de 2026, el Acuerdo del Pleno del Consejo Universitario de Sesión Ordinaria N° 04-2026-SO-CU-UNAM, de fecha 01de abril de 2026, y;

CONSIDERANDO:

Que, conforme al 4to párrafo del artículo 18, de la Constitución Política del Perú, dispone que cada Universidad es autónoma en su régimen normativo, de gobierno, académico, administrativo y económico. Y el artículo 8° de la Ley N° 30220-Ley Universitaria, establece que la referida autonomía inherente a las Universidades, se ejerce de conformidad con la Constitución y demás normativa aplicable. Concordante con el artículo 1, de la Ley N° 31520, Ley que restablece la autonomía y la institucionalidad de las universidades peruanas, así como la Ley N° 32141, Ley que modifica la Ley N° 30220-Ley Universitaria, a fin de fortalecer la institucionalidad de las Universidades Públicas licenciadas;

Que, el Artículo 58, de la Ley N° 30220-Ley Universitaria, establece que el Consejo Universitario es el máximo órgano de gestión, dirección y ejecución académica y administrativa de la Universidad. Concordante con el artículo 18° del Estatuto de la Universidad Nacional de Moquegua, aprobado bajo Resolución de Asamblea Universitaria N° 015-2025-AU-UNAM;

Que, el artículo 59 de la Ley Universitaria-Ley N° 30220, establece las atribuciones del Consejo Universitario, y específicamente el numeral 59.9, establece; Conferir los grados académicos y los títulos profesionales aprobados por las Facultades y Escuela de Posgrado, así como otorgar distinciones honoríficas y reconocer y revalidar los estudios, grados y títulos de universidades extranjeras, cuando la universidad está autorizada por la Superintendencia Nacional de Educación Superior Universitaria. Concordante con el numeral 14, del artículo 20° del Estatuto de la Universidad Nacional de Moquegua;

Que, mediante Resolución de Asamblea Universitaria N° 006-2026-AU, de fecha 20 de abril de 2026, se aprobó la incorporación de la Disposición Transitoria N° 22 al Estatuto de la Universidad Nacional de Moquegua, referido a la excepción para la emisión de los grados académicos de bachiller y títulos profesionales consignando la denominación de "Facultad de Ingeniería y Arquitectura";

Que, mediante Resolución de Consejo de Facultad N° 040-2026-CF-FAIN-UNAM, de fecha 13 de marzo de 2026, el Coseno de Facultad de Ingenierías aprobó el otorgamiento del Título Profesional de Ingeniero de Minas por la modalidad de Tesis, a tres (03) Bachilleres de la Escuela Profesional de Ingeniería de Minas de la Facultad de Ingenierías de la Universidad Nacional de Moquegua, de acuerdo al siguiente detalle: OLIVER HUARACHI LAURA, SHANTALL TREYSI FERNÁNDEZ TICONA y ALLISON TATIANA NAVARRETE GONZALES;

Que, mediante Informe Técnico N° D0040-2026-SG-GT de fecha 23 de marzo de 2026, e Informe N° D0173-2026-UNAM-R-SG de fecha 24 de marzo de 2026, el Secretario General de la UNAM, remite al Rectorado el expediente para el trámite de Título Profesional de Ingeniero de Minas a los Bachilleres: OLIVER HUARACHI LAURA, SHANTALL TREYSI FERNÁNDEZ TICONA y ALLISON TATIANA NAVARRETE GONZALES de la Escuela Profesional de Ingeniería de Minas, quienes se encuentran aptos para la expedición del Título Profesional de Ingeniero de Minas, al haber cumplido satisfactoriamente con los requisitos legales y reglamentarios, exigidos en el Reglamento de Grados y Títulos de la Universidad Nacional de Moquegua, razón por la cual, el señor Secretario General incluye dicho expediente como punto de agenda para ser tratado en Sesión Extraordinaria de Consejo Universitario de fecha 01 de abril de 2026;

Que, el artículo 44° de la Ley N° 30220, Ley Universitaria señala que las universidades otorgan los grados académicos de Bachiller, Maestro, Doctor y los Títulos Profesionales que correspondan, a nombre de la Nación (...). Asimismo, la Ley N° 31803, modifica el artículo en mención adicionando; La Superintendencia Nacional de Educación Superior Universitaria (SUNEDU) determina los criterios, así como establece y supervisa el procedimiento administrativo para el reconocimiento de grados y títulos otorgados en el extranjero, en el marco de la normativa vigente;

Que, el numeral 45.2 del artículo 45° de la Ley N° 30220, Ley Universitaria, precisa los requisitos mínimos para la obtención del título profesional, como son: el grado de Bachiller y la aprobación de una tesis o trabajo de suficiencia profesional. Asimismo, establece que el título profesional solo se puede obtener en la universidad en la cual se haya obtenido el grado de bachiller;

Domicilio Legal: Prolongación Av., Ancash S/N - Moquegua
RUC: 20449347448 - Teléfono: (053) 670168
Página Web: www.unam.edu.pe

Universidad Nacional de Moquegua

RESOLUCIÓN DE CONSEJO UNIVERSITARIO
N° 277-2026-CU

Moquegua, 23 de abril de 2026

Que, mediante Resolución de Comisión Organizadora N° 1153-2021-UNAM, se aprobó el Reglamento de Grados y Títulos de la Universidad Nacional de Moquegua, el mismo que fue modificado a través de las Resoluciones de Comisión Organizadora N° 410; 453 y 890-2022, N° 880-2023-UNAM y N° 081, 484-2024-UNAM el cual establece los requisitos y norma los procedimientos para la obtención de los grados académicos y títulos profesionales conferidos por esta Casa Superior de Estudios;

Que, bajo el amparo de los considerandos precedentes, el Pleno del Consejo Universitario en Sesión Ordinaria N° 04-2026-SO-CU-UNAM, de fecha 01 de abril de 2026, emitió, el siguiente, Acuerdo, POR UNANIMIDAD: CONFERIR, a nombre de la Nación el Título Profesional de Ingeniero de Minas por la modalidad de sustentación de tesis a los Bachilleres: OLIVER HUARACHI LAURA, SHANTALL TREYSI FERNÁNDEZ TICONA y ALLISON TATIANA NAVARRETE GONZALES, de la Escuela Profesional de Ingeniería de Minas, de la Facultad de Ingenierías de la Universidad Nacional de Moquegua;

En uso de las facultades y atribuciones conferidas por el Art. 18, de la Constitución Política del Perú, la Ley N° 30220 Ley Universitaria, el Estatuto de la Universidad Nacional de Moquegua, y a lo acordado por el pleno del Consejo Universitario:

SE RESUELVE:

ARTÍCULO 1°: CONFERIR, A NOMBRE DE LA NACIÓN a los Bachilleres

- **OLIVER HUARACHI LAURA**
- **SHANTALL TREYSI FERNÁNDEZ TICONA**
- **ALLISON TATIANA NAVARRETE GONZALES**

El **TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO DE MINAS.**
Por la modalidad de SUSTENTACIÓN DE TESIS, de la Escuela Profesional de Ingeniería de Minas, de la Facultad de Ingenierías de la Universidad Nacional de Moquegua.

ARTÍCULO 2°: ENCARGAR, al Secretario General de la UNAM, para que realice las acciones pertinentes relacionadas con la inscripción correspondiente en el Registro de Grados y Títulos de la Superintendencia Nacional de Educación Superior Universitaria - SUNEDU.

ARTÍCULO 3°: DISPONER, el cumplimiento de la presente Resolución a todas las dependencias de la Universidad Nacional de Moquegua.

ARTÍCULO 4°: DISPONER la publicación de la presente resolución en el Portal Institucional de la Universidad Nacional de Moquegua www.unam.edu.pe

REGÍSTRESE, PUBLÍQUESE Y CÚMPLASE;

MTRO. JOSE LUIS PACHECO CACERES
SECRETARIO GENERAL

DR. HUGO RUBEN MARCA MAQUERA
RECTOR
PRESIDENTE DEL CONSEJO UNIVERSITARIO

DISTRIBUCION:
VRA,
VRI,
FAIN,
EPIM,
GyT
DASA,
OTI
Interesado,
C.c. Arch.

Domicilio Legal: Prolongación Av., Ancash S/N - Moquegua
RUC: 20449347448 - Teléfono: (053) 670168
Página Web: www.unam.edu.pe