



Aplicación del método de Mathwes para el diseño geotécnico de túneles en minería ecuatoriana

Application of the Mathwes method for the geotechnical design of tunnels in Ecuadorian mining

Aplicação do método de Mathwes para o projeto geotécnico de túneis na mineração equatoriana

Fernanda Guartán C ^I

maria.guartan@esPOCH.edu.ec
<https://orcid.org/0009-0006-4717-1765>

José A. Guartán ^{II}

jaguartan@utpl.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0002-8918-4891>

Carmen A. Esparza ^{III}

caesparza@utpl.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0003-0540-8956>

Correspondencia: maria.guartan@esPOCH.edu.ec

Ciencias Técnicas y Aplicadas
Artículo de Investigación

* **Recibido:** 26 de mayo de 2025 * **Aceptado:** 24 de junio de 2025 * **Publicado:** 15 de julio de 2025

- I. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo Sede Morona Santiago, Escuela de Minas, Ecuador.
- II. Universidad Técnica Particular de Loja, Departamento de Geociencias, Ecuador.
- III. Universidad Técnica Particular de Loja, Departamento de Ingeniería Civil, Ecuador.

Resumen

Este artículo presenta un análisis geotécnico aplicado al túnel de material estéril del Proyecto Mirador, empleando el método empírico de Mathews y el software Unwedge. La metodología incluyó la caracterización del macizo rocoso mediante clasificaciones geomecánicas (RQD, RMR, Q), el cálculo de parámetros de estabilidad como el número N' y el radio hidráulico (RH), y el análisis cinemático de cuñas estructurales. Los resultados del diagrama de Mathews mostraron que todas las superficies del túnel se ubican en zona estable, mientras que los modelos de cuñas con Unwedge arrojaron factores de seguridad elevados, confirmando condiciones favorables de estabilidad. Se concluye que no se requiere sostenimiento estructural, aunque se recomienda monitoreo continuo durante la ejecución. El estudio demuestra la utilidad de combinar herramientas empíricas y analíticas para el diseño de túneles en ambientes geológicos complejos.

Palabras Clave: Método de Mathews; Macizo rocoso; análisis de cuñas; estabilidad de túneles.

Abstract

Este artículo presenta un análisis geotécnico aplicado al túnel de material estéril del Proyecto Mirador, empleando el método empírico de Mathews y el software Unwedge. La metodología incluyó la caracterización del macizo rocoso mediante clasificaciones geomecánicas (RQD, RMR, Q), el cálculo de parámetros de estabilidad como el número N' y el radio hidráulico (RH), y el análisis cinemático de cuñas estructurales. Los resultados del diagrama de Mathews mostraron que todas las superficies del túnel se ubican en zona estable, mientras que los modelos de cuñas con Unwedge arrojaron factores de seguridad elevados, confirmando condiciones favorables de estabilidad. Se concluye que no se requiere sostenimiento estructural, aunque se recomienda monitoreo continuo durante la ejecución. El estudio demuestra la utilidad de combinar herramientas empíricas y analíticas para el diseño de túneles en ambientes geológicos complejos.

Keywords: Mathews method; Rock mass; Wedge analysis; Tunnel stability.

Resumo

Este artigo apresenta uma análise geotécnica aplicada ao túnel de estéril do Projeto Mirador, empregando o método empírico de Mathews e o software Unwedge. A metodologia incluiu a caracterização do maciço rochoso com recurso a classificações geomecânicas (RQD, RMR, Q), o cálculo de parâmetros de estabilidade como o N' e o raio hidráulico (RH), e a análise cinemática

de cunhas estruturais. Os resultados do diagrama de Mathews mostraram que todas as superfícies do túnel estão localizadas numa zona estável, enquanto os modelos de cunha Unwedge produziram elevados fatores de segurança, confirmando condições favoráveis de estabilidade. Conclui-se que não é necessário suporte estrutural, embora seja recomendada a monitorização contínua durante a execução. O estudo demonstra a utilidade da combinação de ferramentas empíricas e analíticas para o projeto de túneis em ambientes geológicos complexos.

Palavras-chave: Método de Mathews; Massa rochosa; Análise de cunha; Estabilidade de túnel.

Introducción

La minería subterránea moderna requiere un diseño geotécnico robusto que garantice la estabilidad de las excavaciones y la seguridad del personal y la eficiencia operativa durante todas las fases del ciclo minero. Este diseño debe basarse en una adecuada caracterización del macizo rocoso y en la selección de métodos de análisis que permitan prever comportamientos estructurales y seleccionar soluciones de sostenimiento técnicamente viables ([Hoek & Brown, 2019](#); [Brady & Brown, 2006](#)). En los últimos años, el desarrollo minero en el Ecuador ha impulsado la aplicación de herramientas técnicas avanzadas para la planificación de excavaciones subterráneas, como túneles, galerías y cámaras de producción. El Proyecto Mirador, ubicado en la provincia de Zamora Chinchipe, representa el primer yacimiento cuprífero a gran escala en operación en el país, y constituye un referente para el uso de metodologías de clase mundial en ingeniería minera.

Como parte de su infraestructura operativa, se construyó un túnel destinado al transporte de material estéril, cuya estabilidad depende directamente de las condiciones geomecánicas del terreno, caracterizado por litología ígneas intrusivas (dioritas y granodioritas), zonas de alteración hidrotermal y una alta densidad de discontinuidades estructurales. Estas características geológicas representan un reto para el diseño del sostenimiento subterráneo, dada la heterogeneidad del macizo rocoso.

Frente a este contexto, el presente artículo presenta la aplicación del método empírico de Mathews, una herramienta ampliamente utilizada en la ingeniería de túneles para estimar la estabilidad de excavaciones subterráneas en función de la calidad del macizo rocoso, el tamaño de la excavación y el tipo de uso operativo ([Mathews et al., 1981](#); [Potvin, 1988](#)).

Este método de Mathews ha sido validado a través de cientos de casos históricos en minas subterráneas y ha sido adaptado a diversos entornos geológicos, lo que lo convierte en una

herramienta clave para la toma de decisiones en el diseño de sostenimiento en túneles mineros ([Hadjigeorgiou & Potvin, 2011](#)). Su enfoque empírico, basado en la experiencia acumulada, resulta particularmente útil en condiciones donde el modelamiento numérico puede estar limitado por la escasez de datos de deformación o propiedades mecánicas precisas.

Además del análisis empírico, se complementó este trabajo con un estudio de cinemática estructural de cuñas mediante el software Unwedge, el cual permite simular en 3D el comportamiento de bloques delimitados por discontinuidades estructurales y calcular su estabilidad en función de la geometría del túnel, la orientación de las fracturas y las condiciones de fricción ([Goodman & Shi, 1985](#); [Rocscience, 2022](#)).

En síntesis, este artículo presenta un enfoque integral para el diseño geotécnico del túnel de material estéril en el Proyecto Mirador, cumpliendo con los siguientes objetivos:

- Evaluar la estabilidad del macizo rocoso, a lo largo del túnel,
- Analizar la cinemática de las discontinuidades mediante el software Unwedge

Los resultados obtenidos contribuyen al conocimiento aplicado de la ingeniería de rocas en proyectos subterráneos del Ecuador, y sirven como referencia técnica para el diseño de túneles en ambientes geológicos similares de la región andino amazónico.

- **Metodología**

- a. **Caracterización y geología local**

La caracterización geomecánica del macizo rocoso es un paso esencial en cualquier diseño subterráneo, ya que permite comprender el comportamiento estructural de la roca ante las excavaciones proyectadas. Este proceso es clave para definir la estabilidad de la excavación, estimar riesgos de inestabilidad estructural y seleccionar el tipo de sostenimiento adecuado ([Hoek & Brown, 2019](#); [Bieniawski, 1989](#)).

Para este estudio, se utilizaron datos recolectados previamente durante las campañas de mapeo geológico y geomecánico del túnel para material estéril en el Proyecto Mirador, aplicando sistemas de clasificación como el RMR y el índice Q, ampliamente utilizados en obras subterráneas mineras ([Barton et al., 1974](#); [Palmström & Broch, 2006](#)).

El túnel se encuentra excavado en rocas ígneas intrusivas, predominantemente dioritas y granodioritas, pertenecientes al batolito del Zamora, una unidad geológica extensa del sur del Ecuador relacionada con la evolución tectono-magmática de la Cordillera real ([Litherland et al., 1994](#); [Chiaradia et al., 2004](#)).

Además, se observan zonas localizadas de rocas volcánicas andesíticas, que afloran como cuerpos intercalados o diques. Estas unidades presentan una fuerte influencia tectónica, evidenciada por la presencia de múltiples planos de discontinuidad, zonas de cizalla y fracturamiento irregular ([Reyes et al., 2016](#)).

b. Clasificación geomecánica

Para valorar la calidad del macizo rocoso, se emplearon los sistemas de clasificación RQD (Rock Quality Designation), RMR (Rock Mass Rating) y Q de Barton ([Tabla 1](#)), calculados a partir de levantamientos en campo ([Bieniawski, 1989](#); [Barton et al. 1974](#)).

▪ *Parámetros característicos:*

Tabla 1. Parámetros geomecánicos

Parámetro	Valor promedio	Observaciones
RQD	26 – 100 %	Buena calidad, con tramos ligeramente alterados
RMR	45 – 65	Roca de calidad regular a buena
Q de Barton	1.04 – 6.67	Clasificación variable: tramos pobres a buenos
GSI	40 – 65	Determinado visualmente y por correlación con RMR

Las propiedades físicas y mecánicas de la roca intacta se estimaron a partir de ensayos de laboratorio previos.

- Resistencia a compresión simple (UCS): 18.57 – 216.35 MPa
- Módulo de Young estimado: 0.17 – 85.88 GPa
- Densidad: 2.6 – 2.7 g/cm³

c. Método de Mathews

El método de Mathews constituye una de las herramientas empíricas más utilizadas para el diseño geotécnico de excavaciones subterráneas en roca. Este enfoque se basa en el análisis de casos reales de excavaciones en distintos tipos de macizos rocosos, y su propósito es correlacionar la calidad del macizo, el tamaño de la excavación y las condiciones de soporte necesarias para mantener la estabilidad ([Mathews et al., 1981](#); [Potvin, 1988](#)).

El método se representa gráficamente mediante el Gráfico de Estabilidad de Mathews, en el cual se relacionan dos parámetros principales:

- Radio hidráulico (RH) y
- Índice de Soporte del Macizo Rocosó (N^o).

De acuerdo con las dimensiones del túnel se calculó el Radio Hidráulico ([Tabla 2](#)).

Tabla 2. Parámetros para determinar el radio hidráulico (RH) para las superficies del túnel

Superficie	Alto (m)	Ancho (m)	Largo (m)	Perímetro (m)	Área (m ²)	Radio Hidráulico (m)
Pared Norte	5	3	-	130	15	0.12
Pared Sur	5	3	-	130	15	0.12
Caja Techo	5	-	60	130	300	2.3
Caja Piso	5	-	60	130	300	2.3
Techo	-	3	60	130	180	1.4

Para determinar el índice de soporte del macizo rocoso (N') se obtienen los siguientes parámetros.

▪ **Índice modificado Q**

Los valores para determinar Q, en cada abscisa del túnel se indican en la [Tabla 3](#).

Tabla 3. Resultados del valor Q' para cada una de las abscisas

Abscisa	Valor Q'
0 + 060	1.04
0 + 120	2.87
0 + 180	1.73
0 + 240	6.67
0 + 300	5.56

Para determinar N', se establecen los siguientes parámetros.

▪ **Factor A esfuerzos inducidos en la roca**

Se ha considerado la profundidad de cada una de las abscisas y densidad de la roca de tipo granodiorita que es la misma en toda la zona de estudio. El esfuerzo vertical, horizontal y la relación entre estos esfuerzos se los han calculado a partir de las siguientes ecuaciones, como ejemplo se presenta para la primera abscisa (0+060).

Esfuerzo vertical

$$\sigma_v = \rho * g * h = \gamma * h$$

$$\sigma_v = 2.6 * 9.8 * 40$$

$$\sigma_v = 1019.2 \text{ KPa}$$

$$\sigma_v = 1.020 \text{ Mpa}$$

Relación de esfuerzos

$$K = 0.25 + \left[\left(7 * Em * \left(0.001 + \frac{1}{h} \right) \right) \right]$$

$$K = 0.25 + \left[\left(7 * 0.17 * \left(0.001 + \frac{1}{40} \right) \right) \right]$$

$$K = 0.28$$

$$K = 0.5$$

Esfuerzo horizontal

$$\sigma_h = K * \sigma_v$$

$$\sigma_h = 0.5 * 1.02$$

$$\sigma_h = 0.51$$

A continuación, se muestra los resultados de las variables para el cálculo del factor A en cada una de las abscisas (Tabla 4).

Tabla 4. Valores para el cálculo del factor A para cada una de las abscisas

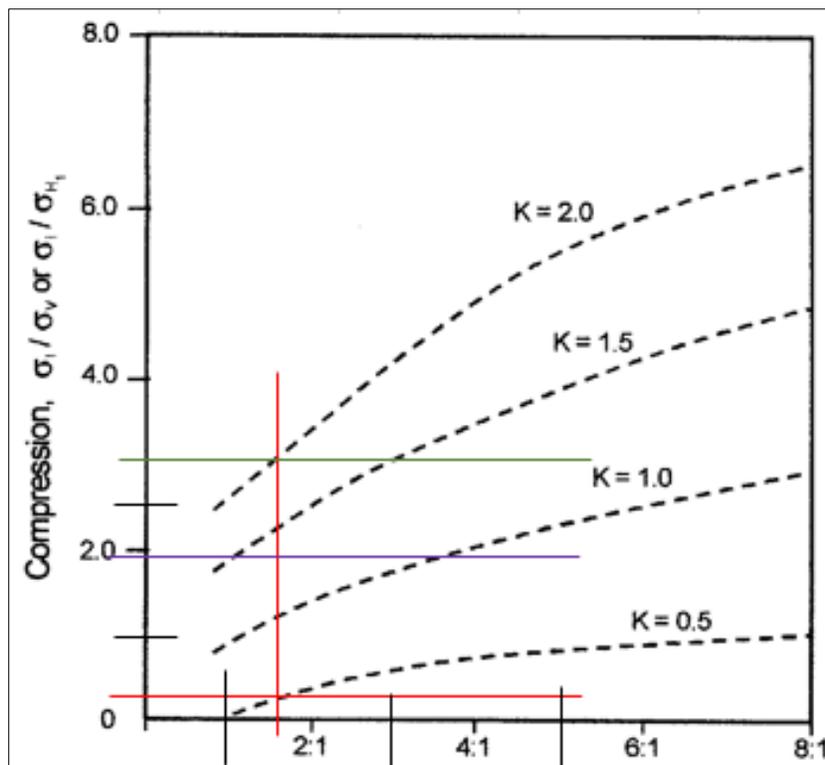
Abscisa	Profundidad (h) m	Peso específico (γ) KN/m ³	Esfuerzo vertical (σ _v) Mpa	Módulo de deformación (E _m) Gpa	Relación esfuerzo (K)	Esfuerzo horizontal (σ _h) Mpa	UCS Mpa
0 + 060	40		1.020	0.17	0.5	0.51	18.57
0 + 120	70		1.780	0.47	0.5	0.89	24.27
0 + 180	96.67		2.46	12.50	1.24	3.05	72.9
0 + 240	126.67	25.50	3.23	59.27	2.0	6.46	154.8
0 + 300	126.67		3.23	85.88	2.0	6.46	216.3

Los esfuerzos inducidos para cada superficie de las abscisas conforme se profundizan en el túnel los valores aumentan, lo que nos indica que los esfuerzos se incrementan a mayor profundidad.

Esfuerzos en el techo del túnel

Para el techo se determinan el factor A, con la relación Span/Altura (A/H) y el valor de K se estimó el valor de $\frac{\sigma_1}{\sigma_v}$ para cada una de las abscisas, utilizando la curva de ajuste para determinar la relación σ_1/σ_v (Figura 1)

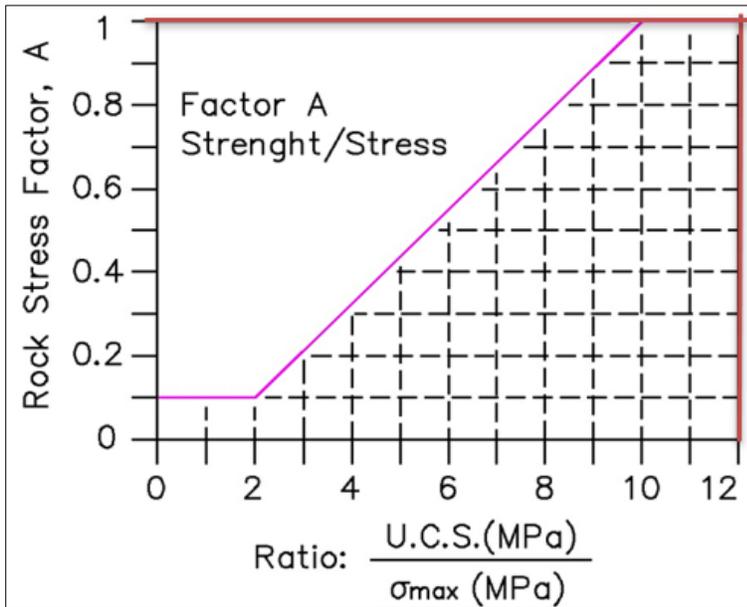
Figura 1. Curvas ajustadas y determinación de la relación σ_1/σ_v



Nota. La línea vertical ratio Span/Altura, línea roja horizontal pertenece al techo de las abscisas 0 + 60, 0 + 120; la línea morada para el techo de la abscisa 0 + 180 y la línea verde a la abscisa 0 + 240 y 0 + 300.

Por ejemplo, el σ_v es de 2.46 Mpa, por tanto, tenemos un σ_1 igual 4.89 (esfuerzo inducido). La Relación UCS/ σ_1 , para este caso es 14.89, lo llevamos a la [Figura 2](#), y se obtiene el valor del Factor A que será igual a 1.

Figura 2. Evaluación del factor A en todas las abscisas



En la [Tabla 5](#) se muestra los valores que se utilizaron para determinar el factor A.

Tabla 5. Valores para determinar en la gráfica el factor A

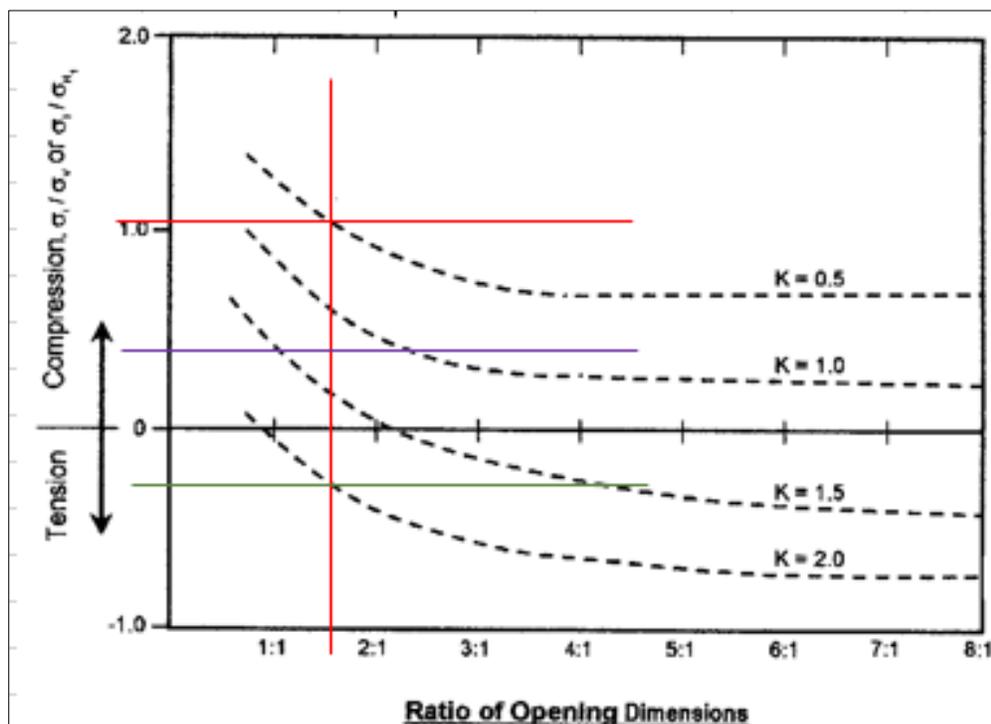
Abscisa	Altura (H)	Ancho (A)	Relación H/A	Relación figura (σ_1/σ_v)	Esfuerzo inducido (σ_1)	UCS/σ_1	FACTOR A
0 + 060				0.2	0.20	91.03	1
0 + 120				0.2	0.36	68.17	1
0 + 180	5	3	1.7	1.99	4.89	14.89	1
0 + 240				3.0	9.69	15.98	1
0 + 300				3.0	9.69	22.33	1

▪ *Esfuerzos inducidos en backs (espalda) (Pared Norte y Sur)*

En cada abscisa se considera un plano vertical que corta transversalmente la galería. Con una ratio Span/Altura (5m/3m) y un valor de K igual a 1.24, se estimó el valor de $\frac{\sigma_1}{\sigma_v}$ de acuerdo a la [Figura](#)

3

Figura 3. Determinación de la relación σ_1/σ_v a lo largo de la vertical



Nota. Abscisa 0 + 060 (rojo), abscisa 0 + 120 (rojo), abscisa 0 + 180 (morado), abscisa 0 + 240 (verde), abscisa 0 + 300 (verde).

En la siguiente [Tabla 6](#) se muestra los valores para determinar el factor A. Las tres primeras abscisas se consideró un factor igual a 1 ya que la relación UCS/σ_1 es mayor a 12 y para las dos últimas abscisas se determinó un factor de 0.1 por que la relación UCS/σ_1 es menor a 2.

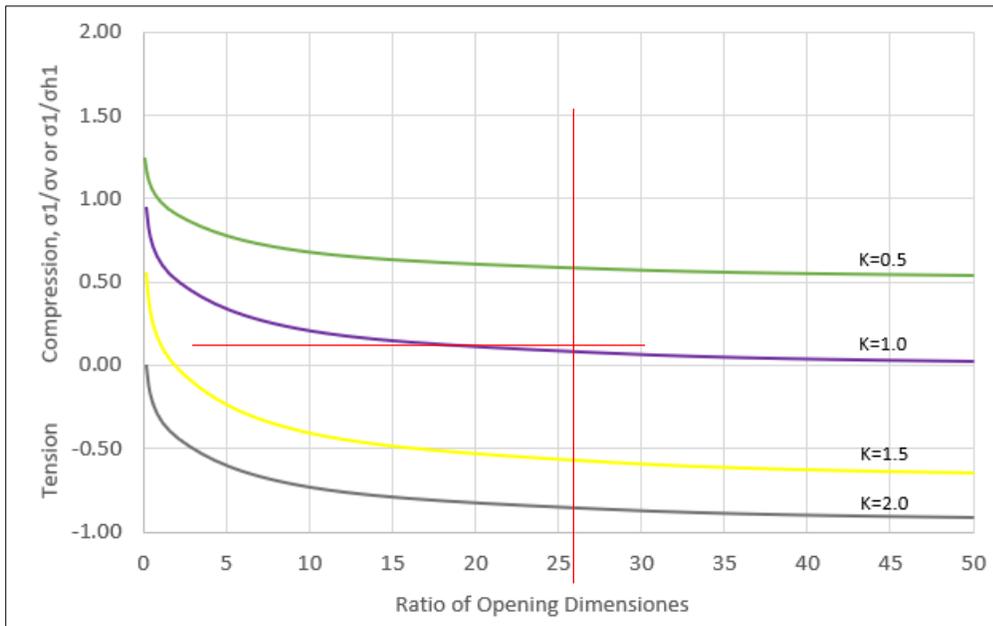
Tabla 6. Valores para determinar el factor A en la gráfica

Abscisa	Altura (H)	Ancho (A)	Relación H/A	Relación figura (σ_1/σ_v)	Esfuerzo inducido (σ_1)	UCS/σ_1	FACTOR A
0 + 060				1.10	1.1	16.55	1
0 + 120				1.10	2.0	12.40	1
0 + 180	5	3	1.7	0.3	0.7	98.79	1
0 + 240				-0.3	-1.0	-159.77	0.1
0 + 300				-0.3	-1.0	-223.27	0.1

A lo largo de la horizontal

Se considera un plano vertical para cada abscisa que es longitudinal a la galería. Con una ratio Span/Altura (60m/3m) y un valor de K igual a 1, obtenido de la relación $\sigma_{h1} / \sigma_{h2}$ (3.05/3.05) se estimó el valor de $\frac{\sigma_1}{\sigma_{h1}}$ de 0.10 (Figura 4) este valor corresponde para la abscisa 0+180.

Figura 4. Curvas ajustadas y determinación de la relación σ_1/σ_2 a lo largo de la horizontal



La gráfica para todas las abscisas es la misma ya que su ratio es igual a 20 y la relación de esfuerzos igual a 1. En la Tabla 7 se muestra los valores que se utilizaron para determinar el factor A.

Tabla 7. Valores para determinar el factor A en la gráfica

Abscisa	Largo (L)	Ancho (A)	Relación L/A	Relación figura (σ_1/σ_v)	Esfuerzo inducido (σ_1)	UCS / σ_1	FACTOR A
0 + 060				0.10	0.05	364.12	1
0 + 120				0.10	0.09	272.70	1
0 + 180	60	3	20	0.10	0.31	239.02	1
0 + 240				0.10	0.65	239.66	1
0 + 300				0.10	0.64	336.47	1

El análisis para la caja techo y caja piso el factor A igual a 1 tanto en la horizontal como vertical, ya que la relación de UCS/σ_1 es mayor a 12. En la [Tabla 8](#) se indica los valores del factor A para cada una de las superficies de cada abscisa.

Tabla 8. Valores de factor A para cada superficie de abscisa

Abscisa	Factor A para las superficies			
	Techo	Pared Norte y Sur	Caja Techo	Caja Piso
0 + 060	1	0.94	1	1
0 + 120	1	0.69	1	1
0 + 180	1	0.6	1	1
0 + 240	1	0.6	0.1	1
0 + 300	1	0.88	0.1	1

▪ *Factor B de ajuste por orientación de estructuras*

Se considera los valores estructurales de las discontinuidades para cada abscisa tanto para techo, pared, caja techo y caja piso ([Tabla 9](#))

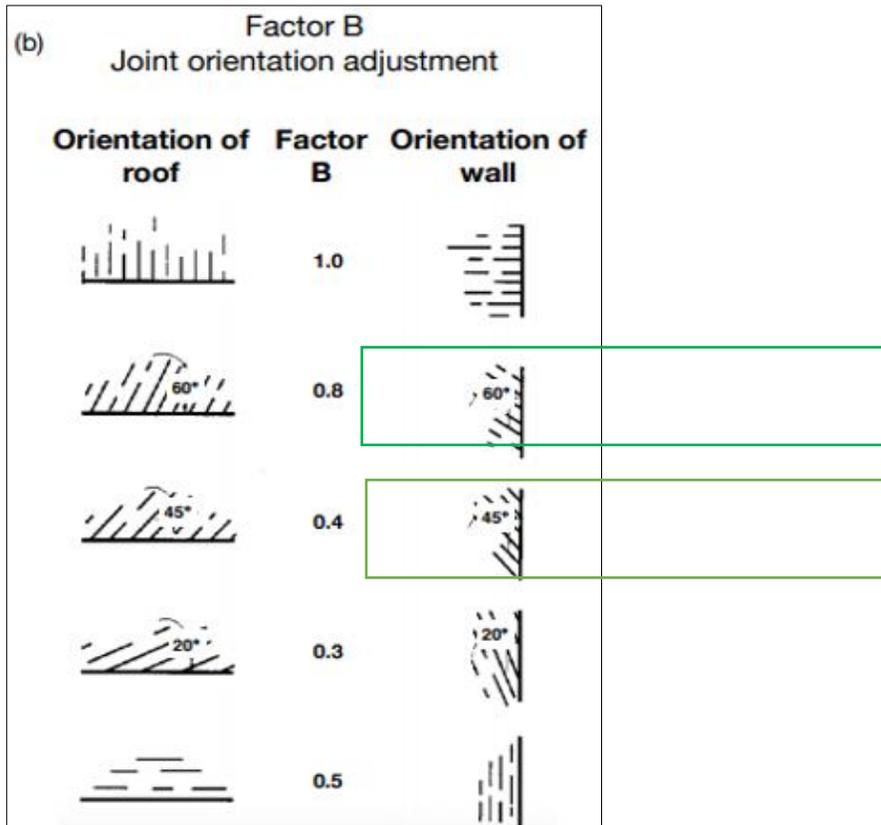
Tabla 9. Ángulos de cada superficie de las abscisas

Abscisa	Ángulo α (°)			
	Techo	Pared Norte y Sur	Caja Techo	Caja Piso
0 + 060	45	46.32	43.68	43.68
0 + 120	60	11	79	79
0 + 180	60	28	62	62
0 + 240	60	15	75	75
0 + 300	60	20	70	70

Utilizando el ábaco de [Potvin et al. \(1988\)](#), se determinó el valor para el factor B del techo, de acuerdo con los ángulos de las discontinuidades que se observan en el techo de las galerías.

El factor B de 0.8 corresponde para el techo de las abscisas 0 + 120, 0 + 180, 0 + 240 y 0 + 360; el valor factor B igual a 0.4 corresponde para la abscisa 0 + 60 ([Figura 5](#)).

Figura 5. Valor de ángulo y factor B para Techo para todas las abscisas



Nota. Abscisa 0 + 60 (naranja), abscisas 0 + 120, 0 + 180, 0 + 240 y 0 + 300 (verde)

Los valores de los ángulos (Dip) que se indican en la [Tabla 9](#), son representados en las [Figuras 6](#), [7](#), [8](#), [9](#) y [10](#), para obtener los valores del factor B para cada superficie; techo, caja techo, caja piso, pardes norte y sur que son mostrados en la [Tabla 10](#).

Figura 6. Evaluación del factor B para cada una de las superficies de la abscisa 0 + 060

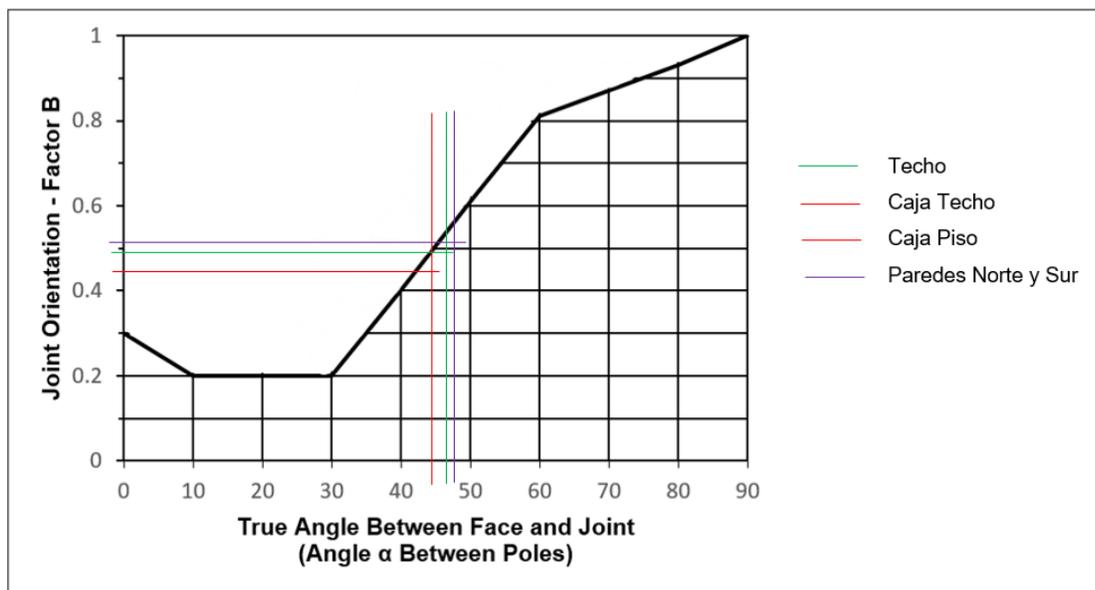


Figura 7. Evaluación del factor B para cada una de las superficies de la abscisa 0 + 120

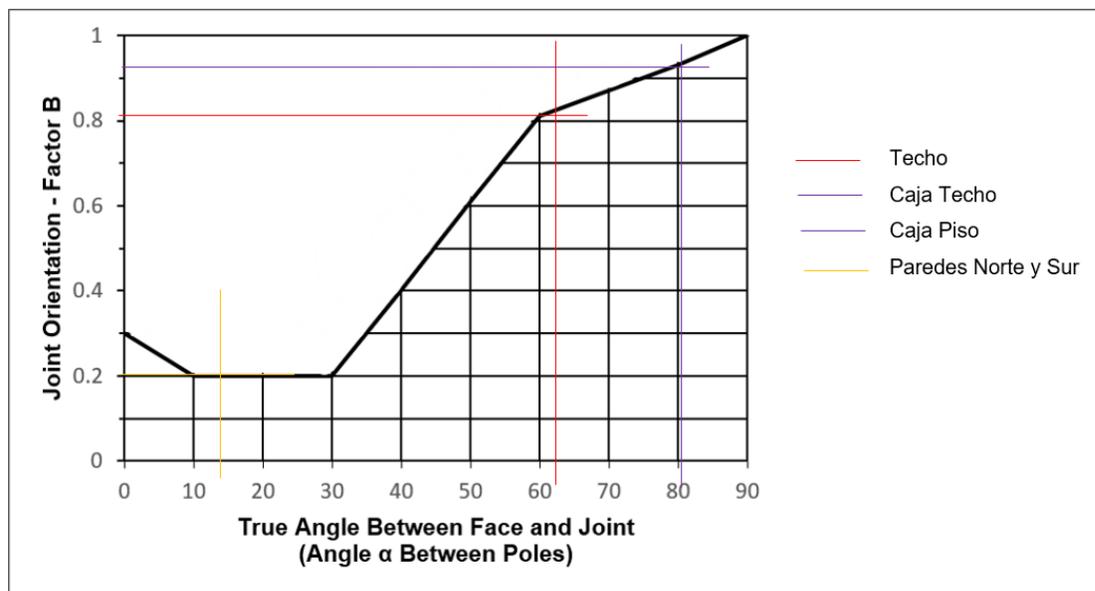


Figura 8. Evaluación del factor B para cada una de las superficies de la abscisa 0 + 180

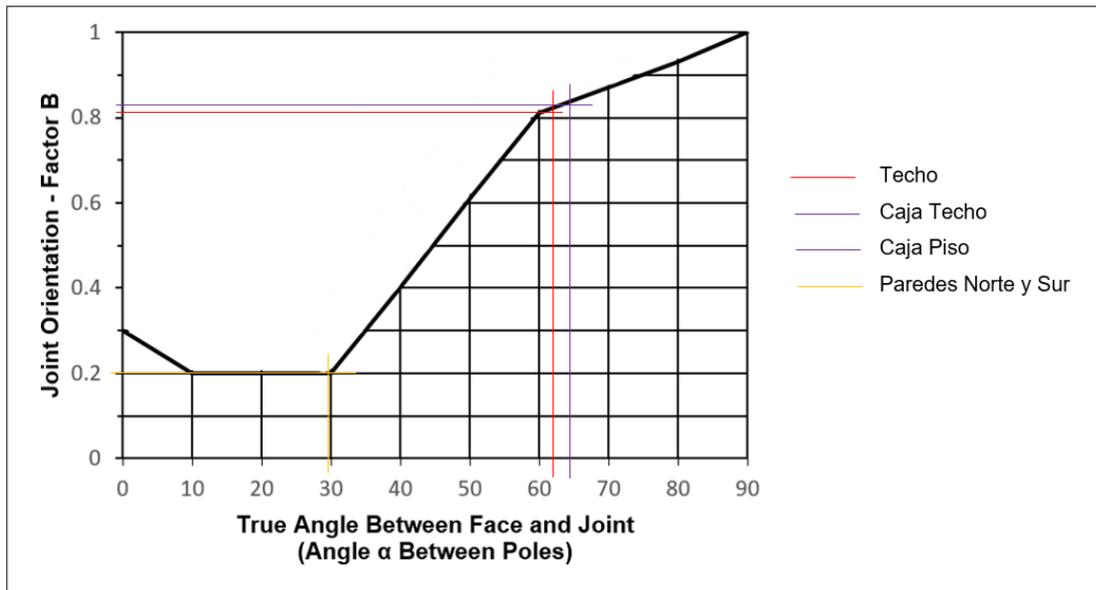


Figura 9. Evaluación del factor B para cada una de las superficies de la abscisa 0 + 240

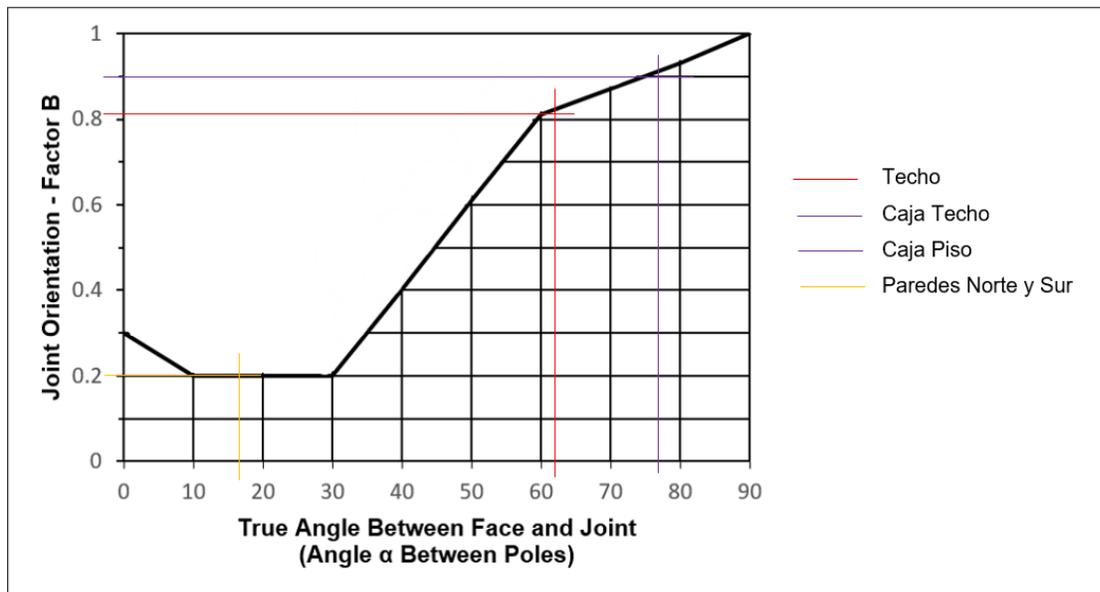


Figura 10. Evaluación del factor B para cada una de las superficies de la abscisa 0 + 300

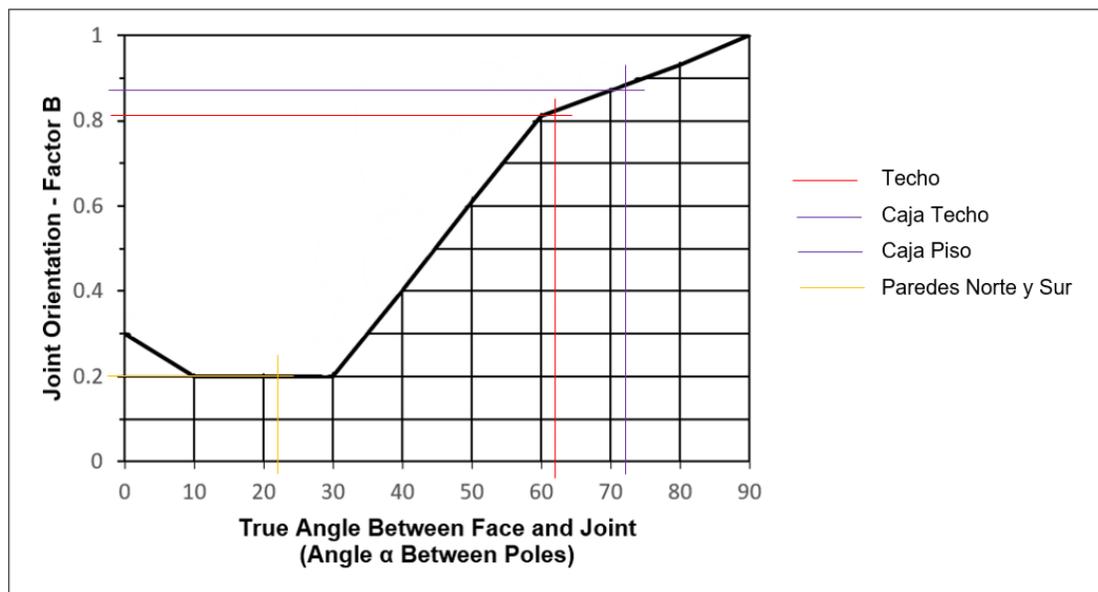


Tabla 10. Valores para el factor B

Abscisa	Factor B			
	Techo	Pared Norte y Sur	Caja Techo	Caja Piso
0 + 060	0.50	0.52	0.45	0.45
0 + 120	0.80	0.20	0.92	0.92
0 + 180	0.80	0.20	0.82	0.82
0 + 240	0.80	0.20	0.90	0.90
0 + 300	0.80	0.20	0.88	0.88

Factor C, gravitacional

Para el factor C se utilizó el ábaco de evaluación de factor C (Figura 11), y el “Dip of stope fase (θ)” que resulta de restar 90° a los ángulos (Dip) que establece la Tabla 9. El valor que se obtiene en la gráfica es también comprobado con la ecuación.

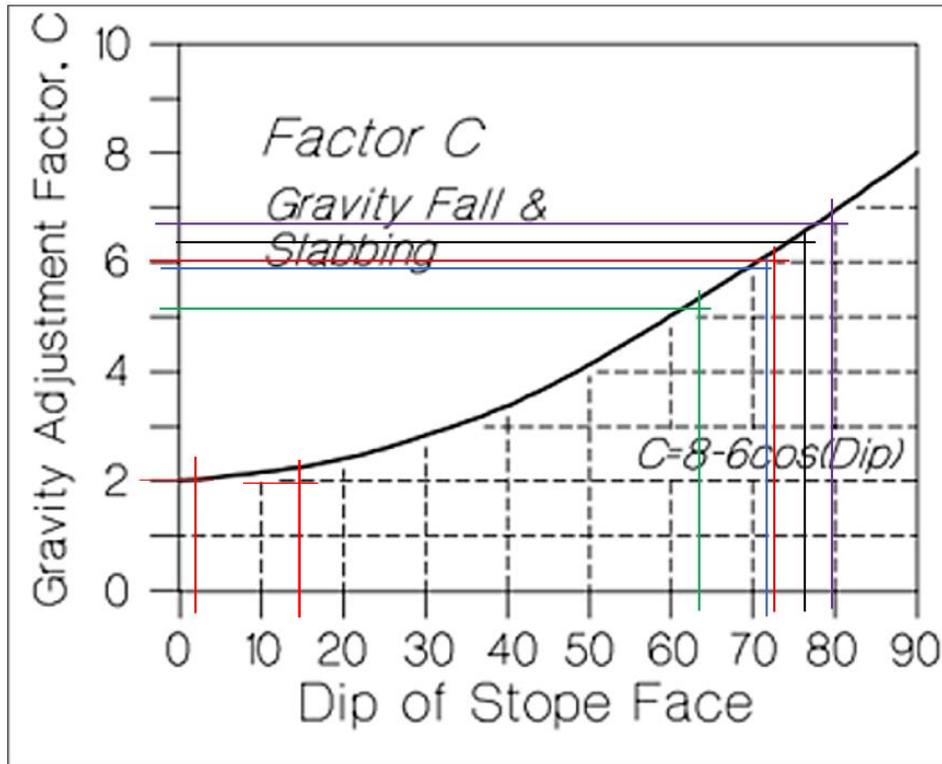
$$C = 8 - 6 * \cos\theta$$

Para la pared Norte y Sur en la abscisa 0 + 180 se tiene un ángulo de 28° (Tabla 9), restando los 90°, se tiene un “Dip stope face (θ)” igual a 62°, este valor al llevar a la Figura 11, da un factor C de 5.2. Si comprobamos con la ecuación, el factor C es igual a 5.18.

$$C = 8 - 6 * \cos62^\circ$$

$$C = 5.18$$

Figura 11. Evaluación de factor C en superficies de las abscisas



Nota. Abscisa 0 + 060 (rojo, Caja Techo – Caja Piso – Pared Norte y Sur), abscisa 0 + 120 (morado), abscisa 0 + 180 (verde), abscisa 0 + 240 (negro), abscisa 0 + 300 (azul).

En la [Tabla 11](#) se muestran los valores para el factor C, para cada una de las abscisas y para las diferentes superficies de la galería.

Tabla 11. Valor del factor C para cada una de las abscisas

Abscisa	Factor C			
	Techo	Pared Norte y Sur	Caja Techo	Caja Piso
0 + 060	2	6.04	6.04	6.04
0 + 120	2	6.8	6.8	6.8
0 + 180	2	5.2	5.2	5.2
0 + 240	2	6.4	6.4	6.4
0 + 300	2	6	6	6

Diagrama de Mathews

En el diagrama de Mathews, el valor de N' (número de estabilidad) se grafica en el eje vertical y el RH (radio hidráulico) en el eje horizontal. Esto permite ubicar si el punto analizado se encuentra en zona estable o zona de hundimiento.

Con los parámetros obtenidos que se muestran en la [Tabla 12](#), se calculó el número de estabilidad “N” para todas las abscisas.

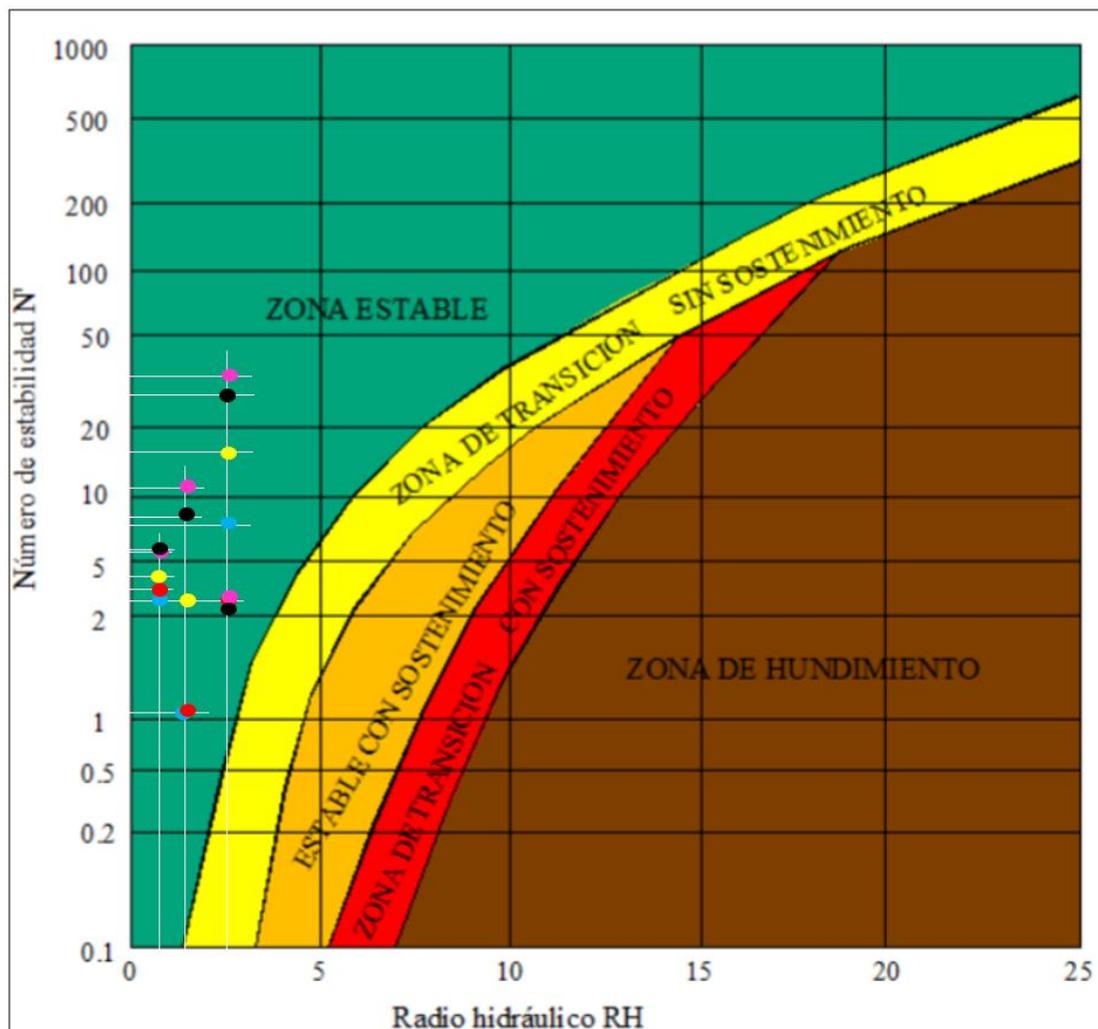
Tabla 12. Valores para el cálculo del Número de estabilidad (N')

Abscisa	Superficie	Q'	Factor A	Factor B	Factor C	Número Estabilidad
0 + 060	Techo	1.04	1	0.50	2	1.04
	Pared N – S		0.94	0.52	6.04	3.07
	Caja Techo		1	0.45	6.04	2.8
	Caja Piso		1	0.45	6.04	2.8
0 + 120	Techo	2.87	1	0.80	2	4.59
	Pared N – S		0.69	0.20	6.8	2.69
	Caja Techo		1	0.92	6.8	18.0
	Caja Piso		1	0.92	6.8	18.0
0 + 180	Techo	1.73	1	0.80	2	2.77
	Pared N – S		0.6	0.20	5.2	1.08
	Caja Techo		1	0.82	5.2	7.4
	Caja Piso		1	0.82	5.2	7.4
0 + 240	Techo	6.67	1	0.80	2	10.7
	Pared N – S		0.6	0.20	6.4	5.12
	Caja Techo		0.1	0.90	6.4	3.8
	Caja Piso		1	0.90	6.4	3.8
0 + 300	Techo	5.56	1	0.80	2	8.9
	Pared N – S		0.88	0.20	6	5.87
	Caja Techo		0.1	0.88	6	2.9
	Caja Piso		1	0.88	6	2.9

Con los valores del Radio Hidráulico (RH) y número de estabilidad (N') que se indican en la [Tabla 13](#), se procedió a determinar la estabilidad utilizando el Gráfico de Estabilidad de Mathwes ([Figura 12](#)) para las diferentes superficies de las abscisas que involucra la galería en estudio.

Tabla 13. Valores del Radio Hidráulico y Número de Estabilidad para la gráfica de Mathwes

Abscisa	Superficie	Radio Hidráulico	Número Estabilidad
0 + 060	Techo	1.4	1.04
	Pared Norte – Sur	0.12	3.07
	Caja Techo – Caja Piso	2.3	2.8
0 + 120	Techo	1.4	4.59
	Pared Norte – Sur	0.12	2.69
	Caja Techo – Caja Piso	2.3	18.0
0 + 180	Techo	1.4	2.77
	Pared Norte – Sur	0.12	1.08
	Caja Techo – Caja Piso	2.3	7.4
0 + 240	Techo	1.4	10.7
	Pared Norte – Sur	0.12	5.12
	Caja Techo	2.3	3.8
	Caja Piso	2.3	38.42
0 + 300	Techo	1.4	8.9
	Pared Norte – Sur	0.12	5.87
	Caja Techo	2.3	2.9
	Caja Piso	2.3	29.35

Figura 12. Análisis de estabilidad para cada una de las superficies de abscisas

Nota. La abscisa 0 + 060 se la muestra con puntos rojos, abscisa 0 + 120 (amarillo), abscisa 0 + 180 (azul), abscisa 0 + 240 (rosado), abscisa 0 + 300 (negro).

Según los cálculos, el punto de diseño del túnel se ubicó en la zona estable, lo que indica que el macizo rocoso no requiere sostenimiento adicional para mantener la estabilidad.

d. Análisis de estabilidad cinemática con Unwedge

El análisis de estabilidad cinemática en túneles permite identificar posibles mecanismos de falla asociados a las discontinuidades del macizo rocoso. En este estudio se utilizó el software Unwedge, desarrollado por Rocscience ([Rocscience, 2022](#)), para modelar la formación de cuñas potencialmente inestables en el túnel.

Este tipo de análisis es crucial cuando las excavaciones se desarrollan en macizos con múltiples sistemas de discontinuidades, ya que permite visualizar cómo interactúan los planos estructurales con la geometría del túnel y estimar el Factor de Seguridad (FS) de cada cuña potencial.

Datos estructurales utilizados

Para el modelamiento, se ingresaron las orientaciones de las tres familias principales de discontinuidades ([Tabla 14](#)) identificadas en el mapeo geológico-geomecánico del túnel:

Tabla 14. Familias de discontinuidades para el software Unwedge

Sistema de Discontinuidades Principales			
Abscisa	Familia	Dip	Dip Direction
0 + 060	1	83	285
	2	62	320
	3	68	162
0 + 120	1	79	270
	2	63	308
	3	79	269
0 + 180	1	62	295
	2	70	165
	3	90	200
0 + 240	1	75	250
	2	63	308
	3	70	165
0 + 300	1	70	165
	2	79	269
	3	90	200

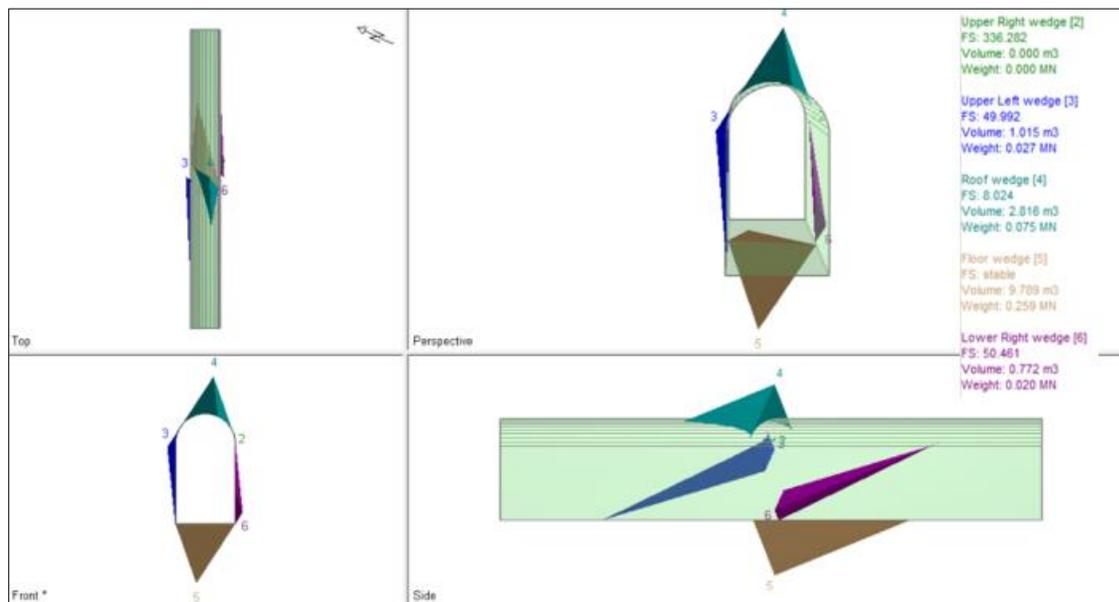
Se asumió una orientación del túnel aproximada de N50°E, con una inclinación horizontal, lo que permitió establecer la interacción angular entre las discontinuidades y el frente de excavación.

Resultados del modelamiento con Unwedge

▪ *Abscisa 0 + 060*

En la [Figura 13](#) se puede ver la formación de 5 cuñas denominadas: 2, 3, 4, 5 y 6. La cuña 4 (techo) presenta un factor de seguridad de 8.024, la cuña 6 (hastial derecho) con un factor de seguridad de 52.41, el resto de las cuñas presentan un factor de seguridad alto, por lo cual muestran estabilidad en el túnel.

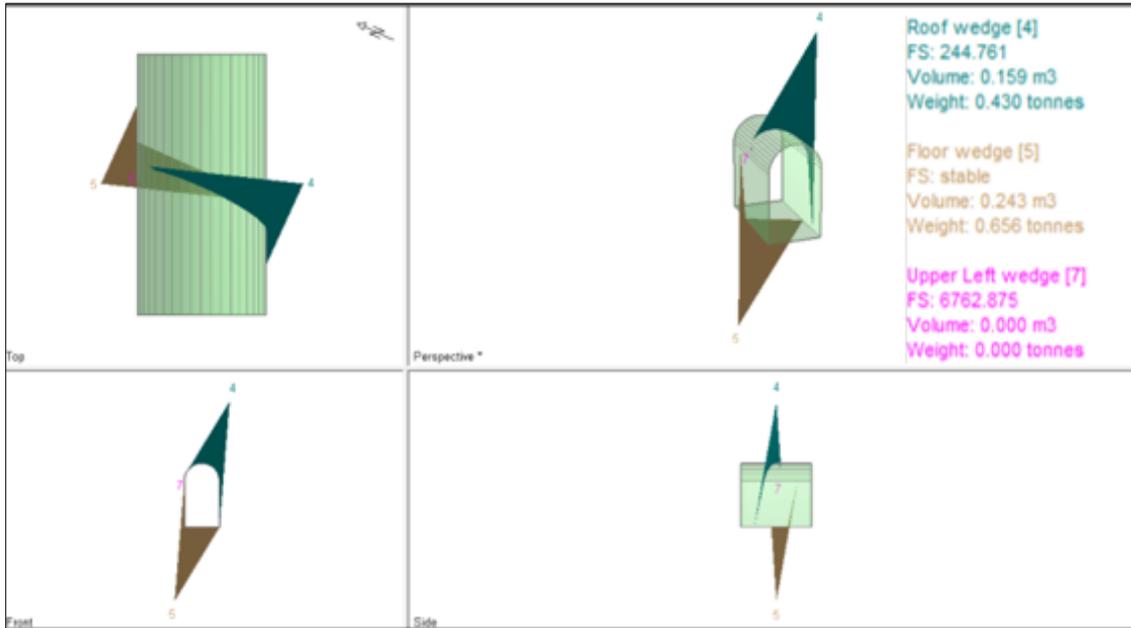
Figura 13. Modelamiento cinemático de las discontinuidades de la abscisa 0 + 060



▪ *Abscisa 0 + 120*

Para la abscisa 0+120 se puede ver la formación de 3 cuñas denominadas: 4, 5 y 7. La cuña 4 (techo) presenta un factor de seguridad de 244.761 ([Figura 14](#)), calculado a partir de los datos de cohesión (0.497 Mpa) y ángulo de fricción (42.61) según el criterio de Mohr – Coulomb, presenta un factor de seguridad alto, ya que su volumen es inferior en comparación con las demás cuñas, por lo tanto, muestran estabilidad en el túnel.

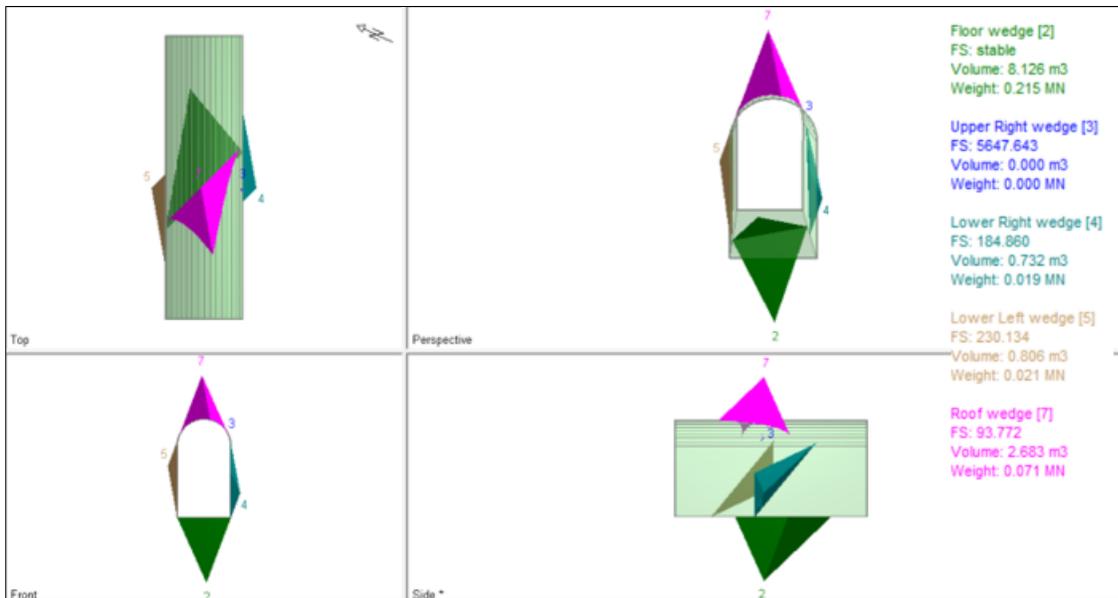
Figura 14. Modelamiento cinemático de las discontinuidades de la abscisa 0 + 120



▪ **Abscisa 0 + 180**

En la [Figura 15](#) se puede ver la formación de 5 cuñas denominadas: 2, 3, 4, 5 y 7. La cuña 7 (techo) presenta un factor de seguridad de 93.772, la cuña 5 (hastial izquierdo) con un factor de seguridad de 230.134, estos valores se dan por su bajo volumen que poseen, el resto de las cuñas muestran un factor de seguridad alto.

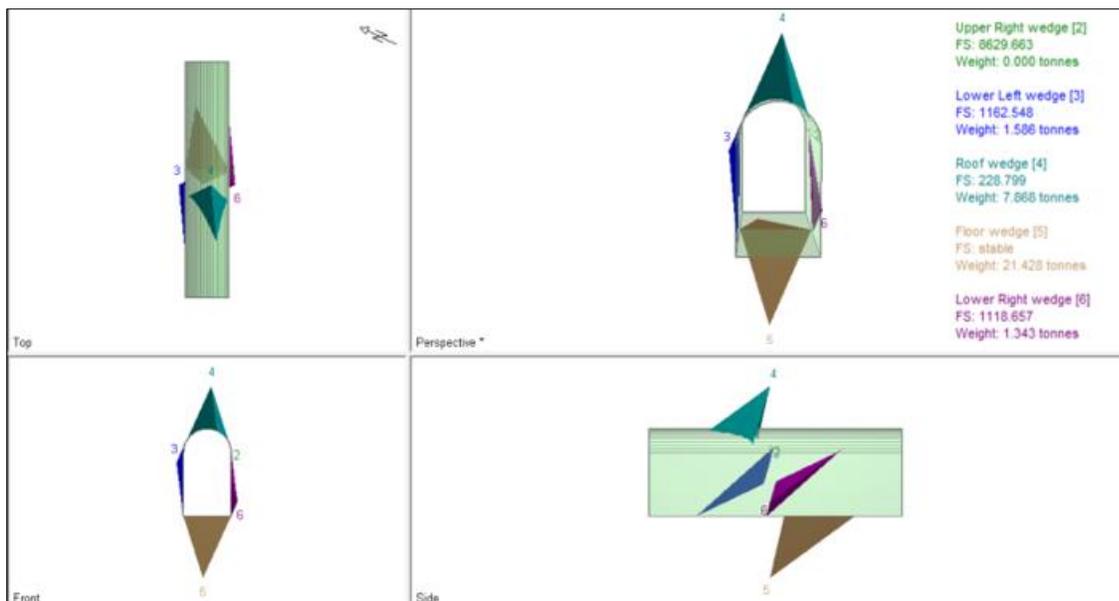
Figura 15. Modelamiento cinemático de las discontinuidades de la abscisa 0 + 180



▪ **Abscisa 0 + 240**

En la [Figura 16](#) se puede ver la formación de 5 cuñas denominadas: 2, 3, 4, 5 y 6. La cuña 4 (techo) presenta un factor de seguridad de 228.77, la cuña 5 (piso) con un factor de seguridad estable, el resto de las cuñas muestran un factor de seguridad alto.

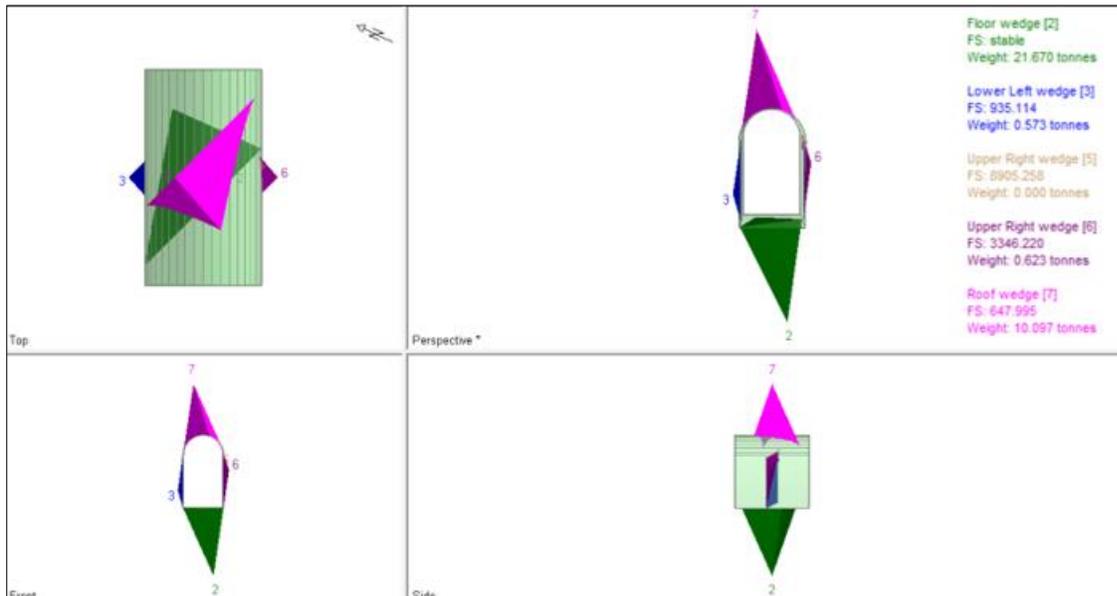
Figura 16. Modelamiento cinemático de las discontinuidades de la abscisa 0 + 240



▪ **Abscisa 0 + 300**

En la [Figura 17](#) se puede ver la formación de 5 cuñas denominadas: 2, 3, 4, 5 y 7. La cuña 2 (piso) presenta un factor de seguridad estable, la cuña 3, 5, 6 y 7 presentan factores de seguridad altos.

Figura 17. Modelamiento cinemático de las discontinuidades de la abscisa 0 + 300



Conclusiones

A partir del análisis geomecánico del túnel para material estéril del Proyecto Mirador, se concluye que el macizo rocoso presenta condiciones estructurales que permiten la excavación sin requerir sostenimiento adicional. Los valores del índice Q y la caracterización litológica (granodioritas del Batolito de Zamora) indican una roca competente, mientras que el análisis de esfuerzos muestra un comportamiento mecánico estable con aumento gradual del UCS y los esfuerzos con la profundidad.

El método de Mathews, aplicado mediante el cálculo de los factores A, B y C, permitió determinar que las abscisas evaluadas se ubican en la zona estable del gráfico de estabilidad, lo cual coincide con los resultados obtenidos mediante el software Unwedge, donde las cuñas modeladas mostraron factores de seguridad elevados. Esta consistencia metodológica fortalece la confiabilidad del diseño.

Finalmente, se recomienda implementar un plan de monitoreo geotécnico durante la ejecución de la excavación, que permita ajustar las medidas de sostenimiento en caso de cambios no previstos en las condiciones del macizo. El enfoque metodológico utilizado en este trabajo puede replicarse en otros proyectos mineros subterráneos de características similares en Ecuador

Referencias

- Barton, N., Lien, R., & Lunde, J. (1974). Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 6(4), 189–236.
- Bieniawski, Z. T. (1989). *Engineering rock mass classifications: A complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering*. Wiley.
- Brady, B. H. G., & Brown, E. T. (2006). *Rock mechanics for underground mining* (3rd ed.). Springer.
- Chiaradia, M., Fontboté, L., & Beate, B. (2004). Cenozoic continental arc magmatism and associated mineralization in Ecuador. *Mineralium Deposita*, 39(2), 204–222. <https://doi.org/10.1007/s00126-004-0399-4>
- Goodman, R. E., & Shi, G. H. (1985). *Block theory and its application to rock engineering*. Prentice-Hall.
- Hadjigeorgiou, J., & Potvin, Y. (2011). Empirical design methods in mining. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 48(3), 537–547.
- Hoek, E., & Brown, E. T. (2019). *The Hoek–Brown failure criterion and GSI – 2019 edition*. Rocscience.
- Hoek, E., Carranza-Torres, C., & Corkum, B. (2000). *Support of underground excavations in hard rock*. Balkema.
- Litherland, M., Aspden, J. A., & Jemielita, R. A. (1994). *The metamorphic belts of Ecuador*. British Geological Survey Overseas Memoir No. 11.
- Mathews, K. E., Hoek, E., Wyllie, D. C., & Stewart, S. B. V. (1981). Prediction of stable excavation spans for mining at depths below 1000 meters in hard rock. *CANMET Report 0-TR-79*.
- Palmström, A., & Broch, E. (2006). Use and misuse of rock mass classification systems with particular reference to the Q-system. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 21(6), 575–593.
- Potvin, Y. (1988). *Empirical open stope design in Canada*. Ph.D. Thesis, University of British Columbia.
- Reyes, C., Almeida, W., & Cueva, J. (2016). Caracterización estructural y petrografía del Batolito de Zamora: implicaciones geomecánicas para proyectos mineros. *Revista Técnica de Geociencias del Ecuador*, 2(1), 35–48.

Rocscience Inc. (2022). Unwedge: 3D Wedge Stability Analysis for Tunnels and Slopes. User Manual. Toronto, Canada.

© 2025 por los autores. Este artículo es de acceso abierto y distribuido según los términos y condiciones de la licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).