

Previsión del volumen de caída de rocas en un talud crítico en Mendoza, Argentina

J.P. Ibañez

juan.pablo.ibanez@ingenieria.uncuyo.edu.ar

Área Geotecnia - Instituto IMERIS, Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Cuyo, Centro Universitario (M5502KFA), Mendoza, Argentina

RESUMEN: La ruta internacional N°7 conecta la provincia de Mendoza con la región central de Chile, incluyendo su capital, Santiago. Esta conexión, estratégica para la región, hace posible el flujo comercial con el Océano Pacífico. Su traza cruza la cordillera de los Andes, abriéndose paso entre las montañas y el estrecho valle del río Mendoza. Muchos eventos de caída de rocas se han sucedido en diferentes taludes laterales críticos en precordillera y alta montaña, inducidos por acción sísmica o más generalmente durante periodos lluviosos. Estos eventos producen muchas veces fatalidades y daños económicos, al interrumpir el tránsito durante horas e incluso días. En el presente trabajo se analiza un talud crítico situado en el área del túnel No. 3, la cual ha experimentado cerca de 20 eventos de inestabilidad registrados. A partir del relevamiento de información disponible sobre el talud, se propone un modelo geomecánico del mismo. Para el análisis de inestabilidad se utiliza el método numérico Discrete Deformation Analysis (DDA), que realiza análisis dinámico de sistemas discretos de bloques. Como resultado del análisis se obtiene una previsión del volumen de roca movilizado esperable en un futuro evento, y sus consecuencias para el normal tránsito de la ruta.

Palabras clave: TALUDES, CÁIDA DE ROCAS, RESISTENCIA AL CORTE, DDA, MODELADO DISCRETO

1 INTRODUCCIÓN

La ruta internacional N°7 es parte del corredor bioceánico que conecta la Ciudad Autónoma de Buenos Aires hasta el límite con Chile, atravesando cinco provincias del centro del país. Se trata de una vía de alto valor estratégico y fundamental para el transporte de cargas internacional, pues vincula los países del Mercosur con los puertos del pacífico en la región central de Chile a través del Paso Internacional Cristo Redentor. Su traza en la provincia de Mendoza atraviesa la precordillera y cordillera de los Andes por el valle del río Mendoza, abriéndose paso entre el río y los cordones montañosos así como lo hace la traza del hoy inactivo tren trasandino. La topografía accidentada y compleja hizo necesaria la realización de numerosas obras de ingeniería, incluidos túneles, cobertizos y perfilados de taludes en roca.

Numerosos eventos de caídas de rocas y otras formas de inestabilidad de taludes han tenido lugar en diversas laderas a lo largo de la ruta. A partir de la relativamente escasa información histórica de estas áreas remotas, se pudieron recopilar unos 361 eventos históricos hasta 2009, a partir de periódicos locales, reportes del ferrocarril transandino, informes de la Dirección Nacional de Vialidad y diarios de antiguos viajeros. Estos eventos corresponden a caídas de bloques y flujos de detritos que han causado diversos daños económicos y lamentables fatalidades, siendo provocados por lluvias prolongadas o acción sísmica, y por variación térmica en menor medida [1][2][3][4].

La figura 1 muestra algunos registros fotográficos de tales eventos históricos, ilustrando el impacto de los mismos sobre el camino.

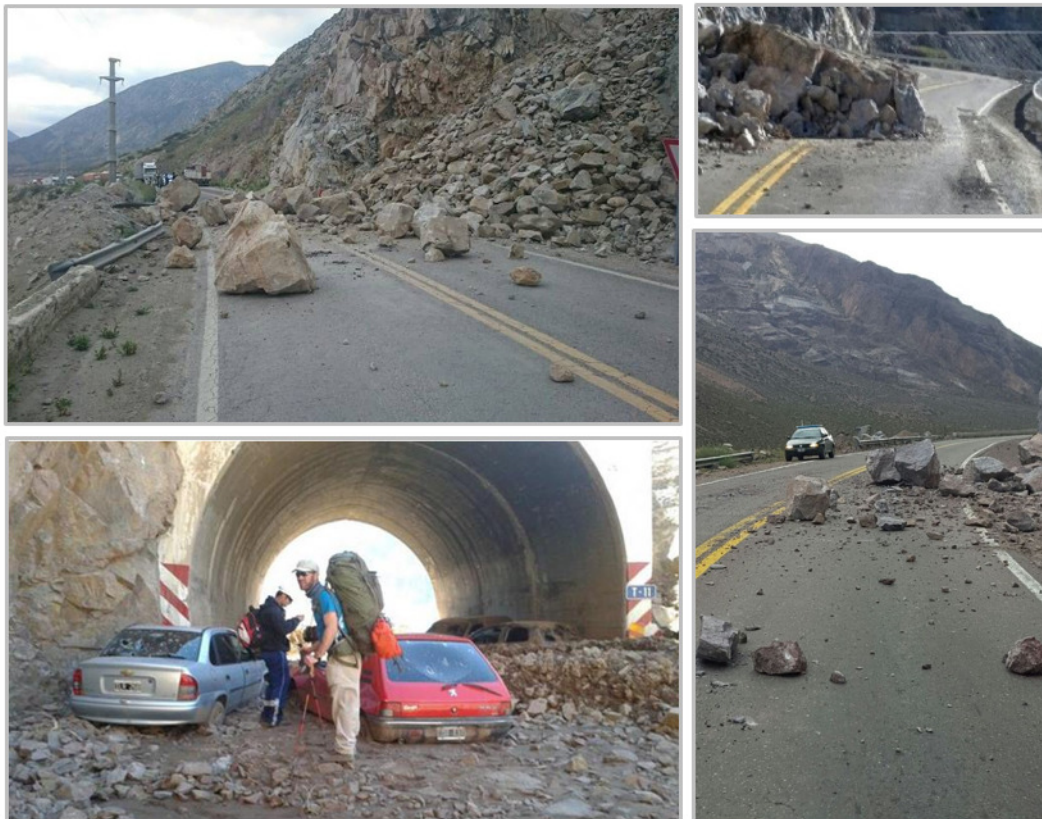


Fig 1. Diversos eventos históricos de caída de rocas sobre la ruta internacional N°7 en la región de Alta Montaña en la provincia de Mendoza, Argentina.

En el presente trabajo se lleva a cabo una previsión de caída de rocas en un futuro evento de inestabilidad en uno de los puntos críticos de la traza, el área en torno al túnel N° 3. A partir de la información geológica regional y de una inspección al área de estudio, se establece un modelo geomecánico para el talud de la boca oeste del túnel N°3. El talud se modela numéricamente mediante Análisis de Deformación Discontinua (DDA), método que permite la discretización del macizo rocoso con sus discontinuidades para un análisis estático o dinámico, aplicando leyes de comportamiento friccional avanzadas. Se plantean distintos escenarios y condiciones para el talud, a fin de cubrir las incertidumbres del modelo geomecánico. Los resultados permiten obtener una cuantificación aproximada del volumen de roca que sería movilizado en un futuro evento de inestabilidad, y su impacto sobre las condiciones de transitabilidad de la ruta internacional N°7.

2 CAÍDA DE ROCAS EN EL ÁREA DE LOS TÚNELES N°2 Y N°3

Ciertos sectores de la traza de la ruta internacional N°7 en precordillera y alta montaña son puntualmente más susceptibles a la ocurrencia de eventos de inestabilidad de los taludes laterales. Uno de esos puntos es el área en torno a los túneles N°2 y N°3, dos túneles cortos separados entre sí unos doscientos metros, que se ubican a la altura del km 1222. Allí, más de 40 eventos han sido reportados a lo largo de las últimas décadas, con un intervalo de recurrencia de 1.2 años [3] (ver figura 2).



Fig 2. Vista satelital del área de ubicación del Túnel N°2 y N°3 y de la boca oeste donde se sitúa el talud a ser estudiado (Fuente: Google Maps).

Un sector especialmente susceptible es el sector de la boca oeste del túnel N°3. En este sitio, en 1983 por ejemplo, se produjo una caída de rocas que incluyó la de un bloque de 4 Ton. Pero los episodios más recientes ocurrieron en 1992, 2001 and 2011. Las figuras 3 y 4 muestran imágenes de los últimos dos episodios que involucraron cortes de la circulación durante varias horas, daños al pavimento y banquetas, vehículos destrozados, heridos y un fallecido. Dada la alta recurrencia de episodios en esta zona específica, se eligió al talud de roca situado inmediatamente a la boca oeste del túnel N°3 para el estudio numérico de previsión de volumen de roca susceptible de ser movilizado en un futuro evento.

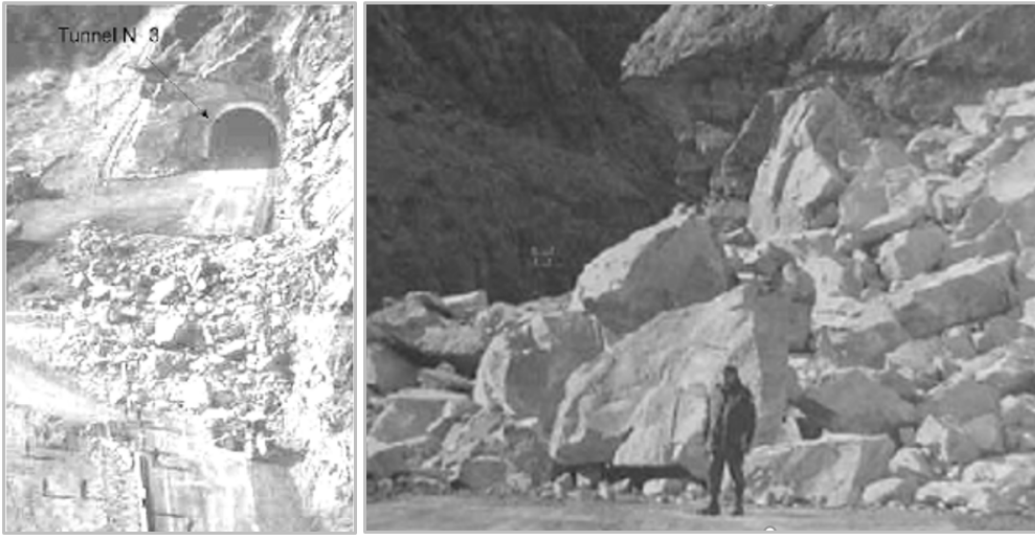


Fig 3. Caída de rocas sobre la boca oeste del túnel N°3 de la ruta internacional N°7 el 19/07/2001. Por efecto de intensas lluvias, más de 800m³ de roca y detritos irrumpieron en el túnel interrumpiendo el tránsito durante 2 días.



Fig 4. Caída de rocas sobre la boca oeste del túnel N°3 de la ruta internacional N°7 el 14/11/2011. El derrumbe causado por lluvias prolongadas impactó en un vehículo que transitaba matando una persona e hiriendo a otra.

3 EL TALUD EN LA BOCA OESTE EL TUNEL N°3

La figura 5 presenta el área elegida para el estudio. En la figura 5a se muestra la región de precordillera de los Andes, al noroeste del lago Potrerillos. La zona marcada en detalle indica el sector donde se sitúan los túneles N°2 y N°3, con registro de numerosos eventos de caída de rocas. La figura 5b muestra la ruta N°7 paralela al río Mendoza en el sector del túnel N°3, construido en un macizo de roca andesítica denominado Cerro Negro (rocas volcánicas del período pérmico temprano), y el talud crítico sobre la boca oeste perteneciente a un macizo de riolita (rocas volcánicas del período pérmico-Triásico). Ambos macizos pertenecen al grupo geoes estructural denominado “Choiyoi” temprano y tardío respectivamente. En la figura 5c se puede observar el talud en estudio, que denominaremos en adelante “talud oeste”, luego del último evento de caída de rocas inducido por lluvias prolongadas en el área.

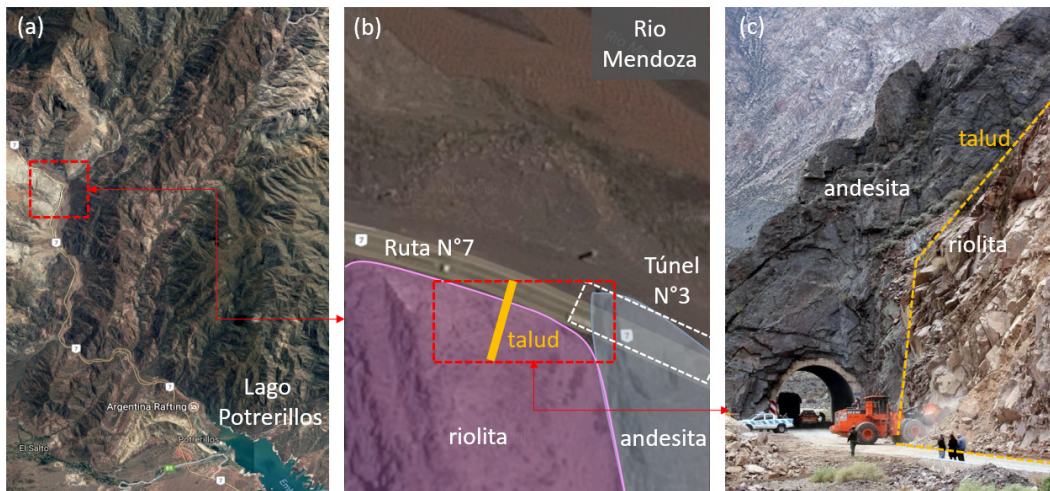


Fig 5. a) Región de la precordillera, aguas arriba del Lago Potrerillos, donde se sitúan los túneles N°2 y N°3; b) Unidades geológicas presentes en la boca oeste del túnel N°3; c) El talud oeste luego del último evento de caída de rocas en 2011.

El talud oeste específicamente constituye el límite lateral de un enorme macizo de riolita, presentando tres familias principales de diaclasas en ese sector. Un modelo geomecánico simple propuesto para el talud es detallado en la Tabla 1. Se realizó una estimación indirecta de la resistencia al corte de las discontinuidades del macizo basados en los datos obtenidos en campo y en la literatura disponible. El ángulo de fricción se estimó entre 40° a 45° con una cohesión de 10 a 30 t/m². El macizo parece tener algunos puentes de roca debido a falta de persistencia de las discontinuidades, especialmente de la familia de diaclasas N°2.

Tabla 1. Familias de diaclasas del macizo del talud oeste

Familia de diaclasas	Ángulo buzamiento	Dirección buzamiento	espaciamiento (m)	rugosidad	Abertura (mm)	Persistencia (m)	Presencia de agua	Puntaje RMR
N°1	50°	10°	1.1 – 1.7	rugosa	< 1 mm	> 10 m	seca-húmeda	~ 75
N°2	67°	190°	1.4 – 2.0	rugosa	< 1 mm	5 a 8 m	seca-húmeda	
N°3	85°	280°	1.7 – 2.3	rugosa	< 1 mm	> 10 m	seca-húmeda	

4 MODELADO DISCRETO CON DDA

DDA es un método numérico para el análisis discreto de sistemas de bloques deformables [5][6]. Este método fue implementado computacionalmente en un programa donde el modelado se realiza a través de cuatro módulos de cálculo consecutivos, es decir, el archivo de salida de un módulo es el archivo de entrada del siguiente módulo. Estos módulos son:

- DDA-LINES (DL): Módulo generador de la geometría del modelo y las discontinuidades. Permite definir fracturas, fallas y familias de diaclasas, así como su dominio espacial. Los parámetros pueden usarse de forma determinística o estadística. También permite definir contornos de obras como túneles o excavaciones.
- DDA-CUT (DC): Módulo generador de bloques. Genera el sistema de bloques a partir de la geometría definida por las discontinuidades.
- DDA-FORWARD (DF): Módulo de análisis forward. El análisis puede ser estático o dinámico. El sistema de ecuaciones se resuelve mediante dos métodos: método directo o iterativo (sobre relajación).
- DDA-GRAPH (DG): Módulo generador de gráficos de salida. Genera gráficos en pantalla y archivos para impresión.

El sistema de bloques que se modeliza para el análisis numérico por DDA tiene dos escalas de acción diferenciadas:

- La escala del bloque. En este ámbito interno, cada bloque de geometría poligonal es asumido como un sólido deformable con comportamiento elástico. Su comportamiento mecánico es definido por su densidad, módulo de elasticidad y coeficiente de Poisson.
- La escala del sistema. En este ámbito externo ocurre la interacción dinámica entre los bloques, y cada bloque recibe fuerzas externas a partir de la interacción con otros bloques. Dichas fuerzas son definidas por un método de penalización entre bloques, donde cada superposición geométrica entre bloques se penaliza con una fuerza de repulsión elástica (modelo de resorte) proporcional a la magnitud de la superposición, según una constante de rigidez asumida, que constituye un parámetro interno del método. Con respecto a las fuerzas normales, no hay límite a la fuerza de repulsión generada por la superposición. En cuanto a las fuerzas de repulsión tangenciales, éstas constituyen la resistencia friccional de los bloques, y por lo tanto tienen un límite a su valor dado por leyes de fricción.

El factor que controla la interacción del sistema y vincula ambas escalas es el contacto entre bloques, cuyas leyes expresan las características mecánicas del sistema. De estas leyes, son de gran importancia las leyes de fricción para las discontinuidades, ya que ellas controlan el movimiento relativo de los bloques en las discontinuidades, y este mecanismo es el que desencadena la inestabilidad del macizo rocoso.

La interacción friccional entre los bloques en una discontinuidad se controla por leyes que determinan un criterio de resistencia por mecanismo de rozamiento. Una vez alcanzado dicho límite, porque la fuerza movilizante es mayor a la resistente, habrá deslizamiento relativo entre los bloques mientras continúa actuando en la discontinuidad la resistencia friccional máxima establecida por la ley. En este momento comienza a ocurrir la degradación friccional del contacto debido al movimiento relativo, fenómeno éste que podrá ser contemplado o no por la ley friccional.

Un modelo bilineal de degradación de la fricción fue recientemente propuesto, dependiente de la escala de los bloques deslizantes y adecuado para discontinuidades inicialmente limpias y rugosas. El mismo fue implementado en DDA y validado [7][8][9].

El modelo bilineal propone que la fricción de pico (ϕ_p) actúa inicialmente en la superficie de deslizamiento en roca, degradándose linealmente (D) con el desplazamiento relativo (d) hasta su valor residual (ϕ_b) que se da para una distancia crítica (d_c). Según el modelo de Bandis-Barton [10][11], esa distancia corresponde aproximadamente al 1% del tamaño del menor bloque involucrado en el deslizamiento. Para distancias mayores la resistencia friccional corresponde al valor residual. El mismo se expresa mediante las ecuaciones

$$\begin{aligned} \phi &= \phi_p - D & \text{if } (d \leq d_c) \\ \phi &= \phi_b = \phi_p - i & \text{if } (d > d_c) \quad (1) \\ D &= \left(\frac{d}{d_c}\right) \cdot i & \text{if } (d \leq d_c) \end{aligned}$$

5 MODELO GEOMECÁNICO DEL TALUD Y ANÁLISIS CON DDA

Se construyó un modelo geomecánico discreto en dos dimensiones para realizar un análisis por el método DDA simulando un proceso de inestabilidad por caída de bloques provocado por lluvias o sismo. El frente del talud se estableció en un valor medio de 15 m, y el dominio de análisis fue establecido hasta una distancia horizontal de 30 m desde el frente del talud. El talud presenta una pendiente más suave por encima de los 15 m, con lo que la altura máxima del modelo es de 46 m. La sección de análisis se dispuso paralela a la familia de discontinuidades N°3. De esta forma, en el modelo geomecánico se incluyeron las familias N°1 y N°2 (ver figura 6).

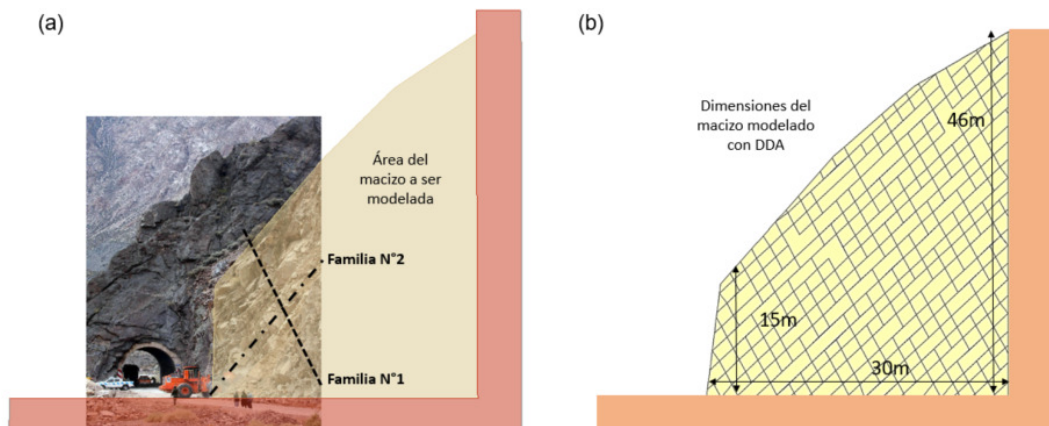


Fig 6. a) Área del talud a ser modelada; b) Modelo geomecánico del talud para DDA.

Se definieron tres diferentes variantes del modelo geomecánico denominadas secciones A, B y C. Se generaron estas secciones en el modelador geométrico (módulo DL), mediante el uso de un parámetro aleatorio para obtener los valores de espaciamiento y persistencia de las discontinuidades con una dispersión en torno al valor medio. Esto generó algunas diferencias en la configuración geométrica de los bloques de roca para cada sección. De esta forma se cubren las incertezas con respecto a estas características del macizo. Las tres secciones son presentadas en la figura 7.

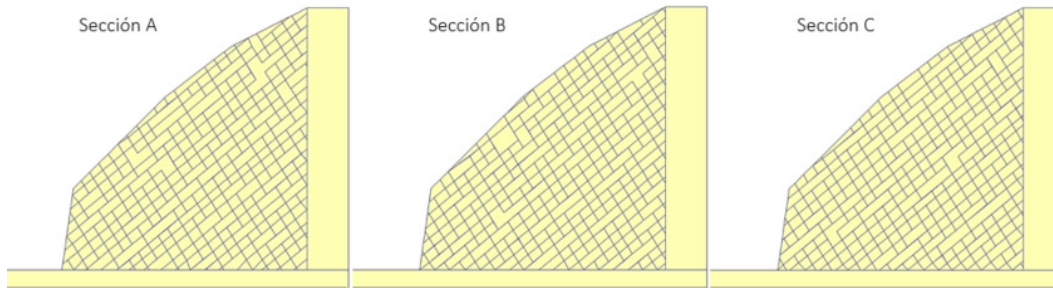


Figura 7. Secciones A, B y C para modelado del talud.

La resistencia al corte de las discontinuidades fue modelada mediante una ley bilineal incluyendo degradación de la rugosidad con el desplazamiento relativo de los bloques, a fin de obtener resultados que contemplen este fenómeno. Los valores adoptados para el análisis fueron los siguientes: ángulo de fricción de pico $\phi = 42^\circ$, un ángulo de rugosidad $i = 12^\circ$, y una cohesión $c = 25 \text{ t/m}^2$. Según esta ley, ocurre la degradación completa de la rugosidad para un desplazamiento del 1% del tamaño del bloque (ver figura 8).

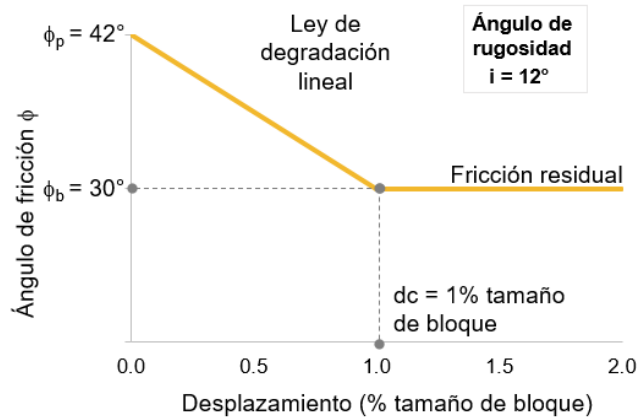


Fig 8. Modelo bilineal de resistencia friccional utilizado en las discontinuidades.

Dado que el talud es estable actualmente, se reprodujo esta condición en el modelo geomecánico según sus tres variantes. Para este objetivo, se llevó a cabo un análisis pseudo estático, esto es, utilizando un factor de amortiguamiento del 50% representando la ausencia de un disparador de inestabilidad, como lluvia o sismo. A fin de obtener la condición de estabilidad en la inminencia de ruptura (factor de seguridad igual a 1), fue necesario incluir una resistencia a tracción débil (0.05 t/m^2) en los contactos de bloques, representando los puentes de roca observados y un efecto estabilizador dado por la tridimensionalidad del macizo. Esta condición se establece en DDA mediante contactos de tracción entre bloques, que rompen una vez que surge una fuerza de tracción igual o mayor entre los bloques.

Para reproducir los eventos de caída de bloques, se definieron adicionalmente tres escenarios de inestabilidad U1, U2 y U3 para cada una de las tres variantes A, B y C. Así, el escenario U1 representa la condición estable en la inminencia de ruptura ($FS = 1$) con una resistencia a tracción de 0.05 t/m^2 en los contactos de bloques. Los escenarios U2 y U3 representan condiciones estables con $FS > 1$, con valores de resistencia a tracción de 0.10 t/m^2 y 0.20 t/m^2 respectivamente.

Para cada escenario se realizó un análisis dinámico utilizando un factor de amortiguamiento del 5%. Al definir un bajo valor de amortiguamiento, las oscilaciones dinámicas debido al ajuste inicial de las fuerzas inerciales de los bloques generaron fuerzas de contacto. Dichas fuerzas actuaron como disparador de inestabilidad, ya que indujeron el quiebre de algunos de los contactos de tracción definidos. De esta forma se consiguió incluir el efecto disparador que provocaría la presión de agua infiltrada por lluvias intensas o la sollicitación sísmica. Una vez quebrados unos pocos contactos de tracción, el proceso de inestabilidad comenzó suavemente y progresó gradualmente hasta el colapso.

6 DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

La figura 9 presenta los resultados obtenidos en la sección A para los tres escenarios de inestabilidad U1, U2 y U3. El volumen total de roca del macizo se dividió en tres categorías:

- volumen estable, compuesto de los bloques que no sufrieron desplazamientos.
- volumen movilizado, compuesto por los bloques que sufrieron desplazamientos pero que encontraron una nueva configuración estable.
- volumen colapsado, compuesto por los bloques que colapsaron invadiendo la traza de la ruta.

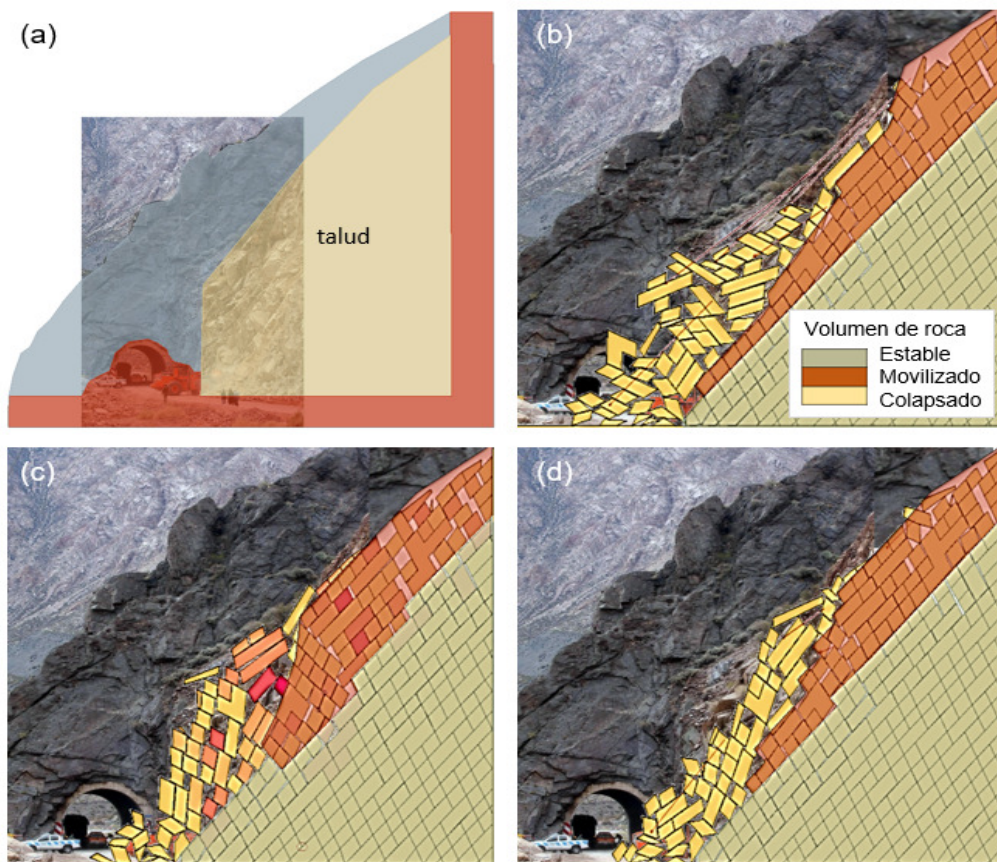


Fig 9. Simulación de caída de rocas con DDA para la sección A: a) área del modelo geomecánico; Simulación a los 45 segundos de análisis: b) Escenario U1; c) Escenario U2; d) Escenario U3.

La figura 10 presenta una secuencia completa de la simulación del proceso de caída de rocas en la sección A para el escenario U1. La secuencia muestra cómo se genera progresivamente la superficie de falla a partir de movimientos relativos de los bloques en diferentes sectores del talud. Para 60 s de simulación el modelo alcanzó su posición estable final.

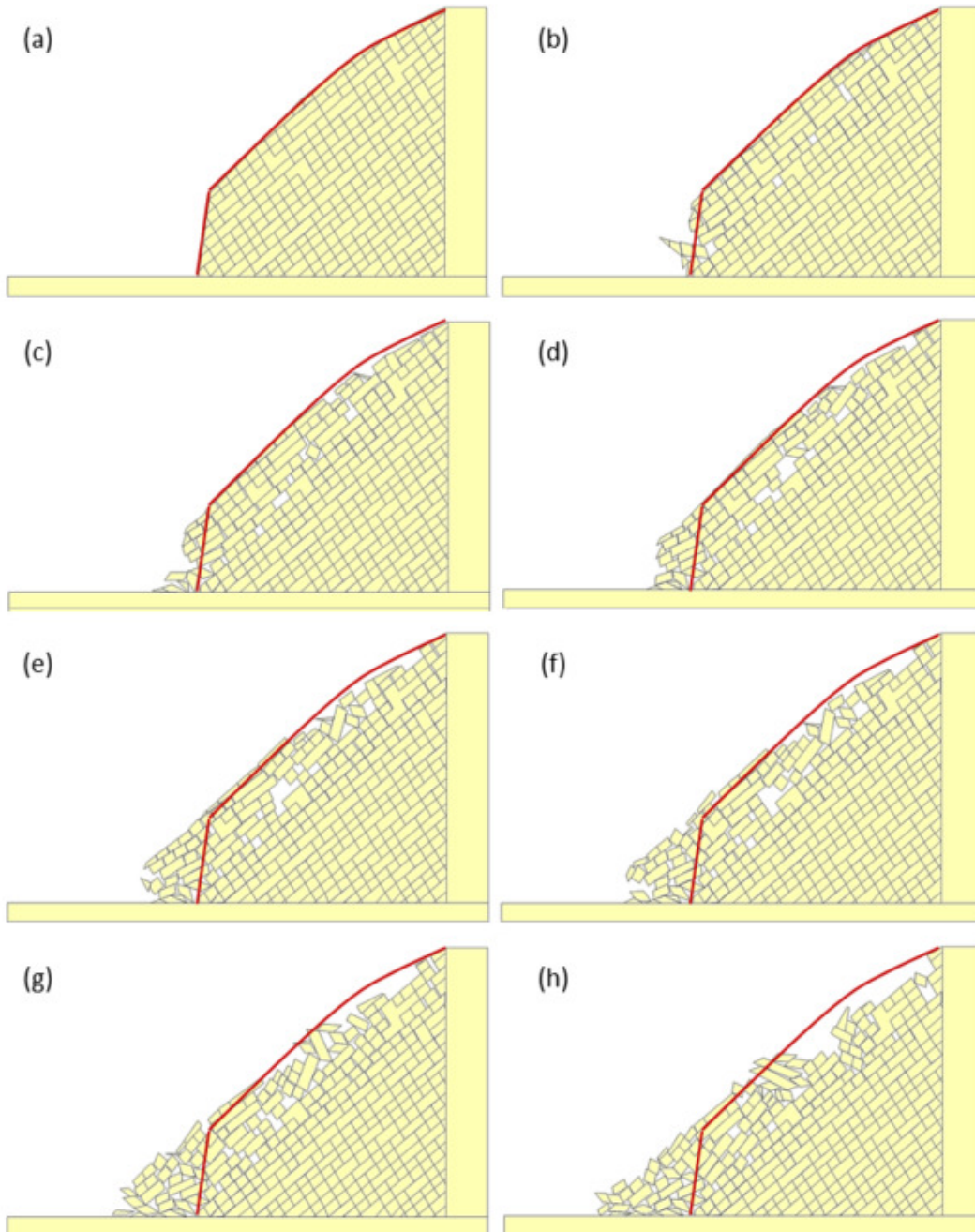


Fig 10. Simulación de caída de rocas con DDA para la sección A: a) 0 s; b) 5 s; c) 10 s; d) 17 s; e) 24 s; f) 30 s; g) 40 s; h) 60 s.

La Tabla 2 presenta un resumen de los volúmenes estable, movilizado y colapsado para la sección A, en los escenarios U1, U2 y U3. Los resultados son consistentes, mostrando un volumen colapsado de roca decreciente para valores crecientes de la resistencia a tracción en los contactos. En todos los casos el proceso total de caída de rocas se produjo entre los 60 y 80 segundos. La comparación con las secciones B y C analizadas reveló una variación menor al 5% en los volúmenes estimados, lo que mostró que la distribución aleatoria de espaciamiento y persistencia tuvo un rol poco determinante en los resultados.

Tabla 2. Volúmenes de roca para los escenarios de inestabilidad U1, U2 and U3 (sección A).

	Estado estable	Estado U1	Estado U2	Estado U3
Resistencia a tracción (t/m ²)	0.05	0.05	0.10	0.20
Volumen de roca estable (m ³ /m)	985	577	582	612
Volumen de roca movilizado (m ³ /m)	--	230	255	228
Volumen de roca colapsado (m ³ /m)	--	178	148	145

7 CONCLUSIONES

Utilizando DDA fue posible realizar una previsión del volumen de roca involucrado en un futuro evento de caída de rocas en el talud situado en la boca oeste del túnel N°3. El modelo propuesto incorporó las principales características geométricas y geomecánicas del talud, a partir de los datos disponibles. Para cubrir las incertidumbres en torno a la real geometría de los bloques de roca del macizo, se generaron tres secciones posibles, a partir de una variación aleatoria en la persistencia y espaciamiento de las familias de diaclasas. El disparador de inestabilidad se logró a través de la rotura de algunos contactos débiles a tracción, lo que desencadenó progresivamente la inestabilidad de la masa de roca. El análisis con DDA permitió reproducir todo el proceso desde el inicio hasta el colapso completo de parte del talud.

Asumiendo que el ancho del talud sobre la ruta es de unos 30 m, el volumen de roca colapsada sería de unos 4000 to 5000 m³ según sea la sección y el escenario. Para cualquiera de los casos analizados, un futuro evento de caída de bloques en el talud afectaría la seguridad y interrumpiría la operación de la ruta internacional N°7.

REFERENCIAS

- [1] S. M. Moreiras, Landslide susceptibility zonation in the Rio Mendoza Valley, Argentina. *Geomorphology*, 66/1–4, 345–357, 2005.
- [2] S. M. Moreiras, Frequency of debris flows and rockfall along the Mendoza river valley (Central Andes), Argentina. In: Piovano, Villalba, & Leroy (eds) Special Issue: Holocene env. catastrophes in South America: from the lowlands to the Andes. *Quaternary International*, 158, 110–121, 2006.
- [3] S. M. Moreiras, Análisis estadístico probabilístico de las variables que condicionan la inestabilidad de las laderas en los valles de los ríos Las Cuevas y Mendoza, *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 65(4): 780-790, 2009.
- [4] S. M. Moreiras, P. Jeanneret, S. Junquera, M. Correas Gonzalez, S. Moragues, Grandes colapsos de laderas asociados a la deglaciación pleistocena en los Andes Centrales de Argentina. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 77 (1): 91-103, 2020.

- [5] Y. H. Hatzor, G. Ma, G. Shi, *Discontinuous Deformation Analysis in Rock Mechanics Practice*. CRC Press, Feng, X.T. ISRM Book Series. The Netherlands, 2017.
- [6] G. Shi, *Block System Modeling by Discontinuous Deformation Analysis.*, Southhampton, UK: Computational Mechanics Publication, Brebbia, C.A., Connor, J.J. *Topics in Engineering* , 1993.
- [7] J. P. Ibañez and Y. H. Hatzor, "Friction degradation in rapid sliding: Back analysis of the catastrophic Vajont landslide using DDA," in *ARMA Congress*, 18–684., Seattle, USA, 2018.
- [8] J. P. Ibañez and Y. H. Hatzor, "Rapid sliding and friction degradation: Lessons from the catastrophic Vajont landslide," *Engineering Geology*, vol. 244, pp. 96-106, 2018.
- [9] J. Ibañez and Y. Hatzor, " From creep to rapid sliding: back analysis of the Vajont landslide with the numerical DDA method.," in *Rock Mechanics for Natural Resources and Infrastructure Development – Fontoura, Rocca & Pavón Mendoza (Eds) ISRM*, ISBN 978, Foz do Iguaçu, Brazil, 2020.
- [10] R. E. Goodman, *Engineering Geology*, Wiley, 1993.
- [11] N. Barton and S. Bandis, "Some effects of scale on the shear strength of joints," *Int. J. Rock Mech. Mining Sci. Geomech.*, vol. 17, no. 1, p. 69–73, 1980.