



Línea base para riesgo de caída de rocas en un camino de montaña en Sierra Chica, provincia de Córdoba, Argentina

Baseline for risk of rock fall on a mountain road in Sierra Chica, Córdoba province, Argentina

Quintana Crespo, Enrique F. ¹ ✉ - Navarro, María Alejandra ²

Recibido: 18 de julio de 2020 • Aceptado: 03 de diciembre de 2020

Resumen

El presente trabajo forma parte de un proyecto de investigación en desarrollo en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Católica de Córdoba, que tiene como objetivo la aplicación de modelos geotécnicos para el análisis de riesgo de caída de rocas en las principales vías de montaña de la Provincia de Córdoba.

Se aborda aquí el caso de los taludes generados para el cruce del cordón de Sierra Chica por la Ruta Provincial 34 (Camino de Altas Cumbres).

Para el establecimiento de una línea base de riesgo de caída de roca se aplicó el Sistema de Calificación de Riesgo de Caída de Rocas (RHRS - Rockfall Hazard Rating System) con algunas modificaciones y al tiempo cero, es decir a escasos meses de la liberación al tránsito de la obra.

Los resultados obtenidos permitieron establecer zonas que deben estar sometidas a un constante monitoreo, debido a las condiciones geométricas de los taludes y/o a sus características geotécnicas.

Palabras clave: *Caída de rocas, Riesgo, Estabilidad, Macizos Rocosos.*

Abstract

This work is part of a research project in development at the Faculty of Engineering of the Catholic University of Córdoba, which aims to apply geotechnical models for the risk analysis of rock falls in the main mountain roads of the Province of Córdoba.

The case of the slopes generated for the crossing of the Sierra Chica mountains, by Provincial Route 34 (Camino de Altas Cumbres) is addressed here.

1. Facultad de Ingeniería. Universidad Católica de Córdoba - Departamento de Construcciones Civiles, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Universidad Nacional de Córdoba - Dirección Provincial de Vialidad. Córdoba, Argentina.

✉ equintr@yahoo.com

2. Facultad de Ingeniería. Universidad Católica de Córdoba. Córdoba, Argentina.

To establish a baseline of rock fall risk, the Rockfall Hazard Rating System (RHRS - Rockfall Hazard Rating System) with some modifications was applied, at time zero, that is, a few months after the release of the transit.

The results obtained allowed the establishment of areas that must be subject to constant monitoring, due to the geometric conditions of the slopes and/or its geotechnical characteristics.

Keywords: *Rockfall, Risk, Stability, Rock Mass.*

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo forma parte de un proyecto de investigación en desarrollo en la Universidad Católica de Córdoba titulado: “Aplicación de modelos geotécnicos para el análisis de riesgo en taludes rocosos para obra viales”, para el cual se ha efectuado una zonificación geotécnica de toda el área de Sierra Chica. La definición de unidades de mapeo geotécnico sienta las bases para posteriores aplicaciones, tales como la aplicación de diversas metodologías de clasificación de macizos rocosos, estabilidad de laderas y taludes y, como se desarrolla a continuación, el análisis de riesgo de caída de rocas.

La obtención de una “línea base” de riesgo de caída de rocas en obras viales de montaña, implica un relevamiento en el momento de la puesta en servicio de la obra, con el fin de determinar la estabilidad resultante de los taludes generados, y tomar un tiempo cero para análisis posteriores, durante la vida útil del camino

La Ruta Provincial 34 (Camino de las Altas Cumbres) forma parte del Corredor Córdoba - Cuyo, con un trazado que atraviesa los principales cordones montañosos del territorio de la Provincia de Córdoba. El tramo estudiado, de 16,6 km de longitud, comunica al camino de cintura C45, a la altura de la localidad de Falda del Cañete, con las rutas 14 y E96, en el Valle de Punilla.

Para la construcción del mismo se debieron realizar una serie de cortes en el macizo rocoso generando taludes de hasta 50 metros de altura.

Las condiciones del macizo fueron analizadas mediante un proceso de zonificación geotécnica del complejo metamórfico que compone el subsuelo rocoso de Sierra Chica. Las principales características geotécnicas de los macizos se relacionan con variaciones en el grado de metamorfismo, y con la aproximación del trazado vial a la Falla de Sierra Chica, generadora de la escarpa occidental de dicho cordón montañoso.

La calificación de macizos rocosos se realizó mediante la aplicación del criterio de Hoek y Brown, para determinar los parámetros intrínsecos: ángulo de fricción y cohesión equivalente para una masa de roca (*Hoek y Brown, 1980*).

El análisis de riesgo de caída de bloques tiene en cuenta aspectos geológicos propios de los macizos rocosos y variables específicas del proyecto de ingeniería. El método utilizado tomó como base el “Rockfall Hazard Rating System (RHRS)”, desarrollado por *Pierson et al., (1990)* en el Departamento de Transporte de Oregón (ODOT) y patrocinado por la FHWA (Federal Highway Administration) con una de las modificaciones propuestas por *Budetta (2004)*: la introducción del “Slope Mass Rating” de *Romana (1991)* como método de caracterización de la estabilidad de los taludes rocosos.

ZONIFICACIÓN GEOLÓGICA - GEOTÉCNICA

Para la presente investigación se ha llevado a cabo una zonificación geológica-geotécnica en escala regional para la unidad geomorfológica de Sierra Chica, con foco en la Ruta Provincial 34 E (Camino de Altas Cumbres), desde su intersección con la ruta C45, en proximidades de la localidad de Falda del Cañete, hasta su intersección con las rutas E96 y RP14 en la cercanía de la localidad de Las Jarillas, en el Valle de Punilla, Provincia de Córdoba.

Un análisis detallado de la metodología de zonificación y los resultados de la misma se encuentra desarrollado en *Quintana Crespo y Soffietti (2020)*.

De acuerdo a la escala de trabajo se definieron las siguientes Unidades de Mapeo Geotécnico (UNESCO/IAEG, 1976): Serie Litológica; Complejo Litológico; Tipo Litológico; y Tipo Geotécnico. Toda la cartografía fue desarrollada mediante un sistema de información geográfico, utilizando el software Quantum Gis (Qgis).

Series Litológicas

El análisis regional se llevó a cabo mediante la utilización de las cartas geológicas: Córdoba-3163 III (1:250.000), y Carta Geológica Los Gigantes- 3166-30 (1:100.000) del Instituto de Geología y Recursos Minerales del SEGEMAR (Servicio Geológico Minero Argentino), de donde se obtuvieron las unidades de mapeo correspondientes a Series Litológicas, en toda la región central del cordón de Sierra Chica. Solo aquellas unidades de mapeo que fueron observadas en los trabajos de campo fueron nominadas. Figura 1 y Tabla 1.

Para la definición de las unidades de mapeo geotécnico de mayor detalle - Complejos y Tipos Litológicos- el área de estudio se restringió a la zona de influencia de la RP34 E (Ruta Provincial 34 Este – Camino de las Altas Cumbres) considerando como tal a los límites de las cuencas hídricas, que son parcial o totalmente atravesadas por el trazado vial. Figura 2.

Este criterio responde a las necesidades del proyecto de investigación general, en el que se encuentra incluido el presente trabajo, donde además de la estabilidad de los taludes rocosos se analizará la estabilidad de las laderas naturales.

Complejos Litológicos

Como puede observarse en la Figura 1, el trazado de la RP34 E se desarrolla sobre los macizos rocosos de la Serie NPgP, en la cual se distinguieron los siguientes complejos:

CL - Complejo Metamórfico La Falda Ubicado sobre la Carta Geológica Córdoba. Paragneis feldespático, cuarzo biotítico

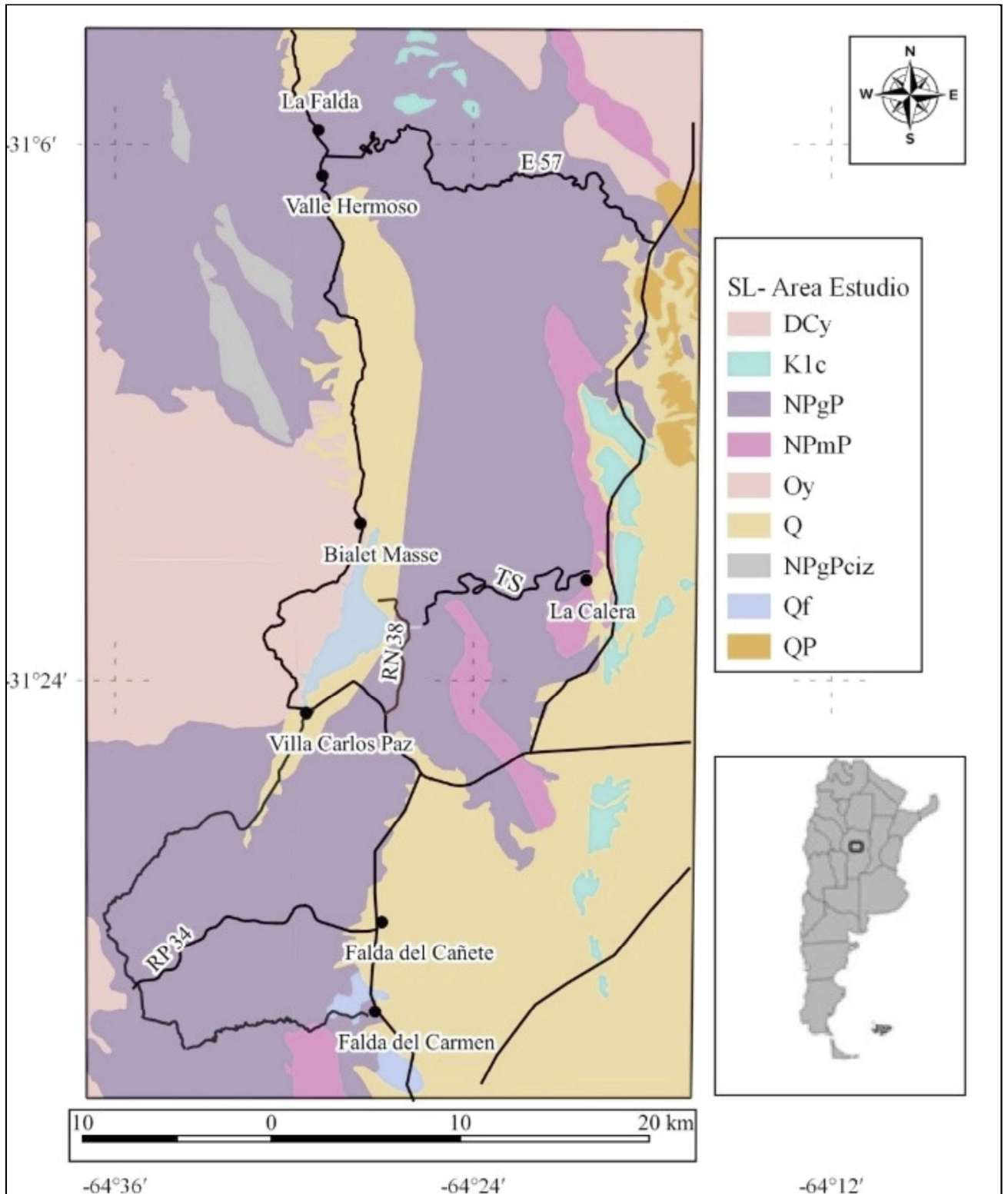


Figura 1. Series Litológicas definidas en el área central de Sierra Chica.

muscovítico, bandeo intercalado con ortogneis leucotonalítico, escasos mármoles y rocas calcosilicáticas. Paleozoico (Cámbrico Inferior).

CL - Complejo Metamórfico Sierra Chica. Ubicado sobre la Carta Geológica Los Gigantes. Se trata de gneises biotíticos, granatíferos del Paleozoico (Cámbrico Inferior a Medio); y

Metatexitas Granatíferas Cordieríticas del Paleozoico (Cámbrico Inferior a medio). Tamaño de grano grueso. Roca de alto grado de metamorfismo y estado masivo, con alguna foliación muy gruesa. Presentan texturas cataclásticas y miloníticas de metamorfismo dinámico.

Tabla 1. Series (SL), Complejos (CL) y Tipos Litológicos (TL) y Tipos Geotécnicos

SL	CL	Cartas SEGEMAR	TL	TG	Materiales		
Q	CL7: Fm Pampeana. Pleistoceno Superior.	Córdoba	TL7.1		Formación Pampeana.		
	CL2: Fm. La Invernada. Loess, Pleistoceno Superior	Córdoba	TL2.1	TG2.1.1	Sedimentos eólicos.		
	CL1: Fm. Río La Granja. Holoceno	Córdoba	TL1.1	TG1.1.1	Limos y arenas fluviales.		
N2c	-----	Córdoba	-----	-----	Neógeno Fm. Cosquín		
K1c	Formación Saldán.	Córdoba	-----	-----	Sedimentos Cretácicos		
DCy	CL6: Granitoides porfíricos gruesos	Córdoba	TL6.1	TG6.1.1	Batolito de Achala		
	Complejo Granítico Achala	Los Gigantes	-----	-----	Batolito de Achala		
	Complejo Granítico Achala	Calamuchita	-----	-----	Batolito de Achala		
Oy	Granito Candonga	Córdoba	-----	-----	Granito Candonga		
NPgP	CL3/4: Complejo Metamórfico La Falda	Córdoba	TL3.1	TG3.1.1	Coluvión		
				TG3.1.2	Regolito		
			TL3.2	TG3.2.1	Gneis Esquistoso		
				TG3.2.2	Gneis Masivo		
				TG3.2.3	Pegmatitas		
			TL4.1	TG4.1.1	Metatexitas		
			TL4.2	TG4.2.1	Cataclasitas		
				TG4.2.2	Milonitas		
			CL5: Complejo Metamórfico Sierra Chica	Los Gigantes	TL5.1	TG5.1.1	Coluvión
						TG5.1.2	Regolito
TL5.2	TG5.2.1	Gneis Esquistoso					
	TG5.2.2	Gneis Masivo					
	TG5.2.3	Pegmatitas					
NPmP	Formación El Manzano Mármoles	Córdoba	TL8.1	TG8.1.1	Mármoles		

Tipos Litológicos y Tipos Geotécnicos

En los Complejos Litológicos definidos se diferenciaron Tipos Litológicos caracterizados por su homogeneidad en composición, textura y estructura. Simultáneamente se fueron definiendo los Tipos Geotécnicos, como las unidades que presentan el mayor grado de homogeneidad litológica, cuyas propiedades físicas pueden ser caracterizadas estadísticamente a partir de determinaciones individuales.

El estudio se ha restringido a los Tipos Litológicos y Geotécnicos constituidos por macizos rocosos excavados mediante voladuras, dejando de lado aquellos formados por sedimentos no consolidados.

La calificación de los macizos rocosos se efectuó mediante el método de *Hoek y Brown (1980)*. Para ello se relevaron las familias de discontinuidades presentes, determinándose su rumbo y buzamiento, espaciamiento, persistencia, apertura, etc. La resistencia a la compresión simple del material rocoso y de las discontinuidades se obtuvieron mediante ensayos de esclerometría, utilizando un martillo de Schmidt, tipo N. Las zonas más críticas de las paredes rocosas, con cuñas o planos de posible inestabilidad, fueron detectadas inicialmente mediante vuelos de dron, utilizando un aparato DJI-Spark 4, (Figura 3) y requirieron del acceso al talud con técnicas de escalada (ascenso y descenso por cuerda). (Figura 4).

Los datos de campo se volcaron en planillas tipo, como la que se muestra en las Tabla 2 - Figuras 5, 6 y 7 y Tabla 3.

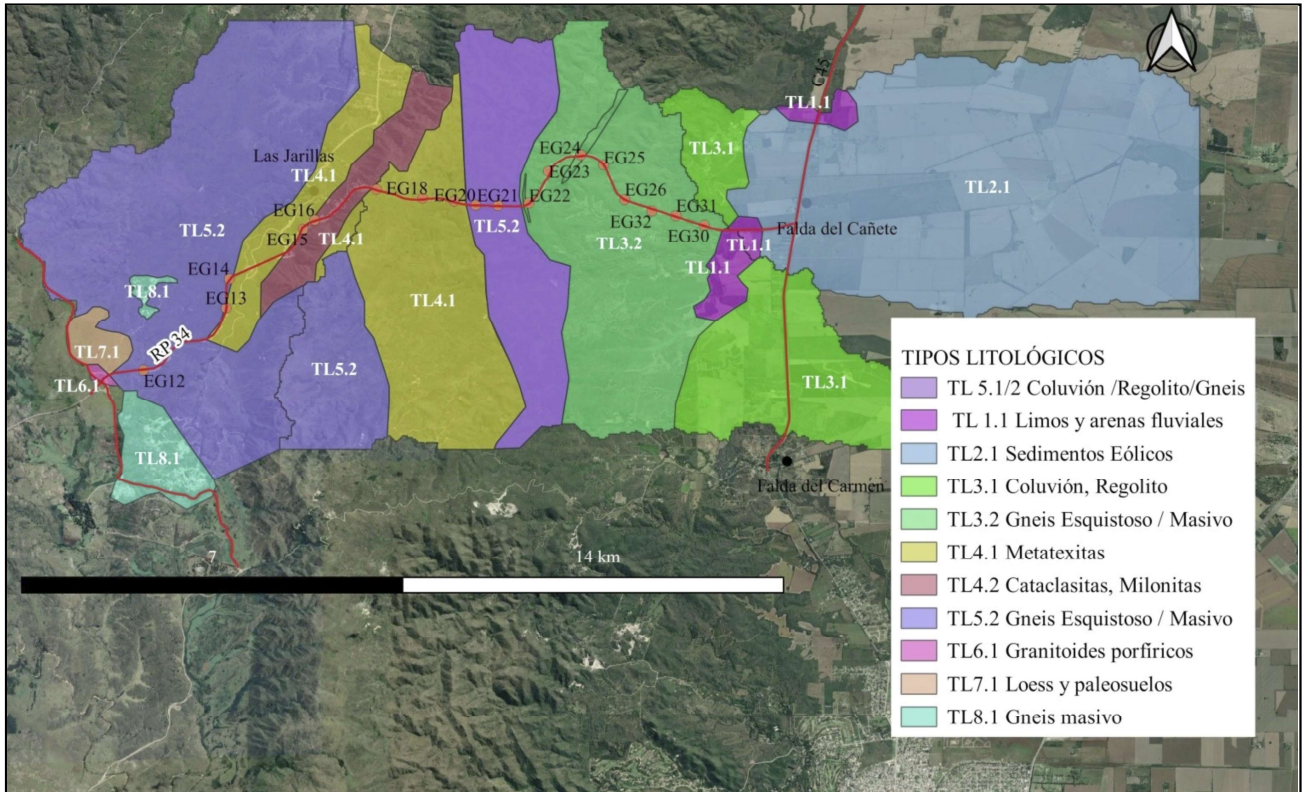


Figura 2. Ruta Provincial 34 E. Complejos y Tipos Litológicos. Ubicación de Estudios Geotécnicos para taludes rocosos. Sobre imagen de Google Earth.



Figura 3. Relevamiento con dron. Altura de toma fotográfica: 120 m.



Figura 4. Medición de buzamiento con brújula geológica, en plano de discontinuidad desfavorable a la estabilidad. Toma de datos en EG 23 (31° 31.754 S - 64°30.060 O).

Tabla 2. Planilla de identificación del talud rocoso y ensayos de esclerometría.

Identificación: RP34E - EG 23	Progresiva: 11.200 km	Coordenadas: 31° 31.754 S – 64°30.060 O
Talud Izquierdo Rumbo Medio: 30 °	Altura: 32 mts. (4 bancos)	Elevación: 842 m s.n.m
	Longitud Total: 260 mt	

Características litológicas: Tipo Litológico 3.2: Gneis color gris claro, masivo. TG: 3.2.2 Gneis masivo

Ensayos de Esclerometría:

RN1 (Rebote Esclerómetro) = 60 - 58 - 50 - 58 - 60 - 50 - 64 - 48 - 60 - 54 (en macizo golpe horizontal F 6.1) RN1m = 56 N1c = 55

RN2 (Rebote Esclerómetro) = 36 - 48 - 46 - 48 - 44 - 46 - 48 - 46 - 50 - 42 (en discontinuidad golpe hacia abajo F 6.2) RN2m = 45 N2c = 46



Figura 5. Croquis de ubicación del talud.

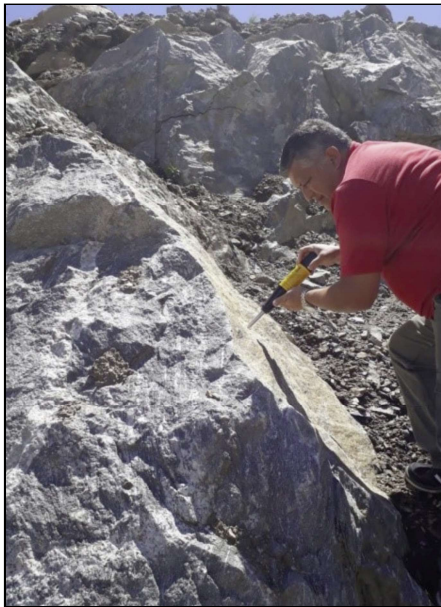


Figura 6. Ubicación del Esclerómetro en el plano.

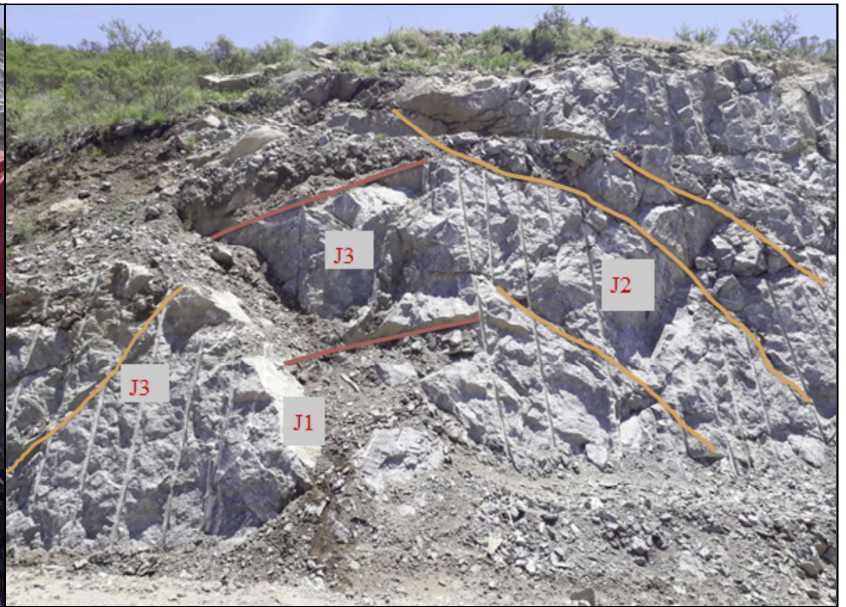


Figura 7. Juegos de discontinuidades relevados.

Tabla 3. Clasificación de Hoek y Brown. Obtención de los parámetros intrínsecos del macizo rocoso.

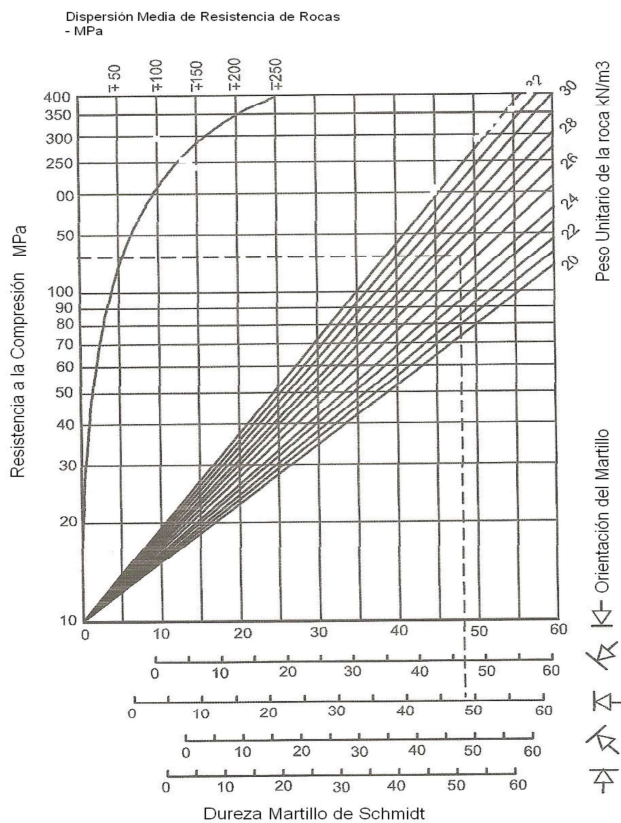


Gráfico de Miller (1965)

Para $R_{N1} = 55$ (Martillo tipo N)
 $(R_N - 7.124) / 1.249 = R_t = 38$
 Goktan y Ayday (1993)

De acuerdo al Gráfico de Miller (1965) para
 $R_t = 38$
 $R_c = 80 \pm 25$ MPa

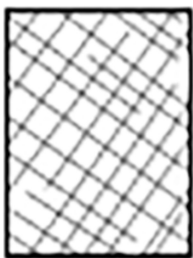
Para el valor de $R_{N2} = 46$ (Martillo tipo N)
 $(R_N - 7.124) / 1.249 = R_t = 31$

De acuerdo al Gráfico de Miller (1965) para
 $R_t = 31$
 $R_c = 62 \pm 15$ MPa

Clasificación de Hoek y Brown (Programa Roclab de Rocscience):

Resistencia a la compresión simple de la roca intacta $\sigma_{ci} = 100 \text{ MPa}$
 (se adopta el máximo valor de resistencia del macizo de acuerdo a RL_{1c}
 y a datos propios del relevamiento de campo: golpes de martillo)

Geological Strength Index (GSI)



Clase 2: Bloques cúbicos, inalterados, formados por 3 juegos de discontinuidades bien trabados.
 Subclase M-MB: GSI varía entre 85 y 65 cuando las condiciones superficiales de las discontinuidades son muy buenas: rugosas, no meteorizadas, ni alteradas;
 GSI = 80

Se considera una altura de talud medio para el sector de 15 m., y se estima un Peso Unitario del macizo = $0,022 \text{ MN/m}^3$.
 Constante de Hoek-Brown
 $m_i = 31$

RESULTADOS

Ángulo de Fricción : $\varphi' = 68^\circ$
 Cohesión : $c' = 2.12 \text{ MPa}$

Propiedades de los Tipos Geotécnicos

La Clasificación de Hoek y Brown, permitió determinar los valores de cohesión y fricción del macizo rocoso para los distintos Tipos Geotécnicos, estableciéndose tres grupos:

Valores bajos ($c < 0,15 \text{ MPa}$ y $\varphi < 40^\circ$). Gneises esquistoso y masivos afectados por fallas;

Valores medios ($c < 0,30 \text{ MPa}$ y $\varphi < 50^\circ$). Gneises esquistosos, y cataclasitas de zona de falla de Sierra Chica;

Valores altos ($c > 0,30 \text{ MPa}$ y $\varphi > 55^\circ$) Gneises masivos y metatexitas. Tabla 4.

SISTEMA DE CALIFICACIÓN DE RIESGO DE CAÍDA DE ROCAS

Para la calificación del riesgo de caída de rocas se tomó como base el "Rockfall Hazard Rating System (RHRS)", desarrollado por *Pierson et al., (1990)* en el Departamento de Transporte de Oregón (ODOT), con una de las modificaciones propuestas por *Budetta (2004)*: el reemplazo de la caracterización geológica del método original, por el SMR de *Romana (1991)*.

De este modo se analiza la situación de estabilidad presente en cada uno de los taludes, para establecer una "línea base" de riesgo de caída de rocas.

Tabla 4. Clasificación de los Tipos Geotécnicos en base a su cohesión y fricción.

TG	Superficie Taludes (m ²)	φ (°)		c' (MPa)	
		Medio	Desviación Estándar	Medio	Desviación Estándar
3.2.1 Gneis esquistoso	7.000	47	13,18	0,16	0,56
3.2.1 Gneis esquistoso con falla	4.200	31	-	0,13	-
3.2.2 Gneises Masivos	14.600	65	2,12	0,74	0,53
3.2.2 Gneis masivo con falla	1.500	37	-	0,08	-
3.2.3 Pegmatitas	48	64	-	1,84	-
4.1.1 Metatexitas	18.200	62	2,47	0,63	0,20
4.2.1 Cataclasitas	16.000	43	-	0,27	-
5.2.1 Gneis esquistoso	2.760	47	-	0,19	-
5.2.2 Gneis masivo	7.490	62	3,70	0,58	0,52
5.2.1 Gneis esquistoso	3.000	56	-	0,52	-
5.2.2 Gneis masivo	19.800	66	2,2	0,96	0,20
5.2.3 Pegmatitas	2.360	63	-	1,32	-

Los datos necesarios para la utilización del método RHRS, pueden agruparse del siguiente modo:

- En relación con el diseño geométrico de la vía: altura de los taludes, eficiencia de la cuneta, distancia visual de decisión, ancho de calzada y cuneta;
- En relación a las características del medio físico de la zona de camino: caracterización geológica, tamaño de bloques y/o volumen de desprendimientos, antecedentes de caídas de rocas, condiciones climáticas y aguas subterráneas.

Las modificaciones propuestas por *Budetta (2004)* con el objetivo de simplificar el método original y brindarle mayor objetividad, son las siguientes:

- Clasificación geológica basada en el Slope Mass Rating (SMR) de *Romana (1991)*;
- Estimación cuantitativa de la eficiencia de las cunetas mediante la carta de *Ritchie (1963)*, con actualizaciones de *Fookes y Sweeney (1976)*, y *Whiteside (1986)*.
- Estimación cuantitativa del tamaño de los bloques o volumen del desprendimiento, definiendo el volumen de los bloques (V_b) antes de la caída mediante el espaciamiento de los principales juegos de juntas (S_1, S_2, \dots, S_n) que afectan al macizo. Para macizos con 3 juegos de juntas, V_b viene dado por:

$$V_b = (S_1 + S_2 + S_3) \cdot \text{sen}\alpha \cdot \text{sen}\beta \cdot \text{sen}\gamma$$

Dónde:

α, β y γ son los ángulos entres los juegos de juntas.

El tamaño de bloque se obtiene a partir de la siguiente expresión:

$$D_b = \sqrt[3]{V_b}$$

- Condiciones climáticas: la presencia de agua y los ciclos de congelamiento y deshielo contribuyen para que se produzca meteorización y caídas de rocas. El RHRS estima cualitativamente estas variables, estableciendo rangos en función de los siguientes criterios: 1. Precipitaciones bajas a moderadas, sin períodos de heladas, sin agua en el talud. 2. Precipitaciones moderadas, cortos períodos de heladas, agua intermitente en el talud. 3. Precipitaciones elevadas, largos períodos de heladas, agua permanente en el talud. 4. Precipitaciones elevadas y largos períodos de heladas o agua permanente en el talud y largos períodos de helada (combinados).

Las modificaciones de *Budetta* tienen en cuenta que el SMR ya tiene en cuenta la circulación de agua subterránea en el talud, por lo que se consideran solamente los valores medios de lluvias anuales. Las áreas que reciben menos de 600 mm anuales son consideradas de moderada precipitación y las que reciben más de 1200 mm anuales de elevada precipitación. Para los períodos de heladas se mantiene el puntaje original del RHRS.

Otros parámetros intervinientes en el método de evaluación permanecieron iguales:

- Altura del Talud: Esta variable representa la altura vertical del talud.
- Riesgo promedio de vehículo (RMV): porcentaje de tiempo que los vehículos están presentes en la zona de riesgo de caída de rocas. Es igual a la cantidad de vehículos por hora que transitan por la zona de riesgo, sobre la velocidad máxima señalizada en metros.
- Distancia visual de decisión (DVD): longitud mínima de calzada necesaria para que un conductor pueda tomar una decisión para no impactar con un obstáculo en la ruta. Se establece comparando la distancia visual disponible con el valor mínimo de diseño definido por AASHTO que se muestra en la Tabla 5; y que depende de la velocidad límite que se encuentra señalizada en el tramo. La DVD se considera como la distancia a lo largo de un camino en la cual un objeto estático de 0,15 m es continuamente visible a 1,10 m de altura desde la superficie de rodamiento (altura del ojo del conductor). Es crítica cuando los obstáculos en la ruta son difíciles de percibir, o cuando se requieren maniobras inusuales o inesperadas para evitarlos. La DVD puede cambiar apreciablemente a través de una zona de riesgo. Las curvas con obstrucciones tales como salientes rocosas o vegetación prominente, puede limitar severamente la habilidad de un conductor para avistar un desprendimiento de rocas, al igual que las tormentas. La evaluación se debe realizar de ser posible en los dos sentidos del tránsito, pero fundamentalmente del lado del talud rocoso.
- Ancho de calzada: medido perpendicular a la sección del talud rocoso que se está analizando. Incluye el ancho de banquetas.
- Frecuencia de caída de rocas: se debe establecer una base de datos de sitios y frecuencias de caída de rocas. La Tabla 6 resume las nueve categorías y los puntajes correspondientes, de acuerdo al criterio de clasificación establecido por *Budetta (2004)*.

Tabla 5. Distancia visual de decisión (AASHTO, 2011).

Velocidad límite (km/h)	Distancia de decisión DVD (m)
40	114
48	137
56	160
64	183
72	206
80	228
88	267
96	304
114	320

Tabla 6. Planilla Resumen del Método RHRS modificado.

Categoría	Criterio de Calificación por Puntaje			
	Puntos 3	Puntos 9	Puntos 27	Puntos 81
Altura del Talud	7,5m	15m	22,5m	> 30m
Eficiencia de la Cuneta	Buena: diseñada según modelo de Ritchie (carta de diseño y barreras)	Moderada: diseñada según modelo de Ritchie (carta de diseño)	Limitada: diseño equivocado	Nula
Riesgo medio por vehículo (% del tiempo)	25%	50%	75%	100%
Distancia Visual de Decisión (% del valor de diseño)	Adecuada (100%)	Moderada (80%)	Limitada (60%)	Muy Limitada (40%)
Ancho de Camino	21,5 m	15,5 m	9,50 m	3,5 m
Slope Mass Rating SMR	80	40	27	20
Tamaño de Bloque	0,3 m	0,6 m	0,9 m	1,20 m
Volumen de Bloques	0,026 m ³	0,21 m ³	0,73 m ³	1,74 m ³
Volumen de derrumbe x evento	2,3 m ³	4,6 m ³	6,9 m ³	9,2 m ³
Lluvias anuales y períodos de heladas	H =300 mm			
Sin heladas	H =600 mm ó			
Cortos períodos de heladas	H = 900 mm ó			
Largos períodos de heladas	H = 1200 mm ó			
Largos períodos de heladas				
Antecedentes de caídas de rocas	1 cada 10 años	3 por año	6 por año	9 por año

La Función Exponencial

El exponente de la ecuación $y=3^{f(x)}$ fue encontrado a través de varios intentos y representan la expresión matemática que mejor ajusta a los datos de las Tabla 1. (Budetta, 2004). La descripción de las funciones usadas para estimar el puntaje que brinda cada una de las ocho categorías (a excepción de la efectividad de cunetas) se puede visualizar en la Tabla 7.

APLICACIÓN DEL SISTEMA RHRS A LA RUTA PROVINCIAL 34 ESTE

El tramo analizado de la RP34 E fue inaugurado a fines del año 2019. Cuenta con 16,6 km de longitud total y 26 taludes rocosos que fueron divididos en 52 secciones homogéneas, cuyas longitudes totalizan 5.169 metros. La "línea base" para el análisis de riesgo de caída de bloques se determinó en 18 taludes considerados representativos de la totalidad, descartándose aquellos que por su baja altura o por estar demasiado alejados de los bordes de calzada no evidenciaban posibilidad de riesgo alguna.

Para cada uno de los taludes analizados se confeccionó una planilla como la que se muestra en la Tabla 8, donde se incorporaron los siguientes datos:

- Altura de talud: se relevaron alturas entre ocho y cincuenta metros (6 bancos de 8 metros, con bermas de 2,50 m de ancho)
- Riesgo promedio de vehículo (RMV): Esta categoría tiene en cuenta la longitud de la zona de riesgo (L); el tránsito medio diario (TMD en vpd - vehículos por día; y vph - vehículos por hora); y la velocidad límite señalizada VLS (km/h). Para la determinación del TMD se estimaron valores de acuerdo a los datos provistos

por la Dirección de Vialidad de Córdoba, y al SIG de Vialidad Nacional, ya que por pertenecer a una ruta recientemente construida no existen aún valores censales. Se consideró un valor medio de 6000 vpd, entre el tránsito pasante proveniente de la provincia de Córdoba hacia las provincias vecinas de San Luis y Mendoza (4450 vpd); más el tránsito local entre la ciudad de Córdoba y el valle de Punilla, por la nueva conexión: Las Jarillas - Int. RP.14 (en la Localidad de San Antonio). El valor de TMD es uniforme para todos los tramos y las VLS varían entre 60 kph en zona de viaductos e intersecciones y 80 kph para el resto, por lo tanto las variaciones del riesgo medio de vehículo serán originadas por la longitud de los tramos evaluados. La zona de VLS igual a 60 kph presenta un RMV entre 11 y 83% y para la zona de VLS igual a 80 kmh, el RMV oscila entre 18 y 78%.

- Porcentaje de distancia visual de decisión (DVD): Teniendo en cuenta las velocidades máximas de circulación señalizadas (80 km/h y 60 km/h), las distancias mínimas requeridas son 228 m. y 171 m. respectivamente. Las distancias de visibilidad disponibles, que son las efectivamente medidas, fueron registradas en condiciones óptimas de visibilidad y podrían registrar disminuciones debido a características geométricas relacionadas con curvas verticales y horizontales, malezas en banquina, niebla, oscuridad, etc. Los resultados variaron entre 100 (distancia adecuada) y 80 (distancia moderada).
- Ancho de calzada: El valor medido es de 7,30 metros para ancho de calzada y 2,50 metros de banquina del lado del talud.

Tabla 7. Funciones exponenciales de ajuste de datos. Budetta, 2004.

Categoría	Ecuación
Altura del Talud (H)	$y = 3 H/7.5$
Riesgo medio de vehículo (AVR)	$y = 3 AVR/25$
Distancia Visual de Decisión (%Da)	$y = 3 (120 - \%Da)/20$
Ancho de Camino (Lc)	$y = 3(27.5 - Lc)/6$
Slope mass rating (SMR)	$y = 3 80/SMR$
Tamaño de Bloque (Db)	$y = 3 Db/0.3$
Volumen de roca por evento (Vfall)	$y = 3 Vfall/2.3$
Precipitación Anual (h)	$y = 3 h/300$
Frecuencia de Caída de Rocas (f)	$y = 3 1 + (0.334 \cdot f)$

-Tamaño de los bloques: Los macizos rocosos están constituidos por gneises masivos o esquistosos y meta-textitas masivas, afectados por 3 o más juegos de discontinuidades. La frecuencia de las discontinuidades ha llevado a obtener bloques de diferentes formas, generalmente con dos dimensiones prevalecientes sobre la tercera, que en promedio arrojan un volumen del orden de los $0,175 \text{ m}^3$.

- Condiciones climáticas: Para la zona de estudio se adoptó un promedio de precipitaciones de 700 mm por año (<https://www.cba.gov.ar/provincia/aspectos-generales/clima/>). En el área de estudio la distribución de las precipitaciones no es homogénea, existiendo un período de lluvias que va desde setiembre hasta marzo de cada año. El período más crítico para la estabilidad de los taludes es el fin de verano, época en la cual los macizos rocosos ya han absorbido toda el agua que potencialmente pueden acumular y por lo tanto su peso unitario se encuentra en un máximo, al igual que la lubricación de los minerales arcillosos producida por el agua infiltrada. Ambas condiciones potencian los derrumbes que suelen producirse como deslizamientos de masas.

- Frecuencia de caída de rocas: Considerando el estudio como el inicial para la vida útil de la obra, no se consideran, ni han sido observadas caídas de rocas de importancia tal, que merezcan ser registradas, ya sea por su escaso volumen o por la trayectoria de impacto que no supera la zona de banquina o por ambas circunstancias a la vez. Para el comportamiento futuro de los taludes se debe desarrollar una base de datos que tenga en cuenta las características climáticas y geológicas que influyen en los resultados del puntaje del RHRS. El grado de meteorización de los taludes es uno de los elementos que, combinados con el clima van a influir severamente. La edad de los taludes es función directa de la relajación del macizo rocoso, lo que implica incremento en la apertura de las discontinuidades y modificaciones en la condición favorable o no de los buzamientos. La colocación de puntos fijos para monitoreo de estas características de la roca es de importancia para ir anticipando los comportamientos futuros de los macizos rocosos.

- Rock Mass Rating (RMR) y Slope Mass Rating (SMR): Las unidades de mapeo geotécnico de mayor detalle: los Tipos Geotécnicos, presentan homogeneidad en sus características litológicas y físico-mecánicas, por lo tanto, los resultados puntuales de los estudios desarrollados en cada talud rocoso, pueden generalizarse con los valores medios de RMR y SMR. De esta forma se obtienen los resultados de la Tabla 9.

La Tabla 10 muestra los resultados de la aplicación del método RHRS modificado, para los 18 taludes en las diferentes secciones analizadas.

De acuerdo a las consideraciones del método RHRS original, los taludes con puntajes menores a 300 son calificados para estabilización a mediano plazo y los mayores a 500 para medidas de estabilización inmediata.

En el caso de estudio los valores de RHRS alcanzados son bajos, variando entre un mínimo de 69 y un máximo de 225. Constituyen una "línea de base" en los que no se suma puntaje por la categoría de Frecuencia de Caída de Rocas y donde la actualización periódica de tal categoría irá incrementando el puntaje y consecuentemente el riesgo.

Debido a las características de autovía de montaña de la RP34 E, las categorías que analiza el método RHRS en relación al diseño geométrico y a las condiciones climáticas, presentan uniformidad o variaciones menores en toda la longitud del tramo analizado, salvo las variaciones en altura y la longitud de los taludes, que influyen en forma significativa en el puntaje final. La longitud de la zona de los cortes se refleja en el Riesgo Medio por Vehículo (RMV).

El SMR muestra una importante influencia en el RHRS, que puede apreciarse en aquellos sectores donde se reconoce una geología y una tectónica compleja, como es la zona de influencia de la Falla de Sierra Chica: el Tipo Geotécnico 4.2.1 integrado por cataclasitas, presenta un valor medio de SMR igual a 36 y los puntajes del RHRS obtenidos son los más elevados dentro del análisis realizado: 153 y 225. El máximo de 225 corresponde al Talud EG16, que es el de mayor altura y longitud del tramo estudiado.

Con la línea base de riesgo de caída de rocas obtenida mediante el sistema RHRS se generó una capa de información, dentro del sistema Qgis, en cuya base de datos georeferenciada se plasmaron las puntuaciones obtenidas.

Tabla 8. Funciones exponenciales de ajuste de datos. Budetta, 2004.

TALUD			EG12		
LONGITUD			80 m (Pr. 1450 km - 1530 km)		
T.G			5.2.2		
Categoría	Unidad	Valor	Función		Rating
Altura del Talud	H(m)	25	$3^{(H/7,5)}$	38,94	27,00
Eficiencia de la cuneta	Buena	1	3	3	3,00
		Moderada	0	9	0
		Limitada	0	27	0
		Ineficiente	0	81	0
Riesgo medio por vehículo (RMV)	RMV km/h (%)	26,6	$3^{(RMV/25)}$	3,21	9,00
	TMDA	veh/día	6000		
	Vehículos por hora	veh/hora	250		
	Longitud de zona	mts	85		
	Velocidad Diseño	km/hr	80		
	Distancia de Visibilidad	%Da	100	$3^{((120-\%Da)/20)}$	3,00
Distancia requerida		m	228,0		Adecuada
Distancia disponible		m	228,0		
Adecuada 100%					
Moderada 80%					
Limitada 60%					
Muy Limitada 40%					
Ancho de calzada	Lc (m)	12,3	$3^{((27,5-Lc)/6)}$	16,17	9,00
	Calzada	m	7,3		
	Banquina	m	5,0		
Tamaño de bloque	Db (m)	0,56	$3^{(Db/0,3)}$	7,76	9,00
Volumen del Bloque	m ³	0,2			
Condición climática	h(mm)	700	$3^{(h/300)}$	12,98	27,00
	1.	300			
	2.	600			
	3.	900			
	4.	1200			
Frecuencia de caída de bloques	f	0,00027	$3^{(1+(0,334*f))}$	3,00	3,00
	1. Algunos	1/(365*10)			
	2. Ocasionales	3/365			
	3. Frecuente	6/365			
	4. Constante	9/365			
Slope Mass Rating	SMR	65	$3^{(80/SMR)}$	3,87	3,00
	I	muy buena	81-100		
	II	buena	61-80		
	III	normal	41-60		
	IV	mala	21-40		
	V	muy mala	0-20		
				88,96	93,00

Se delimitaron las zonas que deben ser regularmente monitoreadas (representadas en color rojo): el TG 4.2.1 (cataclasitas) en los taludes 15 y 16, que presentan los valores de puntuación más elevados (153 – 225 puntos); la zona de falla del talud 22 (171 puntos); los TG 5.2.2 (gneises masivos) en los taludes 12, 13 (147 p.) y TG 3.2.2 en los taludes 21 y 24 (141 p.); y el TG 3.2.1 (gneis esquistoso) en el talud 25 (147p.).

En las zonas representadas en color amarillo pálido, (entre 121 y 173 puntos) con condiciones de estabilidad buena, la

conservación de rutina debe incluir la limpieza de bermas, mantenimiento de cunetas de guardia, y eventualmente tareas de despedrado en algunos puntos críticos.

En cuanto a las zonas representadas en verde presentan una situación inicial de las características geométricas y geológicas de los taludes, que permite prever un comportamiento estable en el mediano y largo plazo. Figura 8.

Tabla 9. Valores medios de GSI, RMR y SMR, según Tipos Geotécnicos.

T.G.	Casos	GSI medio	RMR medio	SMR medio
3.2.1 Gneis Esquistoso	9	53	58	51
3.2.2 Gneis masivo	19	66	71	68
4.1.1 Metatexitas	13	78	81	81
4.2.1 Cataclasitas	10	31	36	36
5.1.3 Regolito	4	23	28	28
5.2.1 Gneis esquistoso	4	54	59	57
5.2.2 Gneis masivo	12	60	65	70
5.2.3 Pegmatitas	1	80	85	85

Tabla 10. Valores de puntajes obtenidos mediante el método RHRS modificado.

Talud	Sección	Tipo Geotécnico	RHRS
12	S1	5.2.2 Gneis masivo	93
	S2-S3-S5	5.2.2 Gneis masivo	147
	S4	5.2.3 Pegmatitas	141
13	S1-S2	5.2.2 Gneis masivo	147
14	S1	5.2.1 Gneis esquistoso	93
	S2	5.2.2 Gneis masivo	93
15	S1-S2	4.2.1 Cataclasitas	153
16	S1	4.2.1 Cataclasitas	225
17	S1-S3	4.1.1 Metatexitas	93
	S2	4.1.1 Metatexitas	111
18	S1-S3	4.1.1 Metatexitas	93
	S2	4.1.1 Metatexitas	87
19	S1-S2-S3-S4-S5-S6	4.1.1 Metatexitas	87
	S7	4.1.1 Metatexitas	93
20	S1-S2-S5-S6	5.2.1 Gneis esquistoso	93
	S3-S4	5.2.2 Gneis masivo	87
21	S1	5.2.2 Gneis masivo	69
	S2-S3-S4-S5	5.2.2 Gneis masivo	141
22	S1-S3-S4-S5-S6	3.2.2 Gneis masivo	84
	S2	3.2.2. Falla	171
23	S1	3.2.2 Gneis masivo	69
	S2-S3-S4-S5-S6-S7-S8	3.2.1 Gneis esquistoso	87
24	S2	3.2.1 Gneis esquistoso	141
	S1	3.2.2 Gneis masivo	94
25	S1	3.2.1 Gneis esquistoso	147
	S2	3.2.2 Gneis masivo	93
26	S1	3.2.1 Gneis esquistoso	100
	S2	3.2.1 Gneis esquistoso	93
30	S1-S2	3.2.1 Gneis esquistoso	69
	S3	3.2.2 Gneis masivo	69
31	S1	3.2.1 Gneis esquistoso	69
	S2	3.2.2 Gneis masivo	69
32	S1	3.2.1 Gneis esquistoso	111

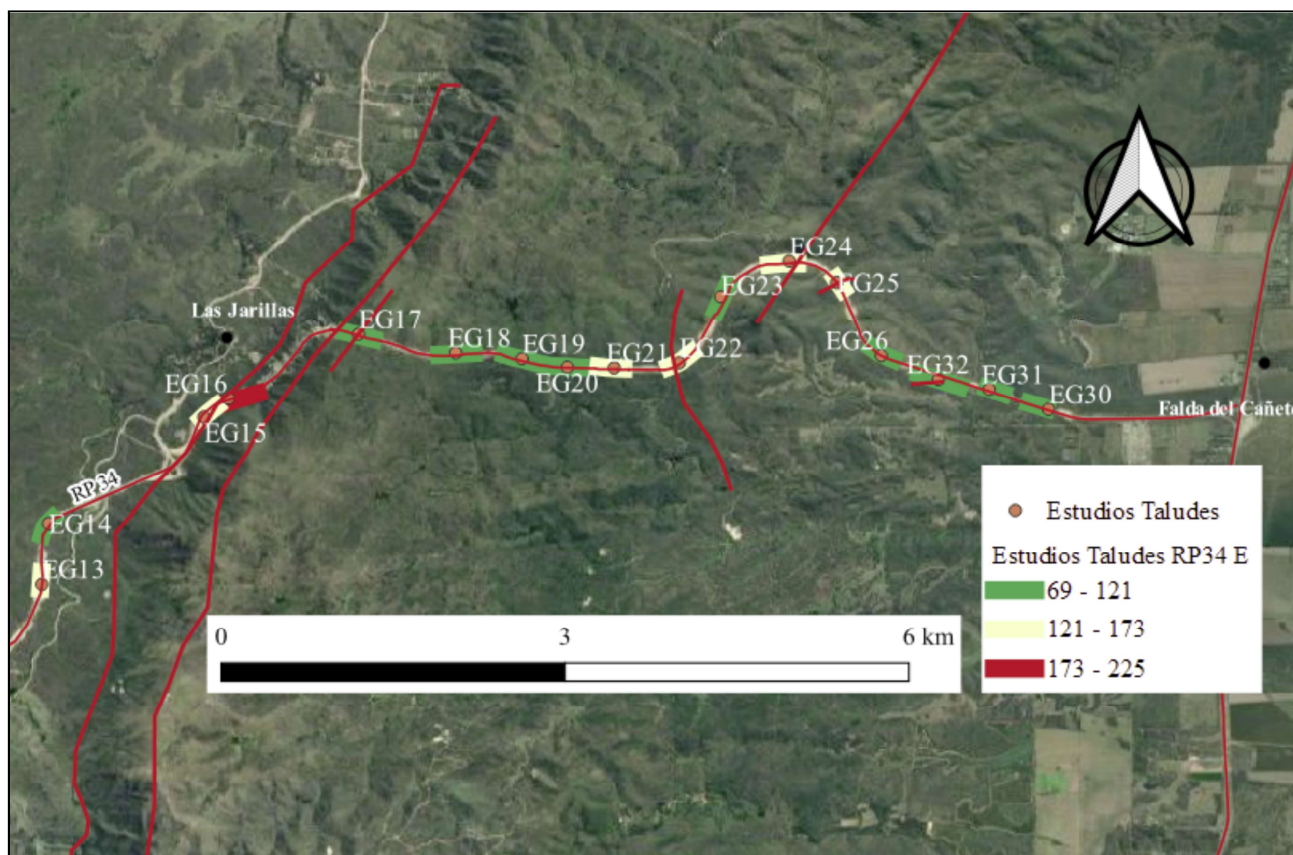


Figura 8. Línea base para riesgo de caída de rocas, determinada con el Método RHRS. Líneas continuas en rojo: Falla de Sierra Chica y otras fallas inversas menores.

CONCLUSIONES

Mediante el Sistema RHRS modificado se realizó la evaluación de la Ruta Provincial 34 Este, recientemente construida, obteniendo la Línea Base de Riesgo de Caída de Rocas.

La zonificación geotécnica mediante la cual se definieron unidades de mapeo en diversas escalas fue realizada mediante la aplicación del Sistema de Calificación de Macizos Rocosos de *Hoek y Brown (1980)*. Se obtuvieron los valores de cohesión y fricción del macizo rocoso, que fueron correlacionados con el RMR de *Bieniawski (1989)*.

Los Tipos Geotécnicos de mayor extensión areal en la zona de influencia de la RP34E, corresponden a gneises esquistosos, gneises masivos, metatexitas, cataclasitas y cuerpos pegmatíticos. Se encontró una muy buena correlación entre las características relevadas en los taludes y los valores de cohesión y fricción calculados. Los valores más bajos correspondieron a los materiales de falla: ángulo de fricción φ (°) = 31° - 37°; cohesión c = 0,13 - 0,08 MPa, y a las cataclasitas: φ (°) = 43°; cohesión c = 0,27 MPa

Los gneises esquistosos ubicados a ambos lados del abrupto de la Falla de Sierra Chica arrojaron valores de fricción y cohesión del macizo de: φ (°) = 47°; cohesión c = 0,16 - 0,19 MPa; y en cuanto a los gneises masivos, los resultados fueron: φ (°) = 62° - 65°; cohesión c = 0,58 - 0,74 MPa.

En cuanto a los macizos rocosos de alto grado de metamorfismo, las metatexitas, los valores obtenidos fueron φ (°) = 62°; cohesión c = 0,63 MPa.

La incorporación del SMR de *Romana (1991)* al método RHRS, permitió la cuantificación de las condiciones geológicas-geotécnicas de los taludes rocosos. Muestra una importante influencia en las puntuaciones del RHRS, que puede apreciarse con claridad en aquellos sectores donde se reconoce una geología y una tectónica compleja, como es la zona de influencia de la Falla de Sierra Chica.

La Línea Base de Riesgo de Caída de Rocas obtenida mediante el sistema RHRS modificado permitió delimitar las zonas que deben ser regularmente monitoreadas: el TG 4.2.1 (cataclasitas) en los taludes 15 y 16, que presentan los valores de puntuación más elevados (153 - 225 puntos); la zona de falla del talud 22 (171 puntos); los TG 5.2.2 (gneises masivos) en los taludes 12, 13 (147 puntos) y TG 3.2.2 en los taludes 21 y 24 (141 puntos); y el TG 3.2.1 (gneis esquistoso) en el talud 25 (147 puntos).

La materialización cartográfica de la Línea Base obtenida mediante un Sistema de Información Geográfica (Qgis), es una herramienta de planificación que permite efectuar una agenda de tareas de mantenimiento de los taludes rocosos.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la Universidad Católica de Córdoba por la aprobación del proyecto de investigación en el marco del cual se realizó este trabajo, a la Universidad Nacional de Córdoba por la licencia por año sabático otorgada a uno de los autores; y a la Dirección Provincial de Vialidad de Córdoba que permitió la publicación de datos técnicos.

TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- AASHTO. 2011.
A Policy on Geometric Design of Highways and Streets.
Tomo 1. Anexo 3. Distancia Visual de Detención.
- BIENIAWSKI, Z.T. 1989.
Engineering rock mass classification (eds).
Pennsylvania (USA): Wilby-interscience.
- BUDETTA P. 2004.
The modified Rockfall Hazard Rating System. Assessment of rockfall risk along roads.
Natural Hazards and Earth System Sciences 4: 71-81
- CEBALLOS F., OLALLA C., JIMÉNEZ R. 2014.
Relationship between RMRb and GSI based on in situ data.
Conference Paper.. Ed. Digital: <https://www.researchgate.net/publication/266265132>
- FOOKES, P. G. AND SWEENEY, M. 1976.
Stabilization and control of local rockfalls and degrading rock slopes,
Quart. J. Eng. Geol., 9, 37- 55.
- GAIDO, M. F., J. J. ZARCO, R. C. MIRÓ, M. SAPP, M.T. GAMBA Y H. LÓPEZ. 2005.
Hoja geológica 316630, Los Gigantes. Instituto de Geología y Recursos Minerales.
Boletín 299. Buenos Aires.
- GÖKTAN R. AND AYDAY C., 1993.
Suggested improvement to the Schmidt rebound hardness ISRM suggested method with particular reference to rock machineability.
International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, vol. 30, pp. 321-322.
- GOODMAN, RE, BRAY J. 1976.
Toppling of rock Slopes.
Proc. ASCE Special Conference Rock Engng. For Foundations and Slopes, Boulder, Co. 2, pp 201-234
- HOEK, E. AND BROWN, E.T. 1980.
Empirical strength criterion for rock masses.
J. Geotech. Engng Div., ASCE 106 (GT9), 1013-1035.
- LUCERO H., DAZIANO C., SANABRIA J., BARBEITO O, TAUBER A. 2006.
Hoja Geológica Córdoba-3163 III (1:250.000)
Instituto de Geología y Recursos Minerales. Buenos Aires.
- MCGEE H.W, MOORE W., KNAPP B.G. AND SANDERS J.H. 1978
Final Report. Decision Sight distance for highway design and traffic control Requirements.
Federal Highway Administration Offices of Research and Development. Washington, D.C. 20590
- PIERSON, L. A., DAVIS, S. A., AND VAN VICKLE, R. 1990.
Rockfall Hazard Rating System - Implementation Manual,
Federal Highway Administration (FHWA), Report FHWA-OR-EG-90-01, FHWA, U.S. Dep. of Transport.
- QUINTANA CRESPO, E., & SOFFIETTI, F. P. (2020).
Una Zonificación Geotécnica Aplicada a Taludes Rocosos en el Cordón de Sierra Chica,
Provincia de Córdoba, Argentina.
Revista De La Facultad De Ciencias Exactas, Físicas Y Naturales, 7(2), 27-43. Recuperado a partir de <https://revistas.unc.edu.ar/index.php/FCEFYN/article/view/29363>
- RITCHIE, A. M. 1963.
Evaluation of rockfall and its control,
U.S. Department of Commerce, Bureau of Public Roads, and the Washington State Highway Commission.
- ROMANA, M. 1991.
SMR Classification,
Proc. 7th Int. Congr. on Rock Mech., Balkema, Rotterdam, 955-960.
- UNESCO/IAEG. 1976.
Engineering Geological Maps.
A guide to their preparation.
- Whiteside, P. 1986.
Discussion on rockfall protection measures,
Conf. on Rock Eng. and excavation in an Urban Env., Institution of Mining and Metallurgy, Hong Kong, 490-498.