



Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente • N.º 50 • 2023 • ISSN 2422-5703 • <https://www.editoriasagai.org.ar/>  
Catinari, J.M., Gatica, J.R., Bassani, S.A., Navarro, J.S., Aires, A.N. y Fernández, C.L.  
Evaluación de estabilidad estructural de la caverna Arenal, Área Natural Protegida Cuchillo Curá, Neuquén  
e010, <https://doi.org/10.59069/24225703e010>

# Evaluación de estabilidad estructural de la caverna Arenal, Área Natural Protegida Cuchillo Curá, Neuquén

## Structural stability assessment of the Arenal cavern, Cuchillo Curá Protected Natural Area, Neuquén

Juan Matías Catinari<sup>1\*</sup> José Ricardo Gatica<sup>1</sup> Santiago Andrés Bassani<sup>2</sup>   
 Joaquín Salvador Navarro<sup>1</sup> Axel Nicolás Aires<sup>1</sup> Camila Ludmila Fernández<sup>1</sup>

\* Contacto

Recibido: 16 de junio de 2023 • Aceptado: 9 de agosto de 2023 • Publicado: 15 de agosto de 2023

### Resumen

El ANPCC (Área Natural Protegida Cuchillo Curá) contiene actualmente al sistema cavernario más extenso de Argentina, con más de 5 kilómetros de extensión conformado por las cavernas Arenal, Templo, Gendarme y Cabritos.

La estabilidad estructural de las mismas es poco conocida y es motivación de este trabajo aportar con estudios que desarrollen la temática. A tal fin, se emplearon dos metodologías específicas de análisis de susceptibilidad en sistemas cavernarios, aplicables tanto en cavernas de origen kárstico o volcánico: el Índice Geotécnico de Cavernas (*Brandi et al., 2020*) y el Índice Q adaptado por *Jordá-Bordehore (2017)*. Ambas clasificaciones fueron aplicadas para estudiar particularmente un sector de la caverna Arenal, dejando el resto del sistema cavernario para próximos estudios en la medida que sea requerido por el Ministerio de las Culturas de la provincia del Neuquén. La resultante sectorización del tramo estudiado fue caracterizada en función de estas clasificaciones, ofreciendo mapas de susceptibilidad a la inestabilidad estructural. Si bien cada una de estas clasificaciones fue diseñada en forma independiente, la aplicación de ambas nos permitió comparar sus resultados y tomar experiencia en el uso de cada una de ellas, lo cual será un gran aporte para decidir cómo continuar la evaluación de estabilidad del resto del Sistema Cavernario Cuchillo Curá.

En función de las observaciones en campo y los estudios geotécnicos desarrollados, se determinó que la caverna Arenal está contenida en un macizo rocoso de calidad mala a buena (RMR), afectada por discontinuidades sistemáticas y, particularmente, un nivel arcilloso que, por sus características expansivas, geométricas y de reducida resistencia, es considerado como el factor condicionante que más influye en la inestabilidad de la misma.

**Palabras clave:** IGC - índice Q - susceptibilidad cavernaria - arcillas expansivas.

1 Universidad Nacional del Comahue. Facultad de Ingeniería. Departamento de Geología y Petróleo. Neuquén, Argentina.

2 Ministerio de las Culturas del Neuquén-Dirección Provincial de Patrimonio Cultural-Depto Espeleología

## Abstract

The ANPCC currently contains the most extensive cave system in Argentina, with more than 5 kilometers extension represented by Arenal, Templo, Gendarme and Cabritos caverns.

The structural stability of these is undeveloped and the motivation of this work is to contribute with studies to the subject. To achieve this particular aim, two specific susceptibility analysis methodologies in cave systems were used, applying both in caves of karstic or volcanic origin, developed in recent years: The Geotechnical Cave Index (*Brandi et al., 2020*) and the Q Index, adapted by *Jordá-Bordehore (2017)*. Both classifications were applied to study a particular sector of the Arenal cave, leaving the rest of the cave system for future studies as required by the Ministry of Cultures of the province of Neuquén. The resulting zonification of the section studied was characterized based on these classifications, acquiring susceptibility to structural instability maps. Although each of the two classifications has been designed independently, the application of both showed us to compare their results and gain experience in the use of each of them, which will be a great contribution to decide how to continue the stability evaluation of the rest of the Cuchillo Curá Cave System.

Based on the infield observations and the geotechnical studies carried out, it was determined that the Arenal cavern is contained in a poor to good (RMR) rock mass quality, affected by systematic discontinuities and, particularly, a clayey level that, due to its expansive, geometric and low resistance characteristics, it is considered as the most determining factor that influences its instability.

**Keywords:** cave susceptibility - expansive clays – GCI - Q index.

## INTRODUCCIÓN

En la provincia del Neuquén, el cuidado del patrimonio espeleológico se rige con la Ley 2213/97 (“Régimen de Promoción, Protección y Conservación de la Espeleología”) cuya autoridad de aplicación es el Ministerio de las Culturas. A raíz de su importancia espeleológica se creó el ANPCC mediante decreto N° 161/2003 de la provincia del Neuquén, con el objetivo de preservación del sistema cavernario que aloja, considerado, al momento, el de mayor desarrollo del país (más de 5 kilómetros), distribuidos en cuatro cavernas alineadas consecutivamente de oeste a este: Arenal (1.299,50 metros), Templo (1.931,50 metros), Gendarme (1.691,18 metros) y Cabritos (83,10 metros). Entre ellas, las cavernas Arenal y Gendarme fueron motivo del informe de *Catinari et al., (2022)*, del cual se toma información para la presente publicación, en la cual se volcará un análisis geotécnico de estabilidad en la primera de las cavernas mencionadas.

El ingreso a estas cavernas conlleva un riesgo poco conocido relacionado a la peligrosidad de caída de bloques y desplomes del techo. La caída de rocas en un ambiente subterráneo es un proceso continuo en el tiempo que se desarrolla hasta alcanzar un estado de equilibrio, por lo que no se debe tomar como eventos únicos y aislados. Es decir, que la presencia de bloques caídos en el piso de una galería, un salón u otro ambiente espeleológico, indica un proceso gravitacional que probablemente continúe activo. Generalmente las caídas, desplomes o colapsos están asociados a factores condicionantes y desencadenantes. Entre los primeros, vale mencionar a aquellos relacionados con el tipo de material asociado (litología), las discontinuidades presentes (diaclasas, fallas, estratificación, etc.), la presencia de agua o flujos subterráneos (hidrogeología) y las condiciones geométricas (forma del techo, espesor de roca por encima, orientación de las discontinuidades respecto al espeleotema, entre otros). Por otro lado, los factores desencadenantes pueden estar

relacionados a la geodinámica externa (erosión superficial, cargas estáticas, factores climáticos, etc.), a la geodinámica interna (sismos) o antrópicos (circulación de vehículos sobre las cavernas, sismicidad inducida por actividades cercanas, etc.).

La escasa información desarrollada para este sistema cavernario, respecto a las amenazas existentes de procesos gravitacionales, limita la posibilidad de evaluar los riesgos que significa adentrarse en las mismas para actividades de investigación y exploración entre otras.

Con el objetivo de evaluar las condiciones de estabilidad de la caverna Arenal, se llevó a cabo la actualización del estudio realizado por *Elzeard et al., (2003a y 2003b)*, considerando una serie de objetivos específicos entre los que se puede mencionar: estudio y análisis de antecedentes de la caverna Arenal; relevamiento geotécnico en campo; y la aplicación de metodologías específicas de evaluación de estabilidad en sistemas cavernarios.

## ZONA DE ESTUDIO

La caverna Arenal (38°36'44.71"S; 70°23'42.71"O) forma parte del Sistema Cavernario Cuchillo Curá, principal atractivo del ANPCC. Se encuentra a 12 kilómetros hacia el sur desde la localidad de Las Lajas, Departamento Picunches, provincia del Neuquén. Se accede desde Ruta Nacional 40, por camino interno de la Estancia La Porteña (Figura 1).

El comportamiento geomecánico de la roca huésped del sistema cavernario presenta una estrecha relación con el marco geológico y tectónico de la misma. Dentro de un contexto geológico regional, se sitúan en la faja plegada y corrida del Agrio, afectada tectónicamente durante los movimientos ándicos que elevaron la cordillera de Los Andes.

En la Hoja 35b, Zapala (*Lambert, 1956*) se puede observar que el área de estudio se emplaza dentro de un sistema estructural denominados cordones Cuchillo Curá y Curymil, junto a la sierra de la Vaca Muerta, los cuales conforman un gran pliegue referido inicialmente como anticlinal de la Sierra de Vaca Muerta. El sistema cavernario fue desarrollado en el limbo norte de dicho pliegue y vinculado a la Formación La Manga como unidad hospedante de los procesos kársticos (*Elzeard, 1987; Anghilante et al., 1990*).

## ANTECEDENTES

Los trabajos de *Elzeard et al., (2003a y 2003b)* y *Catinari et al., (2022)* son considerados como únicos antecedentes de estudios geotécnicos encontrados para las cavernas Arenal y Gendarme. En el primero, se considera a ambas cavernas en un estado evolutivo senil, con procesos kársticos que ya no

están vigentes y que actualmente atraviesan una lenta evolución gobernada principalmente por procesos gravitacionales que dependen en gran medida de las propiedades mecánicas del macizo rocoso y cuya evolución hace que la geometría de las cavidades tienda hacia condiciones de estabilidad de forma natural.

De la espeleogénesis y evolución actual se mencionan procesos graviclásticos activos, controlados en gran medida por los planos de estratificación y por las diaclasas del macizo, discontinuidades que delimitan bloques que lentamente se separan del techo y paredes para finalmente caer. En forma restringida continúan procesos de disolución y reconstrucción por la infiltración de aguas de precipitación, deshielo y rocío.

Se debe considerar que, para esos tiempos, los métodos de evaluación de estabilidad de cavidades en macizos

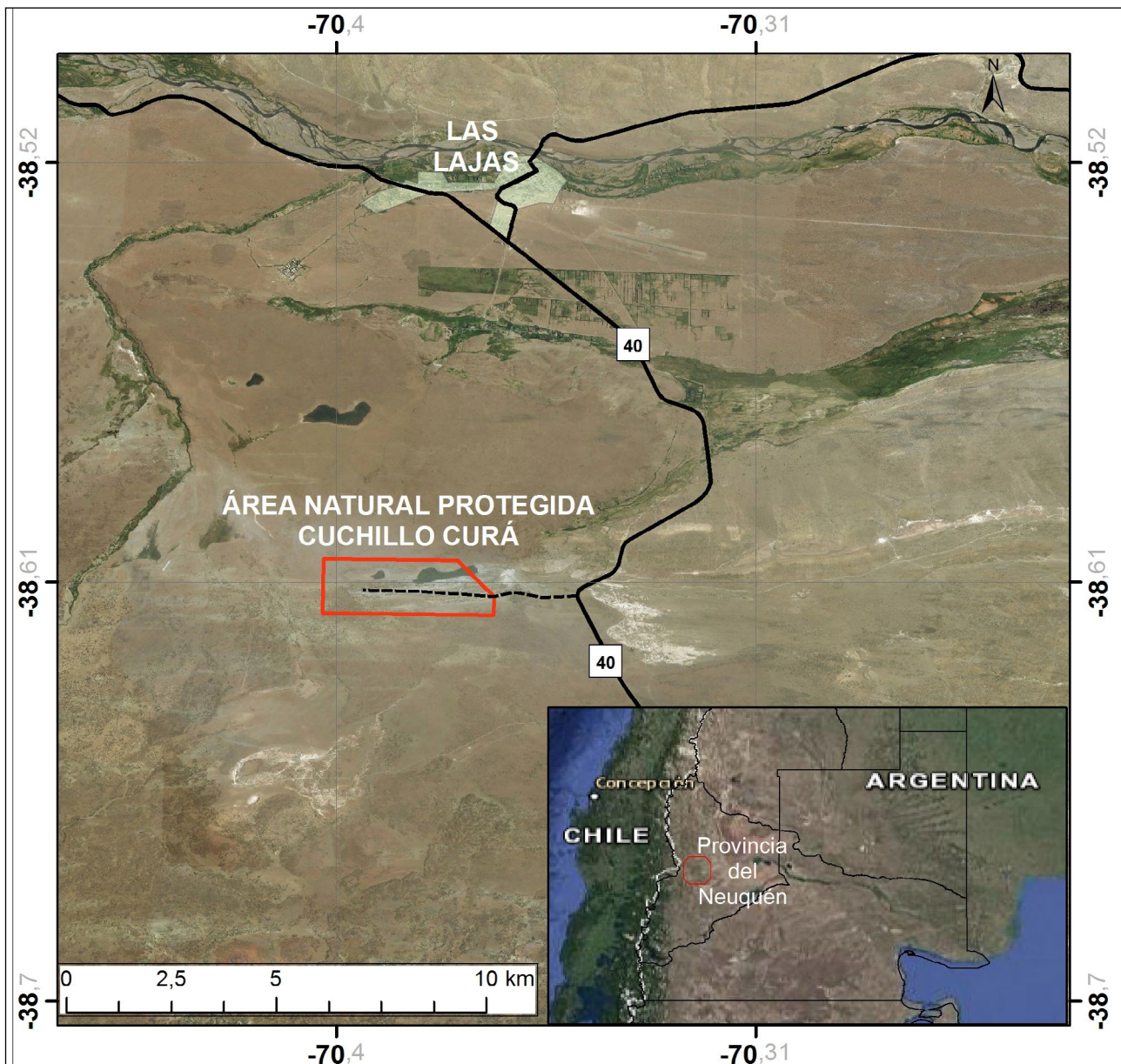


Figura 1. Mapa ubicación

rocosos habían sido desarrollados para el caso de túneles y cámaras perforadas en roca, los cuales no eran totalmente válidos o extrapolables para la evaluación de cavidades naturales. Por otro lado, los estudios de estabilidad de *Elzeard et al.*, (2003a y 2003b) fueron realizados considerando condiciones estáticas, es decir, sin que actúen agentes dinámicos como corrientes de agua, sismos o actividad antrópica, aunque consideran que la actividad sísmica es una de las principales causas que provocan desprendimientos de bloques, dependiendo particularmente de la intensidad del sismo.

Como criterio para definir los sectores transitables de bajo riesgo *Elzeard et al.*, (2003a y 2003b) consideraron, de manera cualitativa, aquellas áreas por donde se puede transitar sin quedar expuesto al riesgo por desprendimientos o caídas de bloques. Por ejemplo, para la caverna Gendarme han sugerido mantenerse del lado sur a partir de la progresiva 40 ya que se observan buenas condiciones de estabilidad.

Como antecedente importante referente a la presencia de agua, *Elzeard et al.*, (2003a y 2003b) describen ausencia de agua en las galerías. Sin embargo, en la década del 80 se manifestaba en varios sectores con profundidades de hasta 1 metro y a partir de la década del 90, el nivel fue descendiendo, secándose en su totalidad. Este descenso también se manifestó en la laguna de superficie, que para entonces se había reducido a la mitad de su superficie, lo que evidencia su vinculación con el nivel freático.

Entre las características geotécnicas principales *Elzeard et al.*, (2003a y 2003b) describen bancos de caliza estratificada con buzamiento variable entre 22° a 28° al norte; paredes y techo de caliza gris oolítica compacta y con baja densidad de fisuración o por un banco de brecha calcárea rojiza con clastos angulosos que alcanzan los 50 centímetros de diámetro, intensamente fracturado; los planos de estratificación se comportan como discontinuidades y tienen una importante participación en la evolución actual del macizo; 5 juegos de discontinuidades en la caverna Arenal y 7 juegos en la caverna Gendarme, incluyendo la estratificación; se clasificó al macizo rocoso mediante la clasificación SCIR (Consejo de Investigación Científica e Industrial por sus siglas en inglés) obteniendo la clasificación para la caverna Arenal como un macizo de calidad regular (53 puntos considerando el ajuste de -12 puntos por orientación desfavorable de las discontinuidades). En dicho trabajo, aclaran que la clasificación empleada (SCIR) fue diseñada para la excavación de túneles y no es apropiado su empleo para evaluar el sostenimiento de cavernas naturales. Además, se realizó el relevamiento de ubicación y características de bloques inestables con la mayor concentración de estos en el nivel superior y en los accesos al nivel inferior.

## METODOLOGÍA

El relevamiento fue realizado en todos aquellos sectores que permitían el paso del equipo sin la utilización de técnicas especiales. Quedaron excluidos del estudio el sector

oriental de la caverna Arenal, por tratarse de una galería de difícil transitabilidad, y el extremo occidental. Para la actualización del estudio de estabilidad se acudió al uso de clasificaciones geotécnicas específicas para cavernas naturales, el Índice Geotécnico de Cavernas (IGC) e Índice Q, desarrolladas con posterioridad al primer trabajo de *Elzeard et al.*, (2003a y 2003b). Se explicarán ambas clasificaciones brevemente para luego clasificar cada uno de los sectores de la caverna en función de estas y poder determinar su situación de estabilidad.

### Índice Geotécnico de Cavernas

El IGC, fue propuesto por *Brandi et al.*, (2020), quienes, apoyándose en la clasificación geomecánica de *Bieniawski* (1978, 1989), clasificaron a las cuevas según su susceptibilidad a la inestabilidad estructural, considerando cuatro variables: 1) la RMR (clasificación geomecánica Rock Mass Rating) de *Bieniawski* (1989), que clasifica al macizo rocoso que contiene al sistema de cavernas; 2) el radio hidráulico (RH), variable de ingeniería que permite evaluar la dimensión del vano; 3) la forma del techo (CS), es una variable espeleológica que indica si la geometría del techo de los vanos de la cueva es favorable o desfavorable; y 4) el espesor del techo (CT), que es una variable geotécnica que representa la profundidad entre el techo de la cueva y la superficie del suelo exterior en cuanto a cuestiones de auto-soporte. Las variables RMR, RH, CT (cuantitativas) y CS (cualitativa), inducen diferentes efectos en la clasificación IGC, dependiendo de la combinación de estas variables en su ecuación ( $IGC = RMR + RH + CS + CT$ ), cuanto mayor sean los valores de RMR y CT habrá mayor contribución a una mejora del IGC, llevando la clasificación a muy baja susceptibilidad a la inestabilidad estructural. Con el RH ocurre lo contrario, cuanto mayor sea su valor, contribuirá a una peor clasificación del IGC, conduciendo a una susceptibilidad muy alta a la inestabilidad estructural. Respecto a la CS, la clasificación empeora o mejora según el tipo de forma del techo. Así, la clasificación IGC discrimina en 5 clases de susceptibilidad a la inestabilidad estructural de los vanos (Tabla 1).

La determinación del RMR fue realizada en campo, tomando descripciones de parámetros específicos requeridos para su determinación (resistencia a la compresión simple, RQD [Índice de Calidad de Roca por sus siglas en inglés: *Rock Quality Designation*], espaciamiento, características de las juntas y condiciones hidrogeológicas). Se seleccionaron distintos sitios elegidos intencionalmente según cambios observados en el macizo rocoso (estaciones geomecánicas), para relevar los parámetros recién mencionados.

Para evaluar las condiciones del CT y RH se emplearon las cartas topográficas existentes para modelar y tomar información de las mismas mediante herramientas de sistemas de información geográfica.

Particularmente para la CS, la única de las cuatro variables que se determina de manera cualitativa, se realizó una serie de secciones del relevamiento topográfico mediante la implementación de herramientas de medición láser y por in-

**Tabla 1. Peso asignado a cada clasificación y rango de clase de las cuatro variables del Índice Geotécnico de Cavernas y grado de susceptibilidad a la inestabilidad estructural en función de la sumatoria de los pesos asignados.**

VARIABLE IGC	CLASIFICACIÓN	RANGO DE CLASE	PESO
Rock Mass Rating (RMR)	Muy mala	0-20	0
	Mala	21-40	15
	Media	41-60	30
	Buena	61-80	45
	Muy Buena	81-100	60
Radio Hidráulico (RH)	Grande	1,83 - 3,00 (m)	0
	Regular	0,92 - 1,82 (m)	15
	Pequeño	0,00 - 0,91 (m)	25
Forma del Techo (CS)	Arco invertido (AI)		0
	Planar (P)		4
	Arco (A)		10
Espesor del Techo (CT)	Pequeño	0,00 - 3,31 (m)	0
	Regular	3,32 - 7,64 (m)	2
	Grande	7,65 - 10 (m)	5
Susceptibilidad a la inestabilidad estructural			IGC
MUY BAJA			IGC > 80
BAJA			60 < IGC < 80
MODERADA			40 < IGC < 60
ALTA			20 < IGC < 40
MUY ALTA			IGC < 20

interpretación visual subjetiva.

Para la asignación de valores del RMR, radio hidráulico (RH), la forma del techo (CS) y el espesor (CT), *Brandi et al., (2020)* propusieron separar en clases a cada una de las variables, asignando diferente peso a cada una (Tabla 1).

### Índice Q

Muchas de las cuevas naturales existentes, si se analizan mediante un enfoque ingenieril que suele aplicarse a excavaciones subterráneas, podrían resultar aparentemente inestables cuando se representan en gráficos empíricos, y requerirían refuerzos incompatibles con la posibilidad de ser aplicados sobre los espeleotemas. El Índice Q de *Barton et al., (1974)*, es uno de los métodos empíricos más empleados al momento de llevar adelante este tipo de excavaciones subterráneas, y no es totalmente compatible para la evaluación de cavernas naturales. Sin embargo, *Jordá-Bordehore (2017)* propone una adaptación del Índice Q contribuyendo con una curva de estabilidad (Span = 5,4 Q0,73) para las cuevas naturales, que consta de dos zonas: 1) donde se representan las cuevas estables; 2) donde se ubican las cuevas inestables o

colapsadas. Esta adaptación fue realizada en base a la evaluación de 137 cavernas (53 cavernas kársticas y 74 cavernas volcánicas).

El Índice Q, fue desarrollado por el Instituto Geotécnico de Noruega por *Barton et al., (1974)*. Este índice asigna una puntuación a cada dominio del macizo rocoso, que aumenta con la calidad de la roca. Su variación no es lineal como la RMR, sino exponencial, y oscila entre 0,001 (roca muy pobre) y 1.000 (roca muy buena). Se puede obtener en función de:

$$Q = \frac{RQD}{J_n} * \frac{J_r}{J_a} * \frac{J_w}{SRF} \quad (1)$$

Donde RQD es la clasificación Índice de Calidad de Roca (*Deere, 1964*) determinada en campo según metodología de *Priest y Hudson (1976)*;  $J_n$  es el número de juntas de diaclasas;  $J_r$  es el número de rugosidad de las juntas;  $J_a$  es el número de alteración de las juntas;  $J_w$  es el factor de reducción de agua en las juntas; y el SRF es el factor de reducción por tensión.

Al igual que para la determinación del RMR empleada para clasificar al macizo con el IGC, se asignaron estaciones geomecánicas para el relevamiento de estos parámetros en cada sitio, además de tomar el registro de las dimensiones de las cavernas para poder entrar a la gráfica propuesta por Jorda-Bordehore (2017).

## RELEVAMIENTO GEOTÉCNICO

### Discontinuidades sistemáticas

La descripción y características de las discontinuidades sistemáticas (diaclasas y planos de estratificación convencionales), junto a la medición de otras variables que se verán a continuación, fue realizada con el objetivo de poder abordar las clasificaciones RMR (Bieniawski, 1989), IGC (Brandi et al., 2021) e Índice Q (Barton et al., 1974) que serán desarrolladas en los próximos apartados. La disposición espacial de las discontinuidades descritas en la caverna estudiada, fueron volcadas en una red estereográfica de Wulf (Figura 2), a partir de las cuales se puede observar 3 sistemas de familias predominantes, acompañadas de otras juntas.

Para la adquisición en campo de esta información se designaron estaciones de relevamiento de datos (estaciones geomecánicas) en distintos sectores del sistema hipogeo y en superficie, a fin de caracterizar al macizo rocoso en general y en sectores particulares y así tener herramientas que aporten a la zonificación del mismo y a posteriores interpretaciones.

Respecto a las características geométricas del sistema cavernario, a partir del relevamiento topográfico (Redonte et al., 2018) y análisis mediante modelado IDW (ponderación de distancia inversa por sus siglas en inglés) con herramientas SIG (Sistemas de Información Geográfica), se obtuvo un mapa de espesor del techo (Figura 3). Además, se obtuvo el área y perímetro de cada sector para calcular el Radio Hidráulico y se buscó conocer la forma del techo en distintos puntos de las cavernas, para lo cual se realizaron secciones topográficas empleando herramientas de medición láser.

### Discontinuidades singulares

El sistema de cavernas está constituido por roca caliza. Elzeard (1987) describe 7 bancos, todos compuestos por calizas oolíticas con excepción de la brecha calcárea (banco 6). En este trabajo se agrega un nivel hallado entre el banco 5 y el banco 6, principalmente compuesto por arcillas grises, blancas y rojizas (con cierto grado de expansividad a juzgar por la presencia de grietas de desecación en el suelo de los salones y por determinaciones indirectas que serán abordadas más adelante), con espesor variable de entre escasos centímetros a sectores que podría alcanzar los 50 centímetros. Este nivel se observa tanto en superficie como en el hipogeo (Figura 4); desde el extremo oeste relevado de la caverna Arenal, hasta el sector más oriental alcanzado en la caverna Gendarme (no se ingresó a la caverna Templo para constatar su presencia ni características, pero se estiman condiciones similares a las observadas al este y al oeste de la misma).

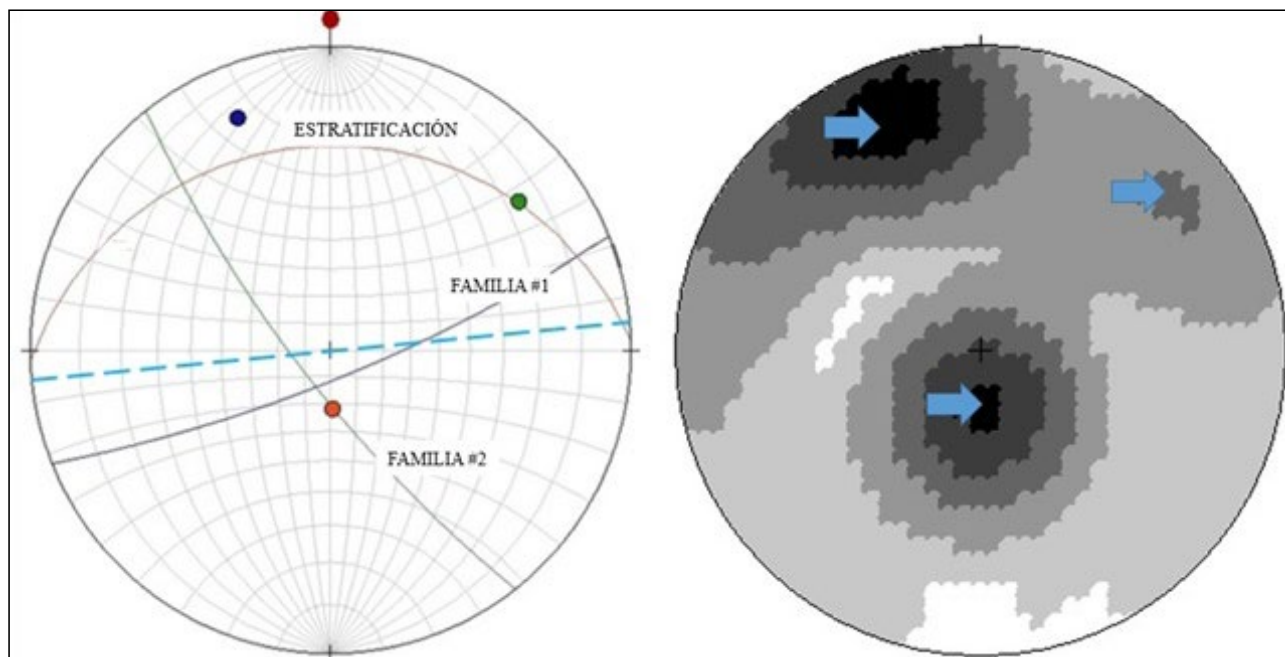
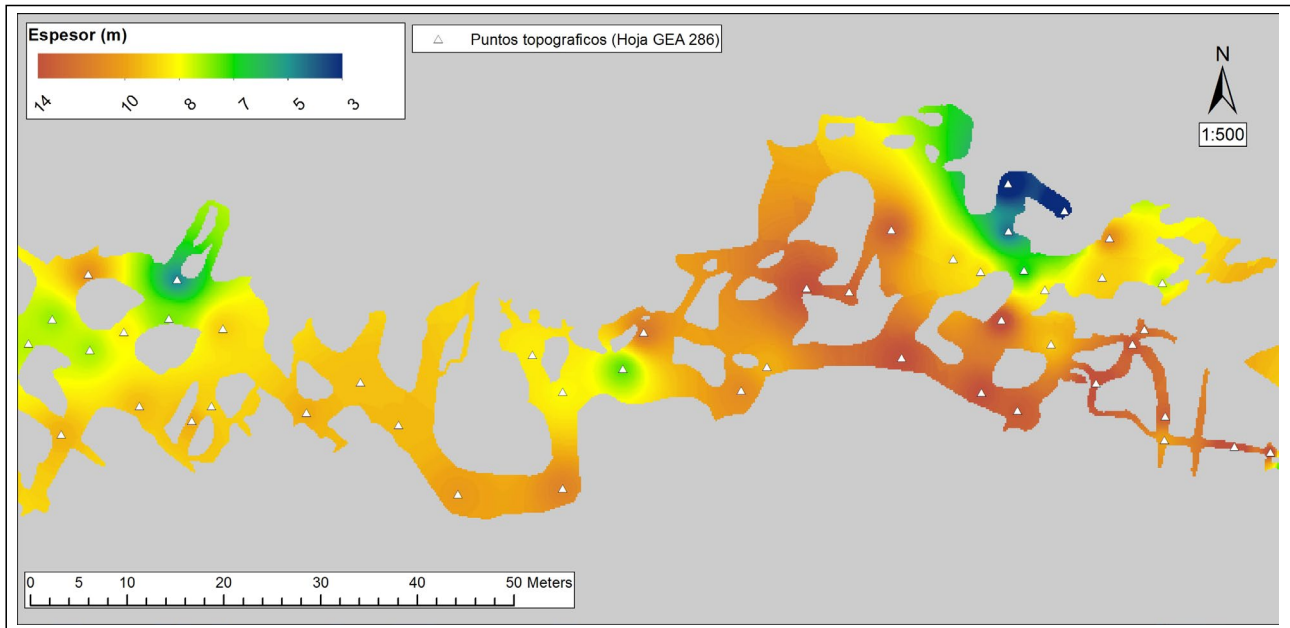


Figura 2. Izquierda: Representación de las 3 familias principales en caverna Arenal: Estratificación (rojo: Az 268°; i22° N); Familia #1 (azul: Az 68°; i79° SE); Familia #2 (verde: Az 142°; i 77° SO). A estas 3 familias de discontinuidades (estratificación incluida), acompañan otras juntas no representadas. Las familias de discontinuidades permanecen con similares comportamientos en su orientación. El círculo máximo de trazos azules representa la orientación principal del Sistema Cavernario Cuchillo Curá (rumbo general al azimut 85°). La fuerte correlación entre el rumbo de la estratificación y el sistema de cavernas sugiere que la primera controló el desarrollo de las mismas. Derecha: red estereográfica de Wulf representando diagrama de contornos de Schmidt (shadow 1%) para 40 discontinuidades de la caverna Arenal. Las flechas azules señalan las mayores concentraciones de polos.



**Figura 3. Modelado IDW del espesor del techo en cada sector de la caverna Arenal, a partir de puntos topográficos de la Hoja GEA 286 (Redonte et al., 2018).**

Este banco es uno de los factores condicionantes que más influye en la estabilidad de las cavernas Arenal y Gendarme. A juzgar por su espesor, amplia extensión y baja resistencia a la compresión simple (estimada entre 0,05 y 0,1 MPa en función de los índices de campo de *Brown, 1981*), puede ser considerado como una discontinuidad singular (en el sentido de *González de Vallejo et al., 2002*). Se observan espeleotemas de tipo coladas y estalagmitas cónicas asociadas a las superficies donde este nivel arcilloso queda expuesto dentro de galerías y salones, lo que evidencia que dicha discontinuidad constituye una vía preferente para la circulación de agua. Además, su orientación paralela a la dirección del eje principal de ambas cavernas (este-oeste) es una condición

desfavorable y se intersectan en todo el tramo recorrido. Por otro lado, al ser un plano de gran continuidad, atraviesa toda la sección y corta las discontinuidades de tipo sistemático (diaclasas) generando cuñas e inestabilidades de gran tamaño, caída de bloques y hasta colapsos. Su resistencia, es muy inferior al resto del macizo rocoso y puede estar sometida a presiones intersticiales constituyendo planos principales de rotura, siendo el propio relleno quien constituye los mismos.

Por todo lo recientemente expuesto, este nivel de arcillas será considerado a lo largo del presente estudio, como un plano de debilidad que controla tanto la morfología como la estabilidad de las cavernas.



**Figura 4. A la izquierda: Afloramiento del nivel arcilloso en superficie; expuesta por la antigua actividad minera. A la derecha: Intersección del sector M de la caverna Arenal con el nivel arcilloso (plano inclinado de coloración grisácea con tintes rojizos, anaranjados y amarillos). Se observan espeleotemas de tipo coladas, de coloración amarillo. La brecha rojiza (banco 6) se observa encima con tonalidades rojizas, amarillas y naranjas.**

El estudio de discontinuidades singulares como la reacción descripta, es uno de los aspectos geológicos más importantes para conocer la estabilidad de infraestructuras subterráneas. Por lo tanto, se dará mayor detalle respecto a las características de expansividad de la misma en un apartado.

### Expansividad de las arcillas

Es de alto interés conocer el potencial de expansividad de las arcillas presentes ya que el proceso de expansión/contracción durante las variaciones de humedad podría ser un factor desencadenante de procesos gravitacionales, desestabilizando bloques del techo y/o paredes del sistema cavernario.

A efectos prácticos, dado que la expansividad se relaciona con el contenido arcilloso, es habitual emplear parámetros de caracterización de arcillas para evaluar y graduar su posible expansividad. Generalmente se consideran cuatro grados de expansividad y existen tres metodologías principales para clasificarlas:

1) Por identificación mineralógica, es muy útil para determinar el material y sus propiedades básicas, pero no son prácticas ni económicas para consideraciones geotécnicas. La composición mineralógica de los suelos expansivos tiene una influencia importante en la expansión potencial. Por lo tanto, el potencial de hinchamiento de cualquier arcilla se puede evaluar mediante la identificación del mineral constituyente. Las cinco técnicas que se pueden utilizar son las siguientes: Difracción de Rayos X; Análisis Térmico Diferencial; Adsorción de tintes; Análisis químicos; Microscopio electrónico de barrido;

2) Por métodos indirectos a partir de propiedades básicas de la arcilla: Límites de Atterberg; Límites de contracción; Ensayo de expansión libre; Contenido de coloides; y

3) Por métodos directos, mediante el uso del consolidómetro. Ofrecen información muy útil para cálculos ingenieriles.

Para el presente estudio se optó por evaluar la expansividad de las arcillas mediante métodos indirectos: 1) relacionando los límites de Atterberg; y 2) por medio de ensayos de expansión libre (FST por sus siglas en inglés).

Holtz y Gibbs (1956) demostraron que el índice de plasticidad y el límite líquido son índices útiles para determinar las características de hinchamiento de la mayoría de las arcillas. A su vez, Seed et al., (1962) han demostrado que el

**Tabla 2. Clasificación de expansión del suelo basado en el Índice de Plasticidad (IP).**

GRADO DE EXPANSIÓN	IP (%)		
	Holtz y Gibbs (1956)	Chen (1975)	IS 1498 (1970)
BAJO	< 20	< 15	< 12
MEDIO	12 - 34	10 - 35	12 - 23
ALTO	23 - 45	20 - 55	23 - 32
MUY ALTO	> 32	> 35	> 32

índice de plasticidad por sí solo puede usarse como una indicación preliminar de las características de hinchamiento de la mayoría de las arcillas y esta postulación fue seguida de numerosos trabajos propuestos por distintos autores, entre los que podemos destacar los trabajos de Chen (1975) e IS 1498 (1970) entre otros (Tabla 2).

Se tomaron cuatro muestras del nivel arcilloso, dos de ellas de la caverna Arenal. Las mismas fueron ensayadas bajo norma ASTM D 4318 para determinar los límites de Atterberg y clasificarlas en función del IP según diferentes autores (Tabla 3 y Tabla 4).

Por otro lado, el Ensayo de Expansión Libre (FST por sus siglas en inglés: Free Swell Test) es un procedimiento sencillo que registra el aumento del volumen expresado en porcentaje. Fue propuesto por Holtz y Gibbs (1956), pero no recomendaron ningún valor de referencia para su clasificación, por lo tanto, el criterio aplicado en este estudio para clasificar al suelo en función del resultado alcanzado es según IS 1498 (1970) y cuyos resultados se puede observar en la Tabla 5.

En función de las observaciones del nivel arcilloso (coloración, textura y contenido de minerales de carbonato de calcio) y de las clasificaciones de las mismas por límites de Atterberg, se puede caracterizar al nivel de arcillas como margas de grado bajo a medio de expansividad.

## CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DEL MACIZO ROCOSO

Habiendo descripto las características de las discontinuidades sistemáticas, de la discontinuidad singular y propiedades de expansividad de las arcillas, se avanzó con la

**Tabla 3. Descripción macroscópica y parámetros índices de las muestras analizadas.**

Muestra	CAVERNA	SECTOR	FST	Límites Atterberg				DESCRIPCIÓN
				LL	LP	IP	Clasif. SUCS	
C002	Arenal	AM	47%	52	25	26	CH	Arcilla de coloración gris. Resistencia estimada en 0,05 a 0,1 Mpa (ISRM, 1981). Contiene Slickensides y otros minerales blancos. Reacciona al HCl.
C003	Arenal	AM	29%	37	23	14	CL	Brecha matriz sostén, de coloración rojiza. Sus clastos subangulosos de variados tamaños son monomicticos (caliza) y la matriz arcillosa de coloración rojiza. Resistencia estimada en 5 a 25 Mpa (ISRM 1981). Reacciona al HCl.



**Tabla 4. Clasificación de las muestras analizadas en función del grado de expansividad basado en el Índice de Plasticidad propuesto por diferentes autores.**

Muestra	IP (%)	Holtz y Gibbs (1956)	Chen (1975)	IS 1498 (1970)
C002	26	Medio-Alto	Medio-Alto	Alto
C003	14	Bajo-Medio	Bajo-Medio	Medio

**Tabla 5. Clasificación de suelos en función del porcentaje de expansividad del FST (IS 1498 (1970)) y los resultados obtenidos.**

IS 1498 (1970)		CLASIFICACIÓN MUESTRAS ANPCC		
GRADO DE EXPANSIÓN	(%)	MUESTRAS	FST	CLASIFICACIÓN IS 1498 (1970)
BAJO	< 50	C002	47%	BAJO
MEDIO	50 - 100	C003	29%	BAJO

sectorización interna de la caverna Arenal, tomando observaciones y datos específicos, para clasificar en función del RMR e Índice Q cada uno de los distintos sectores predeterminados.

La puntuación RMR básica es corregida restando 12 puntos debido a la orientación desfavorable de las cavernas respecto al rumbo paralelo de la estratificación, que como se expresó en el capítulo precedente, controla la estabilidad de las cavernas a partir del plano de debilidad singular con arcillas.

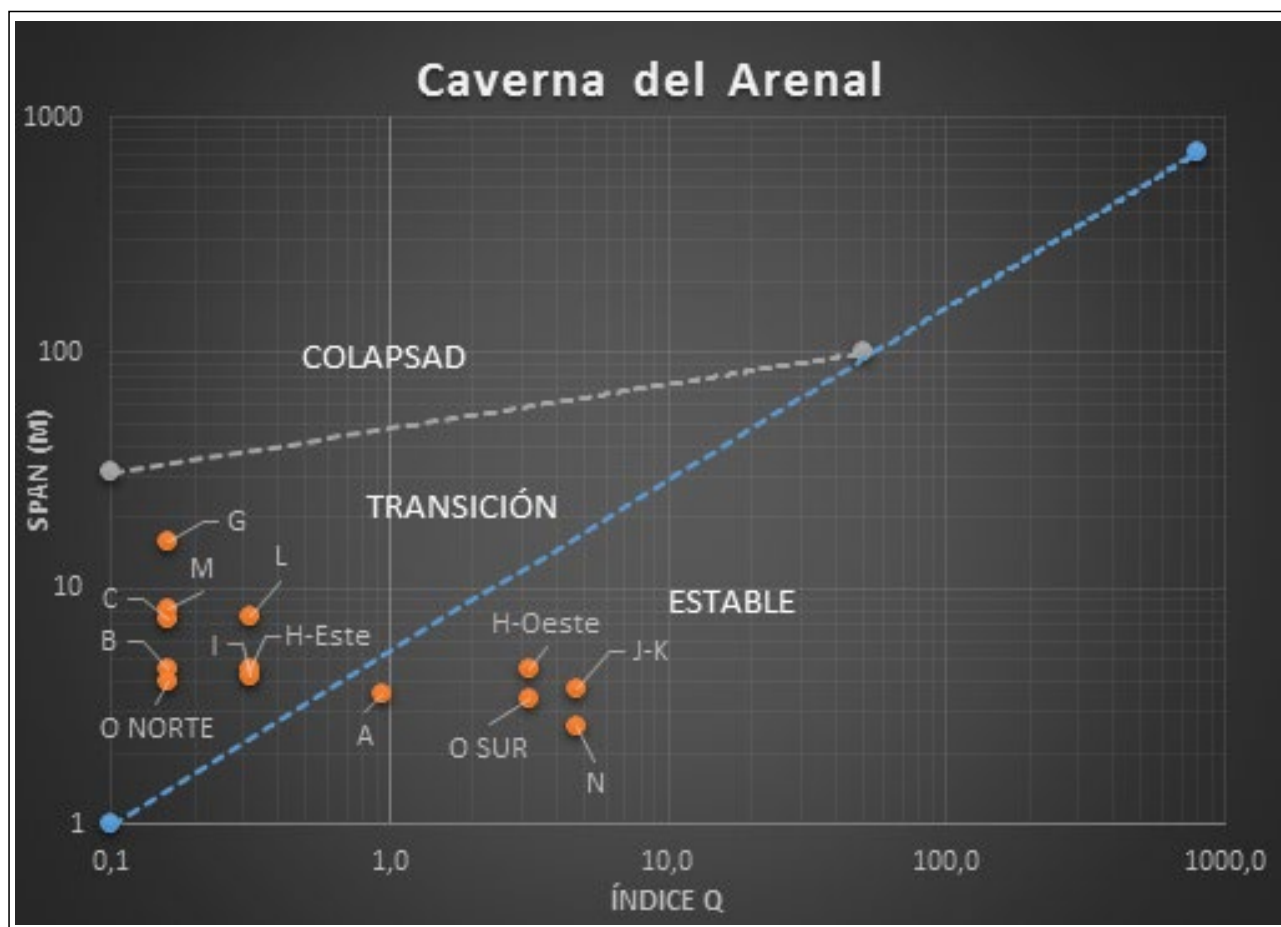
A partir de las clasificaciones RMR y Q la forma del techo, el espesor por encima del mismo, el radio hidráulico y las dimensiones (ancho), se procedió a ponderar cada variable para cada sector de la caverna, aplicando las clasificaciones IGC (Tabla 6) y la adaptación del Índice Q de *Jordá-Bordehore (2017)* (Tabla 7 y Figura 5), alcanzando los mapas de clasificación sectorizada (Figura 6).

**Tabla 6. Información de base y ponderación para clasificación IGC (Brandt et al., 2020) para la caverna Arenal del Sistema Cavernario Cuchillo Curá.**

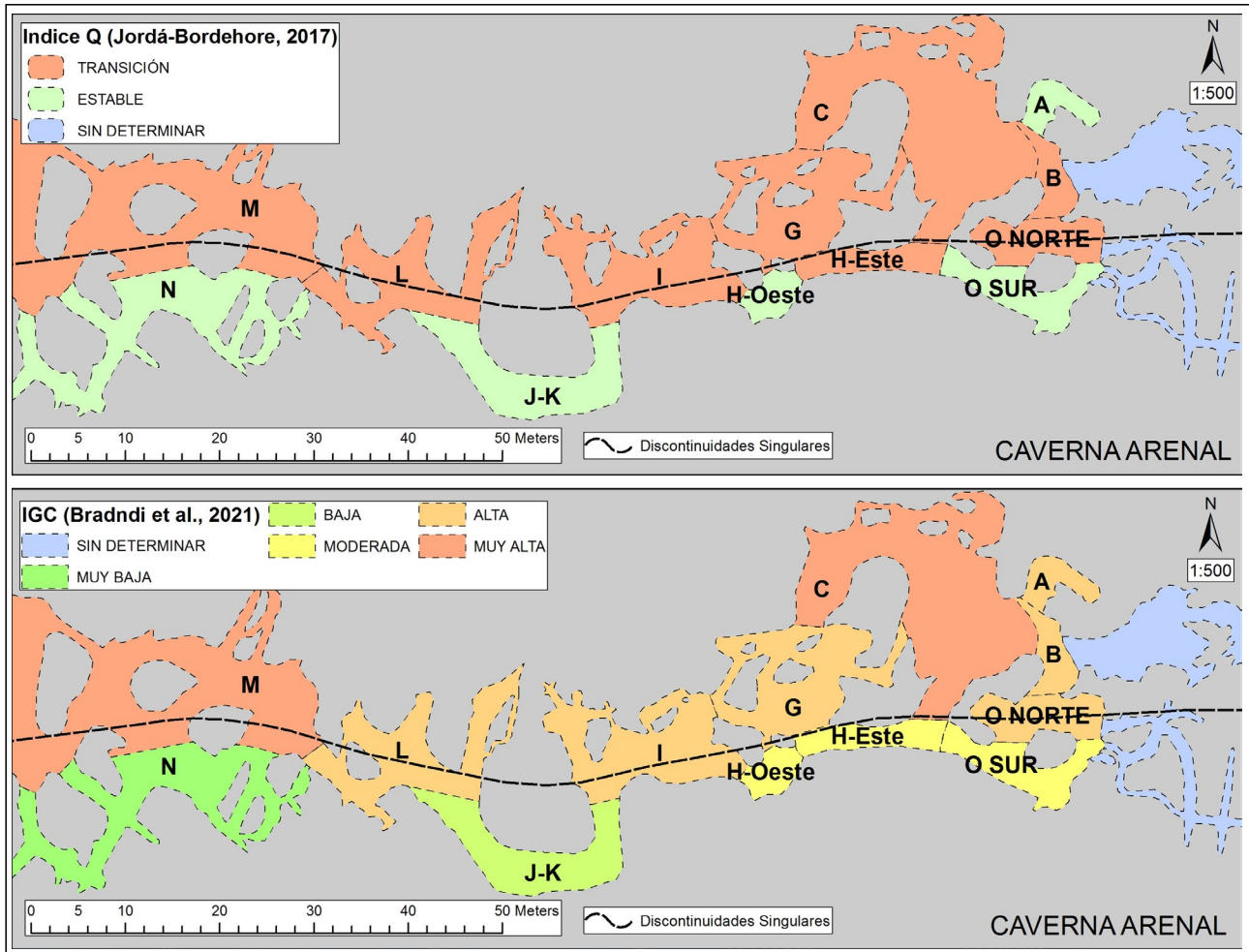
CAVERNA	SECTOR	ÁREA (m <sup>2</sup> )	DESCRIPCIÓN					PUNTUACIÓN					SUSCEPTIBILIDAD A LA INESTABILIDAD ESTRUCTURAL	
			PERÍM. (m)	RH	RMR	CS	CT	RH	RMR	CS	CT	IGC		
ARENAL	A	25,6	26,4	0,97	37	Mala	A Inv.	Small	15	15	0	0	30	Alta
ARENAL	B	29,1	30,9	0,94	37	Mala	A Inv.	Regular	15	15	0	2	32	Alta
ARENAL	C	289,3	139,1	2,08	37	Mala	A Inv.	Regular	0	15	0	2	17	Muy Alta
ARENAL	G	131,5	116,5	1,13	32	Mala	A Inv.	Large	15	15	0	5	35	Alta
ARENAL	H-Este	41,3	37,9	1,09	57	Media	Arco	Large	15	30	10	5	60	Moderada
ARENAL	H-Oeste	23,4	20,6	1,14	57	Media	Arco	Large	15	30	10	5	60	Moderada
ARENAL	I	136,8	102,4	1,34	37	Mala	A Inv.	Regular	15	15	0	2	32	Alta
ARENAL	J-K	103,8	68,0	1,53	72	Buena	Planar	Large	15	45	4	5	69	Baja
ARENAL	L	129,7	124,2	1,04	34	Mala	A Inv.	Regular	15	15	0	2	32	Alta
ARENAL	M	454,4	235,8	1,93	29	Mala	A Inv.	Regular	0	15	0	2	17	Muy Alta
ARENAL	N	214,0	238,6	0,90	64	Buena	Arco	Large	25	45	10	5	85	Muy Baja
ARENAL	O NORTE	56,4	38,7	1,46	37	Mala	A Inv.	Large	15	15	0	5	35	Alta
ARENAL	O SUR	58,4	51,3	1,14	57	Media	Arco	Large	15	30	10	5	60	Moderada

**Tabla 7. Descripción y ponderación de los parámetros requeridos para caracterización por Índice Q.**

CAVERNA	SECTOR	DESCRIPCIÓN	RQD	Jn	Jr	Ja	Jw	SRF	Índice Q
ARENAL	A	Sector de portal, con RQD de 99,16%, cuatro familias de discontinuidades y algunas ocasionales, con juntas rugosas a irregular planares, ligeramente alteradas. Seco a ligeramente húmeda. Roca competente, esfuerzos bajos cercanos a superficie ( $ECS/\sigma_1 > 200$ ).	95	30	1,5	2	1	2,5	0,95
ARENAL	B, C, G, M y O-NORTE	Sectores con RQD que supera el 99%. Se describieron tres familias y algunas juntas, con un nivel continuo que contiene minerales arcillosos de espesor considerable para impedir el contacto entre las caras; expansividad de arcillas media a baja; goteo de agua.	95	12	1	10	1	5	0,16
ARENAL	H-ESTE	RQD superior a 99%. Se describieron tres familias y algunas juntas. Toma influencia, aunque sin intersectar con la cavidad, un nivel continuo que contiene minerales arcillosos de espesor considerable para impedir el contacto entre las caras; expansividad de arcillas media a baja; goteo de agua.	95	12	1	10	1	2,5	0,32
ARENAL	H-OESTE y O-SUR	RQD superior a 99%. Se describieron tres familias y algunas juntas. Juntas suaves a onduladas con caras ligeramente alteradas y algunos minerales no reblandecibles, libre de arcillas. Seco. Roca competente, esfuerzos bajos cercanos a superficie ( $ECS/\sigma_1 > 200$ ).	95	12	2	2	1	2,5	3,17
ARENAL	I y L	Sectores con RQD que supera el 99%. Se describieron dos familias y algunas juntas, con un nivel continuo que contiene minerales arcillosos de espesor considerable para impedir el contacto entre las caras; expansividad de arcillas media a baja; goteo de agua.	95	6	1	10	1	5	0,32
ARENAL	J-K	Sector con RQD superior a 99%. Se describieron dos familias y algunas juntas, con superficies rugosas a irregular planares, ligeramente alteradas. Seco a ligeramente húmedo. Roca competente, esfuerzos bajos cercanos a superficie ( $ECS/\sigma_1 > 200$ ).	95	6	1,5	2	1	2,5	4,75
ARENAL	N	RQD mayor a 99%. Se describieron tres familias y algunas juntas, rugosa a irregular ondulada. Ligeramente alteradas. Seco a ligeramente húmedo. Roca competente, esfuerzos bajos cercanos a superficie ( $ECS/\sigma_1 > 200$ ).	95	12	3	2	1	2,5	4,75



**Figura 5. Dispersión de puntos (sectores de las cavernas) sobre la gráfica propuesta por Jordá-Bordehore (2017) en función del Índice Q y el span (ancho de cavidad), para determinar el estado de estabilidad de cada sector.**



**Figura 6.** Zonificación de la caverna Arenal en función de la susceptibilidad a la inestabilidad estructural de las clasificaciones de Jordá-Bordehore (2017) y Brandt et al., (2021). Puede observarse como la intersección entre el plano de debilidad arcilloso con la cavidad controla la estabilidad de la caverna. Desde la intersección, hacia el norte el comportamiento es de alta a muy alta susceptibilidad a ser inestable según el IGC o de transición según el Índice Q de Jorda-Bordehore (2017).

En los mapas desarrollados, se puede apreciar el fuerte control que ejerce el plano de debilidad arcilloso. Hacia el norte de la intersección entre esta discontinuidad con la caverna, y en las zonas donde esta tiene influencia, el sistema se presenta con inestabilidad activa según los resultados de las clasificaciones empleadas y por observación directa de bloques caídos, cicatrices de rotura o desprendimiento relativamente frescos en el techo de algunos sectores, y por diferencias entre algunas secciones topográficas relevadas durante las campañas de campo.

## DISCUSIÓN Y RECOMENDACIONES

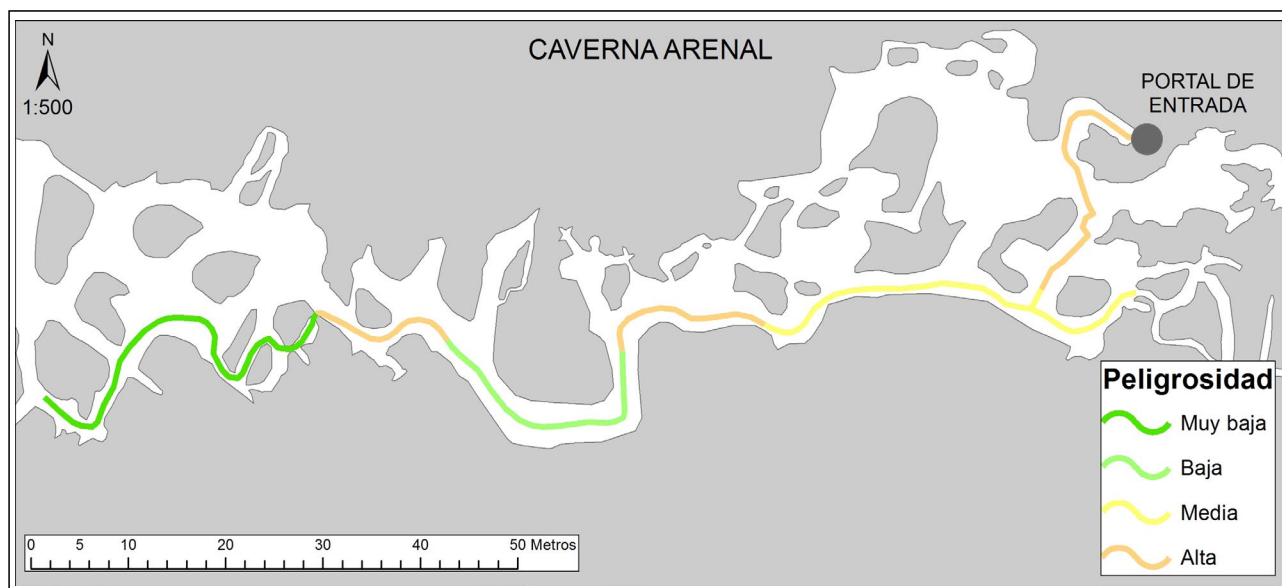
El sendero de menor riesgo se propone en función de la estabilidad estructural determinada mediante las clasificaciones IGC de Brandt et al. (2020) y el Índice Q con la adaptación de Jorda-Bordehore (2017) (Figura 7). Sin embargo, para alcanzar los sectores de menor peligrosidad, se debe atravesar áreas con muy alta susceptibilidad a caída de bloques, desprendimientos, colapsos, etc. Por lo tanto, se propone re-

ducir la exposición para disminuir el riesgo, es decir, reducir el tiempo de tránsito por las zonas inestables.

### Indicadores cinemáticos de falla

En este trabajo se destaca la presencia de slickensides (Figura 8) desarrolladas sobre las arcillas y la presencia de planos con marcas de arrastre tectónico (Figura 9) impresas sobre planos de bloques de calizas oolíticas (banco 5), subyacentes al nivel arcilloso.

Las marcas de arrastre tectónico asociadas al contacto entre los bancos 5 y 6 de Elzeard (1987) y las slickensides en arcillas podrían sugerir una estructura de fallamiento, del tipo de falla de estratificación; el plano basal de un pliegue por flexión de falla; o un flexodeslizamiento, donde los planos de estratificación son superficies activas que facilitan el deslizamiento entre los mismos. De ser así, se podría considerar al nivel arcilloso como harina de falla y a la brecha rojiza (banco 6) en el hanginwall como brecha de falla rojiza, con clastos de tamaños variados, angulosos y monomicticos. La posterior circulación de fluidos por esta estructura y la



**Figura 7. Sendero de transitabilidad evaluado. Modifica levemente al propuesto por Elzeard et al., (2003a) y agrega el grado de peligrosidad en cada tramo en función de la clasificación IGC y observaciones de campo.**

brecha, habrían alterado la roca a arcillas rojas (arcillas con óxidos de hierro), debilitando considerablemente al macizo rocoso donde dicha estructura lo cruza.

#### Expansividad de las arcillas

Como bien se mencionó precedentemente, a juzgar por la presencia de minerales del grupo de los carbonatos (reacción al ácido clorhídrico), por su textura suave y plástica típica del material fino (arcillas) y por la clasificación resultante (CH, CL y ML), se sugiere que el material analizado está compuesto por arcillas y carbonatos en proporciones adecuadas para ser calificadas como margas. Su coloración rojiza a anaranjada podría estar relacionada a la oxidación de minerales de hierro. En función de los resultados de laboratorio del ensayo de FST se observa que existe expansividad del material en un grado bajo. Por otro lado, en función del índice de plasticidad se puede estimar el grado de expansividad entre bajo a alto según la clasificación de referencia (Holtz y Gibbs (1956), Chen (1975) o IS 1498 (1970)).

Se sugiere continuar con más estudios para obtener mayor detalle y precisión de las características del material arcilloso: determinación mineralógica, ensayos directos de expansión, muestreo sistemático, entre otros.

#### Consideraciones geotécnicas y auscultación

El control geológico-geotécnico puede realizarse por diferentes motivos, siendo el principal objetivo mantener la seguridad, detectando a tiempo los fallos potenciales del terreno. La supervisión puede realizarse mediante inspección visual rigurosa y metódica y/o por instrumental.

La observación del terreno requiere el conocimiento, entre otros, de la geología estructural, el estado del techo, de las propiedades de la roca, de las aguas subterráneas y tensiones del subsuelo, así como la interacción de todos estos factores.

La Figura 7 muestra el sendero de menor riesgo que se propone en este trabajo, realizado en función del análisis geotécnico y las clasificaciones geomecánicas empleadas a lo largo del presente estudio. Se puede observar que se atraviesa por sitios de mediana, alta y muy alta susceptibilidad a la inestabilidad estructural (caída de bloques, colapsos, etc.). Por lo tanto, fueron sugeridas tomar medidas de estabilización, saneamiento y prevención en aquellos sectores de mayor peligrosidad para disminuir el riesgo durante el tránsito de personas. Entre estas medidas se sugiere: evaluar la posibilidad de llevar a cabo el saneamiento por palanqueo para retirar o disminuir la energía potencial de bloques y rocas pequeñas que se encuentren en equilibrio sensible, ubicados en altura y en sectores de paso obligado; evaluar la posibilidad de implementar medidas de protección y/o estabilización en sectores inestables de paso obligado (portales de entrada y otros sectores); y, finalmente, mientras no se tomen medidas de estabilidad estructural, la mejor opción para reducir el riesgo, es disminuir la exposición de quienes ingresen. A tal fin, para este caso puntual, se considera que la traza de bajo riesgo propuesta en Elzeard et al., (2003a) debe ser levemente modificada, ajustándose a un recorrido por las zonas estables. Sin embargo, para alcanzar dichos sectores, no es posible hacerlo sin antes atravesar áreas con alta susceptibilidad a caída de bloques, desprendimientos, colapsos, etc. Por lo tanto, se propone reducir la exposición para disminuir el riesgo, es decir, reducir el tiempo de tránsito por las zonas inestables. Por ejemplo, se recomienda transitar sin detenerse, con extrema precaución y de a uno por vez, desde el portal de entrada, a través de la zona "A" hacia la zona "H" u "O Sur".

## CONCLUSIONES

La caverna Arenal presenta factores que condicionan la



**Figura 8.** Detalle del nivel arcilloso con slickensides (flechas blancas). ¿Arcillas expansivas o superficie de falla con estrías? Óxidos de hierro asociados.

estabilidad de las mismas. Si bien, la litología (calizas) y la resistencia de la matriz es en su mayoría favorable, la calidad del macizo rocoso en cuanto a densidad de fracturación (RQD) es muy buena y las condiciones hidrogeológicas son favorables (apenas se observa humedad y goteo ocasional); existe una discontinuidad singular considerada como la principal condicionante de los procesos gravitacionales dada su orientación desfavorable, su amplia extensión, su relleno de arcillas grises a rojizas con grado bajo a medio de expansividad, y por su considerable espesor.

Esta discontinuidad atraviesa toda la sección del sistema cavernario, de este a oeste, y corta las discontinuidades de tipo sistemático (diaclasas) generando cuñas e inestabilidades de gran tamaño, caída de bloques y hasta colapsos. Su resistencia, en conjunto con la brecha rojiza suprayacente, es muy inferior a la del resto del macizo rocoso.

El buzamiento al norte de este plano de debilidad hace que el sector septentrional de las cavernas se presente con mayor susceptibilidad a la inestabilidad estructural. Los mapas resultantes de las clasificaciones IGC (Brandi *et al.*, 2020)



**Figura 9.** Caverna Arenal, Sector I. Fragmento del nivel 5 caído, desprendido del nivel arcilloso. La superficie observada ronda el metro cuadrado. Izquierda: Fotografía sin modificaciones. Derecha: Se señalan algunas de las marcas de arrastre más notorias ocasionadas, hipotéticamente, por movimiento tectónico.

e Índice Q, adaptado por *Jordá-Bordehore (2017)*, reflejan dicha condición y avalan la recomendación de *Elzeard et al. (2003a y 2003b)* respecto a transitar por la margen sur. En caso de adentrarse a la misma, se recomienda transitar por el camino de menor riesgo propuesto, y en los sectores de mayor peligrosidad, transitar sin detenerse, con extrema precaución y de a uno por vez para disminuir la exposición y el riesgo.

A fines prácticos, si bien los resultados de los estudios de expansividad presentan baja precisión, nos están indicando que existe expansividad del material contenido en la discontinuidad singular, condición que fue considerada en los cálculos geotécnicos de este informe. Además, la existencia de material con potencial de expansión, nos indica un nuevo factor desencadenante entre los ya mencionados: las precipitaciones puede llevar a la infiltración de agua a través de la porosidad secundaria hasta alcanzar el techo del sistema cavernario y puede aumentar la carga estática y la presión de poros, disminuir las fuerzas friccionales, modificar las fuerzas cohesivas y puede humectar y expandir las arcillas de manera que aquellos sectores en equilibrio sensible o bloques potencialmente inestables puedan ceder ante los efectos gravitacionales. Por lo tanto, se sugiere monitorear los cambios de humedad y entrada de agua en el sistema cavernario.

Finalmente, las clasificaciones IGC e Índice Q, han arrojado similares resultados para cada sector analizado. Ambas son factibles de uso para continuar con la caracterización del Sistema Cavernario Cuchillo Curá. Sin embargo, a pesar de que la IGC arroja mayor detalle, con una escala de cinco posibles grados de susceptibilidad a la inestabilidad estruc-

tural, para agilizar el relevamiento del resto de las cavernas podemos concluir que sería suficiente y satisfactorio el uso del Índice Q, adaptado por *Jordá-Bordehore (2017)*, ya que es más expeditivo a la hora del relevamiento en campo y no depende del relevamiento topográfico preexistente ni de apreciaciones subjetivos como la forma del techo.

## AGRADECIMIENTOS/FINANCIAMIENTO

Este trabajo fue desarrollado en el marco del Proyecto "Estudios Espeleológicos de Base en el Sistema Cavernario Cuchillo Curá" a pedido del Ministerio de las Culturas de la Provincia del Neuquén, bajo el contrato CFI-FUNYDER, (EX-2021-00050201-CFI-GES#DCS) y el financiamiento del Consejo Federal de Inversiones.

## CONTRIBUCIÓN DE AUTORÍA

"Conceptualización, metodología, análisis de datos, redacción, preparación del borrador original: Juan M. Catinari; Revisión y edición: Todos los autores contribuyeron. Todos los autores leyeron y aprobaron el manuscrito final."

## DECLARACIÓN DE CONFLICTOS DE INTERESES

"Todos los autores declaran que no existe conflicto de interés alguno".

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Anghilante, C., Balbi, A., Bluvstein, D., Calzato, W., Y Carabelli, L. (1990). Evaluación de Impacto Ambiental Sistema de Cuchillo Cura. *Salamanca*, 6(6), 7-52.
- Barton, N., Lien, R. Y Lunde, J. (1974). Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. *Rock Mechanics* (6), 189-236.
- Bieniawski, Z. T. (1978). Determining rock mass deformability: experience from case histories. *International journal of rock mechanics and mining sciences & geomechanics abstracts*. 15(5), 237-247.
- Bieniawski, Z. T. (1989). *Engineering rock mass classifications: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering*. John Wiley & Sons.
- Brandi, I., Barbosa, M., Barata, A., De Paula, R., Correa, T., Lima, H., Y Osborne, R. (2020). Cave Geomechanical Index (CGI). Classification and Contribution to the Conservation of Natural Caves in the Iron Mines. *Geoconservation Research*, 3(2), 134-161.
- Brown, E. T. (1981). *Suggested methods for rock characterization, testing and monitoring*. ISRM Suggested methods. Pergamon Press.
- Catinari, J.M., Gatica, J., Gurlekián Borrás, H., Luri, H., Maurino, E., Pappas, M., Redonte, G., Santana, N., Sicilia, S., Tedesco, E. Y Zungri, L. (2022). *Estudios Espeleológicos de Base en el Sistema Cavernario Cuchillo Curá*. Informe Final, CFI.
- Chen, F.H. (1975). *Foundation on Expansive Soils*. Elsevier.
- Deere, D. U. (1964). Technical description of rock cores. *Rock Mechanics Engineering Geology*, (1), 16-22.

- Elzeard, L. (1987). Geología del sistema de cavernas del cordón Cuchillo – Curá. *Salamanca*. 3(3), 3-11.
- Elzeard, L., Bolinaga, R., Carubelli, O. H., Gonzalez, O. Y Silvestri, M. (2003a). *Estudio de riesgo de inestabilidad de macizo en caverna del Arenal, Neuquén*. Informe Técnico. GeoComahue.
- Elzeard, L., Bolinaga, R., Carubelli, O. H., Gonzalez, O. Y Silvestri, M. (2003b). *Estudio de riesgo de inestabilidad de macizo en caverna del Gendarme, Neuquén*. Informe Técnico. GeoComahue.
- González De Vallejo, L. I., Ferrer, M., Ortuño, L., Y Oteo, C. (2002). *Ingeniería geológica*. Pearson Educación.
- Holtz, W. G., Y Gibbs, H. J. (1956). Engineering properties of expansive clays. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 121(1), 641-663.
- IS: 1498. (1970). *Indian standard classification and identification of soils for general engineering purposes*. BIS, New Delhi
- Jordá-Bordehore, L. (2017). Stability assessment of natural caves using empirical approaches and rock mass classifications. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 50(8), 2143-2154.
- Lambert, L. R. (1956). *Descripción Geológica de la Hoja 35b, Zapala*. Dirección Nacional de Minería.
- Priest, S. D., Y Hudson, J. A. (1976). Discontinuity spacings in rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*. 13(5), 135-148).
- Redonte, G., Maurino, E., Martínez, O., Costa, H., Tedesco, E., Lentijo, E. Y Zungri, L. (2018). *Levantamiento topográfico, Q4 Hoja GEA 286, Caverna del Arenal – Sistema Cuchillo Curá*. Grupo Espeleológico Argentino.
- Seed, H. B., Woodward Jr, R. J., & Lundgren, R. (1962). Prediction of swelling potential for compacted clays. *Journal of the soil mechanics and foundations division*, 88(3), 53-87.