

Informe Técnico

Número 01-2021



Universidad Nacional del Comahue
Escuela Superior de Ciencias Marinas

Disolución de rocas carbonatadas: estudio preliminar sobre un proceso de *karstificación* en los acantilados de Las Grutas, Río Negro

Renzo S. Bonuccelli ¹, Maite Narvarte ^{2,3} y Juan Francisco Saad ^{2,3}

¹ Geólogo, Investigador Independiente

² Docentes de la Escuela Superior de Ciencias Marinas

³ Investigadores del CONICET

Febrero de 2021

San Martín 247
CP 8520 San Antonio Oeste
Provincia de Río Negro
Argentina
Tele-fax +54 2934 422752
<http://www.ibmpas.org>

Los Informes Técnicos de la Escuela Superior de Ciencias Marinas de la Universidad Nacional del Comahue tienen por objetivo difundir los resultados de las actividades de investigación que realizan los docentes, investigadores y alumnos de la ESCiMar. Los contenidos y opiniones vertidas en los mismos son exclusiva responsabilidad de los autores.

La reproducción de esta publicación para fines científicos, educativos u otros propósitos no comerciales está autorizada sin permiso del titular del derecho de autor. La reproducción para fines comerciales está prohibida sin previa autorización por escrito del titular del derecho de autor.

Este documento debe ser citado como:

Bonuccelli RS, Narvarte M, Saad JF (2020) Disolución de rocas carbonatadas: estudio preliminar sobre un proceso de *karstificación* en los acantilados de las grutas. Informe Técnico N°01/2021. Escuela Superior de Ciencias Marinas, Universidad Nacional del Comahue, 23p.

RESUMEN

¿Es posible desarrollar infraestructuras de turismo sustentable en regiones con acantilados disolubles donde el sistema hidrológico está altamente perturbado por aguas residuales? La zona costera de Las Grutas (Río Negro, Argentina) es un sector propicio para responder a esta pregunta. Se tomaron muestras del agua de filtración y de la roca de los acantilados para realizar análisis químicos y petrográficos, respectivamente. Este estudio, aunque preliminar, demuestra que la roca que constituye la estructura del acantilado se disuelve por efecto del agua circulante en su interior. La recarga del acuífero se produce principalmente por las aguas residuales, cuyo caudal se incrementa en la temporada estival. Se propone la existencia de un proceso kárstico, caracterizado por la utilización de las aguas residuales por conductos preferentes de la roca del acantilado. Dado que su origen es el desarrollo urbano-turístico y el consecuente uso del recurso hídrico, se sugiere el nombre de *karstificación antropocena* y se advierte a las autoridades sobre el progresivo deterioro de la costa a una tasa relativamente acelerada. El grado de disolución de la roca dependerá de la disponibilidad y forma de recarga del acuífero, de la litología y estructura de las rocas, de la hidrogeoquímica en la estructura del acantilado y de efectos múltiples (aditivos/sinérgicos) del proceso.

INTRODUCCIÓN

La localidad de Las Grutas se encuentra asentada sobre una costa rocosa acantilada, con estratificación horizontal, de la Formación Gran Bajo del Gualicho, de origen marino y de edad Miocena (Fucks et al. 2015). Desde el establecimiento de las primeras poblaciones en el balneario en los 60's, la eliminación de los residuos líquidos de origen doméstico ha constituido un problema tanto para la población como para el ambiente, ya que, ante la falta de servicios adecuados, esos líquidos fueron volcándose directamente al subsuelo. Recién 35 años después, en el año 1995, se inaugura el primer tramo de la red de servicio cloacal. Sin embargo, para el momento de la presentación de este informe, en el 50% de la superficie urbana que ocupa una extensión de 8,5 km², se sigue descargando al subsuelo.

Acompañando el crecimiento en el uso de la zona con fines urbano-turísticos, se registran cambios en el nivel freático. Anteriormente a la existencia del balneario, el nivel freático de la zona se mantenía por debajo del nivel de playa (Fig. 1a), y era regulado hasta entonces únicamente por la escasa recarga pluvial y, por tratarse de un acuífero costero, por el fenómeno de intrusión del agua de mar. Las sucesivas descargas de aguas al subsuelo produjeron un aumento del nivel freático, que comienza afectando la parte inferior del acantilado, que se apoya sobre el horizonte impermeable (base del acuífero), ascendiendo progresivamente con el crecimiento urbano del balneario (Fig. 1.b).

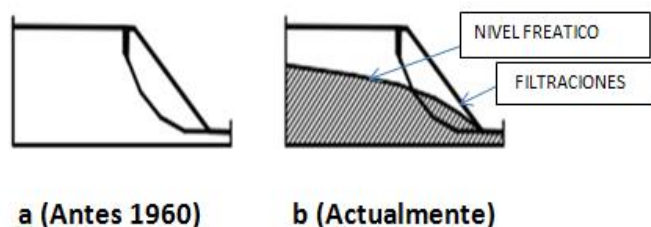


Figura 1. Cambios observados en el acantilado de Las Grutas. Previamente a las descargas de líquidos el acantilado se encontraba totalmente drenado y el nivel freático se ubicaba por debajo del nivel de playa (a). Por la recarga de aguas residuales, el nivel freático se eleva y el suelo por debajo de éste se encuentra saturado, el agua llena todos los poros y cavidades de la formación rocosa, drenando sobre el acantilado (b).

(Modificado de Suárez Díaz 1998)

El detalle del problema: acuífero, disponibilidad y forma de recarga.

El balneario Las Grutas se ubica sobre una estructura sedimentaria de rocas carbonatadas, permeables, que permiten el almacenamiento de agua en su interior. La infiltración actual de importantes volúmenes de agua se genera principalmente a partir de las actividades que emplean el recurso hídrico (aguas residuales provenientes de la planta de tratamiento cloacal, volcado al subsuelo de los residuos de usos domésticos, riegos, etc.) y en menor proporción por las precipitaciones. Esta agua, acumulada en la estructura rocosa, situada encima de un piso impermeable en la base del acantilado, corresponde a la **zona de saturación**. Todos sus poros y fracturas están llenos de agua (Fig. 2), y se la conoce como **agua subterránea**, que circula libremente por acción de la

gravidad a los puntos de drenajes, como es posible observar en las paredes de los acantilados y en los techos de las cuevas.

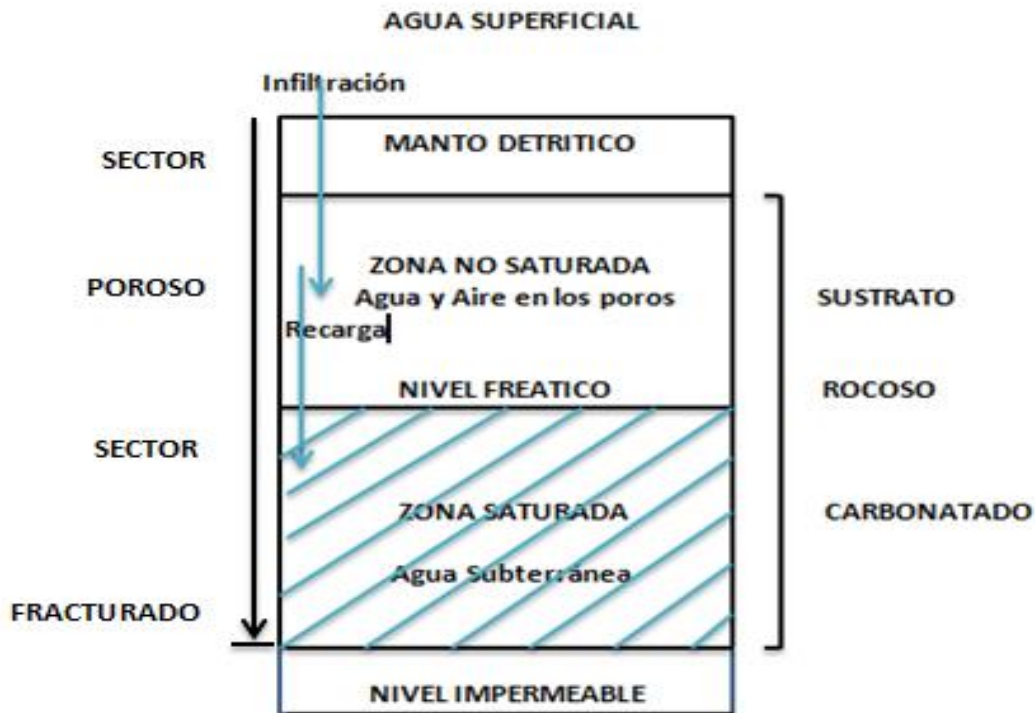


Figura 2. Estructura subterránea del acuífero de Las Grutas.

Como se observa en la figura, el límite superior del agua es el **nivel freático**, que varía según las circunstancias, descendiendo en épocas secas, o ascendiendo, como en el caso de Las Grutas, con un máximo en verano coincidente con la temporada turística. Por encima del nivel freático hasta la superficie se encuentra la **zona no saturada**, donde no todos los poros están llenos de agua.

La descripción de esta estructura (Fig. 2) constituye el **acuífero de Las Grutas**, que es, a su vez, un acuífero costero, ya que uno de sus contornos, el acantilado, se encuentra en contacto con el mar. La entrada de agua de mar es justamente impedida por el acuífero, cuya recarga o alimentación se encuentra en el continente.



Figura 3: Zona urbana de Las Grutas (indicada como *zona de recarga*) y ubicación de las bajadas a la playa (Modificado de Kokot et al. 2013).

Por lo tanto, el acuífero está estrechamente vinculado con el asentamiento urbano, establecido sobre una superficie de unos 8,5 km² a lo largo de 5 km de longitud, siguiendo la costa, de sur a norte, desde el Cañadón de La Paloma hasta Terraza al Mar (Fig. 3), conformando la zona de infiltración (o de recarga) del acuífero. Los mayores espesores del acuífero saturado oscilan entre los 4 y 6 metros en época estival y se manifiestan entre el Cañadón de La Paloma y la Bajada Cero (“Bajada de los Pescadores”), a lo largo de unos 2 km, coincidiendo con el mayor y más antiguo asentamiento urbano de Las Grutas.

Un acuífero de características litológicas particulares

En los primeros 2-3 metros de espesor, el agua infiltrada circula por los espacios y poros del manto detrítico aluvial cuaternario y en las areniscas friables de la parte superior del sustrato rocoso (zona de infiltración en la Fig. 2). Este sector del acantilado tiene permeabilidad media a alta, y promueve el movimiento de agua subterránea en todas las direcciones, comportándose como un acuífero poroso. Por debajo de esta zona, en profundidad, hasta el piso impermeable, la permeabilidad es baja a media, el flujo es sostenido por redes de fracturas donde la conductividad hidráulica es muy buena horizontalmente (como se observa en los planos horizontales de estratificación de la Fig. 4), pero pobre verticalmente.



Figura 4: Imagen de invierno (20/07/2007), que refleja el drenaje de agua, congelada en su salida, entre los niveles de estratificación y oquedades, en el nivel intermedio de los acantilados. En la parte inferior se observa el banco de arcilla prácticamente impermeable, que constituye el piso del acuífero (Foto gentileza Juan Carlos González-Costa Ballena).

Así, el sistema inferior se comporta como un acuífero fisural (Silva y Bocanegra 2007): el agua se encuentra ubicada en fisuras o diaclasas, intercomunicadas entre sí, pero los flujos internos de agua lo hacen por direcciones preferenciales. Las características estructurales y estratigráficas de la masa rocosa provocan la circulación subterránea, de SW a NE, hacia el casco viejo de la zona urbana, concordante con los principales drenajes sobre los acantilados.

La recarga del acuífero

La disponibilidad de aguas superficiales a través de ríos, lagos o agua subterránea (capa de agua para consumo humano), que puedan garantizar agua en cantidad y calidad al balneario es inexistente. Las principales fuentes de recarga se generan principalmente a partir de otras actividades que emplean el recurso hídrico (líquidos cloacales, riego con aguas residuales, etc.). Durante la época estival, el régimen de alimentación hídrica del sistema tiene un notable aumento por el crecimiento demográfico de veraneantes. Por caso, entre diciembre de 2019 y febrero de 2020, ingresaron 411.151 personas (Fuente: Agencia de Turismo, Ambiente y Cultura de la Municipalidad de San Antonio Oeste).

El agua al balneario se provee desde la localidad de San Antonio Oeste y desde la red domiciliaria las aguas residuales domésticas son transportadas por la red cloacal a la planta de tratamiento. Los caudales diariamente tratados en la planta difieren de acuerdo a la época del año. En verano el promedio es de 6.500 m³/día con máximos que oscilan entre 10.000 y 15.000 m³/día mientras que el resto del año los promedios rondan los 2.500 m³/día. La capacidad de tratamiento de la planta es de 3.500 m³/día (Olivares 2016; Bonuccelli y Narvarte 2017).

El valor promedio de 6.500 m³/día durante el verano indica que la planta permanece colapsada, por lo que, al alcanzar este caudal de entrada, los líquidos cloacales salen sin ningún tipo de tratamiento, más aún en los días con máximos caudales (Bonuccelli y Narvarte 2017). Por lo tanto, la disposición final de los líquidos residuales tratados diariamente representa la mayor recarga del acuífero: el 60 % se descarga, día tras día a

cielo abierto, en las inmediaciones del Cerro Banderita y el 40 % restante se dispone para riego diario, por medio de ductos, a emprendimientos agrícolas (plantaciones de olivo) y al Barrio Alto Club de Campo y cancha de golf. Esta última fuente representa una recarga de 1,9 hm³/año (RB sin publicar).

Otra recarga importante es el volcado de los pozos negros directamente al subsuelo, a consecuencia de que la mitad de la población no cuenta con servicio de conexión cloacal. Este valor representa una recarga estimada de 1,1 hm³/año (RB sin publicar).

Otras fuentes de recarga son las infiltraciones de las piletas de decantación de la planta depuradora que no están impermeabilizadas, las infiltraciones de la laguna tajamar por falta de impermeabilización, las infiltraciones por desbordes continuos durante la época estival por colapso de la planta de tratamiento, la recarga por retornos del riego de calles, parques, arboledas, etc., las fugas en las redes de abastecimiento y transporte de aguas residuales domésticas, la recarga por inundaciones subterráneas en edificios por ascenso del nivel freático, fenómenos de intrusión subterránea de agua de mar al acuífero y la recarga pluvial. En relación a esto último y considerando que las precipitaciones en esta zona rondan los 250/300 mm/año con valores estimados de evapotranspiración que superan los 600 mm/año (www.fao.org), el balance hídrico es deficitario (Genchi et al. 2010). Con este régimen pluvial, el ascenso del nivel de la napa freática resulta irrelevante (Bonuccelli y Narvarte 2017).

Cálculos preliminares permiten estimar que el volumen total de recarga al acuífero ronda los 4,2 hm³ al año (4.200.000 m³/año) (RB sin publicar).

Evidencias de contaminación de las aguas

Los vertidos de aguas residuales descritas en la sección anterior tienen su correlato en la descarga de contaminantes. Las filtraciones en los acantilados tienen una importante carga bacteriana, acompañada de materia orgánica particulada (MOP), nitratos y fosfatos (Genchi 2012).

Evidencias de contaminación bacteriana de origen fecal que ingresa a la zona costera, han sido obtenidas en distintas oportunidades a partir de muestras de agua tomadas en diferentes sitios de la costa, tanto del agua de mar que inunda las playas junto al acantilado (Narvarte 2006) como del agua de filtración de los mismos acantilados (Fucks et al. 2015; Bonuccelli y Narvarte 2017). Este aspecto toma mayor relevancia actual si se tiene en cuenta el hallazgo de rastros de SARS-CoV-2, el virus causante de la Covid-19, en aguas residuales de cuatro países (antes del brote en China), lo que aumenta el misterio sobre su origen. (<https://www.bbc.com/mundo/noticias-53358407>). Es decir, la presencia del material genético del virus en las heces indicaría que las aguas residuales pueden ser una vía de contagio. ¹

Objetivos del estudio

El objetivo de este informe es dar a conocer un proceso, en su fase inicial, de transformación del acantilado de Las Grutas, producido como consecuencia de la disolución de la roca carbonatada de los acantilados por aguas de origen principalmente antrópico. Se propone además un modelo esquemático-conceptual de dicho proceso y se explicitan potenciales riesgos geológicos como consecuencia del proceso identificado.

MATERIALES Y MÉTODOS

¹ Dado que la detección en aguas residuales puede servir como una herramienta amplia y económica para monitorear el progreso de covid-19, hay al menos 15 países donde esta estrategia ha sido adoptada o está siendo estudiada.

El estudio se ha centrado en el sector de los acantilados que se extiende entre la Bajada Uno y la Bajada Cero (distantes unos 300 metros), lo que corresponde al frente de playa del “casco viejo” del balneario (Fig. 5). El lugar contiene la mayor densidad de cavernas, originadas por abrasión marina y es el sector de mayor destrucción por el choque de las olas contra el acantilado, factor éste que constituye la principal fuente de inestabilidad del mismo.



Figura 5. Frente del acantilado y de las grutas marinas entre las bajadas Uno y Cero.

Se seleccionaron y muestrearon tres drenajes de aguas para análisis hidrogeoquímicos: WP1 (entre las bajadas Uno y Cero), WP2 (en la Bajada Dos, del drenaje de la base del acantilado) y BO6 (próximo a la Bajada Cero), en los que se midió el caudal directamente en el punto de salida. El análisis de la muestra de agua 442/19-FQ de la salida de la Planta Potabilizadora de San Antonio Oeste se obtuvo de Aguas Rionegrinas SA; desde este sitio, después de su distribución en el Balneario de Las Grutas, esta agua se convierte en la principal fuente de recarga artificial del acuífero del balneario. Todas las muestras de agua obtenidas de los drenajes del acantilado fueron almacenadas en frascos plásticos de 500ml y guardadas a 4°C hasta su análisis. En el momento de la toma de muestras, se midieron el pH del agua de drenaje y la temperatura. Asimismo, se tomaron muestras de mano de diferentes niveles rocosos del acantilado.

Los análisis químicos de agua se realizaron en los laboratorios del Departamento de Agronomía (LANAQUI-CERZOS-CONICET) de la Universidad Nacional del Sur, y en el Laboratorio Bromatológico Industrial y de Medio Ambiente (IACA), de Bahía Blanca.

La petrografía de las muestras de rocas se realizó sobre cortes delgados doblemente pulidos en microscopio petrográfico y cámara fotográfica incorporada. Las secciones delgadas fueron tratadas con resina de azul de metileno para determinar la porosidad (Laboratorio de Petrotomía, Departamento de Geología de la Universidad Nacional del Sur). La mineralogía se confirmó mediante difractogramas de Rayos X, sobre muestras de espeleotemas (LG01), con Equipo Rx Rigaku Denku con anticátodo de Cu, en el Laboratorio de Rayos X del Departamento de Geología de la Universidad Nacional del Sur.

RESULTADOS

En todo el frente del acantilado estudiado es donde se observan las principales filtraciones de agua y depósitos mantiformes de calcita (*espeleotemas*, ver más abajo). Las muestras de los tres drenajes de aguas WP1, WP2 y BO6 mostraron presencia de elementos iónicos mayoritarios, disueltos en el agua. Los cationes presentes fueron calcio, magnesio, sodio y potasio, y los aniones, cloruros, sulfatos, bicarbonatos y carbonatos (Tabla 1), resultantes de la circulación de agua dentro de la formación rocosa carbonatada. El caudal de agua medido en el drenaje WP1 fue de 1,5 l/min.

Tabla 1. Composición de cationes y aniones en las muestras de los drenajes de agua del acantilado (WP1, WP2 y BO6) y de la muestra de agua (442/19-FQ) tomada por ARSA de la red urbana en la salida de la planta potabilizadora.

FECHA	MUESTRA	UBICACIÓN	pH	CALCIO	BICARBONATO	AMONIO	NITRATOS	NITRITOS	FOSFATOS	AZUFRE	SULFATOS
				mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
23/05/2019	WP 1	E 03577197 - N 05482104	7,2	585	379						3.449
23/05/2019	WP 2	E 03576882 - N 05481805	7,6	565	315						3.113
20/07/2019	BO 6	E 03577319 - N 05482186	7,8	381	288	9,7	19	1	1,54	*1320	
30/09/2019	442/19-FQ	Salida Planta Potab.SAO	7,5	18	49		< 1,0	< 0,4			23

*Proviene del sulfato

Los valores del análisis de agua suministrada a la red urbana (muestra 442/19-FQ), ponen de manifiesto la baja mineralización de contenidos iónicos de calcio y bicarbonato (49 mg/l de $\text{CO}_3 \text{H}^-$ y 18 mg/l de Ca^{2+}). Por su parte, las muestras de aguas provenientes del interior del acantilado, tomadas en las surgencias, son fundamentalmente bicarbonáticas cálcicas (379 a 288 mg/l de $\text{CO}_3 \text{H}^-$ y 585 a 381 mg/l de Ca^{++} con pH medio de 7,53. **Queda así de manifiesto la naturaleza de las aguas carbonatadas que circulan en los acantilados y el proceso de dilución por el agua sobre la roca carbonatada.**

La concentración de SO_4 es elevada por la presencia de yeso (sulfato de calcio). Independientemente de la concentración de anhídrido carbónico, la solubilidad del yeso es grande y la disolución es rápida. Las muestras WP1, WP2 y BO6 indican presencia importante de yeso en la formación carbonatada del acantilado. La disolución del yeso aumenta aún más la concentración de calcio, causa sobresaturación con respecto a la calcita (mayores concentraciones), por el efecto del ión común.

Amonio, nitritos y nitratos aumentados indican un medio fuertemente reductor microbiano de sustancias orgánicas (vertido cloacal al subsuelo e infiltración de las aguas residuales) y en parte, abonos agrícolas (RB, observación personal).

Por su parte, la determinación petrográfica y mineralógica de la sección transversal del espeleotema (muestra de la costra calcárea depositada en el acantilado, MLG01, Fig.

6), refleja la presencia de una textura caracterizada por bandas claras y oscuras alternantes (C, Fig. 7) cuya composición tiene calcita micrítica granular y en abanicos formando bandas, algunas teñidas por óxidos de hierro; y precipitación de escaso yeso en los bordes de las oquedades (B), con abundante materia orgánica representada por filamentos y restos irregulares indefinidos, y con alta permeabilidad (se observa agua que circula dentro de la roca, D).



Figura 6. Sección transversal del espeleotema.

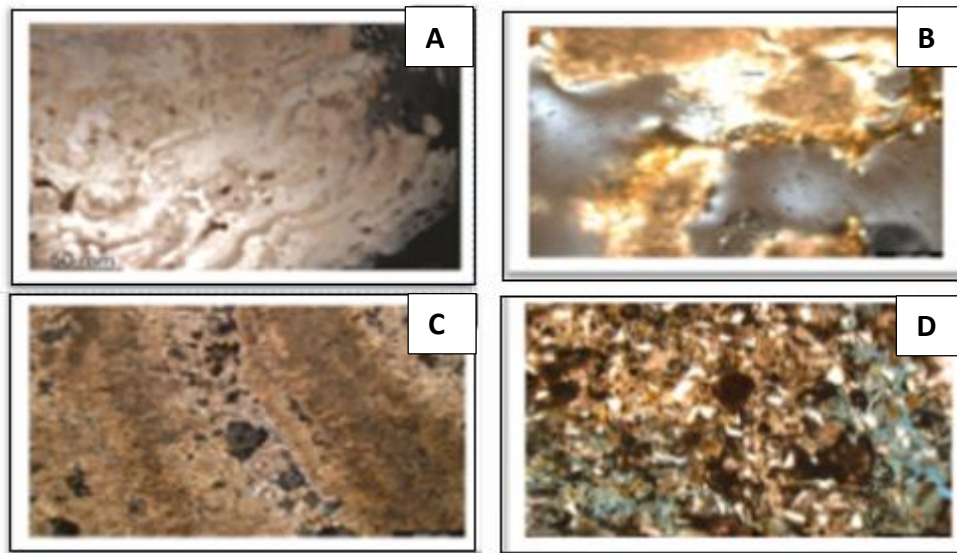


Figura 7. Imágenes de las secciones delgadas del espeleotema extraído del acantilado. A) Sección delgada completa de la muestra. B) Calcita y yeso en los bordes de las oquedades. C) Textura bandeada. D) La presencia de agua (azul) indica el alto grado de permeabilidad.

Las determinaciones mineralógicas y el difractograma de Rayos X de las costras calcáreas depositadas en el acantilado (muestra MLG011), denotan altos valores de calcita (mineral de carbonato de calcio) y escaso sílice (Tabla 2, Fig. 8).

Tabla 2. Composición química del espeleotema identificada por el difractograma de Rayos X.

(UNS)						Peak ID Report				
SCAN: 3.0/59.96/0.04/1(sec), Cu, I(max)= 2472, 05/09/19 07 29p										
PEAK: 13 pts/ Parabolic Filter, Threshold=3.0, Cutoff=0.1%, BG=3/1.0, Peak.Top=Summit										
NOTE: Intensity = Counts, 2T(0)-0.0(deg), Wavelength to Compute d-Spacing= 1.54059A (Cu/K-alpha1)										
#	2-Theta	d(A)	Height	Height%	Phase ID	d(A)	I%	(hkl)	2-Theta	Delta
1	20.788	4.2695	115	4.7	Quartz	4.2637	11.8	(100)	20.817	.029
2	23.070	3.8521	246	10.0	Calcite	3.8508	9.9	(012)	23.078	.008
3	26.603	3.3480	238	9.6	Quartz	3.3486	100.0	(011)	26.599	-.005
4	29.360	3.0396	2472	100.0	Calcite	3.0337	100.0	(104)	29.419	.059
5	31.313	2.8543	84	3.4	Calcite	2.8429	1.9	(006)	31.442	.129
6	36.040	2.4900	401	16.2	Calcite	2.4927	13.9	(110)	36.001	.039
7	39.447	2.2825	501	20.3	Calcite	2.2831	17.6	(113)	39.437	.010
8	43.243	2.0905	444	18.0	Calcite	2.0929	14.9	(202)	43.190	.052
9	47.323	1.9194	389	15.8	Calcite	1.9263	6.5	(024)	47.142	.181
10	48.516	1.8749	420	17.0	Calcite	1.8746	19.3	(116)	48.524	.008
11	56.686	1.6225	103	4.2	Calcite	1.6248	3.1	(211)	56.601	.085
12	57.522	1.6009	197	8.0	Calcite	1.6031	8.7	(122)	57.436	.085
Line Shifts of Individual Phases: 01-086-0174> Calcite - Ca(CO ₃) <2T(0) = 0.02, d/d(0) = 1.0> 01-085-0798> Quartz - SiO ₂ <2T(0) = -0.04, d/d(0) = 1.0>										

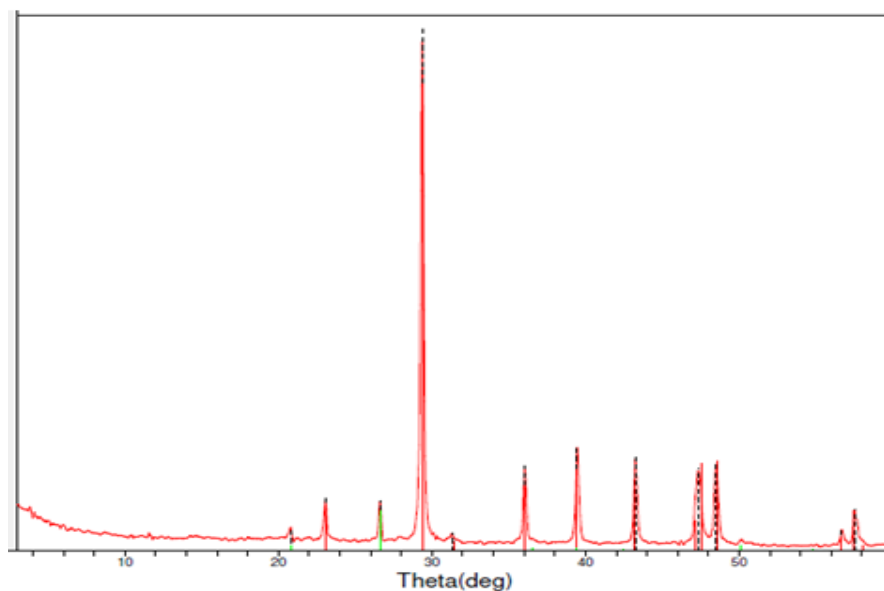


Figura 8. Difractograma de Rayos X de la muestra tomada del espeleotema.

DISCUSIÓN

En su conjunto, los resultados obtenidos en los muestreos realizados, aunque preliminares, fueron concluyentes en los siguientes aspectos: a) la composición del agua

corriente de red que ingresa a Las Grutas es de bajo contenido iónico de calcio y bicarbonato; b) las muestras de agua provenientes del interior de los acantilados se caracterizan por una alta concentración de iones de calcio: son fundamentalmente bicarbonáticas cálcicas; c) el difractograma de la muestra de espeleotema extraído sobre una de las paredes del acantilado, denota que la roca es rica en calcita (carbonato de calcio, d) la disolución del yeso (sulfato de calcio) causa sobresaturación con respecto a la calcita (mayores concentraciones), por el efecto de ión común; e) las muestras WP1, WP2 y BO6, indican presencia de yeso en la formación carbonatada del acantilado. Si bien el estudio ha contado con un escaso número de muestras, los hallazgos hasta el momento permiten proponer la existencia de un **proceso de karstificación**, mediado por actividades humanas y en su etapa inicial.

¿Qué es la karstificación y por qué ocurre en Las Grutas?

La karstificación es un proceso de meteorización química y erosiva que experimentan algunas rocas solubles, como las que contienen carbonato de calcio en su composición (Kranjc 2011). Se lo encuentra también en terrenos que contienen yeso (sulfato de calcio), que es altamente soluble. Ambos minerales, en especial el carbonato de calcio, se encuentran en la Formación Rocosa Carbonatada que forma la costa acantilada de Las Grutas. Se trata de un fenómeno que se produce tanto a nivel de superficie como a nivel subterráneo (Buckerfield et al. 2019).

La dinámica y morfología kársticas acarrearán una serie de procesos activos que pueden desembocar en riesgos como la subsidencia, los hundimientos o los asentamientos diferenciales (ver más abajo), lo que puede afectar no sólo al paisaje (en nuestro caso, a las grutas) sino también a todo tipo de obra civil, ocasionando pérdidas económicas, y más importante aún, causar riesgos a la vida humana por derrumbes ocasionales.

El proceso de karstificación que experimenta el acantilado de Las Grutas se origina a partir del CO₂ disuelto en el agua, que forma luego ácido carbónico, el que ataca a las rocas carbonatadas disolviéndolas. Es en la zona de infiltración (como se observa en la Fig. 3), donde el agua se acidifica en contacto con el dióxido de carbono. La descomposición de la materia orgánica aportada por la descarga de los pozos negros contribuye con una importante liberación de CO₂, por lo que todo el sector permeable de roca adquiere una mayor acidificación, que incrementa aún más la capacidad de dilución sobre el carbonato de calcio (Rojo García 2015).

Evolución de la disolución

La disolución comienza cuando el agua cargada con CO₂ disuelto, se va infiltrando en grietas de tamaños de algunas micras permitiendo una lenta circulación de agua que va disolviendo el carbonato de calcio. La disolución avanza produciendo el ensanchamiento de las fisuras y dando lugar a los conductos de disolución, con diámetros que alcanzan algunos centímetros, conectando la zona de recarga con las surgencias. Se forma, progresivamente, un sistema de canales por los que el agua circula libremente, descargando sobre los acantilados o en el interior de las cuevas a través de fracturas y planos de estratificación. Las mayores filtraciones en el acantilado se observan en el horizonte intermedio, en los planos de estratificación, a lo largo de todo el perfil principalmente entre las bajadas Uno y Cero.

El proceso de karstificación, lentamente va dando lugar a modificaciones de las condiciones y propiedades originales de la formación rocosa. Explorando los acantilados en la zona de estudio, se puede asegurar la ausencia de cavernas kársticas. Sin embargo, como se ha puesto de manifiesto, se observan abundantes conductos que

pertenecen a la red kárstica, por las surgencias de chorros, goteos y flujos laminares sobre las paredes y algunas oquedades de varios centímetros (ver la Fig. 4).

Principales reacciones químicas que ocurren durante la karstificación (Freeze y Cherry 1979)

Desde que el agua llega a la capa freática (Fig. 3) hasta que sale por los drenes de los acantilados pueden transcurrir días o meses, y el recorrido puede ser corto o de algunos kilómetros. Por consiguiente, la evolución química del agua dependerá tanto de los minerales con los que ésta entra en contacto como del tiempo transcurrido.

Durante la infiltración en la roca carbonatada, la disolución de carbonato de calcio a saturación hace que el agua adquiera una composición de iones de Ca^{2+} y (HCO_3^-) . La cantidad de mineral disuelto (calcita) depende, entre otros factores, de la concentración de CO_2 en los poros de la roca, de la temperatura de disolución y de la cantidad de agua que atraviesa las superficies afectadas. El factor que más influye en la reacción es la cantidad de agua en circulación dentro de la formación carbonatada.

Por otra parte, en el tiempo que pasa a través del yeso, la disolución del yeso hacia la saturación hace que el agua obtenga Ca^{2+} y SO_4^{2-} como iones dominantes. La solubilidad del yeso es alta y la disolución es rápida.

Precipitación de calcita (espeleotemas)

En el momento en que las soluciones cargadas de calcio salen al exterior (a través de redes de fracturas, porosidades y grietas) se libera bruscamente el CO_2 alterando la capacidad de mantener estos minerales en disolución, provocando la precipitación de calcita en la forma de espeleotemas (Fig. 9

<https://geologicalmanblog.wordpress.com/2017/07/19/modelado-karstico/>). La imagen muestra la superficie de una pared del acantilado cubierta por espeleotemas formados por precipitación de calcita, de textura botrioidal, formando racimos

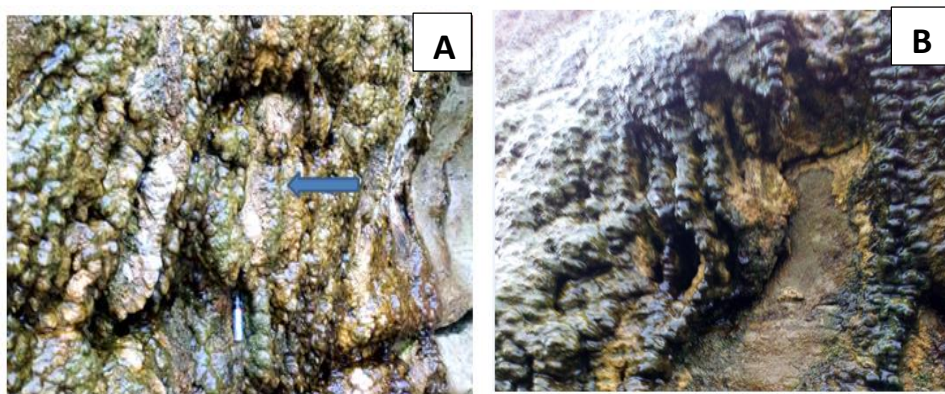


Figura 9: Formación de espeleotemas por precipitación de calcita, en forma de racimos, sobre la pared del acantilado. En (A) se indica el punto de toma de muestra para determinación mineralógica por Rx y en (B) se visualiza el espesor del manto (~ 6 cm) sobre la pared del acantilado.

Riesgos de la karstificación

La disolución de formación rocosa carbonatada de los acantilados, en contacto con el agua acidificada y por efecto de la permeabilidad, conlleva riesgos de deterioro físico-químico del acantilado, y a una disminución de la calidad estética del mismo.

Una roca sometida a meteorización química (karstificación), en el transcurso del tiempo, se convertirá en un material desagregado o poco cementado. La acción antrópica influye de manera determinante, aumentando la velocidad del proceso. Si bien en el caso estudiado nos encontramos en un estadio inicial del proceso de karstificación, de continuar las condiciones actuales, la formación rocosa, tanto en superficie como subterráneamente, se irá desintegrando, perdiendo resistencia mecánica y afectando la estabilidad de los acantilados.

Existen diversos procesos relacionados con la karstificación, que pueden tener lugar, entre ellos:

a) **Asientos diferenciales:**

La estabilidad de una estructura depende en gran medida de las condiciones del terreno sobre la que se asienta. Las edificaciones fundadas sobre la formación rocosa carbonatada con procesos de karstificación, pueden dar lugar a la formación de asientos diferenciales. Por caso, la disolución del carbonato de calcio, dentro de la formación rocosa, progresivamente produce el ensanchamiento de fracturas, grietas, hendiduras, niveles de estratificación, huecos, etc., socavándolas, dejándolas sin apoyo y expuestas a hundirse. Las cargas puntuales de las construcciones generan movimientos relativos de una parte del edificio respecto a otras (asentamiento diferencial) y pueden producir graves lesiones a las estructuras edilicias (grietas, fisuras, etc.), deformándolas (Ayala Gancedo et al. 1989).

b) **Subsidencias y Hundimientos**

El descenso de la superficie del terreno puede ser lento y paulatino (subsidencia) o producirse mediante un movimiento vertical repentino (colapso y hundimiento). Estos movimientos están ligados a cavidades subterráneas, en el caso de estudio, a las propias grutas de origen marino que se encuentran en la base de los acantilados. El techo de la cavidad puede colapsar, produciendo un hundimiento en la superficie debido a cambios tensionales por el proceso de disolución del sustrato rocoso carbonatado. El fenómeno depende del volumen y forma de las cavidades, del espesor de recubrimiento de las cavidades y de la resistencia mecánica de la roca subyacente (Santoalla et al. 2005, 2006). En el sector entre las bajadas Uno y Cero se ubica la sección de mayor riesgo a las subsidencias, especialmente entre las calles Catriel y El Bolsón (Fig. 10).



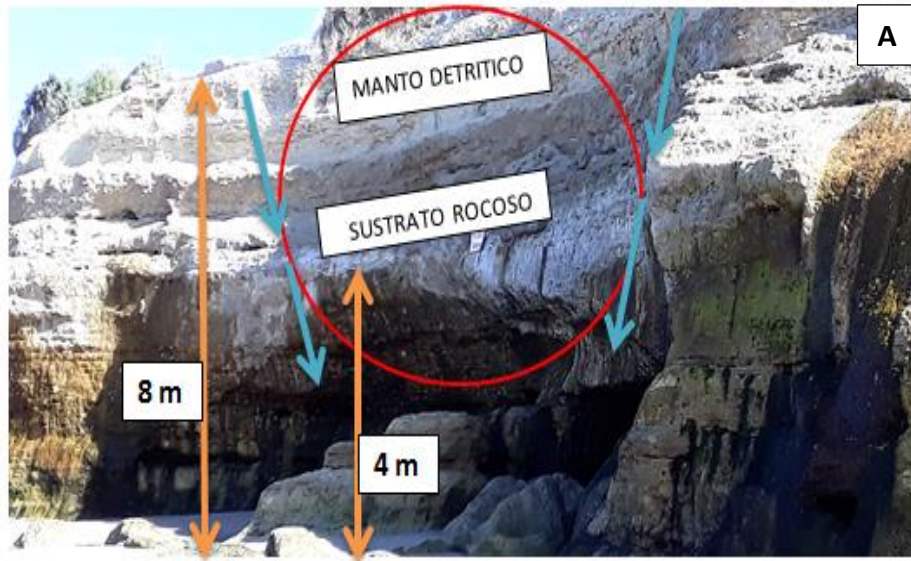


Figura 10. Imágenes satelitales del sector estudiado. *Arriba*: sección entre Bajadas Uno y Cero. *Abajo*: detalle de la zona entre calles Catriel y El Bolsón.

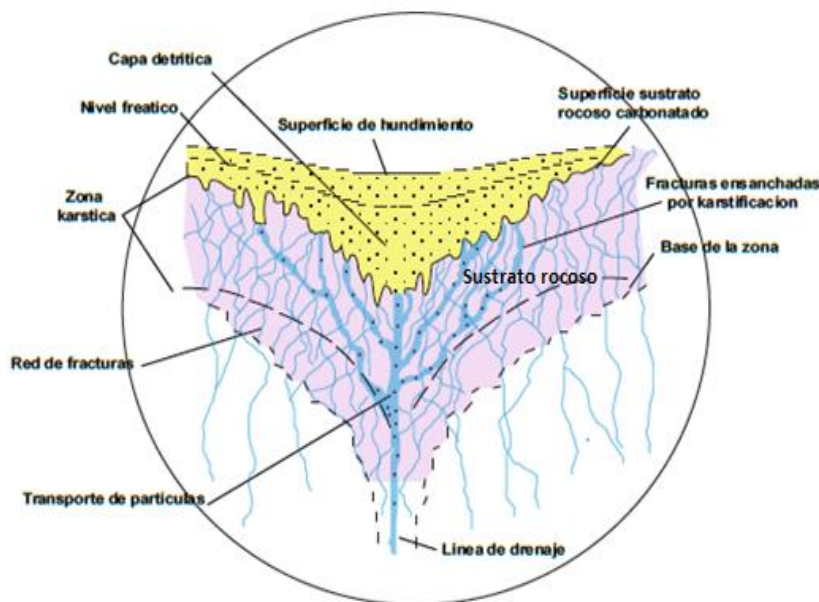
El esquema de un probable fenómeno de subsidencia en una caverna marina situada en la base del acantilado, en la zona de alto riesgo de derrumbes, se representa en la Fig. 11. La karstificación del sustrato rocoso carbonatado bajo la cobertura detrítica da lugar a la generación de fisuras y conductos de disolución. Como consecuencia de la pérdida de soporte basal (techo de la cueva), la estructura tiende a deformarse gravitacionalmente (Fig. 11.b), produciéndose lentamente una subsidencia.

Las partículas insolubles liberadas durante la disolución del carbonato de calcio serán transportadas a través de las vías de drenajes como puede apreciarse en la figura mencionada. El desarrollo de estos hundimientos está controlado por la evolución vertical de las cuevas, favorecida por la presencia de fracturas, especialmente las de rumbo perpendicular a la orientación del acantilado, actuando como conductos preferenciales para las aguas de infiltración. Estas fracturas, a su vez, aumentan considerablemente el riesgo de derrumbe.

Por otra parte, las variaciones texturales, por ej., la alternancia entre materiales más impermeables con niveles calcareníticos (muy permeables) pueden favorecer que estos últimos actúen como conductos preferenciales. Cuando eventualmente el peso de los materiales suspendidos sobre la cavidad supera su resistencia mecánica, se produce el derrumbe. Las cimentaciones próximas al acantilado aumentan la posibilidad de colapso del techo de la cueva.



A



B

Figura 11: (A) Esquema de una probable subsidencia. La altura del acantilado es de 8 m y la altura de la gruta de 4 m, por encima del techo de la gruta el sustrato es rocoso y el manto detrítico. Las flechas celestes indican la probable subsidencia, que podrá ser lenta o catastrófica. En el círculo rojo, detalles del progresivo hundimiento, que se muestra en (B). (Dibujo: Sebastián Garske)

Por lo tanto, la subsidencia es el resultado de la interacción entre la fracturación, los procesos kársticos y las variaciones texturales de los materiales que componen el macizo rocoso del acantilado.

Por otra parte, cuando se producen excavaciones para obras de construcción, la influencia del mar en ellas variará dependiendo de la proximidad a la costa y sobre todo de la permeabilidad del terreno. Las mareas afectan el terreno produciendo subidas y bajadas en el nivel freático en el interior de las excavaciones (Lomoschitz Mora-Figueroa y López Marinas 1994).

Importancia del nivel freático en la estabilidad de los acantilados (Suárez Díaz 1998)

La ubicación del nivel freático corresponde a la línea de presión de poros igual a cero, equivalente a que la presión neta en el sitio es igual a la presión atmosférica. Por debajo del nivel, progresivamente, a medida que se desciende, la presión es superior, ya que soporta la presión de la columna de agua que se encuentra por encima. Es decir, el nivel de agua determina los niveles de presiones hidrostáticas sobre una superficie localizada por debajo del nivel freático. La presión de poros es la presión que ejerce el agua subterránea sobre las partículas, en los espacios (poros), dentro de una roca o suelo. La presión de poros trata de separar las partículas y de esta forma, disminuye la resistencia a la fricción. La resistencia al corte de las rocas y suelos depende de la fricción y cohesión.

Importancia de los lineamientos y la influencia del mar

El sector estudiado, ubicado entre las bajadas Uno y Cero, tiene una longitud de 300 metros de acantilado donde se desarrollan unas 15 grutas de origen marino, alineadas en su base, escasamente separadas por unos 20 metros una de otra (Fig. 5). Esta sección, además de ser proclive a las subsidencias, constituye la zona de mayor inestabilidad de los acantilados. La presión del agua en las fisuras (como las representadas en la Fig. 12), influye de manera significativa sobre la posibilidad de desplazamiento de bloques siguiendo planos de debilidad estructural.

El efecto mecánico del oleaje provoca desplazamientos de rocas hacia y alrededor de cada una de las cuevas a través de las fracturas y derrumbes del techo por flexiones excesivas en la separación de los estratos (Fig. 12; Ramírez Oyanguren-Monge 2004).

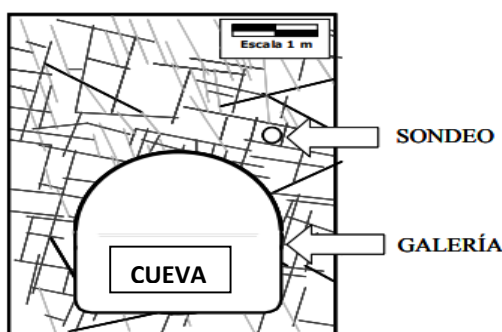


Figura 12. Esquema de estructuras de una formación rocosa sobre una cueva o caverna y un sondeo. Ilustra la influencia de las discontinuidades sobre el tamaño de las aberturas. Obsérvese el efecto desestabilizante que pueden provocar las fracturas en relación a la magnitud de las aberturas (Modificado de Ramírez Oyanguren-Monge (2004).

Las olas constituyen el principal factor dinámico actuando por presión, succión, choque, ametrallamiento y efecto de rebote vertical (Bonuccelli 2005). Por ejemplo, la presión ejercida por las olas del Atlántico sobre la costa española es de 3.000 Kg./m² durante el verano, 10.000 Kg./m² durante el invierno y 30.000 Kg./m² durante grandes tormentas (Holmes 1952). Ante choques de gran intensidad como las de las olas en la zona de estudio, las fisuras y grietas gradualmente se abren y ensanchan. El agua se introduce en cada una de las aberturas comprimiendo el aire ocluido entre las rocas. Al retirarse cada ola, el aire comprimido se expande súbitamente con fuerza explosiva y

con el tiempo, bloques grandes y pequeños, bajo el incesante bombardeo, se van desprendiendo y desplomándose (Fig. 13).

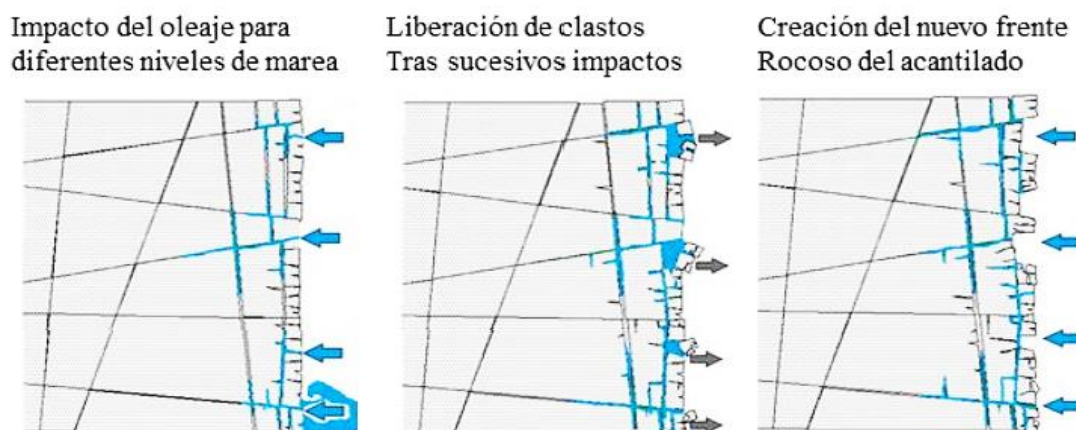


Figura 13. Esquema sobre la liberación de material por acción de las olas en el frente rocoso del acantilado (Tomado de Castedo Ruiz 2012).

Este proceso, traducido sobre los acantilados, puede apreciarse también en el interior de las grutas. La mayor intensidad ocurre en el sector comprendido entre Bajada Uno y bajada Cero, porque es el sector de costa más expuesto a las rompientes por estar recortado hacia mar adentro. El choque destructor de las olas y la dinámica de la disolución de los acantilados acarrearán graves problemas en la capacidad portante de la roca de los acantilados.

Modelo: La roca que almacena agua y sus discontinuidades

Como se mencionó antes, la formación rocosa del acantilado presenta una estructura sedimentaria ligada a rocas carbonatadas, las que permiten la circulación del agua. En superficie, esta estructura se encuentra cubierta por un manto detrítico de hasta 2 m de espesor, con buena permeabilidad (como se representa en la Fig. 2). De acuerdo a Fucks et al. (2015), la capa entre la superficie del sustrato rocoso carbonatado y el nivel impermeable se compone “litológicamente de arcillas y arenas con colores que varían entre el pardo amarillento, pardo grisáceo y verde. En cuanto a su textura, se asocian a arcillitas, arcillitas arena margosas, calcoarenosas, areniscas de grano mediano a fino, areniscas coquinoideas, arcillosas y calcáreas, presentándose materiales tobáceos y niveles de yeso, ya sea cristalizado o en forma pulverulenta”.

Se propone en el presente informe que es justamente el carbonato de calcio contenido en las rocas descriptas, el componente susceptible de dilución, que da lugar al proceso de karstificación. Las discontinuidades de las rocas (planos de estratificación, fracturas, diaclasas, etc.) constituyen planos de debilidad que controlan el comportamiento mecánico de la formación rocosa. Por lo tanto, el número o cantidad de discontinuidades condiciona la intensidad de fracturación y el tamaño de los bloques.

Existen evidencias de estudios similares al presentado aquí en diversos puntos del planeta (Galloway y Burbly 2011). Numerosos casos de hundimientos fueron identificados a partir de investigaciones realizadas en Taipei (China; Hu et al. 2009), Londres (Inglaterra; Longfield 1932), Ciudad de México (México; Marsal y Mazari 1959), Tokio (Japón; Kazaoka et al. 2015), Debrecen (Hungría; Orlóczy 1968), España (Gomez et al. 2009) y Santa Clara Valley (California; Poland et al. 1988), por mencionar sólo algunas. Tal ha sido la magnitud e importancia del problema de la subsidencia que se la ha catalogado como un problema global, y fue el primero en

incluirse en los proyectos de la International Hydrological Decade de la UNESCO en 1964, y más tarde en el International Hydrological Programme (UNESCO 1969). Varios grupos de investigación se enfocaron en el proceso, en detalles de las fracturas (Hernández-Marín et al. 2014), en la modelación (Calderhead et al. 2011), en aspectos geológicos y geomecánicos (Carreón-Freyré et al. 2005), en el monitoreo y deformación de la superficie (Yan et al. 2012), entre los diversos temas abordados en las últimas décadas. Es urgente avanzar en este tipo de investigaciones en la zona de estudio de Las Grutas, conocer por ejemplo el valor y la tasa de las probables subsidencias, para poder relacionar esos resultados con parámetros específicos en relación con el desarrollo de fracturas en la superficie del suelo.

CONCLUSIONES

- Las principales fuentes de alimentación del acuífero costero de Las Grutas se generan fundamentalmente a partir de las actividades que emplean el recurso hídrico, ya que la recarga pluvial es escasa.
- La recarga del acuífero se produce principalmente por infiltración de agua de escorrentía superficial, a través del manto detrítico que cubre la formación carbonatada y por volcado subterráneo de los pozos negros.
- El acuífero responde rápidamente a los eventos estacionales. El crecimiento demográfico en la época estival produce importantes aumentos de caudal al acuífero con diluciones significativas de minerales del acantilado.
- Se ha comprobado químicamente la naturaleza de las aguas carbonatadas que circulan en los acantilados y el proceso de dilución por el agua sobre las rocas carbonatadas, determinando la existencia de un proceso de karstificación.
- Se ha corroborado también la composición de las costras calcáreas (espeleotemas), que resultaron contener principalmente calcita precipitada, y en menor proporción, de cristales de yeso.
- El vertido cloacal al subsuelo, así como la infiltración de aguas residuales con nutrientes aumentados, provocan un medio fuertemente reductor microbiano de sustancias orgánicas, además de serios problemas de contaminación de las playas del balneario.
- La disolución del carbonato de calcio existente en superficie y en el interior del macizo rocoso podrían originar un nuevo modelo de evolución de los acantilados, en especial en el sector del casco viejo, con probabilidad de riesgos en lo urbanístico (asentamientos diferenciales, subsidencias, etc.) y con impacto turístico negativo (destrucción de las grutas y pérdida de calidad paisajística).
- Se propone la existencia de un proceso kárstico, caracterizado por la utilización de las aguas residuales por conductos preferentes de la roca del acantilado. Dado que su origen es por el desarrollo urbano y el consecuente uso del recurso hídrico en el Balneario Las Grutas, se sugiere el nombre de “**karstificación antropocena**” y se advierte a las autoridades sobre el progresivo deterioro de la costa a una tasa relativamente acelerada.

- El grado de disolución de la roca dependerá de la disponibilidad y forma de recarga del acuífero (fundamental), de la litología y estructura de las rocas, de la hidrogeoquímica en la estructura del acantilado y de efectos múltiples (aditivos/sinérgicos) del proceso.

AGRADECIMIENTOS

Deseamos agradecer muy especialmente a las Dras. Violeta González y Ana L. Fernández, del Departamento de Geología de la Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca, por los estudios realizados sobre las muestras de rocas. Asimismo, a la Ing. Paula Fava, del Laboratorio de Química (ESCiMar-UNCo) por la realización de los primeros análisis de muestras de agua, y a Aguas Rionegrinas SA, por facilitar los resultados de un análisis de rutina de una muestra de agua de la salida de la planta potabilizadora de San Antonio Oeste.

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

- Ayala Gancedo FJ, Ferrer Gijon M, Ramírez Trillo F, Cisneros Macho M, Grao del Pueyo JA, Martínez Pledel B (1989) Estudio de riesgos geológicos asociados al karst de Lekeitio (Vizcaya). Instituto Tecnológico Geominero de España, 01244, 185p.
- Bonuccelli RS (2005) Los acantilados del Balneario Las Grutas: Procesos y acciones que intervienen sobre el litoral. Destrucción de los acantilados. Medidas preventivas para que se transformen en estructuras estables. En Masera RF, Lew J, Serra Peirano G (Eds.). Las Mesetas Patagónicas que Caen al Mar: la Costa Rionegrina. Gobierno de Río Negro. p. 221-234.
- Bonuccelli RS, Narvarte M (2017) Manejo de aguas residuales en Las Grutas (Río Negro): ¿matando a la gallina de los huevos de oro? Informe Técnico N°02/2017. Escuela Superior de Ciencias Marinas, Universidad Nacional del Comahue, 15 p.
- Buckerfield SJ, Waldron S, Quilliam RS, Naylor LA, Li S, Oliver DM (2019) How can we improve understanding of faecal indicator dynamics in karst systems under changing climatic, population, and land use stressors? – Research opportunities in SW China. *Science of the Total Environment* 646: 438–447.
- Calderhead AI, Therrien R, Rivera A, Martel R, Garfias J (2011) Simulating pumping-induced regional land subsidence with the use of InSAR and field data in the Toluca Valley, Mexico. *Advances in Water Resources* 34: 83–89.
- Carreón-Freyre D, Cerca M, Luna-González L, Gámez-González J (2005) Influencia de la estratigrafía y estructura geológica en el flujo de agua subterránea del Valle de Querétaro. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 22: 1-18.
- Castedo Ruiz R (2012) Modelización de costas rocosas acantiladas. Tesis (Doctoral). E.T.S.I. Minas (UPM), 253 p.

- Freeze RA, Cherry JA (1979) *Groundwater*: Englewood Cliffs, NJ, Prentice-Hall, 604 p.
- Fucks EE, Pisano MF, Huarte RA, Di Lello CV, Mari F, Carbonari JE (2015) stratigraphy of the pluvial deposits of the Salado river basin, Buenos Aires province: lithology, chronology and paleoclimate. *Journal of South American Earth Sciences* 60:129-139.
- Galloway DL, Burbey TJ (2011) Review: Regional land subsidence accompanying groundwater extraction. *Hydrogeology Journal* 19:1459-1486
- Genchi SA, Carbone ME, Piccolo MC, Perillo GME (2010) Déficit hídrico en San Antonio Oeste, Argentina. *Revista de Climatología* 10:29-43.
- Genchi SA (2012) Geomorfología regional y dinámica costera del sector occidental del Golfo San Matías. Tesis (Doctoral), Universidad Nacional del Sur. 250 p.
- Gómez JLS, Soriando MA, Pocoví Juan A, Arlegui Crespo LE, Casas Sáinz AM, Liesa Carrera CL, Luzón A, Pérez García A, Pueyo Anchuela O, Pueyo Morer ML, Mochales T, Gracia Abadías FJ, Ansón D (2009) Riesgo de subsidencia kárstica en áreas urbanas: el caso de Zaragoza. *Revista de la Asociación Española para la Enseñanza de las Ciencias de la Tierra* 17(3):303-315.
- Hernández-Marín M, Pacheco-Martínez J, Ramírez-Cortes A, Burbey TJ, Ortiz-Lozano JA, Zermeño-de-León ME, Guinzberg-Velmont J, Pinto-Aceves G (2014) Evaluation and analysis of surface deformation in west Chapala basin, central Mexico. *Environ Earth Sci* 72(5): 1491–1501
- Holmes A (1952) *Geología Física*. Ediciones Omega SA Barcelona 281pp.
- Hu BB, Zhou J, Wang J, Chen ZL, Wang DQ, Xu SY (2009) Risk assessment of land subsidence at Tianjin coastal area in China. *Environmental Earth Sciences* 59 (2): 269–276.
- Kazaoka O, Kameyama S, Shigeno K, Suzuki Y, Morisaki M, Kagawa A, Yoshida T, Kimura M, Sakai Y, Ogura T, Kusuda T, Furuno K (2015) Subsidence by liquefaction-fluidization in man-made strata around Tokyo bay, Japan: from geological survey on damaged part at the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake PIAHS-372-221.
- Kokot RR, Salminci, JG, Luna, FS, Tunstall C (2013) Retroceso costero y su relación con parámetros geotécnicos: Las Grutas, Río Negro; Asociación Argentina de Geología Aplicada A la Ingeniería; *Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente* 20(6): 53-66.
- Kranjc A (2011) The Origin and evolution of the term “Karst”. *Procedia Social and Behavioral Sciences* 19:567–570.

- Lomoschitz Mora-Figueroa A, López Marinas JM (1994) Geología aplicada a la ingeniería civil. Editorial El Duende. 506p.
- Longfield, T.E., 1932. The subsidence of London, Ordnance Survey Professional Papers, no. 14, HMSO, London
- Marsal RJ, Mazari M (1959) The Subsoil of México City. XXVIII Reunión Nacional de Ingeniería Geotécnica, Universidad Nacional Autónoma de México. 40p.
- Narvarte M. 2006. Plan de Monitoreo de Contaminación de la zona costera del Golfo San Matías. Informe Final. Proyecto Prevención de la Contaminación Costera y Gestión de la Diversidad Biológica Marina Donación GEF N° 28385 AR. Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable. Noviembre 2006. 18 p.
- Olivares G.M. 2016. Anegamiento de Banquina Ruta Nacional N° 3 a la altura planta transformadora energía San Antonio Oeste. Informe Técnico Interno del Departamento Provincial de Aguas de Río Negro.
- Orlóczi I (1968) A felszín alatti vízkészlet igénybevételének vizsgálata Debrecenben a terepszint süllyedésének mérése alapján (Investigation of the Water Balance Based Upon Measurements of Land Subsidence Caused by Ground Water Withdrawal in Debrecen). Hidrológiai Közlöny 48 (5): 205–213.
- Poland JF, Ireland RL (1988) Land subsidence in the Santa Clara Valley, California, as of 1982: U.S. Geological Survey Professional Paper 497-F, 61 p.
- Ramírez Oyanguren P, Alejano Monge LR (2004) Mecánica de Rocas: Fundamentos e Ingeniería de Taludes. Red DESIR, Madrid. 300p.
- Rojó García A (2015) Los procesos kársticos en Castilla y León. Tesis (Maestría), Universidad de Valladolid. 70p.
- Santoalla FG, Jiménez AM, López PC (2005-2006) Dolinas de subsidencias y de colapso en el karst aluvial de Gravalos (La Rioja): Origen y Evolución. Zubía 23-24: 59-58.
- Silva Jr GC, Bocanegra E (2007) Groundwater exploitation of fractured rocks in South America. En: Groundwater in Fractured Rocks Imprint CRC Press, 12 p. eBook ISBN9780429224324.
- Suárez Díaz J (1998) Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales. Bucaramaga Ed. Instituto de Investigación. 548 p.
- Yan D, Zhang X, Wen A, He X, Long Y (2012) Assessment of sediment yield in a small karst catchment by using ¹³⁷Cs tracer technique. International Journal of Sediment Research 27: 547-554.