
Aspectos geomorfológicos de los acuíferos kársticos de la Formación Polanco (Ediacárico, Uruguay)

L. González Carreira
D. Segovia
C. Gaucher

P. Collazo
J. Montaña

Resumen: Antecedentes hidrogeológicos de la Formación Polanco generaron interés en el desarrollo de modelos prospectivos de aguas subterráneas en carbonatos. En esta área, se realizó relevamiento de campo, fotográfico (SGM, Google Earth y Drone Phantom 2 Vision+), y se generaron modelos 3D de terreno, para interpretar las características morfoestructurales del relieve kárstico, además, se realizaron perforaciones y datos geoelectricos. Asimismo, se complementaron técnicas prospectivas habituales, con tecnologías de acceso remoto al terreno, con el fin de generar un modelo prospectivo específico para estas litologías. Se detectó la presencia de pliegues que generan un relieve invertido con dolinas tipo “taza” y “tubo”, un relieve kárstico tipo lapiaz, 3 manantiales y el desarrollo de pozos con un caudal promedio

de 30 m³/h. La composición hidrogeoquímica corresponde a aguas bicarbonatadas-cálcicas, de calidad de agua mineral natural.

Palabras clave: carbonatos, kárstico, manantiales, dron, agua mineral.

Resumo: Antecedentes hidrogeológicos da Formação Polanco geraram interesse no desenvolvimento de modelos prospectivos de águas subterrâneas carbonáticas. Nesta área, foi realizado um levantamento fotográfico de campo (SGM, Google Earth e Drone Phantom 2 Vision +), e foram gerados modelos 3D do terreno para interpretar as características morfoestruturais do relevo cársico, além de perfurações e dados geoelectricos. . Da mesma forma, técnicas de prospecção habituais foram complementadas com tecnologias de acesso remoto ao terreno, a fim de gerar um modelo prospectivo específico para essas litologias. Foi detectada a presença de dobras que geram um relevo invertido com sumidouros tipo “taça” e “tubo”, um relevo cársico tipo lapiaz, 3 nascentes e o desenvolvimento de poços com vazão média de 30 m³/h. A composição hidrogeoquímica corresponde às á.

Palavras-chave: carbonatos, carste, nascentes, drone, água mineral, águas bicarbonato-cálcio, de qualidade mineral natural.

Recibido: Marzo 24, 2020 /Aceptado: Agosto 15, 2020
Publicado en línea: Octubre, 2020
© 2020

L. González Carreira . D. Segovia 
Centro Universitario Regional del Este (CURE)
E-mail de correspondencia: lgonzalez@cure.edu

C. Gaucher . P. Collazo
Facultad de Ciencias, Instituto de Ciencias Geológicas,
Universidad de la República (UDELAR)

J. Montaña
GeoAmbiente, Uruguay

Abstract: Hydrogeological background generates interest in development of prospective models of groundwater in Polanco Formation (Ediacaran). Field survey and photographic analysis (SGM, Google Earth and Drone Phantom 2 Vision+), performing 3D digital terrain model to translate morfoestructural features of karstic relief. Drilling data, geoelectric studies are relieved. Regular prospective techniques with remote access technologies were complemented with the aim of generating a prospective model. As a result, we identified folds with inverted relief including sinkholes karst, karst plain, springs and average wells production of 30 m³/h. Hydrogeochemical groundwater composition is calcium-bicarbonate like natural mineral water.

Keywords: carbonates, karstic, springs, Drone, mineral water.

INTRODUCCIÓN

Los acuíferos kársticos presentan un notable interés económico, ya que la infiltración en rocas carbonáticas suele ser superior a la de los sedimentos detríticos, dando aguas de muy buena calidad y caudales significativos. La circulación del agua en estos acuíferos ocurre mediante el desarrollo de porosidad secundaria, a través de estructuras de disolución de rocas carbonáticas (tubos verticales, huecos y cavernas) (Custodio, & Llamas, 1983). Las formas kársticas superficiales se generan a partir de la disolución de los carbonatos, configurando un modelado del terreno denominado “paisaje kárstico”. Así como estas estructuras se manifiestan superficialmente, existe un modelado subterráneo que las acompaña. Las formas más comunes son lapiaz, dolinas, úvulas, poljes, ponor, entre otros (Huizar-Álvarez & Oropeza-Orozco, 1989). Los karst presentan vulnerabilidad intrínseca a la contaminación, debido a la importante infiltración y la velocidad de circulación del agua en estos sistemas, donde eventos de contaminación puntual pueden generar

plumas de rápido avance en grandes extensiones geográficas.

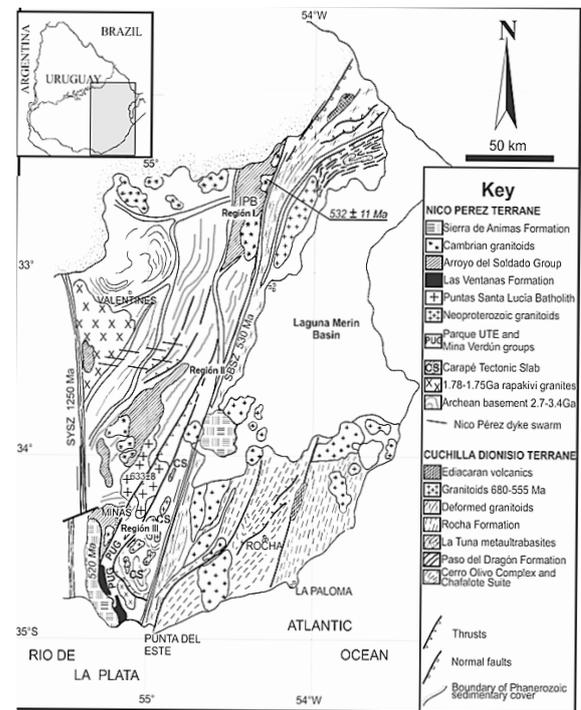


Figura 1. Mapa geológico del Terreno Nico Pérez con las áreas de afloramiento del Grupo Arroyo del Soldado. Se observan las regiones donde se hicieron estudios a detalle (Bossi, & Gaucher, 2004; Frei et al., 2011).

En Uruguay el Grupo Arroyo del Soldado (GAS) corresponde a una sucesión plataforma marina preservada como cobertura del Terreno Nico Pérez (TNP; Gaucher et al., 1996; Gaucher, 2000), de edad Ediacárico tardío (Gaucher et al., 2004, 2007, 2009; Blanco et al., 2009; Frei et al., 2011) a Cámbrico Inferior (Sprechmann et al., 2004) (figura 1). El GAS está integrado entre otras por la Formación Polanco (FP), una de las unidades de mayor extensión geográfica del GAS, representada por potentes depósitos carbonáticos de hasta 900 m de espesor, cuya facies predominante son las ritmitas caliza-dolomía, ocurriendo también calizas y dolomías puras (Gaucher et al., 1996, 1998, 2004, 2009; Gaucher 2000, 2014). En superficie, estas áreas calcáreas están karstificadas y presentan una cobertura de suelos rojos (“terra rossa”), a veces de varios metros de potencia (Preciozzi et al., 1988).

La Formación Polanco es de relevancia como fuente de recursos minerales, ya sean las calizas para la producción de cemento y cal. Otro recurso de importancia y cada vez más valioso son las aguas minerales. Bossi y Navarro (2000), para la región este de Uruguay, identificaron una provincia hidrogeológica donde hay bancos carbonáticos con variación en el relieve, en la fracturación, en los caudales puntuales y en la surgencia, pero de composición química de las aguas constante. Lo cual indica que las condiciones son propicias para su explotación.

DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

Corresponde al sector centro-este del territorio uruguayo, en el Terreno Nico Pérez, para sectores donde afloran unidades del GAS, como los carbonatos de la Formación Polanco.

Se consideraron tres regiones en los departamentos de Treinta y Tres y Lavalleja, que de norte a sur son Región I, Región II y Región III (figura 1).

METODOLOGÍA

Para el estudio estructural y geomorfológico se realizó la fotointerpretación a escala 1/20.000 de las fotos aéreas (133-074 a la 076; 177-140 a la 14135-152 a la 154) del Plan Cartográfico del Servicio Geográfico Militar (SGM) del año 1966-67, así como el análisis de imágenes satelitales obtenidas a través del programa Google Earth. Se realizó el relevamiento geológico y geomorfológico, atendiendo especialmente pliegues, fallas, diaclasado y las geoformas kársticas. Se sobrevoló a 150 m de altura con un dron (DJI Phantom II Vision +) y se obtuvieron ortofotos con solapamiento de 60% (figura 2). Fueron relevadas las perforaciones y se determinó su profundidad, nivel piezométrico, caudal y posición en el terreno. Se emplearon datos geoeléctricos de Sondeos Eléctricos Verticales (SEV), que permitieron interpretar información obtenida en campo. Para el diseño de mapas geológico-estructurales

se utilizó el programa Map Info-Discover (versión 10.5), junto con datos de fotos aéreas e imágenes satelitales de Google Earth Pro. En el procesamiento de los datos estructurales se empleó el programa StereoNet (versión 1.0.1). El análisis morfoestructural se completó con el estudio de la geomorfología de las áreas mediante un modelo digital de terreno 3D, generado a partir de las imágenes obtenidas mediante el vuelo del dron, aplicando el software Agisoft Photoscan. Para la realización de los diagramas y el tratamiento de las imágenes se recurrió a Corel Draw X6 y Adobe-PHOTOSHOP.



Figura 2. Dispositivo aéreo no tripulado (DRONE DJI-Phantom II Vision +).

RESULTADOS

En la Región I afloran las Formaciones Yerbal, Polanco y Cerro Espuelitas. La Formación Polanco está representada por bancos de calizas puras y calizas dolomíticas. Es un pliegue Sinclinal recumbente, con plano axial N45°E, buzando entre 35° y 40° al NW. Operan cabalgaduras con vergencia al SE, que generan límites marcados al N y S del área del sinclinal. Desde el NW hacia el SE, se realizó un corte geológico sobre el área del sinclinal, donde se aprecia la disposición de las unidades y las estructuras que operan (figura 3). La dirección del corte geológico corresponde al sector donde se cuenta con datos de sondeos verticales e hidrogeológicos.

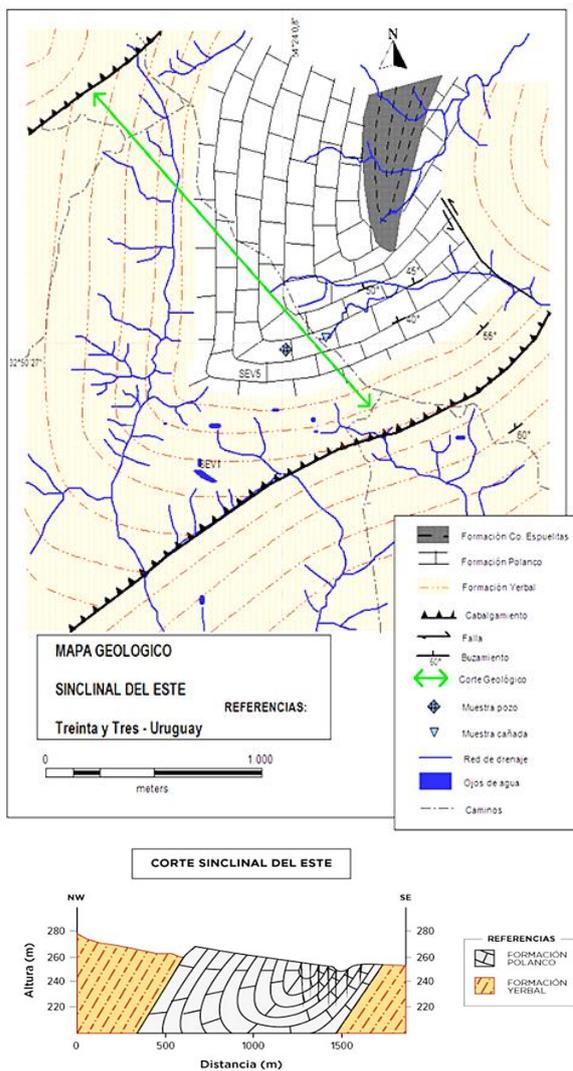


Figura 3. Arriba: mapa geológico de la Región I (Sinclinal del Este). Abajo: Corte geológico de la región I, Treinta y Tres.

Se observa el desarrollo de depresiones en el terreno, de dirección N 40° E; coincide con el rumbo del eje del pliegue y los cabalgamientos que afectan este sector. Las dolinas son estructuras exokársticas que se caracterizan por ser depresiones en la superficie del terreno que se comportan como áreas de infiltración, ya que se comunican con el drenaje subterráneo y, según su morfogénesis, pueden ser clasificadas en diferentes tipos (Huizar, & Oropeza, 1989). En la Región I, se identificó un relieve kárstico de buen desarrollo asociado a las calizas de la Formación Polanco, con estructuras de disolución evidentes. Se registraron estas

estructuras en superficie mediante foto en planta e imágenes obtenidas por el dron (figura 4). Se identificaron dolinas tipo “taza”, donde se observan los procesos de disolución y subsidencia con el desarrollo de suelos tipo “terra rossa”. Estas estructuras están asociadas a un control estructural, vinculado a la dirección del eje del pliegue del Sinclinal del Este. La concentración de dolinas tipo “taza” está asociada a la dirección N 40° a 45° E, que corresponde a la dirección del eje del pliegue. Los modelos digitales de terreno generados a partir de las imágenes capturadas por el dron permiten obtener una visión panorámica de estas estructuras kársticas.

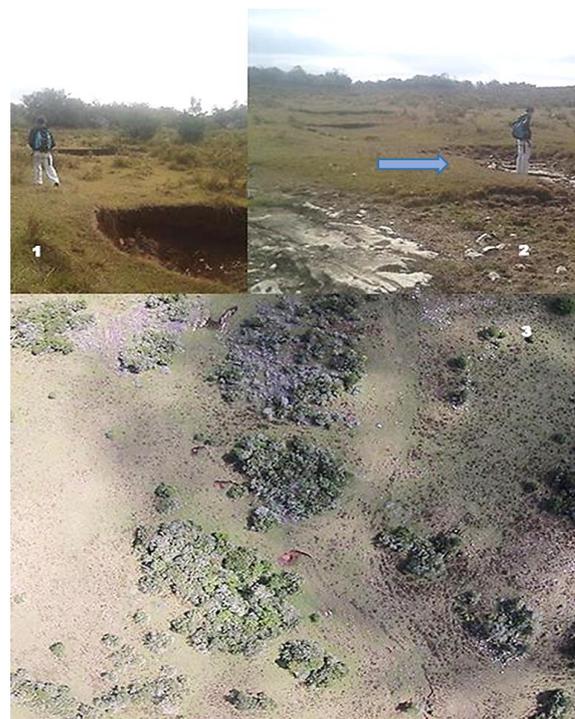


Figura 4. Distribución de estructura de depresión del terreno (Dolinas tipo “taza”), acompañan el rumbo N 45° E. Sinclinal del Este, Treinta y Tres. Dolinas tipo “taza” observadas en planta (1 y 2). Secuencia de Dolinas tipo “taza” observadas con imágenes del dron (3) (coordenadas: X: 32°50’22”, Y: 54°24’10”, fecha: 19/9/15).

Morfoestructuralmente, este pliegue constituye un relieve deprimido, que alberba en la dirección N 40° a 45° E las depresiones

kársticas (González-Carreira, 2016). Los datos registrados con el SEV indican que, próximo a este sector, las condiciones de subsuelo son favorables para hallar aguas subterráneas, pues los valores de resistividad descienden, lo cual indica una elevada permeabilidad en torno al nivel -60 m (Montaño, 2015).

En segunda instancia, se identificaron estructuras de disolución en calizas, con aparente desarrollo vertical mayor que el diámetro de apertura en superficie, donde la corrosión vertical se profundiza y es posible encontrar bloques colapsados desde sectores más profundos en el sector deprimido. Estas estructuras deprimidas se clasificaron como dolinas tipo “pozo”; varias se encuentran descubiertas y otras han sido aprovechadas por el monte nativo para implantarse y desarrollarse en estas cavidades profundas (figura 5).



Figura 5. Diversidad de formas de relieve kárstico conformando dolinas tipo “pozo”. Para 1 y 2, no fue posible alcanzar la base de la depresión. En 3, se observa la base del orificio cerca de la superficie, generando las condiciones para la implantación de retoños de monte nativo. En 4, se observa la corrosión en superficie de las calizas, con sectores de colapso en la estructura y al fondo se ve el desarrollo de monte nativo sobre este tipo de estructuras. Se observa el color gris oscuro característico de las calizas.

En la Región II, la Formación Polanco se caracteriza por estar representada por ritmitas centimétricas de calizas y dolomías. Se desarrollan estructuras cabalgantes con buzamientos casi verticales o de bajo ángulo, de rumbo predominante NE-SW, que afectaron la secuencia sedimentaria; se constata la presencia de manantiales (figura 6). Se realizó un corte geológico NW-SE, paralelo al desarrollo del cauce del arroyo, relevando los afloramientos de carbonatos que se disponen en esa dirección. La dirección de mayor presencia es N 50° a 60° E; se observa este patrón paralelo a la interestratificación de los carbonatos aflorantes. Este fenómeno es un indicio favorable de circulación de agua, ya que en esos planos se observa disolución de carbonatos.

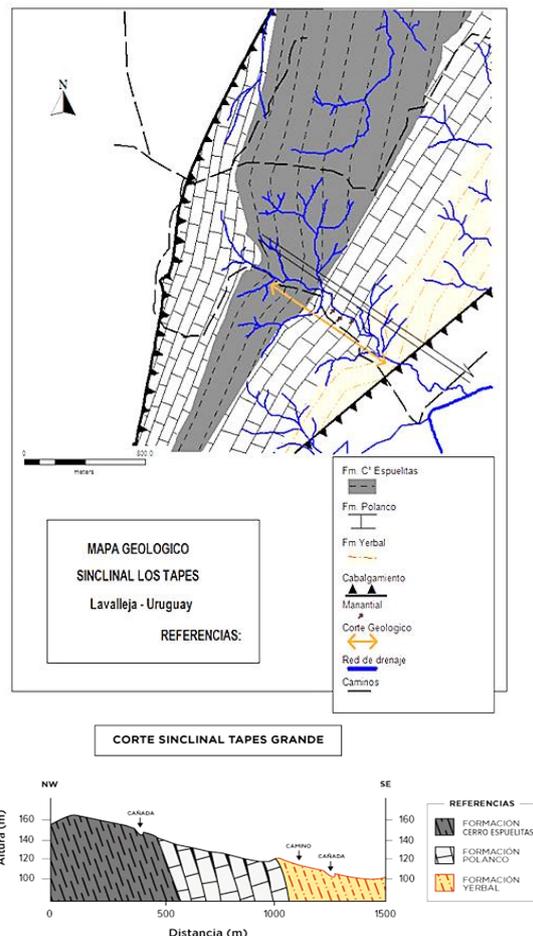


Figura 6. Arriba: Mapa Geológico de la Región II. Abajo: Corte geológico NW-SE (Sinclinal Tapes Grande), Lavalleja.

La distribución de los rasgos estructurales sobre los carbonatos de esta formación permite que se genere una intensa fracturación en superficie. Estas estructuras se registraron en el terreno con imágenes en planta y con el vuelo del dron (figura 7). Los Modelos digitales de terreno permiten visualizar las estructuras exokársticas que se desarrollan en la superficie de la roca, como consecuencia de la erosión del agua a través de fracturas y diaclasas.

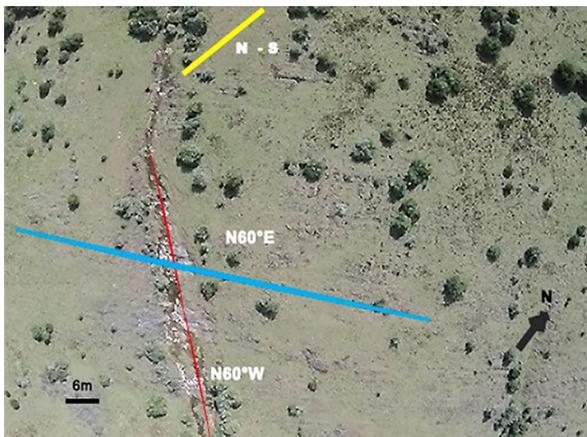


Figura 7. Imagen del dron, donde se visualizan los lineamientos estructurales en superficie, se observan con claridad la estratificación N60°E y la falla N60°W; las estructuras N-S, se ven suaves sobre el extremo superior de la foto. Sinclinal Tapes Grande, Lavalleja (coordenadas del centro de la foto: X: 33°57'59'', Y: 54°57'36'', fecha: 19/9/15).

La dirección de mayor presencia es N 50° a 60° E; se observa este patrón paralelo a la interestratificación de los carbonatos aflorantes. Este fenómeno es un indicio favorable de circulación de agua, dado que en esos planos se observa disolución de carbonatos. Con menor frecuencia, se encuentran los lineamientos de dirección N60°W y N-S, los cuales se asocian a fallas que se observan sobre la red de drenaje.

La distribución de los rasgos estructurales sobre los carbonatos de esta formación permite que se genere una intensa fracturación en superficie. Estas estructuras se registraron en el terreno con imágenes en planta y con el vuelo del dron (figura 7). Los Modelos digitales de terreno permiten visualizar las estructuras exokársticas que se

desarrollan en la superficie de la roca como consecuencia de la erosión del agua a través de fracturas y diaclasas (González-Carreira, 2016).

Los lineamientos de dirección N60°W relevado sobre la red de drenaje se asocian a fallas transcurrentes. La alineación N60°E coincide con la orientación de la cabalgadura al SE del área y corresponde a la estratificación de las ritmitas carbonáticas. Esta característica favorece al desarrollo de un relieve kárstico tipo Lapiaz. Esta forma de disolución kárstica se caracteriza por presentar en superficie un relieve irregular, producto de la corrosión del agua a través de las discontinuidades (figura 8). Esta forma kárstica superficial se genera por disolución de la roca calcárea, generando surcos paralelos y longitudinales que pueden interferir con las diaclasas y generar estructuras arborescentes. La ausencia de cobertura edáfica y una pendiente mayor a 10° favorecen la dinámica del sistema (figura 8/2). También se encuentran hoyos y nichos cilíndricos que se concentran en sectores donde se entrecruzan las estructuras N60°E y N60°W (figura 8/1, 3 y 4).



Figura 8. Se muestran estructuras kársticas en concordancia con las orientaciones: N60°E coincide con lineamientos y estratificación, N60°W corresponde a fallas (foto 1 y 4). Relieve kárstico, de características irregulares en superficie asociado a las diaclasas (foto 2). Estructura kárstica de fractura, desarrollada por diaclasas (foto 3).

En la Región III, se observa el pasaje transicional de las Formaciones Yermal, Polanco y Cerro Espuelitas con intrusiones del Granito de Minas y en contacto tectónico con otras unidades (Gaucher et al., 2004) (figura 9). Se reconocen grandes elevaciones de rumbo NS (ZCSY) y N30°E (Lineamiento Arroyo La Plata) en esta región e intensos plegamientos donde la secuencia sedimentaria del GAS se encuentra afectada.

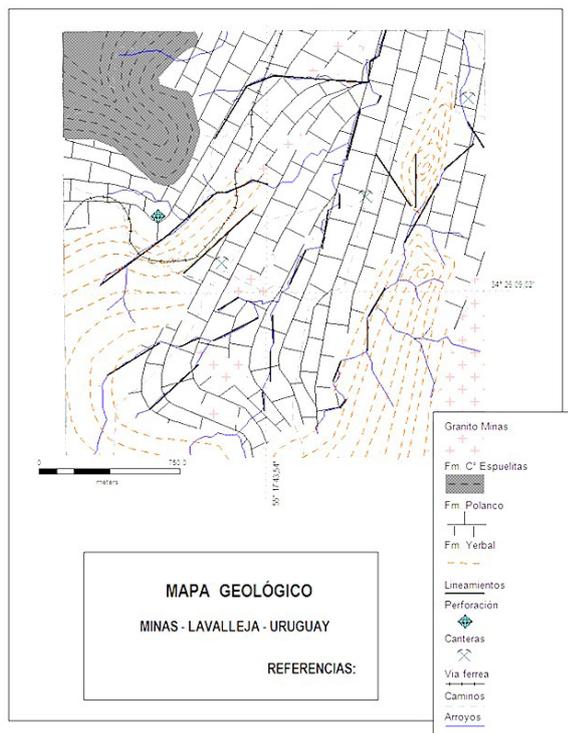
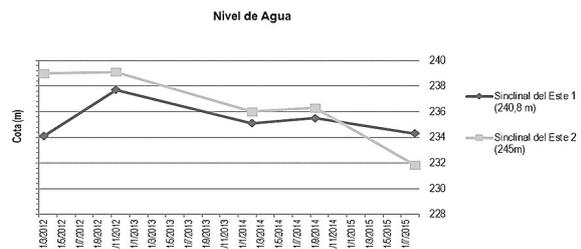


Figura 9. Mapa geológico-estructural de la Región III (Minas). Ampliado del mapa presentado por Gaucher et al. (2004 a).

Se tomaron medidas de nivel de agua de cada pozo para un periodo comprendido entre marzo de 2012 y agosto de 2015. Se graficaron estos datos para mostrar el comportamiento del nivel de agua en cada uno (figura 10). Se comparan las variaciones del nivel de agua en los pozos, con el índice de precipitación estandarizado, el cual mide el exceso o déficit de precipitación para un lugar dado en un periodo de tiempo y lo compara con valores históricos del periodo comprendido entre 1981 y 2010 (figura 11) (Instituto Uruguayo de Meteorología, s.f.)



generan estructuras propias del relieve kárstico, como hoyos y nichos cilíndricos. En los niveles de interestratificación de calizas y dolomías se da la surgencia natural de aguas subterráneas (González-Carreira, 2016) (figura 12). Para este sistema se midió el caudal de la surgente: arrojó un valor de 1200 l/h en setiembre de 2014 y, en junio de 2015, estos niveles de agua subterránea no se manifestaron en superficie. El descenso del nivel de agua que se registró en boca de pozo en la Región del Sinclinal del Este también se observó, con menor precisión, en la Región del Sinclinal de Tapes con la ausencia de surgentes.



Figura 12. Manantial surgente en la Región II, Tapes.

CONCLUSIONES

En las tres regiones analizadas la secuencia sedimentaria del GAS está representada por las formaciones Yerbal, Polanco y Cerro Espuelitas, desde la base hacia el tope, con el pasaje transicional entre cada unidad. Los carbonatos de la Formación Polanco en la Región I (Sinclinal del Este) y III (Minas) se caracterizan por constituir bancos de calizas, calizas dolomíticas y calcarenitas. En cambio, para la Región II (Tapes), la Formación

Polanco está representada por ritmitas de intercalación milimétrica a centimétrica de calizas y dolomías.

En la Región I, la Formación Polanco se dispone conformando un sinclinal con plano axial N 45° E entre dos cabalgaduras: una al NW y otra al SE del área de afloramiento. Esta estructura coincide con los rumbos de los lineamientos registrados sobre la red de drenaje, los cuales oscilan entre N 35° a 45° E. Las Formaciones Yerbal y Cerro Espuelitas se comportan como niveles muy poco permeables hidrogeológicamente. En particular, la Formación Yerbal, que se ubica en los niveles topográficos más elevados del área, genera en superficie depresiones en las que se desarrollan cuerpos de agua temporales. Los resultados del SEV indican que no corresponden a manifestaciones superficiales de agua subterránea, puesto que el sustrato presenta un nivel que supera los 20 m con valores altos de resistividad.

Es de resaltar que en este estudio se definen por vez primera estructuras kársticas. Se desarrolla un relieve kárstico, donde se identifican dolinas tipo “taza” con dirección N 45° E, en igual dirección del eje del pliegue, las estructuras cabalgantes y los principales lineamientos. Se relevaron dolinas tipo “pozo”, abiertas con colapso de las estructuras de las que no se alcanzó la base y que permitieron, a su vez, la implantación de monte nativo en los casos en que los orificios estuviesen rellenos. Morfoestructuralmente, el pliegue constituye un relieve deprimido, que alberga en las cercanías del plano axial, de dirección N 40° a 45° E, depresiones kársticas, estructuras de circulación y acumulación de agua subterránea. Se estima que el karst en calizas plegadas se desarrolla aprovechando el drenaje de plano axial; en dicha estructura es donde se ubica la perforación de caudal 30 m³/h.

En la Región II, se desarrollan cabalgaduras de rumbo NE-SW que afectan la secuencia sedimentaria. No obstante, los lineamientos N 50° a 60° E son dominantes y corresponden a la So de estratificación de los carbonatos. También se encuentran fallas N 60° W y N-S.

A partir de estas estructuras, se identifica un relieve kárstico tipo lapiaz con desarrollo de hoyos y nichos cilíndricos, que se concentran en sectores donde se entrecruzan las estructuras N 60° E y N 120°, además, tres manantiales donde la So y su intersección con la falla N 60° W permiten la surgencia de agua subterránea. En este caso, se observa un comportamiento diferente al de las calizas puras, donde el karst aprovecha el clivaje de plano axial. En los carbonatos más dolomíticos, las fallas parecen jugar un papel importante en el desarrollo del karst. Esto responde posiblemente a la diferente reología de la calcita y la dolomita. El esfuerzo necesario para que fluya la dolomita a bajas temperaturas (~ 200 °C) es de 10 órdenes de magnitud, superior a la calcita (Delle-Piane et al., 2008). Esto significa que a bajas temperaturas, la dolomita presentará deformación frágil, pero la calcita puede deformarse de forma plástica. A temperaturas de 550-600 °C, ambas presentan similares valores de esfuerzos de flujo ("flow stress"; Delle-Piane et al., 2008).

En todas las regiones, el déficit hídrico registrado entre febrero y mayo de 2015 afectó la surgencia, e impidió su registro en superficie. En las perforaciones en el Sinclinal del Este, el pozo de mayor caudal presentó mayor estabilidad frente a la variación de las condiciones climáticas. Considerando la diferencia de cota en el nivel estático de los pozos Sinclinal del Este, se estima que existe independencia en el sistema kárstico del pozo 1 respecto al pozo 2.

Este trabajo representa un paso significativo orientado a la prospección de fuentes de agua, con especial énfasis en las aguas minerales de mesa, que constituyen uno de los recursos minerales de Uruguay y su explotación se encuentra en creciente desarrollo nacional, regional y mundial.

REFERENCIAS

- Blanco, G., Rajesh, H. M., Gaucher, C., Germs, G. J. B., & Chemale Jr., F. (2009). Provenance of the Arroyo del Soldado Group (Ediacaran to Cambrian, Uruguay): Implications for the paleogeographic evolution of southwestern Gondwana. *Precambrian Res*, 171, 57-73.
- Bossi, J., & Navarro, R. (2000). Recursos Minerales del Uruguay. Montevideo: Ediciones Rojobona (CD-ROM).
- Custodio, E., & Llamas, E. (1983). Hidrología Subterránea (Tomo 1 y 2). España: Editorial Omega.
- Delle-Piane, C., Burlini, L., Kunze, K., Brack, P., & Burg, J. P. (2008). Rheology of dolomite: large strain torsion experiments and natural examples. *Journal of Structural Geology*, 30, 767-776.
- Frei, R., Gaucher, C., Poulton, Døssing, L. N., & Sial, A. N. (2011). Chromium isotopes in carbonates – a tracer for climate change and for reconstructing the redox state of ancient seawater. *Earth and Planetary Science Letters*, 312, 114-125.
- Gaucher, C. (2000). Sedimentology, paleontology and stratigraphy of the Arroyo del Soldado Group (Vendian to Cambrian, Uruguay). *Beringeria*, 26, 1-120.
- Gaucher, C. (2014) Grupo Arroyo del Soldado. In: Bossi, J., Gaucher, C. (Eds.) *Geología del Uruguay*. Tomo 1: Predevónico. Polo, Montevideo, pp. 313-339.
- Gaucher, C., Chiglino, L., & Pecoits, E. (2004). Southernmost exposures of the Arroyo del Soldado Group (Vendian to Cambrian, Uruguay): Palaeogeographic implications for the amalgamation of W-Gondwana. *Gondwana Res*, 7(3), 701-714.
- Gaucher, C., Sial, A. N., Ferreira, V. P., Pimentel, M. M., Chiglino, L., & Sprechmann, P. (2007). Chemostratigraphy of the Cerro Victoria Formation (Lower Cambrian, Uruguay): evidence for progressive climate stabilization across the Precambrian

- Cambrian boundary. *Chemical Geology*, 237, 28-46.
- Gaucher, C., Sial, A. N., Poiré, D., Gómez-Peral, L., Ferreira, V. P., & Pimentel, M. M. (2009). Chemostratigraphy. Neoproterozoic-Cambrian evolution of the Río de la Plata Palaeocontinent. En C. Gaucher, A. N. Sial, G. P. Halverson, & H. E. Frimmel (Eds.), *Neoproterozoic-Cambrian tectonics, global change and evolution: a focus on southwestern Gondwana. Developments in Precambrian Geology* (pp. 115-122). Amsterdam: Elsevier.
- Gaucher, C., Sprechmann, P., & Montaña, J. (1998). New advances on the geology and paleontology of the Vendian to Cambrian Arroyo del Soldado Group of the Nico Pérez Terrane of Uruguay. *N. Jb. Geol. Paläont. Mh*, 2, 106-118.
- Gaucher, C., Sprechmann, P., & Shipilov, A. (1996). Upper and Middle Proterozoic fossiliferous sedimentary sequences of the Nico Pérez Terrane of Uruguay: lithostratigraphic units, paleontology, depositional environments and correlations. *Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie, Abh*, 199, 339-367.
- González-Carreira, L. (2016). Caracterización geológica e hidrogeológica de acuíferos kársticos de la Formación Polanco-Ediacárico, Uruguay (Tesis de Maestría). Montevideo: Pedeciba Geociencias, Udelar.
- Huizar-Álvarez, R., & Oropeza-Orozco, O. (1989). Geomorfología kárstica de la región de Galena, Estado de Nuevo León. *Revista Univ. Nac. Autón. México, Inst. Geología*, 8(1), 71-83.
- Instituto Uruguayo de Meteorología. (s.f.). Índice de precipitación estandarizado. Montevideo: INUMET. Recuperado de <http://www.meteorologia.com.uy/ServCli/ipe>.
- Preciozzi, F., Pena, S., & Arrighetti, R. (1988). Carta Geológica del Uruguay, Hoja E-18 Puntas del Yermal, Escala 1:100.000. Memoria Explicativa.
- Sprechmann, P., Gaucher, C., Blanco, G., & Montaña, J. (2004). Stromatolitic and trace fossil community of de Cerro Victoria Formation, Arroyo del Soldado Group (lowermost Cambrian, Uruguay). *Gondwana Res*, 7, 753-766.