

Descarga de agua subterránea submarina durante el Pleistoceno en el acantilado de Aguadulce (Almería, SE España)

Pleistocene submarine groundwater discharge along the Aguadulce cliff (Almería, SE Spain)

Fernando Sola¹, Angela Vallejos¹, Jorge Currás², Linda Daniele^{3,4} y Antonio Pulido-Bosch¹

¹ G.I. Recursos Hídricos y Geología Ambiental. C/ Sacramento s/n. Universidad de Almería. 04120-Almería, España. fesola@ual.es, avallejo@ual.es, apulido@ual.es

² IES Celia Viñas. C/ Javier Sanz 15 04004-Almería, España. jorgecurras@andaluciajunta.es

³ Departamento de Geología. Av. Beauchef 850, Universidad de Chile, Chile, ldaniele@ing.uchile.cl

⁴ Centro de Excelencia en Geotermia de los Andes (CEGA), Fondap-Conicyt 15090013. Plaza Ercilla 803, Santiago, Chile.

ABSTRACT

The town of Aguadulce, in Almería province, receives its name due to the historical discharges of freshwater into the sea, which disappeared as a result of overexploitation of the aquifer in recent times. In this paper, a strip of cliff located just above those ancient discharges, in which a strong solution of the rock that can exceed 60%, has been studied. Dissolution surfaces are impregnated by manganese oxides, on which precipitated calcite and aragonite concretions. These karstic features, located beneath a marine terrace at 40 m a.s.l., had been interpreted as evidences of dissolution reactions and mineral precipitation occurred in a freshwater-seawater mixing zone during the Pleistocene.

Key-words: Submarine discharge, freshwater-seawater mix, Pleistocene, Aguadulce.

RESUMEN

La ciudad de Aguadulce, en la provincia de Almería, debe su nombre a las históricas surgencias de agua freática en el mar, las cuales desaparecieron debido a la sobreexplotación del acuífero. En este trabajo se estudia una franja de acantilado situada justo por encima de esas antiguas surgencias, en la que se observa una fuerte disolución de la roca que puede superar el 60%. Las superficies de disolución están impregnadas por óxidos de manganeso, sobre las cuales precipitaron concreciones de calcita y aragonito. Todos estos elementos de origen kársticos, situados por debajo de una terraza marina a 40 m s.n.m., se han interpretado como el resultado de las reacciones de disolución y precipitación mineral ocurridas en la zona de mezcla agua dulce-agua de mar durante el Pleistoceno.

Palabras clave: Descarga submarina, zona de mezcla agua dulce-agua de mar, Pleistoceno, Aguadulce.

Geogaceta, 57 (2015), 151-154.
ISSN (versión impresa): 0213-683X
ISSN (Internet): 2173-6545

Fecha de recepción: 1 de julio de 2014
Fecha de revisión: 22 de octubre de 2014
Fecha de aceptación: 28 de noviembre de 2014

Introducción

En las zonas de descarga costera se produce una franja de mezcla de aguas, agua dulce continental y agua salada marina, ambas con propiedades y PCO_2 muy distintas lo que favorece que se produzca una amplia gama de procesos físico-químicos (Appelo y Postma, 2005). Aunque los estudios que analizan estos procesos en zonas de mezcla actuales son relativamente comunes (Smart *et al.*, 1988; Sola *et al.*, 2013), son pocos los trabajos que investigan la influencia de estos procesos en el registro fósil (Baceta *et al.*, 2001; Csoma *et al.*, 2006). Los criterios propuestos para reconocer estas zonas de mezcla en el registro sedimentario son (Baceta *et al.*, 2001): 1) que existan criterios indicativos de que

los materiales han estado bajo la superficie freática, 2) desarrollo de una porosidad por disolución, 3) formación de costras de sulfuros u óxidos indicadores de distintas condiciones redox, y 4) otras evidencias que apuntan a una evidencias de una alternancia entre disolución y precipitación de carbonatos.

En este trabajo se estudia el registro sedimentario pleistoceno y el desarrollo kárstico asociado que se observa en el acantilado de Aguadulce, con objeto de dar una interpretación a su génesis.

Encuadre geográfico

La franja costera que se extiende entre los puertos marítimos de Almería y Aguadulce presenta una morfología acantilada,

con desniveles que superan los 200 m. Estos acantilados están excavados en calcoesquitos, calizas y dolomías del Triásico medio del Complejo Alpujárride, a techo de los cuales afloran calcarenitas del Mioceno superior. En este trabajo se estudia el tramo más occidental, justo encima del puerto de Aguadulce (Fig. 1A). El origen del nombre de esta ciudad se debe a la existencia de flujos históricos de agua dulce provenientes del macizo carbonatado de Sierra de Gádor y que descargaban en el mar. Éstos, debido a la fuerte explotación del acuífero desde los años 60 para su uso fundamentalmente en agricultura, llegaron a desaparecer. El abandono de gran parte de los pozos de extracción en este sector en los últimos años, como consecuencia del empeoramiento de la calidad del agua, ha permitido que se res-

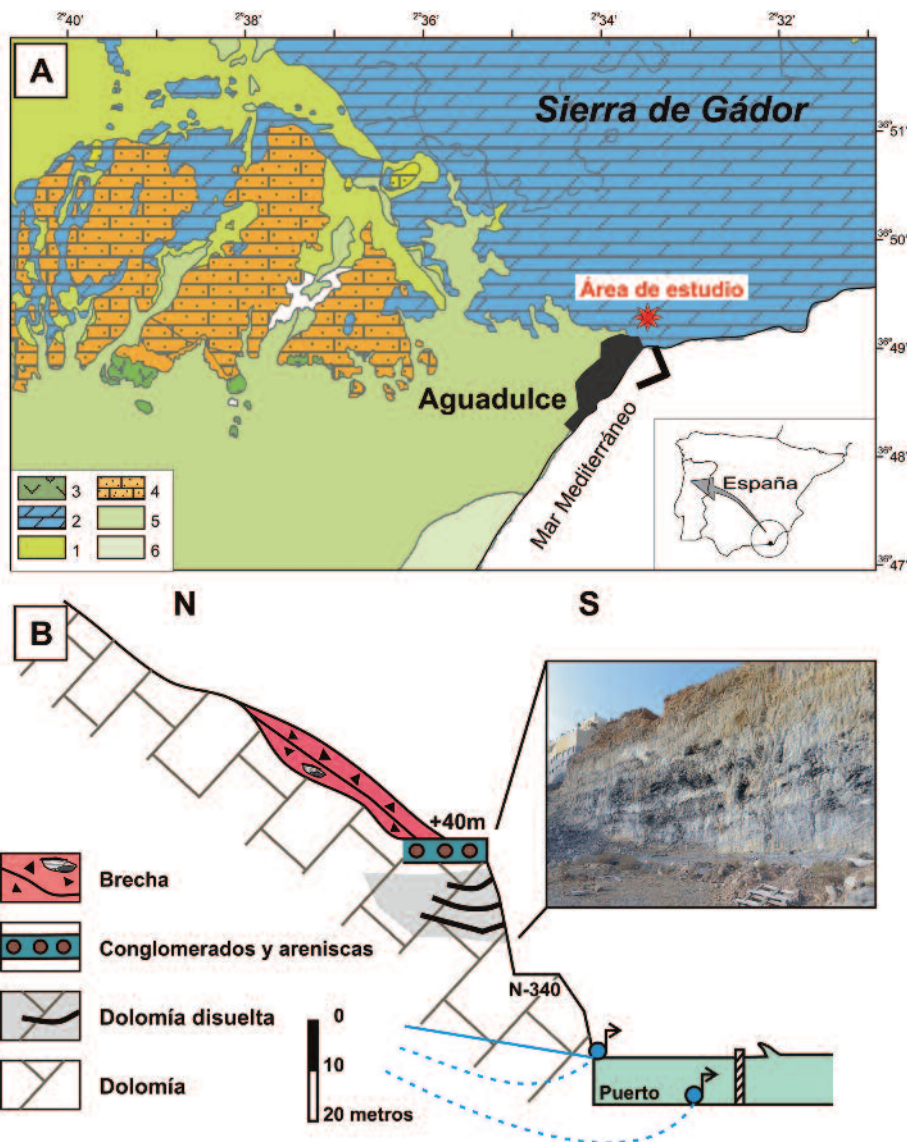


Fig. 1.- A) Situación geográfica y contexto geológico del área de estudio (1: filitas alpujárrides, 2: carbonatos alpujárrides, 3: rocas volcánicas, 4: calcarenitas miocenas, 5: depósitos pleistocenos, 6: depósitos holocenos). B) Sección de acantilado estudiada en la que se observa la fuerte disolución de la roca y precipitados de óxidos de manganeso que dan una fuerte coloración negra al afloramiento.

Fig. 1.- A) Geographical and geological location of the study area (1: alpujarride phyllites, 2: alpujarride carbonates, 3: volcanic rocks, 4: miocene calcarenites, 5: pleistocene deposits, 6: holocene deposits). B) /Section of cliff studied where a strong dissolution of the rock and manganese oxides, which give a strong black coloration to outcrop, are observed.

tablezca en cierta medida el flujo natural, si bien los caudales de descarga actuales podrían calificarse como poco significativos (Díaz-Puga *et al.*, 2011).

La sección de acantilado estudiada presenta una buena exposición a las tareas de observación y estudio, ya que recientemente se ha realizado un desmonte para obras de edificación, que han dejado un talud vertical libre de derrubios o vegetación. Presenta una extensión horizontal aproximada de 300 m y 15 m en vertical, situándose al pie de la carretera nacional N340a que une Aguadulce con Almería, justo encima del punto por el que se producían las históricas surgencias de agua dulce (Fig. 1B).

Materiales y métodos

Con objeto de conocer las fases minerales presentes en los materiales estudiados se realizaron análisis mediante un equipo de Difracción de Rayos X de monocristal el análisis de muestras en polvo BRUKER SMART APEX CCD, con radiación MoK ($= 0,71073 \text{ \AA}$), perteneciente a los Servicios Centrales de Investigación de la Universidad de Almería. Para determinar la composición de los óxidos minerales con menor grado de cristalinidad se tuvo que realizar una descarbonatación previa mediante ácido clorhídrico para eliminar las señales debidas a las fases carbonáticas. Para la

identificación sobre la muestra de mano de los carbonatos se realizó una tinción de alizarina y ferricianuro potásico según el método de tinción que aparece en el clásico compendio de Reid (1969).

Además, el estudio de texturas y formas de crecimiento mineral se realizó mediante la observación de lámina delgada, perpendicular al crecimiento de los precipitados minerales.

Registro sedimentario y desarrollo kárstico

En discordancia sobre las calizas y dolomías alpujárrides, y a cota de 40 m s.n.m.,

se reconoce un nivel horizontal de aproximadamente un metro de potencia compuesto por bloques de tamaño decimétrico de caliza alpujárride parcialmente redondeados y perforados por bivalvos litófagos. Lateralmente se produce una rápida reducción de potencia y de tamaño de clastos, pasando a unas areniscas y conglomerados muy redondeados y seleccionados, compuestos esencialmente por cuarcitas alpujárrides. Las areniscas pasan finalmente a un nivel decimétrico compuesto principalmente por algas rojas y ostreidos (Fig. 2A). Estos materiales están cubiertos por una brecha heterométrica de cantos de carbonatos alpujárrides. Se trata de una brecha matriz soportada con clastos que varían desde varios metros a pocos centímetros de diámetro. La matriz es de tamaño limo a arcilla, de color rojo, y está fuertemente cementada. La brecha se asienta sobre el basamento alpujárride con una estratificación que pasa en la vertical de bancos métricos a decimétricos. Presenta una fuerte pendiente que oscila entre los 25 y 30°. La presencia de fósiles dentro de la brecha es escasa, pudiéndose encontrar restos del gasterópodo pulmonado *Iberus gualtieranus*, un actual endemismo de Sierra de Gádor, conocido localmente como "caracol chapa" por su morfología aplanada y su marcada carena (Fig. 2B).

Por debajo del nivel de conglomerado y arenisca se extiende una franja de unos 15 m de potencia donde los carbonatos alpujárrides están notablemente disueltos (Fig. 1B). La disolución se concentra en bandas más o menos horizontales de potencias variables que oscilan entre un decímetro y un metro. El mayor grado de disolución se encuentra en la parte central de estas bandas con porcentajes que pueden superar el 60%, reduciéndose hacia sus bordes. Las franjas de roca entre estas bandas presentan un grado de disolución bajo o nulo. La disolución de los carbonatos alpujárrides ha dado como resultado en algunos puntos oquedades de varios decímetros de diámetro, si bien lo más común es el desarrollo de una porosidad centimétrica con geometrías bastante angulosas. Recubriendo las superficies de disolución se han formado unas pátinas minerales de colores negro y blanco. La composición mineral de estos precipitados se ha podido reconocer mediante difracción de rayos-X. Los primeros precipitados en depositarse sobre las superficies de disolución fueron óxidos de manganeso, que dan una

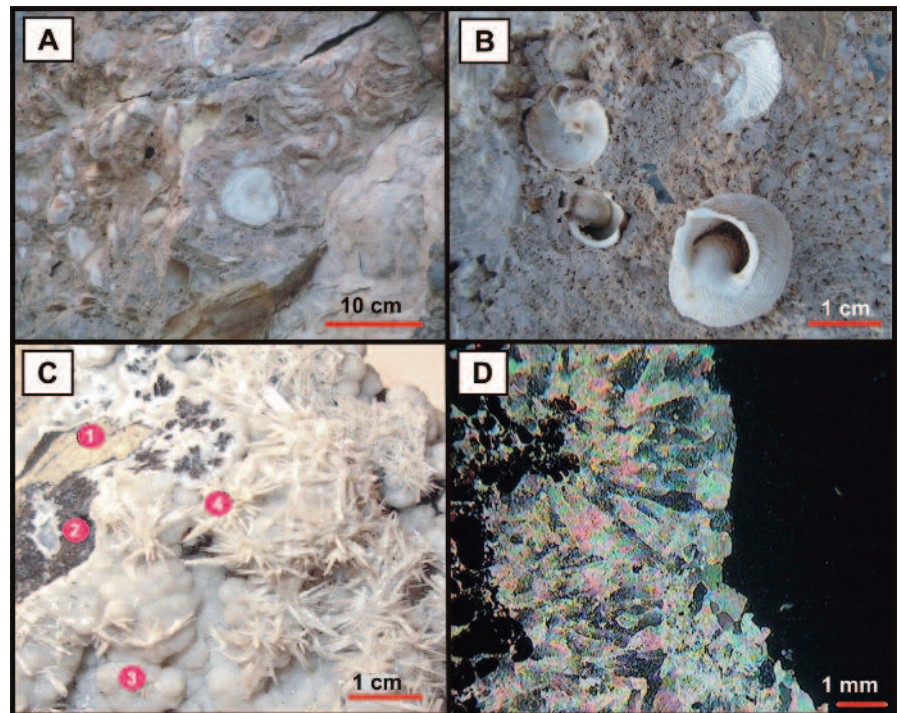


Fig. 2.- A) Acumulación de conchas de ostreidos en la terraza marina. B) Ejemplos de restos fósiles de *I. gualtieranus* y comparación con un ejemplar actual. C) Precipitados minerales sobre la dolomía de caja (1), óxidos de manganeso (2), calcita (3) y aragonito (4). D) Lámina delgada en la que se observan crecimientos aciculares de calcita sobre óxidos de manganeso.

Fig. 2.- A) Oyster shell lag in the marine terrace. B) Fossil remains of *I. gualtieranus* and an actual example for comparison. C) Mineral precipitates on dolomite rock (1), manganese oxides (2), calcite (3) and aragonite (4). D) Thin section with acicular growth of calcite over manganese oxides.

fuerte tonalidad negra a la roca y tiznan al tacto. Estas fases minerales no han podido ser identificadas debido a su bajo grado de cristalinidad. Sobre éstos, se observan concreciones de calcita, apareciendo en último lugar y de manera eventual, cristales bien desarrollados de aragonito en forma acicular (Figs. 2C y 2D).

Interpretación

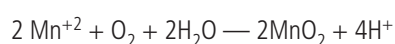
Dado el gran tamaño de clastos, su bajo grado de redondeamiento y el hecho de que los bloques del nivel conglomerático presenten igual composición litológica que el substrato adyacente, se puede inferir que éstos habrían sufrido un bajo o nulo transporte, pudiéndose interpretar este nivel como un lag transgresivo que se habría depositado al pie del acantilado. Lateralmente este conglomerado pasa a areniscas cuarcíticas con un alto grado de madurez. No existen cuarcitas en las inmediaciones de este depósito, por lo que su presencia estaría ligada a un transporte por deriva litoral. Las facies ricas en restos de bivalvos y algas rojas representarían una zona marina so-

mera. El rápido paso de sedimentos conglomeráticos a facies ricas en fósiles sería indicativo de la existencia de una fuerte pendiente. En conjunto, estos sedimentos representarían los depósitos de una terraza marina al pie de un acantilado durante el Pleistoceno. La altura a la que se encuentran, 40 m s.n.m., indicaría que estos sedimentos han sido levantados por la neotectónica hasta su posición actual. Terrazas marinas similares han sido descritas en las proximidades a cotas que superan los 120 m s.n.m. (Sola *et al.*, 2011). En otras zonas del Campo de Dalías, se localizan también terrazas a una altura de 40 m s.n.m. pertenecientes al Pleistoceno medio (Zazo *et al.*, 2003), sin embargo, las terrazas más altas no superan los 90 m. Es posible que en la zona de Aguadulce la tectónica haya sido más acusada y la terraza estudiada sea algo más moderna.

El color rojo de la matriz que engloba la brecha que aparece sobre la terraza marina denota que el clima en el que ésta se depositó sería más húmedo que el actual, dado el alto grado de oxidación. Su alta pendiente, adaptada a la paleotopografía,

no tendría un origen tectónico, interpretándose este depósito como un coluvial al pie del acantilado. En otras zonas del sur de España este tipo de depósitos son denominados como *brecha mortadela* (Moissenet, 1980). La presencia de restos fósiles de *I. gualtieranus*, no descritos hasta el momento, indicaría que este endemismo ha vivido en Sierra de Gádor y sus estribaciones desde el Pleistoceno.

La franja de rocas alpujárrides por debajo de la terraza marina presenta una fuerte tasa de disolución. Formas de disolución similares han sido descritas como Swiss-cheese (Calner *et al.*, 2010), con la diferencia de que en éstas la porosidad resultante suele ser redondeada frente las formas angulosas que se han originado en el área de estudio, probablemente debido a que aquí la roca disuelta ha sido una dolomía. Estas formas de disolución se generan en zonas de mezcla agua dulce-agua de mar en acuíferos costeros carbonatados con la intervención de bacterias. Estas bacterias son también las responsables de la precipitación de incrustaciones de óxidos (Smart *et al.*, 1988; Baceta *et al.*, 2001). En el área de estudio, las superficies de disolución están impregnadas principalmente por óxidos de manganeso. El manganeso procedente del lavado de los relieves de Sierra de Gádor es movilizado a través de las aguas subterráneas hasta la zona de mezcla, donde se habría oxidado y precipitado. En este proceso de oxidación el medio se habría acidificado según la ecuación:



Esta acidificación del medio favorece la disolución de la roca (Gázquez *et al.*, 2012a) y explicaría su alta porosidad. Sobre la pátina de óxidos de manganeso se han formado cristales de calcita y aragonito, in-

dicando un claro cambio en las condiciones de saturación de estas fases minerales en el medio. La precipitación de una u otra fase mineral podría haber estado condicionada por el porcentaje de agua de mar presente en la zona de mezcla. La cristalización de aragonito sería un indicador de un mayor porcentaje de agua de mar (Csoma *et al.*, 2006). Una elevada relación Mg/Ca suele favorecer la precipitación de aragonito, mientras que inhibe la formación de calcita (Gázquez *et al.*, 2012b).

Esta zona de mezcla se sitúa actualmente entre 25 y 40 m s.n.m., justo encima de las salidas históricas de agua dulce subterránea al mar. Esto sería indicativo de que desde el Pleistoceno hasta la actualidad se han estado produciendo descargas de agua dulce procedentes del macizo carbonatado de Sierra de Gádor, estando condicionadas por la estructura geológica de la zona y más recientemente, por el sistema de explotación del acuífero que ha podido favorecer en ciertos momentos procesos de intrusión marina.

Conclusiones

Una franja de roca con alto grado de disolución situada en los acantilados de Aguadulce se interpreta como una antigua zona de mezcla. Ésta está situada justo debajo de una terraza marina pleistocena, y encima de históricas descargas de agua dulce existentes en la zona. Esta antigua zona de mezcla está caracterizada por una intensa disolución de los carbonatos alpujárrides, con tasas que superan el 60%, y por la presencia de precipitados de óxidos de manganeso y de carbonatos, indicadores de cambios en las condiciones redox y en el índice de saturación de carbonatos a lo largo del tiempo, todas ellas características propias de estas zonas de mezcla.

La posición de esta zona de mezcla indica que desde el Pleistoceno hasta la actualidad éste ha sido un área de descarga de las aguas subterráneas de Sierra de Gádor.

Referencias

- Appelo, C. y Postma, D. (2005). *Geochemistry, groundwater and pollution*. 2nd ed. AA Balkema, Rotterdam, 649 p.
- Baceta, J.I., Wright, V.P. y Pujalte, V. (2001). *Sedimentary Geology* 139, 205-216.
- Calner, M., Lehnert, O. y Nölvak, J. (2010). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 296, 235-247.
- Csoma, A.E., Goldstein, R.H. y Pomar, L. (2006). *Sedimentology* 53, 213-236.
- Díaz-Puga, M.A., Vallejos, A., Daniele, L., Sola F., Rodríguez-Delgado, D., Molina, L. y Pulido-Bosch, A. (2011). En: *Advances in the Research of Aquatic Environment* (N. Lambrakis, G. Stournaras y K. Katsanou, Eds.), Springer-Verlag, Berlin, 417-424.
- Gázquez, F., Calaforra, J.M. y Rull, F. (2012a). *Geomorphology* 177, 158-176.
- Gázquez F., Calaforra J.M., Rull F., Forti P. y García-Casco A. (2012b). *International Journal of Speleology* 41, 113-123.
- Moissenet, E. (1980). *Revue Géographique des Pyrénées et du Sud-Ouest* 51, 315-324.
- Reid, W.P. (1969). *Mineral Industries Bulletin* 12(3), 1-20.
- Smart, P.L., Dawans, J.M. y Whitaker, F. (1988). *Nature* 335, 811-813.
- Sola, F., Sanna, L. y Pascucci, V. (2011). En: *28th International Association of Sedimentologists (IAS) Meeting*, Zaragoza, Spain, 182.
- Sola, F., Vallejos, A., Moreno, L., López-Geta, J.A. y Pulido-Bosch, A. (2013). *International Journal of Environmental Science and Technology* 10, 63-76.
- Zazo, C., Goy, J.L., Dabrio, C.J., Bardají, T., Hillaire-Marcel, C., Ghaleb, B., González-Delgado, J.A., Soler, V. (2003). *Marine Geology* 194, 103-133.