

## VIDRIOS DE PICA: CONTROL TOPOGRÁFICO EN LA FORMACIÓN DE FUNDIDOS VÍTREOS POR POSIBLE EXPLOSIÓN AÉREA DE UN BÓLIDO

<sup>1</sup>Perroud, Sebastián; <sup>2</sup>Valenzuela, Millarca; <sup>3</sup>Roperch, Pierrick; <sup>4</sup>Gattacceca, Jerome.

1 Escuela de Geología, Facultad de Ingeniería, Universidad Santo Tomás de Santiago. Ejército 146.

2 Instituto de Astrofísica, Pontificia Universidad Católica de Chile. Vicuña Mackenna N°4860.

3 Géosciences Rennes, Université de Rennes. Francia.

4 Centre de Recherche et d'Enseignement de Géosciences de l'Environnement (CEREGE). Francia.

*perroud94@gmail.com*

### RESUMEN

En el norte de Chile, afloran fundidos vítreos y se interpreta y asocia su génesis al impacto de material extraterrestre. Se encuentran asociados a tierra cocida y/o cerámica y un nivel vegetal. Dos de estos sectores presentan morfologías llanas, conformados por depósitos de paleohumedales, y otros dos se encuentran en quebradas. La tierra cocida y/o cerámica son exclusivos de los sectores de quebradas, infiriendo un control topográfico en las condiciones de génesis de los vidrios. La secuencia de vidrios y tierras cocidas subyacentes podrían indicar un gradiente de temperatura para un eventual calentamiento superficial. La geometría de depresiones irregulares encontradas en la zona, previamente interpretadas como cráteres de impacto, y la ausencia de materiales asociados a un evento de este tipo, descartarían un origen debido a la caída de un meteorito.

**Palabras clave:** Cráteres, Tierra cocida, Vidrios de impacto, Erosión.

### INTRODUCCIÓN

En el Desierto de Atacama, norte de Chile, se encontraron fundidos vítreos *in situ*, distribuidos discontinuamente a lo largo de 70 kilómetros, entre los 20°20' y 21°00'S (Fig. 1), en cuatro localidades diferentes: al norte de Pica, Puquio de Núñez, Quebrada Chipana y Quebrada Guatacondo.

Estos vidrios fueron estudiados anteriormente por Blanco *et al.* (2012), Blanco y Tomlinson (2013), Valenzuela *et al.* (2014) y Roperch *et al.* (2015a), quienes describieron estos vidrios como delgadas cortezas de fundidos vítreos, entre 1 a 30 cm de largo con 1 a 3 cm de grosor, vesiculados y de formas irregulares, con moldes de plantas (*ephedra*) y granos de cuarzo parcialmente fundidos. Junto con esto, se encontraron arcillas rojas, interpretadas por Blanco *et al.* (2012) como tierra cocida (*terracota*), y capas de entramado de tallos vegetales reemplazados por carbonato. En los estudios previos, se descartó el origen volcánico, antropológico y de caída de rayos (fulguritas), y se propuso como hipótesis de formación de estos fundidos vítreos la explosión aérea de un bólido, similar al acontecimiento sucedido en Chelyabinsk, Rusia en el 2013 (Popova *et al.*, 2013) o en Tunguska, Siberia en 1908 (Gasperini *et al.*, 2007).

Dataciones por <sup>14</sup>C indicarían que el evento fue cercano a los 12 ka (Blanco y Tomlinson, 2013; Roperch *et al.*, 2015a), sugiriendo su formación durante la época del Younger Dryas (Bouslough *et al.*, 2012; Bunch *et al.*, 2012). Estudios paleomagnéticos recientes (Roperch *et al.*, 2015b) indican una leve dispersión de los datos de la dirección de los paleo campos magnéticos entre los diferentes sectores y paleointensidades estadísticamente similares entre los vidrios y las tierras cocidas.

Cercano a los 20°42'S, Blanco *et al.* (2012) identificó depresiones irregulares asimétricas de dimensiones decamétricas distribuidas en un área no mayor a 6 km<sup>2</sup> (Fig. 1). Estas fueron interpretadas como pequeños cráteres de impacto asociados a cuerpos menores de impacto, sin embargo, el tamaño de éstos no explicaría la formación de los vidrios, por lo que los autores postulan que una explosión aérea de un cuerpo mayor podría haber entregado la energía necesaria para la formación de estos fundidos.

El objetivo principal de este estudio fue entender e interpretar el origen de los fundidos vítreos encontrados en el área de estudio. Se planteó como objetivos secundarios encontrar la relación estratigráfica entre estos vidrios, las tierras cocidas y otras capas asociadas, así como también, estudiar las estructuras referidas como cráteres de impacto propuestos por Blanco *et al.* (2012) y Blanco y Tomlinson (2013).

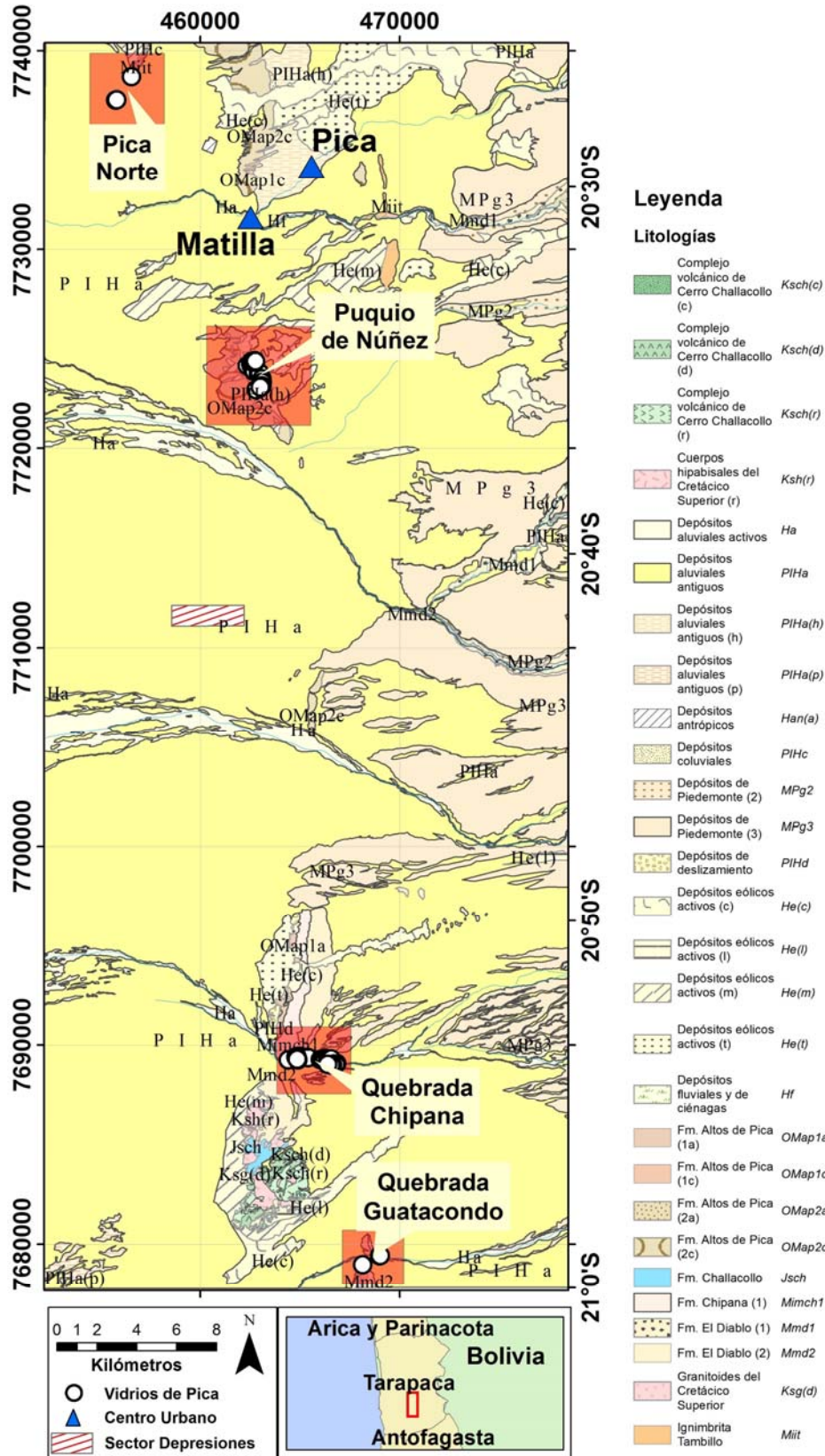


Figura 1: Mapa geológico simplificado mostrando la ubicación de los sectores en donde afloran los Vidrios de Pica y el sector de las depresiones interpretadas como cráteres. Modificado de Blanco et al. (2012).

## METODOLOGÍA

El trabajo consistió en un pre-terreno de recolección de sedimentos en la localidad de Puquio de Núñez y la descripción macroscópica de estos mediante lupa. Estos fueron seleccionados de manera aleatoria en sectores cercanos y alejados de los afloramientos de vidrios. Posteriormente, se procesaron todas las muestras en el laboratorio del Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN) de Chile, mediante un microscopio electrónico de barrido (SEM: *Scanning Electron Microscope*) modelo Zeiss EVO MA-10, a fin de hacer análisis con EDS (*Energy Dispersive Spectroscopy*) de posibles metales del grupo del platino (MGPs), con el fin de complementar estudios anteriores que encontraron platino en algunas muestras (Roperch, *com. per.*). El trabajo en terreno consistió en el muestreo y descripción macroscópica de los vidrios y de las capas asociadas, realizando trincheras de 10 a 90 centímetros de profundidad, y se realizó una visita al sector de posibles cráteres para su reconocimiento. Finalmente se procesó la información y se generaron mapas y columnas estratigráficas.

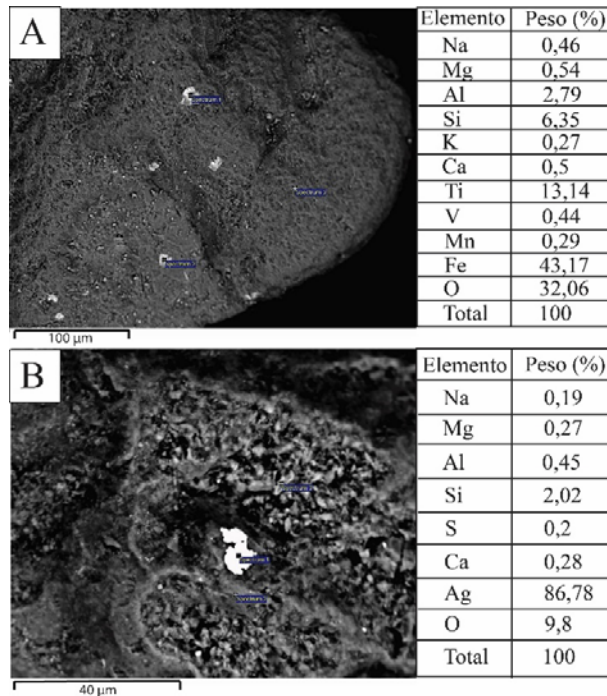
## RESULTADOS

### Análisis de sedimentos

Los sedimentos encontrados en la zona de estudio corresponden principalmente a granos tamaño arena media a gruesa de cuarzo y feldespato potásico, con granos ocasionales de yeso y una gran cantidad de granos minerales de óxidos de hierro. Mediante los análisis con EDS se pudieron observar algunos granos con mayores concentraciones de hierro y titanio, reconocidos como titanomagnetita o ilmenita (Fig. 2A). Otros minerales encontrados ocasionalmente y completan la paragénesis mineral son; baritina, bismuto, calcopirita, circón, cromita, enargita, monacita y plata nativa (Fig. 2B). No se encontraron MGPs.

### Perfiles de suelo

Los vidrios se encontraron en 4 zonas: norte de Pica (PN), Puquio de Núñez (PqN), Quebrada Chipana (QCh) y Quebrada Guatacondo (QGt) (Fig. 1). Estos se presentan en dos geomorfologías y litologías diferentes: los vidrios del sector norte, PN y PqN (Fig. 1), afloran en terrenos extensos y llanos (Fig. 3A), correspondientes en parte a depósitos de paleohumedales con reemplazos carbonáticos del Pleistoceno-Holoceno, mientras que en los sectores QCh y QGt (Fig. 1), los vidrios afloran en sectores cercanos a grandes quebradas formadas por depósitos aluviales antiguos de igual edad (Fig. 3B).



**Figura 2:** Fotomicrografías tomadas con EDS con sus respectivas composiciones obtenidos y expresados en peso (%). A) Óxido de hierro-titanio. B) Plata nativa.

En los cuatro sectores estudiados los vidrios se presentan en superficie y se encuentran asociados a una capa blanca vegetal inferior, a arcillas rojas y/o a cerámica, todos estos en diferente orden estratigráfico dependiendo del sector,

pero repitiéndose principalmente la secuencia vidrio en superficie, un segundo nivel de plantas cementadas por un material blanco no reconocido, por debajo, arcillas rojas y/o cerámica y, por último, arena (Fig. 3D).

En el sector PqN y PN no se encontró arcilla roja ni cerámica, sin embargo, en algunos montículos los vidrios superficiales estaban asociados a la capa blanca vegetal cementada (Fig. 3C), mientras que en otros montículos se encontraban sobre una capa de arenisca medianamente consolidada sin indicios de haber sufrido un cambio post-deposición. En cambio, en QCh y QGt aflora arcilla roja, cerámica y la capa vegetal cementada (Fig. 3D).

#### *Posibles cráteres de impacto*

Entre los sectores PqN y QCh, se encontraron cuatro depresiones, que varían entre los 30 a 70 metros de diámetro y no superan los dos metros de profundidad, alineadas en dirección este-oeste con una separación de ~660 metros entre ellas (Fig. 4A). Éstas se encuentran rellenas con depósitos aluviales distales, principalmente arcillas, con grietas de desecación en su superficie (Fig. 4B). Los bordes son suaves con una pendiente no mayor a 10°, con canales fluviales inactivos que erosionaron los bordes hacia el interior de la depresión (Fig. 4C).

En este sector no se encontraron los Vidrios de Pica, como tampoco el nivel de plantas cementadas, arcillas rojas y/o cerámicas. Materiales de origen de impacto, como tectitas o pedazos de meteorito, no se encontraron en el lugar.

## DISCUSIÓN

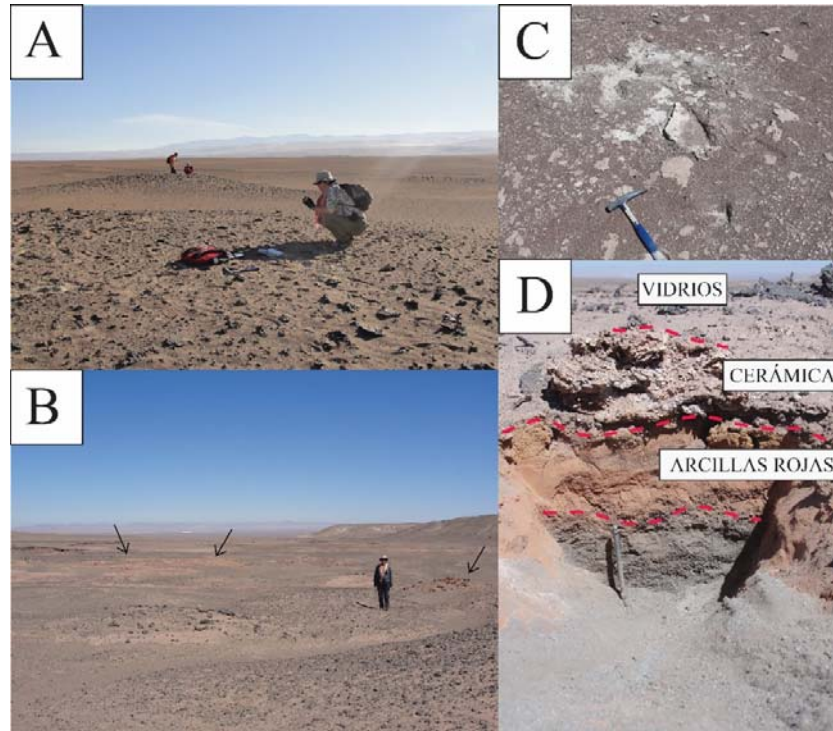
Los resultados del análisis con el uso de SEM y EDS de sedimentos muestreados en los alrededores de los vidrios indican la ausencia de concentración de MGPs. Los minerales metálicos encontrados pueden deber su presencia a contaminación eólica por la existencia de yacimientos mineros polimetálicos que se encuentran en explotación al este de la zona de estudio, como los yacimientos de Quebrada Blanca, Cerro Colorado y Doña Inés de Collahuasi. Si bien la ausencia de iridio y otros MGPs, podrían descartar la posibilidad de un evento de impacto de un meteorito, ya que gran parte de los materiales asociados a impactos presentan altas concentraciones de estos elementos (Ganapathy, 1980; Hou *et al.*, 2004), también cabe la posibilidad de que la erosión diferencial en la zona haya provocado su total remoción.

La presencia de arcillas rojas y cerámica en QCh y QGt, mas no en PqN y PN, podría indicar un control topográfico para la formación de los vidrios. Cabe la posibilidad de que las morfologías locales influyeron en la fusión superficial, sea por un cambio en la litología, nivel de las napas freáticas o porcentaje de carbonato. Acorde a Blanco y Tomlinson (2013), el carbonato presente en los paleohumedales actúa como catalizador reduciendo el punto de fusión, lo que permite una fusión total o parcial de la superficie.

Las tierras cocidas, cerámicas y la capa vegetal cementada parecen tener relación directa con los vidrios, en vista de que no se encontraron estas litologías en zonas sin fundidos. Los vidrios tienden a sobreyacer a la capa blanca y esta última a la tierra cocida y/o cerámica, aunque existen excepciones en que la cerámica se encuentra sobre la capa vegetal. Si consideramos un evento térmico en superficie, la variación litológica de suelos apuntaría a un gradiente de temperatura, el cual disminuiría hacia abajo, con el material fundido en superficie y el material cocido debajo. Un factor clave en esta interpretación es la velocidad de calentamiento y enfriamiento; Blanco y Tomlinson (2013) identificó texturas de colas de golondrina en maskelinita (plagioclasa vitrificada por impacto de meteoritos), luego identificada como melilita (Blanco, *com. per.*) en los fundidos, las cuales indican un rápido sobre-enfriamiento (McPhie *et al.*, 1993).

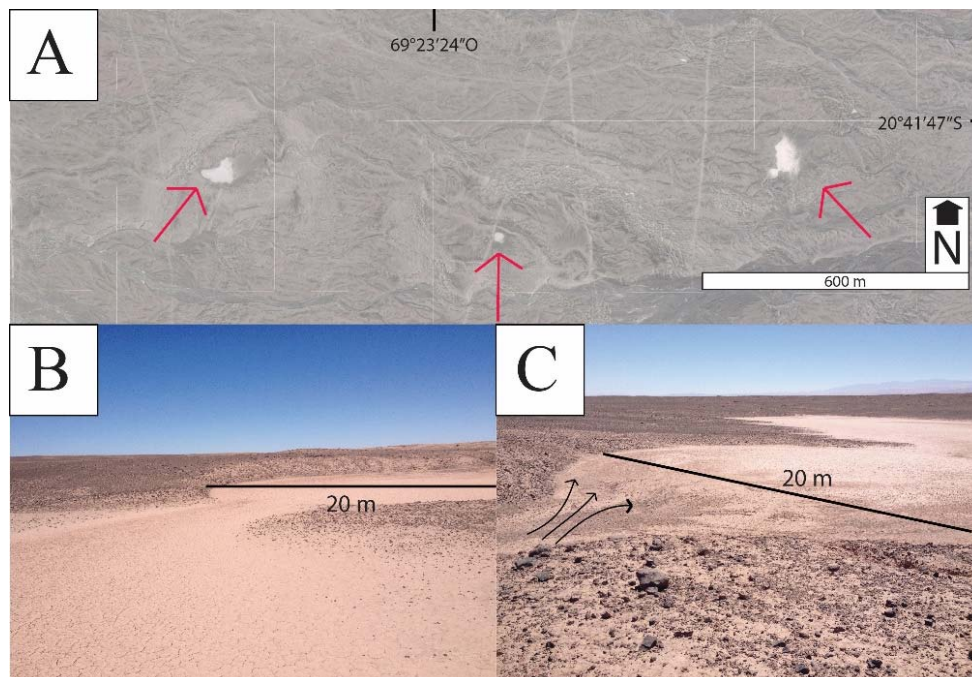
#### *Otros casos*

Diversos casos de fundidos vítreos cuyo origen ha sido atribuido a impactos de un meteorito o explosión aérea han sido estudiados en el mundo, entre ellos, Schultz *et al.* (2006) estudiaron fundidos vítreos similares ubicados en las Pampas Argentinas, los cuales se interpretó como vidrios de impacto, principalmente por características como PDFs (del inglés *planar deformation features*), asociadas a altas presiones de impacto (10-30 GPa) (French & Koeberl, 2010) y evidencia de un alto régimen calórico (>1700 °C). Los Vidrios de Pica no presentan estructuras de PDFs, sin embargo, presentan estructuras de PFs (*planar fractures*) (Valenzuela *et al.*, 2014), indicadores de ondas de choque de baja presión (<10 GPa) (French & Koeberl, 2010).



**Figura 3:** A) Vista general de los afloramientos en el sector PqN. B) Afloramiento de vidrios en QCh. Flechas negras indican la coloración naranja debido a tierra cocida y cerámica. C) Capa vegetal cementada en PqN. D) Perfil de suelo en QCh.

Osinski *et al.* (2008) identificaron vidrios con características similares en el desierto de Dakhleh. Estos fueron encontrados en superficies lacustres carbonatadas del Pleistoceno, sin presencia de tierras cocidas o cerámica. Explicaron su génesis por la explosión aérea de un objeto mayor a niveles cercanos a la superficie. La topografía y roca caja en Dakhleh presentan características similares al sector PqN, lo que las relaciona con la ausencia de tierras cocidas y/o cerámica en ambos lugares.



**Figura 4:** A) Distribución geográfica de las depresiones. Notar lineamiento E-O. B) Relleno de arcillas con grietas de desecación. C) Canales fluviales antiguos que depositan sedimentos dentro de la estructura.

### *Comparación entre las depresiones encontradas y los cráteres de impacto*

Acorde a French (1998) se pueden producir dos tipos de estructuras de impacto: en primer lugar, cráteres de impacto a hipervelocidad o, por otro lado, cráteres de penetración. Los primeros se reconocen por la geomorfología de su estructura, la cual posee bordes elevados con la estratigrafía volcada producto del impacto. Según Pike (1980), en los casos de cráteres simples se debe cumplir una relación de  $d_a = 0,14D^{1,02}$ , con  $d_a$  = profundidad aparente del cráter y  $D$  = diámetro de la estructura. Además, suelen quedar rastros o fragmentos remanentes del impacto.

Según Pike (1980), las depresiones de 70 m de diámetro, deberían tener una profundidad aparente de 10,6 m para que se cumpla la relación. Las corrientes fluviales que intersectan a un cráter de impacto, suelen rodear a este debido a los bordes elevados (Gattacceca, *com. per.*), a diferencia de cómo sucede en este caso. Junto a esto, la falta de estructuras como bordes elevados y la ausencia de material asociado a impactos apuntaría a descartar la opción de cráter de impacto.

Osinski *et al.* (2008) advierten que estudios realizados en cráteres bien documentados indican que los fundidos por impacto son raros y se restringen a capas centimétricas. Los tamaños de los Vidrios de Pica contradicen estas observaciones, por lo que su origen por impacto es cuestionable.

## CONCLUSIONES

Los sedimentos en la zona de estudio no presentan rastros de MGPs, por lo que un evento asociado al impacto o explosión aérea de un objeto podría no estar relacionado con la génesis de los vidrios. Sin embargo, cabe considerar el factor de erosión en la zona.

Las litologías presentes responden en cierto orden a la topografía, con depósitos de paleohumedales con reemplazo carbonático en los terrenos llanos y depósitos aluviales antiguos, algunos actualmente activos, en las zonas de quebradas. Factores como la composición de la roca de caja, profundidad del nivel freático y/o diferentes proporciones de carbonatos pudieron haber condicionado la fusión de los vidrios en mayor o menor medida, formando tierra cocida en las quebradas y solamente vidrio en los terrenos llanos.

La relación entre los Vidrios de Pica y las litologías subyacentes es clave para comprender la génesis de estos fundidos vítreos, ya que, podría indicar un gradiente de temperatura dependiendo de la roca caja afectada por el evento térmico.

Las depresiones encontradas e identificadas previamente como cráteres de impacto, no parecen tener este origen. Sin embargo, no se descarta su relación con los vidrios, en primera instancia porque se desconoce qué morfologías pueda formar una explosión aérea de un meteorito. Estudios geofísicos podrían entregar nuevas evidencias de la geología en profundidad de esta zona.

## AGRADECIMIENTOS

Programme National de Pmanétolgoie (INSU/CNES), Artemis projects of INSU-CNRS, OSU Rennes; Proyecto Fondecyt N° 3140562, Chile; Dra. Valentina Flores Aqueveque, por revisión del manuscrito, y al Sr. Nicolás Blanco, geólogo sénior Sernageomin, por apoyo con los análisis SEM-EDS de los sedimentos.

## BIBLIOGRAFÍA

- Blanco, N., Vásquez, P., Sepúlveda, F.A., Tomlinson, A.J., Quezada, A. y Ladino, M. 2012. Levantamiento geológico para el fomento de la exploración de recursos minerales e hídricos de la Cordillera de la Costa, Depresión Central y Precordillera de la Región de Tarapacá (20°-21°S). Servicio Nacional de Geología y Minería, Informe Registrado IR-12-50, 246 p., 7 mapas escala 1:100.000, Santiago de Chile.
- Blanco, N. y Tomlinson, A. 2013. Carta Guatacondo, Región de Tarapacá. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica 156, 1 mapa escala 1:100.000. Santiago de Chile.
- Bouslough, M., Nicoll, K., Holliday, V., Daulton, T.L., Meltzer, D., Pinter, N., Scott, A., Surovell, T., Claeyes, P., Gill, J., Paquay, F., Marlon, J., Bartlein, P., Whitlock, C., Grayson, D. y Jull, A. 2012. Arguments and Evidence Against a Younger Dryas Impact Event. *Climates, Landscapes and Civilizations Geophysical Monograph* 198.
- Bunch, T., Hermes, R., Moore, A., Kennett, D., Weaver, J., Wittke, J., DeCarli, P., Bischoff, J., Hillman, G., Howard, G., Kimbel, D., Kletetschka, G., Lipo, C., Sakai, S., Revay, Z., West, A., Firestone, R. y Kennet, J. 2012. Very high-temperature impact melt products as evidence for cosmic airburst and impacts 12,900 years ago. *PNAS* 42(2): 1903-1912.
- French, B. 1998. *Traces of Catastrophe: A handbook of shock-metamorphic effects in terrestrial meteorite impact structures*. LPI Contribution N°954, Lunar and Planetary Institute. 120 p.
- French, B. y Koerbel, C. 2010. The convincing identification of terrestrial meteorite impact structures: What works, what doesn't, and why. *Elsevier: Earth-Science Reviews* 98: 123-170.
- Gasperini, L., Alvisi, F., Biasini, G., Bonatti, E., Longo, G., Pipan, M., Ravaoli, M. y Serra, R. 2007. A possible impact crater for the 1908 Tunguska Event. *Terra Nova* 19(4): 245-251.

- Ganapathy, R. 1980. A Major Meteorite Impact on the Earth 65 Million Years Ago: Evidence from the Cretaceous-Tertiary Boundary Clay. *Science* 209: 921-923.
- Hou, Q., Kolesnikov, E., Xie, L., Zhou, M. y Sun, M. 2004. Platinum group element abundances in a peat layer associated with the Tunguska event, further evidence for a cosmic origin. *Planet Space Sci* 52: 331-340.
- McPhie, J., Doyle, M. y Allen, R. 1993. Volcanic texture: A guide to interpretation of texture in volcanic rocks. Centre for Ore Deposits and Exploration Studies, University of Tasmania. 197 p.
- Osinski, G., Kieniewicz, J., Smith, J., Boslough, M., Eccleston, M., Schwarcz, H., Kleindienst, M., Haldemann, A. y Churcher, C. 2008. The Dakhleh Glass: Product of an impact airburst or cratering event in the Western Desert of Egypt?. *Meteoritics & Planetary Science* 43(12): 2089-2107.
- Pike, R. 1980. Control on crater morphology by gravity and target type: Mars, Earth, Moon, Proc Lunar Planet. ci Conf. 11<sup>th</sup>, 2159-2190.
- Popova, O., Jenniskens, P., Emel'yaneko, V., Karstashova, A., Biryukov, E., Khaibrakhmanov, S., Shuvalov, V., Rybnov, Y., Dudorov, A., Grokhovsky, V., Badyukov, D., Yin, Q., Gural, P., Albers, J., Granvik, M., Evers, L., Kuiper, J., Kharlamov, V., Solovyov, A., Ruakov, Y., Korotkiy, S., Serdyuk, I., Korochantsev, A., Larionov, M., Glazachev, D., Mayer, A., Gisler, G., Gladkovsky, S., Wimpenny, J., Sanborn, M., Yamakawa, A., Verosub, K., Rowland, D., Roeske, S., Botto, N., Friedrich, J., Zolensky, M., Le, L., Ross, D., Ziegler, K., Tomoki, N., Ahn, Lee, J., Zhou, Q., Li, X., Li, Q., Liu, Y., Tang, G., Hiroir, T., Sears, D., Weinstein, I., Vokhmintsev, A., Ishchenko, A., Schmitt-Kopplin, P., Hertkorn, N., Nagao, K., Haba, M., Komatsu, M. y Mikouchi, T. 2013. Chelyabinsk Airburst, Damage Assessment, Meteorite Recovery and Characterization. *Science* 342: 1069-1973.
- Roperch, P., Blanco, N., Valenzuela, M., Lorand, J.P., Tomlinson, A., Arriagada, C. y Gattacceca, J. 2015a. Etude paléomagnétique de sols cuits et de verres silicatés en surface du désert d'Atacama (Chili). Resumen del Coloquio PMag, Aix en Provence, Francia.
- Roperch, P., Blanco, N., Valenzuela, M., Gattacceca, J., Devouard, B., Lorand, J.P., Tomlinson, A., Arriagada, C. y Rochette, P. 2015b. NH11A-1882: Paleomagnetism and mineralogy of unusual silicate glasses and baked soils on the surface of the Atacama Desert of Northern Chile: A major airburst impact ~12ka ago?. Poster. American Geophysical Union (AGU).
- Schultz, P., Zárate, M., Hames, W., Harris, S., Bunch, T., Koeberl, C., Renne, P. y Wittke J. 2006. The record of Miocene impacts in the Argentine Pampas. *Meteoritics & Planetary Science* 41(5): 749-771.
- Valenzuela, M., Blanco, N., Tomlinson, A., Roperch, P., Devouard, B., Gattacceca, J. y Rochette, P. 2014. Petrology and magnetic characterization of molten glass samples found at Northern Atacama Desert, Chile: Testing their impact origin. Resumen Metsoc, Marruecos.