

# Análisis geodésico de la Caldera Cerro Blanco, Catamarca

## *Geodetic analysis of the Cerro Blanco Caldera, Catamarca*

Ailin Pereira<sup>1,2,3</sup>, Juan M Alcácer Sánchez<sup>1,4</sup>, José G Viramonte<sup>1,5</sup>, Ayelén Pereira<sup>1,3</sup>, M Cristina Pacino<sup>1,3</sup>

**Resumen** El Complejo Volcánico Cerro Blanco (CVCB) en Argentina constituye un sistema de calderas anidadas que incluye la Caldera Cerro Blanco (CCB) y la Caldera Robledo, siendo uno de los complejos de calderas más jóvenes de los Andes Centrales del Sur. La subsidencia registrada en la CCB ha mostrado una desaceleración en la velocidad de deformación desde 1992 (2.6 cm/año) hasta 2020 (0.7 cm/año). En este estudio, el objetivo es analizar la deformación del suelo en la CCB a lo largo de campañas de relevamiento, aplicando mediciones GNSS y gravimétricas. Para ello, se llevó a cabo una actualización del estado de deformación de la CCB mediante el procesamiento de datos GNSS de las campañas anteriores 2013 y 2015 con la más reciente del 2021, junto con un análisis gravimétrico de la última campaña como herramienta complementaria, con el fin de confirmar la continuación del fenómeno de subsidencia de la caldera. Los resultados preliminares muestran una deformación relacionada con la subsidencia centrada en la CCB durante todo el período bajo análisis.

**Palabras clave** Geodesia, geofísica, subsidencia, GNSS, gravimetría.

**Abstract** *The Cerro Blanco Volcanic Complex (CBVC) in Argentina is a nested caldera system that includes the Cerro Blanco Caldera (CBC) and the Robledo Caldera, being one of the youngest caldera complexes in the Central Southern Andes. Subsidence recorded in the CBC has shown a deceleration of the deformation rate from 1992 (2.6 cm/year) to 2020 (0.7 cm/year). This study aims to analyze the ground deformation in the CBC through survey campaigns, applying GNSS and gravimetric measurements. For this purpose, an update of the deformation status of the CBC was carried out by processing GNSS data from the previous 2013 and 2015 campaigns with the most recent one of 2021, along with a gravimetric analysis of the latest campaign as a complementary tool, in order to confirm the continuation of the caldera subsidence phenomenon. Preliminary results indicate a subsidence-related deformation centered on the CBC throughout the period under analysis.*

**Keywords** *Geodesy, geophysics, subsidence, GNSS, gravimetry.*

## INTRODUCCIÓN

La característica principal del CVCB entre los volcanes activos que se deforman es su singularidad debido a que se hunde a ritmos variables (Pritchard & Simons, 2002, 2004; Brunori et al., 2013; Henderson & Pritchard, 2013). Este Complejo, está ubicado en la Puna Catamarqueña (26° 45' S; -67° 45' W), Andes Centrales del Sur, dentro del departamento de Antofagasta de la Sierra, en la zona protegida de la biosfera denominada "Campo de la Piedra Pómez (CPP)", en Argentina. Es uno de los centros volcánicos ácidos que caracterizan a la Puna Austral, y constituye el sistema caldérico más joven para este sector y uno de los más recientes de los Andes Centrales (Viramonte et al., 2008).

<sup>1</sup>Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Argentina. Email: [apereira@sec.coae.gov.ar](mailto:apereira@sec.coae.gov.ar)

<sup>2</sup>Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE), Argentina.

<sup>3</sup>Área de Geodinámica y Geofísica, Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura, Universidad Nacional de Rosario (AGG FCEIA UNR), Argentina.

<sup>4</sup>Instituto de Geología, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de San Juan (INGEO FCEFYN UNSJ), Argentina.

<sup>5</sup>Instituto de Bio y Geociencias del NOA, Facultad de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Salta (IBIGEO FCN UNSA), Argentina.

La CCB se produjo durante el Holoceno (4.200 YBP) por una de las erupciones más grandes producidas en los Andes Centrales. Cuenta con un diámetro de aproximadamente 5 km y se encuentra a una altura promedio de 4.200 msnm. La última erupción data de hace 4.200 años (Montero Lopez et al., 2010), y se ha detectado una anomalía térmica en el centro de la caldera (Arnosio et al., 2008; Viramonte et al., 2005).

Pritchard & Simons (2002, 2004) realizaron un estudio del arco volcánico de los Andes Centrales entre los años 1992 y 2002 con imágenes de radar satelitales. Descubrieron que la CCB estaba colapsándose a una velocidad promedio de 2 a 2,5 cm/año. La tasa de hundimiento se estima que disminuye con el tiempo desde un máximo de más de 2,5 cm/año a menos de 1,8 cm/año. Los autores suponen que el hundimiento puede estar relacionado con la actividad hidrotermal observada o con el enfriamiento y cristalización de la cámara magmática.

Para validar los datos obtenidos por Pritchard & Simons (2002, 2004), Viramonte et al. (2005) realizaron experimentos sísmicos y geodésicos. En 2004 y 2005, se instaló una red de monumentos (benchmarks) GPS de alta precisión con 4 puntos dentro de la zona de deformación de la caldera y otro por fuera de dicha zona para servir de referencia, a 35 km de la zona de la caldera. Los primeros resultados de esta campaña muestran una señal de proceso de hundimiento que es mayor en el centro de la estructura de la caldera, donde se obtuvieron valores de aproximadamente 1,4 cm/año. Luego, se realizó un estudio gravimétrico adicional para mejorar el conocimiento estructural de esta área (Di Filippo et al., 2008), revelando así los resultados una estructura de colapso de la caldera. También, se realizaron mediciones GNSS en 2013 y 2015 (López, 2016), encontrando deformaciones tanto verticales como horizontales.

Recientemente, Vélez et al. (2021) obtuvieron mediante estudios de imágenes satelitales de radar combinadas con mediciones de la red GPS, una subsidencia de alrededor de 0,7 cm/año para el período 2014-2020, lo que muestra una tendencia decreciente de la tasa de deformación registrada desde 1992.

Se espera que los resultados finales contribuyan a la evaluación de la peligrosidad potencial asociada a una reactivación del CVCB.

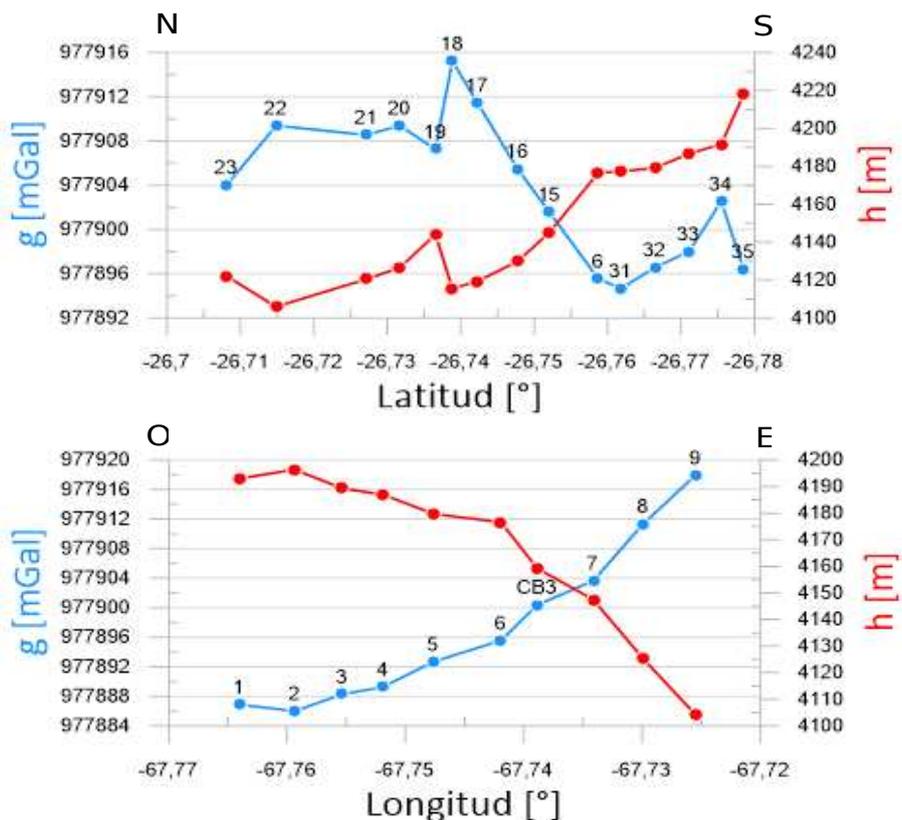
## METODOLOGÍA

En el año 2021, se llevó a cabo un nuevo relevamiento de datos GNSS en la CCB y alrededores para determinar la tasa de colapso, incorporando, además, medidas de micro-gravimetría que relacionan los cambios de gravedad con los de elevación, con el fin de estimar los cambios de masa/volumen en profundidad.

La red geodinámica definida en las campañas de relevamiento anteriores y remeida en el 2021, consta de 5 vértices geodésicos: cuatro de ellos situados en el propio volcán (CB01, CB02, y CB03), o en sus inmediaciones (CB04), y otro lo suficientemente alejado del edificio volcánico para utilizarlo como referencia del sistema local (CB05). Por cuestiones temporales, topográficas y de equipamiento, en la campaña del 2021 el CB04 no pudo ser relevado con GNSS.

Las tareas principales de esta campaña consistieron en realizar medidas con GPS diferencial de doble frecuencia con el GNSS Trimble R6 en el método estático por al menos 30 horas de registro continuo en 4 de las 5 estaciones de la red de puntos fijos (benchmarks) instaladas en el año 2004 por el Instituto GEONORTE en el CVCB. También se obtuvieron los valores de gravedad en dichos puntos con el gravímetro Scintrex CG5, siguiendo una metodología de circuitos cerrados, con el fin de lograr la máxima precisión en las medidas. Al ser este instrumento un gravímetro relativo, se trasladó hasta la zona de estudio el valor de gravedad absoluta conocida del punto fijo 29 de la línea 353 de la Red de Nivelación de Alta Precisión del Instituto Geográfico Nacional.

El procesamiento de los datos GPS involucró el uso de los programas GAMIT/GLOBK, TEQC y TS-



**Figura 1.** Comparación entre las señales de altura ortométrica y gravedad absoluta calculada para la campaña 2021 en los perfiles N-S (arriba) y O-E (abajo).

VIEW. El marco de referencia se basó en 32 estaciones permanentes argentinas, todas referenciadas a ITRF14. Se utilizaron las mediciones de CB1, CB2, CB3 y CB5 obtenidas durante las campañas de 2013 y 2015, así como los datos recopilados en 2021, para realizar un análisis de deformación relativa y absoluta de la caldera en el tiempo, con el fin de establecer un modelo geodinámico.

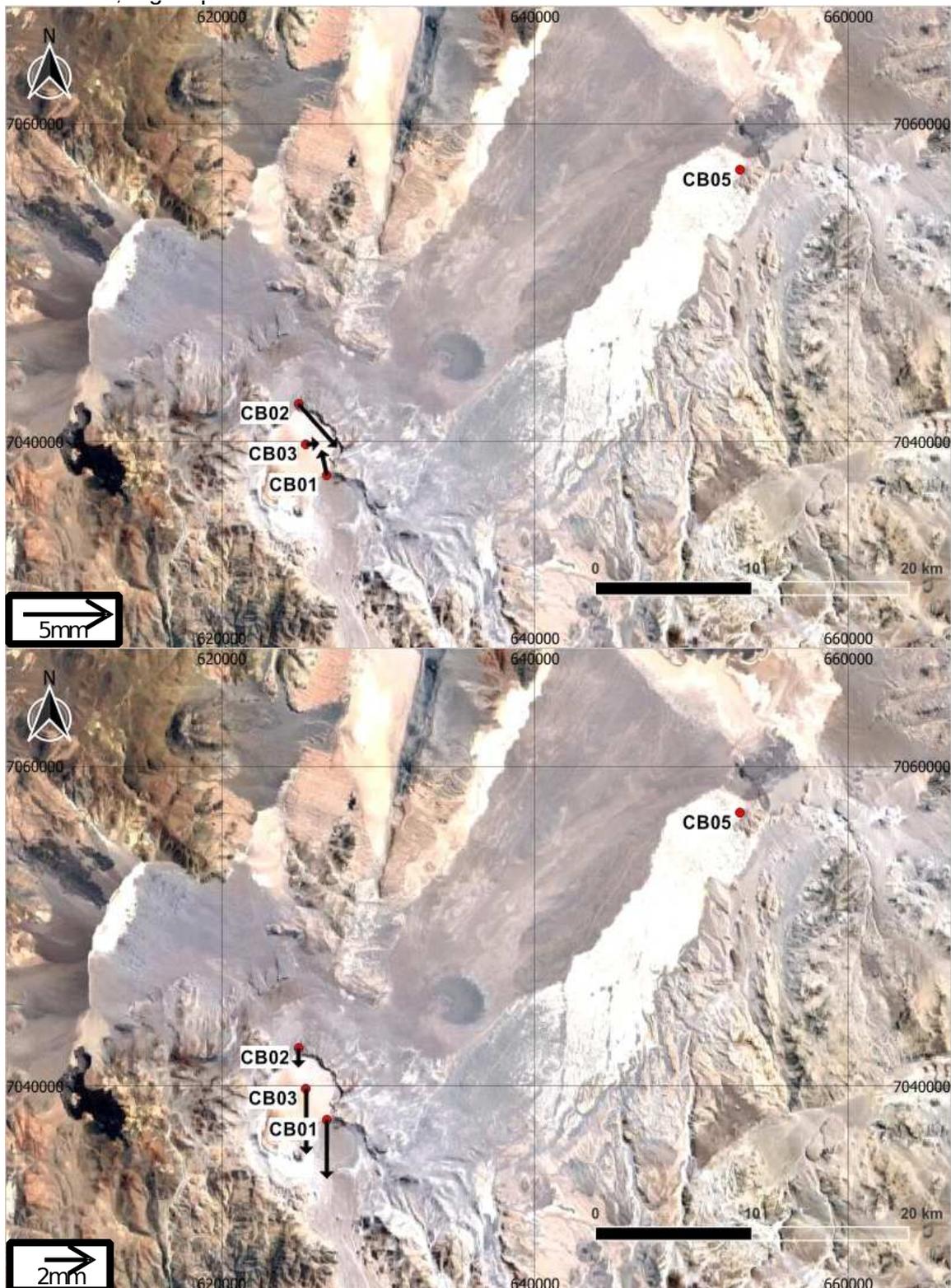
A su vez, se instaló y midió una red gravimétrica de 41 puntos en la zona de la caldera, así como en sus alrededores, a lo largo de los perfiles OSO-ENE y NNO-SSE en el interior del cráter, complementando con otros puntos sobre un perfil ONO-ESE sobre la ignimbrita del CPP. Estos puntos fueron materializados con estacas y se los relevó con el gravímetro relativo Scintrex CG5 y con el GNSS Trimble R6 en el método PPK a fin de obtener sus coordenadas y altura con una precisión del orden del centímetro, usando como base el receptor remoto ubicado en ese momento en uno de los benchmarks. Luego, los datos fueron procesados utilizando los paquetes de software Adjust y Oasis Montaj.

## RESULTADOS

Se realizó un estudio cualitativo entre las dos campañas gravimétricas del 2005 y 2021, analizando la variación de la gravedad con respecto a la variación de altura en el área de la caldera a lo largo de los perfiles, encontrando consistencia y constancia en los cambios de las variables entre ambos relevamientos.

Partiendo del concepto de la Ley Universal Gravitacional, se pueden relacionar los cambios de gravedad con los cambios de altura, es decir, la deformación de la CCB, con el fin de valorar los cambios de masa/volumen en profundidad. Para la campaña 2021, se estudiaron distintas variables, tales como la variación de altura, la variación de gravedad, y los parámetros en los dos perfiles mencionados anteriormente, tanto en sentido N-S y E-O.

Para corroborar la subsidencia de la caldera, sería necesario observar variaciones de gravedad en sentido inverso a las variaciones de altura. Al observar la Figura 1, esto es evidente en la mayoría de



**Figura 2.** Modelo de deformación horizontal (arriba) y vertical (abajo) relativo al CB05 [mm/año].

los puntos en ambos perfiles, indicando que, en gran parte de la región analizada, la variación de la gravedad se atribuye a cambios de elevación. Sin embargo, existe una zona específica al sureste de la caldera, donde esta correlación no se verifica, coincidiendo precisamente con la ubicación de un campo geotérmico. Aquí se observa que no es una variación en la altitud lo que afecta la gravedad, sino más bien una variación de masas, resultado de la inyección y movimiento de magma y fluidos en el sistema volcánico del Cerro Blanco, que permanece activo hasta el día de hoy. En consecuencia,

se está llevando a cabo un trabajo para modelar estas variaciones relacionadas con las fluctuaciones en el sistema geotérmico actual en la zona de la caldera.

A su vez, se obtuvieron para cada uno de los benchmarks relevados en la zona de la caldera las coordenadas y velocidades cartesianas respecto a la solución proporcionada para el marco de referencia ITRF14, y se generaron los modelos de velocidad de deformación de los mismos, obteniendo mapas geodinámicos absolutos para apreciar la deformación a nivel regional, y mapas geodinámicos relativos con respecto a la estación permanente perteneciente a IGS (International GNSS Service) denominada UNSa, ubicada en la Universidad Nacional de Salta, y con respecto al punto de referencia CB05. Para la aplicación de mediciones geodésicas absolutas, en un marco de referencia local (CB05, en el área de estudio), éstas deben estar alineadas con un marco de referencia mundial o global, como lo es el ITRF (International Terrestrial Reference Frame), lo que posibilita expresar la velocidad y el desplazamiento de la estación CB05 en términos absolutos.

En la Figura 2, se presentan los resultados relativos con respecto al punto de referencia CB05, ubicado fuera del área afectada por el proceso volcánico, pero lo suficientemente cerca de la región de interés y por lo tanto con más peso en el resultado a analizar. Se aprecia que la mayor subsidencia se encuentra en CB03, en el centro de la caldera, cerca de la región geotérmica, como se muestra en el mapa de velocidad vertical. Al observar el mapa de deformación horizontal, se aprecia un desplazamiento hacia el centro de la caldera.

Cada proceso de deflación/inflación del suelo genera no solo deformaciones verticales sino también horizontales. La inclusión de las componentes horizontales en la interpretación es muy útil por 2 razones: 1) las componentes horizontales se determinan con GNSS con mayor precisión que la vertical, por ende, se pueden detectar deformaciones/velocidades horizontales más pequeñas que verticales; 2) la orientación del vector de velocidad horizontal indicaría la posición del centro de la deformación (sitio de deflación/inflación máxima). Esto último, se observa en los vectores horizontales los cuales apuntan consistentemente hacia el borde oriental de la caldera, lugar que se identifica como la localización de la fuente de deformación.

## DISCUSIÓN

Medir deformaciones de volcanes como el referido en el presente trabajo y lograr monitorearlos con la mayor frecuencia posible es muy importante, para así poder mitigar los efectos de erupciones volcánicas, deslizamientos de laderas, movimientos de tierra y otros riesgos naturales en zonas geofísicamente activas como las del Cerro Blanco.

La mayor subsidencia se observó en CB03, en el centro de la caldera, cerca de la zona geotérmica. Así como también se detectó una variación de masa a través del análisis gravimétrico en el área sureste de la caldera, en el área del campo geotermal.

Se aprecia la subsidencia con GNSS, y se observa de la misma manera una desaceleración en la tasa de deformación de manera continua en todos los puntos relevados.

Resulta de interés con el fin de estudiar las características de la estructura de la caldera, crear un modelo inverso gravimétrico tridimensional, así como también complementar el análisis de deformación con Interferometría Diferencial de Radar de Apertura Sintética (DInSAR). También, se espera repetir las campañas de GNSS y gravimetría en los próximos años para observar las variaciones que se produzcan debido al colapso de la caldera u otros eventos tecto-volcánicos de interés.

## REFERENCIAS

**Arnosio, M., Becchio, R., Viramonte, J., de Silva, S., & Viramonte, J.** (2008). Geocronología e isotopía del Complejo Volcánico Cerro Blanco: un sistema de calderas cuaternario (73-12 ka) en los Andes Centrales del sur. *Actas 17° Congreso*

*Geológico Argentino*, volumen 1, 177–178.

**Brunori, C., Bignami, C., Stramondo, S., & Bustos, E.** (2013). 20 years of active deformation on volcano caldera: joint analysis of InSAR and AInSAR techniques. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.*, 23, 279–287. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2012.10.003>

**Di Filippo, M., Di Nezza, M., Colombi, A., Viramonte, J., & Toro, B.** (2008). Estructura gravimétrica del Complejo Volcánico Cerro Blanco, Puna Austral. *Actas del 17° Congreso Geológico Argentino*, volumen 1, 203–204.

**Henderson, S. & Pritchard, M.** (2013). Decadal volcanic deformation in the Central Andes volcanic zone revealed by InSAR time series. *G-cubed*, 14, 1358–1374. <https://doi.org/10.1002/ggge.20074>

**López, J.** (2016). *Evolución de la deformación en el Complejo Volcánico Cerro Blanco (Puna Austral) utilizando imágenes satelitales ópticas, radar y datos geodésicos*. Salta University.

**Montero Lopez, M., Hongn, F., Brod, J. F., Seggiaro, R., Marrett, R., & Sudo, M.** (2010). Magmatismo ácido del Mioceno superior-cuaternario en el área de Cerro Blanco-La Hoyada, Puna Austral. *Rev. Asoc. Geol. Argent.*, 67(3), 329–348.

**Pritchard, M. & Simons, M.** (2002). A satellite geodetic survey of large-scale deformation of volcanic centres in the Central Andes. *Nature*, 418, 167–171. <https://doi.org/10.1038/nature00872>

**Pritchard, M. & Simons, M.** (2004). Surveying volcanic arcs with satellite radar interferometry: The Central Andes, Kamchatka, and beyond. *GSA Today*, 14, 4–11. [https://doi.org/10.1130/1052-5173\(2004\)014<4:SVAWSR>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/1052-5173(2004)014<4:SVAWSR>2.0.CO;2)

**Viramonte, J., Arnosio, M., Becchio, R., De Silva, S., & Roberge, J.** (2008). Cerro Blanco Volcanic Complex, Argentina: a late Pleistocene to Holocene rhyolitic arc-related caldera complex in the Central Andes. *IAVCEI General Assembly*.

**Viramonte, J., Castro Godoy, S., Arnosio, M., Becchio, R., & Poodts, M.** (2005). El Campo Geotermal de la Caldera de Cerro Blanco: utilización de imágenes ASTER. *Actas 16° Congreso Geológico Argentino*, volumen 2, 505–512.

**Vélez, M., Bustos, E., Euillades, L., Blanco, M., López, J., Barbero, I., Berrocoso, M., Gil Martínez, A., & Viramonte, J.** (2021). Ground deformation at the Cerro Blanco caldera: A case of subsidence at the Central Andes BackArc. *Journal of South American Earth Sciences*, 106, 102941. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2020.102941>