

# Assessment of the geothermoelectric potential of the Cerro Blanco Volcanic Complex (Catamarca) through thermal numerical modeling.

Luciana Ruiz<sup>1</sup>, María Clara Lamberti<sup>1,2</sup> , and Jeremías Likerman<sup>1,2</sup> 

<sup>1</sup> Departamento de Ciencias Geológicas, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires, Argentina

<sup>2</sup> Instituto de Estudios Andinos “Don Pablo Groeber” (IDEAN), CONICET–Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires, Argentina  
jlikerman@gl.fcen.uba.ar

**Abstract.** The Cerro Blanco Volcanic Complex (CBVC), located in the southern Puna plateau of Catamarca, Argentina, is one of the youngest silicic volcanic systems in the Andean back-arc and a relevant target for geothermal exploration. This short paper integrates geological synthesis, geological mapping and two-dimensional numerical thermal modeling to constrain plausible configurations of the magmatic heat source and estimate preliminary geothermal-electric potential. The numerical experiments were performed with Underworld2 and explore the sensitivity of the shallow thermal anomaly to four first-order parameters: initial temperature, depth, size of an idealized magmatic source, and discrete magmatic recharge pulses. The modeled thermal fields were post-processed at 2 km depth using temperature thresholds of 150 and 200 °C. Favorable thermal intervals were converted into idealized reservoir volumes and then into equivalent electrical power using a volumetric method. Preliminary results indicate that source depth and size exert the strongest control on the shallow thermal field, whereas initial temperature has a mostly transient effect. Magmatic pulses delay thermal relaxation and help sustain the anomaly. Corrected order-of-magnitude estimates suggest geothermal-electric potentials of approximately 51–128 MW for the 150 °C threshold and 33–82 MW for the 200 °C threshold, under conservative and realistic utilization factors.

**Keywords:** geothermal energy , numerical modeling , Cerro Blanco , Underworld2 , volcanic systems

# Evaluación del potencial geotermoeléctrico del Complejo Volcánico Cerro Blanco (Catamarca) mediante modelado numérico térmico

**Resumen** El Complejo Volcánico Cerro Blanco (CVCB), ubicado en la Puna Austral de Catamarca, Argentina, constituye uno de los sistemas volcánicos silícicos más jóvenes del retroarco andino y un objetivo relevante para la exploración geotérmica. Este artículo corto integra síntesis geológica, cartografía y modelado térmico numérico bidimensional para acotar configuraciones plausibles de la fuente magmática y estimar de manera preliminar el potencial geotermoeléctrico. Los experimentos numéricos fueron realizados con Underworld2 y exploran la sensibilidad de la anomalía térmica somera frente a cuatro parámetros de primer orden: temperatura inicial, profundidad, tamaño de una fuente magmática idealizada y pulsos discretos de recarga. Los campos térmicos modelados fueron postprocesados a 2 km de profundidad usando umbrales de 150 y 200 °C. Los intervalos térmicamente favorables fueron convertidos en volúmenes de reservorio idealizados y luego en potencia eléctrica equivalente mediante un método volumétrico. Los resultados preliminares indican que la profundidad y el tamaño de la fuente ejercen el control principal sobre la expresión térmica somera, mientras que la temperatura inicial tiene un efecto mayormente transitorio. Los pulsos magmáticos retrasan la relajación térmica y contribuyen a sostener la anomalía. Las estimaciones corregidas en orden de magnitud sugieren potenciales de aproximadamente 51–128 MW para el umbral de 150 °C y 33–82 MW para el umbral de 200 °C, bajo factores de aprovechamiento conservador y realista.

**Keywords:** energía geotérmica , modelado numérico , Cerro Blanco , Underworld2 , sistemas volcánicos

## 1 Introducción y motivación

Los recursos geotérmicos en regiones volcánicas activas son objetivos prioritarios de diversificación energética. En los Andes Centrales del Sur, el Complejo Volcánico Cerro Blanco (CVCB), en la Puna Austral de Catamarca, representa un caso estratégico: combina magmatismo silícico reciente, manifestaciones hidrotermales activas y evidencias geofísicas compatibles con un sistema magmático–hidrotermal dinámico (Báez et al., 2015; Barcelona et al., 2023; Chiodi et al., 2019; Fernández-Turiel et al., 2019; Vélez et al., 2021).

El objetivo de este trabajo es presentar una primera aproximación reproducible para estimar el potencial geotermoeléctrico del CVCB mediante modelos

térmicos bidimensionales, integrando restricciones geológicas, geoquímicas y geofísicas disponibles.

## 2 Metodología

Se construyó un modelo térmico bidimensional del CVCB con Underworld2, un código de elementos finitos ampliamente aplicado en geodinámica computacional (Beucher et al., 2019). El dominio ( $30 \times 34$  km, malla de  $256 \times 256$  celdas) tiene condición superior de  $20^\circ\text{C}$  y flujo de calor basal de  $80 \text{ mW m}^{-2}$ , compatible con el régimen elevado del Altiplano-Puna (Ege et al., 2007). El modelo incorpora capas horizontales con propiedades térmicas asignadas a litologías equivalentes y una fuente magmática semielipsoidal idealizada para capturar el efecto térmico de una intrusión equivalente.

Los rangos paramétricos se acotaron con observaciones locales: dimensiones de la caldera, subsidencia InSAR, restricciones petrológicas y termobarométricas, gravimetría y cronología eruptiva episódica (Báez et al., 2015; Barcelona et al., 2023; Chiodi et al., 2019; Fernández-Turiel et al., 2019; Vélez et al., 2021). El modelo no incorpora mediciones directas de subsuelo, permeabilidad ni advección hidrotermal; evalúa sensibilidad térmica y no localiza directamente un reservorio explotable.

Se realizaron 24 simulaciones agrupadas en cuatro familias de escenarios (Tabla 1), evaluadas hasta 1 Ma.

**Cuadro 1.** Familias de escenarios exploradas en el modelado térmico.

| Familia     | Parámetro explorado    | Rango analizado                  |
|-------------|------------------------|----------------------------------|
| Temperatura | Temperatura inicial    | $700\text{--}950^\circ\text{C}$  |
| Profundidad | Techo de la fuente     | 2–14 km                          |
| Tamaño      | Alto $\times$ ancho    | $2 \times 5$ a $10 \times 13$ km |
| Pulsos      | Última recarga térmica | 70–250 ka                        |

Para estimar el potencial geotermoeléctrico se postprocesó el campo térmico a 2 km de profundidad. Se identificaron los segmentos laterales donde la temperatura supera dos umbrales:  $150$  y  $200^\circ\text{C}$ . La longitud efectiva se extrapoló a una geometría prismática tridimensional con extensiones en rumbo de 10, 15 y 20 km y espesores efectivos de 0,5 y 1,0 km. Luego se aplicó un método volumétrico con  $T_{ref} = 15^\circ\text{C}$ ,  $\phi = 0,10$ ,  $\rho_r = 2700 \text{ kg m}^{-3}$ ,  $c_r = 1000 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ,  $\rho_f = 1000 \text{ kg m}^{-3}$ ,  $c_f = 4200 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ,  $R_f = 0,15$ , eficiencia eléctrica dependiente de la temperatura y vida útil de 30 años (Muffler & Cataldi, 1978; Williams et al., 2008; Zarrouk & Moon, 2014). No se modeló una temperatura de abandono operacional independiente; la temperatura indicada corresponde a la referencia térmica del balance. Los resultados deben interpretarse como potencial térmico teórico comparativo, no como capacidad instalada.

### 3 Resultados preliminares

Los modelos muestran que la profundidad de la fuente es el control dominante de la expresión térmica somera: fuentes a 2–4 km producen ascensos marcados de isotermas y flujo de calor, mientras que fuentes a 10–14 km generan respuestas amortiguadas. El tamaño es el segundo control; los escenarios con anchos de 11–13 km concentran los mayores valores de potencia normalizada y son los únicos, junto con escenarios de recarga, que alcanzan el umbral de 200 °C a 2 km. La temperatura inicial genera diferencias durante los primeros estadios, pero su efecto se atenúa por relajación conductiva a tiempos tardíos. Los escenarios con pulsos magmáticos indican que la recarga episódica rejuvenece la anomalía e impide su relajación completa, coherente con la historia eruptiva del CVCB (Báez et al., 2015, 2025).

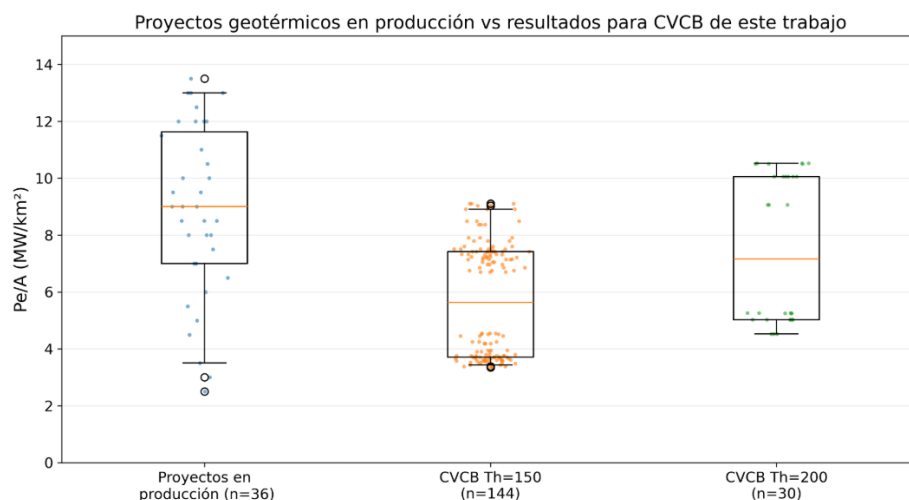
La evaluación volumétrica a 2 km muestra un comportamiento diferenciado según el umbral. Para 150 °C, todas las familias de escenarios alcanzan el umbral, con valores de potencia normalizada comparables en orden de magnitud. Para 200 °C, el cumplimiento se vuelve selectivo y queda restringido a configuraciones más energéticas, principalmente fuentes grandes y escenarios con recarga. Aunque 200 °C permite una eficiencia de conversión mayor, el volumen térmicamente aprovechable por encima de ese umbral es menor que para 150 °C; en los escenarios evaluados, esta reducción domina sobre el incremento de eficiencia. Al aplicar factores globales de aprovechamiento, los valores corregidos resultan de aproximadamente 51–128 MW para 150 °C y de 33–82 MW para 200 °C. La comparación con sistemas geotérmicos en producción es solo de orden de magnitud, porque el CVCB representa aquí un potencial térmico teórico y no una factibilidad comercial demostrada (Figura 1).

### 4 Discusión y conclusiones

El modelado térmico del CVCB permite acotar cuantitativamente el efecto de la profundidad, el tamaño, la temperatura inicial y la recarga magmática sobre la anomalía somera. El potencial a media entalpía es robusto en el espacio paramétrico explorado; el de alta entalpía requiere fuentes grandes y/o con recarga. La estimación volumétrica sugiere potenciales de 51–128 MW (umbral 150 °C) y 33–82 MW (umbral 200 °C). Sin embargo, el modelo es deliberadamente simplificado: no incluye fallas, permeabilidad, circulación hidrotermal ni geometrías 3D. La factibilidad comercial requeriría incorporar productividad e inyectividad de pozos, conectividad hidráulica y evolución termo-hidráulica. El enfoque constituye una base reproducible para futuras evaluaciones del CVCB y para el desarrollo de modelos hidrotermales más completos.

**Agradecimientos** Este trabajo se basa en el Trabajo Final de Licenciatura de Luciana Ruiz, realizado en el Departamento de Ciencias Geológicas de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la Universidad de Buenos Aires.

**Declaración de intereses** Los autores declaran no tener conflictos de interés relevantes para el contenido de este artículo.



**Figura 1.** Comparación de la densidad de potencia geotermoeléctrica ( $Pe/A$ ,  $MW/km^2$ ) entre proyectos geotérmicos en producción a escala internacional y los escenarios modelados para el Complejo Volcánico Cerro Blanco (CVCB) en este trabajo.

**Uso de herramientas de IA** Los autores utilizaron OpenAI Codex para mejorar redacción y legibilidad y aplicar correcciones editoriales; revisaron el contenido resultante y asumen plena responsabilidad por la publicación.

## Referencias

- Báez, W., Arnosio, M., Chiodi, A., Ortiz-Yañez, A., Viramonte, J. G., Bustos, E., Giordano, G., & López, J. F. (2015). Estratigrafía y evolución del Complejo Volcánico Cerro Blanco, Puna Austral, Argentina. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 32(1), 29-49.
- Báez, W., de Silva, S. L., Cirer, M., Berteau, E., Constantinescu, R., Danišák, M., Schmitt, A. K., & Ramos, F. C. (2025). Dynamics of one of the largest Quaternary explosive eruptions in the Andes: the ca. 29 ka Campo de la Piedra Pómez VEI  $\geq 6$  caldera-forming eruption, NW Argentina. *Bulletin of Volcanology*, 87, 72. <https://doi.org/10.1007/s00445-025-01858-5>
- Barcelona, H., Chiodi, A., Yagupsky, D., Peri, G., Winocur, D., & Kleiman, P. (2023). Resource assessment of the Cerro Blanco geothermal system. *Journal of South American Earth Sciences*, 123, 104247. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2023.104247>
- Beucher, R., Moresi, L., Giordani, J., Mansour, J., Sandiford, D., Farrington, R., Mondy, L., & Mallard, C. (2019). UWGeodynamics: A teaching and research tool for numerical geodynamic modelling. *Journal of Open Source Software*, 4(36), 1136.

- Chiodi, A., Tassi, F., Báez, W., Filipovich, R., Bustos, E., Glok Galli, M., Suzaño, N., Ahumada, M. F., Viramonte, J. G., Giordano, G., Pecoraino, G., & Vaselli, O. (2019). Preliminary conceptual model of the Cerro Blanco caldera-hosted geothermal system (Southern Puna, Argentina): Inferences from geochemical investigations. *Journal of South American Earth Sciences*. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2019.102213>
- Ege, H., Sobel, E. R., Scheuber, E., & Jacobshagen, V. (2007). Exhumation history of the southern Altiplano plateau (southern Bolivia) constrained by apatite fission track thermochronology. *Tectonics*, 26(1).
- Fernández-Turiel, J. L., Pérez-Torrado, F. J., Rodríguez-González, A., Saavedra, J., Carracedo, J. C., & Rejas, M. (2019). The large eruption 4.2 ka cal BP in Cerro Blanco, Central Volcanic Zone, Andes: Insights to the Holocene eruptive deposits in the southern Puna and adjacent regions. *Estudios Geológicos*.
- Goff, F., & Janik, C. J. (2000). Geothermal systems. En *Encyclopedia of Volcanoes* (pp. 817-834). Academic Press.
- Moresi, L., Dufour, F., & Mühlhaus, H.-B. (2003). A Lagrangian integration point finite element method for large deformation modeling of viscoelastic geomaterials. *Journal of Computational Physics*, 184(2), 476-497.
- Moresi, L., Quenette, S., Lemiale, V., Mériaux, C., Appelbe, B., & Mühlhaus, H.-B. (2007). Computational approaches to studying non-linear dynamics of the crust and mantle. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 163(1-4), 69-82.
- Muffler, L. J. P., & Cataldi, R. (1978). Methods for regional assessment of geothermal resources. *Geothermics*, 7(2-4), 53-89.
- Vélez, M. L., Bustos, E., Euillades, L., Blanco, M., López, J., Barbero, I., Berrocoso, M., Gil Martínez, A., & Viramonte, J. G. (2021). Ground deformation at the Cerro Blanco caldera: A case of subsidence at the Central Andes Back-Arc. *Journal of South American Earth Sciences*, 106, 102941. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2020.102941>
- Williams, C. F., Reed, M. J., Mariner, R. H., DeAngelo, J., & Galanis, S. P. (2008). *Assessment of moderate- and high-temperature geothermal resources of the United States* (inf. téc.). U.S. Geological Survey.
- Zarrouk, S. J., & Moon, H. (2014). Efficiency of geothermal power plants: A worldwide review. *Geothermics*, 51, 142-153.