

PROCESOS GEOTÉRMICOS:

Nuevo modelo para predecir el movimiento de fluidos en el subsuelo

Mediante pruebas experimentales, un grupo internacional de investigadores, donde participó el profesor de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas (FCFM) de la U. de Chile, Juvenal A. Letelier, pudieron validar un nuevo modelo propuesto por el mismo académico, el cual explica con gran precisión el movimiento de fluidos en geometrías confinadas. Este avance permitiría estimar con mayor precisión el transporte de calor en rocas fracturadas, teniendo impacto en la extracción de energía en zonas geotermales. El estudio, además, podría incidir en exploraciones más allá de la Tierra.

Por Andrea Dávalos O.

Siendo el calor un recurso prominente en nuestro país debido a la gran cantidad de volcanes a lo largo de la cordillera de los Andes, se hace necesario estudiar los mecanismos que hacen eficiente su transporte desde grandes profundidades hasta la superficie. Uno de esos mecanismos es la convección térmica —movimiento de fluidos causado por diferencias de temperaturas—, cuyo proceso es difícil de estudiar en el subsuelo debido a que no es fácil acceder y obtener datos de reservorios geotérmicos profundos y modelar la arquitectura subterránea a gran escala. Esta dificultad se acrecienta cuando se estudia las manifestaciones hidrotermales de

las dorsales oceánicas, las cuales están alimentadas por potentes plumas de convección —columna de fluidos a alta temperatura que asciende desde las profundidades de la corteza terrestre— bajo el fondo marino. Motivados por entender la física detrás de estos procesos de transporte y mezcla térmica, surge el estudio “Plume-scale confinement on thermal convection”, publicado en la prestigiosa revista *Proceedings of the National Academy of Sciences* (PNAS), la cual fue realizada por el equipo de investigadores del grupo de Flujos Geoambientales (GEFLOW) de la Universidad de Pennsylvania, Daisuke Noto y Hugo Ulloa, y el académico del Departamento de Ingeniería Civil de la FCFM, Juvenal A. Letelier. Este trabajo pudo demostrar experimentalmente que los fluidos en ambientes confinados y no isotérmicos, es decir, que no mantienen una temperatura constante, se comportan de manera distinta a lo que usualmente se creía, especialmente cuando las rocas tienen aberturas o grietas notorias, proporcionando una nueva forma de entender y predecir el régimen de flujo y el consecuente transporte de calor.

“Generalmente, los problemas de flujo que aparecen tanto en medios porosos como fracturados se han modelado según la ley de Darcy. Incluso en aquellos casos donde esta ley no es válida, dado que existen velocidades de flujo altas, se aplican correcciones semiempíricas que introducen velocidades cuadráticas o cúbicas —los modelos de Forchheimer y Polubarinova-Kochina—. Sin embargo, aplicar la ley de Darcy en fracturas abiertas de gran escala puede sobrestimar por mucho el transporte de

calor desde la zona de reservorio hasta la superficie. Dado que una fractura abierta es, de por sí, un espacio tridimensional de flujo, no es directo aplicar correcciones de velocidad cuadráticas o cúbicas, por lo que nos embarcamos en estudiar cómo diversas aperturas de fractura pueden provocar la aparición de comportamientos no darcinianos y cómo estas desviaciones afectan en el transporte de calor”, señala Letelier, quien agrega que “en nuestra investigación pudimos comprobar experimentalmente que el régimen de Darcy es válido hasta cierto punto, y después de ello, el transporte de calor se explica muy bien bajo las correcciones de la ley de Darcy que propuse años atrás”.

Este trabajo
pudo demostrar
experimentalmente
que los fluidos
en ambientes
confinados y no
isotérmicos (...) se comportan de
manera distinta a lo
que usualmente se
creía.

Para estudiar la convección térmica en medios fracturados, el equipo utilizó celdas Hele-Shaw, partículas termocrómicas fluorescentes y mucha electrónica, con el objetivo de que el experimento pudiese generar un modelo análogo de las condiciones térmicas de los reservorios naturales de roca fracturada, cuantificando los campos de velocidad y temperatura bajo distintos *inputs* de energía, tanto en el plano central de la celda (plano de fractu-

ra) como en su abertura a distintas profundidades. “Es muy difícil hacer experimentos térmicos porque los materiales tienden a transferir calor por todos lados. Al generar las condiciones de convección térmica en estas celdas, pudimos cuantificar el calor perdido por las paredes. Sin embargo, con ideas simples pero harto trabajo realizado por el autor principal de este trabajo, Daisuke Noto, se logró minimizar esas pérdidas al nivel de hacer este experimento replicable, controlable y comparable con resultados de modelos numéricos”, explica.

De esta forma, el experimento confirmó el hallazgo publicado en 2019 por Letelier, en el cual propuso teóricamente un modelo de flujo en geometrías confinadas, como las de las fracturas geológicas, demostrando las desviaciones que tiene la ley de Darcy. “Nuestros resultados experimentales reproducen con gran precisión los hallazgos teóricos de 2019, validando un nuevo modelo de flujo que corrige el modelo de Darcy en medios permeables con aperturas significativas y altos *inputs* de energía”, indica. De esta manera, el movimiento se asemeja más a la convección libre, donde el efecto de las paredes del medio se pierde.

Además de ampliar el conocimiento sobre procesos que ocurren en el sistema terrestre como las zonas geotermales, la investigación también es aplicable a sistemas hidrotermales del fondo marino, que son áreas donde el agua que circula en la corteza terrestre está a altas temperaturas debido a su interacción con una fuente de calor cercana como el magma.

“Con este modelo validado, creamos una métrica para poder llevar estos resultados de laboratorio a escalas más ligadas a problemas de Ciencias de la Tierra. Creamos

estas reglas de escalamiento, pusimos ejemplos con números gruesos y nos dimos cuenta de que los sistemas hidrotermales de fondo oceánico pueden generar procesos de transporte no darcinianos, dado que es posible que exista un mayor *input* de energía que en sistemas hidrotermales continentales, no descartando que estos últimos también tengan este tipo de regímenes más allá de Darcy. De esta forma, existe evidencia a escala de laboratorio que aplicar la ley de Darcy en sistemas fracturados podría generar sobrestimaciones del transporte de calor”, señala el investigador.

Más allá de la Tierra

El estudio no solo abre puertas para comprender el transporte térmico en sistemas terrestres, también se puede extender a otras áreas de la ciencia.

“La exploración en lugares como Enceladus, luna congelada de Saturno, ha mostrado la existencia de *jets* que salen de las grietas de la superficie congelada, como si fuesen *geysers*, lo cual se puede explicar debido a la existencia de circulación hidrotermal dentro del núcleo rocoso y chimeneas hidrotermales en un océano bajo una gruesa capa congelada. Si este tipo de sistemas existen en La Tierra, la física que rige los fenómenos boyantes en estos

mundos es la misma, entonces, podemos usar los conocimientos de los sistemas terrestres para entender qué es lo que ocurre en estos mundos. Es por eso que hoy nos interesa entender más la física en escalas reducidas para luego migrar a aplicaciones de gran escala realizando modelación de reservorios geotérmicos”, explica.

“Dado que existe evidencia que la corteza de Marte es porosa, entonces podemos aplicar las reglas de transporte usadas en acuíferos terrestres, pero bajo las condiciones de Marte que aún faltan por descifrar. La física en sí no cambia.”
Juvenal A. Letelier

“Se cree que Marte tiene agua potencialmente almacenada en los poros bajo su superficie. Dado que existe evidencia que la corteza de Marte es porosa, entonces podemos aplicar las reglas de transporte usadas en acuíferos terrestres, pero bajo las condiciones de Marte que aún faltan por descifrar. La física en sí no cambia. Hay gente

que ya está preocupada de levantar nuevas preguntas y realizar investigación; están obteniendo datos con satélites y sondas orbitando estos mundos, rovers que perforan los primeros centímetros de suelos, etc. Realmente es muy interesante ver cómo se abren nuevos caminos de investigación y cómo nuestro trabajo puede aportar en este ejercicio”, concluye Juvenal A. Letelier.

Actualmente, el equipo se encuentra trabajando para ampliar los alcances de los descubrimientos, estudiando modelos de reservorios terrestres bajo la mirada de la ingeniería geotérmica, ya que se cree que en Chile existen sistemas geotermales energéticos, tales como El Tatio-La Torta, donde debería darse la transición hacia un régimen más allá de Darcy, un tipo de convección térmica en medios fracturados donde el flujo genera una mayor eficiencia de mezcla térmica al interior de las fracturas abiertas, es decir, aproximándose como si el fluido se moviera en un espacio abierto sin mucha intervención de los bordes. 

Enlace relacionado:

