



TEMA DEL ARTÍCULO.

- Ciencia y tecnología

Aplicación del Diagrama Iónico-ILR para el análisis de la composición química de fluidos geotermiales

**Ana Rodríguez-Lara, Natalia Urrea-González,
Oscar García-Cabrejo, Laura Barrantes**

¹Escuela de Ingeniería Geológica, Universidad Pedagógica
y Tecnológica de Colombia, Sogamoso, Boyacá, Colombia.

RESUMEN

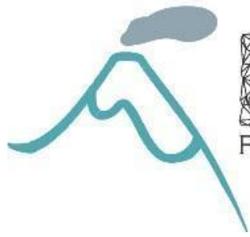
El análisis de la composición química de los fluidos hidrotermales es crítica para la clasificación del tipo de agua e identificación de procesos de mezcla y reacciones químicas que han afectado estos fluidos durante su evolución. El diagrama de Piper es una de las herramientas fundamentales en el análisis de dicha composición química, pero este tiene algunos problemas cuando se analizan muestras de fluidos geotermiales. En este trabajo se aplica el diagrama iónico-ilr como una alternativa al diagrama de Piper. Este diagrama se aplica en un conjunto de muestras del sistema geotermal de Paipa. Los resultados indican que este tipo de diagrama es de utilidad para el análisis de la composición química de fluidos geotermiales.

INTRODUCCIÓN

El estudio de la composición química de los fluidos geotermiales es de especial importancia en la exploración y el manejo de este tipo de recursos. Nicholson (1993) presenta una revisión de los principales gráficos diagnósticos usados en el estudio de la composición química de los fluidos

hidrotermales. Dentro de estos se incluyen los diagramas ternarios convencionales, los diagramas ternarios modificados propuestos por Giggenbach (1988), los diagramas de Piper usados en hidrogeología y diagramas de dispersión entre los diferentes iones. La mayoría de estos diagramas se encuentran implementados en las hojas de cálculo de Excel (R) presentadas por Powell y Cumming (2010).

A pesar que los gráficos diagnósticos antes mencionados son útiles en la mayoría de los casos, estos presentan problemas en el caso de información hidrogeoquímica de fluidos geotermiales. Específicamente los diagramas triangulares y el diagrama de Piper pueden presentar un agrupamiento de puntos en los extremos de los triángulos o diamante que hace difícil apreciar las diferencias de algunos tipos de aguas. Esto es desafortunado si se tiene en cuenta que el diagrama de Piper se ha convertido en una herramienta estándar en hidrogeología debido a la posibilidad de clasificar las muestras, identificar diferentes tipos de procesos que afectan la composición química (mezcla, intercambio iónico, disolución-precipitación, etc). Shelton et al (2018) proponen una alternativa al diagrama de Piper que intenta eliminar los problemas antes mencionados, el cual se basa en la aplicación de la transformación de relación logarítmica isométrica. Esta transformación es una herramienta fundamental del denominado Análisis de Datos Composicionales, el cual es crítico para el análisis de información geoquímica.



En este trabajo se pretende usar el diagrama iónico-ILR en el estudio de la hidrogeoquímica de los fluidos geotermiales en el caso de Paipa, Boyacá, Colombia. Para esto, se va a realizar una comparación de los diagramas diagnósticos propuestos con esta nueva herramienta con el diagrama de Piper convencional usado comúnmente en estudios de calidad de agua subterránea.

DIAGRAMAS IÓNICOS ILR

El *Análisis de Datos Composicionales* es la rama de la estadística que trata con información de tipo cerrada, es decir, con variables cuya suma es constante como porcentajes o concentraciones de especies químicas. Esta característica de suma constante induce problemas cuando las técnicas estadísticas convencionales son aplicadas, como por ejemplo la aparición de correlaciones espurias entre variables. La solución para este problema consiste en abrir los datos, es decir, en transformar los datos originales de tal manera que su suma no sea constante. Esto se puede hacer de diferentes formas mediante las denominadas transformaciones de relación logarítmica. La explicación de dichas transformaciones se encuentra por fuera del alcance de este trabajo y por lo tanto el lector interesado puede consultar la referencia (Pawlowsky-Glahn et al, 2015).

La idea básica del diagrama iónico-ILR es tomar las concentraciones originales de los iones mayores (Ca, Mg, Na, K, HCO₃, CO₃, Cl y CO₄) y transformarlas en unas nuevas variables z₁ a z₄, las cuales definen una base ortogonal en el espacio del simplex en el que se describen las composiciones químicas. Para más detalles ver

Shelton et al (2018). Las expresiones de la transformación están dadas por:

$$z_1 = \sqrt{\frac{2}{3}} \log \frac{\sqrt{[\text{Ca}^{2+}][\text{Mg}^{2+}]}}{[\text{Na}^+ + \text{K}^+]}$$

$$z_2 = \frac{1}{\sqrt{2}} \log \frac{[\text{Ca}^{2+}]}{[\text{Mg}^{2+}]}$$

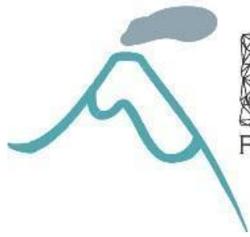
$$z_3 = \sqrt{\frac{2}{3}} \log \frac{\sqrt{[\text{Cl}^-][\text{SO}_4^{2-}]}}{[\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}]}$$

$$z_4 = \frac{1}{\sqrt{2}} \log \frac{[\text{Cl}^-]}{[\text{SO}_4^{2-}]}$$

Con estas nuevas variables, un diagrama de dispersión entre la variable z₁ y z₂ reemplazaría el diagrama triangular de los cationes, mientras que un diagrama entre la variable z₃ y z₄ sería equivalente al diagrama triangular de los aniones. El diamante central del diagrama de Piper se puede reemplazar por un diagrama entre z₁ y z₃. Adicionalmente se puede incluir un diagrama entre z₂ y z₄, con lo cual se puede presentar toda la información de la composición química del agua en 4 diagramas como los que se presentan en la Figura 1.

CASO DE ESTUDIO

Con el fin de probar el diagrama iónico-ilr explicado anteriormente se seleccionó un conjunto de datos de composición química de fluidos geotermiales y agua subterránea en el municipio de Paipa, Boyacá, Colombia. El conjunto de datos de fluidos geotermiales fue colectado por Alfaro (2002) y los datos de calidad de agua subterránea hacen parte de los resultados presentados por el



Servicio Geológico Colombiano a CorpoBoyacá en el marco del proyecto *Modelo Hidrogeológico Conceptual del Acuífero de la parte Central de Boyaca* (2017). El conjunto de datos está conformado por 23 muestras de fluido geotermal y 12 muestras de calidad de agua subterránea cuya ubicación discriminada por tipo de fuente se presenta en la Figura 2.

RESULTADOS

El diagrama de Piper de las muestras de fluidos geotermales y de agua subterránea del acuífero cuaternario de la zona de Paipa, Boyacá, se presentan en la Figura 3. En esta se pueden ver 4 grupos de muestras de fluidos geotermales (puntos en verde oliva), en donde se presenta una concentración alta de muestras en el extremo derecho del diamante. Este es un ejemplo claro de las limitaciones del diagrama de Piper y en este caso particular impide apreciar la variación de la composición química de estas muestras de fluido geotermal.

El diagrama iónico-ILR de las muestras de fluido geotermal y agua subterránea de Paipa, Boyacá se presenta en la figura 4. En los cuatro diagramas de la figura 4 es evidente la separación de las muestras de fluido geotermal y las muestras de aguas subterráneas.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

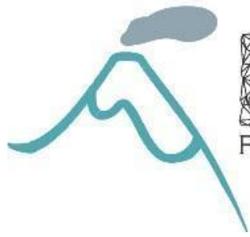
PRELIMINARES

El diagrama iónico-ILR es una alternativa al comúnmente usado diagrama de Piper y tiene una

serie de ventajas en el caso del análisis de la composición química de fluidos geotermales. La información de la composición química de los fluidos hidrotermales de Paipa aparecen concentrados en la esquina derecha del diamante central del diagrama de Piper, y otras muestras se encuentran sobre la línea de variación de Ca y Mg en el diamante central tal como se aprecia en la figura 3. Esto impide ver la variación de la variación en la composición química del fluido hidrotermal y dificulta su comparación con muestras de aguas subterráneas como en el caso de Paipa. Estos dos problemas se resuelven con el uso del diagrama iónico-ILR tal como se aprecia en el diagrama inferior derecho en la figura 4, en donde las muestras de fluido geotermal no aparecen concentradas y se puede establecer de manera visual cuales muestras son afines a este grupo.

Los resultados obtenidos en el caso de estudio presentado indican que el diagrama iónico-ILR es una herramienta útil para el análisis de la composición química de los fluidos geotermales, y por lo tanto se recomienda su uso en estudios futuros. Sin embargo es necesario realizar más estudios con el fin de determinar si las ventajas de esta herramienta aplican en otros datos de fluidos geotermales.

El diagrama se puede elaborar fácilmente con una hoja de cálculo (Excel (R)), aunque el diagrama presentado en la figura 4 se elaboró con el paquete GQAnalyzer del lenguaje de programación R usando la librería *ggplot2*. De esta forma se asegura la posibilidad de modificar fácilmente dicho diagrama de acuerdo a las necesidades del analista. Este paquete está siendo desarrollado en la Escuela de Ingeniería Geológica de la UPTC



RENAG
REUNION NACIONAL DE GEOTERMIA

Bogotá
2018



ASOCIACIÓN GEOTÉRMICA COLOMBIANA

Sogamoso, Boyacá; y el lector puede acceder al mismo comunicándose con alguno de los autores.

REFERENCIAS

Alfaro, C: Geoquímica del Sistema Geotérmico de Paipa. Reporte Técnico INGEOMINAS. 97 pp. (2002).

Giggenbach, W.: Geothermal solute equilibria. Derivations of Na-K-Mg-Ca geothermometers. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 52, 12, 2749-2765. (1988)

Nicholson, K.: *Geothermal Fluids: Chemistry and Exploration Techniques*. Springer-Verlag, Berlin. 297 pp. (1993).

Powell, T. and Cumming, W.: *Spreadsheets for Geothermal Water and Gas Geochemistry.. Proc*

XXXV Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford – California, USA. pp. 1174 – 1184. (2010).

Servicio Geológico Colombiano: Modelo Hidrogeológico conceptual de los acuíferos de la parte central de Boyacá. Informe elaborado para CorpoBoyacá. 256 pp. (2017).

Shelton et al.: The isometric-log-ratio (ilr)-ion plot: A proposed alternative to the Piper diagram. *Journal of Geochemical Exploration*, 190, 3, pp 130-141. (2018),

Pawlowsky-Glahn et al: *Modeling and Analysis of Compositional Data*. 275 pp. (2015).

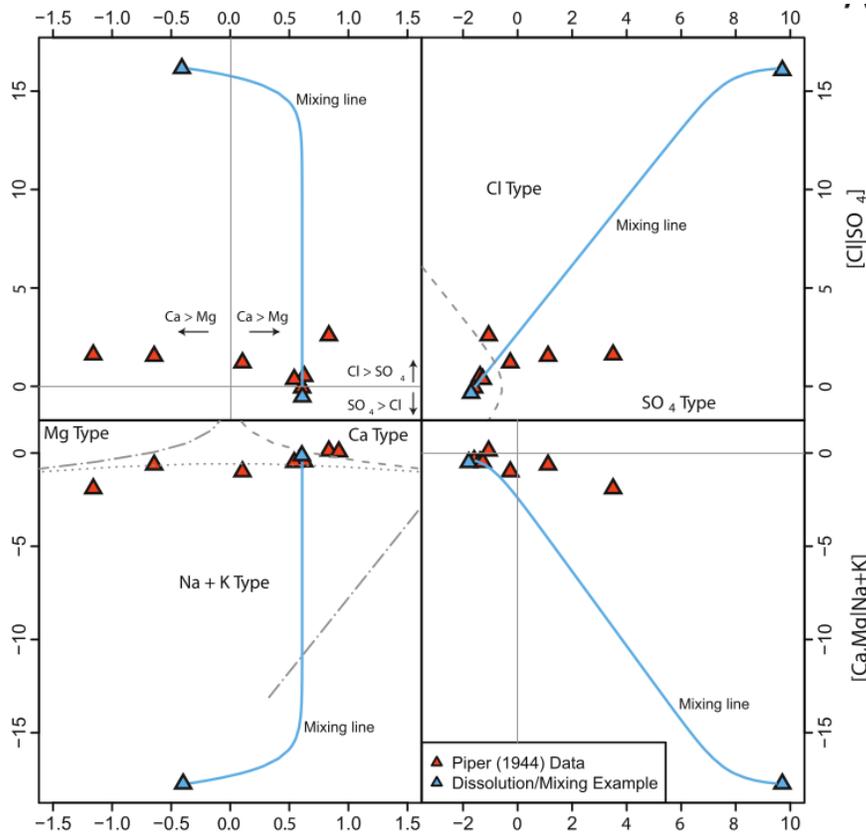
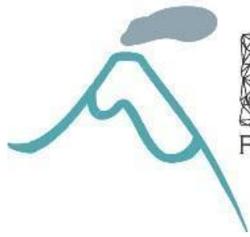
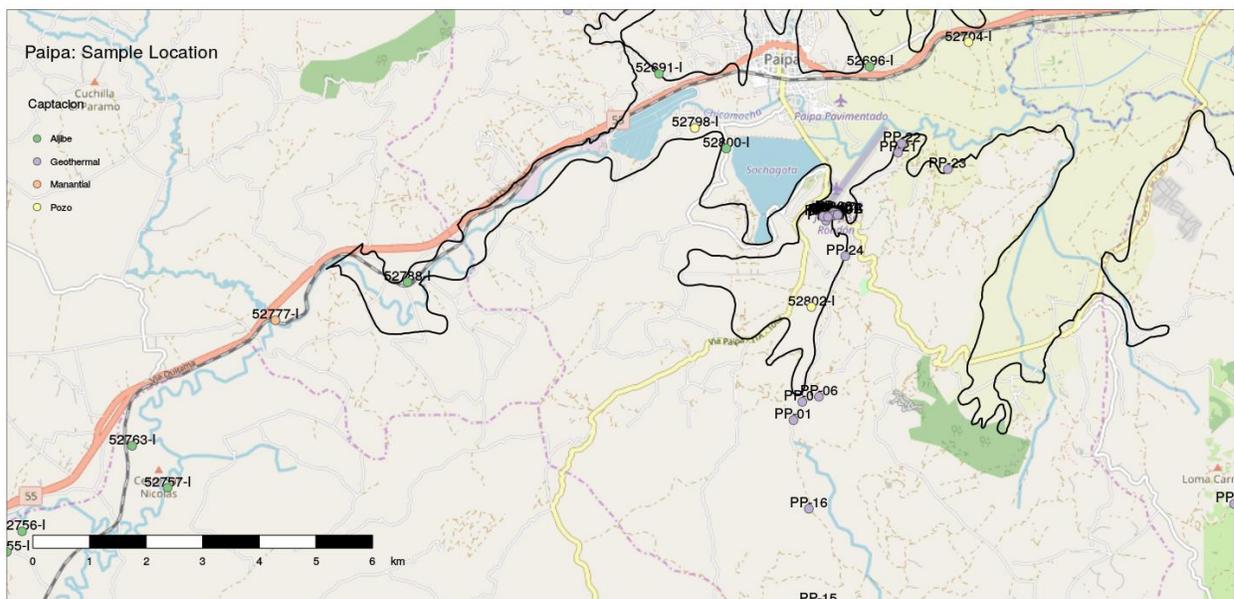
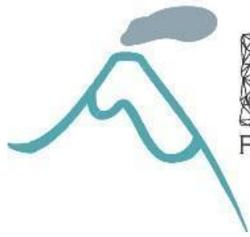


Figura 1. Ejemplo de diagrama iónico-itr. Este diagrama tiene 4 campos con los cuales se reproduce el diagrama de Piper: el diagrama superior derecho representa el diagrama triangular de aniones, el diagrama inferior izquierdo representa el diagrama triangular de cationes, el diagrama inferior derecho representa el



diamante central del diagrama de Piper, mientras que el diagrama superior izquierdo representa un diagrama adicional no incluido en el diagrama de Piper. Tomado de Shelton et al (2018).

Figura 2. Ubicación de muestras en Paipa, Boyacá. La línea negra continua marca el límite del cuaternario en el área de estudio. Las muestras que aparecen fuera del cuaternario corresponden a muestras tomadas en



otros depósitos cuaternarios en el mismo Valle y se incluyen en el análisis para tener una idea más clara de la composición del agua subterránea en el acuífero cuaternario en la zona de estudio.

Paipa Waters

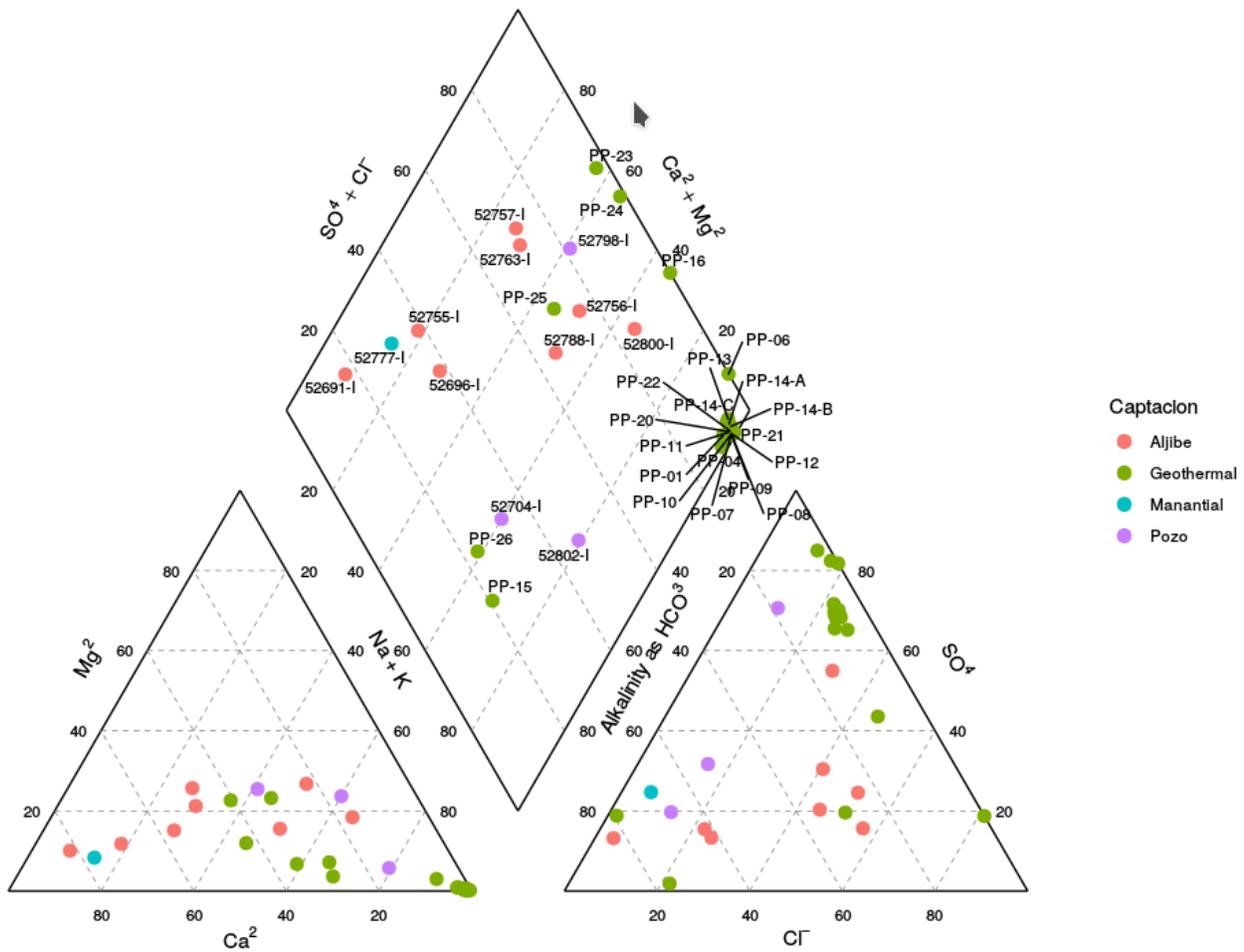


Figura 3. Diagrama de Piper para las muestras de fluido geotermal y aguas subterráneas colectadas en el municipio de Paipa, Boyacá, Colombia. El gráfico presenta las muestras discriminadas por fuente.

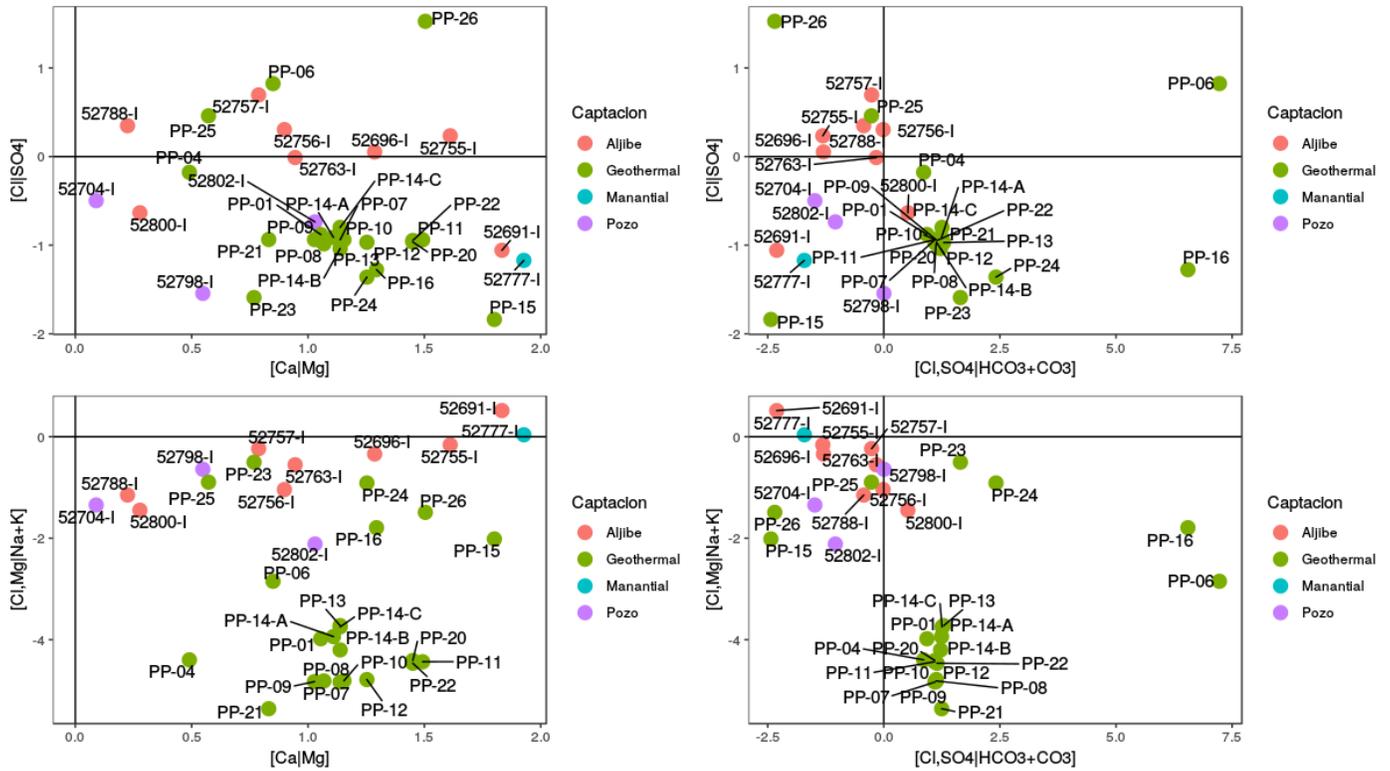


Figura 4. Diagrama iónico-ILR de las muestras de fluido geotermal y de aguas subterráneas del municipio de Paipa, Boyacá, Colombia.