

Sobre la cerradura hidrogeológica de la cuenca de México

Alejandra Cortés
Jaime Durazo

Universidad Nacional Autónoma de México

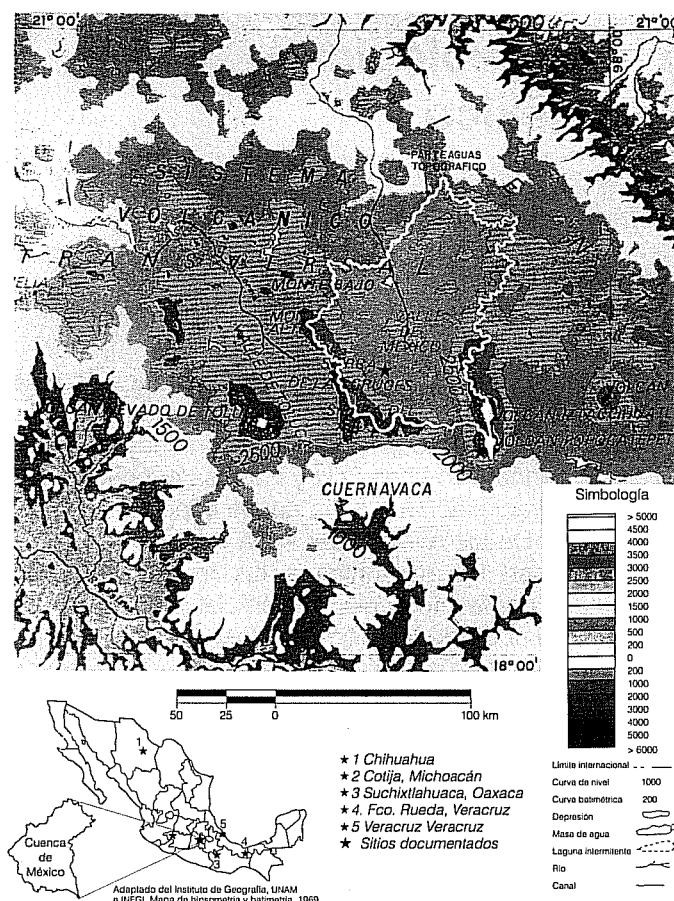
Recientemente, Cortés *et al.* (1997) presentaron una recopilación de los estudios sobre hidrología isotópica de la cuenca artificialmente no endorreica de México, la cuenca, y su accidentada vecindad geográfica (ilustración 1), mismos que pudieron acopiarse hasta mediados de los años noventa. La recopilación, creemos, todavía presenta un panorama bibliográfico bastante completo sobre su tema. Los estudios están enfocados principalmente en el acuífero sedimentario que se aloja en las partes bajas de la Cuenca (altitud de 2.24 kilómetros sobre el nivel del mar), llamado aquí el acuífero del valle de la Cuenca. Además, están incluidos dos acuíferos sedimentarios de cuencas vecinas, el del valle de Cuernavaca (altitud de 1.5 kilómetros sobre el nivel del mar; vecino del sur) y, en mucho menor grado, el del valle de Toluca (altitud de 2.62 kilómetros sobre el nivel del mar; vecino del oeste).

Es característica casi general que los estudios allí considerados, el interés meramente local y la concepción de que los acuíferos periféricos de ambos flancos de la frontera de la cuenca están aislados por los elevados y extensos macizos volcánicos que conforman sus serranías limítrofe típicas. A nuestro parecer, salvo un estudio (el *Source Study 7* de la bibliografía referida), los macizos se consideraron impermeables, no obstante reconocerse como zona común de recarga, lo que sería una paradoja. Utilizando el oxígeno-18 del agua subterránea como trazador ambiental (Fritz y Fontes, 1980), se pondrá a discusión y crítica una original visión de conjunto basada en el concepto de continuidad hidráulica a escala intercuenca. Este último concepto, como propiedad fundamental de todo cuerpo geológico superficial, ha sido formalizado recientemente por Tóth (1995). El objetivo de la presente nota técnica es exponer algunas observaciones preliminares sobre la interacción del agua subterránea en los macizos volcánicos limítrofe donde hay información isotópica y adelantar ciertas reflexiones para otras zonas limítrofe no documentadas.

La mencionada recopilación bibliográfica incluye todos los análisis de la concentración elemental del oxígeno-18 del agua [expresada en unidades $\delta^{18}\text{O}(\text{‰})$ *versus* Vienna-smow) en Fritz y Fontes, *loc. cit.*], referidos a la precipitación y a las aguas superficial y subterráneas. De los análisis del agua subterránea, si se inspeccionan los referentes a las muestras menos afectadas por la interacción superficial inducida por el intenso bombeo de los últimos decenios, es decir, las muestras de pozos profundos; y si los acuíferos son caracterizados por el promedio aritmético $\langle\delta^{18}\text{O}\rangle$ del agua de esos pozos, entonces se revelará un *orden* (examinar el cuadro adjunto) entre parejas de acuíferos periféricos internos y externos del parteaguas topográfico de la cuenca, el del valle más elevado—Toluca en relación con México y México en relación con Cuernavaca— es el que tiene una $\langle\delta^{18}\text{O}\rangle$ menos negativa.

Las diferencias entre promedios isotópicos mostradas en el cuadro son poco mayores que la incertidumbre de laboratorio propia de cada una de las muestras con la que se estimaron los promedios (la reproducibilidad de los análisis es típicamente $\pm 0.3 \text{‰}$. Ver Fritz y Fontes, *loc. cit.*) Por lo demás, si se toman en cuenta las desviaciones estándar de los promedios, hay traslapes: de -9.1‰ a -9.9‰ en Toluca; de -9.8‰ a -10.6‰ en México, y de -10.1‰ a -11.1‰ en Cuernavaca. Habrá pozos profundos en Toluca que extraigan agua isotópicamente indistinguible de la de ciertos pozos profundos de México y Cuernavaca. Sin embargo, tratándose de promedios y de sus desviaciones estándar, tal ocurrencia parece poco frecuente.

Así, el orden con que aparecen los promedios isotópicos de los acuíferos periféricos en estudio, aun siendo sus diferencias pequeñas, proporcionan el *indicio* de una tendencia regional que pudiera ser, siguiendo las ideas de Tóth (*loc. cit.*), hidrogeológicamente significativa. Y, suponiendo que la tendencia lo fuera, cabe preguntar a qué se debe. Veamos.

Ilustración 1. La región de estudio, zona montañosa del centro de México.

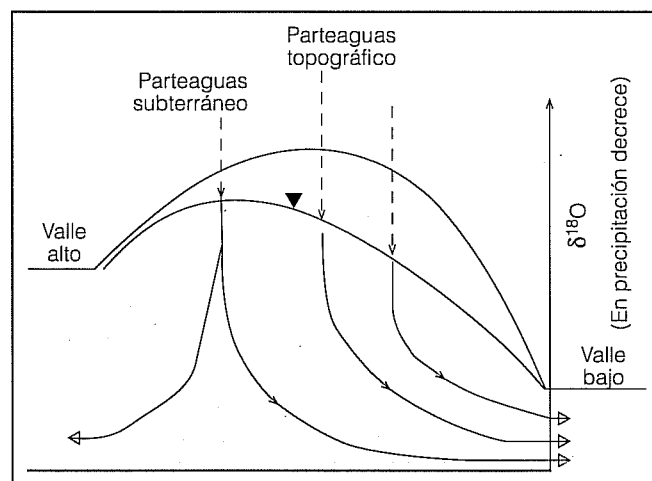
Es bien conocido que en los ambientes montañosos del mundo (en Fritz y Fontes, *loc. cit.*) la precipitación que ocurre en las zonas más altas (las más frías) es, en términos de $\delta^{18}\text{O}$, la más negativa. Según esto, allí la precipitación es más pobre en oxígeno-18. Para la región que nos ocupa, Cortés y Durazo proponen que la relación que gobierna este efecto de altura viene dada por la relación $\delta^{18}\text{O}(X, Y) = -2.13 Z(X, Y) - 3.2$, donde $\delta^{18}\text{O}(X, Y)$ es la concentración de la precipitación que ocurre en todo sitio (X, Y) de la región cuya elevación topográfica, en kilómetros sobre el nivel del mar, es $Z(X, Y)$. Así, si conociéramos el valor $\langle \delta^{18}\text{O} \rangle$ de un acuífero, evaluado éste por un promedio aritmético de los análisis de sus pozos profundos que sea estadísticamente representativo, podríamos estimar la altura media $\langle Z \rangle$ de la precipitación que lo recarga. Tal estimación estaría bien sustentada.

En nuestro caso, los propios promedios mostrados en el cuadro pueden ser discutibles en su representatividad acuífera por diversas razones: las zonas prome-

diadas son demasiado extensas, los pozos de Cuernavaca en general no son muy profundos, pocos datos para Toluca, sesgo involuntario en la selección de datos y otras razones. Por eso, las diferencias isotópicas entre los acuíferos periféricos documentados deben considerarse solamente un indicio de que el acuífero más bajo se recarga en la misma serranía limítrofe, pero a mayor altura media. En lo siguiente ese indicio será nuestra *hipótesis*.

Un modelo hidráulicamente continuo que explica tal hipótesis es el siguiente: el agua precipitada e infiltrada en y alrededor de la cima —donde las δ 's son más negativas— alcanza el nivel de saturación dentro del macizo e inicia su drenaje subterráneo hacia el acuífero relativamente bajo. La fracción remanente, que obviamente excluye a la infiltración de las zonas cimeiras, drena hacia el acuífero del lado opuesto. Eso es todo lo que nos dicen los datos isotópicos; sin embargo, hay implicaciones. Como el drenaje subterráneo es impulsado por la gravedad, el nivel de saturación serrano *necesariamente* debe tener forma de domo, en cuya cresta se dividen los flujos que recargan los acuíferos de ambos flancos. Este lugar es el *parteaguas subterráneo* que, visto desde superficie, no coincide con el lugar donde se dividen las aguas superficiales: el *parteaguas topográfico*. Por lo discutido, de los dos parteaguas, el subterráneo está más cerca del pie de monte del valle elevado.

En la ilustración 2 se compara una sección ilustrativa de la topografía de la serranía con la sección de la forma dominante de domo del nivel de saturación. Es claro que ambas secciones se parecen, pero no son idénticas. El "desfasamiento" entre ellas admite una

Ilustración 2. Comparación de una sección ilustrativa de la topografía de la serranía con la sección de la forma dominante de domo del nivel de saturación.

Cuadro 1. Dos serranías limítrofe de la cuenca de México y sus correspondientes valles periféricos: caracterización topográfica, concentraciones isotópicas promedio del oxígeno-18 del agua de sus acuíferos y sus alturas medias de recarga.

Parejas de valles periféricos intercuenca	Serranía limítrofe	Elevación media de la serranía (km snm)*	
Frontera oeste: México-este de Toluca	Las Cruces	~ 3.0	
Frontera sur: México-norte de Cuernavaca	Chichinautzin	~ 3.5	
Valles	Elevación (km snm)	$\langle \delta^{18}\text{O} \rangle \pm \sigma; n^{**}$ (‰ V-Smow)	Elevación media de la recarga acuífera***
Este de Toluca	2.62	$-9.5 \pm 0.4; 8$	3.0
México	2.24	$-10.2 \pm 0.4; 47$	3.3
Norte de Cuernavaca	1.5	$-10.6 \pm 0.5; 77$	3.5

* km snm: kilómetros sobre el nivel del mar.

** $\langle \delta^{18}\text{O} \rangle$: concentración representativa del oxígeno-18 del acuífero. Promedio aritmético de las muestras de sus pozos profundos; σ , desviación estándar; n , número de datos. Datos selectos (sólo pozos profundos. Ver texto) tomados de Cortés *et al.* (1997).*** Estimados según la relación: elevación media de la recarga del acuífero = $-\langle \delta^{18}\text{O} \rangle + 3.2$ / 2.13. Ver texto.

explicación hidrodinámica esencial si, como lo supusimos, la serranía es un medio hidráulicamente continuo. Para el caso particular de un medio poroso, a este problema se le llama "la presa de tierra" y está resuelto analíticamente en Verruijt (1970).

Así, una interpretación hidrodinámica plausible y sencilla del orden isotópico documentado es que, por una parte, las serranías intercuenca no son la paradójica barrera impermeable mencionada al inicio; y, por la otra, el régimen de drenaje subterráneo serrano rumbo a ambos acuíferos periféricos es consecuencia tanto de las peculiaridades topográficas y de permeabilidad del macizo serrano como —esto es cardinal— de la infiltración que sobre él ocurre (Verruijt, *loc. cit.*). Si se diera otro conjunto de características topográficas y geológicas, o la infiltración disminuyera drásticamente, el problema pudiera admitir otra solución diametralmente distinta, donde el nivel de saturación de las aguas subterráneas serranas no forma domo y, consecuentemente, no es capaz de contener al acuífero elevado. El agua escaparía del acuífero alto al bajo permeando la serranía: una situación de *apertura hidrogeológica*. El orden isotópico sería totalmente diferente.

Por lo visto, en las fronteras Toluca-México y México-Cuernavaca se favorece una situación de *cerradura hidrogeológica*, esto es, en las correspondientes serranías intercuenca se contactan hidrodinámicamente dos sistemas divergentes de flujo subterráneo. Por esas zonas el acuífero del valle de México no recibe ni entrega aportes subterráneos de/a otros acuíferos allende la Cuenca. Tales afirmaciones concuerdan con

las correspondientes de Ortega (1989), alcanzadas con otros argumentos.

Actualmente no disponemos de datos isotópicos para todas las zonas limítrofe exteriores de la cuenca. Por ejemplo, el valle de Puebla, al norte, separado del de México por la porción sur de la Sierra Nevada. Allí, un pronóstico consecuente al enfoque aquí utilizado es que dada la igualdad de elevaciones entre ambos valles, la situación local también será de cerradura hidrogeológica. A manera de posterior comprobación de la veracidad del método propuesto, el acuífero de Puebla tendría que documentar una $\langle \delta^{18}\text{O} \rangle$ indistinguible de la de México.

Es interesante reflexionar sobre la interacción del agua subterránea entre las cuencas de Apan-Tochac y México, cuya frontera común incluye la extensión norte de la misma Sierra Nevada. Ambas cuencas fueron endorreicas hasta tiempos históricos recientes (Tamayo, 1949). Sin embargo, a diferencia de la de México, la otra no parece haber formado un sistema lacustre perenne. Diversas manifestaciones notables típicas de las cuencas endorreicas se dan en la primera (régimen de descarga acuífera en el valle y nivel freático somero, arcillas con aguas de poro salinas y otras), pero no se reportan en la segunda (Huizar *et al.*, 1997). ¿A dónde va el agua subterránea de Apan-Tochac? Dado que sus valles son más elevados que el de México, pudiera suponerse una situación de *apertura hidrogeológica*, quizá hacia los manantiales aún activos de la zona arqueológica de Teotihuacan, dentro de la cuenca. El problema merece investigarse.

Lo discutido da pie a plantear el problema general de la cerradura o apertura hidrogeológica intercuenca con ayuda del enfoque semiempírico de trazadores isotópicos ambientales esbozado en esta nota técnica. Los resultados consecuentes a éste y otros enfoques serán importantes, digamos, para mejorar la estimación de los balances hidrológicos globales de las cuencas implicadas.

Recibido: 06/10/1999
Aprobado: 15/08/2000

Referencias

- Cortés, A. y J. Durazo. "Tendencia del oxígeno-18 en la precipitación del centro de México", *Ingeniería Hidráulica en México*, vol. XVI, núm. 2, abril-junio, 2001, pp. 93-102.
- Cortés, A., J. Durazo y R.N. Farvolden, "Studies of isotopic hydrology of the basin of Mexico and vicinity: annotated bibliography and interpretation", *Journal of Hydrology*, vol. 107, 1997, pp. 346-376.
- Fritz, P. y J.C. Fontes (editores), *Handbook of Environmental Isotope Geochemistry*, vol. 1, Elsevier Sci. Pub. Co., Amsterdam, 1980.
- Huizar-Álvarez, R., J.O. Campos-Henríquez, J. Lermo-Samániego, O. Delgado-Rodríguez y A. Huidoro-González, "Geophysical and hydrogeological characterisation of the sub-basin of Apan and Tochac (Mexico basin)", *Geofísica Internacional*, vol. 36, 1997, pp. 217-233.
- Ortega, G.A., "Las condiciones de frontera hidráulicas naturales en la Cuenca de México, usando modelado matemático", *Geofísica Internacional*, vol. 28, 1989, pp. 283-295.
- Tamayo, J. L., *Geografía General de México. Tomo II: Geografía Física*, Talleres Gráficos de la Nación, México, D. F., 1949.
- Tóth, J., "Hydraulic continuity in large sedimentary basins", *Hydrogeology Journal*, vol. 3, 1995, pp. 4-16.
- Verruijt, A., *Theory of Groundwater Flow*, Macmillan and Co. Ltd., Londres y Basingstoke, 1970.

Dirección institucional de los autores:

Alejandra Cortés
Jaime Durazo

Correo electrónico: durazo@tonatiuh.igeofcu.unam.mx

Universidad Nacional Autónoma de México
Instituto de Geofísica
04510 México, D.F.
Teléfono (1) 5622 4133
Fax (1) 5550 2486