

EL OXIGENO-18 EN LAS AGUAS METEORICAS DE MEXICO

R. Castillo, P. Morales y S. Ramos

Instituto de Física, UNAM
Apartado Postal 20-364
Delegación Alvaro Obregón
01000, México, D.F.

I. Mata, O. Vivaldo

Subdirección de Investigación y Tecnología de Apoyo, S.A.R.H.
Teotihuacan 18, D. Cuauhtémoc
06100, México, D.F.

(recibido agosto 22, 1984; aceptado abril 16, 1985)

RESUMEN

En esta comunicación se reportan los resultados del análisis isotópico del oxígeno-18 efectuados a muestras de agua de lluvia, recolectadas en el período mayo 1982 a mayo 1983 por una red de 18 estaciones distribuidas a lo largo de la República Mexicana, obteniéndose las curvas de correlación $\delta_P^{18}O = 0.011 T_M - 0.001h - 5.20$ (coef. correl 0.678) y $\delta_P^{18}O = 0.19 T_M - 9.71$ (coef. correl 0.52).

ABSTRACT

In this communication we report the oxygen-18 isotopic analysis of rain water samples collected from May 1982 - May 1983 by a 18-station-

network distributed along the Republica Mexicana. We find the correlation curves $\delta_P^{18}O = 0.011 T_M - 0.001h - 5.20$ (c.c.0.68) and $\delta_P^{18}O = 0.193 T_M - 9.71$ (c.c. 0.52).

INTRODUCCION

Desde 1961 la red de estaciones del I.A.E.A./W.M.O. ⁽¹⁾ ha proporcionado información sobre las variaciones del contenido isotópico en la precipitación a nivel mundial. De igual forma, se han desarrollado programas de monitoreo regional en algunas partes del planeta para estudiar algunos aspectos específicos de dichas variaciones isotópicas, que permiten elaborar modelos útiles en la hidrología ⁽²⁾.

La variación, tanto temporal como espacial, del contenido isotópico de las aguas de precipitación tiene su origen en la redistribución de las especies de agua substituidas isotópicamente durante los cambios de fase que ocurren en los distintos estadios del ciclo hidrológico; siendo en los procesos de evaporación y condensación donde ocurre el mayor fraccionamiento isotópico, pues la razón de transporte entre las fases difiere de una especie substituida isotópicamente a otra. El grado de separación isotópica depende de varios parámetros tales como la composición isotópica inicial, las condiciones termodinámicas presentes durante el cambio de fase, la velocidad de reacción, etc., aunque el más importante de todos estos factores es, sin duda, la temperatura a la cual ocurren los cambios de fase ⁽³⁾. El concurso de estos factores en forma individual o mezclados en el ciclo hidrológico trae como consecuencia varios efectos sobre la composición isotópica de la precipitación que resumimos a continuación.

- 1) Efecto de la temperatura: Se refiere a la dependencia de la composición isotópica de la precipitación con la temperatura de condensación (a menor temperatura mayor fraccionamiento isotópico).
- 2) Efecto de altura: Se refiere a la dependencia de la composición isotópica de la precipitación con altitud (a mayor altitud la precipitación se encuentra empobrecida en isótopos pesados).
- 3) Efecto de evaporación: Se refiere al cambio en la composición isotópica de la precipitación, causada por la evaporación en el proceso de

caída de las gotas de agua.

- 4) Efecto de cantidad: Se refiere a la relación observada entre cantidad de precipitación y su composición isotópica (a mayor cantidad de precipitación mayor empobrecimiento en isótopos pesados en la precipitación).
- 5) Efecto continental: Se refiere a la relación observada entre la distancia a la costa y el contenido isotópico de la precipitación (a mayor distancia mayor empobrecimiento en isótopos pesados en la precipitación).

Estos "efectos", que encuentran su explicación cualitativa en el proceso de destilación Rayleigh⁽³⁾, nos permiten relacionar la composición isotópica de la precipitación con los parámetros ambientales característicos del sitio de muestreo, tales como temperatura media anual, altitud, cantidad de precipitación, etc., lo que encuentra múltiples aplicaciones en estudios que pretenden relacionar el agua de un determinado acuífero con la precipitación regional⁽⁴⁾,

Una primera idea del contenido isotópico en la precipitación de la República Mexicana se conoce gracias a dos estaciones de la red mencionada localizadas en las ciudades de Chihuahua y Veracruz, que si bien cumplen su cometido a escala mundial por su localización (una en un clima semiárido con precipitación escasa y alta dispersión en contenido isotópico y la otra de tipo costero que refleja los amplios cambios meteorológicos de la zona marina del Golfo de México) no permiten obtener información a nivel regional que hubiese sido valiosa en la realización de varios estudios geohidrológicos^(5,6,7), pues habría dado la oportunidad de relacionar el contenido isotópico del agua de precipitación con los correspondientes valores isotópicos del agua de los acuíferos subterráneos bajo estudio, lo que a su vez hubiera permitido dar elementos de juicio sobre el origen o tipo de recarga de dichos acuíferos.

Por los antecedentes mencionados, se inició una colaboración entre el Instituto de Física de la Universidad Nacional (IFUNAM) y la Subdirección de Investigación y Tecnología de Apoyo de la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SITASARH) para instalar una red de 18 estaciones distribuidas en varias partes del país (Fig. 1) para obtener

muestras de agua de lluvia, las que posteriormente se sometieron al análisis isotópico (contenido de oxígeno-18) con el fin de evaluar las características generales del contenido de oxígeno-18 con el agua de precipitación de las distintas regiones del país, hasta el momento desconocidas.

Esta comunicación tiene como objetivo presentar los resultados de los análisis isotópicos efectuados a las muestras de agua de lluvia, colectados en el período mayo 1982 - mayo 1983 y discutir en forma breve algunos aspectos relevantes de dichos resultados.

MUESTREO Y ANALISIS ISOTOPICO

En cada una de las estaciones de la red (Fig. 1 y Tabla 1), se recolectó la precipitación total diaria por períodos de 10 días en botellones con una capa de un centímetro de espesor de petrolato líquido, para evitar a lo mínimo su evaporación⁽⁸⁾, de donde se tomaron alícuotas de 30 ml. para enviarse al laboratorio a ser analizadas.



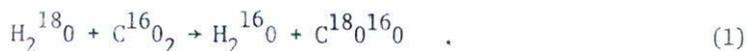
Fig. 1 Mapa de localización de las estaciones climatológicas e hidrométricas que contribuyeron al estudio.

T A B L A I
RESUMEN DE LOS RESULTADOS

NUMERO	ESTACION	NUMERO DE MUESTRAS	LATITUD°.'."	LONGITUD°.'."	ALTURA (m)	TEMPERATURA MEDIA (°C)	$18_0 \Delta$ δ_p	PRECIPITACION TOTAL (mm)
1	San Carlos B.C.N.	15	31.47.16	116.27.30	170	12.0	-7.0	665.2
2	Presa. A. Rodríguez, Son	11	29.04.38	110.55.08	225	21.8	-3.4	221.1
3	Peña del Aguila, Dgo.	13	24.12.20	104.39.25	1890	16.3	-5.8	225.4
4	Nevado de Toluca, Mex.	17	19.07.08	99.44.99	4120	3.0	-10.1	811.3
5	Peñitas, Col.	13	19.15.37	103.48.45	520	22.9	-5.9	825.2
6	El Puerto de Cotija, Mich	19	19.43.03	102.40.20	1640	14.4	-7.4	664.5
7	Jiménez, Chih.	15	27.07.48	104.54.58	1390	14.9	-3.4	225.4
8	San Fernando, Tamp.	21	24.50.50	98.09.30	50	14.3	-3.9	414.5
9	Suchixtlahuaca, Oax.	10	17.43.40	97.22.00	2120	15.2	-9.7	171.1
10	Puente Colgante, Chis.	15	16.44.38	93.02.32	425	24.2	-7.2	677.4
11	Pueblo Nuevo, Tab.	18	17.52.10	92.52.10	10	24.0	-6.1	1740.4
12	Canasayab, Camp.	14	10.50.07	90.26.05	30	26.0	-3.6	946.1
13	Los Pilares, S.L.P.	9	22.29.25	101.02.17	1730	16.1	-8.9	247.0
14	C.C.A. UNAM, D.F.	14	19.20.32	99.12.00	2400	17.4	-6.7	530
15	Fco. Rueda, Ver.	8	17.50.00	93.34.00	7	23.50	-4.20	1855.4
16	El Rejon, Chih.	16	28.37.03	106.07.08	1450	12.0	-5.7	258.1
17	Presa Coyote, Coah.	7	25.26.27	103.28.30	1130	17.10	-9.60	188.6
18	Mérida, Yuc*	6	20.58.35	89.34.50	7	26.2	-4.1	278.7

*Solo se muestreo medio año
ΔLa precisión de los análisis es de 0.1%.

El análisis isotópico del oxígeno-18 se efectuó siguiendo la técnica de Epstein y Mayeda, que fundamentalmente consiste en analizar la relación $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ del CO_2 equilibrado con una alícuota de la muestra de agua, en un espectrómetro de masas. Este CO_2 equilibrado con muestras de agua es el producto de la siguiente reacción de intercambio isotópico efectuada a 25°C :



Para procesar un número grande de muestras, como las que consideraba este estudio, fue necesario implementar una línea de vidrio para operar al alto vacío que pudiese lograr CO_2 equilibrado de varias muestras de agua a la vez. Por tal motivo se construyó una línea de vidrio de 5 unidades iguales (ver Fig. 2) dispuestas en forma circular para procesar 5 muestras en un mismo tiempo.

Su operación resulta muy sencilla y consiste en efectuar por quintuplicado las siguientes operaciones: Colocar una alícuota de 2 ml de la muestra en el frasco reaccionador A y eliminar el aire, con ayuda del sistema de vacío. Introducir CO_2 en el frasco A con ayuda de nitrógeno líquido, que previamente se había confinado en la misma línea entre las válvulas 1 y 2. Una vez que se tiene el CO_2 y la muestra de agua en el frasco A se le permite alcanzar el equilibrio isotópico de acuerdo a la Ec. (1), en un baño de temperatura controlada a 25°C . Posteriormente, se extrae el CO_2 producto de la reacción por la misma línea de vidrio, secándose a su paso por las trampas tipo dedo frío B y C, con la ayuda de nitrógeno líquido y mezcla frigorífica de hielo seco y etanol. Este CO_2 equilibrado y seco se lleva al espectrómetro de masas de triple colector (Finnigan Mat 250) en los frascos D para finalizar el análisis isotópico. El contenido de oxígeno-18 de las muestras de agua se reporta en unidades de desviación por mil (‰) relativas al patrón internacional S.M.O.W.⁽⁹⁾, esto es, en unidades delta definidas por

$$\delta^{18}\text{O} = \left[\frac{(^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{muestra}} - (^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{SMOW}}}{(^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{SMOW}}} \right] \cdot 10^3 \quad .$$

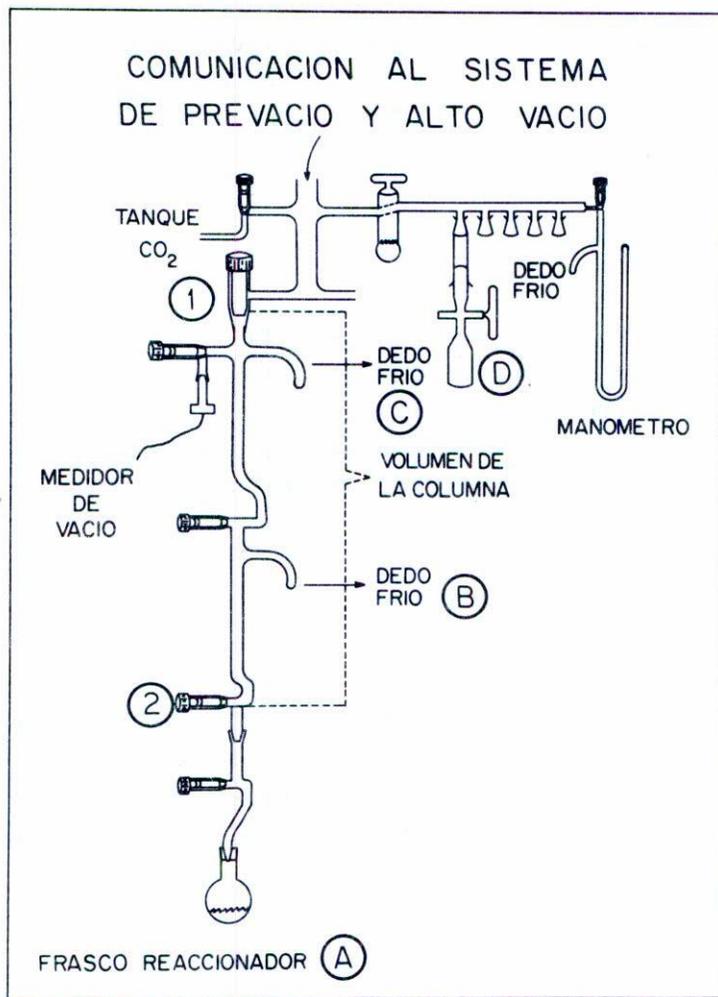


Fig. 2. Línea de preparación de las muestras para efectuar el análisis del oxígeno-18 en muestras de agua.

RESULTADOS

El resumen de los resultados de los análisis isotópicos se encuentra en la Tabla I, en la que se indica la posición geográfica de las estaciones de la S.A.R.H. que contribuyeron a este estudio. La columna

número de muestras corresponde al número de decenas en que se recolectó precipitación durante el año. La columna $\delta_p^{18}O$ corresponde al contenido de oxígeno-18 en % con respecto al SMOW pesada por la precipitación de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$\delta_p^{18}O = \frac{\text{decenas}}{\Sigma} \frac{p_i \delta_i^{18}O_i}{\Sigma P_i},$$

donde los P_i y $\delta_i^{18}O_i$ corresponden a la precipitación y al contenido isotópico de la i -ésima decena respectivamente. (Los resultados correspondientes a cada decena para alguna estación en particular pueden enviarse a solicitud de los interesados). La columna temperatura media corresponde a la temperatura promedio decenal de los días con precipitación en la decena.

DISCUSION

Una vez efectuados los análisis isotópicos, los cálculos de correlación múltiple sobre los parámetros ambientales de las estaciones meteorológicas mostraron, como era de esperarse, que la temperatura media y como consecuencia el altitud de las estaciones tuviesen los más altos coeficientes de correlación parcial. Para estas dos variables la curva de correlación múltiple fue

$$\delta_p^{18}O = + 0.011 T_M - 0.001 h - 5.20 \text{ (coef. correl. mult. = 0.68)}$$

donde T_M = temperatura media y h = altitud en metros sobre el nivel del mar.

La Fig. 3 presenta los valores $\delta_p^{18}O$ contra la temperatura media, siendo la ecuación $\delta_p^{18}O = 0.193T_M - 971$ (coef. correlación 0.52) la recta que mejor ajusta los datos.

El fraccionamiento de la precipitación de las zonas correspondientes a las estaciones 4,1,16,8 y 7 parece estar determinado básicamente por la temperatura, ya que caen muy cerca de la relación $\delta_p^{18}O - T_{\text{mun}}$

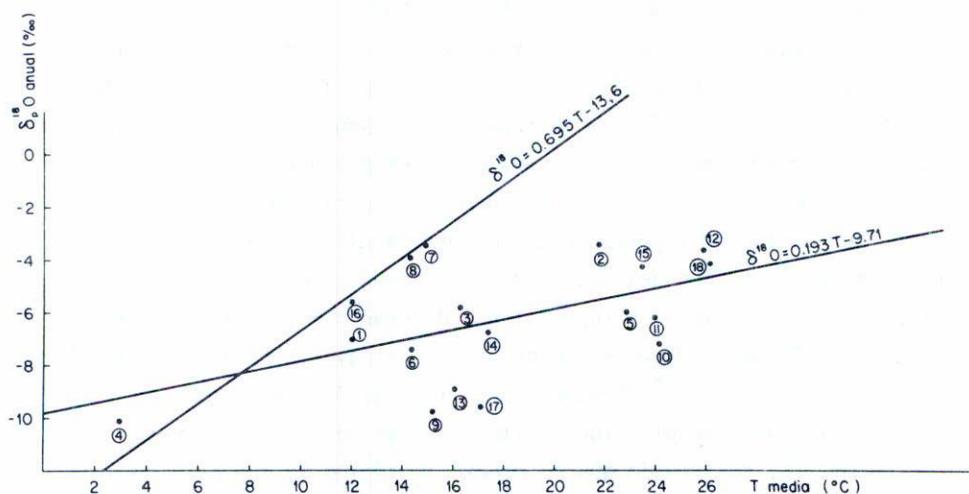


Fig. 3. Gráfica que ilustra la relación $\delta^{18}\text{O}$ anual de la precipitación vs. la temperatura media de los sitios de muestreo (Mayo 1982-Mayo 1983).

dial ($\delta^{18}\text{O} = 0.695T - 13.6$)⁽³⁾. Para el caso de las demás estaciones se sugiere la existencia de otros efectos en el fraccionamiento isotópico de la precipitación, con igual importancia que la temperatura. Ahora bien, por las características del territorio mexicano no podría esperarse que la temperatura fuese el único factor que determinara el fraccionamiento isotópico de la precipitación, como ocurre a mayores latitudes (lo que explicara el bajo coeficiente de correlación $\delta^{18}\text{O}_p$ vs. T), pues, por encontrarse entre los paralelos 14° y 33° de latitud septentrional, dentro del Trópico de Cáncer presenta un clima tropical que muestra en su parte sur características de atmósfera barotrópica propia de bajas latitudes, mientras el resto del país al norte del Trópico de Cáncer se encuentra en la zona de altas presiones subtropicales; si además de estos cambios climáticos originados por la latitud agregamos aquellos debidos a la geografía sumamente abrupta del país, da por resultado una distribución pluvial y térmica muy irregular, tanto en el tiempo como en el espacio, originando desde regiones con abundantes lluvias y oscilaciones tér

micas anuales pequeñas, que podrían presentar en forma relevante el efecto isotópico de cantidad de precipitación, hasta regiones con lluvias escasas y con regímenes pluviales muy variables de un año a otro, así como también regiones con una oscilación térmica anual muy alta, previéndose en estos casos varios efectos isotópicos como son los del tipo continental o fraccionamiento isotópico del agua meteórica en el mismo proceso de precipitación, etc. De esta forma podemos decir que la temperatura parece ser un factor importante que determina el fraccionamiento isotópico de la precipitación del país, pero fuertemente influenciado por características de tipo local y regional que deberán ser estudiadas específicamente en el futuro, pues es de notar que la mayoría de los puntos alejados de la relación $\delta^{18}O$ T mundial, en la Fig. 3, corresponden a zonas con un índice de precipitación máxima probable en 24 horas superiores a los 200 mm⁽¹⁰⁾, sugiriendo que el efecto isotópico de cantidad de precipitación puede ser en algunas zonas muy importante.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecemos al personal de la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos que directa o indirectamente colaboró en la recolección, organización y elaboración de este trabajo, así como a A. Cortes por su ayuda en la preparación de las muestras.

REFERENCIAS

1. I.A.E.A. Environmental Isotope Data. World Survey of Isotope Concentrations in precipitation. Technical report series No. 96, 117, 129, 147, 165, 192,....., Vienna. International Atomic Energy Agency. and Yurtsever Y. and J.R., Gat. Chapter 6 in Stable Isotope Hydrology Technical reports series No. 210. I.A.E.A. Vienna (1981).
2. K. Rozanski, C. Sonntag and K.O. Munnich, *Tellus* 34 (1982) 142-150, y referencias mencionadas en ese artículo.
3. W. Dansgaard, *Tellus*, 16 (1964) 436.
4. J.R. Gat, *Water Resources Res.* 7 (1971) 980.
5. R. Castillo *et al.*, *Rev. Mex. Fis.* 30 (1984) 647; 29 (1983) 509; 29 (1982) 53.
6. A. Issar *et al.*, *Bol. Inv. Geohidral de la U.A. Ch.*, 3 (1983) 1-17,
7. Payne, B.R., Quijano, L. and Latorre, C.J., *Hydrol.* 41 (1979) 201.

8. I.A.E.A. Guidebook on Nuclear Techniques in Hydrology. Tech. report series No. 91. International Atomic Energy Agency. Vienna (1968).
9. Gongiantini, R., *Nature* 271 (1978) 534.
10. S.A.R.H. Plan Nacional Hidráulico. Anexo 2 Comisión del Plan Nacional Hidráulico. México (1981).