

Composición isotópica de la precipitación de la Estación Pergamino, provincia de Buenos Aires. Red Nacional de Colectores Argentina

Cristina Dapeña¹, Silvina I. Portela², Héctor O. Panarello¹, Estela I. Ducós¹

¹ Instituto de Geocronología y Geología Isotópica (INGEIS, CONICET-UBA), Pabellón INGEIS, Ciudad Universitaria, (C1428EHA) Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina

² Estación Experimental Agropecuaria Pergamino, INTA, Ruta 32 km 4,5, 2700 Pergamino, Buenos Aires, Argentina.

dapenna@ingeis.uba.ar

RESUMEN

La composición isotópica media de la precipitación es una característica de cada región y está determinada por los parámetros meteorológicos locales. Teniendo en cuenta que la precipitación puede constituir uno de los principales factores de la recarga de las aguas subterráneas, el conocimiento, la caracterización y registro de su contenido isotópico es fundamental cuando se inicia un estudio hidrológico. La medición y archivo del contenido isotópico de las precipitaciones de la Argentina se lleva a cabo a través de la Red Nacional de Colectores del Instituto de Geocronología y Geología Isotópica (INGEIS, CONICET-UBA). En este trabajo se presentan los resultados obtenidos en la estación Pergamino durante 8 años, del 4/2005 al 12/2012. Esta estación está ubicada en la ciudad de Pergamino y es operada por el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). Se ha obtenido la línea de aguas meteorológicas local, *i.e.*: $\delta^2\text{H} = 8,15 \cdot \delta^{18}\text{O} + 16,1\%$ que permitirá utilizar estos registros como función de entrada a los sistemas hidrológicos de la región.

Palabras clave: isótopos estables, precipitación, Pergamino.

ABSTRACT

The isotope composition of precipitation is a characteristic of each region. It is mainly determined by meteorological local parameters like temperature, relative humidity and amount. Precipitation represents one of the most important factors of groundwater recharge. Therefore, the knowledge and characterization of the isotope content is of great relevance when a hydrological research is initiated. As a result, systematic measurement of isotope content of precipitation in long term records became a useful tool. The measurement and record of the isotope content of the precipitation of Argentina are made by the stations of the National Network of Collectors. This work presents the results obtained at Pergamino Station during 8 years, from 4/2005 to 12/2012. This station is located in Pergamino city and is operated by the "Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA)". The local meteoric water line matches $\delta^2\text{H} = 8,15 \cdot \delta^{18}\text{O} + 16,1\%$, these data can be used like input function to local hydrologic system.

Keywords: stable isotopes, precipitation, Pergamino.

Introducción

La composición isotópica media de la precipitación es una característica de cada región y está determinada principalmente por los parámetros meteorológicos locales (temperatura, humedad relativa, cantidad de precipitación). Teniendo en cuenta que la precipitación puede constituir uno de los principales factores de la recarga de acuíferos, el conocimiento, la caracterización y registro de su contenido isotópico es de importancia fundamental cuando se inicia un estudio hidrológico. La medición y archivo del contenido isotópico de las precipitaciones de la Argentina

se lleva a cabo a través de las estaciones de la Red Nacional de Colectores (Dapeña, 2008; Dapeña y Panarello, 1999, 2002, 2005, 2008).

El objetivo de esta investigación es analizar la composición isotópica de la precipitación y su relación con los parámetros meteorológicos en la Estación Pergamino en el período 04/2005 a 12/2012.

El propósito fundamental del registro de la precipitación en la estación Pergamino así como en otras localidades del país es brindar las bases científicas y técnicas necesarias para la realización de estudios isotópicos complementarios a los llamados métodos

“clásicos” de la hidrogeología con el fin de lograr un manejo adecuado de los recursos hídricos a efectos de preservar su calidad y cantidad.

La Estación Colectora de precipitación Pergamino está situada en la Estación Experimental Agropecuaria (EEA) Pergamino perteneciente al Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), situado en el norte de la Provincia de Buenos Aires, a 33° 56' de Latitud Sur, 60° 33' de Longitud Oeste y 65,5 m sobre el nivel del mar, a 5 km al sur de la ciudad de Pergamino y 226 Km al NO de la ciudad de Buenos Aires (Figura 1). Esta Estación Colectora fue instalada por iniciativa del Instituto de Geocronología y Geología Isotópica (INGEIS, CONICET-UBA) e investigadores de la estación experimental mencionada y comenzó a funcionar en abril de 2005. Su operación y mantenimiento está a cargo de personal del INTA. Los datos de temperatura y cantidad de precipitación son los registrados en la estación meteorológica de la EEA Pergamino.

Pergamino se ubica en la Pampa Ondulada, donde existen una multiplicidad de factores atmosféricos que inciden en el régimen climático tales como la actividad frontal, la Baja del Noroeste argentino, El Niño-Oscilación del Sur (ENSO), la Zona de Convergencia del Atlántico Sur (ZCAS), el anticiclón semipermanente del Atlántico, la Corriente en Chorro en Capas Bajas (LLJ), los Mesosistemas, la Circulación de los Oestes, entre muchos otros (Caffera y Berbery, 2006).



Figura 1. Mapa de ubicación.

Antecedentes

El Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) y la Organización Meteorológica Mundial (OMM) iniciaron en 1961 un proyecto internacional dedicado a la medición del contenido isotópico de la precipitación a nivel mundial. Este proyecto se denominó GNIP (Global Network for Isotopes in Precipitation) y su actividad inicial consistió principalmente en controlar la concentración de tritio en la atmósfera después de las explosiones

nucleares de la posguerra. Su principal objetivo es la evaluación, en escala global, de la distribución espacial y temporal del contenido isotópico de la precipitación a través de la medición de muestras mensuales y su dependencia de los parámetros meteorológicos. Los datos se publican periódicamente en volúmenes técnicos del OIEA y se hallan disponibles en la página de ese Organismo: <http://isohis.iaea.org> (IAEA/WMO, 2002). En este marco, el INGEIS creó una Red Nacional de Colectores (RNC) que integra la GNIP y permite conocer las funciones de entrada (contenido isotópico de la lluvia) en distintas regiones del país que, debido a su compleja morfología y extensión, presenta una gran variedad de climas (IAEA/WMO, 2002; Panarello *et al.*, 1998; Dapeña, 2008; Dapeña y Panarello, 1999, 2002, 2005, 2008).

La composición isotópica del agua de lluvia es buena indicadora del origen del vapor (Dansgaard, 1964; Rozanski *et al.*, 1993). Dansgaard (1964) realizó las primeras investigaciones con datos de la GNIP, sentó las bases para la aplicación de los métodos isotópicos en los estudios hidrogeológicos y explicó las variaciones isotópicas a través de los llamados “efectos”, en términos de relaciones empíricas que involucran parámetros meteorológicos y geográficos. El fraccionamiento isotópico depende de la temperatura (a menor temperatura mayor fraccionamiento) y conjuntamente con la condensación parcial durante las precipitaciones generan los efectos de “altitud”, “continental”, “latitud” y las variaciones estacionales (Dansgaard, 1964). El efecto de “altitud” se debe a que el vapor residual después de la precipitación es más empobrecido que el original. Por lo tanto, a medida que asciende la masa de aire, las precipitaciones serán más livianas, observándose valores más empobrecidos a medida que aumenta la altitud. Una situación similar tiene lugar a medida que la masa de aire avanza tierra adentro, generándose un efecto “continental” con lluvias más ligeras al ir avanzando sobre el continente. El efecto de “latitud” se debe a que el fraccionamiento isotópico producido durante los cambios de estado aumenta con la disminución de la temperatura. Por lo tanto, como al aumentar la latitud disminuye la temperatura, en líneas generales, las precipitaciones en los polos son isotópicamente más empobrecidas que en el Ecuador. Esta dependencia con la temperatura también da origen a variaciones estacionales, siendo las precipitaciones de latitudes medias y altas más empobrecidas en

invierno que en verano. Además, observó que hay una tendencia negativa entre la cantidad de precipitación (“amount effect”) y el contenido isotópico. Por estas razones, los procesos físicos y los fenómenos meteorológicos responsables del transporte del agua en las diferentes fases del ciclo hidrológico producen una caracterización isotópica del agua de acuerdo a su historia, que puede ser de gran utilidad en el estudio de su origen y comportamiento.

El análisis meteorológico de los extensos registros de precipitación en todo el mundo sugiere que la historia meteorológica a largo plazo de las masas de aire (“rainout history”) es el principal factor que gobierna la variabilidad del contenido isotópico de una lluvia a otra, así como la estacionalidad y en las zonas tropicales la cantidad de precipitación. Todas las revisiones e investigaciones posteriores, utilizando la base de datos de la GNIP confirmaron las variaciones espaciales y temporales observadas (Rozanski *et al.*, 1993; Panarello *et al.*, 1998, entre muchos otros).

Desde que Friedman (1953) publicó los primeros datos de la composición isotópica de aguas naturales se pudo observar una clara correlación entre los contenidos de deuterio y oxígeno-18. Esta relación para aguas meteóricas no afectadas por evaporación fue fijada por Craig (1961), cuando al volcar en un gráfico $\delta^2\text{H}$ vs. $\delta^{18}\text{O}$ la composición isotópica de las precipitaciones de todo el mundo, observó que los datos determinaban una banda lineal que describió como: $\delta^2\text{H} = 8\delta^{18}\text{O} + 10\text{‰}$. Dansgaard (1964) utilizó esta correlación lineal para relacionar la composición isotópica de cualquier muestra de agua con la línea de aguas meteóricas y definió el parámetro conocido como exceso de deuterio, *i.e.*: “d” = $\delta^2\text{H} - 8 \cdot \delta^{18}\text{O}$, donde “d” es la ordenada al origen, parámetro inherente al vapor original y es la propiedad más útil para caracterizar el origen del mismo; éste, además permite diferenciar procesos que se desarrollaron en equilibrio isotópico de aquellos que no lo hicieron. En la mayoría de las precipitaciones continentales “d” = +10‰.

Por otro lado, Gonfiantini (1999) confirmó que en cualquier lugar la composición isotópica del hidrógeno y oxígeno en precipitaciones obedece a la relación lineal del tipo: $\delta^2\text{H} = a \cdot \delta^{18}\text{O} + b$, donde: a varía de 6,5 a 8 y b varía de 0 a 30, dependiendo del origen e historia previa de la masa de aire, estación, altitud y latitud, características climáticas, etc. De esta manera se pueden definir líneas meteóricas locales que representan condiciones

meteorológicas locales y que en definitiva, permiten caracterizar la función de entrada en los sistemas hidrológicos en distintas regiones.

Albero y Panarello (1981) estudiaron la relación entre el contenido medio mensual de isótopos estables en aguas meteóricas del Hemisferio Sur, donde describen buena correlación con la temperatura en latitudes altas y medias y con la cantidad de precipitación en latitudes bajas. Dapeña y Panarello (2004; 2007a) y Dapeña (2008) determinaron en la precipitación de la ciudad de Buenos Aires una buena correlación entre la temperatura y la composición isotópica media mensual durante los meses de enero a abril y una inversión de la pendiente con un mayor enriquecimiento isotópico a menor temperatura en los meses más fríos (mayo-agosto). Por otro lado, observaron que los valores más empobrecidos se registran durante los meses de febrero a mayo. Este patrón estacional también se ha observado en las colectoras de la RNC de la región pampeana y en algunos años está marcado por un empobrecimiento isotópico mucho mayor con valores $\delta^{18}\text{O}$ inferiores a -10‰, seguramente vinculados a la procedencia de las masas de aire (Dapeña y Panarello 2007b; Dapeña 2008; Gonzalez *et al.*, 2009).

Materiales y Métodos

La operación de las estaciones de la RNC se basa en la colección de aguas de lluvia en pluviocoletores diseñados para recibir el total mensual de la precipitación, por lo tanto la muestra que se analiza responde a toda la lluvia del mes. Los análisis isotópicos ($\delta^2\text{H}$ y $\delta^{18}\text{O}$) fueron realizados en el laboratorio de Isótopos Estables del INGEIS por espectrometría de masas (IRMS) y por espectroscopía láser. Las muestras por IRMS fueron tratadas siguiendo técnicas convencionales (Coleman *et al.* 1982) y Epstein y Mayeda (1953) y Roether (1970) modificado por Panarello y Parica (1984) a las posibilidades de INGEIS y las relaciones isotópicas se medicieron en un espectrómetro de masas de triple colector, sistema de introducción múltiple, Finnigan MAT Delta S. En el caso de espectroscopía láser se midieron con un equipo Los Gatos Research inc. (OA-ICOS: Off-Axis Integrated Cavity Output Spectroscopy) (Lis *et al.*, 2008).

Los resultados se expresan como δ , definido como: $\delta = 1000(R_s - R_p)/R_p$ ‰, donde, δ : desviación isotópica en ‰; S: muestra; P: referencia internacional; R: relación isotópica ($^2\text{H}/^1\text{H}$, $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$). La referencia utilizada es Vienna Standard Mean Ocean Water (V-SMOW)

(Gonfiantini, 1978). Las incertidumbres son $\pm 0,2\%$ y $\pm 0,3\%$ para $\delta^{18}\text{O}$ por IRMS y espectroscopía laser y $\pm 1,0\%$ para $\delta^2\text{H}$. Por definición, el valor $\delta_{\text{V-SMOW}} = 0 \%$.

Las rectas meteorólicas y el cálculo de los promedios se deben hacer ponderados con la precipitación, con una evaluación cuidadosa de los datos que deben ser depurados para eliminar los valores anómalos y no debe utilizarse una regresión lineal, dado que esta última carece de sentido físico (IAEA, 1992). Por otro lado la Organización Internacional de Energía Atómica (OIEA) sugiere como alternativa la aplicación de regresiones ortogonales (IAEA, 1992). Las regresiones ortogonales tienen en cuenta la incertidumbre de la variable independiente y la dependiente, mientras que la regresión lineal calculada con cuadrados mínimos sólo considera la incertidumbre en la independiente. Los promedios ponderados se calculan considerando cada año individualmente o promediando cada mes para el total del período. Este último sólo es válido para el caso de registros de período largo. Las diferencias entre la media aritmética y la media ponderada generalmente no son significativas en las estaciones con distribución uniforme de la precipitación, sin embargo los promedios ponderados son más apropiados como funciones de entrada en los sistemas hidrológicos (IAEA, 1992).

Datos Meteorológicos

En la Figura 2 se presentan los datos de la precipitación total del mes y temperatura promedio mensual para el período 2005-2012.

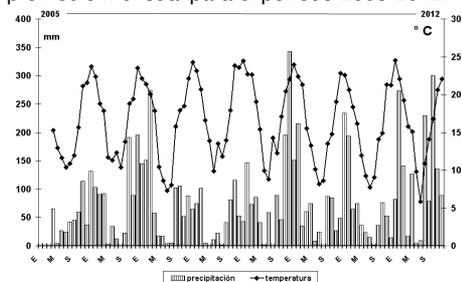


Figura 2. Temperatura promedio mensual y precipitación mensual. Período 2005-2012.

La temperatura tiene comportamiento estacional con valores mínimos en invierno (junio-agosto) y máximos en verano (diciembre-marzo). La temperatura media anual para el período 2005-2012 es de $16,6 \text{ }^\circ\text{C}$ con una media máxima en enero de $24,5 \text{ }^\circ\text{C}$ y una media mínima en julio de

$5,8 \text{ }^\circ\text{C}$. La precipitación media anual total para el período 2005-2012 es de $943,6 \text{ mm}$ y se distribuye a lo largo de todo el año de la siguiente manera: verano (D-E-F): $40,9\%$, primavera (S-O-N): $29,5\%$, otoño (M-A-M): 22% e invierno (J-J-A) $7,7\%$.

Composición Isotópica

Isótopos Estables

En las Figuras 3 a y b se representan los valores mensuales $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ respectivamente en el período 2005-2012. En ambos gráficos se observan claramente amplias variaciones mensuales en la composición isotópica que indican su dependencia con los parámetros meteorológicos.

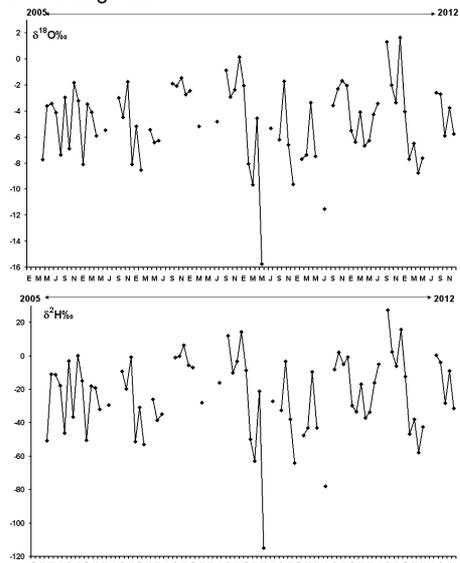


Figura 3 a: $\delta^{18}\text{O}$ (‰) y **b:** $\delta^2\text{H}$ (‰) de la precipitación. Período 2005-2012.

En las Tabla 1 y 2 se presentan los valores promedios ponderados por mes y por año respectivamente y en las Figuras 4 a y b se han graficado los valores máximos y mínimos $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ de cada mes y los promedios ponderados correspondientes. El cálculo de los promedios ponderados se realiza de dos maneras, una considerando el año total (los 12 meses) y la otra tomando cada mes en el período estudiado (i.e. todos los enero y así sucesivamente). Estos promedios cuando los registros son muy extensos son iguales, sin embargo en períodos más cortos son sensibles a las épocas secas y

húmedas típicas de la región pampeana (Tabla 1 y 2).

Tabla 1. Valores promedio ponderados por mes

Mes	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	$\delta^2\text{H}$ (‰)	d (‰)
E	-4.3	-23	11
F	-6.7	-40	14
M	-3.9	-22	9
A	-5.7	-30	15
M	-8.3	-50	16
J	-3.8	-18	13
J	-5.0	-25	14
A	-3.2	-7	19
S	-2.9	-6	18
O	-4.1	-16	17
N	-3.5	-12	16
D	-6.7	-40	13
Promedio	-4.8	-24	15

Tabla 2. Valores promedio ponderados anuales

Año	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	$\delta^2\text{H}$ (‰)	d (‰)
2005	-4.5	-21	15
2006	-5.4	-30	14
2007	-4.5	-21	15
2008	-2.8	-7	15
2009	-7.6	-47	14
2010	-5.5	-28	16
2011	-4.8	-22	16
2012	-5.5	-26	18
Promedio	-5.1	-25	15

En todos los gráficos se observan claramente variaciones en la composición isotópica. Estas variaciones son más pronunciadas en algunos años, sin embargo el promedio ponderado en registros prolongados es un buen (o útil) indicador de la tendencia general. Por ejemplo, el contenido isotópico de 2008 es muy enriquecido y probablemente esté relacionado con sus características secas (573 mm). Además, se observa que el mes más empobrecido resulta ser mayo. Por otro lado, se observa que la composición isotópica en los meses de verano es relativamente muy empobrecida (diciembre y febrero), mientras que en los meses más fríos (junio-septiembre) es más enriquecida, con un máximo en el mes

de septiembre.. Este comportamiento es inverso al esperado, es decir a mayor temperatura mayor enriquecimiento isotópico y a menor temperatura valores más empobrecidos (Rozanski *et al.*, 1993). Probablemente este fenómeno esté vinculado al origen de las masas de aire (lluvias).

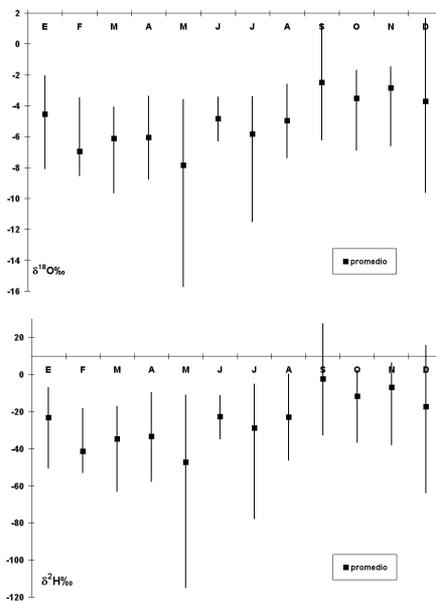


Figura 4 a: $\delta^{18}\text{O}$ (‰) y **b.:** $\delta^2\text{H}$ (‰) valores máximos y mínimos y promedio mensual ponderado. Período 2005-2012.

En la Figura 5, diagrama convencional $\delta^2\text{H}$ vs. $\delta^{18}\text{O}$, se representan los datos de lluvia individuales, observándose que los valores se agrupan y alinean en una recta con una pendiente y ordenada al origen característica que define la recta meteórica local de la Estación Pergamino.

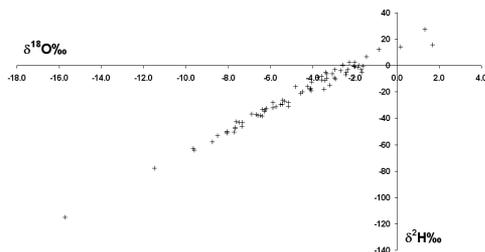


Figura 5. $\delta^{18}\text{O}$ (‰) y $\delta^2\text{H}$ (‰) de las lluvias individuales. Período 2005-2012.

En la Figura 6 se han graficado las precipitaciones individuales conjuntamente con la recta meteórica elaborada a partir de una regresión ortogonal, el promedio ponderado anual y el promedio ponderado por meses. La gran amplitud en los valores de las lluvias individuales revela los distintos orígenes de las masas de aire que producen las precipitaciones, y a su mayor o menor influencia.

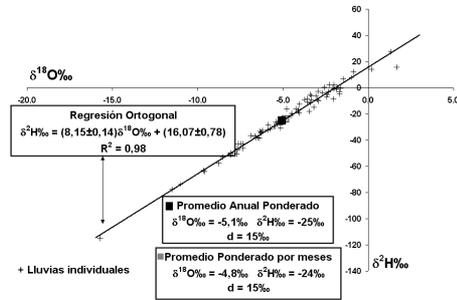


Figura 6. $\delta^{18}\text{O}$ (‰) y $\delta^2\text{H}$ (‰) de la precipitación, recta meteórica local y promedios ponderados. Período 2005-2008

Relación entre Temperatura y ^{18}O ($^{\circ}\text{H}$)

La relación entre la temperatura y los valores isotópicos puede valorarse con cualquiera de los dos isótopos, tanto ^{18}O como ^2H . En este caso se muestra como ejemplo ^{18}O .

En la Figura 7 se presentan los valores $\delta^{18}\text{O}$ (‰) mensuales vs. temperatura promedio mensual ($^{\circ}\text{C}$) correspondientes al período 2005-2012. No se observa correlación y el coeficiente de regresión es casi cero.

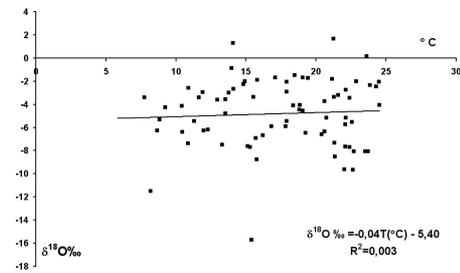


Figura 7. $\delta^{18}\text{O}$ (‰) mensual vs. Temperatura media mensual ($^{\circ}\text{C}$)

Sin embargo, al graficar los mismos valores a lo largo del tiempo se observa que contrariamente a lo esperado, en los meses más fríos (junio-septiembre) se observa una inversión de la pendiente con un mayor enriquecimiento isotópico a menor temperatura y en los meses más cálidos la composición

isotópica es más empobrecida (Figura 8). Probablemente, esto se debe a la multiplicidad de factores atmosféricos que modifican el clima de la región y al registro que aún es insuficiente para realizar pronósticos extendidos.

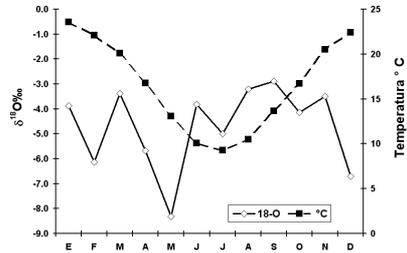


Figura 8. Temperatura promedio y $\delta^{18}\text{O}$ promedio vs. Tiempo

Por otro lado, con las mediciones realizadas hasta la fecha se observa una tendencia positiva en los meses de marzo a mayo, que deberá ser comprobado con mayor número de años de registro. Este patrón estacional también se observa en otras estaciones de la región pampeana (Dapeña, 2008; Dapeña y Panarello, 2007a; Dapeña y Panarello, 2007b).

Relación composición isotópica – Cantidad de precipitación

La relación entre la cantidad de precipitación y los valores isotópicos puede valorarse con cualquiera de los dos isótopos, tanto ^{18}O como ^2H . En este caso se muestra como ejemplo ^{18}O .

En la Figura 9 se grafican los valores $\delta^{18}\text{O}$ (‰) vs. cantidad de precipitación (mm) del total de las muestras y no se observa correlación.

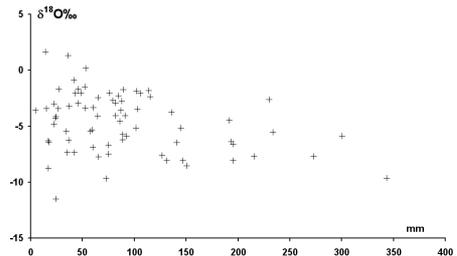


Figura 9. $\delta^{18}\text{O}$ (‰) vs. cantidad de precipitación mensual (mm)

La composición isotópica determinada en las lluvias de las estaciones colectoras se

realiza sobre una muestra conformada con toda la precipitación del mes. Esto probablemente enmascara el efecto de cantidad que está asociado a eventos convectivos intensos que provocan grandes precipitaciones en pocas horas. La identificación de este efecto se deberá realizar a través de la medición de las lluvias diarias.

Exceso deuterio

En la Figura 10 se grafican el exceso de deuterio (d ‰) en función del tiempo para el período estudiado. Los valores d > 10 son típicos de lluvias originadas por vapor reciclado (González et al., 2009). Los valores d entre 0 y 10 indican procesos de evaporación. Los valores d < 0 indican procesos cinéticos de fraccionamiento. En el caso de esta estación Pergamino se observan amplias variaciones con la mayoría de los valores mayores que 10‰. Sobre un total de 74 análisis, se puede apreciar que el 93% de los excesos de deuterio son mayores que 10‰, el 3% son menores y 2% son iguales a 10‰. Estos valores d > 10 característicos de masas de aire originadas por vapor reciclado imprimen una característica distintiva a la precipitación que se ve reflejada en el agua subterránea, como por ejemplo en los acuíferos Puelche y Pampeano estudiados en Pergamino (Dapeña y Panarello, 2004; Galindo et al. 2007).

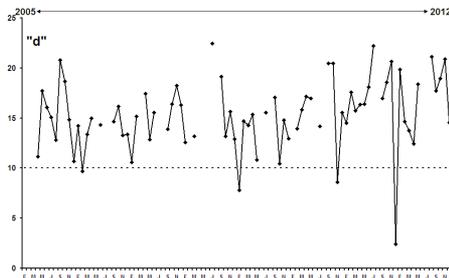


Figura 10. d (‰) de la lluvia. Período 2005-2012.

Conclusiones

La composición isotópica de la precipitación está fuertemente influenciada por los parámetros meteorológicos. Su caracterización y registro es fundamental ya que el agua de lluvia representa la función de entrada para la mayoría de los sistemas hidrológicos.

En la Estación Pergamino se observa que contrariamente a lo esperado en latitudes medias, en los meses más fríos (junio-

septiembre) hay un mayor enriquecimiento isotópico y que en los meses más cálidos la composición isotópica es relativamente más empobrecida. Probablemente, esto es causado por la multiplicidad de factores atmosféricos que modifican el clima de la región y al registro que aún es insuficiente para realizar pronósticos extendidos. Asimismo, se ha obtenido la línea de aguas meteóricas local, i.e. $\delta^2\text{H} = 8,15 \cdot \delta^{18}\text{O} + 16,1\%$, cuyo exceso de deuterio > 10 caracteriza la precipitación de la región.

Finalmente, se destaca la importancia del mantenimiento operativo de la Red Nacional de Colectores de Argentina así como un aumento en el número de estaciones en distintas latitudes y altitudes del país y la necesidad de la toma de conciencia de su trascendencia por parte de las autoridades científico tecnológicas.

Agradecimientos

Los autores agradecen al personal del INTA Pergamino por la colección muestras y la medición de los parámetros meteorológicos así como al personal del laboratorio de Isótopos Estables y la Secretaría del INGEIS.

Referencias

- Albero, M.C. y Panarello, H.O., 1981. Tritio and stable isotopes in precipitation water in South America. *Interamerican Symposium of Isotope Hydrology*, IAEA, Collumbia, 91-109.
- Caffera, R.M. y Berbery, E.H., 2006. Climatología de la Cuenca del Plata. Capítulo II. En *El cambio climático en la Cuenca del Plata* (Barros, V., Clarke, R. y Silva Dias, P. Ed.), CONICET: 19-38.
- Coleman, M.L., Sheperd, T.J., Durham, J.J., Rouse, J.E. y Moore, F.R., 1982. A Rapid and Precise Technique for Reduction of Water With Zinc for Hydrogen Isotope Analysis. *Analytical Chemistry*: 54, 993-995.
- Craig, H., 1961. Isotope variations in meteoric waters. *Science* 133: 1702-1703.
- Dansgaard, W., 1964. Stable isotopes in precipitation. *Tellus* 16: 436-468.
- Dapeña, C., 2008. Isótopos Ambientales livianos: su aplicación en hidrología e hidrogeología. *Tesis Doctoral. Departamento de Ciencias Geológicas, Facultad de Ciencias y Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires*. Tesis 4282. 442p
- Dapeña, C. y Panarello, H.O., 1999. Development of the National Network for Isotopes in Precipitation of Argentina. *II Simposio Sudamericano de Geología Isotópica (IISAGI)*, Córdoba, Actas: 503-507.

- Dapeña, C. y Panarello, H.O., 2002. Red Nacional de Colectores de Isótopos en precipitación en Argentina: su importancia en estudios hidrogeológicos. *Congreso Agua Subterránea y Desarrollo Humano*. Bocanegra, E., Martínez, D., Massone, H. (Eds.), Vol. (CD), 1053-1060.
- Dapeña, C. y Panarello, H.O., 2004. Composición isotópica de la lluvia de Buenos Aires. Su importancia para el estudio de los sistemas hidrológicos pampeanos. *Revista Latino-Americana de Hidrogeología*, n.4, p.17-25, 2004
- Dapeña, C. y Panarello, H.O., 2005. Evolución y estado actual de la Red Nacional de Colectores de Isótopos en Precipitación de la República Argentina. *Actas del XVI Congreso Geológico Argentino*, La Plata, II: 635-642.
- Dapeña, C. y Panarello, H.O., 2007a. Application of environmental isotopes techniques to selected hydrological Pampean Systems. Argentina. *International Symposium on Advances in Isotope Hydrology and its role in Sustainable Water Resources Management (HIS-2007)*, IAEA Proceedings. Vol. 1: 251-260. CN151-90. Vienna, Austria.
- Dapeña, C. y Panarello, H.O., 2007b. Composición isotópica de la precipitación de la Estación Santa Fe. Red Nacional de Colectores. Argentina. *V Congreso Argentino de Hidrogeología*, Actas: 187-198.
- Dapeña, C. y Panarello, H.O., 2008. Isótopos en precipitación en Argentina. Aplicaciones en estudios Hidrológicos e Hidrogeológicos. *IX Congreso Latinoamericano de Hidrología Subterránea*. ALHUSUD Volumen CD T-100. 8p. Quito, Ecuador.
- Epstein, S. y Mayeda, T.K., 1953. Variation of $\delta^{18}\text{O}$ content of water from natural sources. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 4: 213-224
- Friedman, I., 1953. Deuterium content of natural water and other substances. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 4: 89-103.
- Froehlich, K., Gibson, J.J. y Aggarwal, P., 2002. Deuterium excess in precipitation and its climatological significance. En: *Study of environmental change using isotope techniques*, C&S Papers Series 13/P: 54-65. International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria.
- Galindo, G., Sainato, C., Dapeña, C., Fernández-Turiel, J. L., Gimeno, D., Pomposiello, M. C. y Panarello, H. O., 2007. Surface and Groundwater Quality in the Northeastern Region of Buenos Aires Province, Argentina. *Journal of South American Earth Sciences* 23: 336-345.
- Gonfiantini, R., 1978. Standards for stable isotope measurements in natural compounds. *Nature* 271: 534.
- Gonfiantini, R., 1999. Investigating the hydrological Cycle with Environmental Isotopes. Conference. *II South American Symposium on Isotope Geology*, Actas: 537-547.
- González, M., Dapeña, C., Cerne, B., Sanchez-Ccoyllo, O., Freitas, S., Silva Dias, P.L. y Panarello, H., 2009. Verification of the geographical origin of modeled air-mass trajectories by means of the isotope composition of rainwater during the SALLJEX experiment. *Environmental Fluid Mechanisms*. Vol 9 (4): 389-407.
- IAEA, 1992. Statistical Treatment of Data on Environmental Isotopes in Precipitation. *Technical Reports Series* N^o. 331, Vienna, 781p.
- IAEA/WMO, 2002. Global Network for Isotopes in Precipitation. The GNIP Database. <http://isohis.iaea.org>.
- Lis, G., Wassenaar, L.I. y Hendry, M.J. 2008. High-Precision Laser Spectroscopy D/H and $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ measurements of Microliter Natural Water Samples. *Analytical Chemistry*. 80, 287-293.
- Panarello, H.O. y Parica, C.A., 1984. Isótopos del oxígeno en hidrogeología e hidrología. Primeros valores en aguas de lluvia de Buenos Aires. *Asociación Geológica Argentina, Revista* 39 (1-2): 3-11.
- Panarello, H.O., Araguas-Araguas, L., Gerardo Abaya, J. y Gibert, E., 1998. The role of the "Global Network for Isotopes in precipitation, GNIP, in hydrological and hydroclimatic studies. Key note. *Actas del International Symposium on Isotope Techniques in the Study of Past and Current Environmental Changes in the Hydrosphere and the Atmosphere*. International Atomic Energy Agency, Vienna, pp. 79-91.
- Roether, W., 1970. Water CO₂ exchange set-up for the routine oxygen-18 assay of natural water. *International Journal Applied Rad. Isotopes*, 21: 379-387.
- Rozanski, K., Araguas-Araguas, L. y Gonfiantini, R., 1993. Isotopic patterns in modern global precipitation. *Climate Change in Continental Isotopic Records*, *Geophysical Monograph* 78, American Geophysical Union, 1-36.