

Datación de agua subterránea en el Acuífero Pampeano del sudeste bonaerense y su significado ambiental

Daniel E. Martínez^(1,2), Orlando M. Quiroz Londoño^(1,2), Melisa Glok Gallí^(1,2), Sebastián Grondona^(1,2), Héctor E. Massone⁽¹⁾

¹Instituto de Geología de Costas y del Cuaternario, U.N de Mar del Plata. Dean Funes 3350. CC 722 (7600) Mar del Plata. TE 0223 4754060.

²Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras. CONICET-UNMDP. Dean Funes 3350, (7600) Mar del Plata.

Mail de contacto: demarti@mdp.edu.ar

RESUMEN

El acuífero Pampeano abarca una gran extensión y es un recurso de agua de extrema importancia. La determinación del tiempo de residencia o edad aparente del agua es una herramienta moderna de gran utilidad. Si bien se asume que el mismo es portador de aguas jóvenes, el estudio de los tiempos de residencia es poco conocido. Diferentes técnicas de datación de aguas jóvenes se aplican en la provincia de Buenos Aires. Las edades aparentes determinadas con CFCs y la relación $^3\text{H}/^3\text{He}$ dan tiempos de tránsito de entre 8 y más de 50 años, evidenciando la mezcla de aguas modernas y antiguas. Aplicado a la gestión del recurso, estas edades definirían algunos sectores de vulnerabilidad alta y otros en donde la calidad no es afectada antrópicamente de manera directa, pero sí por el tiempo de contacto agua-matriz del acuífero. Las tasas de renovación hacia niveles profundos contribuyen a definir una mayor peligrosidad de sobreexplotación. Palabras clave: edad del agua, acuífero Pampeano, trazadores ambientales.

ABSTRACT

The Pampeano Aquifer covers extended areas representing a water resource of great importance. The estimation of residence time or water apparent age is a modern and useful tool. Even though it is assumed to contain young waters, residence times are not well known. Different tracer techniques used for young waters are applied in Buenos Aires Province. Apparent ages obtained from CFCs and $^3\text{H}/^3\text{He}$ result in transit times between 8 and 50 years, showing the mixing of young and old groundwater. In the context of water resources management, these ages would define high aquifer vulnerability in some areas, while in other sectors water quality is not directly affected by anthropogenic activities but it could be affected by large water-rock interaction times. Water renewal rates through deeper levels imply over-exploitation risks.

Keywords: water age, Pampeano Aquifer, environmental tracers

Introducción

La edad del agua en un acuífero se define como el tiempo transcurrido desde su aislamiento de la atmósfera hasta que la misma se descarga naturalmente o es captada en una perforación, lo que es equivalente al tiempo de la recarga (Plummer y Busenberg, 2006). El tiempo medio de residencia es el tiempo de tránsito promedio integrado de las líneas de flujo captadas, y expresa la relación entre el volumen total de agua en un acuífero y el caudal de descarga del sistema.

El término "agua joven" se usa en general para el agua recargada aproximadamente en los últimos 50 años, una escala de tiempo definida por un pequeño número de trazadores que indican, en general, que el agua ha sido potencialmente impactada por contaminación

antropogénica (Plummer, 2005). Entre las técnicas de datación de aguas jóvenes se reconocen tres grupos: 1) medición de la actividad de un radionucleido individual de origen atmosférico como ^3H , ^{85}Kr , ^{39}Ar ; 2) el método de $^3\text{H}/^3\text{He}$, medición del isótopo padre y su hija; 3) métodos basados en la medición de gases atmosféricos de origen antropogénico, tales como los gases clorofluorocarbonados (CFCs) y el hexafluoruro de azufre (SF_6). Una fracción joven de una muestra de agua contiene una concentración detectable de alguno de esos trazadores. En general, se define como "moderna" al agua recargada con posterioridad a 1940, o mezclas con una fracción post-1940, y que contiene concentraciones detectables de ^3H , CFCs o una actividad de ^{14}C mayor de 100 pMC; u otras sustancias de origen

subterráneas y superficiales, en sectores del sudeste de la llanura pampeana bonaerense, en las cuencas del río Quequén Grande, de la laguna Mar Chiquita y del Río Salado (Fig. 1). El objetivo del mismo, es dar un orden de magnitud de edades de aguas jóvenes en el acuífero Pampeano, y a la vez, evaluar la aplicación de varios de los diferentes métodos disponibles.

Materiales y métodos

De los métodos disponibles para la datación de aguas jóvenes, en este trabajo se utilizan los siguientes: la determinación de ^3H y su uso en términos relativos, sin poder especificar de manera precisa edades; la determinación de las concentraciones de CFCs en aguas; y la obtención de la edad a partir de muestreo de gases nobles y de la determinación del ^3He de origen tritigénico ($^3\text{He}_{\text{trit}}$) para la aplicación de la relación $^3\text{H}/^3\text{He}$.

El $^3\text{He}_{\text{trit}}$ proviene de la desintegración radiactiva del ^3H , según la ecuación:



Según el tiempo de decaimiento, el tiempo transcurrido puede determinarse a partir de la ecuación:

$$C = C_0 e^{-\lambda t} \quad (2)$$

donde C es la concentración de ^3H medida en el agua, C_0 es la concentración inicial en la recarga y λ la constante de decaimiento. La concentración de ^3H en la atmósfera alcanzó un máximo muy fuerte en los años 60 como consecuencia de ensayos nucleares, lo que constituye una señal interesante para la determinación de edades. Aguas con valores de tritio próximos a cero se interpretan como recargadas con anterioridad a 1960.

La aplicación de la ecuación (2) requiere conocer C_0 , es decir, la función de entrada de ^3H , lo cual es sumamente difícil en muchas localidades debido a la carencia de registros históricos de ^3H en la precipitación. Por ese motivo y según se desprende de la ecuación (2), es posible obtener la edad del agua midiendo la hija del proceso de desintegración, el ^3He , lográndose entonces recalcular el ^3H inicial y obtener la edad aparente a partir de la ecuación (Maloszweski y Zuber, 1982):

$$T = \lambda^{-1} \ln(^3\text{He}_{\text{trit}}/^3\text{H} + 1) \quad (3)$$

donde $^3\text{He}_{\text{trit}}$ es el ^3He de origen tritigénico, o sea, el debido a la desintegración del ^3H . También existe un aporte de ^3He atmosférico y litogénico (de rocas del manto) que debe ser corregido, para lo cual se utilizan las mediciones de ^{20}Ne y la razón $^4\text{He}/^{20}\text{Ne}$ en el primer caso, y la razón $^3\text{He}/^4\text{He}$ para el de origen litogénico (Heilweil et al., 2009).

Estos métodos no se aplican de manera sistemática en la presente contribución, sino que se realiza una compilación de diferentes resultados en distintos lugares (Fig. 1). En la cuenca del río Quequén Grande, en la llanura interserrana bonaerense, se cuenta con mediciones de ^3H y de concentraciones de CFCs en tres pozos de agua subterránea, tres muestras de agua superficial, (una en el curso principal y dos en tributarios, en condiciones de flujo base), y una muestra en un manantial. En la cuenca de la laguna Mar Chiquita, se analiza la información de dataciones con CFCs y $^3\text{H}/^3\text{He}$ a tres profundidades diferentes en piezómetros multinivel (Fig. 2), localizados en INTA Balcarce (al noroeste de la ciudad de Balcarce) y en la localidad de Vivoratá (Fig. 1). Se determinaron CFCs, ^3H y $^3\text{H}/^3\text{He}$; contándose con determinaciones de gases clorofluorocarbonados para cuatro muestras tomadas en molinos. En la cuenca del Salado, se determinó ^3H y la edad según $^3\text{H}/^3\text{He}$ a dos profundidades diferentes en un piezómetro multinivel (Fig. 2).

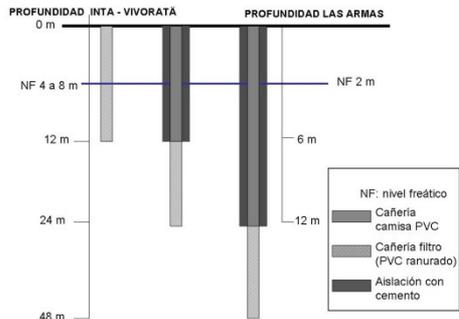


Figura 2. Diseño de los piezómetros multinivel utilizados.

Las bases conceptuales de las dataciones con ^3H pueden encontrarse en Clark y Fritz (1997). La determinación de edades con CFCs puede verse detalladamente en Cook y Solomon (1997), mientras que para el uso de gases nobles, en especial de $^3\text{H}/^3\text{He}$, puede consultarse en Solomon y Cook (2000), Stute y Schlosser (2000), y como antecedentes en nuestro país a Martínez et al. (2012). Las

muestras para determinación de ^3H fueron tomadas en botellas de plástico de 1 L, y enviadas para su determinación por centelleo líquido al Instituto Nacional de Geocronología y Geología Isotópica (INGEIS) en el caso de las muestras de la cuenca del Río Quequén Grande, y al Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) en el caso de las cuencas de la laguna Mar Chiquita y del Río Salado. Las muestras para determinación de CFCs se tomaron según las técnicas descriptas en Busemberg et al. (2006), por triplicado, empleando botellas de vidrio color ámbar de 250 ml. Su análisis se realizó por cromatografía gaseosa con detector de captura de electrones (GC-ECD) en la Universidad de Utah (EE.UU.). Las muestras gases nobles, a partir de la cual se determina el $^3\text{He}_{\text{tr}}$, se tomaron en tubos de cobre y fueron analizadas por espectrometría de masas en el OIEA.

El error en las determinaciones de ^3H es de 0,5 UT. Los errores en la determinación de gases nobles son muy bajos (<1%) por lo que los errores en las edades provienen más del de ^3H y otras incertidumbres. En el caso de los CFCs existe un error analítico en la determinación, y uno más importante atribuible a la estimación de la temperatura de recarga. La suma de estos errores se traduce en errores de 1 a 2 años.

Resultados

A partir de los resultados obtenidos en diferentes muestreos y análisis de laboratorio, se discuten en este trabajo dataciones obtenidas con al menos uno de los trazadores, en 24 muestras tomadas en la llanura pampeana bonaerense. Las mismas comprenden, de manera sintética, tres tipos de muestras: aquellas correspondientes a pozos someros (de 12 a 24 m), de uso rural o domiciliario; muestras de piezómetros multinivel especialmente perforados para muestreo; y muestras asimiladas a la integración de descarga de aguas subterráneas, que corresponden a una muestra de un manantial y de agua superficial en condiciones de predominio de flujo base. Los resultados se sintetizan en la Tabla 1.

En la cuenca del Río Quequén Grande, en la llanura interserrana, las tres muestras de agua subterránea tomadas tiene valores de ^3H de 1,6, 1,8, y 1,9 UT, correspondiendo respectivamente a pozos de 100 m (G117), 80 m (G220) y 24 m de profundidad (G156). En estos pozos se realizaron además mediciones de

concentraciones de CFCs, siendo los valores muy bajos en los dos más profundos (G117 y G120), en donde no se cuenta con detección de CFC-12, y que se corresponden con aguas recargadas alrededor de 1950, es decir, aguas sub-modernas. En el pozo G156, las edades obtenidas con CFC-12 y CFC-113 se corresponden con aguas recargadas en 1975 y 1982, respectivamente. Más allá de esta diferencia de siete años entre los dos trazadores, sobre lo cual se volverá a hacer referencia más adelante, una clara diferencia de edad aparente se observa entre los dos pozos profundos con aguas sub-modernas y el pozo somero de aguas modernas según estos trazadores. No existen diferencias significativas en los valores de ^3H , por lo que en este caso las dataciones con CFCs parecen manifestar mejor la distribución de edades aparentes en profundidad.

En la cuenca del Río Salado, sólo se cuenta con dos muestras de piezómetros de diferentes profundidades, especialmente perforados en la Colonia Ortiz Basualdo, localidad de Las Armas (partido de Ayacucho) (Fig. 1). Se realizó la determinación de ^3H y, utilizando tubos de cobre, la determinación de gases nobles. En el pozo de 6 m de profundidad (G880) se determinaron 1,2 UT y una edad aparente según $^3\text{H}/^3\text{He}$ de 23,9 años; y en el de 12 m de profundidad (G881), 1,4 UT y una edad aparente según $^3\text{H}/^3\text{He}$ de 39,3 años. Las unidades de ^3H y las edades según $^3\text{H}/^3\text{He}$ son coherentes y corresponden a aguas sub-modernas.

Los otros dos grupos de piezómetros situados en INTA Balcarce y en la localidad de Vivotatá, incluyen pozos a tres profundidades diferentes. Se cuenta con resultados incompletos correspondientes a dos campañas, en las que se realizaron dataciones con ^3H y CFCs en la primera (noviembre de 2011) y con ^3H y $^3\text{H}/^3\text{He}$ en la segunda (mayo de 2012).

En los piezómetros localizados en INTA Balcarce, se determinaron valores de ^3H decrecientes con la profundidad, que varían desde 2,1 UT a 0,7 UT en la primer campaña, y de 1,4 a 1,2 UT en la segunda. Para el pozo de 20 m de profundidad (G792), se determinó a partir de CFCs una edad de recarga correspondiente al año 1979,5, y un año de recarga en 1968 para el pozo de 30 m de profundidad. En el muestreo realizado en mayo de 2012, se pudo determinar con $^3\text{H}/^3\text{He}$ para el pozo de 10 m (G793) una edad aparente de 8,6 años; y para el de 30 m (G794) una de 24,4 años.

En los piezómetros de Vivoratá se cuenta con datos de los tres pozos en cada muestreo. En el realizado en noviembre de 2011, los valores de ^3H decrecen con la profundidad. Se determinaron 1,3 UT a los 12 m (G786), 0,0 UT a los 24 m (G787) y 0,5 UT a los 48 m (G788); mientras que en la segunda campaña (mayo de 2012), los valores fueron de 3,3, 0,9 y 0,8 UT, a los 12, 24 y 48 m, respectivamente. En ambos casos, los valores indican aguas sub-modernas en superficie, y una mezcla de aguas sub-modernas y antiguas en profundidad. Las dataciones con CFCs en noviembre de 2011,

dan como resultado, de menor a mayor profundidad, aguas recargadas alrededor de 1966 (a los 12 m), 1953 (a los 24 m), y mayor a 1950 (a los 48 m). Las edades aparentes según $^3\text{H}/^3\text{He}$ en el segundo muestreo dan 37,6 años, 100,4 años y 58,8 años, a los 12, 24 y 48 m, respectivamente. Si bien existen algunas diferencias entre los valores de ^3H en ambos muestreos, las dataciones realizadas por dos métodos diferentes sí son bastante coincidentes en general, con la excepción del punto intermedio G787, que da un valor de 100,4 años con $^3\text{H}/^3\text{He}$.

Tabla 1- Resultados obtenidos. (M: muestra, GW: agua subterránea, Sup: agua superficial, Mnt: manantial, Lag: laguna, RQG: río Quequen Grande, MCh: Mar Chiquita)

M	TIPO	Prof. pozo (m)	^3H UT	AÑO DE REGARGA SEGÚN CFCs			$^3\text{H}/^3\text{He}$ años	FECHA	CCA.	Lugar
				CFC11	CFC12	CFC-113				
G117	GW	100	1,6	1952	-	1943	NA	Mayo 08	RQG	Est, El Moro
G220	GW	80	1,8	1952	-	1943	NA	Mayo 08	RQG	Pte Blanco
G156	GW	24	1,9	-	1975	1982	0,3	Mayo 08	RQG	Lobería
STC	Sup		3,1	1985	1983	1989,5	2,9	Mayo 08	RQG	Aº Tamang.
SSB	Sup	-	5,2	1978	1976	1986	2,2	Mayo 08	RQG	Arroyo Seco
SPT	Sup	-	3,5	1972,5	1974,5	1980	2,8	Mayo 08	RQG	RQG
WLS	Lag	-	6,1	1989	1985,5	-	0,0	Mayo 08	RQG	La Salada
MTB	Mnt	-	-	1968	1974	1978		Mayo 08	RQG	PBlanco
G786	GW	12	3,3	-	-	-	37,6	Mayo 12	MCh	Vivoratá
G787	GW	24	0,9	-	-	-	100,4	Mayo 12	MCh	Vivoratá
G788	GW	48	0,8	-	-	-	58,8	Mayo 12	MCh	Vivoratá
G793	GW	10	1,4	-	-	-	8,6	Mayo 12	MCh	INTA
G794	GW	30	1,2	-	-	-	24,4	Mayo 12	MCh	INTA
G793	GW	10	2,1	-	-	-	-	Nov 11	MCh	INTA
G792	GW	20	1,3	1975,5	1979,5	1980,5	-	Nov 11	MCh	INTA
G794	GW	30	0,7	1968	1972	1978,5	-	Nov 11	MCh	INTA
G786	GW	12	1,3	1966,5	1965,5	1982,5	-	Nov 11	MCh	Vivoratá
G787	GW	24	0,0	1953,5	1951,5	1958	-	Nov 11	MCh	Vivoratá
G788	GW	48	0,5	-	-	-	-	Nov 11	MCh	Vivoratá
G447	GW	12	-	1963,5	1967,5	1964,5	-	Mayo 11	MCh	Molino
G791	GW	12	-	1965	1967	1969,5	-	Mayo 11	MCh	Molino
G778	GW	12	-	1957,5	1956	1957,5	-	Mayo 11	MCh	Molino
G880	GW	6	1,2	-	-	-	23,9	Mayo 12	Salado	Las Armas
G881	GW	12	1,4	-	-	-	39,3	Mayo 12	Salado	Las Armas

De todas formas, lo que se observa es que en este sector, para muestras tomadas a alrededor de 40 m de profundidad, existe un fuerte componente de aguas viejas que resulta en edades de más de 60 años. Así, la muestra tomada a 24 m en el segundo muestreo da una edad muy vieja, coherente con el valor de 0,0 UT obtenido en noviembre de 2011.

Las muestras tomadas en molinos en la cuenca de Mar Chiquita arrojaron edades aparentes con CFCs correspondientes a una recarga ocurrida alrededor de 1967 en dos casos (G447 y G791) y 1956 en el restante (G778). En estas muestras, la similitud de las edades aparentes para los tres CFCs analizados es buena.

Discusión

Un aspecto destacable es la detección de ^3H en casi todas las muestras, desde un valor muy bajo de 0,02 (G787) a un máximo de 6,1 UT (WLS). Como se ha mencionado, la presencia de ^3H indica el aporte de aguas jóvenes. El rango de variación es muy amplio, desde un valor de 0 UT a valores equiparables a la precipitación moderna, de 6,1 UT. De manera cualitativa, en regiones costeras y de bajas latitudes, valores $<0,8$ UT se asimilan a aguas recargadas antes de 1952 (submodernas), entre 0,8 y 2 UT a mezclas de aguas sub-modernas con aguas de recarga reciente, y de 2 a 8 UT a aguas modernas, recargadas en los últimos 5 a 10 años (Clark y Fritz, 1997). Desde esta óptica, resulta evidente que las aguas superficiales muestreadas (STC, SSB, SPT y WLS) corresponderían a aguas modernas, o mezclas de aguas modernas con aguas más antiguas. En el caso de las aguas subterráneas, en cambio, todos los valores se encuentran entre 0 y 2 UT, indicando una mezcla entre aguas sub-modernas y de recarga reciente. Las dataciones no son coherentes entre los valores obtenidos con CFCs y los correspondientes a $^3\text{H}/^3\text{He}$, lo cual fue adjudicado a algún probable error en la determinación de ^3H (Martínez et al, 2009).

En la totalidad de los casos de los pozos someros correspondientes a las tres cuencas en estudio (6 a 24 m de profundidad), y también de las descargas en agua superficial, los años de recarga obtenidas con CFCs están en el orden de los 30 a 40 años. Las muestras de la laguna La Salada (WLS) y de un manantial (MTB), localizadas en la cuenca del río Quequén, dan edades aparentes más modernas, cuyos años de recarga son 1985,5 y 1974, respectivamente.

Las muestras tomadas en molinos en la cuenca de Mar Chiquita dan aguas recargadas entre 1956 y 1967, lo que equivale a edades más antiguas. Además, las aguas datadas en los piezómetros someros de la cuenca del Salado con $^3\text{H}/^3\text{He}$, dan edades en años que también corresponden a una recarga en la década del 70. De esta manera, en el acuífero Pampeano del sudeste bonaerense, las aguas someras corresponden a aguas jóvenes con edades aparentes de entre 25 y 40 años, con buena coherencia en los métodos de datación y valores de tritio mayores a 1,5 UT.

En los piezómetros multinivel de Vivotatá e INTA Balcarce, se ha observado un aumento creciente de la edad con la profundidad, tal como es de esperarse; a la vez que aparecen bien marcadas las diferencias de edades entre los piezómetros ubicados en la zona de recarga (INTA) y los de la zona de tránsito/descarga (Vivotatá). En los primeros, se obtuvieron edades aparentes según $^3\text{H}/^3\text{He}$ de 8,6 años en el pozo más somero, y de 24,4 en el más profundo; mientras que en Vivotatá las edades fueron 27,6 años en el somero y 58,8 años en el profundo.

Resulta notable el hecho de que en la datación de mayo de 2012 con $^3\text{H}/^3\text{He}$ en Vivotatá, la muestra del piezómetro de 24 m tenga una edad mucho mayor que la del de 48 m. Esto no se observa tan claramente en las edades aparentes con CFCs de noviembre de 2011, en las que tanto la muestra intermedia como la de profundidad son cercanas a 1950, pero la medición de ^3H en el pozo de 24 m intermedio da un valor de 0,0 UT, lo cual es también coherente con la determinación de los gases nobles genera un interrogante acerca de esta inversión de edades.

Entre los modelos simplificados de distribución de edades (Solomon et al., 2006), el del acuífero Pampeano puede asimilarse al de un acuífero libre con espesor constante. La distribución de edades es creciente en profundidad y según isócronas, aproximadamente horizontales y paralelas, tal como podría deducirse de los datos presentados en estas cuencas.

Un análisis más detallado de las dataciones con CFCs, permite observar que en una buena parte de los casos la edad aparente del CFC-113 es mayor que la correspondiente a las edades aparentes coincidentes de CFC-11 y CFC-12 (Tabla 1). Esto, si bien podría asignarse a una contaminación con CFC-113, también puede deberse a que, como consecuencia de las diferentes funciones de entrada de los tres CFCs, mezclas de aguas de

diferentes edades resultan en tiempos de tránsito diferentes. Mezclas de aguas jóvenes con aguas pre-1940 resultan en patrones como los observados en estas muestras, con una edad más reciente en el CFC-113. Las muestras de molinos no presentan este efecto de mezcla.

A partir de las edades obtenidas, algunas implicancias en la gestión del recurso aparecen con claridad en aspectos cuantitativos y cualitativos. Entre los primeros, el hecho de haber determinado en los niveles más profundos edades del orden de 50 años, y en muchos casos mezclas con aguas más antiguas, constituye un llamado de atención acerca de los peligros de sobreexplotación del recurso ante escenarios de riego intensivo. La presencia de ^3H en casi todas las muestras indica siempre alguna proporción de agua moderna.

Entre los aspectos cualitativos, puede mencionarse que, en general, el hecho de que las aguas tengan edades de varias décadas permite suponer que estarán libres de contaminantes antrópicos no persistentes. Sin embargo, la comprobación de que en muchos casos se trata de mezclas de agua, implica que puede esperarse encontrar a estos contaminantes en diferentes proporciones. El pozo más somero de los piezómetros de INTA Balcarce, con una edad de 8 años, confirma que en las zonas de recarga en ambiente de lomas, existe una alta posibilidad de que la carga contaminante potencial esté presente, lo cual incrementa la peligrosidad de contaminación del agua subterránea.

Finalmente, las edades determinadas en la pampa depirmida, en la cuenca de la laguna Mar Chiquita, en posiciones distales de la recarga, son de muchos años según lo que podría suponerse en pozos someros. Sin embargo, estas edades son coherentes con los modelos conceptuales clásicos que asignan la alta salinidad del sector al elevado tiempo de contacto con el acuífero, dada la muy lenta movilidad del agua subterránea como consecuencia de los bajos gradientes (Orsolini et al, 2000).

Conclusiones

El acuífero Pampeano es un acuífero libre y somero, para el cual pueden esperarse aguas jóvenes en general. La presencia de ^3H en la mayor parte de las muestras analizadas en el mismo así parece indicarlo. Sin embargo, no se contaba hasta la fecha con dataciones precisas.

El uso de trazadores múltiples como ^3H , CFCs y $^3\text{H}/^3\text{He}$, ha permitido obtener edades variables entre 8 y más de 50 años, en las

cuencas del río Quequén Grande, la laguna costera de Mar Chiquita y el río Salado, en la provincia de Buenos Aires. Si bien las edades entre los diferentes trazadores no son concordantes exactamente, en muchos casos sí resultan coherentes con mezclas de diferentes proporciones de aguas modernas y submodernas o antiguas.

Valores de aguas viejas a profundidades mayores de 40 metros o aún en pozos someros en áreas extremadamente planas, indican una alerta acerca de la velocidad de renovación del recurso y de su posible explotación intensiva. Por otra parte, la edad aparente contribuye claramente en la determinación de áreas de mayor peligrosidad de contaminación, y sectores con limitaciones cualitativas de origen natural. Por todo ello, este tipo de determinaciones, si bien actualmente tienen limitaciones de tecnologías y costos, tendrán seguramente un rol importante en las evaluaciones de sustentabilidad del recurso hídrico subterráneo.

La aplicación conjunta de los trazadores $^3\text{H}/^3\text{He}$ y CFCs para la determinación de tiempos de residencia en el acuífero Pampeano, resulta de utilidad práctica y presenta nuevos desafíos sobre los modelos existentes.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por los proyectos PICT11-0768 del FONCYT y el PIP CONICET 11220110100392. Las dataciones con $^3\text{H}/^3\text{He}$ fueron posibles gracias al OIEA.

Referencias

- Busenberg, E., Plummer, L.N., Cook, P.G., Solomon, D.K., Han, L.N., Gröning, M. and Oster, H. 2006. Sampling and analytical methods. En: *Use of chlorofluorocarbons in hydrology. A guidebook*. Págs. 199- 227. International Atomic Energy Agency, Viena.
- Clark, I. and Fritz, P. 1997. Environmental Isotopes in Hydrogeology. Lewis Publishers. Boca Raton, E.E.U.U., 328 pp.
- Cook, P.G. and Solomon, D.K. 1997. Recent advances in dating groundwater: Chlorofluorocarbons, $^3\text{H}/^3\text{He}$ and ^{85}Kr . *Journal of Hydrology*. Vol 191: 245-265.
- Dapeña, C. and Panarello, H.O. 1999. "Development of the National Network for Isotopes in Precipitation of Argentina". En II South American Symposium on Isotope Geology, 503-508.
- 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.
- Heilweil V., Solomon D.K., Gingerich S.B. and Verstraeten I.M. 2009. Oxygen, hydrogen, and helium isotopes for investigating groundwater systems of the Cape Verde Islands, West Africa. *Hydrogeology Journal*, Vol. 17 (5): 1157-1174.
- Levin, M., Albero, M.C., Panarello, H.O., Hernandez, M., Lorenzo, F. y Kersfeld, A., 1988. Uso de Isótopos ambientales (18O, 2H y 3H) para la determinación de recarga y trazado de procesos hidrodinámicos en un sector costero de la provincia de Buenos Aires. En: Proc. Segundas Jornadas Geológicas Bonaerenses, Actas: 599-607
- Maloszewski, P. and Zuber, A. 1982. Determining the turnover time of groundwater systems with the aid of environmental tracers, I-models and their applicability. *Journal of Hydrology*, 240:187-205.
- Martínez, D.E., Solomon, K., Dapeña, C., Quiroz Londoño, M. y Massone H. 2009. Técnicas modernas en la determinación de la edad del agua: acuífero Pampeano, cuenca del río Quequén Grande (Buenos Aires). *Revista Latinoamericana de Hidrología Subterránea*. Vol. 7: 83-90.
- Martínez, D.E., Solomon, K., Quiroz Londoño, O.M., Dapeña, C., Massone, H.E., Benavente, M.A., Panarello, H. y Grondona, S. 2010. Tiempo Medio de residencia en aguas superficiales de la llanura pampeana: aplicación de isótopos del agua, gases nobles y CFCs en el río Quequén Grande. En *Varni, Entraigas y Vives Editores "Hacia una gestión integrada de los recursos hídricos en zonas de llanura"*, Vol. I: pp 241-248. Edit. Martín ISBN 978-987-543-392-2.
- Martínez, D.E., Solomon, D.K. y Quiroz Londoño, O.M. 2012. Gases nobles disueltos en aguas naturales. Su aplicación en estudios hidrológicos y primeros datos en Argentina. *Segunda Reunión Argentina de Geoquímica de Superficie*. Libro de Resúmenes expandidos: 139-142. ISBN: 978-978-1620-86-9.
- Orsolini H, Zimmermann E, Basile P (2000) Hidrología: Procesos y Métodos. ISBN N 950-673-254-4. Págs. 320.
- Panarello, H.O. and Albero, M.C. 1983. Tritium, oxygen-18 and deuterium contents of Buenos Aires rainwater". *Actas del Coloquio Internacional de Grandes Llanuras*, Olavarría, Provincia de Buenos Aires, UNESCO, Vol. II, pp. 889-898, 1983.
- 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., M. Levin, R. De Felipi, F. Lorenzo, J. Paladino Y A. Vizcaino, 1993. "Uso de isótopos ambientales (3H, 2H y 18O) para la determinación de recarga y trazado de procesos hidrodinámicos en un sector costero de la provincia de Buenos Aires. II Parte. Asociación Geológica Argentina, Revista, 48 (3-4) 147-153.
- Panarello H.O., Dapeña C. y Auge M., 1995. Mecanismos de salinización del agua subterránea de La Plata, Buenos Aires, Argentina: su interpretación por medio de los isótopos ambientales. IAEA-TECDOC-835. Estudios de hidrología isotópica en América Latina 1994, pp. 13-28.
- Plummer, L.N. 2005. Dating of young groundwater. En Aggarwal P., Gat J.R. y Froenlich F.O. Editores: *Isotopes in the Water Cycle*. Springer, Dordrecht, Holanda. 193-218.
- Sala, J. M., 1975. "Recursos Hídricos (Especial Mención de las Aguas Subterráneas)", Relatorio VI Con. Geol. Arg., 169-193.
- Plummer N. and Busemberg, E. 2006. Chlorofluorocarbons in aquatic environments. En Use of Chlorofluorocarbons in Hydrology. A Guidebook. *International Atomic Energy Agency, Viena*. Págs. 1-8.
- Schultz C. y Castro E, 2003. Estudio planificación y explotación del agua subterránea. Una trilogía utópica en la República Argentina.. III Congreso Argentino de Hidrogeología. Actas I: 219-225. Rosario, Argentina.
- Seiler, K.P. and Lindner, W., 1995. Near-surface and deep groundwaters. *Journal of Hydrology*, 165: 33-44.
- Silva Busso, A. y Santa Cruz, J., 2005. Distribución de elementos traza en las aguas subterráneas del Partido de Escobar, Buenos Aires, Argentina. *Ecología Austral*. Vol 15 (1): 31-47.
- Solomon, D. K. and Cook P.G., 2000. ³H and ³He, in *Environmental Tracers in Subsurface Hydrology*, Cook and Herzeg, eds., Kluwer Academic Press, 397-424.
- Solomon D.K., Cook P.G. and Plumer N., 2006. Models of groundwater ages and residence times. En *Use of Chlorofluorocarbons in Hydrology. A Guidebook. International Atomic Energy Agency, Viena*. Págs. 73-88.
- Stute M. and Schlosser P., 2000. Atmospheric noble gases. Capítulo 11: 349-437. En Cook P. y Herzeg A. Eds. *Environmental Tracers in Subsurface Hydrology*. Kluwer Academic Publishers.