

Relaciones entre aguas superficiales y subterráneas en la región hídrica de los Esteros del Iberá (Corrientes, Argentina)

Lucía Ortega¹, Marisol Manzano¹, Leticia Rodríguez², Luis Vives³, Andrés Mira³, Javier Heredia⁴, Luis Araguás⁵ y Pradeep Aggarwal⁵

¹ Escuela de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos y de Ingeniería de Minas, Universidad Politécnica de Cartagena. Paseo Alfonso XIII 52, (30203) Cartagena, España.

² Universidad Nacional del Litoral, Centro de Estudios Hidroambientales. Ciudad Universitaria CC 217 Ruta Nacional 168 Km 472.4, (3000) Santa Fe, Argentina.

³ Instituto de Hidrología de Llanuras "Dr. Eduardo Usunoff", UNCPBA-CIC. República de Italia 780, (7300) Azul, Buenos Aires, Argentina.

⁴ Instituto Geológico y Minero de España, Calle Ríos Rosas, 23, (28003) Madrid, España.

⁵ International Atomic Energy Agency, Vienna International Centre, PO Box 100, (1400) Vienna, Austria.

Mail de contacto: lucia.ortega@upct.es

RESUMEN

El ²²²Rn se ha utilizado, con otros trazadores ambientales, para estudiar la descarga de aguas subterráneas a cuerpos de agua superficial en los Esteros de Iberá y su entorno hasta el río Uruguay. Se realizó un estudio químico regional y mediciones de ²²²Rn en lagunas, ríos y pozos. Todas las aguas superficiales y muchas subterráneas estudiadas tienen características químicas e isotópicas coherentes con la lluvia. En cambio las actividades de ²²²Rn medidas en aguas subterráneas y superficiales son significativamente diferentes. Los resultados no sugieren la existencia de descarga de agua subterránea en los lugares medidos, al menos en magnitud notable. No obstante, algunas medidas locales relativamente altas apuntan cierta contribución de agua subterránea: en el río Uruguay al S de Misiones y al S de la laguna Iberá. Una segunda medición en ésta última no reprodujo los valores de la primera vez, debido a que la detección de la descarga depende de muchos factores.

Palabras clave: Iberá, esteros, río, descarga de agua subterránea, ²²²Rn.

ABSTRACT

²²²Rn activity was used, with other environmental tracers, to assess the existence of groundwater discharge to surface water bodies in the Esteros de Iberá and its surrounding towards the Uruguay River. A regional chemical study has been performed together with ²²²Rn measurements in lagoons, rivers, and wells. All surface water samples and many groundwater samples are poorly mineralized and their chemical and isotope properties are coherent with rain water. ²²²Rn activities measured in groundwater and surface water are significantly different. The results do not suggest the existence of generalized and relevant groundwater discharge to the measures surface waters. However, some local measurements with relatively high activities could indicate groundwater discharge: this is the case of the Uruguay River in S Misiones and at the S of the Iberá lagoon. A second measurement in the last place did not reproduce the first results, but detecting groundwater discharge depends on many factors.

Keywords: Iberá, shallow lagoons, river, groundwater discharge, ²²²Rn.

Introducción

Los estudios hidrogeológicos, hidrogeoquímicos e isotópicos llevados a cabo en el marco del Proyecto para la protección ambiental y el desarrollo sostenible del Sistema Acuífero Guaraní (Proyecto SAG) generaron un modelo conceptual de funcionamiento del SAG que tenía algunas incertidumbres significativas en el sector sur del área de estudio. Algunas de

las más relevantes se refieren a la posible descarga de agua subterránea de flujos regionales del SAG a cuerpos superficiales, como el río Paraná, río Uruguay o los Esteros de Iberá (Rodríguez et al., 2009).

De hecho, el modelo hidrogeológico conceptual tradicional sugiere que los Esteros de Iberá reciben descarga de agua subterránea, incluyendo aportes de las formaciones profundas del SAG (Araújo et al.,

1999; Campos, 2000; Vives et al., 2009). Los estudios en marcha de los autores de este trabajo han confirmado la existencia de agua del SAG en pozos ubicados en el borde oriental de los Esteros de Iberá (Manzano et al., 2013). Por el contrario, el modelo hidrológico superficial conceptual sostiene que el agua de los esterios es escorrentía de la lluvia (Canziani et al., 2003).

Este estudio tiene como objetivo identificar la posible existencia de descarga de aguas subterráneas a los Esteros del Iberá y su entorno hasta el río Uruguay, utilizando para ello trazadores químicos ambientales tales como la actividad de ^{222}Rn medida in situ en aguas superficiales y subterráneas y el valor de la relación Cl/Br. Este trabajo se enmarca dentro del proyecto MICINN REDESAC del Ministerio de Economía y Competitividad de España, cuyo objetivo es el estudio de procesos de recarga y descarga de acuíferos mediante trazadores ambientales.

Características de la zona de estudio

De forma operativa, y a efectos exclusivos de este trabajo, se ha denominado a la zona de estudio "región hídrica del Iberá (RHI)". La RHI comprende los Esteros del Iberá más los ríos y arroyos del entorno sur y oriental de los Esteros: ríos Corriente, Miriñay, Aguapey y Uruguay.

Los Esteros del Iberá se ubican sobre un abanico aluvial de edad pliocena a actual. La geología regional se conoce relativamente bien (Herbst y Santa Cruz, 1995; Chebli et al., 1999) pero no la de detalle, sobre todo su extensión en profundidad. El sustrato de la RHI consiste en arenas finas a gruesas, limos y arcillas de las formaciones Ituzaingó, Toropí-Yupoí y San Guillermo. Al N y NE de la RHI afloran basaltos de la Fm Serra Geral (Cretácico) y arenas de las formaciones que los recubren. Estudios recientes (Mira et al., 2013) indican que el conjunto de las formaciones está afectado por grandes fallas verticales, lo que posibilitaría la conexión hidráulica entre distintas formaciones. Una descripción más detallada de la geología de la zona de estudio se puede ver en el trabajo mencionado.

El agua de la RHI fluye de NE a SW y es drenada por un solo cauce, el río Corriente, afluente del Paraná. Dentro de la RHI y al E de los Esteros nacen los ríos Miriñay y Aguapey, que desembocan en el río Uruguay. La cuenca del río Miriñay posee una superficie de 10.290 km² (SsRH, 2004) e incluye arroyos y bañados. Su cauce principal tiene una longitud de 217 km. Se desarrolla en sentido dominante N-S desde

su lugar de nacimiento, justo al S de la Laguna de Iberá (junto a la población Colonia Pellegrini) hasta el río Uruguay al norte de la ciudad de Monte Caseros. Por el NE linda con la cuenca del río Aguapey, por el E y SE con las cuencas de otros arroyos menores y por el O linda con la cuenca del río Corriente. La cuenca del río Aguapey, al E de la del Miriñay, ocupa una superficie de 7.970 km² (SsRH, 2004) y se sitúa al NE de la provincia de Corrientes, actuando como límite natural entre la meseta de Misiones y la llanura mesopotámica. El río Aguapey nace de esterios y bañados próximos a la localidad de San Carlos, cerca de la Provincia de Misiones, y desemboca en el río Uruguay a la altura de la localidad de Alvear. La cuenca limita al N con el río Paraná, al O con las cuencas de los ríos Miriñay y otros arroyos menores, al S por el río Uruguay y al E con algunos arroyos menores que también desembocan en el río Uruguay. El cauce principal tiene unos 310 km. La cuenca se caracteriza por una amplia llanura de inundación sobre suelo de baja permeable que, junto a su escasa pendiente (< 1 %), favorece la retención del agua superficial. La cuenca del río Corriente se sitúa en el centro-SW de la provincia de Corrientes. Nace en la laguna Itaí, al SW de los Esteros del Iberá, y desemboca en el río Paraná en Esquina (Corrientes).

Fundamentos de aplicación de los trazadores utilizados

Actividad de ^{222}Rn

El ^{222}Rn es un gas noble radioactivo de origen litogénico, con un periodo de semidesintegración de 3,82 días, que se utiliza como trazador de la presencia de descargas de agua subterránea a cuerpos de agua superficial. Esto es debido a que presenta usualmente una actividad de ^{222}Rn de 2 a 4 órdenes de magnitud mayor en agua subterránea que en agua superficial (Burnett et al., 2010). Tras una descarga de agua subterránea se produce un incremento inmediato de la concentración de ^{222}Rn en el cuerpo de agua receptor, pero la volatilidad del Rn hace que dicha actividad disminuya más o menos rápidamente, en función de otros factores. Si la magnitud de la descarga es pequeña y el espesor de la lámina de agua también, la descarga puede no ser detectable.

El uso del ^{222}Rn en hidrología como trazador isotópico ambiental ha incrementado en los últimos años como resultado de la automatización de las técnicas de medición en agua, que permiten obtener resultados

confiables en unos minutos (Burnett et al., 2001; Dulaiova et al., 2005; Burnett et al., 2010).

Relación Cl/Br

El valor del cociente Cl/Br (molar) y su relación con el contenido de Cl de un agua se usa en el ámbito de la hidrogeología para identificar el origen y la evolución de la salinidad de las aguas subterráneas y superficiales (Alcalá y Custodio, 2008). El Cl⁻ y el Br⁻ son iones ubicuos en todas las aguas naturales y tienen un comportamiento conservativo debido a su carácter hidrófilo y su pequeño tamaño iónico. Ninguno de los dos se intercambia iónicamente a bajas temperaturas, ni se adsorbe a la superficie de minerales y, debido a su elevada solubilidad, solo forman minerales en condiciones de evaporación extremas. Por ello, los procesos físico-químicos que tiene lugar en el terreno (disolución, evaporación, transpiración, etc.) pueden cambiar su concentración absoluta pero no varían significativamente la relación molar Cl/Br (R). En la literatura científica se puede encontrar una buena recopilación de los valores de R para distintos tipos de aguas con distinto origen de salinidad (Davis et al., 1998; Custodio y Herrera, 2000; Alcalá y Custodio, 2008). En este estudio se utiliza como referencia la realizada por Alcalá y Custodio (2008). Algunos valores de R necesarios para la interpretación de los resultados son: (i) En el agua marina no contaminada se tiene $R = 655 \pm 4$, por lo que aguas con adición o presencia de agua de mar tienen valores de R similares a ese; (ii) la lluvia continental tiene valores de R variables entre 50

y 650; (iii) las aguas residuales urbanas y las agropecuarias pueden tener valores de $R > 1000$ por adición de NaCl; las aguas de origen agrícola tienen valores de $R \ll 1000$.

Metodología

Para conocer la posible descarga de aguas subterráneas a las masas de agua superficial de la RHI (esteros, lagunas, arroyos y ríos) se ha realizado un estudio hidroquímico e isotópico regional utilizado como trazadores los componentes mayoritarios del agua y algunos minoritarios, entre ellos la relación Cl/Br y, especialmente, la actividad de ²²²Rn. Se han estudiado 86 análisis químicos de aguas superficiales y subterráneas tomadas entre agosto y septiembre de los años 2009, 2010 y 2011 y en julio de 2012. En todas las muestras se midió en campo la temperatura del aire y el agua, la conductividad eléctrica, el pH y la alcalinidad; en 51 de ellas (23 sondeos y pozos, 21 ríos y arroyos y 7 lagunas) se midió también la actividad de ²²²Rn. Los análisis químicos de los componentes mayoritarios y minoritarios (HCO₃⁻, CO₃²⁻, SO₄²⁻, Cl⁻, F⁻, NO₃⁻, NO₂⁻, Na⁺, K⁺, Ca²⁺ y Mg²⁺) se realizaron en el laboratorio del Instituto de Hidrología de Llanuras (IHLLA; Azul, Argentina), y los componentes minoritarios (Br y relación Cl/Br) en el laboratorio del Instituto Geológico y Minero de España (IGME, Madrid, España). La Tabla 1 resume las técnicas empleadas y sus límites de detección. En la Fig. 1 se muestra la ubicación de todos los puntos muestreados.

Tabla 1. Límites de detección de los elementos químicos analizados en aguas y su técnica de análisis (EAA= Espectrofotometría de absorción atómica; VAB= Valoración ácido-base; EUV= Espectrómetro UV-visible; Cl= Cromatografía iónica; EM= Espectrometría de masas).

Elemento	Na ⁺ mg/L	K ⁺ mg/L	Ca ⁺⁺ mg/L	Mg ⁺⁺ mg/L	HCO ₃ ⁻ mg/L	CO ₃ ²⁻ mg/L	SO ₄ ²⁻ mg/L	NO ₃ ⁻ mg/L	Cl ⁻ mg/L	Cl ⁻ mg/L	Br ⁻ mg/L	F ⁻ mg/L	²²² Rn pCi·L ⁻¹
Técnica de análisis	E.A.A.	E.A.A.	E.A.A.	E.A.A.	V.A.B	V.A.B	E.U.V.	E.U.V.	V.A.B	C.I.	C.I.	E.U.V.	E.M.
Laboratorio	IHLLA	IHLLA	IHLLA	IHLLA	IHLLA	IHLLA	IHLLA	IHLLA	IHLLA	IGME	IGME	IHLLA	RAD7
Límite de detección	0,4	0,13	0,5	2,5	20	20	1	0,4	<2	0,01	0,02	0,1	0,2

Las medidas ²²²Rn en sondeos, ríos y lagunas se llevaron a cabo in situ utilizando un espectrómetro de masas portátil RAD7 (Durrige Co.), diseñado para medir continuamente la actividad de radón en aire. Este detector de estado sólido consiste en un material semiconductor de silicio que convierte la radiación de partículas alfa (α) directamente en una señal eléctrica. Para la extracción del gas ²²²Rn se usó un cilindro intercambiador, RADAQUA, que se conecta al espectrómetro

formando un circuito cerrado de aire. Este método permite hacer un seguimiento continuo de la concentración de ²²²Rn en agua. El límite de respuesta teórico es de aproximadamente 10-15 minutos para una respuesta del 95 %, impuesto por el periodo de semidesintegración del ²¹⁸Po, que es el descendiente de ²²²Rn, de 3,05 min. El límite de respuesta es sensible a la concentración de ²²²Rn disponible, disminuyendo cuanto mayor sea la actividad de ²²²Rn presente (Burnett et al., 2001). Otros

factores tales como el caudal de agua que entra al intercambiador, la velocidad de transferencia de radón desde el agua al aire, que a su vez depende del tamaño de la gota de agua y la eficiencia de aireación, y/o el volumen del bucle de aire pueden influenciar este límite de respuesta (Dulaiova et al., 2005). Cada medición puntual tuvo una duración de 1 h, periodo que se considera adecuado para obtener varias medidas con un margen de

incertidumbre pequeño. Burnett et al. (2001) describen tiempos de medición similares en cuerpos de agua superficial con concentraciones similares de ^{222}Rn que la zona de estudio aquí descrita. La relación $^{222}\text{Rn}_{\text{aire}} / ^{222}\text{Rn}_{\text{agua}}$, con un valor de 4:1, es función de la temperatura, la cual fue medida en el mismo cilindro intercambiador y registrada durante la medición.

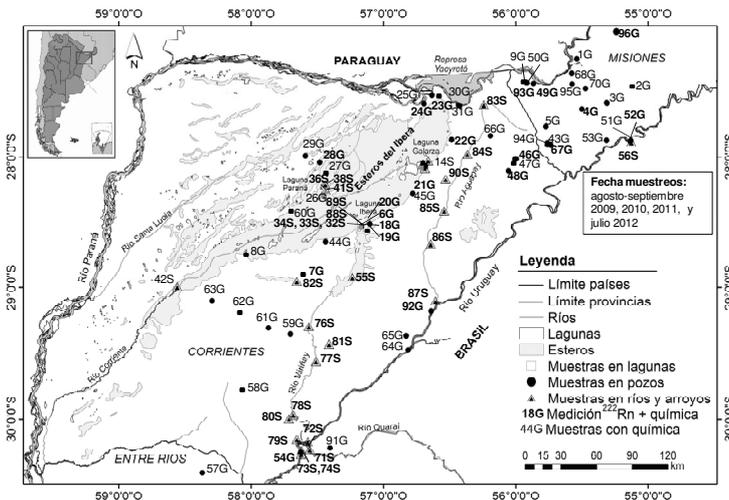


Figura 1. Localización de los puntos de agua superficial y subterránea muestreados en las campañas de 2009, 2010, 2011 y 2012.

Se realizaron 21 mediciones puntuales de ^{222}Rn en los ríos Aguapey, Miriñay, Uruguay y Quarai (Brasil), y en los arroyos Pared, Ayú Grande y Cruzú Cuatí, pertenecientes a la cuenca del río Miriñay. También se realizaron medidas puntuales en las lagunas de Galarza, Luna, Iberá y Paraná, así como en los arroyos Yacaré y Carambola, todos dentro de los Esteros del Iberá. Muchas mediciones no se registraron ya que el objetivo solo era detectar la presencia de actividades significativas. La mayoría de las mediciones se realizaron desde una barca situada en el punto medio del cauce utilizando para la extracción del agua una bomba sumergible ($Q=0,3 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$) que se situaba a 50 cm aproximadamente del lecho del río, arroyo o laguna. En situaciones donde no fue posible utilizar una barca se midió desde una orilla, situando la bomba lo más lejos posible de la misma. La mayoría de las mediciones en lagunas se realizaron siempre desde una barca en un punto fijo, con excepción de la laguna Paraná, donde se midió a lo largo de un transecto desde la isla central de la laguna

Paraná hacia el N, hasta la desembocadura del arroyo Carambola. En pozos y sondeos la medición de ^{222}Rn se realizó utilizando una manguera conectada al pozo o sondeo y regulando el caudal.

Resultados

Posibles relaciones entre aguas superficiales y subterráneas según la relación Cl/Br

La Fig. 2 muestra los valores de Cl/Br frente al contenido de Cl⁻ en las aguas subterráneas y superficiales muestreadas. La mayoría de ellas están muy poco mineralizadas. Según Alcalá y Custodio (2008), las aguas subterráneas con valores de Cl/Br menores al valor marino y de $\text{Cl} < 10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ suelen proceder de la recarga de lluvias continentales. En general cabe esperar que sean de recarga reciente, con poco tiempo de permanencia en el terreno, pero también pueden ser aguas antiguas en terrenos sin fuentes de Cl. Las aguas de ríos y lagunas dentro de ese mismo rango corresponderían

también a lluvias de zonas continentales. Las aguas con valores de $R > 800$ y $1 < CI < 40 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (la mayoría de río y algunas de pozo) están contaminadas por aguas residuales de origen urbano o ganadero, tal como sugieren sus contenidos de NO_3 . Las muestras de los pozos 6G, 19G, 20G y 54G son las únicas que reciben aportes de aguas más salinas que la lluvia local actual; son aguas antiguas (con poco ^{14}C , ver Manzano et al., 2013) que se atribuyen a formaciones profundas.

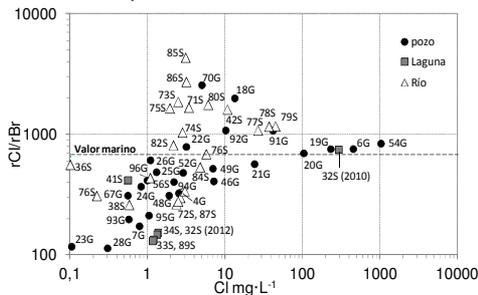


Figura 2. Relación Cl/Br (molar) en función de la concentración de Cl^- (mg/L) en las aguas medidas en pozos, lagunas y ríos.

En general no se aprecia una relación clara entre las aguas subterráneas y las superficiales, excepto en el caso de la muestra 32S. Ésta es agua del sector S de la laguna de Iberá, tomada en septiembre de 2010. Presenta una concentración de Cl^- y un valor de R muy similares a los de los pozos 20G, 19G, y 6G, que se encuentran relativamente cerca. No obstante, como se ve más adelante, la relación Cl/Br no es el único trazador que sugiere la presencia de agua subterránea en esa zona en el momento del muestreo en 2010, por tanto no se puede descartar que en ese momento hubiese descarga significativa de agua subterránea a la laguna.

Posibles relaciones entre aguas superficiales y subterráneas según el ^{222}Rn

En la Figura 3 se observan los valores de actividad de ^{222}Rn medidos en función de la concentración de Cl^- . Esta figura permite hacer una primera caracterización de la actividad de ^{222}Rn típica de las aguas superficiales y subterráneas del SHI.

Aguas superficiales

Las actividades de ^{222}Rn en las aguas superficiales de la RHI (Tabla 2) son en general muy bajas, con un rango de valores entre $0,1$ y $5 \text{ pCi}\cdot\text{L}^{-1}$, incluyendo la incertidumbre. Son aguas de baja mineralización con concentraciones de

Cl $^-$ de entre 1 y $10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. En general, las aguas de río medidas tienen actividades de ^{222}Rn ligeramente mayores que las aguas de las lagunas. La mayoría de las aguas de río presentan actividades entre $0,2$ y $5 \text{ pCi}\cdot\text{L}^{-1}$, con un rango de Cl $^-$ entre $0,5$ y $6 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$.

Tabla 2. Actividades de ^{222}Rn en los ríos y lagunas medidos.

Ident.	Fecha	Nombre	Tipo	^{222}Rn	
				$\text{pCi}\cdot\text{L}^{-1}$	2σ $\text{pCi}\cdot\text{L}^{-1}$
32S	27/09/2010	Lag. Iberá S, Centro	Laguna	26,9	2,32
32S	11/07/2012	Lag. Iberá S, Centro	Laguna	0,1	0,69
33S	11/07/2012	Lag. Iberá S, Borde S	Laguna	0,15	0,74
34S	11/07/2012	Lag. Ibera S, Puente	Laguna	0,36	0,85
36S	30/09/2010	Ay. Carambola, Centro	Arroyo	0,81	1,49
38S	02/10/2010	Ay. Carambola, Recodo.	Arroyo	0,6	0,83
41S	02/10/2010	Lag. Paraná S	Laguna	0,4	0,25
55S	28/08/2011	Río Miriñay, puente ruta 114	Río	4,94	1,7
56S	28/08/2011	Río Uruguay, San Javier	Río	21,04	7,87
71S	06/07/2012	Río Quaraí	Río	2,59	1,54
72S	07/07/2012	Río Uruguay Aguas Arriba	Río	0,31	0,96
73S	07/07/2012	Río Uruguay Medio	Río	0,14	0,69
74S	07/07/2012	Río Uruguay Aguas Abajo	Río	0,52	0,89
75S	10/07/2012	Miriñay 2	Río	0,73	1,05
76S	09/07/2012	Miriñay 3	Río	2,9	1,67
77S	08/07/2012	Miriñay 4	Río	2,14	1,46
78S	08/07/2012	Miriñay 5	Río	6,88	2,38
79S	07/07/2012	Miriñay 6	Río	0,14	0,67
80S	08/07/2012	Ayo. Curuzú Cuatiá	Arroyo	7,57	2,5
81S	09/07/2012	Ayo. Pared	Arroyo	2,57	1,65
82S	09/07/2012	Ayo. Ayuí Grande	Arroyo	3,95	1,95
83S	15/07/2012	Aguapey 1	Río	2,87	1,65
84S	15/07/2012	Aguapey 2	Río	0,15	0,7
85S	12/07/2012	Aguapey 3	Río	1,54	1,35
86S	12/07/2012	Aguapey 4	Río	1,4	1,23
87S	10/07/2012	Aguapey 6	Río	0,32	0,77
88S	11/07/2012	Lag. Ibera N, Borde S	Laguna	2,77	1,21
89S	11/07/2012	Lag. Iberá S, Borde NE	Laguna	0,05	0,65

Sin embargo, se han encontrado algunos lugares con indicios de aporte de agua subterránea: (i) en el río Uruguay a la altura de San Javier, S de la provincia de Misiones (muestra 56S), con una actividad de ^{222}Rn de $21,04 \pm 7,87 \text{ pCi}\cdot\text{L}^{-1}$, muy similar a la muestra 26G de agua subterránea; (ii) en la cuenca baja del río Miriñay (muestra 78S), una zona de afloramientos de basaltos, con una actividad de ^{222}Rn de $6,88 \pm 2,38 \text{ Bq}\cdot\text{L}^{-1}$ y una concentración de Cl^- de $36,76 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; (iii) en el arroyo Curuzú Cuatiá (muestra 80S), a unos 5 km al O de la muestra anterior, con una actividad de ^{222}Rn de $7,57 \pm 2,50 \text{ pCi}\cdot\text{L}^{-1}$ y una concentración de Cl^- un orden de magnitud menor que en el río Miriñay ($6,01 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ de Cl^-); y (iv) también en el río Miriñay (muestra 55S), a unos 40 km aguas abajo de su nacimiento, con una actividad de ^{222}Rn $4,94 \pm 1,70 \text{ pCi}\cdot\text{L}^{-1}$ y una concentración de Cl^- de $0,22 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$.

Los valores de actividad medidos en lagunas (Tabla 2) tienen un rango entre $0,05 \pm 0,6$ y $0,4 \pm 0,25 \text{ pCi}\cdot\text{L}^{-1}$, excepto dos muestras que presentan valores algo mayores, la 32S (en

2010) y la 88S (en 2012). En septiembre de 2010 se midió una actividad de $26,90 \pm 2,32$ pCi·L⁻¹ en el sector S de la laguna Iberá (muestra 32S (2010)) en Fig. 3). Con el objetivo de contrastar este resultado, en julio de 2012 se realizó otra medición en el mismo lugar pero el resultado fue mucho menor ($0,10 \pm 0,69$ pCi·L⁻¹) que en la campaña de 2010 (muestra 32S (2012)) en Fig. 3). Los resultados de ²²²Rn en cada una de las dos campañas son coherentes con lo que indica la relación Cl/Br en cada una de ellas, por lo que ambos resultados parecen correctos. La muestra 88S corresponde a un punto ubicado en el NE del sector S de la laguna Iberá, y en él se midió una actividad de $2,77 \pm 1,21$ pCi·L⁻¹ en julio de 2012 (muestra 88S en Fig. 3).

Aguas subterráneas

Las aguas subterráneas medidas presentan actividades de ²²²Rn de uno a dos órdenes de magnitud mayor que las aguas superficiales. Los resultados están resumidos en la Tabla 3.

Tabla 3. Actividades de ²²²Rn en las aguas subterráneas medidas.

Ident.	Fecha	Nombre	Tipo	Prof. Pozo (m)	²²² Rn	
					pCi·L ⁻¹	2σ pCi·L ⁻¹
4G	01/09/2011	Cerro Azul	Pozo	535	62	5
6G	27/09/2010	Tanque Col. Pellegrini	Pozo	96	895	-
7G	03/09/2011	Ea. El Timbó	Pozo	-	490	17
18G	28/09/2010	R. Tribbia	Pozo	12	252	5
19G	29/09/2010	Ea. San Antonio	Pozo	98	161	4
20G	29/09/2010	Ea. El Estribo (ex LMSA)	Pozo	100	122	3
21G	29/09/2010	Est. San Juan Corá 1	Pozo	60-80	268	5
22G	30/09/2010	Est. Tavé Retá	Pozo	120	213	3
23G	01/10/2010	EFA Nº 28	Pozo	25	717	9
24G	01/10/2010	Sol del Lago, embotelladora	Pozo	120	103	7
25G	01/10/2010	Res. Natural Sta. María	Pozo	-	1	0
26G	02/10/2010	Ea. San Alonso, Ianque	Pozo	20	19	1
28G	02/10/2010	Ea. Sta. Sixta, molino	Pozo	32	32	2
44G	28/08/2011	Ea. El Socorro	Pozo	95	362	14
46G	30/08/2011	Virasoro 1.1	Pozo	60	237	11
48G	30/08/2011	Ea. Las Marías	Pozo	100	246	11
49G	30/08/2011	Villa Bonita	Pozo	490	211	10
52G	31/08/2011	San Javier 2	Pozo	97	325	13
54G	26/08/2011	Monte Caseros	Pozo	1035	64	6
67G	13/07/2012	Expoerba	Pozo	90	55	5
92G	10/07/2012	COVESA La Cruz (6)	Pozo	80	59	22
93G	13/07/2012	SAMSA A4 San Lorenzo	Pozo	420	276	11
96G	14/07/2012	Jardín América	Pozo	528	196	9

La mayoría de las aguas tienen una baja mineralización y contenidos de Cl⁻ menores a 10 mg/L L⁻¹, excepto algunas muestras que pueden llegar a alcanzar los 1000 mg·L⁻¹. Las aguas subterráneas poco mineralizadas proceden de pozos con distintas profundidades (entre 25 y 500 m) y tienen una actividad de ²²²Rn media de 250 pCi·L⁻¹, aunque hay excepciones. El pozo 23G, situado al N de los Esteros, alcanza los 717 ± 9 pCi·L⁻¹. Se trata de un pozo somero (25 m) que perfora la FM Ituzaingó, a unos 5 km al S del embalse de Yaciretá. El pozo 7G, situado en la Estancia El Timbó, al S de los Esteros del Iberá, tiene una actividad de ²²²Rn de 490 ± 17 pCi·L⁻¹. Se trata también de un pozo somero

perforado en la FM Serra Geral. Muy por debajo de la media se encuentran los pozos 25G y 26G, con actividades de ²²²Rn inferiores a los 20 pCi·L⁻¹, valores más característicos de aguas superficiales. Las actividades de ²²²Rn varían con la concentración de Cl⁻, pero no parece existir una correlación clara.

Características químicas de las aguas superficiales

La Fig. 4 muestra las características químicas de las aguas superficiales muestreadas. A la izquierda están representados los 8 análisis realizados en septiembre de 2010 de la laguna Paraná y en julio de 2012 de la laguna Iberá. Todas las aguas están muy poco mineralizadas. Las aguas de la laguna Paraná (39S, 40S y 41S) son de tipo bicarbonatado cálcico, mientras que las aguas de la laguna Iberá (32S, 33S, 34S, 88S y 89S) son bicarbonatadas sódicas. Aunque las bajas mineralizaciones sugieren un origen principalmente pluvial, no se puede descartar la descarga de agua subterránea somera o incluso de flujos hipodérmicos.

En los ríos (Fig. 4, derecha) las aguas están algo más mineralizadas, pero aún presentan concentraciones bajas. El río Miriñay tiene aguas de tipo bicarbonatado cálcico-sódico en la cuenca alta y media, mientras que las tres muestras de la cuenca baja (77S, 78S y 79S) son de tipo clorurado sódico y bastante más mineralizadas que el resto, lo cual puede deberse a contaminación por aguas residuales de origen ganadero. El río Aguapey tiene aguas de tipo bicarbonatado cálcico-sódico muy poco mineralizadas.

En el río Uruguay la muestra tomada en 2011 (56S, en San Javier) está muy poco mineralizada, con concentraciones de Cl⁻ por debajo del límite de detección (ver Tabla 1). Las muestras del río Uruguay en la zona de Monte Caseros (SE de Corrientes) presentan también una mineralización muy baja. Estas muestras se tomaron en julio de 2012, y aunque fue una época seca, los valores sugieren que ese momento las aguas eran principalmente de escorrentía pluvial.

Características químicas de las aguas subterráneas

Las aguas subterráneas muestreadas tienen mineralizaciones entre muy bajas y medias y tienden a crecer con la profundidad, aunque no en toda la zona. Hacia el centro, N y NE de la RHI las aguas son principalmente bicarbonatadas sódicas, mientras que al S son bicarbonatadas cálcicas. Dos pozos tienen

aguas sulfatadas sódicas, uno ubicado al SO de Misiones y con 1050 m de profundidad (2G) y otro ubicado al SE de Corrientes y con 1050 m de profundidad (54G). Las características del pozo 2G se atribuyen a contribución de agua de las formaciones del SAG y quizás del pre-SAG. El pozo 54G capta formaciones salinas infrayacentes al SAG. En una zona relativamente pequeña en torno al nacimiento

del Miriñay hay cuatro pozos con profundidades cercanas a 100 m que tienen agua clorurada sódica levemente salina, la cual parece ser mezcla de las formaciones del SAG y Serra Geral, aunque la hipótesis está por contrastar. Manzano et al. (2013) exponen con detalle la composición y el posible origen de las aguas subterráneas mencionadas.

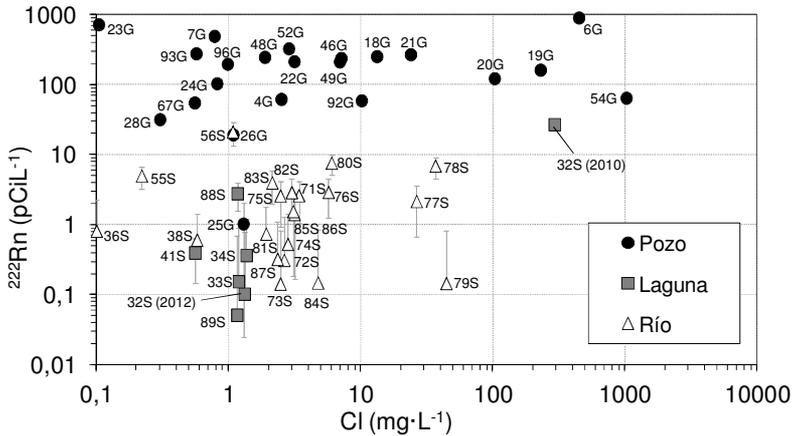


Figura 3. Actividad de ²²²Rn (con su incertidumbre) y concentración de Cl⁻ en las aguas medidas.

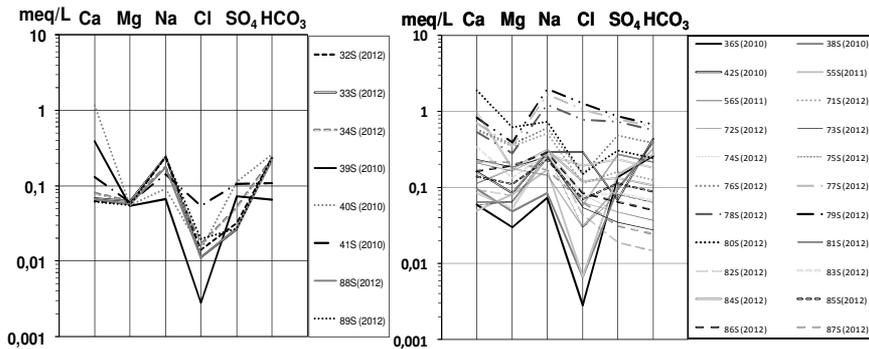


Figura 4. Diagramas de Schöeller-Berkaloff de aguas de lagunas (izquierda) y ríos (derecha).

Conclusiones

Todas las aguas superficiales estudiadas están muy poco mineralizadas y sus características químicas e isotópicas son coherentes con un origen mayoritario en la lluvia. Las aguas subterráneas someras, y muchas relativamente profundas, también tienen mineralizaciones muy pequeñas, similares química e isotópicamente a las de las aguas superficiales. Por tanto, podría existir cierta contribución de agua subterránea a

lagunas, arroyos y ríos, sin modificación significativa de las características de éstas.

En cambio los valores de actividad de ²²²Rn medidos en aguas subterráneas y superficiales son significativamente diferentes. Los valores medidos en aguas superficiales (inferiores a 5 pCi·L⁻¹) no sugieren la existencia generalizada y en magnitud relevante de descarga de agua subterránea a los esteros, lagunas y ríos estudiados. No obstante, algunos valores anómalamente elevados –en términos relativos– podría indicar cierta contribución de aguas

subterráneas, entre ellos uno medido en 2011 en el río Uruguay en San Javier (Misiones), con una actividad de ^{222}Rn superior a $20 \text{ pCi}\cdot\text{L}^{-1}$, y otro medido en 2010 en el sector S de la laguna de Iberá, con una actividad de ^{222}Rn de $26,90 \pm 2,32 \text{ pCi}\cdot\text{L}^{-1}$. Este último valor es coherente con el de la relación Cl/Br medida en ese momento, que fue similar a las medidas en tres pozos de 100 m de profundidad del entorno cercano a Colonia Pellegrini. Nuevas medidas realizadas en este lugar en 2012 no muestran influencia de agua subterránea ($^{222}\text{Rn} = 0,10 \pm 0,69 \text{ pCi}\cdot\text{L}$), pero dada la pequeña lámina de agua de la laguna, es plausible que la descarga sólo sea detectable en ciertas condiciones hidrológicas.

Agradecimientos

Los datos proceden de distintos proyectos desarrollados en 2009 a 2012 por los autores y han sido financiados por el Ministerio de Economía y Competitividad de España, (proyecto MICINN-REDESAC CGL2009-2910-CO3), la Agencia Internacional de Energía Atómica y el Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación Productiva de Argentina (proyecto PICT 2008/2071).

Referencias

Alcalá, F. J. y Custodio, E. 2008. Using Cl/Br ratio as a tracer to identify the origin of aquifers in Spain and Portugal. *J Hydrol* 359, 189-207.

Araújo, L., Franca, A. y Potter, P. 1999. Hydrogeology of the Mercosul Aquifer System in the Paraná and Chaco-Paraná Basins, South America, and comparison with the Navajo-Nugget Aquifer System, USA. *Hydrogeol J*, 7, 317-336.

Burnett, W., Kim, G. y Lane-Smith, D. 2001. A continuous monitor for assessment of ^{222}Rn in the coastal ocean. *J Radioanalytical Nucl Chem* 249(1): 167-172.

Burnett, W., Peterson, R., Santos, I. y Hicks, R. 2010. Use of automated radon measurements for rapid assessment of groundwater flow into Florida streams. *J Hydrol*, 380: 298-304.

Campos, H. 2000. Modelación conceptual y matemática del Acuífero Guaraní, Cono Sur. *Acta Geol. Leopoldinense*, São Leopoldo, 23(4): 3-50.

Canziani, G., Rossi, C., Loisele, S. y Ferrati, R. (eds.) 2003. Los Esteros del Iberá. Informe del Proyecto "El manejo sustentable de humedales en el MERCOSUR". *Fund. Vida Silvestre Argentina*, Bs As, Argentina. 258 pp.

Chebli, G., Mozetic, M., Rossello, E. y Bühler, M. 1999. Cuencas sedimentarias de la llanura chacopampeana. En: Caminos, R. (Ed.) *Geol.*

Argentina. Subsecretaría de Minería de la Nación, SEGEMAR, Instituto de Geol. y Rec. Minerales, Bs As, Anales N° 29: 627-644.

Custodio, E. y Herrera, C. 2000. Estudio del potencial de la relación Cl/Br como indicador del origen de la salinidad en diversos acuíferos de España y Portugal. Proyecto CICYT: HID 1990-0205. IGME, Madrid, 1-141.

Davis, S.N.; Wittemore, D.O. y Fabryka-Martin, J. 1998. Uses of chloride/bromide ratios in studies of potable water. *Ground Water* 36(2): 338-350.

Dulaiova, H., Peterson, R., Burnett, W. y Lane-Smith, D. 2005. A multi-detector continuous monitor for assessment of ^{222}Rn in the coastal ocean. *J Radioanalytical Nucl Chem*, 263(2): 361-365.

Herbst, R. y Santa Cruz, J. 1995. Mapa geol. de la Prov. Corrientes. Secretaría de Minería. Dir. Nacional del Servicio Geol. de Argentina.

Manzano, M., Rodríguez, L., Vives, L., Ortega, L., Heredia, J., Mira, A., Nittman, J., Valladares, A., Araguás, L. y Aggarwal, P. 2013. Caracterización hidroquímica e isotópica de las aguas subterráneas del entorno de los Esteros del Iberá (Corrientes, Argentina). VIII Congreso Argentino de Hidrogeología, La Plata, 2013.

Mira, A., Rodríguez, L., Veroslavsky, G. y Vives, L. 2013. Actualización del modelo hidrogeológico conceptual del SAG y la influencia geológica del sector Argentino. VIII Congreso Argentino de Hidrogeología, La Plata, 2013.

Ortega, L., Manzano, M. y Hornero, J. 2013. Aplicación del ^{222}Rn para identificar y cuantificar descargas de agua subterránea en el río mundo (Albacete, España). VI Seminario Hispano Latinoamericano sobre temas actuales de la Hidrología Subterránea.

Subsecretaría de Recursos Hídricos (2004). Estadística Rep. Argentina. Buenos Aires. (<http://catalogo.mecon.gov.ar/ver.php?pub=852>)

Rodríguez L.B., Vives, L.S., Gómez, A.A. y Cota, S.D. 2009. Simulación del flujo subterráneo regional del SAG en régimen estacionario. ENIEF: XVIII Congreso sobre Mét. Numéricos y sus Aplicaciones. Tandil, Argentina. En: XXVIII libro de la Serie Mecánica Computacional (AMCA). 2817-2832.

Vives, L.S., Rodríguez, L.B., Gómez, A.A. y Cota, S.D. 2008. Modelación numérica regional del SAG (Regional numerical modeling of the GAS). Project for Environmental Protection and Sustainable Development of the GAS. Global Environment Facility (GEF). Technical Report. Montevideo, Uruguay, 144 pp.