

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERIA HIDRAULICA

XX CONGRESO CHILENO DE HIDRAULICA

CARACTERIZACION ISOTOPICA DE UNA CUENCA ARIDA: APLICACION EN LA ESTIMACION DEL BALANCE HIDRICO DEL SALAR DEL HUASCO, NORTE DE CHILE. RESULTADOS PRELIMINARES

JOSE FRANCISCO MUÑOZ P.¹

JAVIER URIBE B.¹

LAURA VITORIA²

RICARDO OYARZUN³

EVELYN AGUIRRE⁴

ORLANDO ACOSTA⁵

FERNANDO VARAS²

RESUMEN

Salar del Huasco es una cuenca endorreica ubicada en el altiplano chileno caracterizada por la escasez de precipitaciones que recarguen el acuífero y una alta tasa de evaporación que corresponde a la principal salida de la cuenca. Estimaciones anteriores del balance hídrico se han realizado con el fin de lograr una gestión sustentable de los recursos hídricos en la cuenca. Técnicas isotópicas pueden ser utilizadas para reducir la incertidumbre en la estimación de los componentes del ciclo de agua del Salar del Huasco. Para ello se han recolectado cuarenta y seis muestras de agua superficial, subterránea, aguas de vertiente y precipitación a distintas altitudes. Utilizando el análisis isotópico de estas muestras complementada con información anterior, se ha concluido, preliminarmente, que la recarga efectiva podría estar sobrestimada en las zonas bajas de la cuenca (bajo los 4.000 msnm) debido a la ausencia de muestras de agua subterráneas que coincidan con la composición isotópica de las aguas lluvias a baja altura.

¹ Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental, Pontificia Universidad Católica de Chile

² Geohidrología Consultores Ltda., Santiago, Chile

³ Departamento Ingeniería de Minas, Facultad de Ingeniería, Universidad de La Serena

⁴ Laboratorio de Isótopos Ambientales, Comisión Chilena de Energía Nuclear

⁵ Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi, Iquique, Chile

1. INTRODUCCION

El conocimiento del balance hídrico de una cuenca permite una administración y gestión más eficiente del recurso hídrico y elaborar planes de aprovechamiento de agua de manera sustentable, de modo de que puedan convivir las actividades socioeconómicas con los ecosistemas existentes. Bajo este contexto es que en una acción de apoyo entre la Dirección General de Aguas (DGA) y el Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental de la Pontificia Universidad Católica de Chile (DIHA-PUC), se ha desarrollado el proyecto donde se estudia la cuenca Salar del Huasco, ubicada en la Región de Tarapacá de Chile (DIHA, 2008). Esta cuenca alberga una gran variedad de aves y otros animales endémicos en un humedal de gran importancia ambiental lo que motivó la protección de parte de esta cuenca bajo el convenio Ramsar (1996) y desde el año 2010 como Parque Nacional.

Si bien el estudio del balance hídrico para la cuenca Salar del Huasco ya ha sido investigado antes (Acosta, 2004), la escasa información y difícil acceso a nuevos y mejores datos ha derivado en una gran incertidumbre al momento de determinar los parámetros que intervienen en el balance. Como la investigación se desarrolla a partir de la información histórica que se tiene, y considerando que en largo plazo los niveles de agua permiten inferir que el almacenamiento en el acuífero es despreciable, es que la estimación del balance hídrico está condicionada a conocer las recargas y descargas de ella, que dado el carácter endorreico de la cuenca y la no comprobación de conexiones subterráneas con otras cuencas, corresponde a recarga efectiva por precipitación y evaporación, respectivamente. El estudio realizado en Salar del Huasco por DGA y DIHA-PUC introduce nuevos antecedentes para estimar la evaporación desde la zona no saturada del suelo realizando mediciones en terreno mediante el método del domo (Johnson et al., 2010) y comprender de mejor manera el comportamiento de las precipitaciones, lo cual ha sido complementado con un análisis isotópico de 46 muestras de agua recolectadas desde el Salar del Huasco y cuencas vecinas.

2. AREA DE ESTUDIO

El Salar del Huasco (Figura 1) es un salar situado en una depresión volcánica-tectónica que forma una cuenca endorreica de 1.471 km² situado en el Altiplano Andino rodeado por volcanes con alturas que oscilan entre 4.000 y 5.220 msnm. La hidrografía de la cuenca está dominada por el río Collacagua, que se extiende de norte a sur, y desaparece 10 km al norte del salar. Este salar es el sumidero final de toda la cuenca donde se forma un sistema de lagunas.

Las precipitaciones en la cuenca, que son la única fuente de recarga existente, son de origen tropical y ocurren durante el verano del hemisferio sur, lo que es conocido como el Invierno Altiplánico. Estas precipitaciones son de carácter convectivo, con una alta variabilidad espacial y se concentran en los meses de enero y febrero. Por otro lado, la evaporación de la zona no saturada y de las lagunas es la única descarga de la cuenca.

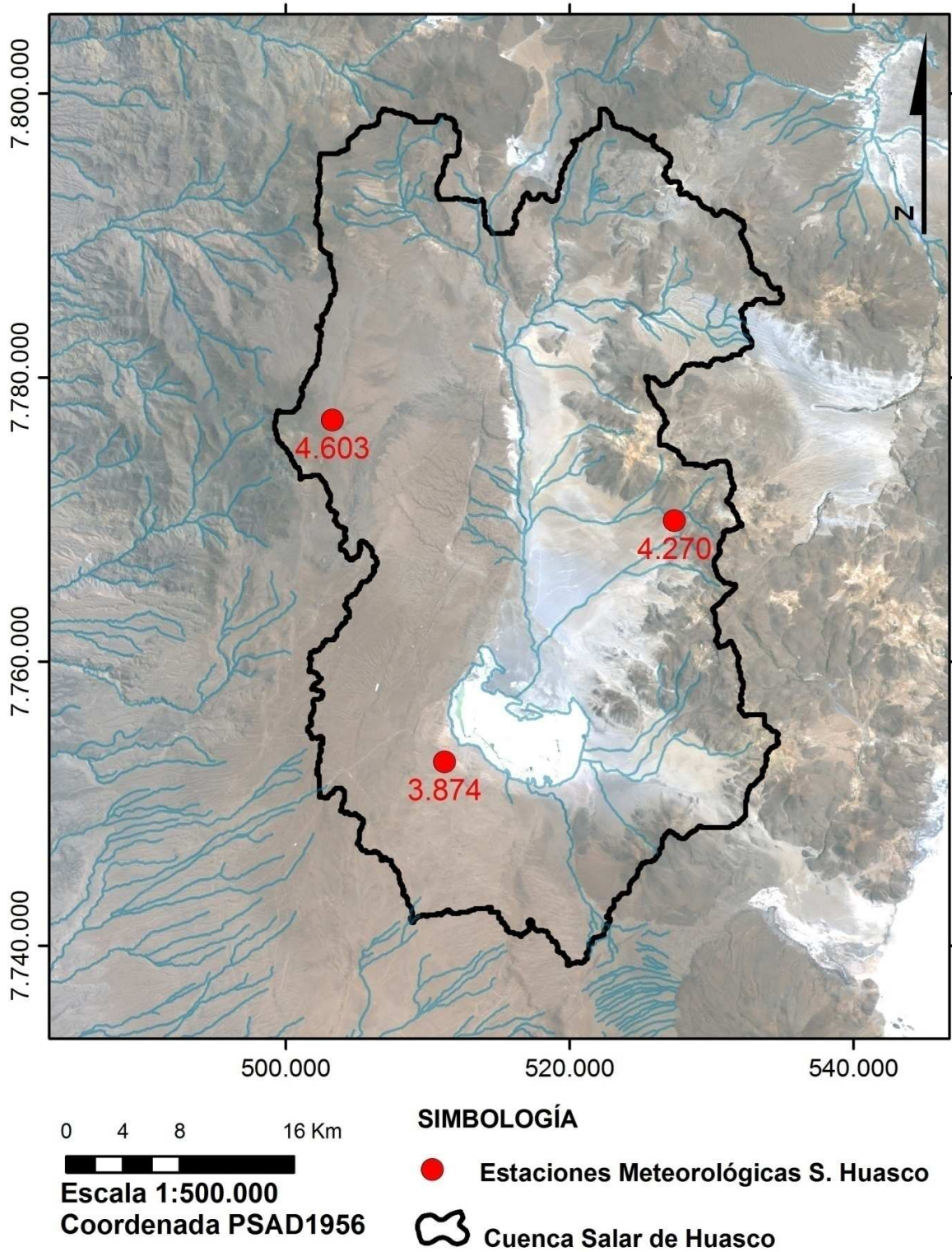


Figura 1. Área de estudio, Salar del Huasco en Norte de Chile.

Se diferencian tres fases tectónicas en los sistemas estructurales que da origen al régimen de fallas existentes en la cuenca (Sayes, 1978). La primera se asigna al Plioceno y origina un sistema de fallas N-S y NW-SE que afecta a la Formación Altos de Pica generando en sus estratos un pliegue monoclinal (Hargis y Montgomery, 1981). Una segunda fase habría ocurrido durante el Plioceno tardío- Pleistoceno temprano, dando lugar a un sistema de fallas normales y fracturas N-S y NE- SW. Por último, la tercera fase, se considera post- Plioceno y se le atribuyen importantes desplazamientos a lo largo de los planos de falla, produciendo la discontinuidad de algunos depósitos ignimbríticos (Hargis y Montgomery, 1981). Destacan dos fallas NE- SW en la Formación Altos de Pica cuya traza se prolonga hacia el sur por varios kilómetros, variando su rumbo a N-S.

En el sistema acuífero del Salar del Huasco pueden reconocerse tres unidades litológicas en donde se han definido tres unidades hidrogeológicas (JICA, 1995): superior, medio e inferior. El acuífero superior se compone por el conjunto de depósitos fluviales y aluviales que recubren de manera uniforme a las unidades más antiguas con un espesor saturado que va entre 20 m (salar) y 70 m. El acuífero medio, que corresponde al acuífero principal (Acosta et al., 2008), está formado por los depósitos terciarios con un alta permeabilidad a pesar de su contenido de arcilla. El acuífero inferior se compone por la Ignimbrita Huasco y las lavas del Mioceno y Plioceno; corresponde al basamento de la cuenca sedimentaria que constituye un medio altamente fracturado, permitiendo el almacenamiento del recurso.

3. MATERIALES Y METODOS

Esta investigación contiene una revisión hidrogeológica del Salar del Huaco con el fin de estimar los parámetros que rigen el ciclo hidrológico y establecer la disponibilidad de los recursos hídricos de la cuenca.

3.1 Recarga

Tres estaciones pluviométricas fueron instaladas para complementar los registros de lluvias medidos dentro y fuera de la cuenca. Estos corresponden a 5 estaciones DGA, uno de ellos (Collacagua) localizado dentro de la zona de estudio con registro desde 1961, y 6 estaciones de propiedad de Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi (CMDIC) con registro desde 1997.

La recarga en el largo plazo se calculó como una recarga directa (R_D) dada por la precipitación sobre depósitos sedimentarios y una recarga lateral (R_L) dada por la precipitación sobre roca impermeable (Figura 2). El balance de masa en un volumen de control, define el cambio neto en el almacenamiento como las entradas menos las salidas. Cuando el balance es aplicado en el largo plazo el cambio en el almacenamiento es despreciable; por lo tanto el balance de masa está dado por:

$$PP \cdot A_{RD} = ET + Q + R_D \quad (1)$$

donde PP es la precipitación [$L T^{-1}$], A_{RD} es el área de la unidad litológica para la recarga directa [L^2], ET es la evapotranspiración [$L T^{-1}$] y Q es el flujo superficial [$L^3 T^{-1}$]. En zonas áridas como el área de estudio, Q es despreciable y la precipitación se evapora o infiltra. Por lo tanto, la infiltración se puede calcular por medio de un coeficiente de infiltración, y así la recarga directa se calcula como:

$$R_D = C_I \cdot PP \cdot A_{RD} \quad (2)$$

donde C_I es el coeficiente de infiltración que varía entre 0,05 y 0,3 dependiendo de la permeabilidad y consolidación de la unidad litológica.

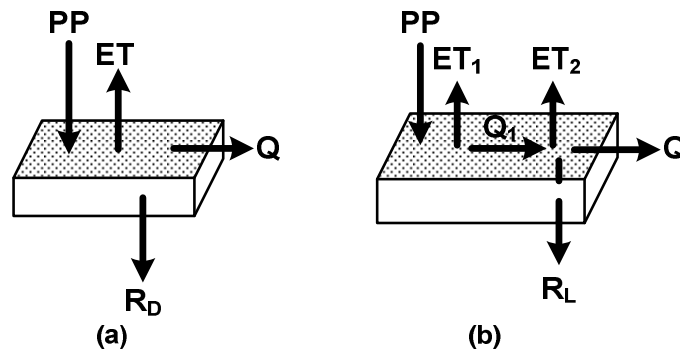


Figura 2. Esquema conceptual del balance hídrico en las unidades litológicas para estimar la recarga en el sistema piloto (a) Recarga directa. (b) Recarga lateral

Dos volúmenes de control se definen para la recarga lateral: i) el volumen donde se generan los escurrimientos y ii) el volumen que corresponde a los cauces desde donde se produce la recarga. El balance de masa para el primer volumen de control es:

$$PP \cdot A_{RL} = ET_1 + Q_1 \quad (3)$$

donde A_{RL} es el área de la unidad litológica para la recarga lateral [L^2], ET_1 es la evapotranspiración [$L T^{-1}$] y Q_1 es el flujo superficial [$L^3 T^{-1}$]. La evapotranspiración puede estimarse en función de la precipitación mediante un coeficiente de escurrimiento C_E que se estimó en 0,13 para cuencas altiplánicas (DIHA, 2008):

$$ET_1 = (1 - C_E) \cdot PP \cdot A_{RL} \quad (4)$$

Para el segundo volumen de control, el balance de masa es:

$$Q_1 = ET_2 + Q + R_L \quad (5)$$

La evapotranspiración (ET_2) puede ser calculada como una función del coeficiente de infiltración de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$ET_2 = (1 - C_I) \cdot Q_1 \quad (6)$$

Combinando ambos balances de masa y despreciando el escurrimiento Q , la recarga lateral finalmente se calcula como:

$$R_L = C_I \cdot C_E \cdot PP \cdot A_{RL} \quad (7)$$

El valor de C_I depende de la magnitud y duración de cada evento de precipitación, de la textura del suelo y su condición de humedad. Sin embargo, para estimar la recarga en el largo plazo es posible despreciar los efectos de los eventos individuales de precipitación y de la condición antecedente de humedad, de tal manera que C_I dependa solamente de la textura del suelo. Xu et al. (2005) definió un coeficiente de 0,31 para suelos de alta permeabilidad y Wang et al. (2008) un valor de 0,0082 para suelos de permeabilidad baja en zonas semiáridas. Con estas consideraciones se estimaron un conjunto de valores para el coeficiente C_I en función de la permeabilidad cualitativa de las unidades litológicas, los cuales se presentan en la Tabla 1.

3.2 Descarga

Considerando que el Salar del Huasco es una cuenca endorreica, y como no existe evidencia concluyente que compruebe la conexión subterránea con otras cuencas, las descargas provienen de la evapotranspiración desde lagunas, vegetación y de la zona no saturada. Las extracciones de agua para actividades humanas son despreciables.

Johnson et al. (2009) desarrolló un trabajo en terreno para medir evaporación desde la zona no saturada en sectores donde la napa subterránea se encuentra a poca profundidad; utilizando el método del domo en 16 puntos distribuidos en 4 zonas se determinó la tasa de evaporación como función de la profundidad de las aguas subterráneas (entre 0 y 4 metros).

3.3 Composición Isotópica de aguas de la cuenca

Cuarenta y seis muestras de agua se colectaron desde ríos, lagunas, pozos, vertientes y precipitación entre 2008 y 2010, con el objeto de verificar el modelo hidrogeológico conceptual del Salar del Huasco. El análisis isotópico (^{18}O y ^2H) de estas muestras se complementó a otros análisis (107) realizados para otros estudios (Risacher et al. (1999) y base de datos DGA).

Considerando que la precipitación en la región altiplánica se la única fuente de recarga de este acuífero, es muy probable que la composición isotópicas de las aguas subterráneas refleje su origen. Aunque no toda la precipitación alcanza el acuífero debido a la evaporación desde la zona no saturada, la composición isotópica de las aguas subterráneas se encuentra entre la curva meteórica de agua (MWL, por su sigla en inglés) y la curva meteórica de agua sin excesos de deuterio (MWL-D). Algunos autores vinculan esta situación con el clima árido de la zona de estudio, especialmente por las elevadas temperaturas y evaporación durante la temporada lluviosa en verano, cuando ocurren los principales eventos de recarga (DIHA, 2008; Acosta et al., 2008)).

4. RESULTADOS Y DISCUSION

La cuenca fue dividida en 4 bandas de altura donde se calculó la recarga. La Tabla 1 resume estas zonas, el valor de las variables que participan en la estimación de la recarga y la recargas parciales y totales.

Tabla 1. Recarga efectiva en la cuenca del Salar del Huasco para diferentes bandas de altura.

Zona (m.s.n.m.)	Conductividad Hidráulica	Recarga	Área (km ²)	Precipitación (mm/a)	C _E	C _I	Recarga L/s	Total L/s
3.772 – 4.000	Baja a Media	Lateral	112,8	134,1	0,13	0,15	9,4	426,4
	Alta	Directa	170,0	134,1		0,30	216,8	
	Media	Lateral	10,0	134,1	0,13	0,10	0,6	
	Media a Alta	Directa	187,9	134,1		0,25	199,7	
4.000 – 5.000	Muy Baja	Lateral	11,3	146,9	0,13	0,05	0,3	614,3
	Media a Baja	Lateral	206,3	146,9	0,13	0,15	18,7	
	Alta	Directa	146,6	146,9		0,30	204,8	
	Baja	Lateral	99,5	146,9	0,13	0,10	6,0	
	Media a Alta	Directa	330,1	146,9		0,25	384,4	
4.500 – 5.000	Muy Baja	Lateral	26,3	164,9	0,13	0,05	0,9	116,9
	Media a Baja	Lateral	22,1	164,9	0,13	0,15	2,3	
	Alta	Directa	14,9	164,9		0,30	23,4	
	Baja	Lateral	62,1	164,9	0,13	0,10	4,2	
	Media a Alta	Directa	65,9	164,9		0,25	86,1	
5.000 – 5.234	Muy Baja	Lateral	2,7	177,2	0,13	0,05	0,1	1,0
	Alta	Directa	0,5	177,2		0,30	0,8	
	Baja	Lateral	1,8	177,2	0,13	0,10	0,1	
Cuenca			1.470,7	145,2				1.158,7

Para el cálculo de la descarga, la cuenca se dividió en dos zonas: el humedal-salar y el resto de la cuenca. Para el humedal, las descargas por evaporación se estimaron entre 627 y 741 L/s, mientras que para el resto de la cuenca la evaporación varía entre 72 y 74 L/s (DIHA, 2008). La Tabla 2 muestra el cálculo del balance hídrico para la cuenca entera.

Considerando los valores medios de los componentes hídricos estimados, el balance tiene un error de cierre de +402 L/s (es decir, +35%), lo que se traduce en un exceso de recarga. Para comprender estas discrepancias es que se ha utilizado la composición isotópica de las aguas de la cuenca.

Tabla 2. Cálculo del balance hídrico en la cuenca Salar del Huasco

Recarga (L/s)	Evaporación salar (L/s)	Evaporación Cuenca (L/s)	Entradas-Salidas (L/s)	Error (%)
+1,158.7	-684.0	-73.0	+401.7	+35

La composición isotópica de las precipitaciones del Salar del Huasco a diferentes altitudes se determinó utilizando una muestra colectada en la Estación Collacagua (3.900 msnm) (Aravena et al., 1999) y tres otras muestras colectadas para esta investigación a 3.874, 4.270 y 4.603 msnm para el período entre diciembre de 2009 y octubre de 2010. La Figura 3 muestra la composición isotópica de las aguas subterráneas que no han sido afectadas por evaporación directa a lo largo del sistema de flujo.

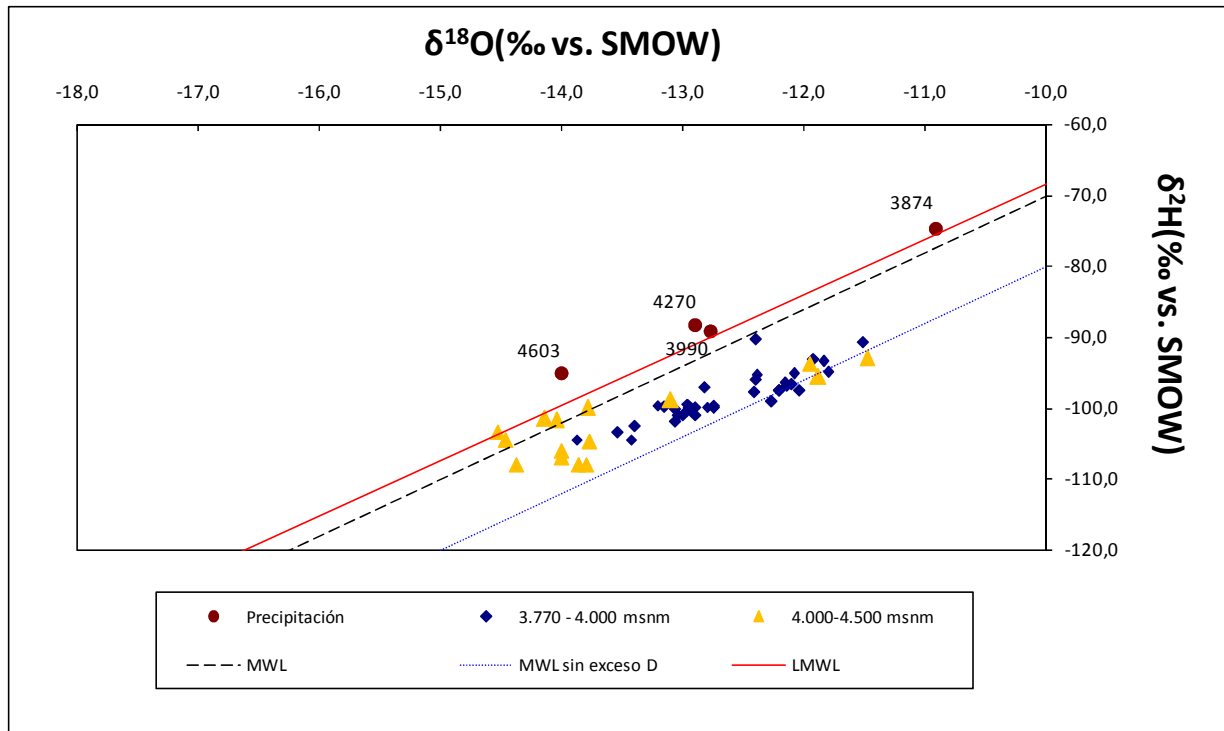


Figura 3. Composición Isotópica de las muestras de agua de la cuenca. La composición isotópica de las aguas subterráneas es diferente a la composición de las precipitaciones en la parte baja de la cuenca (3.874 msnm), lo que sugiere que la recarga puede estar sobrestimada en las zonas bajas de la cuenca.

Pese a que las muestras isotópicas de precipitación son escasas y limitadas y aún no representan la composición isotópica en el largo plazo, las muestras de agua subterránea colectadas bajo los 4.000 msnm son más empobrecidas que las precipitaciones recogidas a bajas altitudes, lo que sugiere que la recarga por debajo de los 4.000 msnm, 427 L/s que corresponde al 37% de la recarga total, podría estar sobrestimada introduciendo errores en la estimación del balance hídrico de la cuenca.

Si esta tesis es confirmada por nuevos datos de precipitación que serán recolectados en los siguientes meses, el cálculo de la recarga para las zonas bajas de la cuenca deberá ser revisada.

5. CONCLUSIONES

Considerando la complejidad de este tipo de sistemas, la gran variabilidad espacial, temporal y la dificultad para estimar los parámetros que caracterizan el sistema, se considera de manera preliminar que un 35 % de error en la estimación del balance hídrico del Salar del Huasco es aceptable, validando los métodos utilizados.

Sin embargo, los datos isotópicos de precipitación preliminares recolectados a diferentes altitudes y comparado con la composición de las aguas subterráneas de la cuenca, sugiere que los valores de recarga calculados para la zonas bajas de la cuenca podrían estar sobrestimado.

Así, aunque las técnicas isotópicas permiten plantear hipótesis sobre los posibles errores en la estimación del balance hídrico, sigue siendo necesaria mayor información para mejorar el conocimiento del modelo conceptual hidrogeológico de la cuenca.

Futuros trabajos serán orientados a reunir más información sobre la composición isotópica de las precipitaciones y utilizar este análisis para entender la hidrología de la zona y así poder comprender posibles conexiones del Salar del Huasco con cuencas vecinas, como Laguna Lagunillas o la Pampa del Tamarugal (Tröger et al., 2004).

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación se desarrolla en el marco del proyecto CHI8/029 (Organización Internacional de Energía Atómica), y se realiza gracias al apoyo de Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi, Geohidrología Consultores Ltda. y la Dirección General de Aguas Tarapacá.

REFERENCIAS

Acosta, O., 2004. Impacto de las extracciones de agua subterránea en el Salar del Huasco. Tesis de Máster, Universidad Politécnica de Cataluña, España.

Acosta, O. y Custodio E., 2008. Impactos ambientales de las extracciones de agua subterránea en el Salar del Huasco (norte de Chile). *Boletín Geológico Minero*, 119 (1): 33-50.

Aravena, R., Suzuki O., Peña, H., Pollastri, A., Fuenzalida, H. and Grilli, A., 1999. Isotopic composition and origin of the precipitation in Northern Chile. *Applied Geochemistry* 14:411–422.

Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental (DIHA)-Pontificia Universidad Católica de Chile, Dirección General de Aguas (DGA), 2008. Levantamiento hidrogeológico para el desarrollo de nuevas fuentes de agua en áreas prioritarias de la zona norte de Chile, Regiones XV,I,II y III, Chile. DGA-MOP, Chile (S.I.T. N° 157).

Hargis and Montgomery, 1981. Hydrogeological Investigation of the Salar del Huasco Basin. Interim Report, August 4, 1981.

Japan International Cooperation Agency (JICA), Dirección General de Aguas (DGA) y Pacific Consultants International, 1995. The Study on the Development of Water Resources in Northern Chile. Dirección General de Aguas, MOP Chile.

Johnson, E., Yáñez, J., Ortiz, C. and Muñoz, J., 2010. Evaporation from shallow groundwater in closed basins in the Chilean Altiplano. *Hydrol. Sci. J.* 55(4),

Risacher, F., Alonso, H. y Salazar, C., 1999. Convenio de Cooperación entre la Dirección General de Aguas (DGA), la Universidad Católica del Norte (UCN) y el Institute de Recherche Pour le Développement (IRD). *Geoquímica de Aguas en Cuencas Cerradas: I, II y III Regiones – Chile (S.I.T. N° 51).*

Sayes, J., 1978. Cuadrángulos Collacagua y Laguna del Huasco, Provincia de Iquique, I Región: scale 1:100,000. Instituto de Investigaciones Geológicas de Chile, 43 pp.

Tröger, U. y Gerstner, D., 2004. Estudio de Investigación de la Situación Hidrogeológica en la Formación Altos de Pica. Informe Técnico de Asesoría Experta, S.D.T. N° 174, Convenio DGA – CONADI.

Wang B., Jin, W., Nimmo, J., Lei Yang L., Wang, W., 2008. Estimating groundwater recharge in Hebei Plain, China under varying land use practices using tritium and bromide tracers. *Journal of Hydrology*, 356(1-2), 209– 222.

Xu, Y., Mo, Y., Cai, and. Li, X., 2005. Analysis on groundwater table drawdown by land use and the quest for sustainable water. *Agricultural Water Management*, 75(1), 38–53.