

ESTUDIO DE HIDROLOGIA ISOTOPICA DE LAS AGUAS SUBTERRANEAS DEL VALLE DEL RIO COPIAPO, III REGION, CHILE

Aguirre, I.¹, Geyh, M.², Aguirre, E.³

INTRODUCCION

El Servicio Nacional de Geología y Minería en conjunto con el Instituto Federal de Geociencias y Recursos Naturales (BGR) y con la participación de la Comisión Chilena de Energía Nuclear ha completado recientemente un estudio isotópico en el valle del río Copiapó, III Región (Fig. 1). Compromete una zona donde durante los últimos 15 años se ha registrado un notable incremento tanto en las actividades mineras como agrícolas, derivando así en el consiguiente aumento en las demandas del recurso hídrico subterráneo y superficial. En este trabajo se presentan antecedentes isotópicos a partir de los cuales se discuten el posible origen, el tiempo de residencia y los procesos que afectan la calidad de las aguas subterráneas.

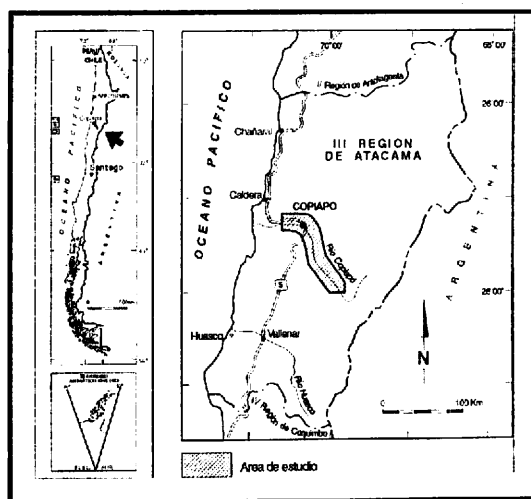


Figura 1. Ubicación de la zona de estudio.

METODOLOGÍA

Entre los años 1996 y 1999 se recolectaron numerosas muestras de agua, principalmente subterráneas y algunas de aguas superficiales, durante diversas campañas a terreno desarrolladas entre las nacientes del valle del río Copiapó y el sector de San Pedro, aguas abajo de Piedra Colgada (Fig. 1). Alrededor de 100 muestras para análisis de $\delta^2\text{H}$ y $\delta^{18}\text{O}$ fueron recolectadas durante enero y mayo de 1996, enero de 1998 y posteriormente cada dos meses hasta noviembre de 1998. En agosto de 1999 se tomaron 20 muestras para análisis de ^3H , ^{14}C , $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^2\text{H}$ y $\delta^{18}\text{O}$. Las muestras tomadas en 1996 y 1998 fueron analizadas por $\delta^2\text{H}$ y $\delta^{18}\text{O}$ en el Laboratorio de Isotopía de la Sección de Isótopos Ambientales de la Comisión Chilena de Energía Nuclear (CCHEN). Las muestras tomadas en 1999 fueron analizadas por ^3H , ^{14}C , $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^2\text{H}$ y $\delta^{18}\text{O}$ en el Laboratorio de Isotopía de la BGR, Alemania. Una muestra del río Copiapó, tomada en 1996, fue analizada por ^3H en este mismo Laboratorio. Los análisis químicos convencionales se realizaron en el Laboratorio Químico del Sernageomin, Santiago. En terreno se efectuaron determinaciones analíticas de pH, conductividad y temperatura.

¹ Servicio Nacional de Geología y Minería. Av. Santa María 0104, Providencia, Santiago, Chile

² Instituto Federal de Geociencias y Recursos Naturales. Stilleweg 2, D-30655 Hannover, Alemania

³ Comisión Chilena de Energía Nuclear, Nueva Bilbao 12501, La Reina, Santiago, Chile.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Oxígeno-18 (^{18}O) y Deuterio (^2H)

Los valores $\delta^2\text{H}$ (-95 a -72 ‰) y $\delta^{18}\text{O}$ (-12,6 a -8,6 ‰) de las muestras colectadas, graficados en el diagrama $\delta^2\text{H}$ v/s $\delta^{18}\text{O}$ se observan limitados por dos líneas de evaporación ($\delta^2\text{H} = 4,5\delta^{18}\text{O} - 29,7$, $\delta^2\text{H} = 4,5\delta^{18}\text{O} - 41,5$), ambas con una pendiente igual a 4,5 cruzando la Línea de Aguas Meteoricas (MWL, $\delta^2\text{H} = 8\delta^{18}\text{O} + 10$) para valores $\delta^{18}\text{O}$ iguales a -14,7 y -11,3 ‰, respectivamente (Fig. 2). La pendiente igual a 4,5 se consideró debido a que se corresponde con la pendiente de línea de tendencia adoptada para las muestras de agua subterránea tomadas durante la última campaña (Agosto 1999, Fig. 2).

En la Fig. 3 se observa la correlación positiva existente entre enriquecimiento isotópico y salinidad de las aguas subterráneas, con ambos parámetros aumentando según el sentido de escurrimiento de las aguas (2, 3 y Fig 4). Estos antecedentes son indicativos del enriquecimiento isotópico por evaporación que afecta las aguas subterráneas, el que es mayor hacia la parte baja del valle. Este efecto se asocia a recargas producto de los retornos por riego, las que además contribuyen al aumento de las sales disueltas contenidas en las aguas subterráneas (1, 7, 9).

Para establecer la proveniencia de las precipitaciones que dan origen a las aguas subterráneas del valle podemos utilizar dos rangos de valores $\delta^{18}\text{O}$ de -12,6 a 12,0 ‰ e incluso hasta -10,5 ‰ y -14,7 a -11,3 ‰. El primero resulta de los valores $\delta^{18}\text{O}$ obtenidos para la zona de cabeceras (Fig. 4); el segundo, corresponde a un rango $\delta^{18}\text{O}_{\text{corr}}$ resultante de descontar el efecto de evaporación suponiendo una pendiente igual a 4,5 (Fig. 2). Estos valores podrían corresponder a los valores $\delta^{18}\text{O}$ que debería tener la precipitación original para las aguas del valle del río Copiapó. Sin embargo, existen varios factores a considerar en estas hipótesis; ellos se discuten más adelante.

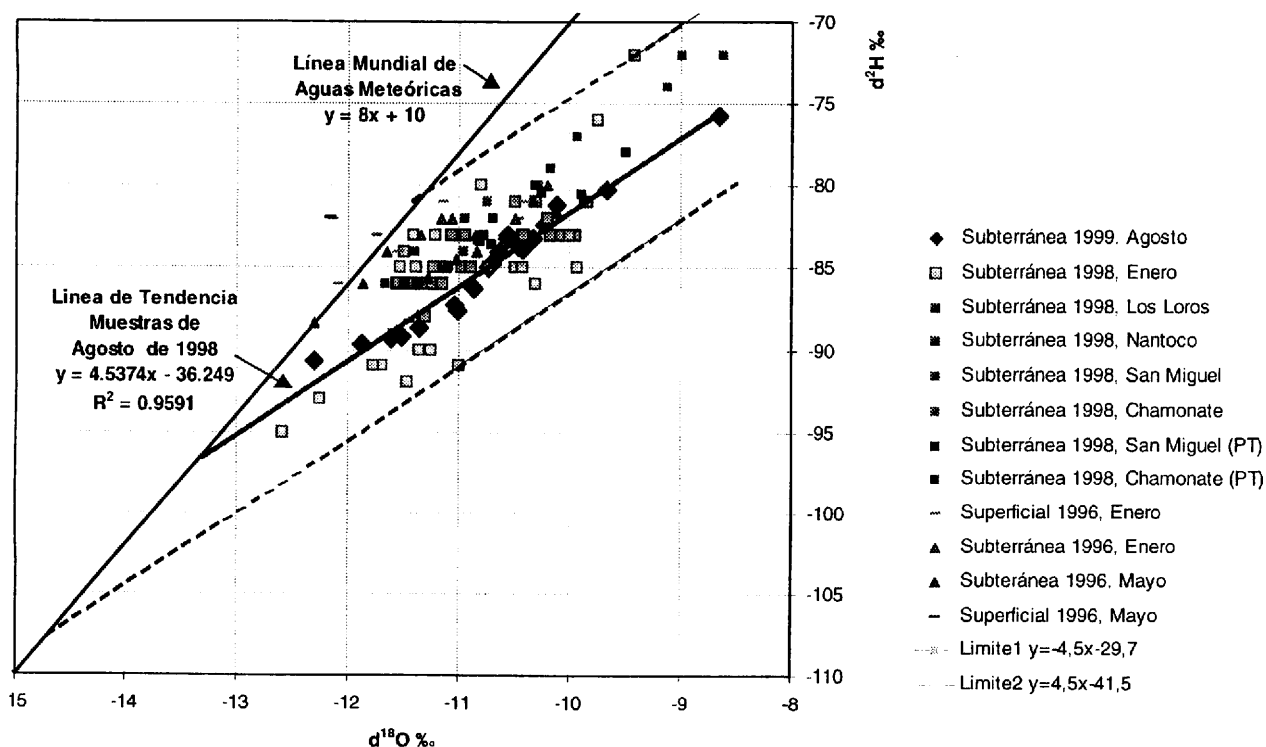


Figura 2. Diagrama $\delta^2\text{H}$ v/s $\delta^{18}\text{O}$ para las aguas subterráneas del valle del río Copiapó. Los rombos grandes con la línea de tendencia $y = 4,5x - 36,2$ corresponden a las muestras de agua subterráneas tomadas en 1999. Las muestras de agua superficial muestreadas en 1996, corresponden tanto al río Copiapó como a sus afluentes. La más alejada de la Línea Mundial de Aguas Meteoricas corresponde al río Montosa. PT se refiere a muestras tomadas en sentido transversal al valle.

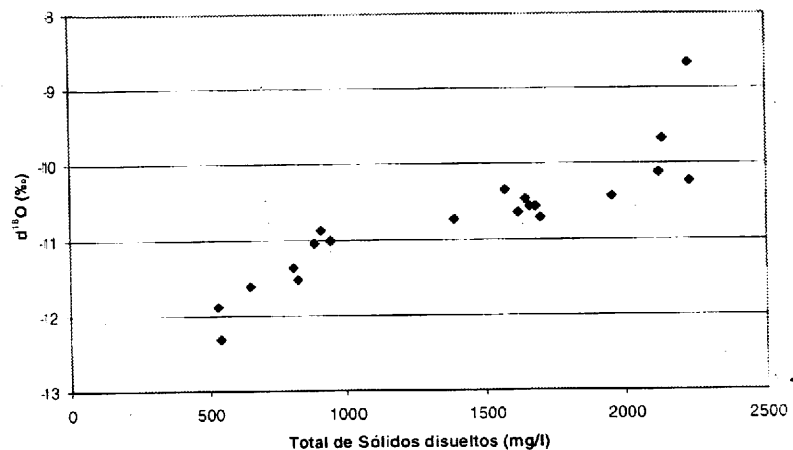


Fig. 3. Diagrama $\delta^{18}\text{O}$ v/s Total de Sólidos Disueltos (terreno) para las aguas subterráneas del valle del río Copiapó. Agosto de 1999

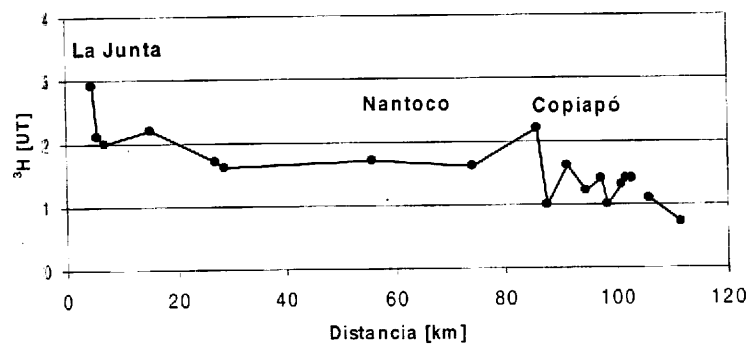


Fig. 5. ^3H en aguas subterráneas a lo largo del valle del río Copiapó. Agosto de 1999.

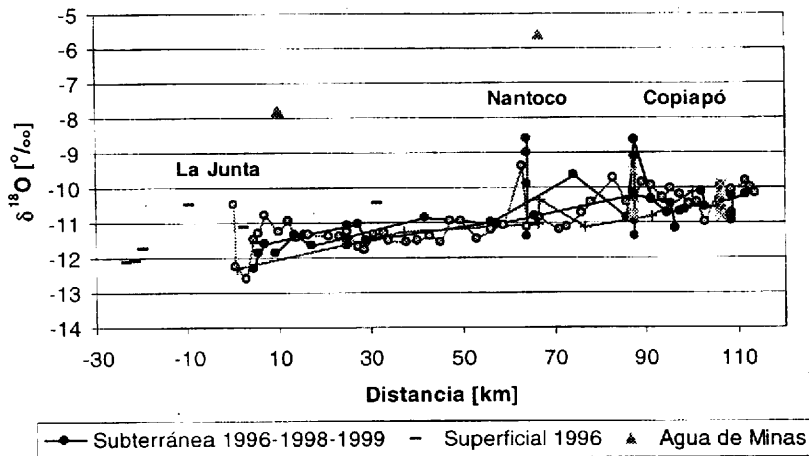


Fig. 4. $\delta^{18}\text{O}$ a lo largo del valle del río Copiapó. 1996, 1998 y 1999

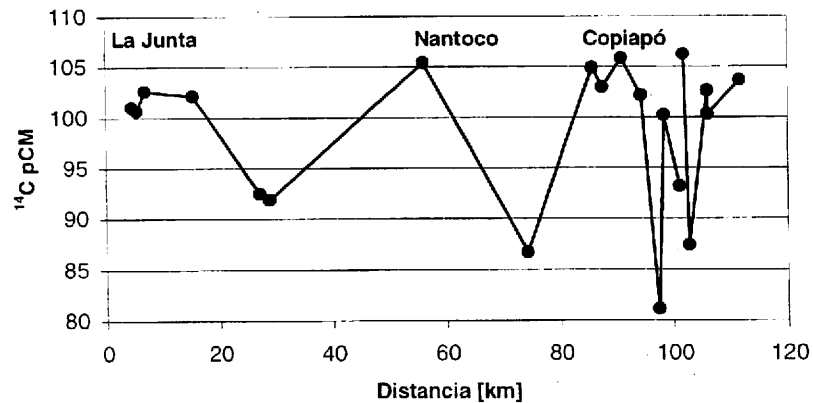


Fig. 5. Carbono-14 en aguas subterráneas a lo largo del valle del río Copiapó. Agosto de 1999.

Tritio (^3H)

Para interpretar el significado de los valores de ^3H en las aguas, es necesario considerar la función entrada de tritio o actividad de tritio en la precipitación. Es así como entre 1954 y 1963, y especialmente al término de las grandes pruebas nucleares, el nivel de tritio en la atmósfera fue máximo y en Sudamérica no superó los 30 UT (unidades de tritio). Posteriormente los valores de tritio atmosférico comenzaron a descender de manera estable (9). En particular para el valle del río Copiapó, no se conocen estos valores. Una muestra tomada el 7 de Mayo de 1996 desde el río Copiapó en el Embalse Lautaro arrojó un valor de $8,9 \pm 1,2$ UT, muy cuestionable por el hecho de ser un valor muy elevado y único. Sin embargo, en lugares cercanos a la cadena de Cerros que conforman las cabeceras del valle Copiapó se detectaron valores de entre 4,4 a 3,5 UT (Iriarte y Aravena, comunicación escrita) los que parecen más razonables. Por lo tanto, para la zona estudiada, podrían asumirse que los valores de ^3H actual son de ~ 4 UT.

Los valores de tritio detectados para las aguas del valle del río Copiapó fluctuaron entre 0,5 y 2,9 UT (Fig. 6) detectándose una tendencia a una disminución en estos valores hacia aguas abajo, lo que se interpreta como un paulatino aumento en el tiempo de residencia de las aguas en la medida que circulan hacia aguas abajo. Considerando que los valores de ^3H antes de 1954 eran menores que 2 UT (9), hoy en día las aguas recargadas antes de 1954 deberían presentar un nivel natural de $\sim 0,1$ UT. Para una vida media de 12,43 años, entre 3-4 vidas medias se han ido y la actividad específica decayó por un factor de 16. Como entre los años 1954 y 1963 los valores de ^3H alcanzaron su máximo, el agua recargada durante esos años hoy en día tendría un máximo de 2 UT. Con ello, se puede asumir que la recarga de las aguas subterráneas ocurrió, al menos parcialmente, con posterioridad al año 1963 y que a lo más, ellas podrían tener 40 años como máximo (9). Cálculos hidrogeológicos referidos a la velocidad de flujo también coinciden con esta estimación (8).

Carbono-14 (^{14}C)

La curva de ^{14}C (del CO_2 atmosférico) v/s tiempo tiene un comportamiento similar a la del tritio. Antes de 1955 el nivel de ^{14}C en la atmósfera era ~ 98 pCM (porcentaje de Carbono Moderno) elevándose hasta 160 pCM en 1963 en el hemisferio Sur. Posteriormente este valor comenzó a disminuir alcanzando en la actualidad un valor de ~ 110 pCM. De esta forma, como la mayor parte de las muestras de agua del valle del río Copiapó poseen valores de ^{14}C superiores a 98 pCM, ellas deben ser más jóvenes que 1963. Sin embargo, los valores más elevados también podrían estar asociados a la influencia de aguas de retorno de riego. Estas aguas durante la infiltración se cargan de CO_2 el que se caracteriza por estar empobrecido en ^{13}C y con valores de ^{14}C sobre 100 pCM. Los datos de ^{13}C a lo largo del valle muestran una tendencia a valores más empobrecidos asociados a un aumento de la actividad de ^{14}C (9). Este comportamiento apoyaría la influencia del agua de retorno de riego en el acuífero. La existencia de valores ^{14}C en DIC (Carbono Inorgánico Disuelto) más bajos requiere de una explicación adicional. Los valores más bajos se encuentran en la zona de vegas (4, 8, 9) lo cual podría explicarse por: (a) Una mezcla de agua moderna con aguas fósiles (15% como máximo) con valores ^{14}C cercanos a cero, caso poco probable según los antecedentes hidroquímicos. (b) Una mezcla entre aguas subterráneas de circulación profunda ligeramente más antiguas con aguas de circulación somera y más jóvenes, presenta una mayor factibilidad, especialmente favorable en zonas en donde el perfil de basamento hidrogeológico sufre fuertes disminuciones en su profundidad, coincidente con las zonas de vegas (4). (c) Disolución de carbonatos fósil, el que puede ocurrir tanto en la zona de recarga como en el acuífero. Estos procesos provocan una disminución de los valores ^{14}C a valores menores que 100 pCM, los que podrían estar en un rango de 85 a 65 pCM dependiendo de cómo sea el proceso de disolución de carbonatos. De esta forma, los valores bajos de 85 a 83 pCM podrían ser reflejo de la disolución de los carbonatos, con lo cual todas las aguas presentarían un tiempo de residencia de no más de 40 años. Por ello se puede establecer que no existen señales de aporte de aguas muy viejas asociadas a un flujo regional.

IMPLICACIONES HIDROGEOLÓGICAS Y GEOQUÍMICAS

Según antecedentes de la DGA (6), la recarga de los acuíferos del valle Copiapó, para el segmento Embalse Lautaro-Piedra Colgada, estaría asociada a infiltración directa del río Copiapó (1171 l/s), infiltración de canales matrices y canales secundarios (426 y 236 l/s), infiltración por riego predial (460 l/s) y aportes provenientes de quebradas que tributan al río Copiapó (570 l/s). Otros procesos que también podrían influir son las filtraciones del Embalse Lautaro (200 l/s) y la descarga de aguas servidas (220 l/s).

Los datos isotópicos también aportan información sobre la recarga al acuífero. La tendencia a valores isotópicos más enriquecidos a lo largo de valle tiene que estar asociada al proceso de evaporación que puede afectar a las aguas superficiales en el cauce del río o en la zona de riego. En esta última zona, el proceso de evaporación ocurre en la zona no saturada, y los efectos cinéticos debido a la difusión de gases son mayores que los generados por la evaporación a partir de superficies abiertas. Según (11), existen pérdidas de evaporación de agua durante las prácticas de riego y desde la zona no saturada a partir de procesos de difusión. Además señalan que el enriquecimiento de ^{18}O y ^2H en las aguas producto de los retornos por riego que pueden seguir una pendiente de entre 2,5 y 5,5, dependiendo de la humedad relativa. De las figuras 2, 3 y 4 se puede establecer que los procesos de enriquecimiento isotópico son mayores hacia la parte baja del valle, fenómeno acompañado por un incremento en la salinidad de las aguas. Según ello, es posible establecer que los aumentos en la salinidad de los acuíferos están relacionados con los procesos de riego, aunque no se descarta la influencia de la infiltración de aguas superficiales afectadas por evaporación. Consecuentemente, es probable que estos procesos se intensifiquen (Fig. 4) en sectores donde el nivel estático es somero (4) por evaporación a partir de la zona no saturada. Cabe señalar que, la transpiración también concentra sales en los suelos, pero el agua residual no sufre cambios isotópicos (11).

Antecedentes de $\delta^{18}\text{O}$ para las precipitaciones en el norte de Chile (19° - 21° Lat. Sur) señalan valores de -18 a -15 ‰ para zonas de elevada altitud (Altiplano) y de -10 a -6 ‰, para áreas de baja altitud (10). Los bajos valores de $\delta^{18}\text{O}$ (valores empobrecidos en ^{18}O) observados en el Altiplano, se relacionan a los procesos que afectan las masas de aire originadas sobre el Atlántico, cruzan la cuenca Amazónica (efecto continental), ascienden a los Andes (efecto de altitud) y precipitan (efecto convectivo). Los mayores valores de $\delta^{18}\text{O}$ (valores enriquecidos en ^{18}O) observados a menores altitudes, hacia el oeste, se relacionan con fuentes de humedad provenientes de las masas de aire del Pacífico (10).

Valores $\delta^{18}\text{O}$ para muestras de agua subterránea y superficial del Altiplano de la III Región (Iriarte y Aravena, comunicación escrita) corregidos matemáticamente por (8) de supuestos efectos de enriquecimiento isotópico por evaporación, (-17,5 y -11,5 ‰), señalan valores $\delta^{18}\text{O}_{\text{corr}}$ que incluyen a los $\delta^{18}\text{O}_{\text{corr}}$ obtenidos para el valle del río Copiapó (-14,7 y -11,3 ‰, Fig. 2), lo que en conjunto con valores inferiores a 10 ‰ para el exceso de deuterio (d) obtenidos para las aguas subterráneas del valle del río Copiapó (-7 a 10 ‰), según (8, 9), señalan un origen para el agua fuertemente vinculado a las precipitaciones del "Invierno Boliviano". Sin embargo, si en el gráfico $\delta^2\text{H}$ v/s $\delta^{18}\text{O}$ (Fig. 2) consideramos una pendiente de evaporación menor (-2) a la usada en la corrección de los valores $\delta^{18}\text{O}$ ($\delta^{18}\text{O}_{\text{corr}}$) descrita previamente (~4,5), obtenemos valores $\delta^{18}\text{O}_{\text{corr}}$ que alcanzan un máximo de -6,6 ‰, el que se acerca mucho más a los valores reconocidos por (10) para fuentes de humedad provenientes de masas de aire del Pacífico. Por otro lado, no se pueden desestimar los antecedentes históricos (5), que señalan que las mayores precipitaciones a lo largo del valle ocurren en los meses de mayo a agosto, concentrándose en el invierno de Copiapó. De estos antecedentes y de (2, 5, 6), se deduce una relación directa entre precipitaciones ocurridas en estas fechas e infiltración y ascenso en los niveles estáticos del valle Copiapó.

Cabe señalar que la utilización de valores $\delta^{18}\text{O}_{\text{corr}}$ puede suponer errores al no conocer con exactitud la pendiente de evaporación que afectaría a la totalidad de las muestras y al asumir un valor fijo para ella. Lo anterior, simplifica, enormemente el problema quedando abierta la posibilidad de que la variabilidad detectada en los valores $\delta^{18}\text{O}_{\text{corr}}$ represente aportes diferentes a lo largo del valle Copiapó. Sin embargo, al considerar los valores $\delta^{18}\text{O}$ (sin corrección por evaporación) para una zona más restringida, como la zona de cabeceras del valle del río Copiapó (-12,6 a -10,5 ‰) y la Laguna del Negro Francisco (-13,48 y -7,38 ‰), también se observa que existe una similitud entre los valores de $\delta^{18}\text{O}$ para ambas zonas. De esta forma, para las aguas que recargan al valle del río Copiapó es posible suponer un origen similar, al menos en parte, al de las masas de aire que dan origen a las precipitaciones que recargan a la Laguna del Negro Francisco.

Según los antecedentes presentados por (10), los valores $\delta^{18}\text{O}$ detectados en muestras de agua en la Laguna del Negro Francisco (-13,48 y -7,38 ‰) se acercan mucho más a los valores $\delta^{18}\text{O}$ detectados por (10) para las precipitaciones originadas a partir de masas de aire provenientes del Pacífico (-10,0 a -6,0 ‰) que del "Invierno Boliviano" (-18,0 a -15,0 ‰). Según estos mismos antecedentes, los valores $\delta^{18}\text{O}$ detectados en las cabeceras del valle del río Copiapó (-12,6 a -10,5 ‰) quedan en un rango intermedio al proporcionado por (10) para el origen de las precipitaciones entre los 19° y 21° Lat. Sur. De esta forma y sin antecedentes isotópicos directos de las precipitaciones para la zona de estudio, es muy probable que las precipitaciones que recargan las cabeceras del valle del río Copiapó tengan un origen mixto, es decir a partir de una combinación entre las masas de aire que dan origen a las precipitaciones del Invierno Copiapino y del Invierno Boliviano.

CONCLUSIONES

Los resultados de los análisis isotópicos de tritio y carbono-14, consistentes con antecedentes hidroquímicos e hidrogeológicos, señalan que la mayor parte de las aguas subterráneas del valle del río Copiapó poseen un tiempo de residencia inferior a los 40 años, sin señales importantes de infiltración por aguas fósiles o de aguas con elevados tiempos de residencia, como se podría esperar si esta proviniera del Altiplano. Estos resultados indican que el acuífero del valle del río Copiapó es bastante susceptible a los procesos de contaminación y a la introducción de cualquier contaminante en la parte alta y/o intermedia del valle. Lo anterior presenta particular relevancia ante la factibilidad de que estos contaminantes afecten a los pozos de la parte baja del valle en un tiempo relativamente reducido. A su vez, a partir de los antecedentes de isótopos estables disponibles para la zona, se puede establecer que la recarga de los acuíferos tendría un origen mixto, vinculado tanto a precipitaciones invernales como a partir de precipitaciones estivales (Invierno Boliviano). Por último, los antecedentes de isótopos estables en conjunto con los datos hidroquímicos, señalan que uno de los procesos importantes en la recarga son los retornos por riego, los que enriquecen a los acuíferos con aguas más salobres debido a la evaporación a que estarían sometidas durante y después del riego.

AGRADECIMIENTOS

En los trabajos de muestreo de enero de 1998, se contó con la colaboración de Arturo Hauser, Alberto Pollastri y Pedro Moya. Así mismo Jorge Lemp junto a otros conductores del Sernageomin colaboraron durante los trabajos de terreno. Loreto Morales colaboró eficientemente en la campaña de agosto de 1999. Carmen Espejo, Loreto Morales y Oscar López contribuyeron con los análisis químicos. Ramón Aravena realizó un importante aporte en el desarrollo y buen término de este trabajo. De igual forma Constantino Mpodozis y Sergio Iriarte proporcionaron adecuados comentarios. Hans Weber brindó gran apoyo para la ejecución de los trabajos. Finalmente es necesario indicar que esta publicación fue auspiciada, patrocinada y editada por la Subdirección Nacional de Geología del Sernageomin.

REFERENCIAS

1. Aguirre, I. 1997. Análisis de isótopos estables en las aguas del valle del río Copiapó y sus afluentes. Informe Inédito Sernageomin. Santiago. 16 p.
2. Aguirre, I. 1999. Hidrogeología del valle del río Copiapó entre el Tranque Lautaro y Piedra Colgada (Inédito). Tesis para optar al Grado de Magister en Geofísica y Memoria para optar al Título de Geólogo, Universidad de Chile, Departamento de Geofísica; Departamento de Geología, 266 p. Santiago.
3. Aguirre, I.; Hauser, A.; Schwerdtfeger, B.; 1999. Estudio hidrogeológico del valle del río Copiapó, segmento Embalse Lautaro - Piedra Colgada, Región de Atacama. Servicio Nacional de Geología y Minería (Chile), Informe Registrado IR-99-17, 2 mapas escala 1:50.000. Santiago.
4. Aguirre, A.; Hauser, I. 2000. Potencial Hidrogeológico del valle del río Copiapó, Segmento Embalse Lautaro-Piedra Colgada, III Región, Chile. Presentado al 9 Congreso Geológico, Puerto Varas.
5. Dirección General de Aguas. 1987b. Análisis y Evaluación de los Recursos Hidrogeológicos. Valle del río Copiapó-III Región. Dirección General de Aguas. 2 v. y 8 anexos. Vol. 1, 338 p. y Vol. 2, 267 p, Santiago.
6. Dirección General de Aguas. 1995. Análisis y evaluación de recursos hídricos en el valle del río Copiapó III Región (Inédito). Dirección General de Aguas - Alamos y Peralta Ings. Consultores Ltda. . 2 v. Vol. 1, 252 p. Vol. 2, 73 p. Santiago.
7. Geyh, M.A. 1997. Isotope hydrological study in the valley Copiapó (Part I). Informe Inédito BGR-Technical Cooperation Project N°92.2027.8. 17 p. Hannover.
8. Geyh, M.A. 1998. Isotope hydrological study in the valley Copiapó (Part II). Informe Inédito BGR-Technical Cooperation Project N°92.2027.8. 20 p. Hannover
9. Geyh, M.A. en prep. 2000. Isotope hydrological study in the valley Copiapó (Part III). Informe Inédito BGR-Technical Cooperation Project N°92.2027.8. 20 p. Hannover.
10. Aravena, R.; Suzuki, O., Peña, H.; Pollastri, A.; Fuenzalida, H.; Grilli, A. 1999. Isotopic composition and origen of the precipitation in Northern Chile. Applied Geochemistry 14 (1999) 411-422. Elseiver Science Ltd.
11. Clark, I.; Fritz, P. 1997. Environmental Isotopes in Hydrogeology. 328 p. By CRC Press LLC. Unites States of America.