

GEOQUIMICA DE AGUAS EN CUENCAS CERRADAS I, II Y III REGIONES-CHILE

SALAZAR, CARLOS (DGA),

ROJAS, LUIS (DGA),

ALONSO, HUGO (UCN),

RISACHER, FRANÇOIS (ORSTOM-FRANCIA)

*Dirección General de Aguas. Morandé 59. Piso 8. Santiago
Universidad Católica del Norte, Dpto. Química. Antofagasta*

ORSTOM - Francia

RESUMEN

El estudio abarca 53 cuencas cerradas, es decir cuya base son salares o lagunas, ubicadas en la zona altiplánica que se extiende entre la I y III Regiones, en el norte de Chile. El objetivo apunta a la caracterización hidroquímica de las aguas afluentes; efectuar el balance hídrico de las lagunas; y determinación de la evolución hidrogeoquímica y los principales factores que la controlan.

Se estableció que los componentes disueltos tienen un doble origen, la alteración de rocas volcánicas o sedimentarias por aguas meteóricas o hidrotermales; y la redisolución de sales evaporíticas y salmueras residuales de antiguos salares recubiertos por formaciones volcánicas más recientes; siendo este último el principal mecanismo de salinización de las aguas de aporte.

El análisis de las vías evolutivas permitió establecer dos grandes grupos (sulfatado y cálcico), y dos casos excepcionales de salares con salmueras ácidas. Se propone una clasificación de aguas a partir de las vías evolutivas, considerando las razones Alc/Ca , $Alc/(Ca+Mg)$ y $(Alc+SO_4)/Ca$.

INTRODUCCION

El estudio de las cuencas cerradas de la I, II y III regiones, es altamente relevante, pues de ellas se extrae el agua para el uso urbano y para las principales faenas mineras. Considerando que las mayores inversiones anunciadas para Chile ocurrirán en la minería, los requerimientos de agua se verán notoriamente aumentados, por ejemplo, en 1993 la demanda hídrica sobre estos recursos alcanza los 7 m³/s, con una demanda regional cercana a 35% de este valor, sin embargo, se espera que en el futuro (2017) esta demanda se duplique, concentrando el 50% en la I Región (DGA, 1996).

A través de un convenio, entre la Dirección General de Aguas (DGA), del Ministerio de Obras Públicas, la Universidad Católica del Norte (UCN), y el Instituto Francés de Investigación Científica para el Desarrollo en Cooperación (ORSTOM), se realiza el estudio de

geoquímica de aguas en cuencas cerradas en las regiones I, II y III. Este estudio abarca 53 cuencas cuya base la constituyen lagos salados y salares, cuyo listado y ubicación se presenta en la figura 1. Los objetivos del programa fueron a la vez aplicados y investigación. Se estudió la calidad de las aguas de los aportes, el balance hídrico-salino y la hidroquímica de las lagunas saladas, así como, el origen de las sales y de los factores que controlan la hidrogeoquímica de los salares.

INCRUSTAR Word.Picture.8

Figura 1 - Ubicación de las cuencas estudiadas

ANTECEDENTES GENERALES DEL AREA DE ESTUDIO

La evolución estructural del borde occidental-sur de América del Sur está relacionada a la tectónica de bloques originada por deformaciones en la corteza de la Placa Sudamericana debido al esfuerzo producido por la subducción bajo ella de la Placa de Nazca. Una sucesión de etapas de compresión y distensión, cuyo resultado fue la formación de grandes bloques estructurales caracterizados por una serie de horst y graben de orientación norte-sur, los que de oeste a este son: Fosa marina de Chile-Perú - Cordillera de la Costa - Depresión Central - Precordillera - Cuencas Preandinas - Cordillera de los Andes o Cordillera Occidental. En el presente trabajo se denomina Cordillera de los Andes o Cordillera Andina a la rama occidental de la Cordillera de los Andes que en el norte de Chile constituye el borde oeste del Altiplano, siendo el borde este la Cordillera Oriental.

La zona estudiada está entre las más áridas del planeta y lo ha sido así desde el Mioceno Medio, hay evidencias de cierta actividad pluvial durante el Plioceno, Pleistoceno y Cuaternario, así como de una glaciación pleistocénica. El levantamiento de la Cordillera de la Costa detuvo el drenaje hacia el Océano Pacífico a partir del Oligoceno Inferior y el levantamiento de los Andes Centrales durante el Oligoceno y Mioceno fue un factor que hizo de barrera a las precipitaciones desde el Amazonas estabilizando el anticiclón del Pacífico, configurándose sistemas hidrográficos endorreicos, particularmente andinos y preandinos, cuyo nivel de base hidrológico es un salar o una laguna.

EVOLUCION DE AGUAS EN CUENCAS CERRADAS

En zonas áridas, clasificar las aguas diluidas según la vía evolutiva que siguen cuando se evaporan permite relacionar aguas de salinidad y composición muy distintas, no sólo considerando las concentraciones de los componentes, sino también sus cambios cuando el agua se evapora. Sin embargo, la modelación de la evolución de aguas por evaporación que considere las condiciones reales a que está sujeta el agua de aporte es de difícil aplicación práctica. Existen dos maneras de proceder, una cualitativa y rápida que no requiere mayores medios informáticos y una cuantitativa que utiliza un programa computacional.

La metodología cualitativa se basa en la noción de alcalinidad expresada como la diferencia (en miliequivalentes) entre la suma de los cationes de bases fuertes y la suma de los aniones de ácidos

fuertes. Dependiendo de las concentraciones iniciales el cálculo de solamente tres razones (alc/Ca , $\text{alc}/(\text{Ca}+\text{Mg})$ y $(\text{alc}+\text{SO}_4)/\text{Ca}$, (en milliequivalentes) del agua de aporte permite determinar la vía evolutiva. La distinción entre vía sulfatada alcalina y vía sulfatada directa es de poca relevancia. Las dos son muy vecinas y tienen el mismo significado geoquímico: son aguas diluidas que han drenado terrenos volcánicos con poco azufre.

$[\text{alc}] > [\text{Ca}]$ y $[\text{alc}] > [\text{Ca}] + [\text{Mg}] \implies$ vía carbonatada
 $[\text{alc}] > [\text{Ca}]$ y $[\text{alc}] < [\text{Ca}] + [\text{Mg}] \implies$ vía sulfatada alcalina o directa
 $[\text{alc}] < [\text{Ca}]$ y $[\text{alc}] + [\text{SO}_4] > [\text{Ca}] \implies$ vía sulfatada neutra
 $[\text{alc}] < [\text{Ca}]$ y $[\text{alc}] + [\text{SO}_4] < [\text{Ca}] \implies$ vía cálcica

En la metodología cuantitativa se aplican programas computacionales complejos que calculan exactamente la composición química de un agua que se evapora y determinan los minerales que precipitan. Los algoritmos se basan en las leyes de equilibrio y las composiciones calculadas son, por supuesto, teóricas, corresponden a un agua que se evapora en una pileta sin interacción con sedimentos y polvos eólicos, sin actividad biológica, sin mezclas con otras aguas y sin ninguna sobresaturación de los minerales que precipitan. A pesar de todas las interferencias posibles durante la evaporación del agua, el modelo computacional es capaz de seguir con fidelidad la evolución real de la solución. Eso se debe en gran parte a que las interferencias tienen poco peso en soluciones salobres y saladas. Las mayores divergencias ocurren al principio de la evaporación cuando las aguas son todavía muy diluidas. El resultado de la simulación es un conjunto de análisis que van desde el agua inicial hasta una salmuera de salinidad total siempre superior a la salinidad de la laguna estudiada. Se compara el análisis de la laguna con la composición calculada de misma salinidad total, o también se puede interpolar una composición entre dos composiciones calculadas cuyas salinidades encuadran la salinidad de la laguna.

Distribución de las aguas de aportes según vías evolutivas

En la figura 2 se muestran todas las aguas de aportes según las distintas vías evolutivas y el número de lagunas de cada uno de los megagrupos químicos: carbonatado, sulfatado, cálcico y ácido. El total de lagunas es superior al número de cuencas. Se debe a que 8 cuencas contienen lagunas de dos tipos químicos distintos. Existe una anomalía mayor: hay 53 aguas de aporte que siguen teóricamente la vía

carbonatada, pero solamente una laguna es carbonatada. La casi total ausencia de lagunas carbonatadas en esta zona de los Andes chilenos se debe a dos factores; a) las aguas de aporte que siguen la vía carbonatada se encuentran diseminadas en varias cuencas donde se mezclan con aguas de otras vías evolutivas, b) la depositación de azufre eólico sobre las formaciones superficiales de las cuencas de drenaje ha sido puesto en evidencia en el vecino Altiplano boliviano (Risacher y Fritz, 1991). Al disolverse en las aguas de aporte carbonatadas, el azufre produce ácido sulfúrico que neutraliza parte del carbonato. Es muy probable que el mismo mecanismo afecte también las aguas de aporte chilenas.

La casi totalidad de las soluciones salinas de las lagunas y salares chilenos pertenecen a los dos mega-grupos sulfatado y cálcico. Hay 39 lagunas o salares sulfatados, 19 cálcicos y 2 ácidos (Gorbea e Ignorado). El fuerte predominio de salares y lagunas sulfatadas se debe obviamente a la abundancia del azufre en los volcanes de la Cordillera de los Andes. La mayor parte de los salares cálcicos se encuentran también en un ambiente volcánico y la composición de sus aguas de aporte no tiene relación con la litología superficial de las cuencas de drenaje. Proviene de la disolución de salmueras residuales cálcicas de antiguos salares recubiertos por formaciones volcánicas.

Fig.2 - Recuento de las vías evolutivas y de las composiciones de las lagunas

ORIGEN DE LOS COMPONENTES EN AGUAS

Relación entre litología y vía evolutiva

El cuadro siguiente resume la relación entre litología de la cuenca y vía evolutiva. Los valores de salinidad de las aguas de alteración son ilustrativos; puede haber mucha variación, en particular para las aguas de rocas sedimentarias. La figura 3 muestra la distribución de todas las aguas de aporte de las cuencas cerradas estudiadas. Se observa claramente el aumento de salinidad desde las aguas de vía carbonatada hasta las de vía cálcica.

Fig.3 - Histogramas de salinidades de las aguas de aporte agrupadas según sus vías evolutivas.

Es posible sintetizar en el siguiente esquema la relación entre la litología de una cuenca cerrada y la naturaleza de las sales evaporíticas que precipitan en su salar.

Existen también varias cuencas que contienen a la vez formaciones volcánicas y sedimentarias. Cuando las distintas formaciones están bien separadas en la cuenca, cada una de ellas provee aguas de alteración que reflejan la litología de su sector.

Aportes atmosféricos

Con excepción del As y el NO₃, la magnitud de los componentes salinos aportados por las nieves son despreciables en comparación con los originados por la alteración de rocas y la disolución de antiguas evaporitas presentes en los aportes. El origen eólico de estos dos componentes en las nieves es obvio, y es probable que su existencia en las napas subterráneas tengan el mismo origen debido a la similitud de las concentraciones encontradas en las nieves y en los aportes. Aunque no debe descartarse un aporte adicional debido a la alteración de rocas, en particular para el arsénico, este proceso no es predominante.

Balance hídrico de las lagunas

Una laguna permanente en una cuenca cerrada bajo clima árido recibe agua por la cuenca de drenaje (vertientes, ríos, napas subterráneas), y también por las precipitaciones directas sobre el espejo de agua. Pierde agua por evaporación desde la superficie y también por infiltraciones en el fondo de la laguna (Fig.4). Si se considera despreciable la transpiración por vegetación en los bordes y se resuelve el sistema de ecuaciones establecido entre el balance hídrico y el balance salino de un componente conservativo, se obtiene las siguientes relaciones:

$$Vap = S(He - Hp) / (1 - Cap/CL)$$

$$Vi = S(He - Hp) / (CL/Cap - 1)$$

En donde:

- S : superficie de la laguna (en m²)
- He : altura de evaporación potencial (en m/año)
- Hp : altura de las precipitaciones (en m/año)
- Ve = SHe : volumen de agua evaporada desde la superficie

- (en m³/año)
- V_p = SH_p : volumen de precipitaciones sobre la superficie (en m³/año)
 - V_{ap} : volumen de los aportes por la cuenca de drenaje (en m³/año)
 - V_i : volumen de las infiltraciones (en m³/año)
 - C_{ap} : concentración promedio de un componente conservativo de los aportes (g/l)
 - C_L : concentración promedio de ese componente conservativo en la laguna (g/l)

El coeficiente de escorrentía, definido como la razón entre el volumen de agua que entra en la laguna y el que cae sobre la cuenca de drenaje se expresa como:

$$C_{esc} = V_{ap} / V_{dr} = S/S_{dr} \times (H_e/H_p - 1)$$

Fig.4 - Balance hídrico y balance salino de una laguna en una cuenca cerrada en clima árido.

Esta expresión es válida sólo para las cuencas cuya depresión central está ocupada en totalidad, o en gran parte, por una laguna y su aplicación ha permitido el análisis de la hidrología de las cuencas en estudio.

Se observa un gran rango de variación para el coeficiente de escorrentía, que va desde 0,005 (0,5%) hasta 0,453 (45,3%), o sea de casi un factor 100. El promedio se sitúa entre 0,10 y 0,15 (10 a 15%). Coeficientes muy altos, sugieren que los aportes a la laguna no provienen exclusivamente de lo que cae sobre su cuenca de drenaje, consecuentemente existen aportes subterráneos desde otras cuencas.

Por otra parte, coeficientes muy bajos (0,5% y 0,8%) indican que una muy pequeña parte de las aguas que caen sobre la cuenca de drenaje llega hasta la laguna. Una gran parte del agua faltante se ha infiltrado, alimentando napas subterráneas y una cierta proporción se ha evaporado antes de infiltrarse. Un coeficiente de escorrentía bajo no es forzosamente un indicio negativo en prospección de agua. Sugiere la existencia de napas subterráneas bien alimentadas.

Calidad de potabilidad

La salinidad y el arsénico son los dos componentes que casi siempre limitan la potabilidad de las aguas. El nitrato, que constituye en el Valle Central los yacimientos de NaNO_3 más importantes del mundo, no es un componente importante de las aguas de aporte. En otro sentido, la calidad de aguas está nítidamente relacionada con sus vías evolutivas. Casi la mitad de las aguas de vía carbonatada es potable. La proporción baja a 39% para las aguas de vía sulfatada directa y alcalina y a 17% para las de vía sulfatada neutra. En cuanto a las aguas de vía cálcica, solamente el 1,5% es potable. La vía carbonatada refleja aguas que drenan rocas volcánicas sin azufre ni mineralizaciones; no se salinizan mucho. Contrariamente las aguas de vía cálcica drenan terrenos sedimentarios o han rediseuelto salmueras cálcicas residuales; tienen una salinidad elevada. Entre los extremos, las aguas de vía sulfatada alcalina tienden a ser de mejor calidad que las que siguen la vía sulfatada neutra. Mientras más azufre en la cuenca, de menor calidad las aguas de aporte

El 32% de las aguas de vertientes fluyentes está dentro de la norma chilena de potabilidad. Los ríos y napas lo están en una menor proporción: 20 a 25%, y casi no hay vertiente difusa cuya agua sea potable. Las vertientes fluyentes potables, que son las más diluidas, están alimentadas en gran parte por las precipitaciones que se infiltran cuenca arriba; las aguas siguen un trayecto corto en rocas volcánicas.

Calidad de riego

Los componentes que intervienen mayormente en la limitación de calidad de aguas para riego son la salinidad (1000 mg/l), el boro (0,75 mg/l) y el arsénico (0,100 mg/l). A pesar de ser más tolerante la norma de riego que la norma de potabilidad para STD y As, hay menos aguas aptas para el riego que para el consumo humano. Esto se debe a la muy baja concentración límite del boro en la norma de riego. Las rocas

volcánicas de los Andes Centrales contienen boro fácilmente lixiviable; puede haber concentraciones apreciables en aguas muy diluidas, por ejemplo en aguas de vía carbonatada y sulfatada directa o alcalina.

CONCLUSIONES

Las principales preguntas planteadas al principio del estudio fueron: ¿de dónde provienen los componentes disueltos en las aguas?, ¿cuál es la razón de la variedad de composiciones químicas de las lagunas?, ¿cuáles son los sectores favorables para la prospección de aguas de buena calidad?, ¿es posible estimar balances hídricos con los datos disponibles?.

Los componentes disueltos en las aguas de aporte tienen un doble origen: a) la alteración de rocas volcánicas o sedimentarias de la cuenca de drenaje por aguas meteóricas o hidrotermales. b) la redisolución de sales evaporíticas y salmueras residuales de antiguos salares recubiertos por formaciones volcánicas más recientes. Este último es el principal mecanismo de salinización de las aguas de aporte. Algunos salares parecen resultar en gran parte de la removilización de antiguos salares lixiviados por los aportes actuales.

Las aguas de alteración de rocas volcánicas sin azufre siguen la vía carbonatada. Si nada interfiere en su evolución, llegan a salmueras carbonatadas de tipo Na / CO₃-Cl. Las aguas de alteración de rocas volcánicas con azufre siguen una vía sulfatada directa, alcalina o neutra, dependiendo de la cantidad de azufre. Estas tres vías llegan a salmueras sulfatadas del tipo Na / SO₄-Cl. Las aguas de alteración de rocas sedimentarias siguen en general la vía cálcica que llega a salmueras cálcicas de tipo Na-Ca / Cl. La casi totalidad de las salmueras de las lagunas y salares chilenos pertenece a los dos mega-grupos sulfatado y cálcico. Es la principal característica geoquímica de los salares chilenos. La presencia de salares cálcicos en ambientes volcánicos refleja la proximidad de formaciones sedimentarias o de antiguos salares cálcicos por debajo de las estructuras volcánicas.

La salinidad y el arsénico son los dos componentes que casi siempre limitan la potabilidad de las aguas. Para uso en riego, hay que agregar el boro. La calidad de aguas está relacionada con sus vías evolutivas. Desde el punto de vista litológico, las aguas de mejor calidad se encuentran en terrenos volcánicos sin azufre ni mineralizaciones y de preferencia en sectores altos de la Cordillera, lejos del basamento

sedimentario. Tales condiciones se encuentran más frecuentemente en la Primera Región. El norte de la Tercera Región es la zona menos favorable para la prospección de aguas diluidas.

El balance hídrico de las lagunas permitió, con pocos parámetros, estimar el coeficiente de escorrentía de las cuencas. Coeficientes muy altos (> 30%) sugieren que los aportes a la laguna no provienen exclusivamente de lo que cae sobre su cuenca de drenaje, pero que recibe aportes subterráneos desde otras cuencas. Coeficientes muy bajos (< 1%) indican que una muy pequeña parte de las aguas que caen sobre la cuenca de drenaje llega hasta la laguna. Un coeficiente de escorrentía bajo no es forzosamente un indicio negativo en prospección de agua. Sugiere la existencia de napas subterráneas bien alimentadas.

REFERENCIAS

RISACHER F.; ALONSO H.; SALAZAR C.1998. Geoquímica de Cuencas Cerradas, I,II y III Regiones. DGA-UCN-ORSTOM.

RISACHER, F.; FRITZ, B. 1991a. Geochemistry of Bolivian salars, Lipez, southern Altiplano.

DGA. 1987. Balance Hídrico de Chile.

DGA. 1996. Análisis Uso Actual y Futuro de los Recursos Hídricos de Chile.

INCRUSTAR Word.Picture.8