

# ESTUDIO DEL ORIGEN Y PROCESOS DE SALINIZACIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EN EL VALLE DE AZAPA. I REGION. CHILE

H. PEÑA, C. SALAZAR  
Dirección General de Aguas,  
Ministerio de Obras Públicas

A. POLLASTRI  
Comisión Chilena de Energía Nuclear,  
Santiago, Chile

## *Resumen - Abstract*

ESTUDIO DEL ORIGEN Y PROCESOS DE SALINIZACIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EN EL VALLE DE AZAPA. I REGION. CHILE

*El incremento en el uso de los recursos hídricos en el Valle de Azapa ha sido cada vez más intensivo, lo que ha planteado sobre el acuífero una demanda de agua creciente; detectándose además un paulatino deterioro de la calidad de las aguas. Utilizando tanto técnicas de hidrología isotópica como metodologías convencionales se efectuó un análisis orientado a estudiar el origen y movimiento de las aguas subterráneas y estudiar el posible impacto de los trasvases desde el sector altiplánico en el deterioro de la calidad del agua. Los resultados indican que en el valle se desarrolla un proceso de mezcla de aguas de diferentes orígenes, que se manifiesta con mayor intensidad en el sector alto; el deterioro de la calidad de las aguas no se relaciona con los trasvases sino más bien con la expansión agrícola que experimenta el valle.*

STUDY OF THE ORIGIN AND SALINIZATION PROCESSES OF GROUNDWATER IN THE AZAPA VALLEY, I REGION. CHILE

*The increasing requirements from domestic and agricultural uses intensify the groundwater demand and are raising water quality problems. Water quality and isotopic data were used to analyze: a) the origin and movement of groundwater, b) impact due to diverted water from Chilean altiplano (Lauca river). Collected data show a mixing process between waters of different origin, mixing is stronger in higher areas. No correlation exists between water quality problems and agricultural expansion.*

## I. INTRODUCCION

Uno de los principales factores que limita el desarrollo del Norte Grande es su extremada aridez. Es el caso de la ciudad de Arica, la cual presenta una situación crítica debiendo mantener permanentemente un sistema de racionamiento de los consumos.

Para cubrir el déficit de recursos hídricos, en 1962 fue puesto en operación un canal para el trasvase de agua (700 a 800 l/s) al río San José desde el río Lauca, ubicado en el sector altiplánico. Sin embargo, la situación de déficit se ha agravado como resultado del crecimiento urbano de la ciudad de Arica y de la zona agrícola, detectándose además problemas de salinización de las aguas, lo que resulta especialmente grave considerando las limitaciones ya señaladas.

El presente trabajo tiene como propósito general entregar una visión global orientada a mejorar la gestión del acuífero. Cabe destacar que se han empleado técnicas de hidrología isotópica, teniendo en cuenta que es posible suponer que las aguas altiplánicas tendrán una composición isotópica diferente de las aguas propias del valle. Los objetivos específicos del estudio son: a) analizar el origen, movimiento y procesos de salinización de las aguas subterráneas en el Valle de Azapa y b) analizar el impacto de las aguas provenientes del río Lauca (via canal e trasvase) en las aguas subterráneas originales del acuífero en explotación.

## **II. DESCRIPCION DE LA ZONA**

### **1. Geología e hidrogeología**

El curso inferior del Valle de Azapa, comprendido entre la bocatoma del canal Azapa y la desembocadura del río San José se ha desarrollado cortando principalmente las formaciones de Oxaya y Azapa, atravesando rocas de tipo intrusivo en el sector de Cabuza; rocas estratificadas volcánicas, sedimentarias jurásicas y cretácicas correspondientes a las formaciones Camaraca, Los Tarros y Ajataña; que presentan nulas a escasas perspectivas desde el punto de vista de su calidad como acuíferos. Los rellenos cuaternarios se constituyen en las principales fuentes de aguas subterráneas, siendo los depósitos fluviales actuales y aterrizados las principales vías de circulación y de recarga de las aguas subterráneas.

En general, puede señalarse que los acuíferos principales de la cuenca tienden a ubicarse a profundidades variables entre 0 y 70 m., dando lugar a la existencia de napas libres, algunas de las cuales estarían en condiciones de semi-confinamiento.

A pesar de la continuidad longitudinal del relleno en la cuenca, algunos estudios la separan en tres sectores, atendiendo a la presencia de irregularidades que provocan discontinuidad en el flujo subterráneo, debido a disminuciones locales de la transmisibilidad, que se traducen en descensos de la cota del nivel freático. Las secciones definidas son Cabuza-Albarracines; Albarracines - Alto Ramírez y Alto Ramírez - Desembocadura.

### **2. Clima**

Entre la costa y la cota 1.000 msnm, en un perfil oeste-este, se tiene un clima desértico y prácticamente no llueve. Entre la cota 1.000 y 2.000 msnm, se presenta un clima desértico normal, la pluviometría es escasa con lluvias ocasionales en la parte más alta. Entre la cota 2.000 y 3.000 msnm, se produce una importante variación en la magnitud y distribución de las lluvias por influencia de las masas de aire de origen ecuatorial continental que origina el llamado "invierno boliviano". Las lluvias anuales, con valores del orden de 200 mm en la parte alta, ocurren normalmente en el período comprendido entre diciembre y marzo.

A la cota 3.500 msnm ocurren precipitaciones en forma regular y de mayor magnitud siempre provocadas por el invierno boliviano; sobre los 4.500 msnm la precipitación es de tipo nival, con valores anuales del orden de 500 mm..

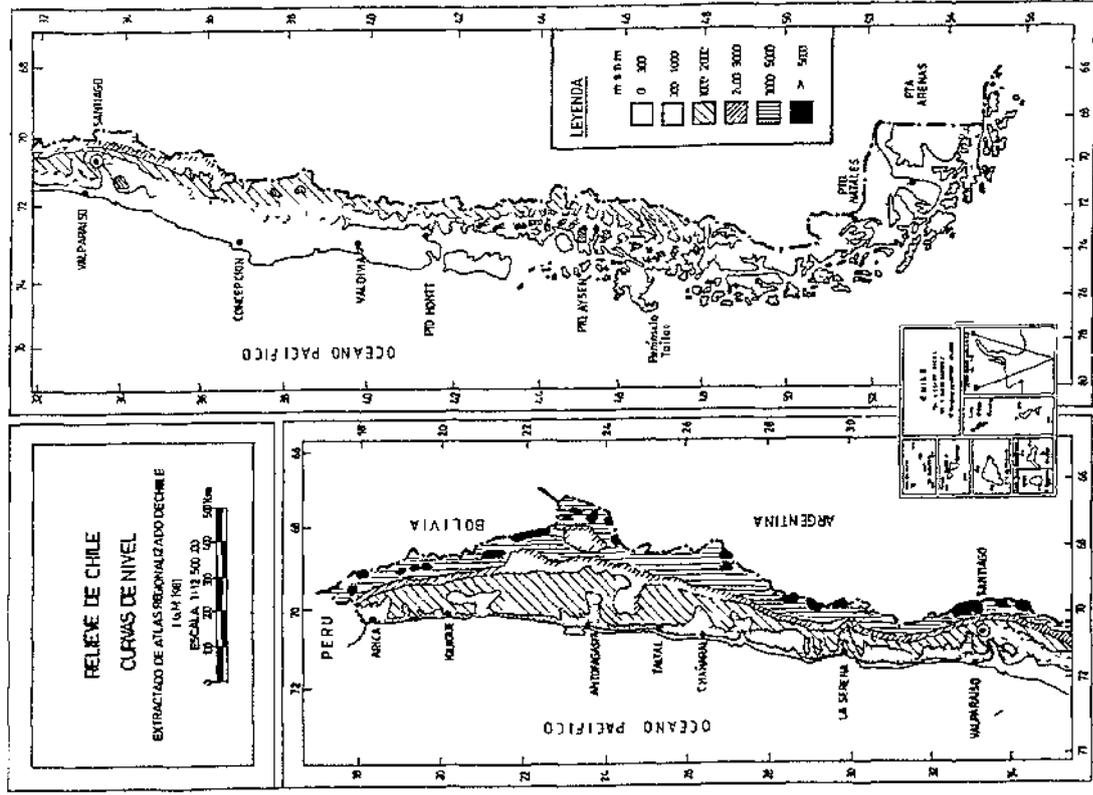
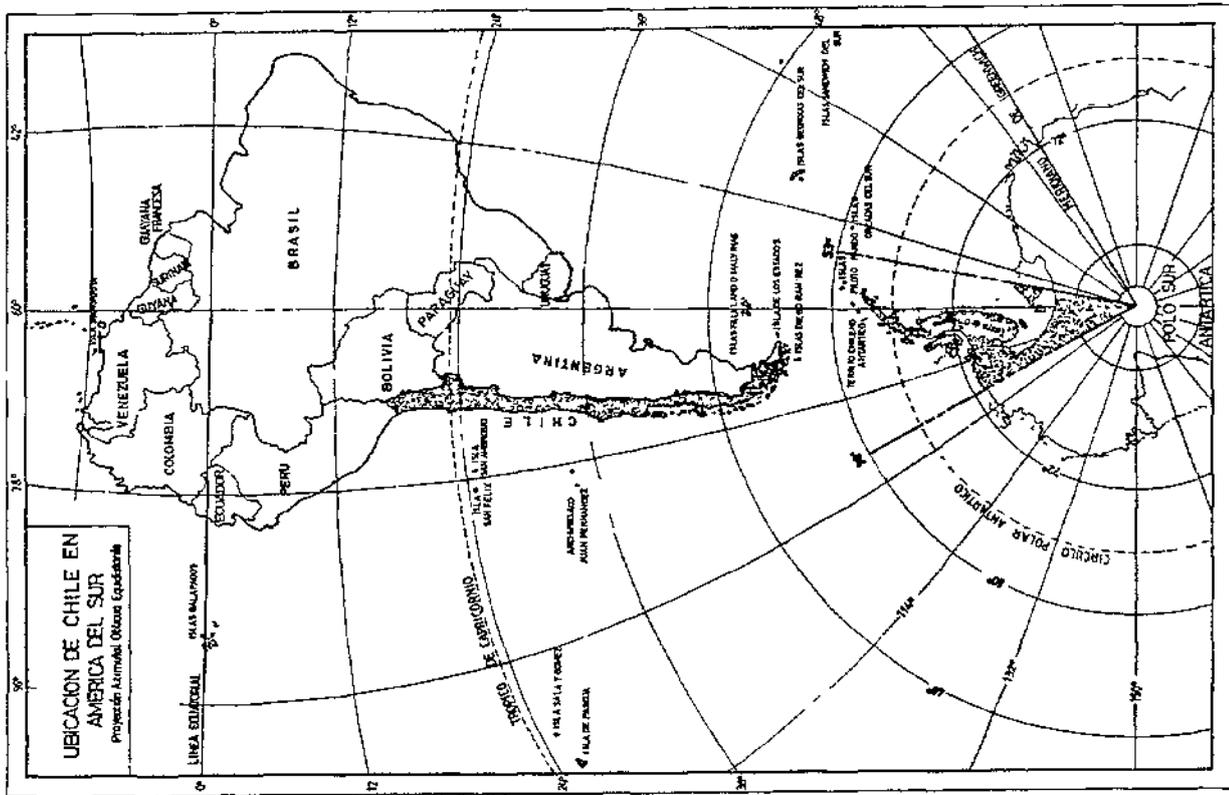


Fig. 1. Mapa de ubicación de la zona de estudio en la parte norte Chile. Region I.

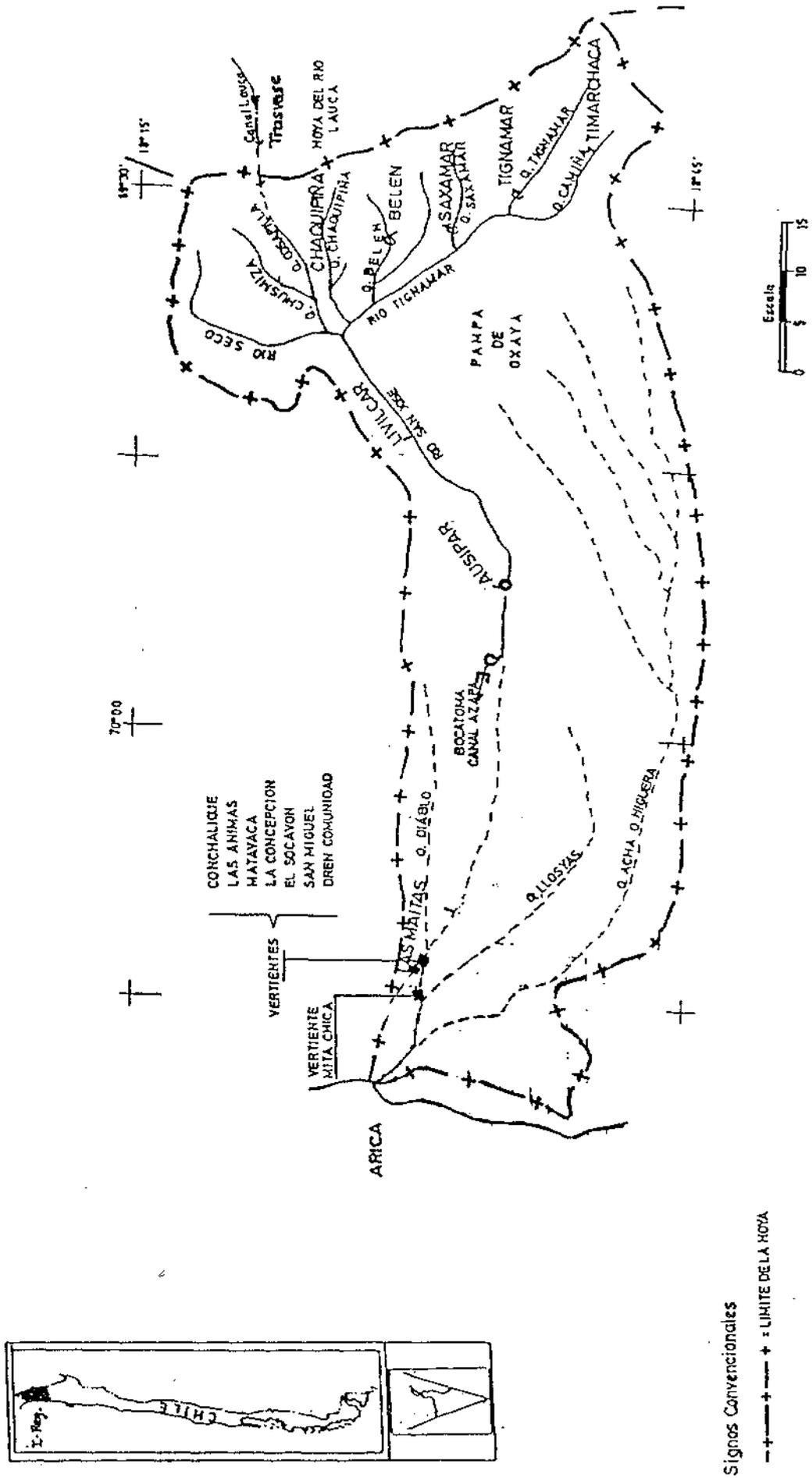


Fig. 2. Esquema de la Hoya del río San José.

### **3. Hidrología**

#### **a) Aguas Superficiales**

La cuenca del río San José abarca una superficie de aproximadamente 3.200 km<sup>2</sup>, quedando delimitada al Norte por los cordones montañosos que la separan de la cuenca del río Lluta; por el sur por la cuenca del río Codpa, y por el oriente por la cuenca del río Lauca (Figuras 1 y 2). La red de drenaje está constituida en el sector de cabecera, por los ríos Tignamar y Seco, que dan origen al río San José, cubriendo una superficie de 870 km<sup>2</sup>.

El régimen hidrológico del río San José se considera permanente hasta el sector de Humagata, llegando ocasionalmente hasta la altura de Livilcar respaldado por las precipitaciones de origen altiplánico, que se generan en la parte alta de la cuenca. Al régimen natural desde el año 1962 se superpone el agua aportada por el canal Lauca, cuyo caudal medio (1960-1980) alcanza unos 800 l/s, el cuál es captado por el canal Azapa. El caudal medio en el sector de captación varía entre 250 y 2.200 l/s, con un promedio del orden de 950 l/s; a nivel mensual los caudales promedio varían entre 640 y 2.000 l/s.

#### **b) Aguas subterráneas**

La forma angosta y alargada del Valle del río San José impone un sentido de escurrimiento longitudinal en prácticamente toda la cuenca, excepto en las cercanías de la costa (Figura 3).

Se estima que ingresa al sistema, a la altura de la bocatoma del canal Azapa, un gasto del orden de 300 l/s y de unos 600 l/s en el sector de Cabuza. La descarga del sistema subterráneo se produce tanto en forma natural como artificial; la descarga natural está dada por los caudales de afloramiento de 15 vertientes entre el sector de Cabuza y la desembocadura, las cuales se concentran en dos áreas específicas, las Riberas-Albarracines y Las Animás. La magnitud de dichos afloramientos varía considerablemente, en Albarracines fluctúa entre 70 y 140 l/s, y en Las Animás entre 0 y 150 l/s. La descarga artificial se efectúa a través de pozos y norias y se concentra principalmente en el valle, alcanzando unos 600 l/s.

La descarga neta al mar es muy pequeña (150 l/s), debido a los bajos gradientes en el sector costero; y a los niveles dinámicos que establecen las explotaciones en el propio sector; esto último genera inversiones que podrían provocar un problema de intrusión salina.

Del análisis de la variación de niveles se estima que para el sector comprendido entre Cabuza y Saucache (entrada de Arica) aumento en los niveles de 1 a 4 m, producen recargas entre 3 y 10 millones de m<sup>3</sup>; por otra parte en los períodos de desembalse los volúmenes alcanzan entre 3 y 6 millones de m<sup>3</sup>. Por su parte en la zona baja de la cuenca, se estiman volúmenes de recuperación que llegan a unos 4 millones de m<sup>3</sup> al año; las tendencias de disminución de niveles entregan volúmenes del orden de 17 millones de m<sup>3</sup> anuales. Cabe señalar que se detecta una ostensible variación en los niveles, con ciclos marcadamente descendentes y ascendentes y significativas recuperaciones asociadas principalmente a la recarga generada por crecidas.

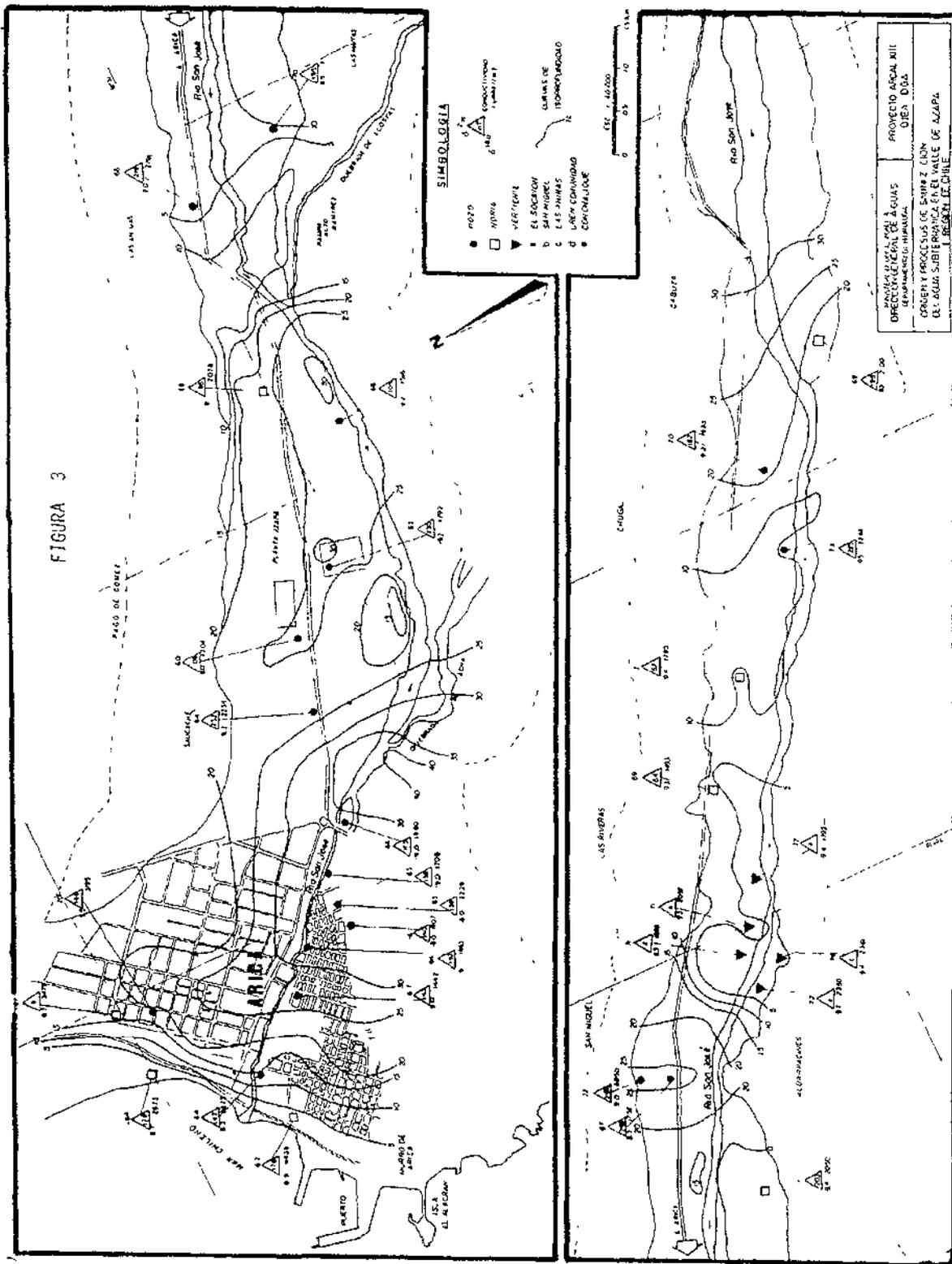


Fig. 3. Mapa de ubicación de los puntos de muestreo en varios tramos del río San José.

En general la determinación de los volúmenes de almacenamiento del sistema acuífero presenta cierta incertidumbre [1-2]; para el sector Cabuza-Albarracines se estima un volumen almacenado en torno a 260 millones de m<sup>3</sup>; de acuerdo con esto se estima en forma preliminar que el volumen almacenado total alcanza a alrededor de 500 millones de m<sup>3</sup>. Si se considera que los caudales totales de recarga al acuífero son del orden de 1 m<sup>3</sup>/s, ello significaría un tiempo medio de residencia de aproximadamente 16 años.

### **c) Infraestructura de Aprovechamiento de las Aguas**

El regadío del valle de Azapa se realiza a través de tres fuentes, la más importante la constituyen los recursos superficiales, fundamentalmente los provenientes desde el río Lauca a través de trasvases, que abastece alrededor de 1.900 Há.; estos recursos se distribuyen a través del canal Azapa y sus derivados (con pérdidas entre 13 y 25%). Otra fuente la constituyen las vertientes, las cuales pueden llegar a abastecer hasta unas 550 Há. La superficie abastecida por pozos es muy variable, ya que se utilizan para reforzar los recursos superficiales en época de déficit.

De acuerdo con los catastros de pozos, actualmente 145 sondajes se encuentran en funcionamiento; de estos se destina un 55% al abastecimiento de agua potable y un 38% para riego. El volumen de explotación anual alcanza a unos 52 millones de m<sup>3</sup>, de los cuales el 78% corresponde a agua potable, el 17% a riego y alrededor del 5% a uso industrial.

La explotación de las aguas subterráneas para abastecimiento de agua potable ha experimentado un crecimiento significativo en el tiempo, pasando de 100 l/s en el año 1950 hasta alrededor de 640 l/s en 1988, proyectándose un aumento de consumo para la década 1990-2000 del orden de un 30%. El uso industrial ha experimentado un crecimiento ostensible, aunque en menor escala, pasando de 5 l/s en 1970 a unos 50 l/s en 1988.

## **III. PROGRAMA DE MEDICIONES DE LA CONSTITUCION ISOTOPICA Y QUIMICA DE LAS AGUAS**

Con el objeto de coleccionar las muestras necesarias para el estudio se efectuaron tres campañas de muestreo en la zona (Marzo 1990, Noviembre 1990, Junio 1991). Los análisis químicos fueron realizados por la Dirección General de Aguas<sup>1</sup>; los análisis de isótopos se efectuaron en la Comisión Chilena de Energía Nuclear<sup>2</sup>, y en el Instituto de Hidrología de GSF de Alemania.

Las campañas contemplaron mediciones de las aguas superficiales (28 muestras), en la zona de cabecera y en el valle del río San José, así como en la cuenca altiplánica del río Lauca; se coleccionaron muestras de aguas subterráneas (92 muestras) en el sector del valle y la zona costera.

---

<sup>1</sup>Laboratorio Ambiental DGA. Dpto. Conservación y Protección de Recursos Hídricos

<sup>2</sup>Laboratorio de Isótopos Ambientales

#### IV. ANALISIS DE RESULTADOS

##### 1. Caracterización isotópica

###### a) Aguas Superficiales

El estudio isotópico de las aguas superficiales estuvo básicamente orientado a caracterizar las aguas en las entradas al sistema acuífero del valle de Azapa, distinguiéndose entre a) caudal base propio de la cuenca; b) caudal de trasvase de origen altiplánico y c) caudal de crecidas del río San José.

A partir de los antecedentes obtenidos se efectúan los siguientes comentarios:

- Las aguas propias de la cuenca, representadas por las vertientes (sector de cabecera) de Tignamar, Chusmiza, río Seco, Belén, Lupica y Saxamar que caracterizan el flujo base, presentan contenidos isotópicos con valores medios de  $-66\text{‰}$  en  $^2\text{H}$  y  $-9,5\text{‰}$  en  $^{18}\text{O}$ . Es importante destacar que el rasgo que mejor identifica estas aguas es su ubicación en el entorno de la recta meteórica mundial. Además, si se considera que los estudios anteriores efectuados en la región altiplánica muestran que las precipitaciones se alinean en la misma recta, se concluye que los procesos evaporativos no juegan un papel importante en el proceso de recarga de estas vertientes (Figura 4).
- Las aguas altiplánicas muestreadas en las nacientes del río Lauca, a lo largo del canal de trasvase y en el canal Azapa tienen un contenido isotópico que varía en un rango muy amplio, pero que sin embargo presentan un notable alineamiento según una recta de evaporación de pendiente  $m = 4,5$ . La prolongación de dicha recta pasa muy próxima al contenido isotópico del lago Chungará (ubicado en el sector altiplánico, cuenca del río Lauca), que se encuentra fuertemente evaporado (Figura 4).
- Este comportamiento peculiar tiene su explicación en la elevada evaporación que se observa en las lagunas de Cotacotani, que dan origen al río Lauca, y en su mezcla con otros aportes al río en su recorrido. De este modo, en períodos de sequía el contenido isotópico de las aguas de trasvase se observa muy evaporado, mientras que en períodos húmedos o en crecidas esta característica tiende a disminuir o desaparecer.

Al comparar precipitación y caudal se pudo observar que los contenidos isotópicos más livianos, ubicados sobre la recta meteórica, coincidían con períodos que siguen a lluvias importantes; cabe señalar que dicho contenido isotópico es perfectamente coherente con el determinado en otras zonas altiplánicas ubicadas inmediatamente al sur [3].

De acuerdo a este análisis las aguas de trasvase se caracterizan principalmente por su ubicación, durante los períodos normales, bajo la recta meteórica, con contenidos típicos de  $\delta\text{D} = -78$  y de  $\delta^{18}\text{O} = -9,2\text{‰}$  (Figura 4).

- No fue posible obtener muestras de crecidas del río San José, sin embargo, las investigaciones realizadas en otras cuencas de la región permiten suponer que ellas presentan un comportamiento similar al de las vertientes de la cuenca alta del río (o algo más pesadas) (Figura 6).

## DEUTERIO vs OXIGENO-18

### AGUAS SUPERFICIALES

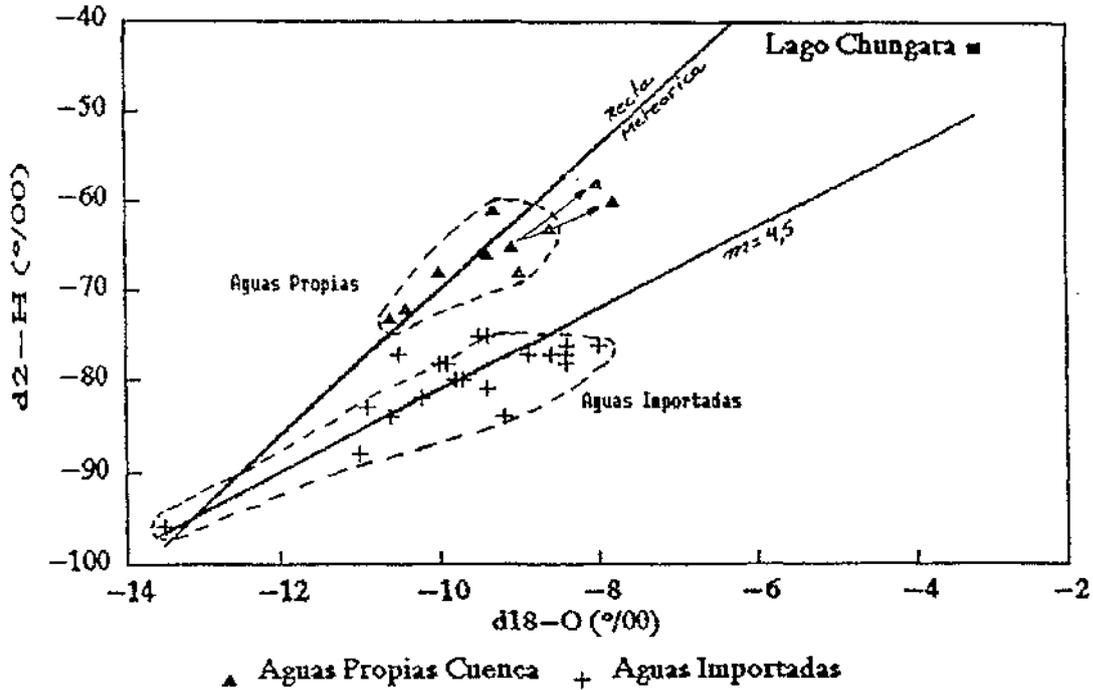


Fig. 4. Relación  $\delta^{18}O/\delta D$  en las aguas superficiales del estudio, mostrando la diferencia en los contenidos isotópicos de cada tipo de agua.

## DEUTERIO vs OXIGENO-18

### AGUAS SUBTERRANEAS Y VERTIENTES

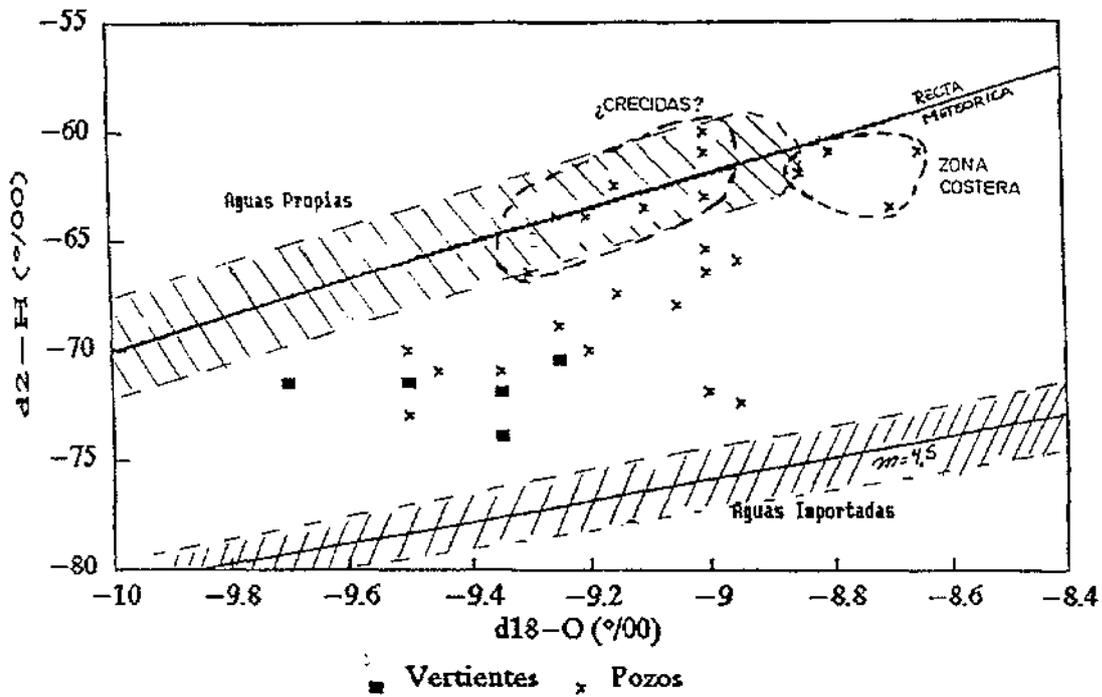


Fig. 5. Relación  $\delta^{18}O/\delta D$  en las aguas subterráneas y vertientes del estudio, mostrando la contribución de varias fuentes.

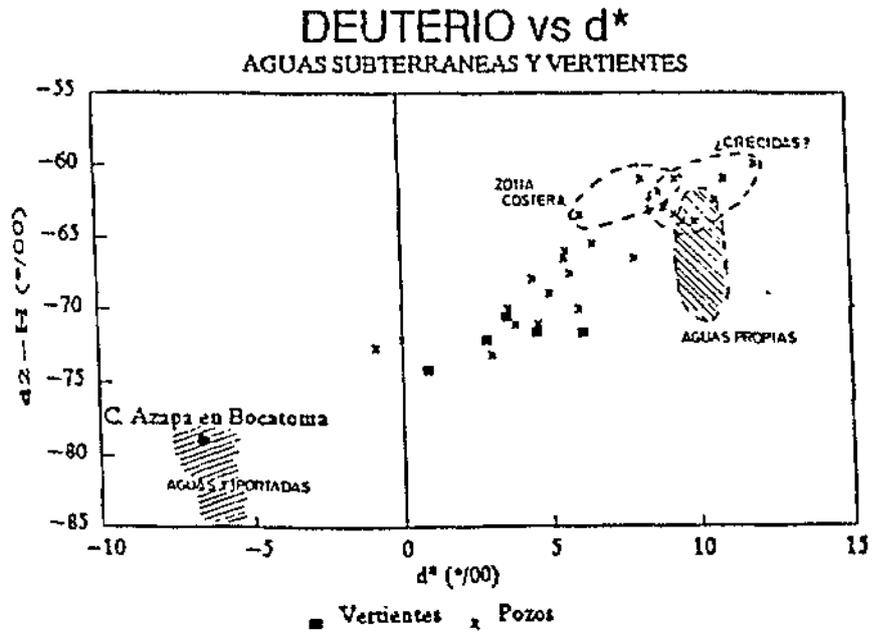


Fig. 6. Relación  $\delta D/d$  (exceso de deuterio) en las aguas subterráneas y vertientes.

#### b) Vertientes y Aguas Subterráneas

Las vertientes y aguas subterráneas se ubican entre los contenidos isotópicos característicos de las aguas propias y de las importadas a la cuenca, correspondiendo posiblemente a una mezcla de ambos tipos de agua. Sin embargo, algunas muestras se ubican por sobre la recta meteórica con valores enriquecidos en isótopos pesados; situación que puede corresponder a recarga de aguas de crecidas o de aguas propias (Figura 6).

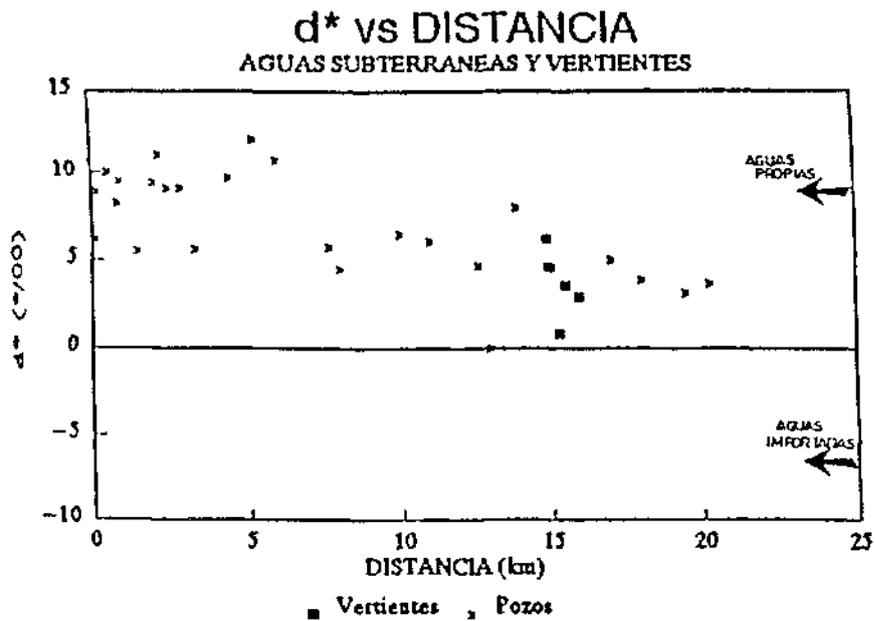


Fig. 7. Relación entre el exceso de deuterio de las aguas del río y la distancia a lo largo de su curso. Se muestra la contribución progresiva de aguas importadas al cauce.

Se desprende además que los procesos evaporativos, caracterizados por el fraccionamiento isotópico, no han estado presentes en forma decisiva en el proceso actual de recarga; aunque pudieran estar presentes en una segunda instancia, a través de la evaporación de aguas previamente mezcladas.

Las aguas de las vertientes a ser levemente más livianas y con mayor exceso de deuterio que las aguas subterráneas, lo que las asemeja más a las aguas de trasvase ( Figuras 4 y 5).

Las aguas subterráneas tienden a ser comparativas más ricas en isótopos pesados y a presentar un mayor exceso de deuterio a medida que se aproximan al océano. Esta distribución espacial sugiere que las aguas del sector alto corresponden a una mezcla entre las aguas propias de la cuenca y las aguas del trasvase, con una fuerte componente de esta última. En el tramo inferior los aportes del trasvase, más livianos y con un menor valor de  $d^*$ , serían menos significativos (Figura 7).

No es posible atribuir esta distribución a procesos evaporativos, los cuales tendrían que ir asociados a un menor valor del exceso de deuterio hacia aguas abajo.

De acuerdo con lo anterior, en el Valle se estaría produciendo una mezcla de las aguas importadas a la cuenca, la cual estaría en una fase más avanzada en el tramo superior, como resulta lógico de esperar.

No obstante esta tendencia general, se presenta cierta dispersión de los resultados, obteniéndose contenidos isotópicos diferentes en puntos de medición relativamente próximos. Esto se explica por la complejidad de los mecanismos de recarga y la existencia de áreas de recarga local debido a percolación de agua de riego o de crecidas.

El contenido isotópico de las vertientes resulta comparable al contenido de las aguas subterráneas de su entorno.

Las aguas subterráneas del Valle, con valores de  $^3\text{H}$  del orden de 2 UT y de  $^{14}\text{C}$  próximos al 100% de pcm, tienen una alta proporción de aguas recargadas en los últimos 30 años, fecha posterior al inicio del trasvase desde el altiplano. Esta conclusión resulta, muy coherente con la interpretación del contenido isotópico de las aguas del valle, como producto de una mezcla entre aguas propias de la cuenca e importadas.

Se pudo comprobar además la disminución del contenido de  $^{13}\text{C}$  hacia aguas abajo, fenómeno muy similar al investigado en otros ríos de la zona que ha sido atribuido al aporte del carbono biogénico presente en la zona de las raíces, que se incorpora al flujo como resultado del aprovechamiento de los recursos hídricos para fines de riego.

Lo anterior confirma la idea de un proceso de mezcla que se desarrolla con mayor fuerza en el sector alto del valle y que se propaga hacia aguas abajo.

## **2. Hidroquímica**

### **a) Evolución histórica de la constitución química**

Los antecedentes de calidad química muestran extraordinario incremento de la salinización de las aguas de la cuenca. En efecto, la conductividad eléctrica que, a principios

## CONDUCTIVIDAD vs TIEMPO VERTIENTES DEL VÁLLE DE AZAPA

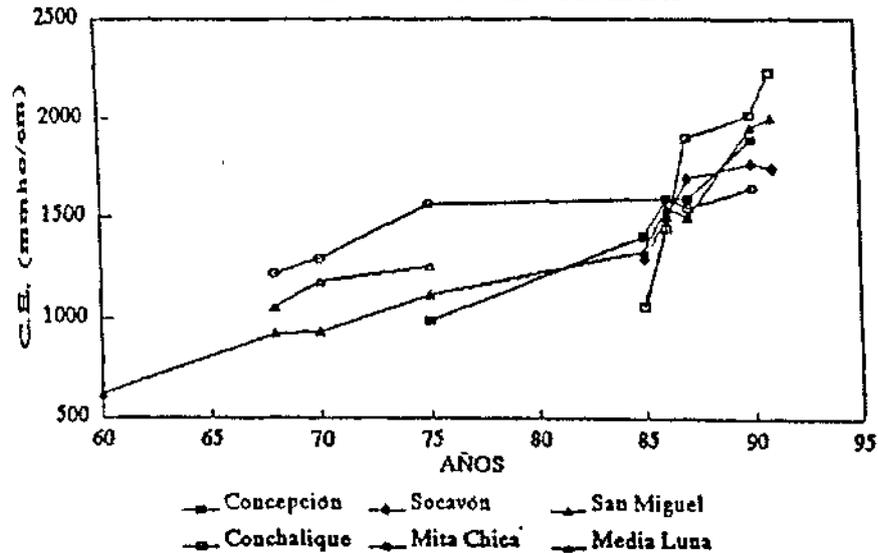


Fig. 8. Incremento temporal de la salinidad del agua en las vertientes del valle de Azapa.

de los años 60, alcanzaba en las vertientes valores entre 600 y 1.000 mmhos/cm, en la actualidad entrega cifras del orden de 2.000 a 2.500 mmhos/cm, es decir, se han duplicado e incluso triplicado las concentraciones originales (Figura 8).

Este proceso de salinización ha estado acompañado de un desplazamiento de las características químicas de las aguas, observándose un importante incremento relativo de los cloruros y de los cationes  $\text{Ca}^{++}$  y  $\text{Mg}^{++}$  (Figura 10 y 11). Cabe señalar que aún cuando los sulfatos no han mostrado un incremento notorio, se encuentran excedidos ligeramente de los límites de la Norma de Calidad de Aguas para fines domésticos.

### b) Caracterización hidroquímica de la situación actual

Las aguas superficiales propias de la cuenca y las importadas tiene valores de conductividad entre 600 y 800 mmhos/cm, sustancialmente inferiores a las medidas actualmente en aguas subterráneas y vertientes del Valle.

Estos valores, sin embargo, son coincidentes con los que se registraban en esas aguas antes de la entrada en funcionamiento del trasvase. Se comprueba además que la conductividad de las vertientes y de las aguas subterráneas varía en un amplio rango a lo largo del valle, sin que se reconozca una tendencia clara en función de la cercanía al océano. Sólo es posible identificar un aumento importante de la salinidad en algunos pozos próximos a la playa. Otro aspecto que conviene destacar es la concordancia entre la constitución química de las aguas superficiales actuales con la observada en las aguas subterráneas y vertientes antes del trasvase (Figuras 9,10 y 11).

En síntesis, la calidad de las aguas superficiales es concordante con la situación anterior de las aguas subterráneas en el valle y difiere significativamente de la actual.

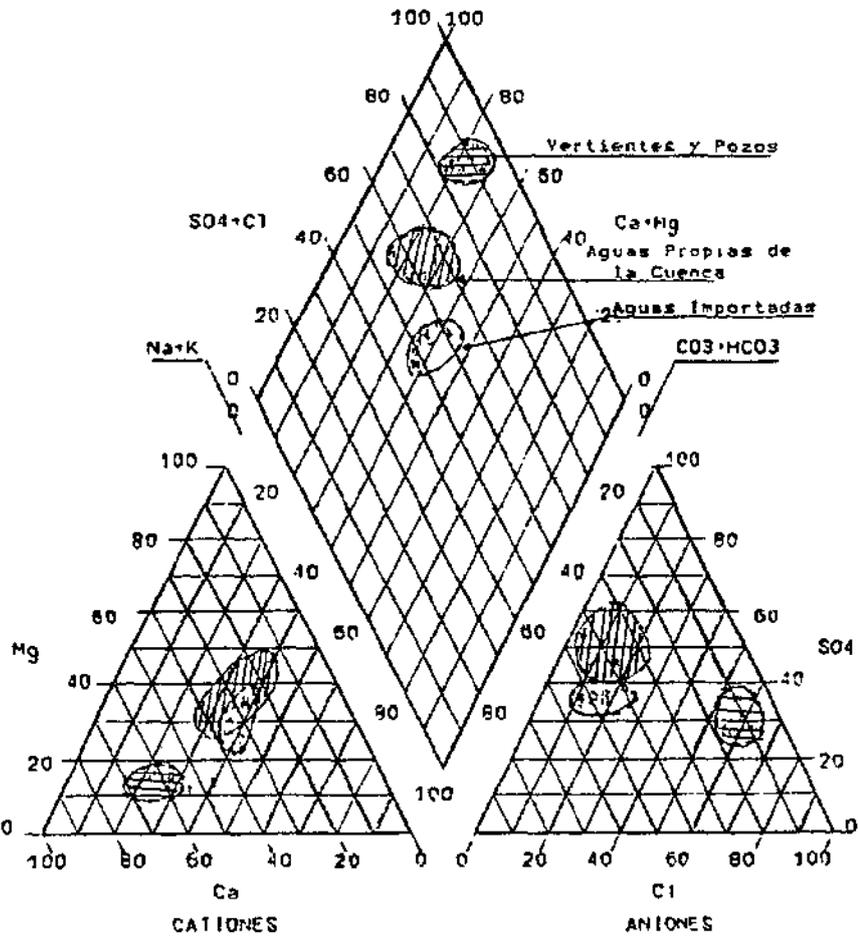


Fig. 9. Diagrama de Piper mostrando el carácter químico de las aguas superficiales, vertientes y pozos.

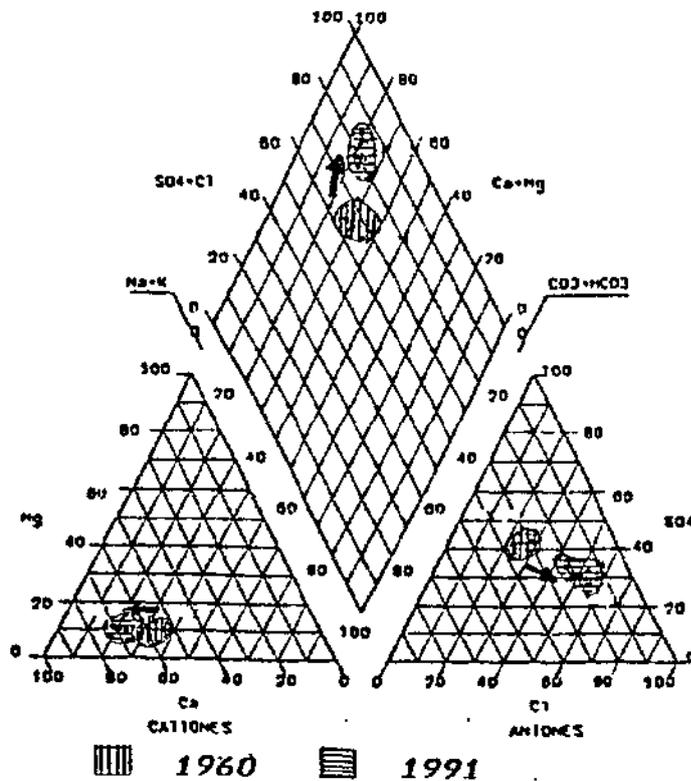


Fig.10. Diagram de Piper mostrando el cambio en el carácter químico de las aguas subterráneas entre 1960 y 1991.

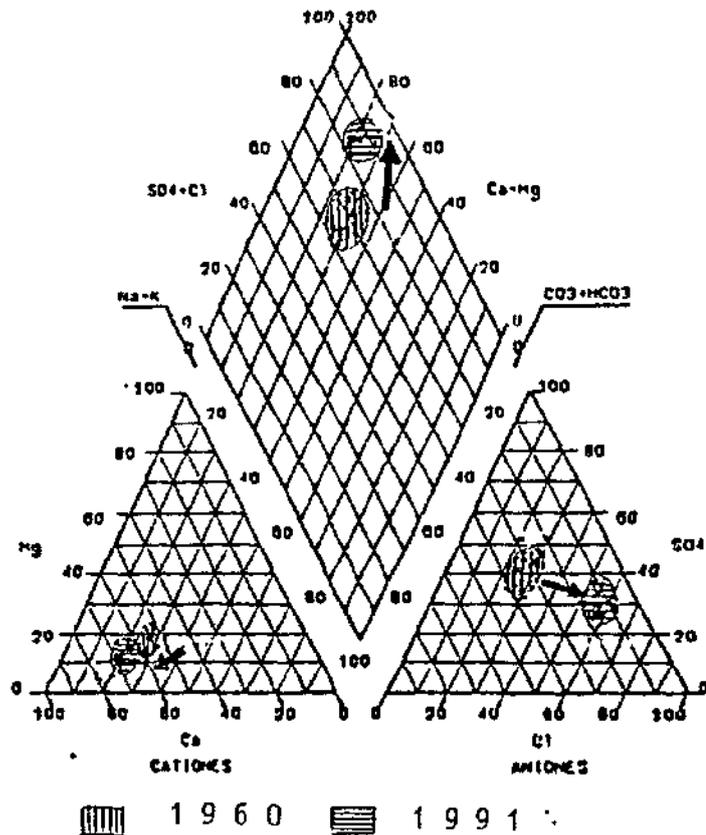


Fig.11. Diagram de Piper mostrando el cambio en el carácter químico de las aguas de las vertientes.

### 3. Comparación entre la distribución del contenido isotópico y la salinidad

A través del contenido isotópico se ha intentado determinar si el incremento de la salinidad se asocia de forma preferente a una de las fuentes de recarga; al respecto se señala lo siguiente:

- La intensidad de la salinización de las aguas resulta independiente de su contenido isotópico [4].
- No fue posible detectar modificaciones en el exceso de deuterio relacionadas con el contenido de sales. Esto se explica por el hecho que dicha variable no se relaciona con procesos evaporativos en el valle, los que podrían significar una mayor concentración de sales.
- Las razones iónicas no presentan fluctuaciones atribuibles al contenido de isótopos. El incremento local de salinidad en algunos pozos próximos al mar no se relaciona con cambios en la composición isotópica.
- Lo anterior hace pensar que el origen de la salinización del valle se encuentra fuertemente influenciado situaciones locales tales como prácticas agrícolas, composición química de los suelos, procesos de lavado de nuevos terrenos agrícolas, reuso del agua y otros; y no por la procedencia del recurso hídrico.

- No fue posible efectuar un análisis del proceso que siguen las aguas que se infiltran durante el riego, aún cuando se lograron obtener algunos valores isotópicos en la columna de suelo ( 0 a 1,5 m) para 1, 3 y 6 días después de aplicado el riego, no se contó con información hidroquímica.

## **V CONCLUSIONES GENERALES**

- Se ha podido comprobar el desarrollo de un proceso de mezcla de aguas de diversos orígenes a lo largo del acuífero del Valle de Azapa, que se manifiesta con mayor intensidad en los sectores más altos y débilmente hacia la desembocadura.
- Este comportamiento se ve favorecido por la gran dinámica de acuífero y la velocidad de renovación de las aguas.
- El análisis histórico de los registros de calidad de agua ha confirmado un significativo deterioro de las aguas del valle en los últimos 30 años; sin embargo, no se ha detectado una relación directa entre las aguas altiplánicas importadas a la cuenca y el incremento de sales.
- Se estima que el proceso de salinización se relaciona con la expansión agrícola, la cual pasó de 800 a 3.200 Ha. en los últimos 30 años. La cual ha estado unida al lavado de suelos en áreas de nuevo riego y a un uso más intensivo del recurso hídrico.
- Para alcanzar un conocimiento más profundo de las causas precisas del aumento del nivel de sales, se considera imprescindible desarrollar un programa de investigación más detallado en algunas áreas seleccionadas, que permita definir las situaciones locales y complementar los estudios con antecedentes de procesos o de sectores sobre los cuales no sido posible obtener información.
- Desde el punto de vista de la gestión de cuencas, es importante poner énfasis en la naturaleza y magnitud de los impactos asociados a proyectos de riego en zonas áridas.

## **REFERENCIAS**

- [1]. D.G.A. Modelo de simulación de las aguas subterráneas del Valle de Azapa. Realizado por Ayala, Cabrera y Asoc. Ltda. (1989).
- [2] D.G.A. The study on the development of water resources in northern Chile. Interim Report (1) JICA - PCI Consultants. (1993).
- [3] Peña et al. Utilización de técnicas isotópicas en hidrología de zonas áridas. Aplicación en la Provincia de Iquique. I Región. VIII Congreso Nacional de Ingeniería Hidráulica. (1987).
- [4] Peña et al. Estudio del origen y proceso de salinización de las aguas del río San José. I Región. Doc. Síntesis 1/92. Dirección General de Aguas. MOP. (1991).