



GOBIERNO DE CHILE  
MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS  
DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS  
DIVISIÓN DE ESTUDIOS Y PLANIFICACIÓN

**INFORME TÉCNICO**  
**ANÁLISIS DE LA DISPONIBILIDAD DE AGUA**  
**SUBTERRÁNEA EN EL ACUIFERO DE PAMPA CAYA,**  
**COMUNA DE PICA, I REGIÓN**

**REALIZADO POR:**  
**División de Estudios y Planificación**  
**SDT N° 329**

**Santiago, junio de 2012**

**Profesional:**  
Luis Rojas Badilla

*Junio de 2012*

## ÍNDICE

<b>1</b>	<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVO</b>	<b>5</b>
<b>3</b>	<b>DESCRIPCIÓN METODOLOGÍA DGA</b>	<b>5</b>
<b>3.1</b>	<b>ETAPA 1. RELACIÓN ESCORRENTÍA TOTAL- PRECIPITACIÓN MEDIA.</b>	<b>5</b>
<b>3.2</b>	<b>ETAPA 2. DETERMINACIÓN DE LA RECARGA NETA</b>	<b>9</b>
<b>4</b>	<b>APLICACIÓN CASO PAMPA CAYA</b>	<b>10</b>
<b>5</b>	<b>OTRAS CONSIDERACIONES</b>	<b>13</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	<b>14</b>
<b>7</b>	<b>ANEXOS</b>	<b>14</b>

## 1 INTRODUCCIÓN

Los recursos subterráneos de la meseta altiplánica y de las quebradas con vertiente pacífica son la principal fuente de abastecimiento de recursos de agua en el norte de Chile, sin embargo, corresponden también a sectores con escasa información y conocimiento hidrológico lo que dificulta la evaluación de disponibilidades.

Entre los años 2008 y 2011, la DGA estuvo investigando el altiplano chileno, con el objeto de actualizar el conocimiento y caracterizar regionalmente la hidrología de esta macro zona. A partir de ello se pudo avanzar en el desarrollo de una herramienta metodológica para la estimación de recarga de agua subterránea, necesaria para la evaluación hidrológica de los flujos aprovechables de estos sistemas.

El informe técnico DGA SDT N° 317, de Agosto del 2011, detalla las bases que fundamentan la metodología anteriormente indicada, por lo que en el presente informe, sólo se entrega una breve descripción de los aspectos metodológicos principales, suficiente para entregar el marco conceptual necesario para su aplicación al sector acuífero de Pampa Caya.

El sector hidrogeológico Pampa Caya, se localiza en la cabecera de la subcuenca de la Q. de Chacarilla, que a su vez es afluente a la Pampa del Tamarugal. Está conformado por el relleno alojado en una depresión por desplazamiento en bloque tipo "horst y graben", y se compone de intercalaciones de materiales sedimentarios detríticos (aluviales, coluviales y arcillas), así como, en menor proporción de cenizas volcánicas.

Dada la particular condición hidrológica e hidrogeológica de Pampa Caya, se ha requerido que adicionalmente a la determinación de la recarga neta, se definan algunas consideraciones de tipo técnico-administrativo con el objeto de fijar su situación de disponibilidad, así como, efectuar recomendaciones específicas para la explotación sustentable del acuífero.

## **2 OBJETIVO**

El presente informe tiene por objeto analizar la disponibilidad hídrica del acuífero de Pampa Caya, a partir de la aplicación de una metodología de estimación de recarga en cuencas altiplánicas desarrollada por la DGA para estos efectos.

Como objetivos específicos se cuentan:

- Definir la cuenca de aporte al acuífero de Pampa Caya, a partir de consideraciones hidrológicas e hidrogeológicas.
- Aplicar la metodología DGA para estimar recarga en cuencas altiplánicas.
- Efectuar las consideraciones necesarias para establecer la disponibilidad de agua del acuífero de Pampa Caya.
- Efectuar las recomendaciones necesarias para asegurar la explotación sustentable del acuífero

## **3 DESCRIPCIÓN METODOLOGÍA DGA**

En términos generales, se puede decir que la principal dificultad para desarrollar una metodología de aplicación regional, que determine la recarga de cuencas altiplánicas, ha sido la escasa información disponible.

Una metodología puede estar basada en un modelo conceptual muy coherente, sin embargo, si la información hidrométrica espacial y temporal no es suficiente es prácticamente imposible sostener su validez más allá del ámbito local. Consecuentemente, la metodología propuesta incorpora simplificaciones temporales y espaciales de las variables hidrológicas de mayor importancia, en consistencia con la información disponible, de manera que toda particularidad no cubierta se encuentra propagada aleatoriamente sobre los resultados.

En lo principal, el desarrollo metodológico quedo definido en dos etapas, una primera etapa basada en una relación de largo plazo entre la precipitación media y la escorrentía total de salida de una cuenca (superficial más subterránea), y la segunda, basada también en una relación empírica, pero esta vez entre la recarga neta estimada a partir del comportamiento de los caudales superficiales estacionales y la escorrentía total.

### **3.1 Etapa 1. Relación Escorrentía Total- Precipitación Media.**

La recarga de los acuíferos altiplánicos tiene como fuente principal la precipitación, que se infiltra con mayor facilidad por zonas de mayor permeabilidad, y que se ve favorecida por eventos de mayor envergadura que son capaces de saturar el suelo y conducir agua hasta el acuífero. Las distintas clases de suelos constituyen zonas de transferencia del agua subterránea hacia las zonas más bajas de la cuenca. Si una cuenca o subcuenca posee caudal de salida conocido (superficial y subterráneo), es razonable asumir que su valor medio de largo plazo representa su escorrentía total.

Una primera relación entre la precipitación media y la escorrentía total en cuencas del Norte de Chile fue la adoptada por la JICA en 1995, a partir de la cual fue estimada la recarga media de la Pampa del Tamarugal.

$$Q_s = f * P_c * A$$

$$P_c = m f + C$$

$$Q_s = F(P_c) = P_c(P_c - C) * A / m$$

$$Q_s = (A/m) * P_c^2 - (C * A/m) * P_c$$

En donde,

$P_c$  = Precipitación media anual de largo plazo de la cuenca  
 $Q_s$  = Caudal medio superficial de salida de la cuenca ó escorrentía total (largo plazo)  
 $A$  = Área de la cuenca  
 $f$  = Coeficiente de escorrentía de la cuenca  
 $m$  y  $C$  = Coeficientes de ajuste lineal.

Esta relación se cumple si es que el flujo subterráneo pasante, no registrado por la estación de control, es nulo ó poco significativo respecto del caudal superficial. Su aplicación ha demostrado tener un buen grado de aproximación en el ámbito de la I región.

La metodología DGA extiende el dominio del modelo JICA tomando en cuenta la fuerte influencia de la latitud sobre la distribución de la precipitación estacional en el norte. Un análisis más detallado sugirió que la precipitación media anual desagregada entre invierno y verano, permitía aumentar el dominio de aplicación, dividiendo la relación precipitación-escorrentía en dos relaciones estacionales que consideraran separadamente las lluvias estivales con influencia amazónica, de las provenientes por los frentes del Pacífico desde el sur.

La figura n°1 y n°2 siguientes, presentan las precipitaciones medias de invierno y verano de las 25 cuencas del estudio DGA, según su coordenada UTM N, así como, el modelo de distribución adoptado para la aplicación posterior en cuencas sin control.

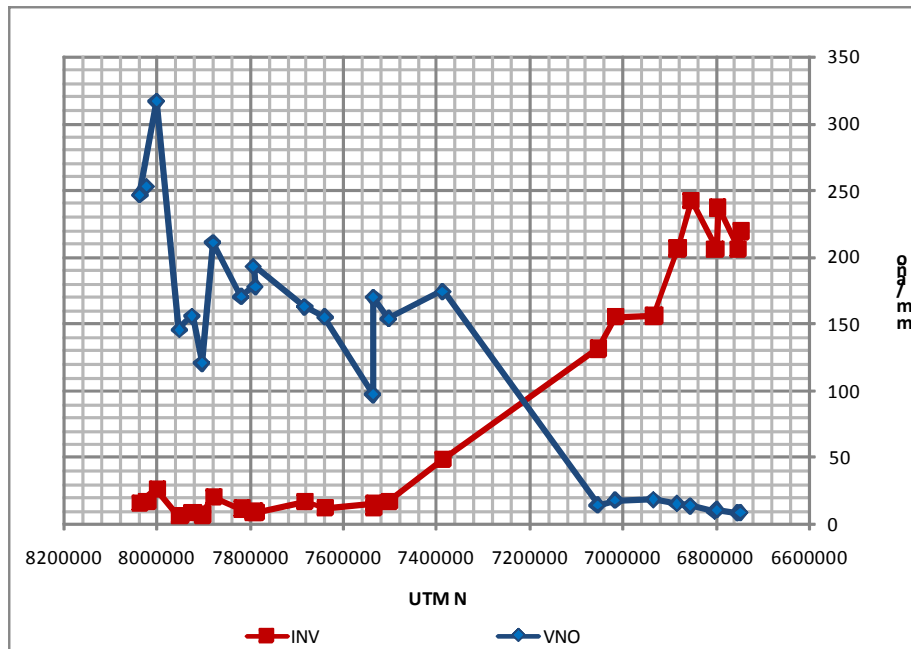


Figura n° 1 Distribución estacional de Precipitaciones Medias en cuencas del estudio

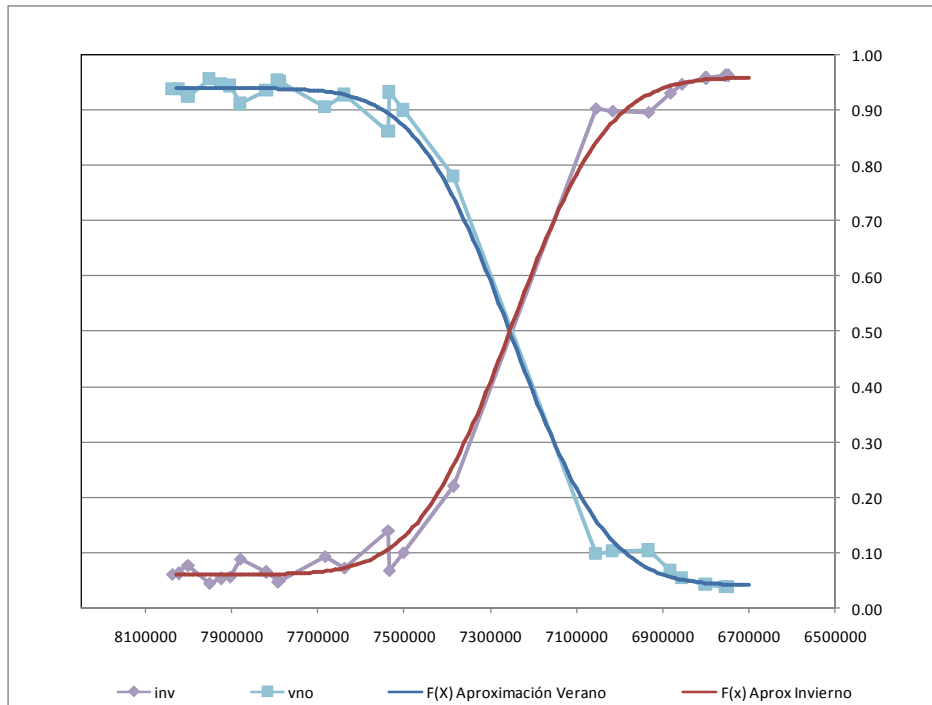


Figura N° 2 Modelo de ajuste exponencial de los Coeficientes de Distribución Invierno-Verano de la Precipitación Media Anual en Cuencas Seleccionadas.

En consecuencia, la relación entre la precipitación media y la escorrentía total es reformulada en dos relaciones estacionales, basado en que:

- Para un mismo volumen de agua caída en invierno o en verano, las condiciones meteorológicas de temperatura, humedad relativa, evaporación y de evapotranspiración, presentan diferencias que determinan distintas condiciones de infiltración y de escurrimiento.
- El caudal medio de salida de la cuenca (escorrentía total), corresponde a la suma de escorrentía de invierno más la de verano.

Luego, la relación precipitación-escurrimiento JICA es planteada en los siguientes términos:

$$Q_{INV} = f_{inv} P_{inv} A$$

$$Q_{VNO} = f_{vno} P_{vno} A$$

$$P_{inv} = m_1 f_1 + C_1$$

$$P_{vno} = m_2 f_2 + C_2$$

$$Q_S = Q_{INV} + Q_{VNO}$$

$P_{INV}$  = Precipitación media anual de invierno

$P_{vno}$  = Precipitación media anual de verano

$Q_{INV}$  = Escorrentía media anual de invierno

$Q_{VNO}$  = Escorrentía media anual de verano

$f_{inv}$  = Coeficiente de escorrentía de invierno  
 $f_{vno}$  = Coeficiente de escorrentía de verano  
 $Q_s$  = Caudal medio anual de salida de la cuenca ó escorrentía total (largo plazo)

$A$  = Área de la cuenca  
 $m_i$  y  $C_i$  = Coeficientes de ajuste lineal.

El ajuste de coeficientes se presenta en la figura 3 siguiente:

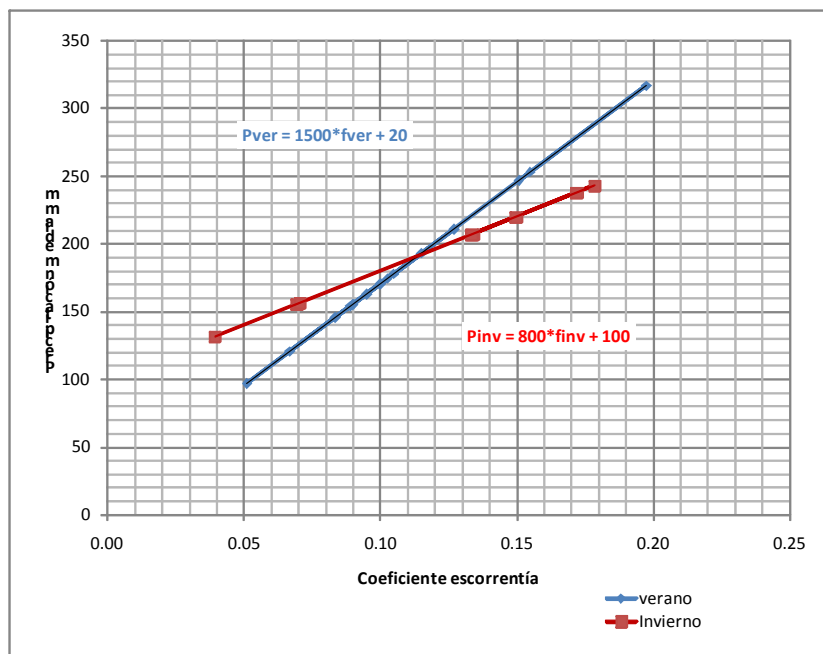


Figura n° 3 Ajuste lineal de parámetros  $f_{inv}$  y  $f_{vno}$ .

Con,

	Verano	Invierno
m	1500	800
c	20	100

Estos parámetros son el reflejo de una tendencia regional, dado que las relaciones deducidas son el resultado de condiciones medias de largo plazo, en las que se producen variaciones naturales no contempladas, así como, la fusión de los errores de estimaciones de los distintos parámetros involucrados, especialmente de las precipitaciones medias.

Sin perjuicio de lo anterior, el ajuste obtenido entre el caudal medio observado y la escorrentía total estimada es de muy buena calidad, con una recta del tipo  $y=x$  y un  $r^2=0.92$ . Situación que finalmente es considerada adecuada para el nivel de información disponible y para la cobertura o dominio de aplicación alcanzado.



### 3.2 Etapa 2. Determinación de la Recarga Neta

La relación propuesta en el punto anterior permite estimar la escorrentía total de salida desde una cuenca, en el contexto de una condición de equilibrio de largo plazo, sin embargo, la recarga neta constituye sólo una parte de esta escorrentía total, y su determinación requiere de una relación adicional. En este caso, entre la escorrentía total y la escorrentía base. Para ello, se adoptaron las siguientes hipótesis y conceptos hidrológicos de base:

- a. Los flujos subterráneos son despreciables y los caudales superficiales controlados a la salida de las 25 cuencas representan la escorrentía total.
- b. Se entiende como "recarga neta de una cuenca", aquella parte de la escorrentía total de salida, compuesta por el agua que ha infiltrado al menos una vez y que ha transitado subterráneamente en algún momento, tal que su permanencia dentro de la cuenca es superior a la de un año hidrológico.
- c. Esta recarga neta o caudal base interanual de salida de la cuenca se estima, en términos de caudal medio mensual, como el promedio de los mínimos decadales observados entre los meses de junio, julio y agosto. Lo anterior sobre la base que:
  - Hacia el norte las precipitaciones de invierno son escasas y de bajo monto, y hacia el sur comienzan a ser mayoritariamente sólidas. Por lo que el aporte directo de las precipitaciones al escurrimiento de invierno es significativamente menor que en verano. Las bajas temperaturas limitan el deshielo de las nieves y la escorrentía de salida se aproxima al caudal base de la cuenca, tal que en períodos de sequía interanual, el caudal de salida se aproxima a este valor.
  - Durante el verano, el caudal base persiste pero es difícil de ser medido, ya sea por el aporte directo de las precipitaciones de verano o debido a las mayores pérdidas de evaporación y evapotranspiración, que pueden llegar a consumir la totalidad del flujo base en años secos, y/o períodos de sequía interanual.
  - Por otra parte, existe consenso en interpretar las series hidrológicas del norte bajo la perspectiva de ciclos hidrológicos decadales, a partir de lo cual resulta razonable estimar el flujo base como el promedio del conjunto de los 4 mínimos decadales observados históricamente.

En el gráfico 4 siguiente, se indica la relación obtenida entre el promedio de los mínimos decadales y la escorrentía total observada para las 25 cuencas seleccionadas en el estudio DGA.

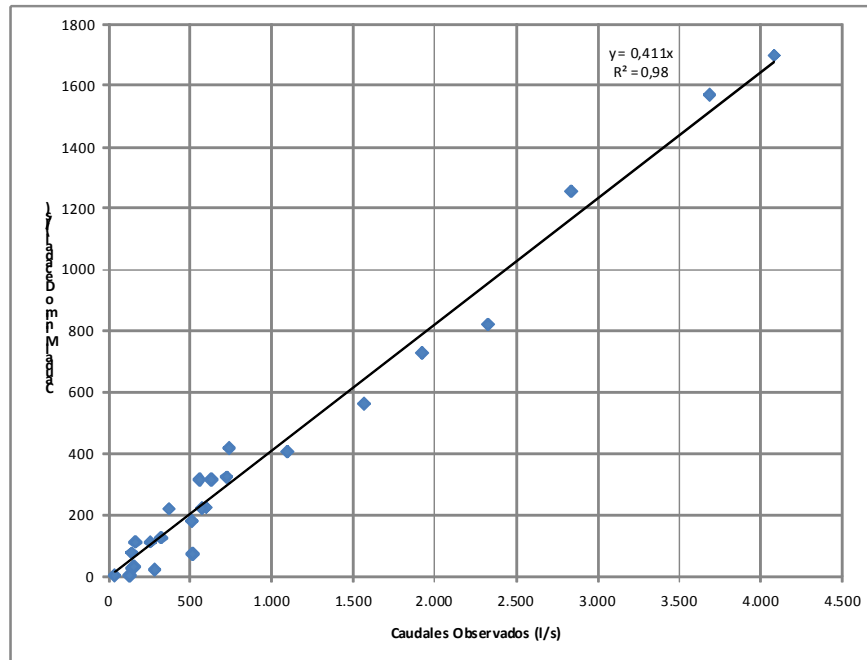


Figura n° 4 Correlación entre el caudal medio anual histórico observado y mínimos decadales promedios, cuencas 1 a 25.

Conforme a estos resultados se asume que aproximadamente un 41% de la escorrentía total de salida de una cuenca altiplánica corresponde potencialmente al flujo base o recarga neta de esta.

Sin perjuicio que las hipótesis asumidas determinan el alcance de la metodología propuesta, se debe poner especial atención en la interpretación de resultados, sobre todo en ciertas situaciones específicas, como en cuencas sin flujo superficial de salida que aportan sólo recursos subterráneos. Así, dependiendo de cada situación específica, la recarga podrá responder y adoptar conceptualmente un valor distinto, que se encontrará entre 100% de escorrentía total y el 41% (recarga neta).

#### 4 APLICACIÓN CASO PAMPA CAYA

Tal como se había indicado anteriormente, el sector hidrogeológico Pampa Caya, conforma un acuífero de relleno compuesto de intercalaciones de materiales detríticos y cenizas volcánicas, alojado en una depresión por desplazamiento en bloque tipo "horst y graben", localizada en la cabecera de la subcuenca de la Q. de Chacarilla, que a su vez es afluente a la Pampa del Tamarugal.

Este acuífero, sobreyace y se encuentra flanqueado con roca volcánica fracturada y agilizada en superficie, entregando condiciones de estanqueidad en sus contactos, definiendo con ello el límite de su cuenca de recarga y una significativa desconexión hidráulica hacia el norte, en dirección al sector de la Q. de Chara (ver figura n° 5) Ref.4. Su principal exutorio lo constituye un cañón estrecho de 15 km de largo labrado en la roca ignimbrítica, apegado al borde noreste del acuífero, a través del cual, desagua las turbulentas crecidas estivales excedentes de su cuenca de drenaje, así



Precipitación (mm)				
Anual	Verano		Invierno	
157	0.938014	147	0.06199	10

Caudal (escorrentía total)(l/s)				
Verano		Invierno		Anual
0.0848455	190	0	0	190

Recarga neta=  $190 \times 0.41 = 78$  l/s

Este valor correspondería a una estimación mínima del recurso renovable del acuífero, y sería factible asumir como el caudal disponible a ser constituido en derechos permanentes, sin embargo, la disponibilidad del acuífero de Pampa Caya depende también de las condiciones administrativas en que esta recarga se encontraría comprometida hacia aguas abajo, más precisamente en su relación con el acuífero de Pica o de la Pampa del Tamarugal, o bien desde el punto de vista ambiental, de los humedales que pudiesen depender de este recurso. Para ello, en el punto siguiente se efectúan algunas consideraciones técnicas a partir de los antecedentes técnicos disponibles, con el objeto de fijar un marco administrativo necesario para resolver el tema de la disponibilidad.

## 5 OTRAS CONSIDERACIONES

En lo que sigue se enlistan algunos antecedentes técnicos puestos a consideración durante la tramitación de los expedientes de solicitudes sobre este acuífero, seguido de una interpretación técnica que complementa el modelo conceptual de funcionamiento del acuífero y su consecuencia sobre la situación administrativa.

- I. Las aguas subterráneas y confinadas de Pampa Caya no presentan contenido de H<sup>3</sup> detectable y su contenido de H<sup>2</sup> y O<sup>18</sup> se encuentra muy cercano a la Recta Meteorica Local. Ref. 1.

Siendo la muestra de agua representativa de una profundidad superior a 60 m y en condiciones de confinamiento, se deduce que las aguas profundas alumbradas en Pampa Caya tienen una antigüedad de al menos 50 años desde su proceso de recarga, y una dinámica de flujo lenta que se traduciría en una escasa conexión temporal con los acuíferos situados hacia aguas abajo. No obstante, no se descarta que en capas más superficiales la dinámica se incremente estrechando una relación con los humedales del sector por una mayor contribución al afloramiento.

Este punto tendría una mayor importancia al momento de fijar las condiciones a la explotación, por cuanto sugiere que esta se realice preferencialmente en profundidad.

- II. La conductividad eléctrica de las aguas subterráneas de Pampa Caya se encuentran en el orden de los 1500 mmhos/cm, valor superior al de los afloramientos termales desde la ignimbrita en el sector de Pica, que no superan los 500 mmhos/cm, en ese sentido las aguas de Pica no serían recargadas por las aguas de Pampa Caya. Sin perjuicio de lo anterior, si existiría entre ambas una afinidad isotópica de H<sup>2</sup> y O<sup>18</sup>, que tendría más relación con tener una misma altura y litología de la cuenca de recarga, la Ignimbrita Huasco, que por una eventual conexión hidrogeológica entre ellas. Similar situación se produciría con la vertiente Huascolipe que aflora al suroeste de la zona terminal del Salar del Huasco, con la cual conformarían el grupo de aguas más livianas de la I región (figura A.1 de Anexo). Ref. 1,2 y 3.

A partir de lo anterior es posible asumir una desconexión hidrogeológica con el sector de Pica, por lo que el flujo subterráneo debiera fluir hacia la Pampa del Tamarugal a través de la Quebrada de Chacarilla.

- III. En agosto del 2010, la conductividad eléctrica de los escurrimientos superficiales aguas abajo de las Q. de Pampa Caya y Chara, se encuentran en el orden de los 7000 mmhos/cm, asociado a un caudal del orden de los 36 l/s, valor que se encuentra disminuido por el consumo parcial y la evaporación.

Este caudal representa la mayor parte del flujo subterráneo proveniente de las cuencas de Caya y Chara, que afloraría en calidad de caudal base en la cabecera de la Q. de Chacarilla, y alcanzaría un orden de 150 l/s, tomando en consideración sólo el grado de concentración de sales alcanzado respecto de las aguas del acuífero de Pampa Caya.

Este recurso sería consumido por la vegetación o se evaporaría rápidamente hacia aguas abajo, sin llegar a constituir una recarga efectiva de la Pampa del Tamarugal.

- A partir de las consideraciones anteriores, es posible asumir que el acuífero de Pampa Caya puede ser considerado como un acuífero de aprovechamiento común independiente del acuífero de la Pampa del Tamarugal, y desconectado hidrogeológicamente con el acuífero de Pica.

## **6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

- La cuenca de drenaje asociada al acuífero de Pampa Caya, cubre hacia el norte hasta el límite entre la formación sedimentaria y la formación Altos de Pica, con un área de 480 km<sup>2</sup> y una precipitación media de 157 mm/año. Estos valores, entregan una escurrentía total de 190 l/s y una recarga neta de de 78 l/s de acuerdo con la metodología para estimar recarga en cuencas altiplánicas de la DGA.
- La evidencia hidroquímica e isotópica sugiere que el acuífero de Pampa Caya se encuentra desconectado hidrogeológicamente con el sector de Pica, y que su descarga subterránea fluye y aflora en dirección a la Pampa del Tamarugal a través de la Q. de Chacarilla. Este recurso se consumiría y evaporaría hacia aguas abajo por la quebrada, sin llegar a constituir una recarga efectiva de la Pampa del Tamarugal.
- El acuífero de Pampa Caya puede ser considerado como un acuífero de aprovechamiento común independiente del acuífero de la Pampa del Tamarugal, y desconectado hidrogeológicamente con el acuífero de Pica.
- El recurso factible de ser constituido en derechos permanentes asciende a 78 l/s. Mayores recursos sólo podrán ser considerados a partir de la figura de derechos provisionales.
- Se recomienda que la explotación de los recursos anteriormente indicados se realice preferencialmente bajo los 60 m de profundidad, y sometido a las condiciones de un Plan de Alerta Temprana, que permita dar seguimiento a la evolución del acuífero, validar el modelo conceptual de la presente evaluación y controlar los efectos no contemplados. Para ello se sugiere monitorear la piezometría en el sector del bofedal de Pampa Caya, habilitando un pozo de monitoreo multipiezométrico, así como, implementar un sistema de medición aproximada de los caudales de crecidas y la instalación de pluviómetros que cubran la cuenca de drenaje.

## **7 ANEXOS**

## Referencias:

1. "Evaluación Hidrogeológica de Acuífero de Depósitos de Terraza de Pampa Caya". 1998, NAZCA SA.
2. Minuta Técnica N°2, "Antecedentes Técnicos Complementarios Relacionados con las Solicitudes DGA ND-0103-1514, Ubicadas en el Sector Hidrogeológico Pampa Caya, Comuna de Pica, Región de Tarapacá". DGA, Región de Tarapacá.
3. DGA SIT N° 48, "Evaluación de Recursos Hídricos en el Sector de Pica, Hoya de la Pampa del Tamarugal, I Región". DGA 1998.
4. "Exploración Aguas Subterráneas Hoya Quebrada Caya, Comuna Pozo Almonte, Provincia de Iquique, I región de Tarapaca, Chile. Aquaconsult. 2005.

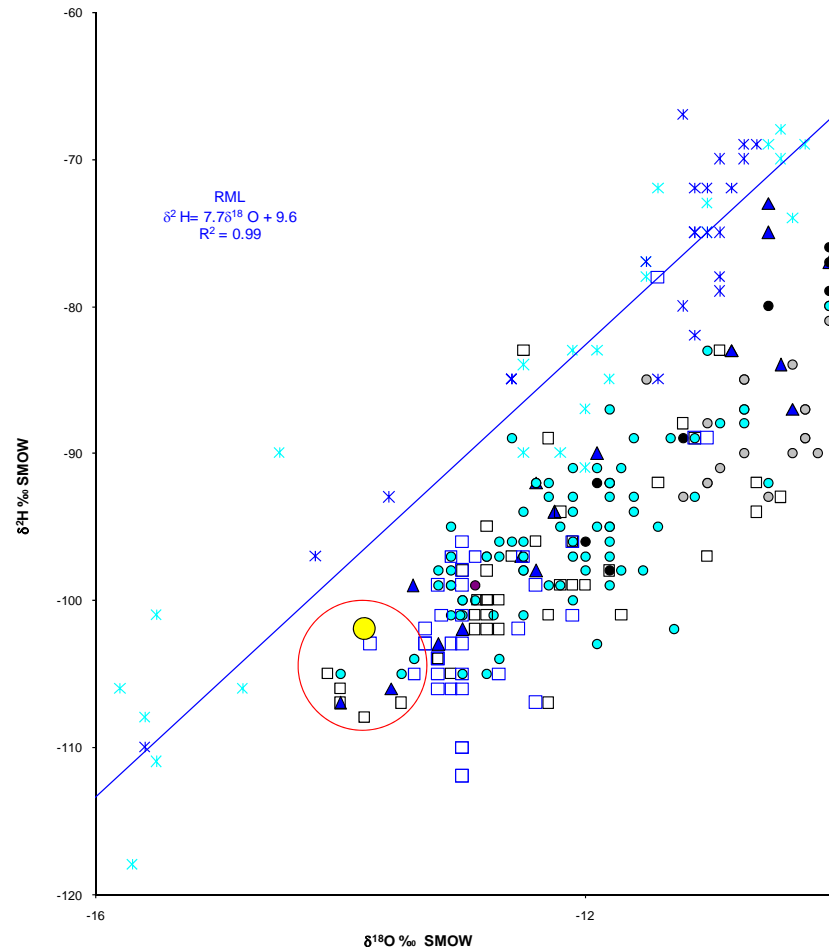
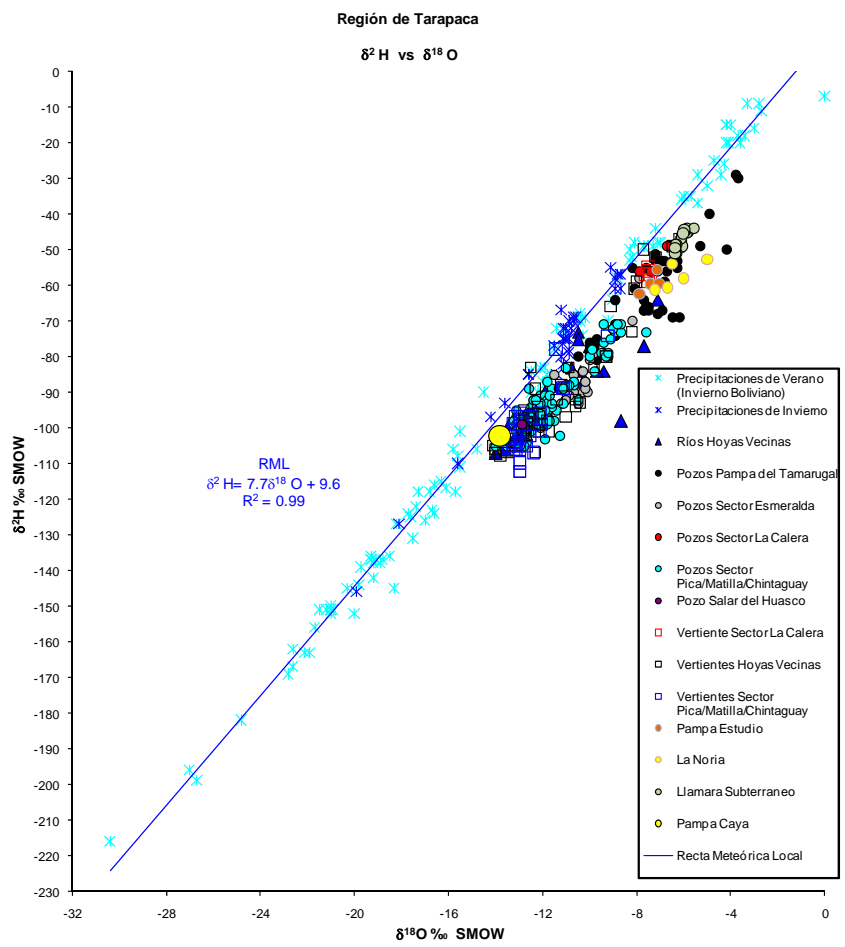


Fig. A.1 Distribución Isotópica de las Aguas de la I Región