

**SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA**  
**XXI CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA**

**EVALUACIÓN A NIVEL DE PERFIL DE LA FACTIBILIDAD DE UN PROYECTO DE  
RECARGA ARTIFICIAL DE ACUÍFEROS EN LA CUENCA DEL RÍO SAN JOSÉ,  
ARICA**

**GONZALO JIMÉNEZ M.<sup>1</sup>**  
**JULIO VALLEJOS A.<sup>2</sup>**  
**PAULO HERRERA R.<sup>3</sup>**

**RESUMEN**

La intensa explotación hídrica del Valle de Azapa ha generado un déficit de entre 250 y 540 [l/s] que ha incrementado la tasa de descenso de los niveles de los pozos en hasta un 140%. En este escenario el objetivo de este trabajo consiste en determinar la factibilidad de recargar el acuífero del valle mediante lagunas de infiltración o con pozos de inyección para así reparar en parte esta condición de sobreexplotación. Para lo anterior se estudió la disponibilidad y calidad hídrica tanto del río San José como de los efluentes de la planta de tratamiento de aguas servidas de Arica, junto con las características hidráulicas del acuífero. Se encontró que el volumen de agua disponible para ser recargado cada año alcanza los 2,57 [hm<sup>3</sup>] en el caso del Río San José y de 27,25 [hm<sup>3</sup>] para las aguas residuales. Por otra parte, el agua proveniente de ambas fuentes requeriría tratamiento terciario antes de la infiltración para remover arsénico y nitrógeno. Las características de permeabilidad del acuífero indican que existen dos zonas del valle apropiadas para realizar la recarga: la primera en la parte baja con una capacidad de almacenamiento de 6,2 [hm<sup>3</sup>] y otra en la parte alta con un potencial de almacenamiento de 18,5 [hm<sup>3</sup>]. Por último, se estima que la recarga de aguas residuales en la parte baja del valle es la alternativa más recomendable para ser implementada desde el punto de vista técnico, lo cual se recomienda sea corroborado con una evaluación económica. Además, es necesario avanzar en una mejor caracterización del arsénico en el acuífero, para comprender de mejor forma las implicancias que un proyecto de infiltración podría ocasionar sobre la calidad de las aguas de este.

---

<sup>1</sup> Memorista, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile – [gojimene@ing.uchile.cl](mailto:gojimene@ing.uchile.cl)

<sup>2</sup> Ingeniero Jefe de Proyectos, Instituto Nacional de Hidráulica – [juliovallejos@inh.cl](mailto:juliovallejos@inh.cl)

<sup>3</sup> Profesor Asistente, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile – [pherrera@ing.uchile.cl](mailto:pherrera@ing.uchile.cl)

# 1 INTRODUCCIÓN

La agricultura constituye una de las principales actividades económicas en la región de Arica y Parinacota. El Valle de Azapa alberga el área agrícola más importante de la región con cerca de 3.000 [ha] cultivadas y como ocurre en todo el norte del país, el factor limitante para el desarrollo de dicha actividad es el recurso hídrico.

Diversos trabajos han estudiado el déficit hídrico del Valle de Azapa, y si bien existen diferencias en el valor, todos coinciden en que la cuenca sufre un déficit importante de entre 250 y 540 [l/s], equivalente a 7,9 y 17,0 [hm<sup>3</sup>/año]. A raíz de aquello se han observado descensos sostenidos de los niveles de los pozos por períodos de hasta 20 años, y el aumento en la demanda de agua en años recientes ha incrementado esta tasa de descenso en hasta un 140%.

Frente a este escenario, recargar el acuífero artificialmente aparece como una alternativa para darle solución a la condición de sobreexplotación del valle. Esta alternativa presenta ventajas comparativas con respecto a grandes obras hidráulicas superficiales, teniendo como principal objetivo actuar sobre la calidad de las aguas y aumentar su disponibilidad (Fernández, 2004).

El objetivo de este trabajo es analizar la factibilidad de recargar el acuífero del Valle de Azapa mediante lagunas de infiltración con el agua proveniente del río San José o mediante pozos de inyección en la zona no saturada con los efluentes de la planta de tratamiento de aguas servidas de la ciudad de Arica.

## 2 ANTECEDENTES SOBRE RECARGA ARTIFICIAL DE ACUÍFEROS

### 2.1 Consideraciones generales

La recarga artificial de acuíferos consiste en sistemas de ingeniería donde el agua es puesta sobre o dentro del subsuelo para su infiltración y posterior movimiento hacia los acuíferos para aumentar el recurso de agua subterránea (Bouwer, 2002). En diversos países se ha posicionado como una herramienta eficaz para solucionar problemas de intrusión salina en acuíferos costeros, controlar el fenómeno de subsidencia, mejorar la calidad del recurso hídrico subterráneo tanto como la del agua de recarga, recuperar niveles piezométricos y almacenamiento, entre otros. Al año 2007 se estima que existían 376 sistemas de recarga en 57 países, dentro de los cuales destacan India, EEUU, Holanda y Australia (IGRAC, 2007).

Los aspectos más importantes a tomar en cuenta para cualquier sistema de recarga artificial son los que tienen que ver con la fuente de abastecimiento, metodologías de recarga, consideraciones hidrogeológicas y probabilidad de colmatación. La colmatación del suelo (o *clogging*) corresponde a cualquier acumulación de un factor físico, químico o biológico en la superficie de recarga que genera disminución en las tasas de infiltración.

Dependiendo del uso que se le dará al agua, características del acuífero, calidad y disponibilidad tanto de la fuente como del agua subterránea, se deberá seleccionar el sistema de recarga más apropiado para satisfacer el objetivo del proyecto.

## 2.2 Fuentes de agua

Un prerrequisito para la recarga artificial de acuíferos es la disponibilidad de una fuente de agua de recarga de calidad adecuada y en cantidad suficiente. Esto debido a la buena calidad del agua subterránea en general, la cual resulta del filtrado natural y del tratamiento microbiológico que sufre el agua de lluvia y el agua de los ríos mientras se percola a través del suelo hacia el acuífero (UNESCO, 2005).

En la Tabla 1 se indican las fuentes de abastecimiento típicas y sus características de disponibilidad y calidad.

Tabla 1: Alternativas de fuente de agua para realizar recarga artificial de acuíferos (UNESCO, 2005).

<b>Fuente</b>	<b>Disponibilidad</b>	<b>Calidad</b>
<b>Agua superficial</b>	Variable pero predecible en el caso de ríos. Constante en lagos	Ríos podrían contener carga importante de sólidos suspendidos o contaminantes. En lagos el agua podría ser recargada directamente
<b>Escorrentía de tormenta</b>	Incierta y espaciada temporalmente	En general sólo requiere remoción de sólidos suspendidos.
<b>Agua residual</b>	Constante y predecible	Requiere tratamiento secundario o terciario dependiendo del uso del agua recargada
<b>Agua potable</b>	Constante y predecible	Calidad óptima, no requiere tratamiento

## 2.3 Metodologías

Las metodologías para implementar sistemas de recarga artificial de acuíferos son variadas y responden a características específicas del lugar en que requieren ser emplazados. En términos generales se pueden clasificar en métodos de distribución, modificaciones en el interior del canal y pozos y perforaciones (UNESCO, 2005).

Los métodos de distribución consisten en disponer el agua en una superficie de permeabilidad adecuada para que esta pueda ser infiltrada a través del suelo. Se utilizan cuando el acuífero está cercano a la superficie y, dependiendo de las características de permeabilidad, se puede requerir más o menos superficie para realizar la recarga. Los esquemas más utilizados son las lagunas de infiltración, los sistemas de tratamiento suelo acuífero (SAT) y la inundación controlada.

En el caso de las modificaciones en el interior del cauce de los ríos, las diferentes alternativas consisten en aprovechar condiciones favorables de permeabilidad para fomentar la infiltración natural del río, aumentando el tiempo de retención del agua o aumentando la superficie de recarga. Las metodologías más usadas son los estanques de percolación, represas perforadas y diques.

Los pozos y perforaciones en general son emplazados en lugares donde no se dispone de terrenos para implementar un sistema de infiltración superficial o el suelo permeable se encuentra a una profundidad considerable. Las opciones más comunes son los pozos en la zona no saturada, pozos en la zona saturada y las zanjas de infiltración.

## 2.4 Consideraciones para una implementación exitosa

La correcta evaluación de un proyecto de recarga debe considerar ciertos aspectos fundamentales, como los que se detallan en la Tabla 2.

Tabla 2: Criterios de evaluación para proyectos de recargar artificial de acuíferos (Murray, 2009).

Criterio	Preguntas e indicaciones
1. La necesidad de un proyecto de recarga	<ul style="list-style-type: none"><li>- ¿Cuál es el principal objetivo del proyecto?</li><li>- ¿Es la recarga artificial la mejor opción?</li><li>- ¿Se logrará el principal objetivo?</li></ul>
2. La fuente de agua	<ul style="list-style-type: none"><li>- ¿Cuál es el volumen disponible para recargar?</li><li>- ¿Cuándo está disponible?</li></ul>
3. Calidad del agua	<ul style="list-style-type: none"><li>- ¿Tiene la fuente de agua la calidad apropiada?</li><li>- Describir la calidad natural del agua subterránea</li><li>- ¿La mezcla mejorará o empeorará la calidad del agua subterránea?</li><li>- Estimar probabilidad de colmatación</li></ul>
4. Hidráulica del acuífero	<ul style="list-style-type: none"><li>- ¿Hay suficiente espacio en el acuífero para almacenar el agua?</li><li>- ¿Es suficientemente permeable como para recibir el agua?</li><li>- ¿Será recuperable en el momento deseado?</li></ul>
5. Metodología de recarga	<ul style="list-style-type: none"><li>- ¿Cómo se realizará la infiltración?</li><li>- ¿Cuál es la infraestructura necesaria?</li><li>- ¿Cuáles son los desafíos ingenieriles?</li></ul>
6. Consideraciones ambientales	<ul style="list-style-type: none"><li>- ¿Cuáles son los potenciales beneficios y riesgos?</li></ul>

## 3 DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

La zona de estudio se encuentra en la XV región de Arica y Parinacota ubicada aproximadamente entre los 17°30' y 19°15' de latitud sur y los 68°55' y 70°30' de longitud oeste. La cuenca del río San José se encuentra en la comuna de Arica y abarca una superficie de 3.187 [km<sup>2</sup>]. Las principales fuentes de agua natural de la cuenca son los ríos Laco, Seco y Tignamar, los cuales son afluentes al San José (Figura 1).

El Valle de Azapa se encuentra en la parte baja de la cuenca entre los sectores de Saucache y Pampa Grande. Para efectos de un mejor entendimiento, en adelante también se hablará en términos del kilometraje del Camino Azapa, el cual atraviesa el Valle desde Saucache hasta Ausipar, ubicándose el sector de Pampa Grande alrededor del kilómetro 40.

Debido a la escasez del recurso hídrico, en los años sesenta se construyó el canal Lauca, el cual aporta un promedio histórico de 600 [l/s] al río San José en el punto de descarga de la central hidráulica Chapiquiña. Luego el caudal es recuperado en el sector San José en Bocatoma y distribuido a los regantes a través del Canal Matriz Azapa

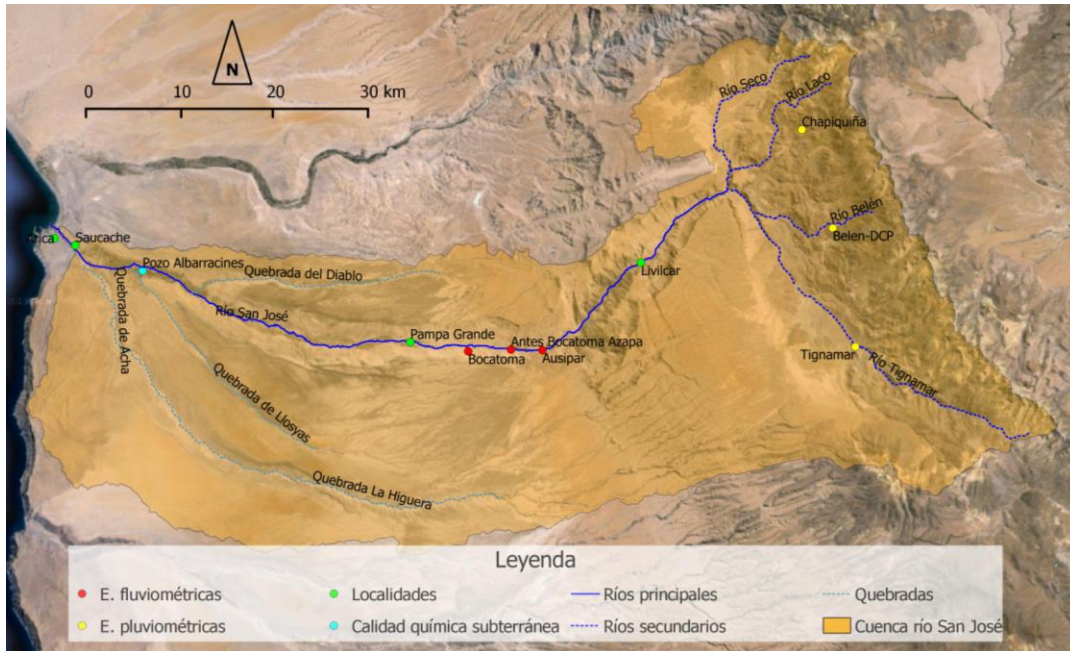


Figura 1: Cuenca del río San José.

### 3.1 Antecedentes climáticos

El clima de la cuenca es del tipo árido subtropical. Se aprecian camanchacas características del borde costero del norte de Chile y una alta humedad. En la parte media del valle bajan las temperaturas y tienen mayor oscilación producto de la altura y la lejanía con el mar. La parte alta de la cuenca se caracteriza por concentrar la mayor parte de las precipitaciones las cuales son de origen convectivo (JICA, 1995). En la Figura 2 se muestra la pluviometría en la parte alta del valle.

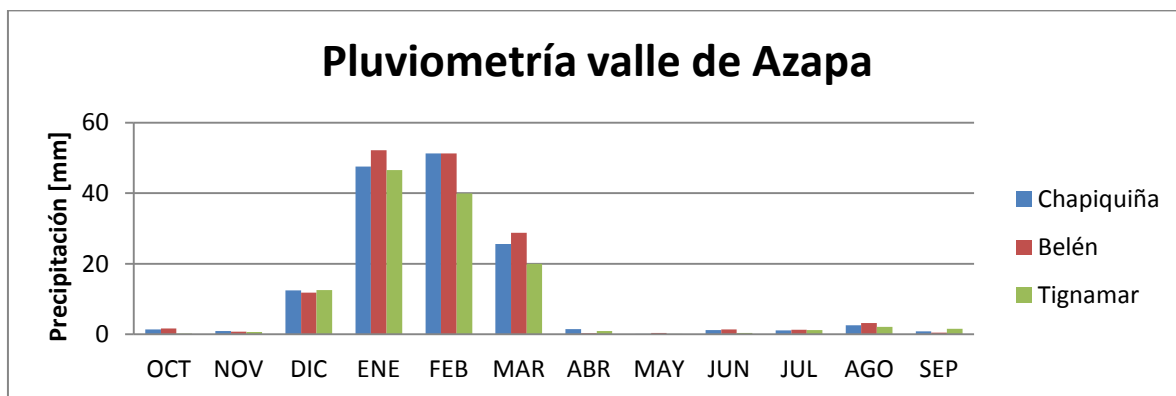


Figura 2: Pluviometría cuenca alta del Valle de Azapa.

### 3.2 Hidrología

La hidrología del Río San José depende principalmente de las lluvias estivales altiplánicas, siendo esta la principal causa para los aumentos de caudal en los meses de verano. Es en aquellos meses, entre diciembre y marzo, en que el caudal es suficiente y atraviesa por completo el valle para desembocar en el Océano Pacífico.

En la Figura 3 se muestra la curva de variación estacional en el sector Río San José antes Bocatoma Azapa generada a partir de la estadística rellena para el período comprendido entre 1963 y 1993 (Arrau, 1997), la cual representa el comportamiento general del río.

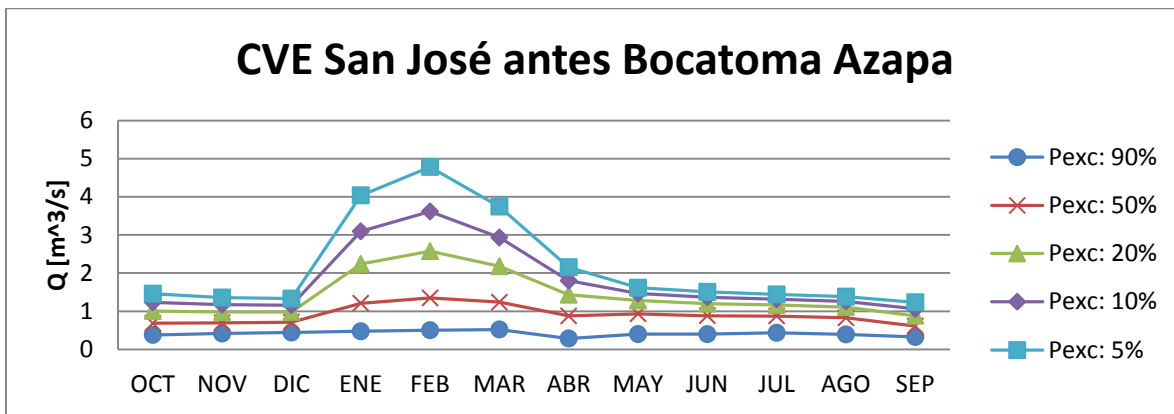


Figura 3: Curva de variación estacional río San José sector Antes Bocatoma Azapa.

### 3.3 Uso y explotación del agua

Actualmente los usos más importantes son el agropecuario y el de agua potable, los que juntos constituyen cerca del 80% de la demanda total del valle (AC-Ingenieros, 2007). Históricamente la explotación del recurso hídrico ha permanecido en una situación de equilibrio, si bien se observa un descenso importante en los niveles de los pozos durante periodos secos, estos se recuperan después de las grandes crecidas en todos los sectores del valle. Sin embargo, el incremento en los niveles de explotación de un promedio histórico de 567 [l/s] a 740 [l/s] en el año 2008, ha generado descensos más acelerados y la desaparición de algunas vertientes (DGA, 2009).

## 4 ANÁLISIS

### 4.1 Fuentes de agua

Se consideraron dos posibles fuentes de agua para la recarga: el caudal de las crecidas del río San José y los efluentes de la planta de tratamiento de aguas residuales de la ciudad de Arica.

#### *Aguas de Crecida*

La estación fluviométrica ubicada en el valle y que presenta información más completa corresponde a la estación de monitoreo Ausipar, aguas arriba del sector San José en Bocatoma. La disponibilidad hídrica se estimó en base a la estadística completada y corregida en Ausipar entre los años 1991 y 2008 realizada por MN Ingenieros en 2011 (MN-Ingenieros, 2011), a la cual se le restó el caudal medido en el Canal Azapa para el mismo período.

Como la mayor parte de la disponibilidad de agua ocurre durante la época estival, desde el punto de vista de la recarga artificial lo que interesa saber es cuál es el volumen susceptible de ser almacenado durante la temporada de crecidas para después ser recuperado durante el resto del año.

En la Figura 4 se muestra el volumen que podría ser infiltrado entre septiembre de un año y agosto del siguiente para todo el período analizado, dado un caudal de diseño para el sistema de infiltración de entre 0,2 [m<sup>3</sup>/s] y 2,0 [m<sup>3</sup>/s]. Se observa que en general existe una capacidad ociosa importante a medida que aumenta el caudal de diseño, a excepción de las crecidas de los años 1999 y 2001.

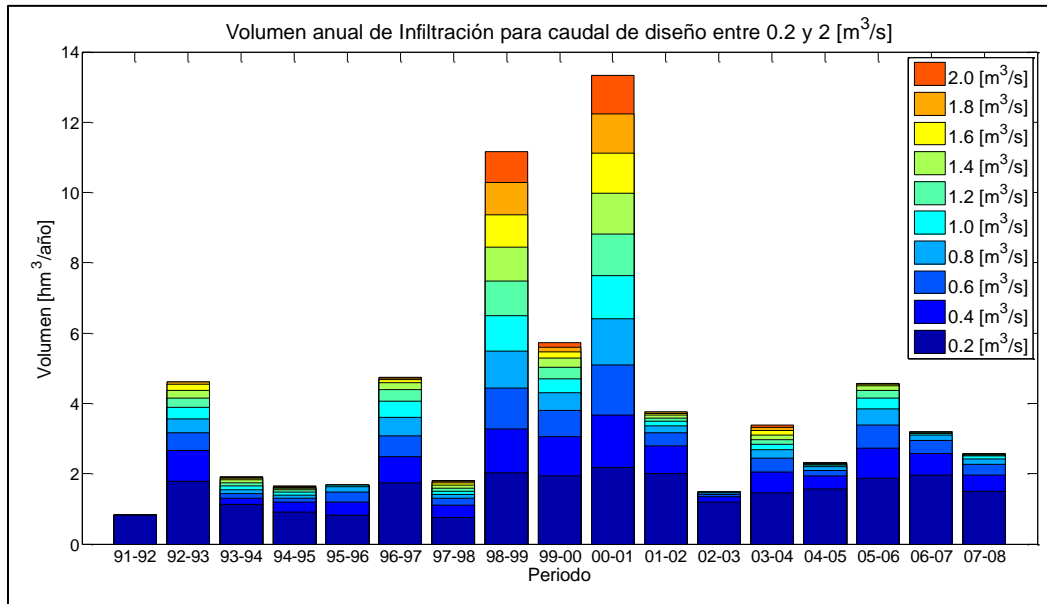


Figura 4: Volumen aprovechable por año.

Se estimó que un caudal de diseño de 0,6 [m<sup>3</sup>/s] sería apropiado en este caso considerando como criterio de diseño la disminución de la capacidad ociosa del sistema de infiltración, evitar cargas excesivas de sólidos suspendidos que pudiesen generar colmatación y, finalmente, infiltrar un caudal que resultase significativo. Así, el volumen almacenado anual sería de 2,57 [hm<sup>3</sup>], equivalente a una tasa de infiltración promedio de 81 [l/s].

#### Aguas Residuales

La disponibilidad de agua residual se extrajo del estudio tarifario realizado por Aguas del Altiplano para el período 2013-2018. Según ese estudio el volumen de facturación es de 27,25 [hm<sup>3</sup>/año], es decir, 864 [l/s] en promedio. La variabilidad temporal de esta fuente no afecta el rango aprovechable para la recarga artificial, por lo cual no se considera en el análisis.

## 4.2 Calidad de agua

#### Aguas de Crecida

Se analizó la calidad de agua superficial considerando sólo las mediciones de calidad realizadas en la estación RíoSan José antes Bocatoma Azapa. En el caso del acuífero se examinaron las mediciones realizadas en la estación de monitoreo de la DGA Pozo Albarracines.

Dicha información se comparó con la normativa NCh1333.Of78 y NCh409/1.Of2005 que establecen las concentraciones máximas para el uso en riego y agua potable respectivamente. Cabe destacar además que en el Decreto Supremo N° 46 de 2003 se dispone que si la calidad natural del agua del acuífero excede la normativa, entonces el límite máximo de descarga de contaminantes será igual a dicha concentración natural.

Se encontró que los parámetros más críticos del valle son el boro y el arsénico ya que exceden de forma importante las concentraciones máxima para el uso en riego y potable respectivamente. La evolución temporal de sus concentraciones, junto con el límite máximo establecido por norma, se muestra en la Figura 5 y Figura 6.

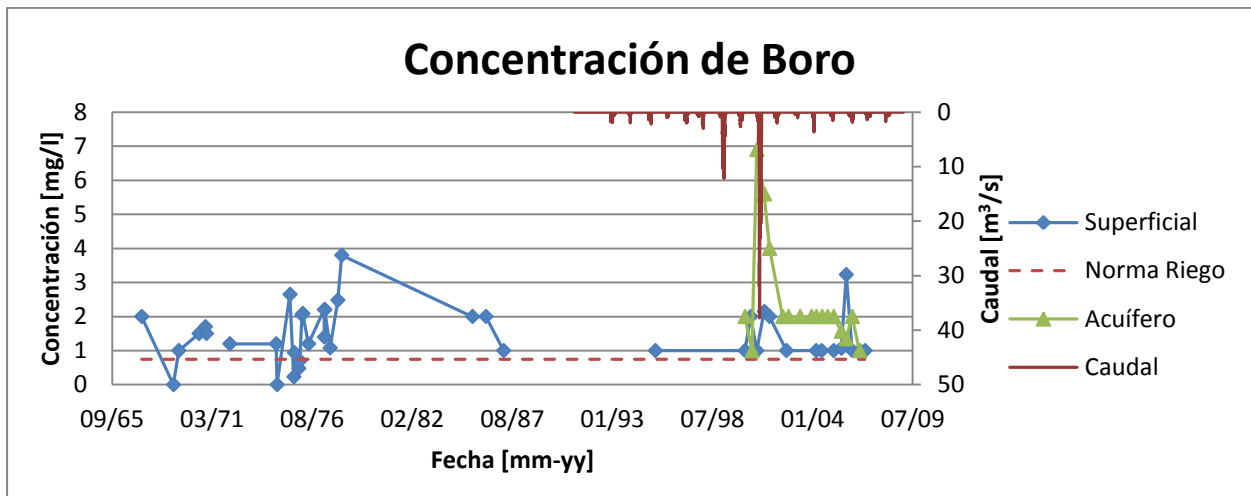


Figura 5: Evolución de las concentraciones de boro en el pozo de monitoreo Albarracines de la DGA en el acuífero del Valle de Azapa.

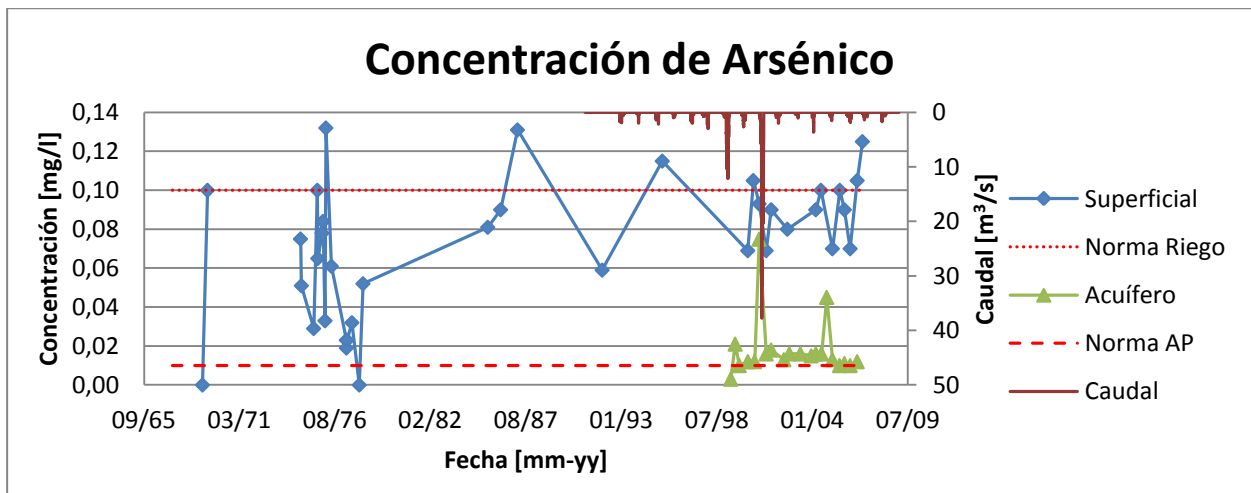


Figura 6: Evolución de las concentraciones de arsénico en el pozo de monitoreo Albarracines de la DGA en el acuífero del Valle de Azapa.

Si bien la concentración de boro superficial es mayor a lo permitido por norma, esta es menor a la concentración existente en el acuífero, por lo tanto el agua superficial podría ser infiltrada sin necesidad de tratamiento. Además, cabe mencionar que en la normativa de calidad de aguas para uso potable no existe restricción para la concentración de boro.



Una situación distinta ocurre en el caso de la concentración de arsénico, en el cual los valores observados en el acuífero son inferiores a los detectados en el agua de recarga, la cual presenta concentraciones de 0,07 [mg/l] en promedio.

### *Aguas Servidas*

La infiltración de efluentes de plantas de tratamiento de aguas residuales es factible siempre y cuando, se aplique un tratamiento adecuado según el uso que se le dará finalmente al agua recargada. En ese sentido Honeyman (Honeyman, 1999) estudió la remoción de contaminantes que ejerce el suelo al inyectar agua mediante pozos en la zona no saturada. En dicho trabajo se obtuvo como resultado, después de aplicar la infiltración mediante ciclos de carga y descarga, que la calidad del agua que alcanza la zona saturada tiene calidad suficiente para ser utilizada en riego, sin embargo la débil remoción de nitrógeno amoniacal imposibilita su uso para agua potable

En la Tabla 3 se muestran los parámetros característicos de calidad en el emisario submarino de Aguas del Altiplano (A.A.) y la caracterización del agua que utilizó Honeyman en sus experimentos de laboratorio (SAT).

**Tabla 3: Calidad de aguas servidas de Arica.**

Parámetro	Unidad	Valor A.A.	N° muestras A.A.	Valor SAT
pH	-	7,1	7	7,5
CE	uS/cm	6750	1	2000
DBO5	mg/l	272	50	100
DQO	mg/l	823	2	300
SST	mg/l	312	178	75

Los parámetros de calidad utilizados por Honeyman son bastante mejores que la calidad del agua residual de Arica, por lo cual no sería factible inyectar esta agua a través del sistema SAT si se considera solamente como criterio la calidad final del agua recargada.

### **4.3 Metodologías de Infiltración**

#### *Infiltración mediante lagunas*

Como parte de este estudio se realizaron pruebas de infiltración superficial con un infiltrómetro de doble anillo con carga variable, para estimar el requerimiento de superficie para recargar un caudal de diseño de 0,6 [m<sup>3</sup>/s]. Las mediciones fueron realizadas en cinco sectores del valle entre los kilómetros 6 y 24 del Camino Azapa, los cuales fueron escogidos en base a las características granulométricas de los sedimentos que se observan en superficie.

El diseño de lagunas de infiltración incluye una pequeña capa de arena en la superficie de infiltración que actúa como filtro para disminuir la probabilidad de colmatación. Por esta razón se utilizó la tasa de infiltración residual en los sitios que representaron de mejor forma esta condición. Los escogidos fueron el S1 S2, S4 y S5 de la Figura 7, obteniéndose una infiltración media de 3,18 [m/d].

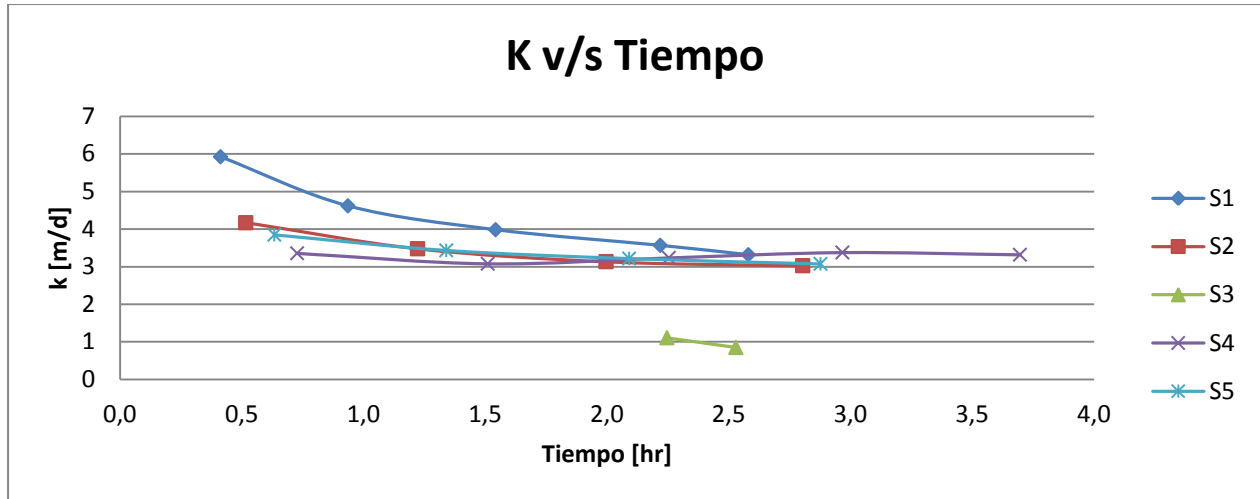


Figura 7: Resultado de pruebas de infiltración superficial.

Considerando que la superficie de infiltración en algún momento se colmatará y disminuirá su capacidad, se estimó un coeficiente de reducción del 15% (Hofkes&Visscher, 1986) con lo cual la tasa de infiltración de largo plazo sería de 0,48 [m/d]. Teniendo en cuenta que estos sistemas funcionan con varias unidades infiltradoras alternando ciclos de recarga y secado, y considerando experiencia internacional (CAP, 2003), se estimó que un 20% de la superficie dispuesta para infiltrar permanecerá en el ciclo seco y se requerirá un 11% extra para instalar un sedimentador (Hurlow et al. 2011). Adicionalmente, se sumó un 10% para incluir la superficie requerida para equipos e instalaciones.

Luego de aplicar estos factores de corrección se obtuvo que el requerimiento de superficie para un caudal de diseño de 0,6 [m<sup>3</sup>/s] sería de 14,7 [ha], equivalente a una infiltración media anual por hectárea de 5,6 [l/s/ha].

#### 4.4 Hidráulica del acuífero y capacidad de almacenamiento

La capacidad de almacenamiento del acuífero se calculó mediante la siguiente expresión.

$$V = S \cdot A \cdot \Delta h \quad (1)$$

Donde  $V$  es el volumen de almacenamiento,  $S$  es el coeficiente de almacenamiento,  $A$  es la superficie del acuífero y  $\Delta h$  es el espesor disponible para almacenar. El coeficiente de almacenamiento se estimó en 0,12 (DGA, 2009), mientras que la superficie del acuífero se calculó utilizando el modelo actual de aguas subterráneas de la cuenca (DGA, 2009).

El espesor disponible para almacenar depende de la variación promedio en el nivel piezométrico producto de la recarga, y corresponde al espesor entre el nivel promedio histórico del agua subterránea y una profundidad de diseño  $h_d$ , suficientemente grande como para evitar reducciones significativas en la capacidad de infiltración del pozo o laguna. Basado en experiencia internacional se estimó  $h_d$  igual a 6 [m] (CAP, 2003). En la Tabla 4 se indica la capacidad de almacenamiento del valle.

**Tabla 4: Capacidad de almacenamiento**

Cuenca	Extensión (Km Azapa)	$\Delta h$ [m]	Área [ha]	Volumen total [hm <sup>3</sup> ]
Baja	0-7	22,9	809	22,2
Media baja	7-13	7,0	732	6,2
Media alta	13-19	4,8	562	2,7
Alta	19-30	14,3	1079	18,5

Se estimó la permeabilidad del suelo a partir de la estratigrafía de perfiles transversales en diferentes sectores del valle (Figura 8), construidos en base a la estratigrafía de pozos (JICA, 1995) y resultados de estudios geofísicos mediante el método del transiente electromagnético (TEM) (DGA, 2010). El análisis indicó que los sectores de la cuenca que cuentan con las mejores permeabilidades son la parte baja entre los kilómetros 5 y 10 del Camino Azapa y la parte alta entre los kilómetros 20 y 30.

Si la fuente de agua es el río San José, lo ideal sería emplazar el sistema de infiltración en la parte alta de la cuenca para así aprovechar la infraestructura de la Bocatoma del Canal Azapa para desviar las aguas del río. Así, el almacenamiento de 18,5 [hm<sup>3</sup>] es suficiente para contener el volumen infiltrable de 2,57 [hm<sup>3</sup>] en términos anuales.

En el caso de las aguas residuales un buen sector de emplazamiento sería en la parte baja cercano al kilómetro 10 y la capacidad de almacenamiento de 6,2 [hm<sup>3</sup>] generaría un caudal posible de ser infiltrado de 195 [l/s].

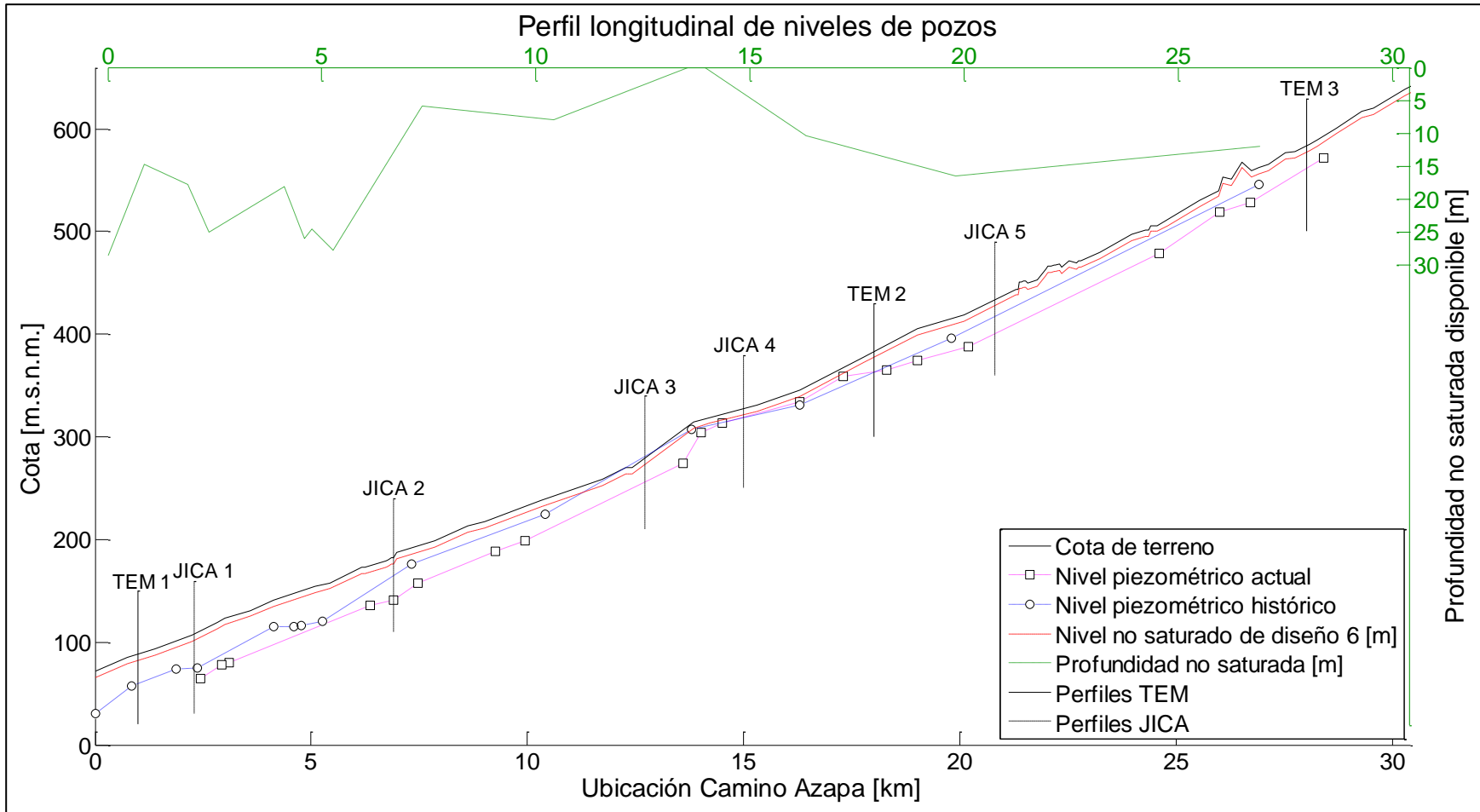


Figura 8: Perfil longitudinal de niveles de agua subterránea y disponibilidad de almacenamiento

## 5 CONCLUSIONES

Si la fuente de agua es el río San José, entonces el volumen susceptible de ser infiltrado es de 2,57 [hm<sup>3</sup>/año] con un caudal de diseño de 600 [l/s] y una infiltración media de 80 [l/s]. Para las aguas residuales la disponibilidad alcanza los 27,25 [hm<sup>3</sup>/año] equivalente a 864 [l/s]. Respecto de la calidad, ambas fuentes requieren tratamiento de tipo terciario para la remoción de arsénico y nitrógeno. La disponibilidad del acuífero para almacenar agua es de 18,5 [hm<sup>3</sup>] en la parte alta del valle y 6,2 [hm<sup>3</sup>] en la parte baja.

En términos generales la infiltración superficial ofrece la ventaja, en comparación a la recarga con pozos, que los costos en infraestructura son considerablemente menores. Esto en condiciones ideales donde la disponibilidad de superficie y la calidad del agua son adecuadas, aspectos que en el Valle de Azapa no se cumplen. Los altos niveles de arsénico, el intensivo uso agrícola y la alta variabilidad del recurso hídrico indican que esta alternativa no sería la más apropiada para la cuenca del río San José.

Si bien la recarga con aguas residuales exige un elevado costo en tratamiento, elevación y construcción de pozos, el caudal infiltrable podría ser considerablemente mayor y se tendría un alto grado de seguridad respecto de su disponibilidad.

A escala conceptual, la infiltración de aguas residuales en la zona no saturada, mediante pozos en la parte media baja de la cuenca, asoma como la metodología más recomendable para incrementar la disponibilidad del recurso hídrico del Valle de Azapa. Sin embargo, esta hipótesis debe ser comprobada mediante análisis económicos que determinen si los costos de superficie y de remoción de arsénico representarían factores que imposibilitarían la infiltración mediante lagunas, y además, se debe aumentar la cobertura en medición de calidad de aguas en la parte alta del valle.

## REFERENCIAS

- AC-Ingenieros. (2007). Estimaciones de demanda de agua y proyecciones futuras. Zona I norte. Regiones I a IV.
- Arrau, L. (1997). Modelo de simulación hidrológico operacional cuenca del río San José.
- Bouwer, H. (2002). Artificial recharge of groundwater: hydrogeology and engineering. *Hydrogeology Journal*, 10:121–142.
- CAP. (2003). Central Arizona Project. Obtenido de <http://www.cap-az.com/index.php/departments/recharge-program/hieroglyphic-mountains>.
- DGA. (2009). Definición de estrategias de manejo sustentable para el acuífero de Azapa, XV Región. Dirección General de Aguas (DGA), Ministerio de Obras Públicas, República de Chile.
- Fernández, E. (2004). Recarga artificial de acuíferos en cuencas fluviales. Aspectos cualitativos y medioambientales. Criterios técnicos derivados de la experiencia en la Cubeta de Santiuste (Segovia). Universidad Complutense de Madrid, Facultad de Ciencias Geológicas. Departamento de Geodinámica, Madrid.

- Hofkes&Visscher. (1986). Artificial groundwater recharge for water supply of medium-size communities in developing countries.
- Honeyman, G. (1999). Estudio experimental para la recuperación de aguas servidas de Arica mediante el sistema de tratamiento acuífero (SAT). Universidad de Chile, Departamento de Ingeniería Civil, Santiago.
- Hurlow, H., Lowe, M., Matyjasik, M., & Gettings, P. (2011). THE WEBER RIVER BASIN AQUIFER STORAGE AND RECOVERY PILOT PROYECT. Utah Geological Survey, Utah Department of Natural Resources, Utah.
- IGRAC. (2007). Artificial Recharge of Groundwater in the World. International Groundwater Resources Assessment Centre.
- JICA. (1995). Estudio sobre el desarrollo de los recursos de agua en la parte norte de Chile. Japan International Cooperating Agency.
- MN-Ingenieros. (2011). Diseño Embalse Livilcar región de Arica y Parinacota.
- Murray, R. (2009). A check-list for implementing successful artificial recharge projects. Department of Water Affairs, Republic of South Africa.
- UNESCO. (2005). Strategies for Managed Aquifer Recharge (MAR) in semi-arid areas. Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura, International Hydrological Programme (IHP).