



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

**CARACTERIZACIÓN DE LA CUENCA DEL RÍO SAN JOSÉ EN ARICA PARA LA EVALUACIÓN
A NIVEL DE PERFIL DE UN SISTEMA DE RECARGA ARTIFICIAL DE ACUÍFEROS**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

GONZALO ESTEBAN JIMÉNEZ MARTÍNEZ

PROFESOR GUÍA:
JULIO ROBERTO VALLEJOS ALFARO

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
PAULO HERRERA RICCI
MARÍA PÍA MENA PATRI

SANTIAGO DE CHILE
NOVIEMBRE 2013

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL
TÍTULO DE: Ingeniero Civil
POR: Gonzalo Esteban Jiménez Martínez
FECHA: Noviembre 2013
PROFESOR GUÍA: Julio Vallejos Alfaro

CARACTERIZACIÓN DE LA CUENCA DEL RÍO SAN JOSÉ EN ARICA PARA LA EVALUACIÓN A NIVEL DE PERFIL DE UN SISTEMA DE RECARGA ARTIFICIAL DE ACUÍFEROS

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. En diferentes estudios el déficit hídrico se ha estimado entre 250 y 500 [l/s], y a raíz de aquello se han observado descensos continuos de los niveles de los pozos por periodos de hasta 20 años.

El objetivo de este trabajo fue realizar una caracterización de la cuenca del río San José para determinar el potencial de implementar un sistema de recarga artificial de acuíferos en el Valle de Azapa, como alternativa para mitigar el déficit hídrico de la zona. Luego de analizar preliminarmente los antecedentes, tanto de metodologías de recarga existentes como las características propias del valle, se determinó que la infiltración de las aguas del río San José mediante lagunas de infiltración, y la recarga de las aguas residuales de Arica mediante pozos serían alternativas factibles de implementar en este caso.

Se estimó la disponibilidad hídrica del río San José en base a la estadística de caudales diarios de las estaciones de monitoreo Ausipar y San José en Bocatoma Azapa. Se encontró que considerar un caudal de diseño de 0,6 [m³/s] sería razonable, lo cual permitiría infiltrar en promedio 2,45 [hm³] anualmente y se requerirían 15,9 [ha] para hacerlo mediante lagunas. Sin embargo, se requiere una importante remoción sedimentos para evitar problemas de colmatación y existe el riesgo de contaminar el acuífero con arsénico por sus elevadas concentraciones en el agua superficial. Las aguas residuales presentan una disponibilidad de 864 [l/s] y para infiltrarlas requieren tratamiento terciario y elevar el caudal hasta el punto de inyección.

Se identificaron dos sectores de adecuada permeabilidad para la recarga: uno en la parte baja del Valle entre los kilómetros 5 y 12 del Camino Azapa con un potencial de almacenamiento de 6,2 [hm³] y otro en la parte alta entre los kilómetros 18 y 30 con un potencial para almacenar 18,5 [hm³]. Así, un buen lugar de emplazamiento para la infiltración por lagunas sería entorno al kilómetro 30 cercano a la Bocatoma Azapa, mientras que la infiltración por pozos sería recomendable emplazarla entorno al kilómetro 12.

La infiltración por pozos asoma como la alternativa más recomendable por el mayor caudal que podría ser recargado y el alto grado de seguridad respecto de su disponibilidad, a diferencia de la infiltración por lagunas donde sería necesario remover el arsénico y los sedimentos que arrastra el río San José, la disponibilidad de terreno es limitada, no hay certeza respecto de la disponibilidad de agua y las crecidas del río constituyen un riesgo importante para las obras hidráulicas.

Finalmente cabe destacar que para implementar un proyecto de este tipo se requiere mejorar de manera importante tanto la cantidad como la calidad de la información de caudales y aumentar la cobertura de monitoreo de la calidad química de las aguas subterráneas.

TABLA DE CONTENIDO

<u>CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN</u>	<u>1</u>
1.1 MOTIVACIÓN	1
1.2 OBJETIVOS	1
1.3 ORGANIZACIÓN Y ALCANCES DE LA MEMORIA	2
<u>CAPÍTULO 2: REVISIÓN DE ANTECEDENTES: RECARGA ARTIFICIAL DE ACUÍFEROS</u>	<u>3</u>
2.1 GENERALIDADES	3
2.2 FUENTES DE ABASTECIMIENTO	3
2.3 METODOLOGÍAS DE RECARGA	4
2.3.1 MÉTODOS DE DISTRIBUCIÓN	4
2.3.2 MODIFICACIONES EN EL INTERIOR DEL CANAL.	5
2.3.3 POZOS Y PERFORACIONES	7
2.3.4 INFILTRACIÓN INDUCIDA	8
2.4 COLMATACIÓN	9
2.5 INSTITUCIONALIDAD	9
<u>CAPÍTULO 3: CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO</u>	<u>11</u>
3.1 GENERALIDADES	11
3.2 ANTECEDENTES CLIMÁTICOS	12
3.3 HIDROLOGÍA	12
3.4 HIDROGEOLOGÍA	13
3.5 CALIDAD DEL AGUA	15
3.6 USO DE AGUA	16
3.7 EXPLOTACIÓN	16
3.8 FUNCIONAMIENTO DEL ACUÍFERO	17
<u>CAPÍTULO 4: EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS DE RECARGA</u>	<u>18</u>
4.1 GENERALIDADES	18
4.2 VARIACIÓN DE NIVELES DE AGUA SUBTERRÁNEA	18
4.3 CRITERIOS DE EVALUACIÓN EN PROYECTOS DE RECARGA ARTIFICIAL	22
4.4 FUENTES DE AGUA PARA LA RECARGA	23
4.4.1 CRECIDAS DEL RÍO SAN JOSÉ	23
4.4.2 AGUAS RESIDUALES DE ARICA	27
4.5 CALIDAD DEL AGUA	27
4.5.1 RÍO SAN JOSÉ Y AGUA SUBTERRÁNEA	27

4.5.2	AGUAS RESIDUALES DE ARICA	33
4.6	HIDRÁULICA DEL ACUÍFERO	34
4.6.1	CAPACIDAD DE ALMACENAMIENTO	34
4.6.2	CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA	38
4.7	METODOLOGÍA DE RECARGA	38
4.7.1	LAGUNAS DE INFILTRACIÓN	38
4.7.2	INFILTRACIÓN CON POZOS	40

CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES **42**

5.1	METODOLOGÍAS DE RECARGA	42
5.2	RECOMENDACIONES	43
5.3	CONCLUSIONES GENERALES	44

BIBLIOGRAFÍA **45**

ANEXO A: RECARGA ARTIFICIAL DE ACUÍFEROS

ANEXO B: CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

ANEXO C: CAMPAÑAS DE TERRENO

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1: Características de fuentes de abastecimiento para recarga artificial	4
Tabla 2-2: Metodologías de recarga artificial. Métodos de distribución.	5
Tabla 2-3: Metodologías de recarga artificial. Modificaciones en el interior del canal.....	6
Tabla 2-4: Metodologías de recarga artificial. Pozos y perforaciones.....	8
Tabla 2-5: Metodologías de recarga artificial. Infiltración inter dunar.	9
Tabla 3-1: Evaporación en el Valle de Azapa.....	12
Tabla 3-2: Normativa de calidad de agua.	15
Tabla 3-3: Uso de agua en el valle de Azapa.....	16
Tabla 4-1: Criterios de evaluación para proyectos de recargar artificial de acuíferos.....	22
Tabla 4-2: Volumen promedio anual de infiltración para diferentes caudales de diseño.....	26
Tabla 4-3: Parámetros de calidad de agua exigidos por la normativa vigente.	28
Tabla 4-4: Factibilidad de infiltrar al acuífero y factibilidad de utilizar el agua recargada.....	30
Tabla 4-5: Calidad de aguas Instituto Nacional de Hidráulica y Aguas del Altiplano.....	31
Tabla 4-6: Volumen almacenable por aumento unitario del nivel freático	34
Tabla 4-7: Espesor y volumen total de almacenamiento	36

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1: Descenso en niveles de pozos.....	1
Figura 3-1: Cuenca del Río San José.	11
Figura 3-2: Pluviometría cuenca alta del río San José.	12
Figura 3-3: Curva de variación estacional San José antes Bocatoma Azapa.	13
Figura 3-4: Ubicación perfiles JICA y perfiles TEM.....	14
Figura 3-5: Caracterización aguas superficiales y subterráneas.	15
Figura 4-1: Registro histórico de caudales y precipitación.....	19
Figura 4-2: Ubicación de pozos de monitoreo de niveles de agua subterránea	20
Figura 4-3: Niveles de agua subterránea y precipitación mensual.	20
Figura 4-4: Niveles de agua subterránea y caudales diarios.	21
Figura 4-5: Estadística de caudales medios diarios aguas abajo de Bocatoma Azapa.	23
Figura 4-6: Estadística de caudales medios diarios aguas abajo de Bocatoma Azapa. Período entre septiembre de 2000 y agosto de 2003.	24
Figura 4-7: Estadística corregida de caudales medios diarios aguas abajo de Bocatoma Azapa.	25
Figura 4-8: Curva de duración caudal aguas debajo de Bocatoma Azapa.	25
Figura 4-9: Volumen aprovechable por año.	26
Figura 4-10: Concentración de Arsénico antes Bocatoma Azapa.	32
Figura 4-11: Sedimentación de material fino	32
Figura 4-12: Representación esquemática de niveles de agua subterránea.....	35
Figura 4-13: Efecto de una capa colmatante en la tasa de infiltración.....	35
Figura 4-14: Efecto de la profundidad del nivel freático en la tasa de infiltración.	36
Figura 4-15: Perfil longitudinal de niveles de pozos.....	37
Figura 4-16: Mapa de perfil longitudinal de niveles de agua subterránea.....	38
Figura 4-17: Ubicación de pruebas de infiltración superficial.....	39
Figura 4-18: Resultado de pruebas de infiltración superficial.	39

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1 MOTIVACIÓN

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], y como ocurre en todo el norte del país, el factor limitante para el desarrollo de dicha actividad es el recurso hídrico, obteniéndose este del Canal Azapa y de la explotación de las aguas subterráneas.

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 500 [l/s], es decir, entre 7,9 y 15,8 [hm³/año]. La aparente sobreexplotación y vulnerabilidad en la que se encuentra el sistema se ha evidenciado por descensos continuos en los niveles de los pozos durante períodos prolongados de tiempo de hasta 20 años.

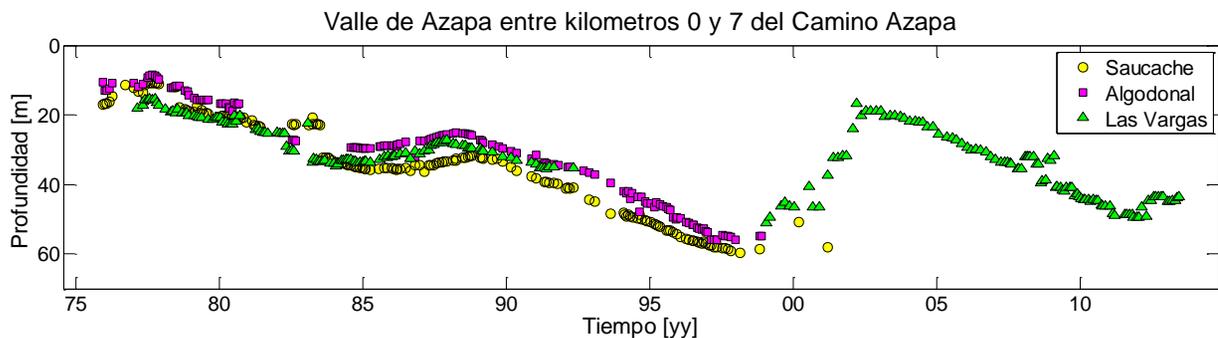


Figura 1-1: Descenso en niveles de pozos.
Fuente: Elaboración propia.

En este contexto se han evaluado diversas medidas para darle solución a la sobreexplotación del valle. Una de ellas consiste en recargar el acuífero artificialmente. La recarga artificial de acuíferos consiste en un conjunto de técnicas que permiten incrementar la disponibilidad de los recursos hídricos de un acuífero mediante el aumento de las tasas de recarga. Existen variadas técnicas para llevar a cabo tal objetivo, algunas de ellas con cientos de años de antigüedad. En los últimos años se ha posicionado como una herramienta de gestión hídrica económica y de gran efectividad con respecto a grandes obras hidráulicas superficiales, y cuyo principal objetivo es actuar sobre la calidad de las aguas y aumentar su disponibilidad (Fernández, 2004).

1.2 OBJETIVOS

El objetivo general de esta memoria es realizar una caracterización de la cuenca del río San José que permita determinar el potencial de implementar un programa de recarga artificial de acuíferos.

Para llevar a cabo lo anterior se distinguen los siguientes objetivos específicos:

- Identificar posibles fuentes de agua para infiltrar, así como su caracterización en cuanto a disponibilidad y calidad.
- Identificar metodologías de recarga aplicables y potenciales zonas de infiltración.
- Evaluar las alternativas según las características de disponibilidad y calidad de aguas y según las características de almacenamiento del acuífero.
- Determinar una metodología de recarga óptima mediante un análisis técnico y ambiental a nivel de perfil de proyecto.

1.3 ORGANIZACIÓN Y ALCANCES DE LA MEMORIA

Capítulo I: Consiste en una breve introducción al trabajo de título, destacando el déficit hídrico que enfrenta el Valle de Azapa y la recarga artificial de acuíferos como una herramienta eficaz para darle solución.

Capítulo II: Corresponde a la revisión bibliográfica realizada donde se hace referencia a los aspectos más importantes a considerar para un proyecto de recarga artificial de acuíferos, tales como fuentes de agua, metodologías de recarga y aspectos hidrogeológicos, entre otros.

Capítulo III: Caracterización de la zona de estudio. Se entrega una descripción general de la cuenca del río San José enfocada en los puntos más importantes a considerar desde la perspectiva de la recarga artificial.

Capítulo IV: En esta sección se evalúan las alternativas de recarga artificial que se podría implementar en el Valle de Azapa, se analizan cuáles son las fuentes de agua disponibles, evaluándose su disponibilidad y calidad, se estudia la capacidad del acuífero para almacenar agua de recarga y se evalúa en qué sectores del valle sería más recomendable realizar la recarga entre otros aspectos.

Capítulo V: Se resumen las principales conclusiones del trabajo de título y se entregan algunas recomendaciones.

CAPÍTULO 2: REVISIÓN DE ANTECEDENTES: RECARGA ARTIFICIAL DE ACUÍFEROS

2.1 GENERALIDADES

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 usos (Murray R. , 2009). 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, 2013).

De acuerdo a los diversos trabajos estudiados se resume que los aspectos más importantes a tomar en cuenta para el diseño de 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. Dependiendo de la calidad y disponibilidad del recurso, características hidrogeológicas del suelo, lugar donde se lleva a cabo y sistema de recarga, se obtendrán diferentes resultados respecto de las tasas de infiltración y remoción de contaminantes, los cuales deberán ser evaluados dependiendo del uso que se le quiera dar posteriormente al agua recargada.

En el Anexo A se analiza en extenso aspectos como las posibles fuentes de abastecimiento, consideraciones hidrogeológicas, metodologías de recarga y sus esquemas de funcionamiento, y por último se explica en detalle qué es la colmatación y de qué forma puede ser prevenida o mitigada. En este capítulo se resumen los puntos más importantes de dicho anexo.

2.2 FUENTES DE ABASTECIMIENTO

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 usualmente alta calidad del agua subterránea, 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 base a los antecedentes investigados se concluye que es de suma importancia ser cuidadoso en la elección de la fuente de agua para recarga, la cual dependerá de su disponibilidad, del objetivo del sistema de infiltración, la calidad del agua del acuífero y del uso que se le dará posteriormente al agua recargada.

En la Tabla 2-1 se muestran las posibles fuentes de agua y sus características de disponibilidad y calidad.

Tabla 2-1: Características de fuentes de abastecimiento para recarga artificial

Fuente: Resumido de (UNESCO, 2005).

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

2.3 METODOLOGÍAS DE RECARGA

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, pozos y perforaciones e infiltración inducida (UNESCO, 2005).

A continuación se resumen las principales características de cada metodología en base a la revisión de antecedentes detallada en el Anexo A.

2.3.1 Métodos de distribución

Se utilizan cuando el acuífero está cercano a la superficie y la infiltración se produce a través del medio permeable (UNESCO, 2005). Estos métodos requieren que el suelo sea de alta permeabilidad, y de acuerdo a la distribución de ésta, puede requerir más o menos superficie para infiltrar el caudal deseado. Los sistemas más utilizados son los siguientes:

- Estanque de infiltración: Consiste en piscinas construidas generalmente fuera del cauce, donde el agua superficial es depositada e infiltrada a través del suelo (Murray R. , 2009).
- Tratamiento suelo acuífero (SAT): Estanques de infiltración cuyo principal objetivo es el mejoramiento de la calidad de aguas residuales provenientes de plantas de tratamiento, a través de la limpieza natural que ejerce el suelo a medida que el agua percola a través de este (Murray R. , 2009).
- Inundación controlada: Infiltración de caudales de crecida en amplios terrenos de baja pendiente y previamente acondicionados con zanjas o terraplenes para controlar la inundación (UNESCO, 2005).

Tabla 2-2: Metodologías de recarga artificial. Métodos de distribución.

Fuente: Elaboración propia en base a la bibliografía estudiada.

	MÉTODOS DE DISTRIBUCIÓN		
	Estanque de infiltración	Tratamiento suelo acuífero	Inundación controlada
Necesidad de terreno	Alta dependiendo de la permeabilidad del terreno	Alta dependiendo de la permeabilidad del terreno	La de mayor requerimiento de superficie
Factores estéticos y ambientales	Desventaja debido a su requerimiento de terreno	Desventaja por demanda de terreno y generación de olores. El tratamiento del agua es una ventaja	En general son emplazados en lugares de poco interés económico o ambiental
Requerimiento de permeabilidad del suelo	Mediana o alta dependiendo de la superficie disponible y del volumen objetivo de recarga	Mediana o alta dependiendo de la superficie disponible y del volumen objetivo de recarga	Requiere permeabilidad mediana o baja debido a la gran superficie disponible
Construcción de instalaciones	Sencilla y no requiere de equipos sofisticados	Sencilla, pero requiere equipos sofisticados de monitoreo de calidad.	Sencilla y no requiere de equipos sofisticados
Caudal de recarga	Ventaja. Puede llegar a ser muy grande	Ventaja. Puede llegar a ser muy grande	Ventaja. Puede llegar a ser muy grande
Pérdidas por evaporación	En general despreciable respecto de la infiltración	En general despreciable respecto de la infiltración	En general despreciable respecto de la infiltración
Requisito de calidad del agua	Libre de SS y contaminantes dependiendo de la capacidad de limpieza del suelo	Bajo, utiliza el agua residual de las PTAP con efluente secundario o terciario	Agua libre de contaminantes
Colmatación	Riesgo medio y factible de ser remediado mediante limpieza manual o mecánica	Riesgo alto y factible de ser remediado mediante limpieza manual o mecánica	Riesgo medio y factible de ser remediado mediante limpieza manual o mecánica
Grado de depuración del agua	Alto al aprovechar el mejoramiento al pasar el agua por la zona no saturada	Alto al aprovechar el mejoramiento al pasar el agua por la zona no saturada	Alto al aprovechar el mejoramiento al pasar el agua por la zona no saturada

2.3.2 Modificaciones en el interior del canal.

De utilidad si la permeabilidad del lecho del río es adecuada y no se cuenta con otro sector para implementar un sistema de recarga diferente. También sirven de complemento para controlar crecidas. Los sistemas más utilizados son los siguientes:

- Estanque de percolación: Muros construidos en el cauce que retienen el agua y favorecen así la infiltración (Murray R. , 2009).
- Represa de arena: Consiste en muros construidos sobre suelos de baja permeabilidad que atrapan los sedimentos de las crecidas formando un acuífero artificial (Murray R. , 2009).
- Represa perforada: Estanques de percolación que permiten la liberación controlada de agua para que sea infiltrada aguas abajo del muro (Murray R. , 2009).
- Diques: Barreras en forma de T o L en ríos de poca pendiente y baja altura que aumentan el tiempo de retención del agua (Bouwer, 2002).

Tabla 2-3: Metodologías de recarga artificial. Modificaciones en el interior del canal.
Fuente: Elaboración propia en base a la bibliografía estudiada.

	MODIFICACIONES EN EL INTERIOR DEL CANAL			
	Estanque de percolación	Represa de arena	Represa perforada	Diques
Necesidad de terreno	Media a alta al generar superficie de inundación	Media a alta al generar superficie de inundación	Media a alta al generar superficie de inundación	Pequeña, no genera gran superficie de inundación
Factores estéticos y ambientales	Desventaja por generar superficie de inundación y alterar el régimen natural del río	Desventaja por generar superficie de inundación y alterar el régimen natural del río	Desventaja por generar superficie de inundación y alterar el régimen natural del río	Escasos
Requerimiento de permeabilidad del suelo	Mediana o alta	Requiere suelo de arena gruesa a media	Mediana o alta	Mediana o alta
Construcción de instalaciones	Dificultad media o alta dependiendo del material del muro	Dificultad media o alta dependiendo del material del muro	Dificultad media o alta dependiendo del material del muro	Dificultad media
Caudal de recarga	Proporcional a la permeabilidad. Puede ser muy grande	Proporcional a la permeabilidad. Puede ser muy grande	Proporcional a la permeabilidad. Puede ser muy grande	Proporcional a la permeabilidad. Puede ser muy grande
Pérdidas por evaporación	En general despreciable respecto de la infiltración	Mínima ya que el agua se encuentra en el espacio de poros	En general despreciable respecto de la infiltración	En general despreciable respecto de la infiltración
Requisito de calidad del agua	Sin contaminantes y acepta bajas cargas de SS	Libre de material fino y de buena calidad	Sin contaminantes y acepta bajas cargas de SS	Sin contaminantes y acepta bajas cargas de SS

	MODIFICACIONES EN EL INTERIOR DEL CANAL			
	Estanque de percolación	Estanque de percolación	Estanque de percolación	Estanque de percolación
Colmatación	Riesgo medio y remediable con limpieza manual o mecánica	Riesgo alto sin opción de limpieza	Riesgo medio y remediable con limpieza manual o mecánica	La velocidad de escurrimiento no permite la sedimentación del material fino
Grado de depuración del agua	Alto al aprovechar el mejoramiento al pasar el agua por la zona no saturada	Bajo mejoramiento en la calidad del agua	Alto al aprovechar el mejoramiento al pasar el agua por la zona no saturada	Alto al aprovechar el mejoramiento al pasar el agua por la zona no saturada

2.3.3 Pozos y perforaciones

En general son utilizados 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. La colmatación es el factor crítico debido a la dificultad para realizar limpiezas y el alto costo de las instalaciones (UNESCO, 2005).

- Pozo en la zona no saturada: Pozos que inyectan el agua en la zona no saturada del acuífero cuando el suelo permeable se encuentra a una profundidad considerable o no existe disponibilidad de terreno en superficie para construir métodos de distribución. Puede ser implementado como sistema SAT (Bouwer, 2002).
- Pozo al acuífero: Pozos que inyectan el agua directamente al acuífero cuando el suelo permeable se encuentra a gran profundidad o no existe disponibilidad de terreno en superficie para construir métodos de distribución (Bouwer, 2002).
- Almacenamiento en acuífero y recuperación (AAR): Inyección directa al acuífero y recuperación desde el mismo punto de inyección. Útil para aprovechar capacidad ociosa en plantas de tratamiento (UNESCO, 2005).
- Almacenamiento, transporte y recuperación (AATR): Inyección directa al acuífero y recuperación aguas abajo. Aprovecha la limpieza natural que ejerce el suelo durante el transporte (UNESCO, 2005).
- Zanja de infiltración: Zanjas de 2 a 5 metros de profundidad rellenas con material graduado donde el agua es aplicada mediante una tubería perforada en la parte superior de la zanja (Bouwer, 2002).

Tabla 2-4: Metodologías de recarga artificial. Pozos y perforaciones.

Fuente: Elaboración propia en base a la bibliografía estudiada.

	POZOS Y PERFORACIONES				
	Pozo en la zona no saturada	Pozo al acuífero	AAR	AATR	Zanja de infiltración
Necesidad de terreno	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo	Baja o media
Factores estéticos y ambientales	Bajo impacto estético. Mejora la calidad del agua	Bajo impacto estético. No mejora la calidad del agua	Bajo impacto estético. No mejora la calidad del agua	Bajo impacto estético. Mejora la calidad del agua	Bajo impacto estético. Mejora la calidad del agua
Requerimiento de permeabilidad del acuífero	Mediana o alta	Mediana o alta	Mediana o alta	Mediana o alta	Mediana o alta
Construcción de instalaciones	Alto nivel de ingeniería, pero puede aprovechar instalaciones existentes	Alto nivel de ingeniería, pero puede aprovechar instalaciones existentes	Alto nivel de ingeniería, pero puede aprovechar instalaciones existentes	Alto nivel de ingeniería, pero puede aprovechar instalaciones existentes	Costo medio
Caudal de recarga	Menor comparado con los sistemas superficiales	Menor comparado con los sistemas superficiales			
Pérdidas por evaporación	Nula	Nula	Nula	Nula	Despreciable
Requisito de calidad del agua	Tratamiento secundario o terciario	Al menos tratamiento terciario	Al menos tratamiento terciario	Al menos tratamiento terciario	Tratamiento secundario o terciario
Colmatación	Riesgo alto sin opción de limpieza	Riesgo alto con opción de limpieza			
Grado de depuración del agua	Alto si se diseña como sistema SAT	Nulo	Nulo	Pequeño	Pequeño

2.3.4 Infiltración inducida

Se distinguen 2 principales metodologías en esta categoría: la infiltración en ríos y la infiltración inter-dunar. La primera consiste en un sistema de varios pozos de extracción colocados en serie en el sentido del río que mediante el bombeo inducen la infiltración hacia el acuífero. La infiltración inter-dunar es utilizada en los valles que se forman en las dunas costeras donde el agua de ríos o aguas residuales es depositada y recuperada aguas abajo (UNESCO, 2005).

Tabla 2-5: Metodologías de recarga artificial. Infiltración inter dunar.

Fuente: Elaboración propia en base a la bibliografía estudiada.

	INFILTRACIÓN INDUCIDA	
	Infiltración en ríos	Infiltración inter-dunar
Disponibilidad de terreno	Pequeña. La necesaria para instalar pozos de bombeo	Variable dependiendo del caudal objetivo
Factores estéticos y ambientales	Interviene poco estéticamente y mejora la calidad del agua	Además de la superficie de inundación podría generar olores.
Permeabilidad del acuífero	Alto requerimiento de permeabilidad	Alto requerimiento de permeabilidad.
Construcción de instalaciones	Costosa con elevado nivel de ingeniería. Bajo costo si se aprovechan instalaciones existentes	No requiere instalaciones
Caudal de recarga	Variable dependiendo de la capacidad y número de los pozos	Puede ser alto
Pérdidas por evaporación	Despreciables.	Despreciable en comparación al caudal infiltrado
Requisito de calidad del agua	Libre de contaminantes, sólo acepta una pequeña carga de sedimento fino	Mediano o bajo ya que el agua es utilizada para usos no potables
Colmatación	Variable	Baja
Grado de depuración del agua	Pequeño ya que el trayecto a través del acuífero es corto	Medio a alto ya que las dunas actúan como filtro de arena

2.4 COLMATACIÓN

La colmatación o clogging corresponde a cualquier acumulación de un factor físico, químico o biológico en la superficie de recarga, y que provoca una disminución en la tasa de infiltración. Entre ellos se encuentran la acumulación de sólidos suspendidos, crecimiento de microorganismos y precipitación de elementos químicos, entre otros. Otros factores que influyen en la capacidad de infiltración son la presencia de aire en la zona no saturada y la temperatura tanto del agua de recarga como la del acuífero (Bouwer, 2002).

El control de la colmatación viene dado principalmente, primero por la prevención en el diseño, y luego mediante la operación del sistema de recarga. Algunas medidas consisten en la construcción de sedimentadores o filtros de arena previo a la recarga, operación con ciclos de carga y descarga, realizar sesiones de autolavado (backwashing), limpieza manual o mecánica y cloración entre otras soluciones (Bouwer, 2002).

2.5 INSTITUCIONALIDAD

Es básico y de vital importancia, en cualquier sistema de recarga artificial, considerar la legislación vigente del país en que se emplaza cada proyecto. Los aspectos institucionales más importantes son los que tienen que ver con la normativa medioambiental, derechos de aprovechamiento del recurso hídrico y finalmente establecer quién será el responsable del sistema de recarga.

Respecto de los derechos de aprovechamiento, en el caso de Chile no existe una normativa que abarque específicamente la recarga artificial de acuíferos. Sin embargo en los Artículos 66 y 67 del Código de aguas, y desde su modificación del año 2005 (D.F.L. N° 1122), se menciona que se pueden constituir derechos de aprovechamiento provisional sobre las aguas subterráneas derivadas de las obras de recarga mientras estas se mantengan operando, y podrán transformarse en definitivos después de cinco años de funcionamiento.

Por otro lado, en la Resolución N°425 de la Dirección General de Aguas (DGA) publicada el año 2008, se establecen los estudios técnicos que debe contener un proyecto de recarga artificial para que este sea aceptado por la autoridad, los cuales incluyen correctamente los elementos esenciales que se deben considerar para una implementación exitosa.

El Decreto Supremo N° 46 de 2003 (D.S.N°46) determina las concentraciones máximas de contaminantes permitidas en los residuos líquidos que son descargados por una fuente emisora, a través del suelo, a las zonas saturadas de los acuíferos mediante obras destinadas a infiltrarlo. En este decreto se detallan los límites máximos de emisión dependiendo de la vulnerabilidad del acuífero. Se destaca que si la calidad natural del agua del acuífero excede la normativa, entonces el límite máximo de descarga será igual a dicha concentración natural.

Por otro lado, respecto de la utilización de la mezcla entre el agua recargada y el agua natural del acuífero, ésta debe cumplir con la normativa vigente según su uso. En la Norma Chilena 1333 Of.78 (NCh1333) se establecen las concentraciones máximas de contaminantes en aguas para riego, recreación y vida acuática, mientras que en la Norma Chilena 409/1 Of.2005 (NCh409) se establecen los valores máximos para agua potable.

CAPÍTULO 3: CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

3.1 GENERALIDADES

La zona en 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 [km²]. Las principales fuentes de agua natural de la cuenca son los ríos Laco, Seco y Tignamar, los cuales son afluentes al San José.

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 para trasvasar aguas desde el río Lauca hacia el Valle de Azapa, 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.

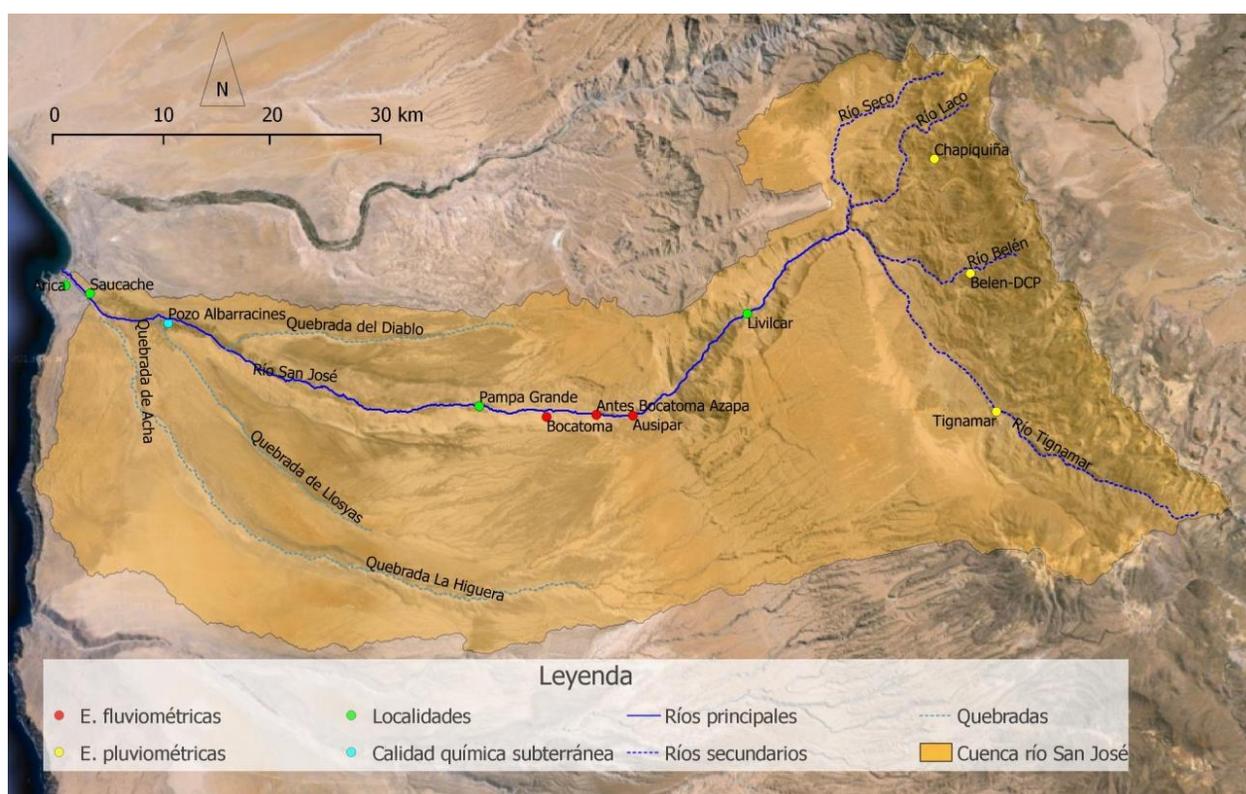


Figura 3-1: Cuenca del Río San José.
Fuente: Elaboración propia.

3.2 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 3-2 se muestra la pluviometría media mensual en la parte alta de la cuenca para el período comprendido entre 1980 y el 2011.

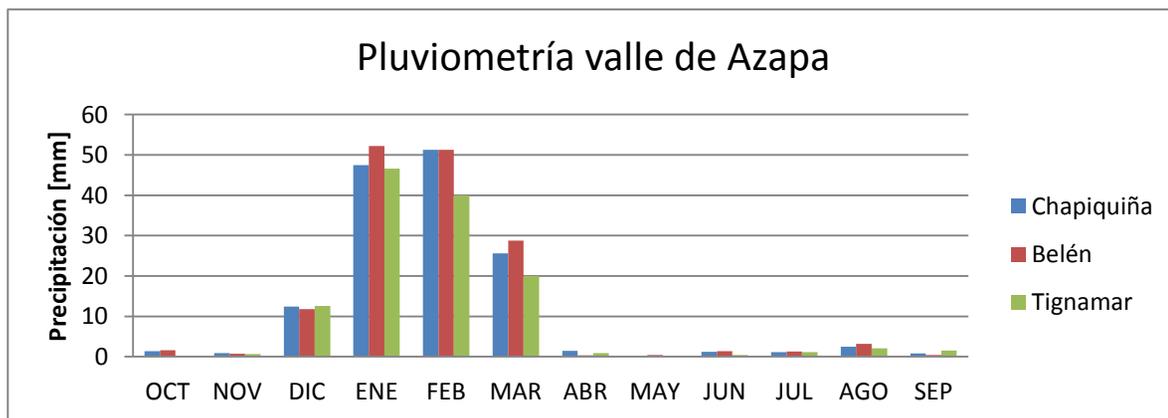


Figura 3-2: Pluviometría cuenca alta del río San José.
Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, la evaporación (EV) también es un factor importante a considerar en la recarga artificial, ya que podría generar pérdidas sobre el volumen de agua factible de recargar. En la Tabla 3-1 se indican los valores medios mensuales.

Tabla 3-1: Evaporación en el Valle de Azapa.
Fuente: (CIREN, 1997).

	Oct.	Nov.	Dic.	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.
EV [mm]	214	251	285	325	283	286	228	181	134	121	133	159

La EV anual es de 2600 [mm], mientras que la EV máxima ocurre en el mes de Enero con un valor de 325 [mm], equivalente a 0,011 [m/d].

3.3 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 sobrepasa el valle desembocando en el Océano Pacífico.

En la Figura 3-3 se muestra la curva de variación estacional en el sector río San José antes Bocatoma Azapa para el período comprendido entre 1963 y 1993, la cual representa el comportamiento general del río.

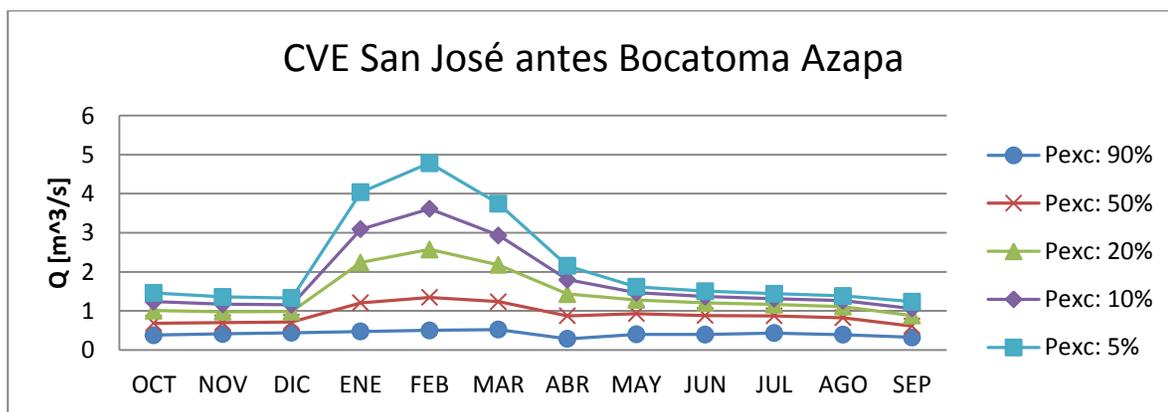


Figura 3-3: Curva de variación estacional San José antes Bocatoma Azapa.
Fuente: Elaboración propia.

3.4 HIDROGEOLOGÍA

El valle está formado principalmente por sedimentos de origen fluvial. En su desembocadura alcanza un ancho de aproximadamente 3500 [m], disminuyendo gradualmente al interior hasta los 1000 [m] en el sector de Pampa Grande. Los principales acuíferos se encuentran a profundidades de entre 0 y 70 [m] dando origen a napas libres y semiconfinadas (AC-Ingenieros, 2010).

La geología del valle está dominada por depósitos recientes de diferente origen que cubren las rocas consolidadas que forman el basamento de la cuenca. A continuación se describen las diferentes unidades que se encuentran en el valle.

- Rocas del basamento: Corresponden a las rocas consolidadas que afloran en el Valle de Azapa y se consideran el basamento desde el punto de vista hidrogeológico por su impermeabilidad.

La matriz de las rocas sedimentarias del basamento generalmente está rellena con materiales como limo, arcilla, y ceniza volcánica. No hay gran desarrollo de fisuras y/o diaclasas en las rocas sedimentarias e ígneas. Algunas fracturas se desarrollan y meteorizan cerca de la superficie de las rocas (JICA, 1995).

- Depósitos marinos: Formados en la planicie costera por continuos movimientos eustáticos. Los depósitos fueron acumulados en terrazas y se componen principalmente por arenas y gravas intercaladas con limo. Esta unidad es uno de los acuíferos en la ciudad de Arica (JICA, 1995).
- Depósitos fluviales: El río San José formó terrazas fluviales a lo largo de las riberas del río. Los depósitos se componen de gravas, arenas y limos, constituyendo el acuífero más importante del Valle de Azapa por su alta permeabilidad.

La litología de los depósitos fluviales ha sido estudiada en diversos trabajos, en especial destacan los perfiles transversales (Anexo D) en diferentes sectores de este generados a partir de la estratigrafía de pozos antiguos (JICA, 1995), y mediante la técnica del transiente electromagnético TEM (AC-Ingenieros, 2010). En la Figura 3-4 se muestra la ubicación de estos perfiles dentro del Valle de Azapa.

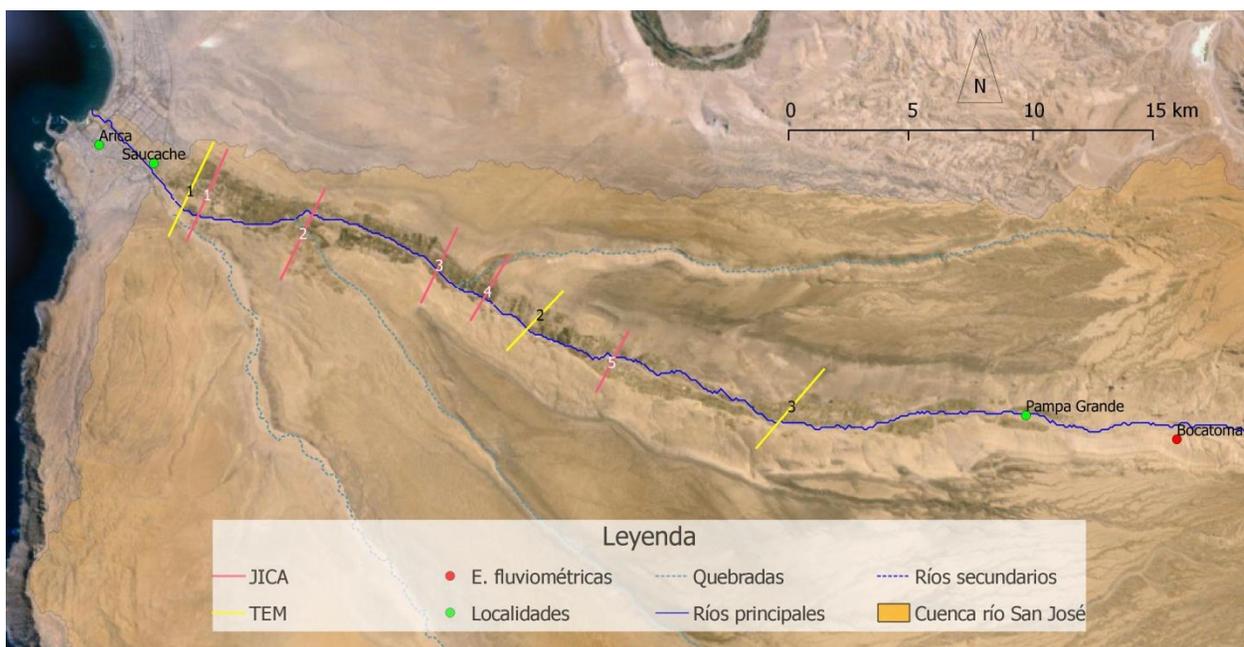


Figura 3-4: Ubicación perfiles JICA y perfiles TEM.

Fuente: Elaboración propia.

En la parte baja (TEM 1, JICA 1) el acuífero tiene una profundidad de 100 [m] aproximadamente con una capa superficial permeable de unos 80 [m] de gravas arcillosas con presencia de lentes de arcilla a distintas profundidades.

En el sector intermedio entre el kilómetro 5 y el kilómetro 10 del Camino Azapa (JICA 2) el basamento se encuentra a unos 170 metros de profundidad con una importante capa superficial de 80 [m] de suelo permeable y leve presencia de material fino (AC-Ingenieros, 2010).

Entre los kilómetros 13 y 15 (JICA 3 y 4), lugar donde se encuentra la Quebrada del Diablo, se observa un acuífero principal de 50 [m] de espesor con significativa presencia de finos probablemente depositados por la quebrada. Se destaca que dicha descripción es coincidente con los niveles más superficiales de agua subterránea del valle. La roca basal se estima a unos 80 [m] de profundidad (AC-Ingenieros, 2010).

Desde el kilómetro 18 hasta el 30 (TEM 2 y 3, JICA 5) el acuífero tiene una profundidad total entorno a los 130 [m], sin embargo las zonas más permeables se encuentran entre la cota de terreno y los 70 [m]. Se distinguen pequeñas intercalaciones de suelos finos.

- Depósitos detríticos: Consisten principalmente en depósitos de talud y otros formados por colapsos y deslizamientos de tierras.
- Depósitos de abanicos: Las quebradas del Diablo, Llosyas y de Acha formaron abanicos en la confluencia con el río San José. Están compuestos principalmente por gravas, arenas y limos. Por esta razón es una unidad usualmente permeable, sin embargo los depósitos de la Quebrada del Diablo son abundantes en materiales finos en la matriz y forman amplios sectores impermeables en el acuífero (JICA, 1995).

- Depósitos de playa recientes: se distribuyen a lo largo de la costa y se forman por arenas y gravas con escasa presencia de finos.
- Depósitos fluviales recientes: Se distribuyen a lo largo del cauce del río San José y de la Quebrada de Acha. Consisten en ceniza volcánica, limo, arcilla, grava y arena. Importante acuífero por su elevada permeabilidad.

3.5 CALIDAD DEL AGUA

En la cuenca del San José se cuenta con 12 estaciones de monitoreo de agua superficial, de aquellas, solo 2 se encuentran vigentes (DGA, mapa interactivo). En la Figura 3-5 se muestra una descripción general de todas las aguas superficiales del Valle y de las aguas subterráneas del pozo Albarracines.

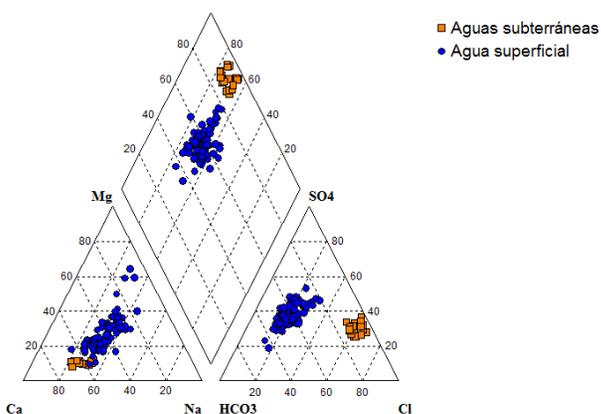


Figura 3-5: Caracterización aguas superficiales y subterráneas.
Fuente: Elaboración propia.

Se observa que las aguas subterráneas son del tipo clorurada cálcica mientras que las aguas superficiales son del tipo bicarbonatada cálcica, lo cual concuerda con la evolución geoquímica natural de las aguas. Las aguas jóvenes tienen mayores concentraciones de bicarbonato, principalmente producto de la disolución del CO₂ atmosférico y la disolución del carbono mineral. Por otro lado las aguas más antiguas tienden a seguir la secuencia de Chebotarev aumentando su concentración de cloruro (Edwards, 2013).

Existe un total de 390 muestras de calidad química incluyendo aguas superficiales y subterráneas, a las cuales se les aplicó análisis de balance iónico y conductividad eléctrica para evaluar su consistencia. Se obtuvo que 172 de ellas fueron consistentes, equivalente a un 44% del total. De acuerdo a la NCh409/1.Of2005 y la NCh1333.Of78, respecto de la utilización de estas aguas, los parámetros más críticos corresponden al arsénico y el boro en agua potable y riego respectivamente. En la Tabla 3-2 se indican sus valores máximos permitidos.

Tabla 3-2: Normativa de calidad de agua.
Fuente: NCh1333.Of78. NCh409/1.Of.2005.

Uso	Arsénico As [mg/l]	Boro B [mg/l]
Riego	0.10	0.75
Potable	0.01	-

Solamente un 12% de las muestras de arsénico cumplen con la normativa, mientras que el restante 88% la excede en un 505%. En el caso del boro sólo un 10% cumple la norma, mientras que el 90% restante la excede en un 162%. El detalle del resto de los elementos químicos, junto con el procedimiento para determinar la consistencia de los datos medidos por la DGA, se encuentra en el Anexo B.

3.6 USO DE AGUA

Actualmente más del 50% de uso de agua en el Valle de Azapa es de tipo agropecuario. Considerando aguas superficiales y subterráneas, al año 2005 la demanda total era de 2039 [l/s]. En la siguiente tabla se muestran los usos separados por sector y proyectados al año 2030.

Tabla 3-3: Uso de agua en el valle de Azapa.

Fuente: (AC Ingenieros, 2007).

Año	Agropecuario	Agua Potable	Industrial	Minero	Energía	Turismo	Caudal Ecológico	Total
2005	1228	447	247	17	6	4	90	2039
2015	1395	546	475	21	6	7	90	2540
2030	1395	751	1270	29	6	11	90	3552

3.7 EXPLOTACIÓN

El Valle de Azapa históricamente ha presentado buenas condiciones de calidad y cantidad de agua, razón por la cual ha sido intensamente explotado, sin embargo su disponibilidad se ha visto afectada en los últimos años debido a la intensa explotación. Su principal fuente de recarga proviene de la infiltración de las precipitaciones y la escorrentía superficial generada por ésta, luego se encuentra la filtración en sistemas de regadío, perdidas en el sistema de distribución de agua potable y el flujo subterráneo proveniente de la parte alta de la cuenca. Las salidas del sistema acuífero consisten en el afloramiento de vertientes, bombeo, afloramiento en el río y flujo subterráneo que pasa hacia el norte en la ciudad de Arica.

La explotación se ha mantenido en una situación de equilibrio, si bien se observa un descenso importante en los niveles de los pozos, estos se han recuperado después de las grandes crecidas en todos los sectores del valle. No obstante lo anterior, el último estudio realizado en el valle indica que el nivel de explotación se ha incrementado en los últimos años a 740 [l/s] en el año 2008, de un promedio histórico de 567 [l/s] (Anexo B). Considerando este nuevo nivel de explotación, y sumándole los nuevos derechos de agua solicitados, el acuífero colapsaría en un plazo de 5 años (AC-Ingenieros, 2010).

Debido a esta situación de vulnerabilidad del acuífero, la cual ha sido observada en estudios que datan desde 1989, el Valle de Azapa fue declarado zona de prohibición para nuevas explotaciones de aguas subterráneas el año 1996 con el fin de proteger el agotamiento paulatino de las vertientes, el descenso progresivo de los niveles de pozos y evitar el deterioro en la calidad de las aguas.

3.8 FUNCIONAMIENTO DEL ACUÍFERO

La forma angosta y alargada del valle del río San José y la usencia de recargas laterales, impone un sentido de escurrimiento longitudinal de este a oeste a través del valle, excepto en el sector costero (Arrau, 1997).

Desde el sector de Pampa grande hasta la Quebrada del Diablo es posible distinguir un subsistema del acuífero de características hidrogeológicas homogéneas y niveles de agua subterránea relativamente estables con variaciones entre los 10 y 20 [m] de profundidad (Figura 4-3). En esta parte alta del valle el acuífero recibe un aporte de aguas subterráneas proveniente de la parte alta de la cuenca, estimado en 198 [l/s] en su situación histórica (AC-Ingenieros, 2010). Las transmisividades oscilan en torno a los 1.500 y los 2.000 [m³/d/m] y disminuyen gradualmente hacia aguas abajo (Arrau, 1997).

En el sector de la Quebrada del Diablo se observa una singularidad en el sistema acuífero generada probablemente por los depósitos de la quebrada. En este lugar las permeabilidades disminuyen drásticamente hasta valores de 37 [m³/d/m] (JICA, 1995) y presenta los niveles más superficiales de agua subterránea dentro del valle (Las Riveras de Madrid, Figura 4-3).

Otro elemento importante del acuífero es el relleno ubicado sobre el lecho del río San José y el cual se extiende a lo largo de todo el valle. La gran permeabilidad de estos estratos permiten la recarga directa en las ocasiones de crecidas (Arrau, 1997), la cual se ha estimado en 548 [l/s] para la situación histórica (AC Ingenieros, 2007).

Finalmente existe un segundo subsistema el cual comprende toda el área aguas abajo de la Quebrada del Diablo, desde la ciudad de Arica hasta el kilómetro 13 de Camino Azapa aproximadamente. Este sector es el más extenso y concentra el mayor número de extracciones, observándose descensos cercanos a los 50 [m] en los niveles de agua subterránea (Figura 4-3). El rango de valores de transmisividad es amplio y varía entre 300 y 2.000 [m³/d/m]. Finalmente, en la parte más baja de este sector, en la ciudad misma de Arica, se ha estimado un flujo de agua subterráneo de 10 [l/s] que pasa hacia el norte (AC Ingenieros, 2007).

CAPÍTULO 4: EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS DE RECARGA

4.1 GENERALIDADES

El principal objetivo del proyecto de recarga es aumentar la disponibilidad y seguridad del recurso hídrico y así darle solución, en parte, a la condición de sobreexplotación que sufre el Valle de Azapa. Ésta situación ha generado que se reduzca la eficiencia de las bombas de extracción, ha obligado la profundización de pozos, muchos de ellos tipo noria, ha empeorado paulatinamente la calidad del agua y ha hecho desaparecer afloramientos de vertientes.

Anteriormente se han evaluado otras opciones para mitigar el déficit hídrico de la zona, como la construcción del Embalse Livilcar o la instalación de barreras de goma en el lecho del río San José. En el primer caso, y según los estudios que se han realizado, la alta carga de sedimentos que trae el río en cada crecida reduciría notablemente la vida útil del embalse lo cual lo hace poco atractivo (MN-Ingenieros, 2011). En el caso de las barreras de goma se evaluó la factibilidad de instalarlas en el lecho del río con el objetivo de retener parcialmente el agua de las crecidas y así generar lagunas artificiales que favorezcan la infiltración, sin embargo el alto costo de las instalaciones afecta la viabilidad del proyecto (CONIC-BF, 2001).

Inyectar agua artificialmente en el acuífero ciertamente ayudaría a darte solución a la problemática planteada, sin embargo esta afirmación debe estar acompañada de estudios que incluyan al menos modelación del flujo subterráneo y de calidad del agua, aspectos que están fuera de los alcances de este trabajo.

Luego de estudiar las diferentes metodologías de recarga existentes, junto con analizar preliminarmente las características propias del Valle de Azapa y de la cuenca del Río San José en general, tales como las precipitaciones, caudales, geografía, uso de suelo, entre otros, se decidió enfocar el estudio en dos alternativas de recarga: lagunas de infiltración con la escorrentía superficial del río San José y la inyección de aguas servidas pretratadas mediante pozos.

4.2 VARIACIÓN DE NIVELES DE AGUA SUBTERRÁNEA

A continuación se analiza las variaciones históricas de los niveles de agua subterránea con el objetivo de entender de mejor forma el funcionamiento del acuífero. En primero lugar, en la Figura 4-1 se muestra el registro histórico de caudales y precipitación de la cuenca. Los caudales corresponden a las mediciones diarias realizadas en las estaciones de Ausipar y Antes de Bocatoma Azapa, y las precipitaciones corresponden a las mediciones diarias y mensuales promediadas de las estaciones Belén, Chapiquiña y Tignamar.

En el caso de los registros diarios, la correlación entre precipitaciones y caudales no es tan clara debido a la escala en que son presentados los datos. Al reducirla se observa que existe una clara respuesta entre precipitación y escorrentía superficial, lo cual se comprueba en la Tabla 4-6 del punto 4.4 donde se analizará posteriormente la disponibilidad de agua para realizar la recarga.

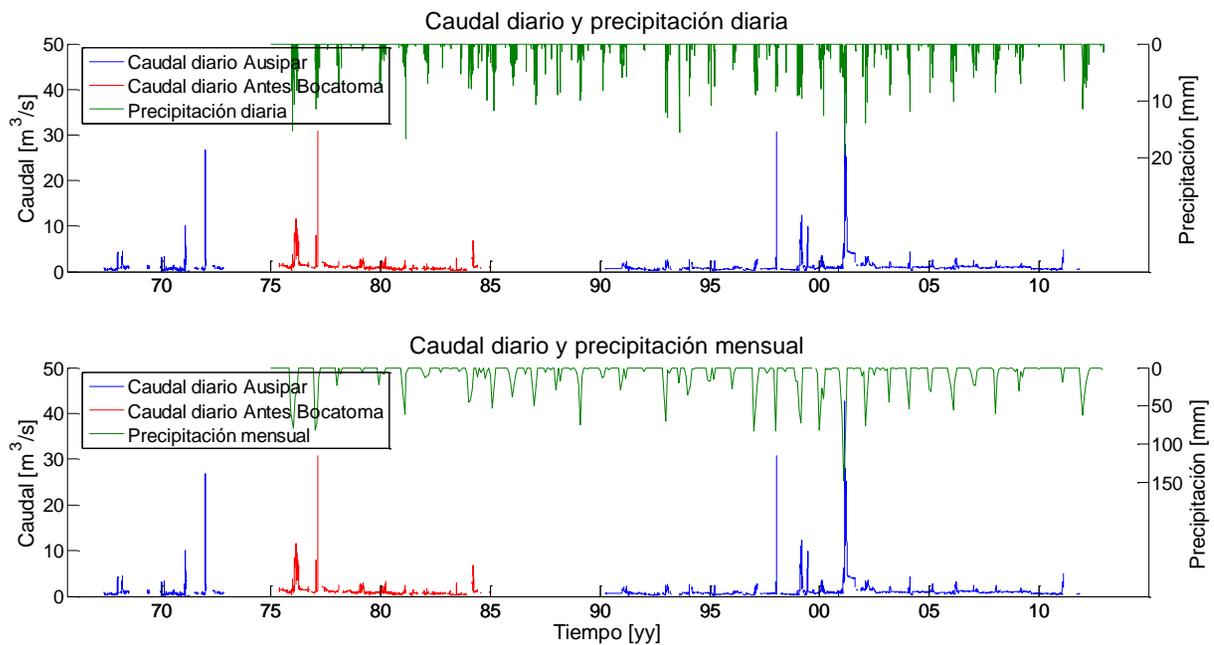


Figura 4-1: Registro histórico de caudales y precipitación.
Fuente: Elaboración propia.

Las crecidas más significativas ocurrieron los años 1972, 1977 y 2001. Según los registros históricos de prensa se puede decir que también hubo crecidas importantes los años 1985 y 1987 (Arrau, 2003). Finalmente la crecida del año 1998 cercana a los 30 [m³/s] se atribuyó a un error en el registro ya que no hay presencia de precipitaciones capaces de generar una crecida de esa magnitud, no se observa un descenso gradual del caudal como sí se observa los años 1999 y 2001, y finalmente tampoco se encontraron antecedentes en los registros históricos de prensa (Arrau, 2003) que hablen sobre alguna crecida en la ciudad de Arica en esa fecha.

En los registros mensuales de precipitación se observa de mejor forma la respuesta del flujo superficial ante los eventos de precipitación. Entre los años 1975 y 1977 hubo precipitaciones que dieron origen a crecidas importantes en el mismo período de tiempo, y entre los años 1997 y 2002 sucedió de igual forma, sin embargo en este último período se aprecia una respuesta significativamente diferente en la magnitud de los caudales ante eventos de precipitación de magnitud similar. Este comportamiento se explicará más adelante al analizar la relación entre la escorrentía superficial y los niveles de agua subterránea.

A continuación se estudiará la relación de las precipitaciones mensuales y los caudales diarios con los niveles de agua subterránea. Para esto se utilizaron los registros de la DGA de 9 pozos de monitoreo a lo largo del valle entre el kilómetro 1 y el kilómetro 27 del Camino Azapa. Si bien el valle se extiende hasta el kilómetro 40, no existen registros históricos de niveles más allá del kilómetro 27. En la Figura 4-2 se muestra la ubicación de los pozos utilizados.



Figura 4-2: Ubicación de pozos de monitoreo de niveles de agua subterránea
Fuente: Elaboración propia.

La relación entre los niveles de agua subterránea y las precipitaciones se observa en la Figura 4-3. En primer lugar se observa una clara diferencia en la magnitud de los descensos entre la parte alta y la parte baja del valle. Los pozos de la parte baja han alcanzado profundidades de hasta 60 [m], y se muestran bastante susceptibles a los períodos de ausencia de recarga, debido probablemente a que en este sector el valle es más amplio y por lo tanto ha sido explotado más intensamente.

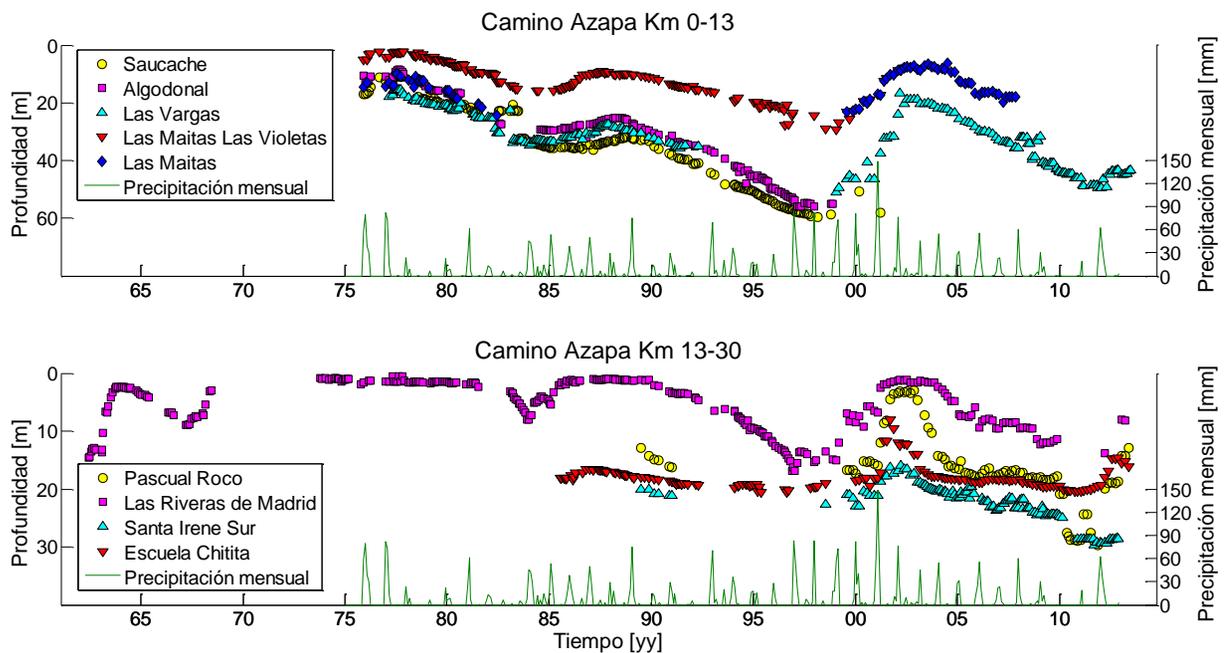


Figura 4-3: Niveles de agua subterránea y precipitación mensual.
Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado en la parte alta del valle los niveles han tendido a mantenerse más constantes con el paso del tiempo. El pozo Las Riveras de Madrid, ubicado en la desembocadura de la Quebrada del Diablo, ha tenido variaciones interesantes ya que los niveles han permanecido en general muy cercanos a la cota de terreno. Esta acumulación de agua podría deberse a que la presencia de

suelos finos en ese sector del valle, la cual fue descrita en el punto 3.4, podría estar actuando como una barrera para el flujo subterráneo.

Adicionalmente se observa que los niveles responden rápidamente ante los eventos de precipitación; entre 1975 y 1977 los niveles se mantuvieron producto de las precipitaciones, luego entre 1984 y 1989 hubo una sucesión de años con precipitaciones significativas que permitieron recuperar en cierto grado los niveles de agua subterránea, y finalmente entre 1997 y el 2002 las precipitaciones fueron aún más abundantes y posibilitaron la recuperación casi total en todos los sectores del valle.

De la comparación de los niveles de agua subterránea con los caudales diarios (Figura 4-4) se extrae una observación interesante respecto de la diferencia entre la magnitud de los caudales generados a partir de eventos de precipitación similares. Si se observa el período entre 1990 y el 2002, este podría ser dividido en un periodo de bajas precipitaciones de 1990 a 1996, y un período de altas precipitaciones de 1997 al 2002 (Figura 4-3). Las primeras precipitaciones de 1997 y 1998 probablemente se infiltraron en la parte alta de la cuenca y escurrieron subterráneamente sin generar grandes caudales, y luego a partir de mediados de 1998 los niveles de agua subterránea del Valle de Azapa comenzaron a experimentar un aumento hasta el año 2002. Fue este aumento de los niveles el que seguramente indujo que las precipitaciones de 1999, y en mayor medida las del 2001, escurrieran mayoritariamente de forma superficial ocasionando las grandes crecidas que se observaron aguas abajo.

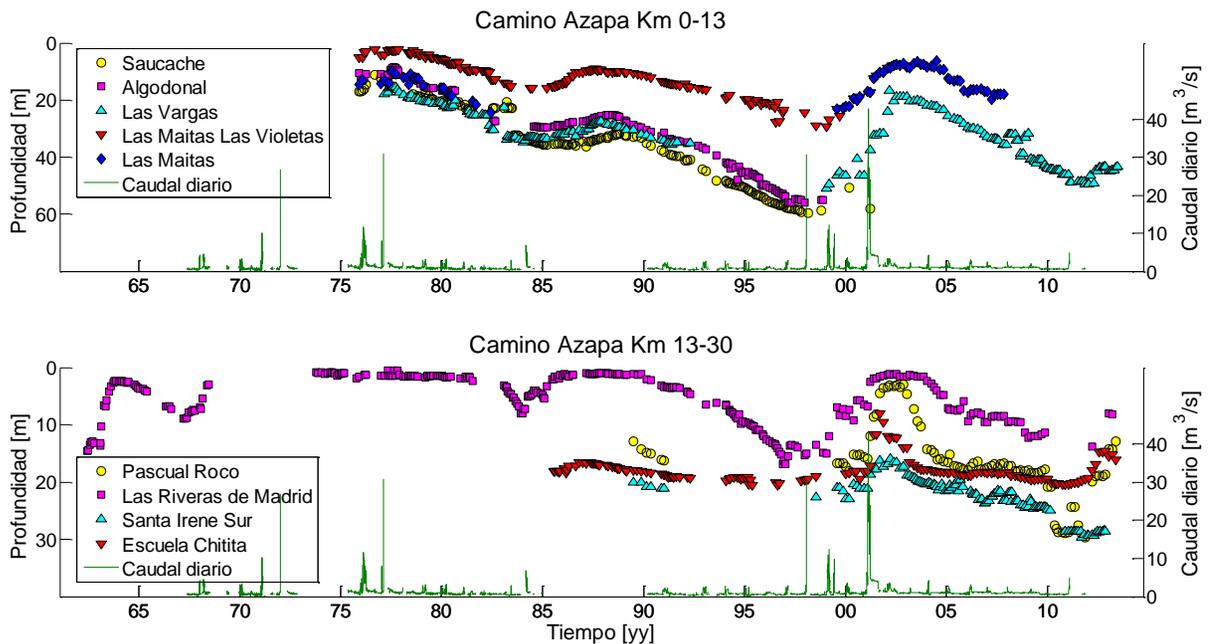


Figura 4-4: Niveles de agua subterránea y caudales diarios.
Fuente: Elaboración propia.

Esto indica que niveles superficiales de agua subterránea podrían advertir que la capacidad de infiltración de la cuenca es reducida, por lo cual ante un evento importante de precipitación la escorrentía generada sería principalmente superficial. De esta manera el río San José estaría más susceptible a experimentar crecidas significativas que podrían generar daños en la infraestructura del Valle de Azapa.

4.3 CRITERIOS DE EVALUACIÓN EN PROYECTOS DE RECARGA ARTIFICIAL

La correcta evaluación de un proyecto de recarga debe considerar la evaluación de ciertos aspectos fundamentales, los cuales se resumen en la Tabla 4-1.

Tabla 4-1: Criterios de evaluación para proyectos de recargar artificial de acuíferos

Fuente: (Murray R. , 2009). Modificado y traducido para este trabajo.

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

El objetivo de este capítulo es darle respuesta a los puntos más importantes de ésta tabla con el objetivo de determinar la factibilidad de realizar un proyecto de estas características en la cuenca del río San José.

Dado que los principales centros de consumo y los problemas más importantes de escases hídrica se encuentran en la parte baja de la cuenca, el análisis estará enfocado en el sector del Valle de Azapa, el cual como se explicó en el punto 3.1, se extiende desde la ciudad de Arica hasta el kilómetro 40 del Camino Azapa en el sector de Pampa Grande aproximadamente.

El tema de la necesidad de un proyecto de recarga ya ha sido discutido anteriormente. La escasez hídrica que sufre el valle y la inviabilidad de otros proyectos hacen de la recarga artificial una alternativa interesante para remediar en parte los descensos progresivos de los niveles de agua subterránea. Por otro lado lo expuesto en el punto 4.2 indica que el acuífero responde positivamente ante los eventos de recarga, por lo cual un proyecto de estas características podría efectivamente generar el efecto deseado en la recuperación de los niveles de los pozos.

4.4 FUENTES DE AGUA PARA LA RECARGA

Son 2 las fuentes de agua que se identifican en el valle: el agua de las crecidas del río San José y las aguas residuales de la ciudad de Arica. A continuación se analiza tanto la disponibilidad como la calidad de estas fuentes potenciales.

4.4.1 Crecidas del río San José

Se sabe que el caudal sobrepasa el valle sólo durante las lluvias producidas por el invierno altiplánico, por lo tanto la disponibilidad de agua está directamente relacionada con las crecidas en la época estival.

Los registros más completos de caudales corresponden a la estación Ausipar (Anexo B). Esta se extiende entre los años 1967 y 2011, sin embargo existe un vacío entre 1973 y 1989. El análisis de la disponibilidad de agua se realizó en base a la estadística completada y corregida en Ausipar entre los años 1991 y 2008 realizada por MN Ingenieros en 2011.

Se debe considerar que el caudal en Ausipar no corresponde a la disponibilidad real del valle, esto porque incluye las aguas trasvasadas a la cuenca del río San José a través del canal Lauca, caudal que es recuperado en el sector San José en Bocatoma y canalizado a través del Canal Azapa a los distintos regantes del valle.

En la Figura 4-5 se muestran los caudales medios diarios medidos en Ausipar menos el caudal medio diario desviado en la bocatoma del Canal Azapa. En el caso del canal, los días que no cuentan con registro fueron rellenados con el caudal promedio para el período entre los años 1991 y 2008, el cual se estimó en $0,55 \text{ [m}^3/\text{s]}$.

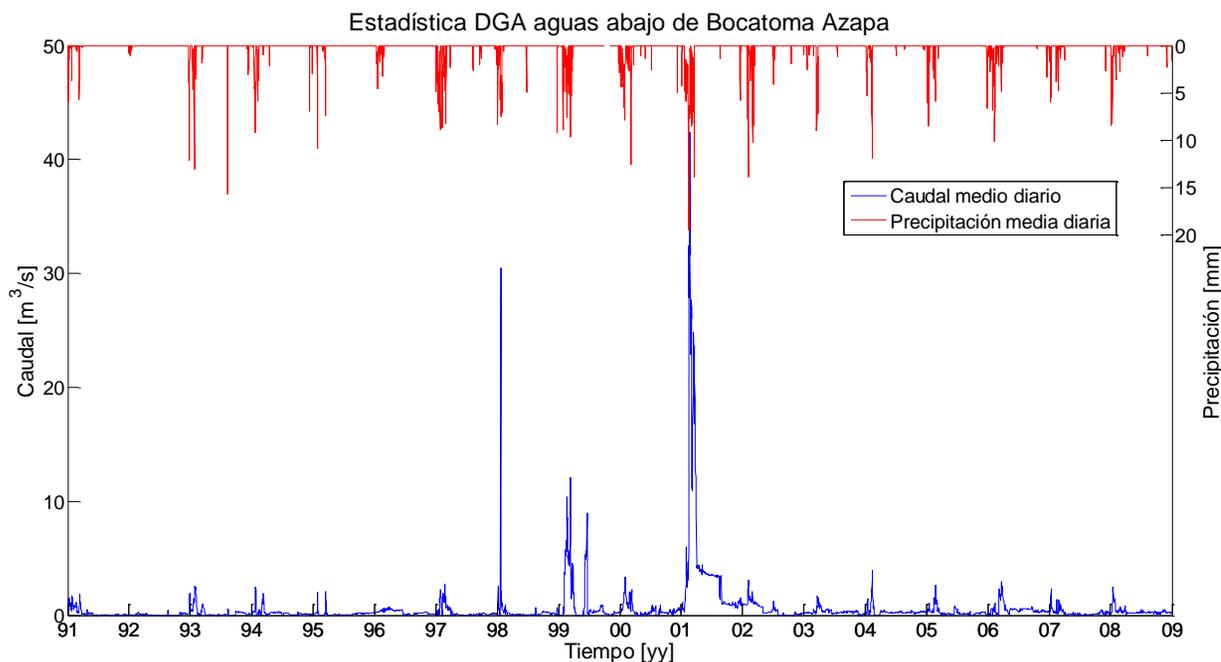


Figura 4-5: Estadística de caudales medios diarios aguas abajo de Bocatoma Azapa.

Fuente: Elaboración propia.

Como se mencionó anteriormente, se observa que las crecidas están concentradas entre diciembre y marzo, sin embargo se observan algunos caudales importantes entre abril y noviembre debido principalmente a dos factores. En primer lugar, hay antecedentes que indican que el caudal medido en Ausipar correspondería al total del recurso hídrico entrante al valle, tanto superficial como subterráneo, ya que los lechos de las estaciones estarían formadas por rocas del basamento impermeable (JICA, 1995). Esto genera que el agua subterránea aguas arriba de la estación Ausipar aflore como agua superficial antes de llegar a esta, y parte de ella volvería a infiltrarse aguas abajo antes de llegar a la estación Bocatoma Azapa, por lo tanto al calcular la disponibilidad real del valle faltaría descontarle esta infiltración.

En segundo lugar, con anterioridad a la crecida del 2001 se observa que la presencia de caudales fuera de la época estival es esporádica y pequeña, lo cual es consistente con la ausencia de precipitaciones, y cuando estas ocurren generan crecidas de menor magnitud. Sin embargo, después de la crecida de febrero del 2001, y hasta el año 2008, se observa un caudal relativamente constante de aproximadamente $0,3 \text{ [m}^3/\text{s]}$ entre los meses de abril y noviembre. Inmediatamente después de la crecida de 2001, el caudal entre mayo y agosto fue de $4,2 \text{ [m}^3/\text{s]}$ y disminuyó hasta estabilizarse entorno a los $0,3 \text{ [m}^3/\text{s]}$ a partir del año 2003 (Figura 4-6).

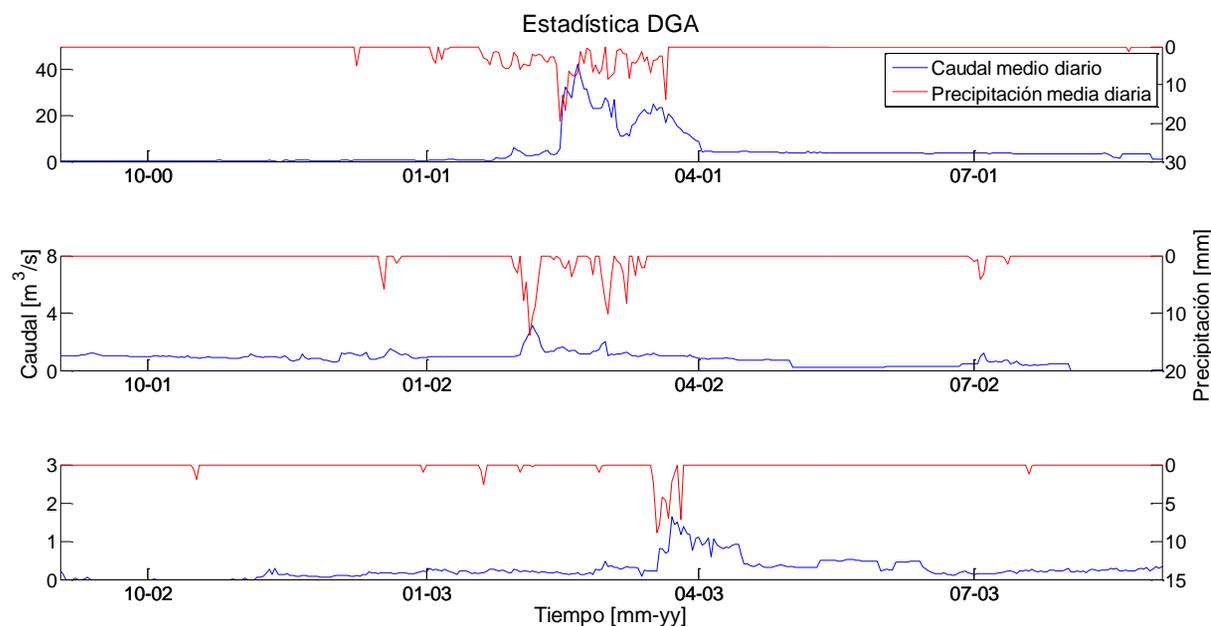


Figura 4-6: Estadística de caudales medios diarios aguas abajo de Bocatoma Azapa. Período entre septiembre de 2000 y agosto de 2003.

Fuente: Elaboración propia.

La explicación de este fenómeno es que a raíz de la crecida del 2001 se produjo un cambio en la curva de descarga de la estación, y a raíz de ese cambio los caudales han sido sobreestimados de manera significativa ya que la escorrentía real es comparativamente del mismo orden de magnitud que el caudal de $0,3 \text{ [m}^3/\text{s]}$ mencionado anteriormente.

Por estos motivos se realizó una corrección de los caudales para que estos considerasen sólo las crecidas producto del invierno boliviano, y eliminando la sobreestimación generada a partir del año 2001. Adicionalmente se eliminó la crecida de $30 \text{ [m}^3/\text{s]}$ de 1998 por las razones que se mencionaron en el punto 4.2.

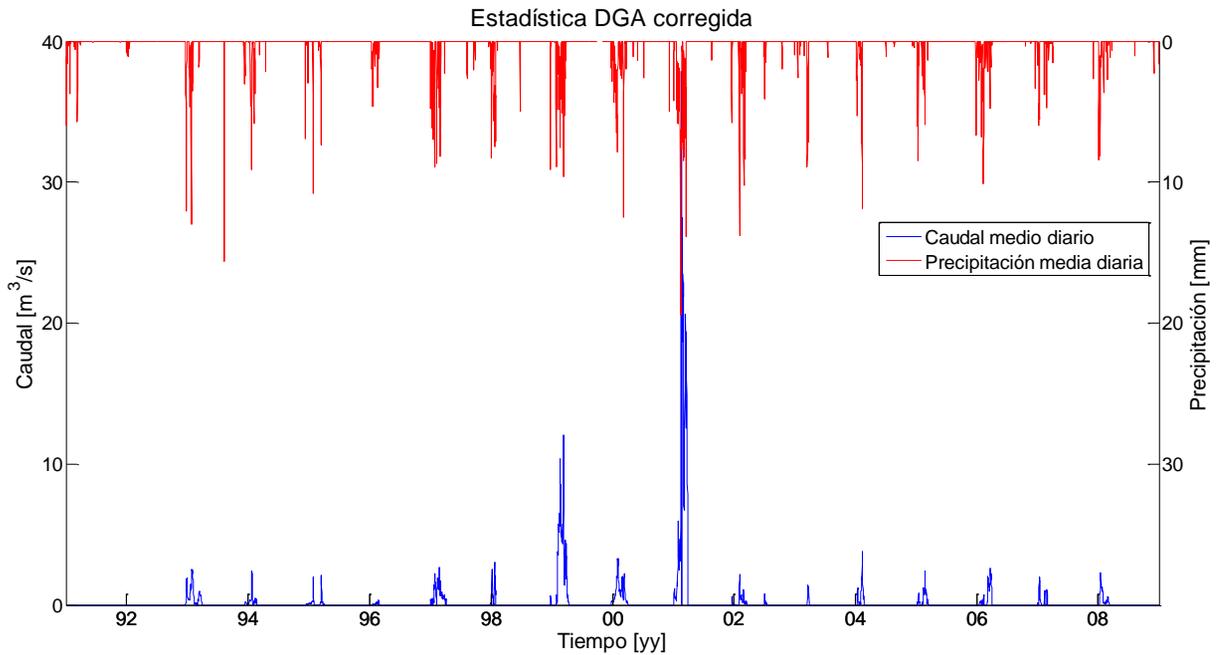


Figura 4-7: Estadística corregida de caudales medios diarios aguas abajo de Bocatoma Azapa.
Fuente: Elaboración propia.

En la estadística corregida se observa que para los periodos entre mayo y noviembre de cada año no hay disponibilidad de agua, sin embargo se ha estimado un caudal de 26 [l/s] promedio en Ausipar para esos periodos correspondiente a crecidas menores (CONIC-BF, 2001). Este caudal fue considerado en el cálculo del volumen total aprovechable anual. Se destaca que de considerar los derechos de agua permanentes de 2,132 [m³/s] (DGA, 2010) entonces la disponibilidad se produce sólo en las crecidas de los años 1999 y 2001. En la Figura 4-8 se presenta la curva de duración de los caudales medios diarios.

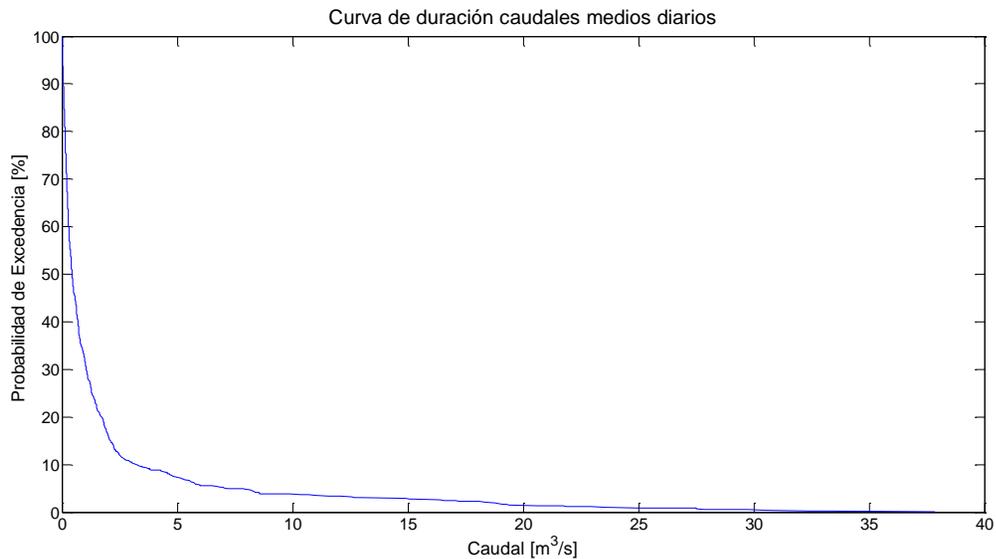


Figura 4-8: Curva de duración caudal aguas debajo de Bocatoma Azapa.
Fuente: Elaboración propia.

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 mediante recarga del acuífero, para después ser recuperado durante el resto del año.

En la Figura 4-9 se muestra el volumen que podría haber sido infiltrado para cada año hidrológico, definido entre septiembre y agosto, para todo el período analizado, dado un caudal de diseño de entre 0,2 [m³/s] y 2,0 [m³/s]. Se observa que para los períodos 1998-1999 y 2000-2001 el incremento es prácticamente lineal ya que la mayoría de los caudales en esos años fue mayor a los 2,0 [m³/s], sin embargo para el resto de la estadística se genera una capacidad ociosa a medida que aumenta el caudal de diseño. Esto se debe principalmente a la importante variación temporal de las crecidas.

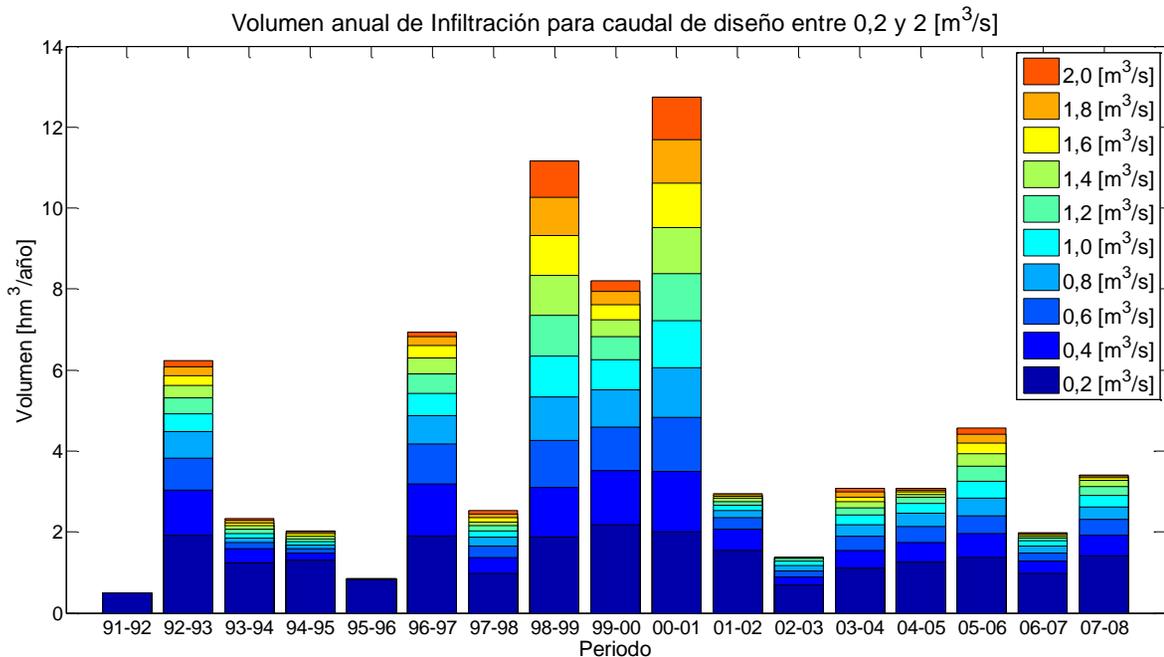


Figura 4-9: Volumen aprovechable por año.
Fuente: Elaboración propia.

Finalmente en la Tabla 4-2 se indican los volúmenes de infiltración promedio anual, el incremento porcentual del volumen para un aumento de 0,2 [m³/s] en el caudal de diseño, el caudal promedio anual de infiltración y la probabilidad de excedencia del caudal de diseño.

Tabla 4-2: Volumen promedio anual de infiltración para diferentes caudales de diseño.
Fuente: Elaboración propia

Caudal de diseño [m ³ /s]	Volumen [hm ³ /año]	Incremento porcentual	Caudal promedio infiltrado [l/s]	Probabilidad de excedencia
0,2	1,36		43	71%
0,4	1,97	45%	62	53%
0,6	2,45	24%	78	44%
0,8	2,85	16%	90	36%
1,0	3,19	12%	101	31%
1,2	3,49	9%	111	28%

Caudal de diseño [m³/s]	Volumen [hm³/año]	Incremento porcentual	Caudal promedio infiltrado [l/s]	Probabilidad de excedencia
1,4	3,74	7%	119	24%
1,6	3,97	6%	126	21%
1,8	4,17	5%	132	19%
2,0	4,35	4%	138	16%

Se estimó que un caudal de diseño de 0,6 [m³/s] sería apropiado en este caso considerando como criterio la disminución de la capacidad ociosas del sistema de infiltración, evitar cargas excesivas de sólidos suspendidos que pudiesen generar colmatación y finalmente infiltrar un caudal que resultase significativo. Con este caudal el volumen almacenado anual sería de 2,45 [hm³] y alcanzaría una infiltración promedio anual de 78 [l/s].

4.4.2 Aguas residuales de Arica

La infiltración de aguas residuales es una realidad en varios países del mundo como Estados Unidos, Australia, y Sudáfrica por nombrar algunos. Esta es realizada en lugares donde el recurso hídrico es sumamente escaso o donde la disponibilidad de superficie es acotada y el agua es tratada e inyectada mediante pozos o lagunas de infiltración.

Tal como se mencionó en la Tabla 2-1, determinar la disponibilidad de las aguas residuales es simple ya que es bastante predecible y constante en el tiempo, lo cual es una ventaja en comparación a la disponibilidad del agua generada durante las crecidas del río San José. En el caso particular de Arica, la disponibilidad de agua residual se extrajo del estudio tarifario realizado por Aguas de Altiplano para el período 2013-2018. Según el estudio, el volumen de facturación el año 2011 fue de 27.250.465 [m³], es decir, 864 [l/s] en promedio, por lo tanto este sería el caudal disponible para la infiltración.

La variabilidad de las aguas residuales es reducida y depende directamente de la demanda de agua potable. Así, la variabilidad temporal de los 864 [l/s] disponibles para infiltrar no afecta el rango aprovechable para cubrir el déficit hídrico del Valle de Azapa, el cual tiene como máximo 500 [l/s] aproximadamente.

Por último, cabe mencionar que actualmente las aguas residuales son descargadas al mar mediante un emisario submarino en la ciudad de Arica, lo cual constituye una restricción importante por el lugar donde se encuentran disponibles. Por lo tanto se debe considerar que la utilización de estas aguas requerirá altos costos en construcción de tuberías y elevación del caudal hasta el punto en que se desee infiltrar.

4.5 CALIDAD DEL AGUA

4.5.1 Río San José y agua subterránea

En esta sección se analiza la factibilidad de recargar el acuífero con las aguas del río San José desde el punto de vista de la calidad de sus aguas, considerando como criterio lo establecido por la normativa vigente respecto de la emisión de residuos líquidos a un acuífero receptor (D.S.N°46) y respecto de la utilización de las aguas según su calidad química (NCh409 y NCh1333).

Para el análisis de calidad de agua superficial se consideraron sólo las mediciones de calidad realizadas en la estación río San José antes Bocatoma Azapa, ya que presenta un largo período de medición y corresponden a las aguas disponibles para ser recargadas. El resto de las estaciones no se consideraron debido a que representan mediciones en vertientes con despreciable disponibilidad hídrica o el período de medición es muy acotado.

En lo que respecta a la calidad del agua del acuífero, se consideraron las mediciones realizadas en la estación de monitoreo de la DGA Pozo Albarracines. Lo anterior se complementó con mediciones realizadas por el Instituto Nacional de Hidráulica (INH) durante el año 2013 y mediciones de Aguas del Altiplano del año 2011.

Como se mencionó anteriormente, en el Anexo B se explica en detalle el procedimiento para determinar la consistencia de los datos medidos por la DGA. A continuación se analiza la factibilidad de recargar artificialmente el acuífero considerando sólo los datos consistentes de las estaciones mencionadas. Para las aguas superficiales se cuenta con 38 mediciones confiables, mientras que en el agua subterránea se cuenta con 20 mediciones confiables.

En primer lugar es necesario mencionar que tanto el D.S.N°46 como la NCh1333 y la NCh409 consideran diferentes parámetros de calidad del agua, y las mediciones realizadas por la DGA no incluyen todos los parámetros que establece la normativa. En el caso del D.S.N°46, se establece que el límite máximo de emisión depende de la vulnerabilidad del acuífero, la cual se clasifica en baja, media o alta, y es responsabilidad de la DGA determinar su clasificación. Si la vulnerabilidad es alta, entonces el límite máximo de emisión corresponde a la calidad natural del acuífero. En la Tabla 4-3 se presentan los límites máximos de cada parámetro permitidos por cada norma, considerando una vulnerabilidad media en el caso del D.S.N°46, e incluyendo las concentraciones promedio de las mediciones realizadas en el pozo Albarracines (A. Sub.) y en la estación Antes Bocatoma Azapa (A. Sup.).

Tabla 4-3: Parámetros de calidad de agua exigidos por la normativa vigente.
Fuente: D.S.N°46, NCh1333 y NCh409.

Parámetro	Unidad	D.S.N°46	NCh1333	NCh409	A. Sub.	A. Sup.	
pH		6,0 - 8,5	5,5 - 9,0	6,5 - 8,5	7,3	8,0	
Conductividad específica	c	µs/cm	N/A	7.500	N/A	3325	744
Amoníaco	NH3	mg/L	N/A	N/A	1,5	s/i	0,08
Cianuros	CN-	mg/L	0,20	0,20	0,05	s/i	s/i
Cloruros	Cl	mg/L	250	200	400	720	49
Fluoruro	F-	mg/L	1,5	1,0	1,5	s/i	s/i
Nitrato	NO3-	mg/L	N/A	N/A	50	13	0,2
Nitrito	NO2-	mg/L	N/A	N/A	3,0	s/i	s/i
Nitrito más Nitrato		mg/L	10	N/A	N/A	s/i	s/i
Razón Nitrito + Nitrato			N/A	N/A	1,0	s/i	s/i
Sulfatos	SO4	mg/L	250	250	500	482	142
Sulfuros		mg/L	1,0	N/A	N/A	s/i	s/i
Sólidos disueltos totales		mg/L	N/A	N/A	1.500	s/i	s/i

Parámetro		Unidad	D.S.N°46	NCh1333	NCh409	A. Sub.	A. Sup.
Aceites y Grasas		mg/L	10	N/A	N/A	s/i	s/i
Benceno		mg/L	0,010	N/A	0,010	s/i	s/i
Fenol		mg/L	N/A	N/A	0,002	s/i	s/i
Tetracloroetano		mg/L	0,040	N/A	0,04	s/i	s/i
Tolueno		mg/L	0,70	N/A	0,70	s/i	s/i
Triclorometano		mg/L	0,20	N/A	0,20	s/i	s/i
Xileno		mg/L	0,50	N/A	0,50	s/i	s/i
DDT+DDD+DDE		mg/L	N/A	N/A	0,002	s/i	s/i
2,4-D		mg/L	N/A	N/A	0,030	s/i	s/i
Lindano		mg/L	N/A	N/A	0,002	s/i	s/i
Metoxicloro		mg/L	N/A	N/A	0,020	s/i	s/i
Pentaclorofenol		mg/L	0,009	N/A	0,009	s/i	s/i
Aluminio	Al	mg/L	5,0	5,0	N/A	0,8	2,9
Arsénico	As	mg/L	0,010	0,10	0,010	0,015	0,076
Bario	Ba	mg/L	N/A	4,0	N/A	s/i	s/i
Berilio	Be	mg/L	N/A	0,10	N/A	s/i	s/i
Boro	B	mg/L	0,750	0,750	N/A	2,16	1,54
Cadmio	Cd	mg/L	0,002	0,010	0,010	0,010	0,010
Cobalto	Co	mg/L	N/A	0,050	N/A	0,01	0,01
Cobre	Cu	mg/L	1,0	0,20	2,0	0,011	0,014
Cromo	Cr	mg/L	0,050	0,10	0,050	0,014	0,010
Hierro	Fe	mg/L	5,0	5,0	0,30	0,12	1,20
Litio	Li	mg/L	N/A	2,5	N/A	s/i	s/i
Litio (cítricos)	Li	mg/L	N/A	0,075	N/A	s/i	s/i
Magnesio	Mg	mg/L	N/A	N/A	125	43	30
Manganeso	Mn	mg/L	0,30	0,20	0,10	0,03	0,08
Mercurio	Hg	mg/L	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
Molibdeno	Mo	mg/L	1,0	0,010	N/A	0,02	0,02
Níquel	Ni	mg/L	0,20	0,20	N/A	0,011	0,012
Plata	Ag	mg/L	N/A	0,20	N/A	0,01	0,01
Plomo	Pb	mg/L	0,050	5,0	0,050	0,02	0,03
Selenio	Se	mg/L	0,010	0,020	0,010	0,002	0,001
Vanadio	V	mg/L	N/A	0,10	N/A	s/i	s/i
Zinc	Zn	mg/L	3,0	2,0	3,0	0,015	0,019
Nitrógeno total		mg/L	10	N/A	N/A	s/i	s/i

N/A: No Aplica. s/i: Sin Información

Existen dos puntos importantes a destacar de la normativa para la emisión de residuos líquidos (D.S.N°46). El primero es que en su Artículo 7° se establece que si la calidad natural del acuífero excede el límite máximo exigido por la norma, entonces el límite máximo corresponde a la calidad natural del acuífero. Y segundo, en su Artículo 8° se establece que la única forma de emitir directamente a la zona saturada del acuífero es que la calidad del agua de la emisión sea de igual o mejor calidad que la del contenido natural del acuífero.

Por otro lado, respecto de la utilización del agua recargada, se debe entender que el agua que se recuperará posteriormente desde el acuífero corresponde a una mezcla entre el agua superficial infiltrada y el agua natural del acuífero. Por lo tanto el análisis para determinar si el agua recuperada desde el acuífero cumple con los estándares de calidad dependiendo de su uso es complejo, y dependerá de diferentes factores como por ejemplo: porcentaje de agua natural v/s porcentaje de agua infiltrada del agua recuperada, porosidad del acuífero, precipitación de elementos químicos, condiciones redox, entre otros. Estimar la calidad del agua mezclada está fuera de los alcances de este trabajo, sin embargo, asumiendo que la calidad se situará entre la calidad natural del acuífero y la calidad del agua superficial, se analizará la factibilidad de utilizar esta mezcla de agua en riego y agua potable.

En la Tabla 4-4 se indica la factibilidad de infiltrar, a la zona saturada o no saturada del acuífero, las aguas superficiales del río San José, utilizando como criterio el D.S.N°46. Adicionalmente se indica la factibilidad de utilizar el agua según lo indicado en la NCh1333 y la NCh409, tomando como referencia la calidad del agua superficial y la calidad del agua subterránea por separado.

Tabla 4-4: Factibilidad de infiltrar al acuífero y factibilidad de utilizar el agua recargada.
Fuente: Elaboración propia.

Parámetro	Infiltración		Uso. Calidad superficial		Uso. Calidad subterránea	
	Zona saturada	Zona no saturada	Riego	Potable	Riego	Potable
pH	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
Amoníaco	N/A	N/A	N/A	Sí	N/A	s/i
Cloruros	Sí	Sí	Sí	Sí	No	No
Nitrato	N/A	N/A	N/A	Sí	N/A	Sí
Sulfatos	Sí	Sí	Sí	Sí	No	Sí
Aluminio	No	Sí	Sí	N/A	Sí	N/A
Arsénico	No	No	Sí	No	Sí	No
Boro	Sí	Sí	No	N/A	No	N/A
Cadmio	No	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
Cobalto	N/A	N/A	Sí	N/A	Sí	N/A
Cobre	No	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
Cromo	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
Hierro	No	Sí	Sí	No	Sí	Sí
Magnesio	N/A	N/A	N/A	Sí	N/A	Sí
Manganeso	No	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
Mercurio	No	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
Molibdeno	N/A	N/A	No	N/A	No	N/A
Níquel	N/A	N/A	Sí	N/A	Sí	N/A
Plata	N/A	N/A	Sí	N/A	Sí	N/A
Plomo	No	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
Selenio	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
Zinc	No	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí

Como se mencionó en la sección 4.1, la alternativa de infiltrar el agua de las crecidas del río San José es mediante lagunas de infiltración, es decir, infiltrar en la zona no saturada del acuífero. Por lo tanto según la Tabla 4-4 el único parámetro de calidad del agua que imposibilita la infiltración es el arsénico, el cual excede más de 4 veces lo exigido por norma. Cabe mencionar que esta diferencia se debe a que la concentración de arsénico en el acuífero está mayormente constituida por su fracción disuelta, mientras que en la concentración superficial domina la fracción particulada. De esta forma, al ser ambas mediciones sobre el arsénico total, el agua subterránea tiene menores concentraciones de arsénico puesto que ha sufrido un filtrado natural durante su transporte desde la superficie hasta el acuífero. Lo mismo ocurre con el hierro.

Respecto del uso, se observa que en ninguno de los casos el agua puede ser utilizada directamente para riego o agua potable. Sin embargo, actualmente para el riego se utiliza directamente tanto agua superficial como agua subterránea con las calidades descritas en la Tabla 4-3, mientras que en el caso del agua potable se utiliza agua subterránea a la cual se le aplica el tratamiento adecuado para alcanzar los estándares de calidad exigidos por la normativa.

Considerando lo anterior, el riesgo de empeorar la situación actual está en aquellos casos donde el agua superficial no cumple con la NCh1333 o la NCh409 y además es de peor calidad que el agua del acuífero. En el caso de la NCh1333 el boro y el molibdeno impiden la utilización en riego, sin embargo la concentración superficial es de mejor calidad que el agua del acuífero, por lo tanto la infiltración no empeorarían la situación actual. En el caso de la NCh409 el arsénico y el hierro están por sobre la normativa, y ambas concentraciones en el agua superficial están por sobre la concentración del acuífero, por lo tanto estos dos parámetros constituyen el mayor riesgo si se desea recargar el acuífero con el agua de las crecidas del río San José.

Las concentraciones obtenidas por el INH y Aguas del Altiplano (A.A.) de boro, arsénico y hierro en el agua subterránea se muestran en la Tabla 4-5 y son consistentes con lo obtenido por la DGA. El detalle con el resto de los parámetros se encuentra en el Anexo B.

Tabla 4-5: Calidad de aguas Instituto Nacional de Hidráulica y Aguas del Altiplano.
Fuente: Instituto Nacional de Hidráulica. Aguas del Altiplano.

Parámetro	INH	A.A.
Boro	1,67	1,3
Arsénico	0,013	0,017
Hierro	0,04	0,04

Finalmente para resumir, la infiltración con el agua de las crecidas del río San José se ve dificultada desde el punto de vista de la calidad del agua. En primer lugar porque la concentración de arsénico supera lo permitido por el D.S.N°46 para la infiltración de agua al acuífero. Y en segundo lugar, porque tanto la concentración de arsénico como la de hierro superan lo exigido en la NCh409 para su uso potable y también podrían empeorar la calidad natural del acuífero. Es así como el arsénico es el parámetro más complejo en este análisis. Su variación temporal se muestra en la Figura 4-10.

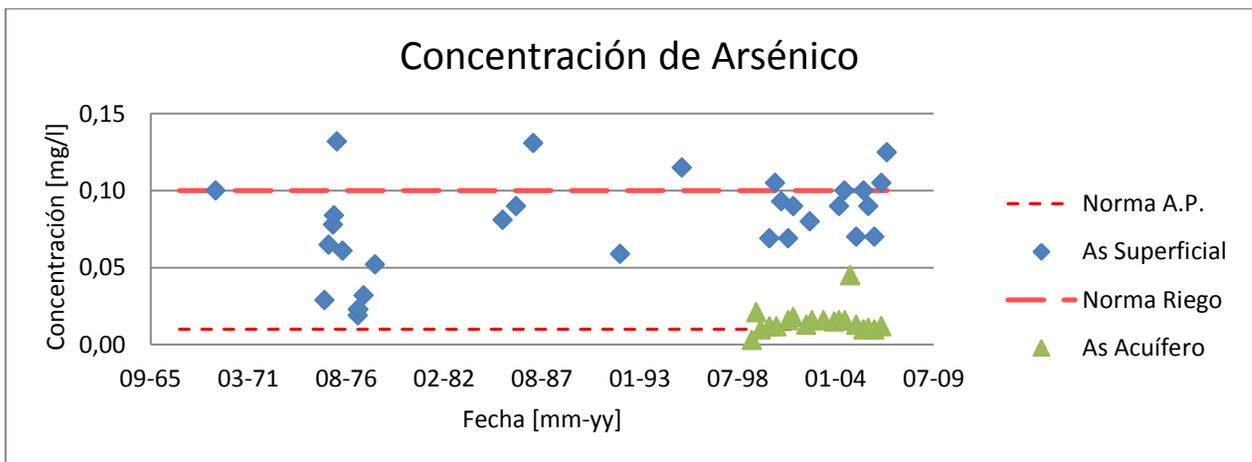


Figura 4-10: Concentración de Arsénico antes Bocatoma Azapa.
Fuente: Elaboración propia.

Finalmente se debe mencionar que es necesario ampliar la cobertura de medición de calidad química del agua en el Valle de Azapa para así realizar el mismo análisis efectuado en esta sección aplicado a los diferentes sectores del valle. En este caso se analizaron sólo las muestras del pozo Albarracines lo cual podría no ser representativo de lo que sucede en otros sectores. Adicionalmente es aconsejable medir las concentraciones de arsénico y hierro disuelto del agua superficial para así estimar correctamente el impacto real que podría tener la infiltración de estas aguas al acuífero.

4.5.1.1 Arrastre de sedimentos del río San José

Como se mencionó en la Tabla 2-1, una de las características de las escorrentías de crecida es que contienen una carga importante de sólidos suspendidos. Esto fue comprobado durante una visita a terreno al Valle de Azapa de carácter exploratorio realizada entre los días 22 y 25 de enero de 2013 (Anexo C), la cual coincidió con la primera crecida del año la cual tuvo su caudal peak de 2.8 [m³/s] el día 17 de ese mes. Para la fecha de la visita el caudal promedio fue de 0,9 [m³/s] y se logró observar una importante sedimentación de suelo fino en algunos sectores del río que alcanzó espesores de hasta 9 [cm] en sectores donde el agua tendía a estancarse (Figura 4-11).



Figura 4-11: Sedimentación de material fino
Fuente: Terreno exploratorio.

Otro antecedente sobre la carga de sedimentos del San José se encuentra en el diseño del Embalse Livilcar donde se calculó la curva de descarga del gasto sólido en suspensión (ss) y de fondo (sf) descritas por las ecuaciones (1) y (2) (MN-Ingenieros, 2011).

$$Q_{ss} = 17.617,9 \cdot Q_L^{2,508} \quad (1)$$

$$Q_{sf} = 75.811 \cdot Q_L^{1,389} \quad (2)$$

donde Q_{ss} y Q_{sf} son el gasto sólido en [kg/día] y Q_L es el caudal en [m³/s]. Con estas ecuaciones se puede estimar el orden de magnitud de la cantidad de sedimentos que se acumularían en la superficie de una laguna de infiltración. Por ejemplo, para un caudal de 1,0 [m³/s], el gasto sólido en suspensión y de fondo capturado por un caudal de infiltración de diseño de 0,6 [m³/s], es de 10,6 [ton/d] y 45,5 [ton/d] respectivamente.

Lo anterior indica que de utilizar el río San José como fuente de recarga, se requeriría necesariamente una importante remoción de sedimentos con el objetivo de evitar problemas de colmatación en la superficie de recarga.

4.5.2 Aguas residuales de Arica

Actualmente, las aguas residuales de Arica son recolectadas en un centro de tratamiento donde se le aplica tratamiento preliminar a través de rejillas, para luego ser descargadas al mar mediante un emisario submarino.

En el Capítulo 2 se mencionó que mediante el sistema de tratamiento suelo acuífero (SAT) es factible infiltrar aguas residuales para su reutilización. En esta metodología los *outputs* críticos de calidad de agua que determinan éxito de la recarga artificial son la eficiencia en la remoción del carbono orgánico total, eficiencia en la remoción del nitrógeno y la eficiencia en la remoción de organismos patógenos (Todd K. & Mays W., 2005).

En este contexto, una serie de trabajos de título de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile estudiaron entre 1998 y 2001 el sistema SAT como herramienta para la recuperación de aguas servidas en Arica y Copiapó. En particular Honeyman (1999) estudió la remoción de contaminantes a través del sistema SAT aplicado mediante lagunas de infiltración y pozos de inyección en la zona no saturada. En dicho trabajo, después de aplicar la infiltración mediante ciclos de carga y descarga, se obtuvieron buenas eficiencias en la remoción de carbono y organismos patógenos, mientras que la remoción de nitrógeno amoniacal fue débil. Se concluyó 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 imposibilita el uso potable. En el trabajo de Honeyman se explica que el principal mecanismo de remoción del nitrógeno es la adsorción, por lo tanto una vez que se acaba la capacidad de adsorción del amoníaco la remoción comienza a ser mínima aumentando el potencial de contaminación del agua.

Los antecedentes indican que la reutilización de las aguas servidas podría ser viable, sin embargo existe una diferencia importante entre la calidad del agua utilizada por Honeyman y la calidad del agua disponible en Arica. En el primer caso el agua corresponde al efluente de un tratamiento secuencial de lagunas anaerobias, lagunas aireadas y sedimentación, mientras que en

el segundo corresponde a agua servida doméstica sin tratar. En consecuencia inyectar las aguas servidas de Arica, aunque sea a través del sistema SAT, no es una opción viable, para aquello se requeriría un tratamiento avanzado de tipo terciario para realizar la recarga.

4.6 HIDRÁULICA DEL ACUÍFERO

Determinar si un acuífero es adecuado para recibir, almacenar y finalmente recuperar el agua recargada, requiere determinar al menos dos importantes características físicas: la conductividad hidráulica y el coeficiente de almacenamiento. Los acuíferos con alta conductividad hidráulica y una elevada capacidad de almacenamiento son más apropiados que aquellos con baja capacidad y baja conductividad (Murray R. , 2009). Sin embargo se debe asegurar que el agua podrá ser recuperada en el momento deseado, en ese sentido una excesiva conductividad podría ser problemático ya que el agua fluiría rápidamente.

También es primordial conocer el gradiente hidráulico para determinar la dirección del flujo subterráneo y así emplazar las estructuras de recarga y recuperación de manera correcta. En el caso particular del Valle de Azapa se sabe que el agua escurre de este a oeste.

4.6.1 Capacidad de almacenamiento

La capacidad de almacenamiento del acuífero es calculada mediante la ecuación

$$V = S \cdot A \cdot \Delta h \quad (3)$$

donde V es el volumen disponible para almacenar, S es el coeficiente de almacenamiento, A es la superficie del acuífero y Δh es el espesor no saturado disponible.

En el estudio *Definición de estrategias de manejo sustentable para el acuífero de Azapa, XV Región* , realizado en 2010 por AC Ingenieros Consultores para la DGA, se obtuvo como resultado de la modelación hidrogeológica en Visual MODFLOW que el coeficiente de almacenamiento en el área de estudio es de 0,12, valor característico de arenas finas (Johnson, 1967).

La superficie se obtuvo del mismo modelo considerando el *layer* que delimita el coeficiente de almacenamiento igual a 0,12. El valle se dividió en 4 sectores entre el kilómetro 0 y el kilómetro 30 del Camino Azapa utilizando como criterio que cada sector presentase valores similares de nivel piezométrico. En la Tabla 4-6 se indica el resultado del cálculo de las superficies por sector y el volumen almacenable por aumento unitario del nivel freático.

Tabla 4-6: Volumen almacenable por aumento unitario del nivel freático
Fuente: Elaboración propia.

Valle	Extensión (Km Azapa)	Área [ha]	Volumen [hm ³ /m]
Bajo	0-7	809	0,97
Medio bajo	7-13	732	0,88
Medio alto	13-19	562	0,67
Alto	19-30	1.079	1,30

Respecto del espesor Δh disponible para almacenamiento, la Figura 4-12 muestra conceptualmente los diferentes volúmenes de almacenamiento de un acuífero dependiendo del espesor considerado, los cuales pueden ser clasificados como estático o dinámico. En este caso el nivel 1 representa el fondo del acuífero, el nivel 2 es el fondo de la elevación dinámica, el nivel 3 es la profundidad actual, el nivel 4 la profundidad promedio y el nivel 5 la parte superior del acuífero (Murray R. , 2009). Por lo tanto, se distinguen los siguientes volúmenes de almacenamiento:

- i. $\Delta h = h_5 - h_1$, entrega el almacenamiento máximo.
- ii. $\Delta h = h_4 - h_1$, entrega el almacenamiento total promedio.
- iii. $\Delta h = h_4 - h_2$, entrega el almacenamiento dinámico promedio.
- iv. $\Delta h = h_3 - h_2$, entrega el almacenamiento dinámico actual.
- v. $\Delta h = h_2 - h_1$, entrega el almacenamiento estático.

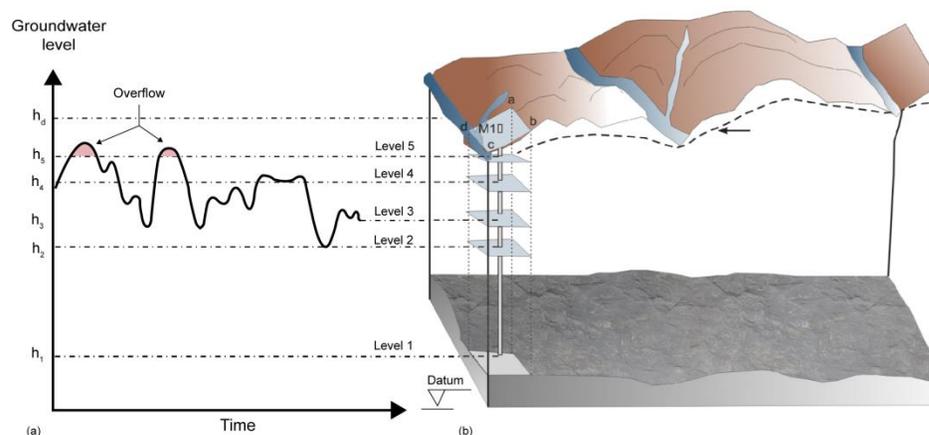


Figura 4-12: Representación esquemática de niveles de agua subterránea.
Fuente: Murray et al. 2009, modificado para este trabajo.

El volumen disponible para almacenar el agua de la recarga artificial estará dado por el espesor entre el nivel promedio y una profundidad de diseño h_d .

$$\Delta h = h_4 - h_d \quad (4)$$

Un valor muy pequeño de h_d podría generar un efecto negativo en la tasa de infiltración dependiendo de si ésta es controlada por una capa colmatante o no. En el caso de existir, la infiltración estará controlada por la conductividad de la capa colmatante y las variaciones del nivel freático no afectan mayormente la tasa de infiltración (Figura 4-13).

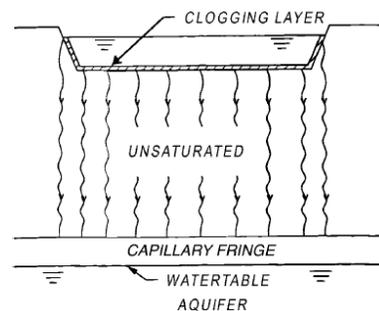


Figura 4-13: Efecto de una capa colmatante en la tasa de infiltración.
Fuente: (Bouwer, 2002)

De no haber presencia de *clogging*, y si la profundidad del nivel freático es relativamente grande, entonces el flujo bajo el sistema de infiltración es principalmente vertical y dominado por gravedad (Figura 4-14 derecha), sin embargo si la profundidad disminuye lo suficiente, entonces el flujo se divide en una componente lateral hasta ser dominado completamente por la pendiente del nivel freático (Figura 4-14 izquierda).

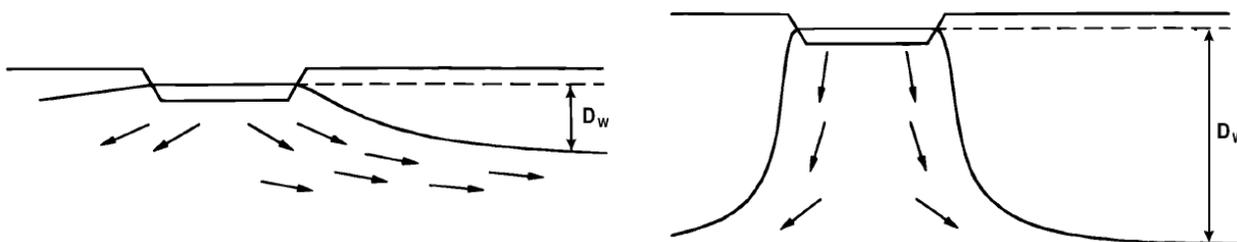


Figura 4-14: Efecto de la profundidad del nivel freático en la tasa de infiltración.
Fuente: (Bouwer, 2002)

Para este caso se tomó como referencia la profundidad h_d del *Hieroglyphic Mountains Recharge Project* (HMRP) en Arizona Estados Unidos. El HMRP consiste en 3 lagunas de infiltración divididas en 7 unidades infiltradoras con una superficie total de 15,4 [ha], una capacidad de infiltración de 1,4 [m³/s] y en el cual se define h_d igual a 6 [m] (CAP, 2003).

Los niveles promedio históricos de agua subterránea se obtuvieron de 14 pozos de monitoreo de la DGA, entre los cuales se encuentran los pozos de la Figura 4-2, y que presentan periodos de medición variable entre 1962 y el año 2013 (Anexo B). En la Tabla 4-7 se presenta el volumen de almacenamiento con que cuenta el acuífero calculado mediante la ecuación (3) para los sectores del valle definidos previamente. Adicionalmente se determinó el volumen de almacenamiento actual en base a las mediciones realizadas por el INH entre febrero y mayo de 2013 (Anexo C).

Tabla 4-7: Espesor y volumen total de almacenamiento
Fuente: Elaboración propia.

Valle	Extensión (Km Azapa)	Δh actual [m]	Δh promedio [m]	Volumen actual [hm ³]	Volumen promedio [hm ³]
Bajo	0-7	40,7	22,9	39,5	22,2
Medio bajo	7-13	33,9	7,0	29,8	6,2
Medio alto	13-19	16,7	5,2	11,2	3,5
Alto	19-30	26,7	14,3	34,6	18,5

Con la información de niveles tanto de la DGA como del INH se elaboró un perfil longitudinal del Valle de Azapa el cual se presenta en la Figura 4-15. En ella se indica la cota de terreno, el nivel h_d de diseño, nivel freático promedio histórico y nivel freático actual, todos en el eje vertical izquierdo. En el eje vertical derecho se indica la profundidad no saturada disponible para almacenar calculada mediante la ecuación (4). Adicionalmente en la Figura 4-16 se muestra la ubicación dentro del valle de los pozos utilizados para la elaboración del perfil longitudinal y la ubicación de los perfiles transversales empleados en la descripción hidrogeológica del punto 3.4.

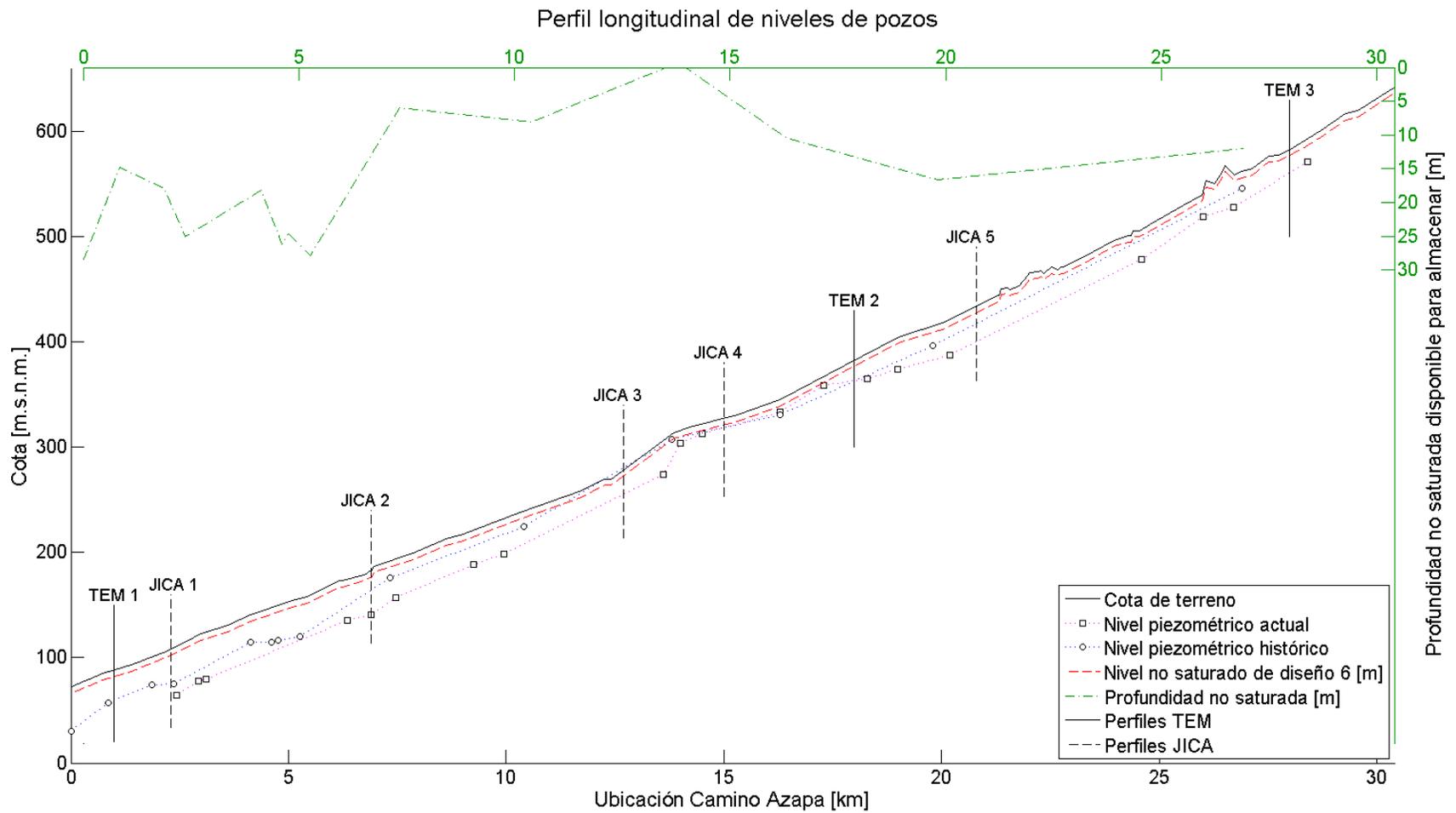


Figura 4-15: Perfil longitudinal de niveles de pozos.
Fuente: Elaboración propia.

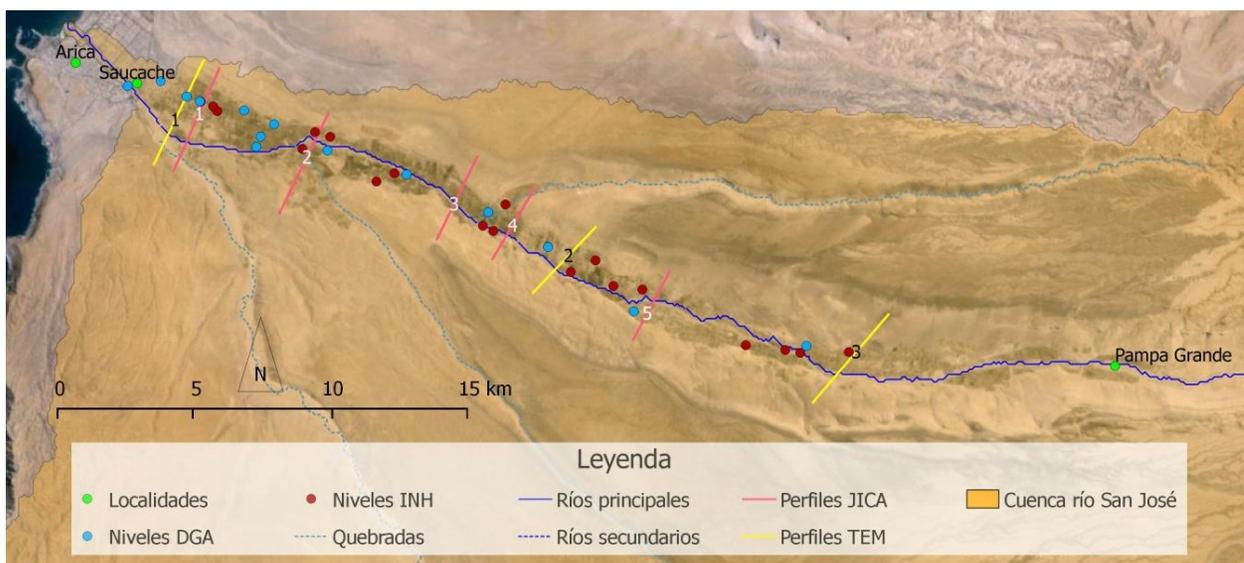


Figura 4-16: Mapa de perfil longitudinal de niveles de agua subterránea.
Fuente: Elaboración propia.

4.6.2 Conductividad hidráulica

De acuerdo a la caracterización hidrogeológica entregada en el punto 3.4. de este trabajo, los mejores sectores para realizar la recarga, desde el punto de vista de la permeabilidad, serían en la parte baja del valle entre los kilómetros 5 y 10, y un segundo sector en la parte alta entre el kilómetro 18 y el 30.

Los valores de transmisividad en los distintos sectores del valle son consistentes con la descripción anterior. En el sector de Saucache, en la parte baja del valle (TEM 1, JICA 1) los valores oscilan entre 150 y 700 [m²/d]. Luego hasta antes de la Quebrada del Diablo (JICA 2), entre los kilómetros 5 y 12 del Camino Azapa aproximadamente, se observan valores entre 1.500 y 2.000 [m²/d]. En la Quebrada del Diablo (JICA 3 y 4) los valores disminuyen hasta los 37 [m²/d] (JICA, 1995) con valores que en general oscilan entre 150 y 300 [m²/d]. Finalmente en la parte alta del valle (TEM 2 y 3, JICA 5) se observan transmisividades en el rango de 1.500 a 2.000 [m²/d] (AC-Ingenieros, 2010).

4.7 METODOLOGÍA DE RECARGA

4.7.1 Lagunas de infiltración

La primera alternativa evaluada es realizar la recarga mediante lagunas de infiltración con el agua de las crecidas del río San José. En este caso lo ideal sería emplazar el sistema de infiltración en la parte alta del Valle de Azapa cercano al kilómetro 30, de esta forma se aprovecharía la infraestructura de la Bocatoma del Canal Azapa para desviar las aguas del río y se ahorrarían costos en la conducción de estas. Así, el almacenamiento de 18,5 [hm³] es suficiente para contener el volumen infiltrable de 2,45 [hm³] en términos anuales.

Cabe mencionar que el volumen de almacenamiento se calculó en base a un coeficiente de almacenamiento de 0,12, el cual se obtuvo como resultado de una modelación numérica y que por lo tanto está sujeto a incertidumbre. Sin embargo el almacenamiento es 7,6 veces superior a la disponibilidad de agua, y el coeficiente de almacenamiento para arenas finas varía entre 0,10 y

0,28 (Johnson, 1967), por lo tanto existe un rango de confianza amplio sobre la capacidad del acuífero para contener la recarga.

Uno de los aspectos importantes en las metodologías de infiltración superficial es el requerimiento de superficie, el cual depende de la capacidad de infiltración del suelo. Este aspecto es particularmente significativo en el Valle de Azapa debido a que su intensa explotación ha generado la ocupación casi total del suelo disponible como para implementar obras de recarga.

Con el objetivo de determinar la superficie necesaria para infiltrar el caudal de diseño de 0,6 [m³/s], se realizó una campaña de terreno en la cual se midió la capacidad de infiltración superficial del suelo utilizando un infiltrómetro de doble anillo (Anexo C). Las mediciones fueron realizadas en 5 sectores del valle entre los kilómetros 6 y 24 del Camino Azapa los cuales fueron escogidos en base a sus características granulométricas. Adicionalmente se incluyó una medición en el sector de Bocatoma Azapa (Figura 4-17). Los resultados de la experiencia se indican en la Figura 4-18.



Figura 4-17: Ubicación de pruebas de infiltración superficial.
Fuente: Elaboración propia.

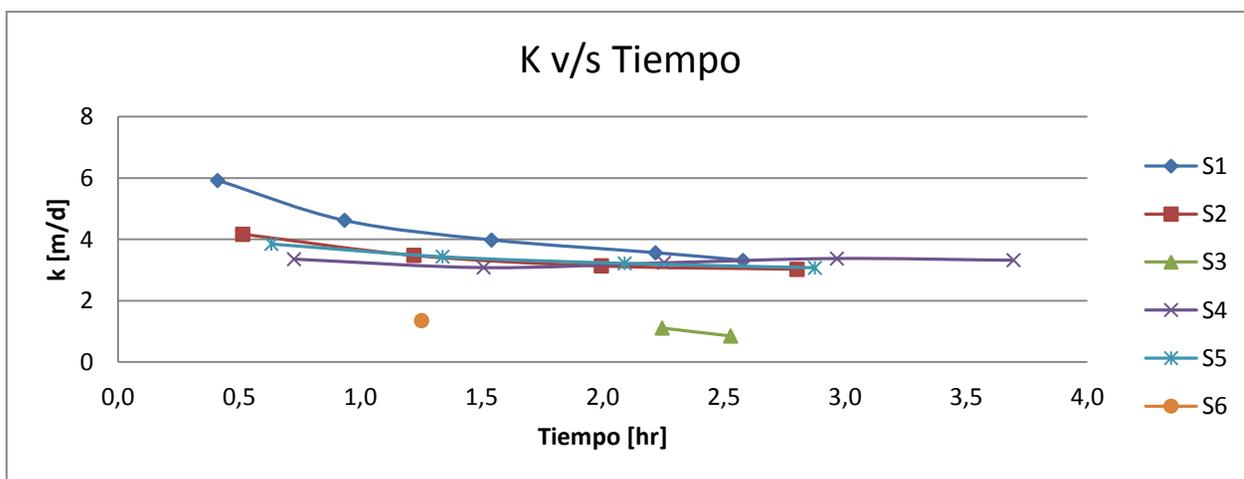


Figura 4-18: Resultado de pruebas de infiltración superficial.
Fuente: Elaboración propia.

Se utilizó la tasa de infiltración residual obtenida en los sitios que representan de mejor forma las características de un sistema de recarga por laguna, esto significa que deben presentar una pequeña capa de arena superficial que actuaría como filtro para disminuir la probabilidad de colmatación. Los sitios escogidos fueron el S1, S2, S4 y S5, obteniéndose una infiltración media de 3,18 [m/d], lo cual se ajusta a la indicado en la bibliografía para arenas limosas (Freeze & Cherry, 1979).

A pesar de considerar un filtro que reduzca la probabilidad de colmatación, la superficie de recarga a la larga igualmente se colmatará y disminuirá su capacidad de infiltración. Se estimó un coeficiente de reducción del 85% (Hofkes&Visscher, 1986) por la alta carga de sedimentos del río San José, con lo cual la tasa de infiltración de largo plazo sería de 0.48 [m/d].

Basado en experiencia internacional, se considera que estos sistemas funcionan con varias unidades infiltradoras alternando ciclos de recarga y secado, por lo cual se estimó que continuamente un 20% (CAP, 2003) de la superficie dispuesta para infiltrar permanecerá en el ciclo seco. Adicionalmente se incluyó un 11% de superficie extra para instalar un sedimentador (Hurlow et al. 2011) y 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 [m³/s] es de 15,9 [ha], con lo cual la infiltración media anual por hectárea alcanza los 5,1 [l/s/ha]. Según lo visto en terreno, en el valle no existe tal disponibilidad de superficie (Anexo C) por lo que habría que utilizar parte de la superficie agrícola para realizar la recarga. A modo de comparación, la demanda de agua subterránea para uso agrícola es de 0,42 [l/s/ha] (AC-Ingenieros, 2010), por lo tanto por cada hectárea de infiltración se generarían 11,2 [ha] agrícolas. Sin embargo, se debe estimar con precaución el beneficio real que tendría el agua recargada ya que lo más probable es que el beneficio venga por un mejoramiento de los cultivos ya existentes y no por la generación de cultivos nuevos.

En la estimación de la demanda de superficie no se consideraron las pérdidas por evaporación en la superficie de recarga. En el punto 3.2. se mencionó que la evaporación mensual máxima es de 0,011 [m/d], equivalente a un 2,3% de la tasa de infiltración, por lo tanto se consideró despreciable.

4.7.2 Infiltración con pozos

La siguiente metodología analizada es la infiltración de las aguas residuales de la ciudad de Arica mediante pozos. Un buen lugar de emplazamiento en este caso es el sector medio-bajo del valle en torno al kilómetro 12 del Camino Azapa. Este lugar presentaría permeabilidades adecuadas para realizar la recarga y se encuentra lo suficientemente arriba en el valle como para que el agua recargada sea aprovechada por los dos principales centros de consumo: la parte baja del valle por su uso agrícola y la ciudad de Arica por el uso potable. Situar el sistema de infiltración en la parte alta del valle no tendría sentido ya que se aumentarían los costos en conducción y elevación de las aguas.

Si bien el potencial de almacenamiento del acuífero en el sector medio bajo está entorno a los 6,2 [hm³], bastante menor que en la parte alta del valle, dado que la fuente de agua es continua entonces el almacenamiento no requiere ser de carácter estacional como en el caso anterior. Por lo tanto el caudal potencial de infiltración dependerá principalmente de la variación de niveles de

agua subterránea y del tiempo de retención del agua en el acuífero, el cual estará determinado por las características hidrogeológicas de este y por el uso que se le dará al agua recargada. A modo de ejemplo, un tiempo de retención de 6 meses permitiría recargar 12,4 [hm³] anuales, equivalente a un caudal de 0,4 [m³/s].

La infiltración podría realizarse mediante inyección directa a la zona saturada o mediante inyección a la zona no saturada. La primera es necesaria en ocasiones donde el acuífero se encuentra a gran profundidad o cuando hay presencia de una capa de suelo fino superficial. Este no es el caso del Valle de Azapa. La decisión pasará entonces por un tema económico. La inyección directa tiene la ventaja de que en general la vida útil del pozo es más prolongada, porque la colmatación es mitigable mediante *backwashing*, sin embargo son costosos y el agua a recargar requiere altos estándares de calidad. En el caso de la inyección en la zona no saturada, la necesidad de tratamiento es menor y los pozos son más baratos, pero no es posible mitigar la colmatación por lo que la vida útil es menor.

CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Durante el desarrollo de este trabajo se logró determinar el potencial de implementar un sistema de recarga artificial de acuíferos en el Valle de Azapa. Luego de conocer el valle en terreno y analizar preliminarmente las características de las posibles fuentes de agua para realizar la recarga, se determinó que esta podría ser lograda mediante lagunas de infiltración con el caudal disponible durante las crecidas del río San José o mediante la inyección de las aguas residuales de Arica a través de pozos aplicándoles previamente un tratamiento adecuado.

5.1 METODOLOGÍAS DE RECARGA

Se estimó que el volumen aprovechable para la recarga de las crecidas del río San José bordea los 2,45 [hm³] anuales, y un buen lugar de emplazamiento sería en la parte alta del valle, alrededor del kilómetro 30 del Camino Azapa, ya que el acuífero en ese sector tiene la capacidad para contener ese volumen de agua. También se podría aprovechar la Bocatoma del Canal Azapa para desviar el caudal, y la conducción de este no sería excesivamente larga. Esta alternativa amortiguaría parcialmente el déficit hídrico cuyo valor promedio se estima en 11,8 [hm³].

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. Se observó en terreno que la disponibilidad de superficie que no tenga otro uso es limitada por no decir nula, lo cual aumentaría los costos para el emplazamiento de las lagunas de forma importante.

Luego está el problema del arsénico, según el marco legal actual (D.S.N°46) sería necesario implementar un sistema de remoción de arsénico antes de infiltrar las aguas superficiales, lo cual haría esta alternativa aún más costosa. Adicionalmente tanto el arsénico como el hierro presentan concentraciones superficiales que impedirían el uso potable (NCh409) e incluso empeorarían la calidad actual del acuífero, actual fuente de agua potable del valle. Sin embargo se debe mencionar que la actual normativa es rígida en cuanto a sus exigencias, esto porque los límites máximos permitidos aplican sobre las concentraciones totales, por cuanto no se estaría considerando el mejoramiento natural que ejerce el suelo durante la infiltración del agua superficial. Este aspecto es particularmente relevante en este caso ya que en las concentraciones totales de arsénico y hierro domina la fracción particulada, mientras que en el acuífero domina la fracción disuelta. Por último recalcar la necesidad de realizar estudios en otros lugares del valle y ampliar la red de monitoreo para caracterizar de mejor forma la calidad del agua subterránea.

Por otro lado, se destaca que existe un grado de incertidumbre importante que se genera por diferentes motivos: el acotado registro disponible de caudales diarios para realizar el análisis, por la calidad de las mediciones fluviométricas, y finalmente, por la dificultad de estimar cual sería la tasa de infiltración real de largo plazo en la superficie de recarga. Por último, las crecidas ocasionales del río San José y los daños provocados en distintos sectores del valle indican que estas constituyen un factor de riesgo importante para las obras hidráulicas. Si además se determina la disponibilidad de agua considerando solamente los derechos de aprovechamiento permanentes, entonces prácticamente no habría disponibilidad hídrica para recargar.

Por todos estos motivos la recarga artificial del acuífero del Valle de Azapa mediante lagunas de infiltración no sería recomendable.

En el caso de la infiltración con pozos un buen lugar de emplazamiento sería en torno al kilómetro 12 del Camino Azapa. Este lugar se encuentra lo suficientemente arriba en el valle como para que el agua recargada sea aprovechada por la mayor parte de este, y es el lugar con condiciones de permeabilidad apropiadas más cercano a la fuente de abastecimiento.

Si bien el potencial de almacenamiento del acuífero en ese sector es menor que en la parte alta, el caudal factible de ser recargado no es necesariamente menor que en el caso de las aguas superficiales, ya que el almacenamiento no requiere ser de carácter estacional. La estimación del caudal de recarga con aguas servidas dependerá del tiempo de retención del agua en el acuífero, la variación de niveles de agua subterránea producto tanto de la recarga artificial como de la natural y deberá ser determinado mediante modelación del flujo subterráneo.

A escala conceptual, la infiltración de aguas residuales 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. Esto porque la fuente de agua otorga un grado de seguridad importante respecto de su disponibilidad, y segundo, porque el caudal de recarga es potencialmente mayor. Sin embargo esta alternativa es costosa por cuanto requiere la implementación de una planta de tratamiento de las aguas residuales de tipo terciario, y junto con eso requiere tanto la conducción como la elevación del caudal hasta el punto de recarga.

5.2 RECOMENDACIONES

Probablemente, si se desea aprovechar el agua de las crecidas del río San José, una mejor idea sería implementar un sistema de menor costo y bajo nivel de ingeniería, paralelo a la infiltración de aguas residuales, como podría ser el mejoramiento del lecho del río en la parte alta del valle para incrementar la tasa natural de recarga. Se ha observado que los niveles de agua subterránea se han recuperado en todos los sectores después de las grandes crecidas, por lo tanto existe un potencial de mejoramiento del lecho del río que podría ser aprovechado.

Sin embargo una alternativa de este tipo requeriría un manejo integral a nivel de cuenca ya que existe un potencial de contaminación de las aguas subterráneas con arsénico principalmente. Considerando que las concentraciones del río cumplen con la normativa para riego, entonces se podría realizar una sectorización del acuífero donde se permita que las aguas de la parte alta sean de menor calidad y se utilicen en riego, y las aguas de la parte baja cumplan con los estándares de agua potable. Esta sectorización permitiría recargar parcialmente la parte alta del valle mediante un sistema económico de infiltración, situaría la fuente de abastecimiento de agua potable más cerca de la ciudad de Arica y el agua de calidad para riego podría ser utilizable en todo el valle.

De seguir avanzando en las etapas de un proyecto de este tipo los esfuerzos deberían estar enfocados en aumentar la cobertura de monitoreo de calidad de aguas subterráneas en todos los sectores del valle, especialmente entre el los kilómetros 5 y 12 del Camino Azapa y en la parte alta entorno al kilómetro 30. En los mismos sectores se debe estudiar con detalle la permeabilidad del acuífero y el rendimiento de pozos mediante pruebas de terreno.

Adicionalmente es primordial mejorar la calidad de la información de caudales ya que sobreestimaciones que bordean los 0,3 [m³/s] son significativas para una cuenca de estas características donde los caudales medios diarios son del mismo orden de magnitud.

5.3 CONCLUSIONES GENERALES

Los potenciales efectos ambientales de recargar el acuífero artificialmente incluyen principalmente la recuperación de los niveles de agua subterránea y el posible afloramiento de vertientes que han desaparecido con el paso del tiempo. Por otro lado, se debe considerar los posibles impactos negativos que podrían generarse. Estos son el empeoramiento de la calidad del agua de no hacerlo con una fuente de calidad apropiada o de no implementar los sistemas de monitoreo pertinentes, o el del riesgo de sufrir daños por las crecidas del río San José, ya que las más destructivas han ocurrido en años donde los niveles de agua subterránea se han encontrado más superficiales.

Finalmente es importante mencionar que la solución al problema de sobreexplotación del acuífero del Valle de Azapa no pasa por implementar un sistema de recarga artificial, un proyecto de estas características debe ser considerado sólo como parte de un proyecto integral a nivel de cuenca en el que participen y se genere conciencia de lo limitado del recurso hídrico en todos los actores.

BIBLIOGRAFÍA

- AC Ingenieros. (2007). *Estimaciones de demanda de agua y proyecciones futuras. Zona I norte. Regiones I a IV*. Ministerios de Obras Públicas, República de Chile, Dirección General de Aguas.
- AC-Ingenieros. (2010). *Definición de estrategias de manejo sustentable para el acuífero de Azapa, XV Región*. Ministerio de Obras Públicas, República de Chile, Dirección General de Aguas.
- Aguas del Altiplano S.A. (2012). *Estudio determinación de tarifas 2013 - 2018*. Superintendencia de Servicios Sanitarios.
- Arrau, L. (1997). *Modelo de simulación hidrológico operacional cuenca del río San José*.
- Arrau, L. (2003). *Plan maestro de aguas lluvias de Arica. Manejo de los cauces de los ríos Lluta y San José y sus desembocaduras. Arica, 1ª Región*.
- Bouwer, H. (2002). Artificial recharge of groundwater: hydrogeology and engineering. *Hydrogeology Journal*, 10:121–142.
- Cahill, M. (2011). *Infiltration testing. Oregon State University*.
- CAP. (2003). *Central Arizona Project*. Obtenido de <http://www.cap-az.com/index.php/departments/recharge-program/hieroglyphic-mountains>
- CIREN. (1997). *Cálculo y cartografía de la evapotranspiración potencial en Chile*. Centro de Información de Recursos Naturales.
- CONIC-BF. (2001). *Construcción de barreras de goma río San José. Comuna de Arica*. Ministerio de Obras Públicas, Dirección de Obras Hidráulicas.
- DGA. (2010). *Plan de acción estratégico para el desarrollo hídrico de la región de Arica y Parinacota*. Ministerio de Obras Públicas, Gobierno de Chile, División de Estudios y Planificación.
- Edwards, A. (2013). *Introducción a la Hidrogeoquímica*. Universidad de Chile, Departamento de Ingeniería Civil.
- Espinoza, C. (2008). *Apunte curso "Hidráulica de aguas subterráneas y su aprovechamiento"*. Universidad de Chile, Departamento de Ingeniería Civil.
- 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.
- Fewster, E. (2010). *Resilient techniques to improve water availability, with a focus on drought-prone areas*.

- Freeze, R., & Cherry, J. (1979). *Groundwater*. Prentice Hall.
- Goberment of India. (2007). *Manual in artificial recharge of ground water*. Ministry of water resources.
- Hofkes&Visscher. (1986). *Artificial grounwater 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.
- Ibañez, S. (s.f.). *Características del infiltrómetro de doble anillo*. Universodad Politécnica de Valencia.
- IGRAC. (2013). *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.
- Johnson, A. (1967). *Specific yield - compilation of specific yields for various materials*. U.S. Geological Survey.
- 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.
- Murray, R. (2009). *Artificial recharge, the intentional banking and treating of water in aquifers*. Water affairs and forestry. Republic of South Africa.
- Murray, R., Tredoux, G., Ravenscroft, P., & Botha Fanie. (2007). *Artificial Recharge Strategy: Version 1.3*. Department of Water Affairs and Forestry, Republic of South Africa.
- Todd K., D., & Mays W., L. (2005). *Groundwater Hydrology*.
- 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).

ANEXO A: RECARGA ARTIFICIAL DE ACUÍFEROS

Este anexo consiste en una recopilación de antecedentes acerca de la recarga artificial de acuíferos. Se investigaron aspectos relevantes tal como fuentes de agua, características hidrogeológicas y metodologías de recarga artificial entre otros.

A.1 GENERALIDADES

La recarga artificial de acuíferos consiste en un conjunto de técnicas que permiten, mediante una intervención programada e introducción directa o inducida de agua, incrementar el grado de seguridad y disponibilidad de los recursos hídricos de un acuífero, así como también actuar sobre su calidad.

La forma tradicional de almacenamiento ha sido mediante represas, sin embargo la recarga artificial ofrece algunas ventajas comparativas; los buenos lugares para represas son cada vez más escasos, existen pérdidas por evaporación, acumulación de sedimentos, riesgo de falla estructural, impactos ambientales e impactos socio culturales entre otros.

Por otro lado la recarga de acuíferos ofrece una oportunidad de almacenamiento de largo plazo. Si se piensa en el calentamiento global, la probabilidad de eventos extremos como sequías o lluvias abundantes podría aumentar, por lo que el almacenamiento subterráneo sería una buena alternativa para almacenar en tiempos de abundancia y utilizar en períodos de escasez.

El principal problema en los sistemas de infiltración artificial es el riesgo de colmatación, la cual es producida por sedimentación de material fino, crecimiento microbiano, precipitación química o por burbujas de aire que bloquean el espacio de poros. Algunas medidas para prevenir o solucionar problemas de colmatación incluyen la construcción de sedimentadores previo a la infiltración, bombeo desde el acuífero para generar un autolavado, raspado y limpieza de la superficie de infiltración y operación mediante ciclos de infiltración y posterior secado, entre otros.

Por este motivo es necesario ser cuidadoso en la elección de la fuente de agua, metodología de recarga y acuífero en el que se almacenará. Dependiendo de la calidad y disponibilidad del recurso, características hidrogeológicas del suelo y lugar donde se lleva a cabo la infiltración, se obtendrán diferentes resultados respecto de las tasas de infiltración y remoción de contaminantes, los cuales deberán ser evaluados dependiendo del uso que se le quiera dar posteriormente al agua recargada.

A.2 FUENTES DE ABASTECIMIENTO

Un prerequisite 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 alta calidad del agua subterránea, 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.

La calidad natural del agua subterránea puede ser alterada como consecuencia de una amplia variedad de actividades antrópicas; las más significativas son la extracción del agua subterránea, el aumento de la recarga, el riego, cambios en el uso de la tierra, las actividades agrícolas y forestales, urbanización, minería y disposición de residuos líquidos y sólidos. La mayor amenaza para el agua subterránea es la salinización por medio de la intrusión salina en regiones costeras o desde acuíferos más profundos, percolación profunda de aguas de riego y retorno de aguas servidas a los acuíferos.

Por lo tanto, cuando se considera el impacto de la recarga en un ambiente hidrogeológico particular, es importante conocer la calidad natural del agua subterránea, los impactos de las actividades humanas y los procesos que determinan la calidad resultante. Partiendo de esta base, pueden predecirse y monitorearse los posibles impactos de la recarga en el agua subterránea original y en el agua de recarga para evitar impactos inaceptables.

Es importante ser cuidadoso en la elección de la fuente de agua para recarga, la cual dependerá de su disponibilidad, del objetivo del sistema de infiltración, la calidad del agua del acuífero y del uso que se le dará al agua recargada. Las principales fuentes de abastecimiento son las aguas superficiales, escorrentía de tormenta, aguas residuales y agua potable, cada una de ellas con diferentes características respecto de la calidad y su disponibilidad.

A.2.1 Agua superficial

Se refiere al agua de ríos y lagos principalmente. En el caso de los ríos la disponibilidad podría variar durante el año, en general se prefieren cauces sin grandes variaciones de caudal favoreciendo el grado de confianza respecto del recurso. En casos donde el agua traiga una carga importante de partículas en suspensión es recomendable utilizar un sedimentador para eliminarlos antes de infiltrar. La disponibilidad en el caso de los lagos es más constante y el agua podría ser infiltrada directamente si no existen grandes descargas industriales o de aguas servidas (UNESCO, 2005).

A.2.2 Escorrentía de tormenta

Consiste en los grandes caudales de agua que se generan en los ríos después de lluvias abundantes. Su disponibilidad es bastante incierta y ocurren entre períodos largos de tiempo. Su calidad en general es buena ya que se trata principalmente de agua lluvia. La escorrentía de tormenta se caracteriza por acarrear una importante cantidad de sólidos en suspensión, los cuales deben ser eliminados para la posterior infiltración del agua. Una buena estrategia es dejar pasar los primeros pulsos de agua de la tormenta ya que contienen las mayores cargas de sedimentos (UNESCO, 2005).

A.2.3 Agua residual

Son las aguas servidas producidas por el consumo humano o desechos industriales y posteriormente procesadas en plantas de tratamiento de agua residual. Su disponibilidad es la más constante de todas, sin embargo la calidad del agua es inferior. Esta fuente es utilizada en sectores donde la disponibilidad de agua es reducida y es necesario su reutilización. En términos generales, si el efluente viene de una planta con tratamiento secundario, entonces ésta puede ser infiltrada y ser utilizada para riego, aprovechando la limpieza que realiza el suelo de forma

natural a medida que el agua pasa a través de éste. Si el efluente viene de un tratamiento de tipo terciario, entonces el agua podría ser utilizada para uso potable nuevamente.

A.2.4 Agua potable

Las plantas de tratamiento de agua potable en general son diseñadas para el mes de máxima demanda y durante los meses en que la demanda es menor existe una gran capacidad de tratamiento que no es utilizada. Ésta capacidad ociosa puede ser aprovechada para infiltrar el agua cuando ésta no es requerida para posteriormente extraerla cuando la demanda es máxima. Este sistema de aprovechar la capacidad ociosa permite disminuir el dimensionamiento de las plantas de tratamiento de agua potable (UNESCO, 2005).

A.3 CONSIDERACIONES HIDROGEOLÓGICAS

El éxito de un proyecto de recarga artificial depende en gran medida de las condiciones hidrogeológicas locales. Éstas determinan la capacidad del agua de recarga para percolarse a través de la zona no saturada y la capacidad del acuífero para almacenar.

Las condiciones hidrogeológicas en la superficie y en la zona no saturada son muy importantes en proyectos que usan técnicas de infiltración superficial, ya que el agua debe moverse hacia abajo a través de estas zonas antes de alcanzar el acuífero. La tasa de infiltración depende de la permeabilidad vertical del suelo y de la zona no saturada. Una vez que el agua de recarga alcanza el nivel freático, la cantidad de agua que el acuífero puede almacenar depende de las características hidráulicas (transmisibilidad, capacidad de almacenamiento, coeficiente de almacenamiento o porosidad efectiva) su espesor y contenido de aire.

La formación geológica de entrada debe tener la permeabilidad y el espesor suficiente como para recibir agua de recarga a una tasa determinada. Por otro lado, los acuíferos con alta conductividad hidráulica pueden tener una rápida dispersión del agua de recarga y como resultado, únicamente cantidades limitadas pueden ser recuperadas (UNESCO, 2005).

Los ambientes hidrogeológicos pueden ser agrupados en 4 categorías generales desde la perspectiva de la recarga artificial (UNESCO, 2005).

A.3.1 Aluvional

Consiste en depósitos fluviales, marinos o lacustres que varían en grosor desde varias decenas de metros a kilómetros. El relieve topográfico es usualmente bajo, al igual que los gradientes hidráulicos naturales. Los sedimentos varían desde grava gruesa altamente permeable hasta limo impermeable de grano fino.

A.3.2 Roca dura fracturada

Este tipo de acuífero está formado por roca madre fracturada compuesta de rocas ígneas, metamórficas o volcánicas. A pesar de tener baja capacidad de almacenamiento y de transmisividad, puede ser la única fuente de agua subterránea en regiones semiáridas, por lo que deben ser gestionados con cuidado.

A.3.3 Acuífero de arenisca consolidada

Son acuíferos porosos y/o fracturados que pueden tener una gran capacidad de almacenamiento y transmisión. La capa superficial determinará la recarga natural. Si el suelo se originó a partir de arenisca la capacidad de recarga será alta, aunque puede ser reducida si se encuentra recubierto por depósitos aluviales de grano fino. Si la permeabilidad del acuífero es alta, es probable que el agua de recarga se disipe rápidamente.

A.3.4 Acuífero de carbonato

Presenta características similares a los acuíferos de arenisca, excepto que el volumen de agua y flujo más importante se encuentra en las fracturas. La proporción del volumen de agua que se encuentra en las fracturas respecto del volumen intergranular variará considerablemente si se trata de piedras calizas porosas o piedras calizas cársticas; en el primer caso el porcentaje será menor, mientras que en el segundo el volumen almacenado en las fracturas será mayor.

A.4 METODOLOGÍAS DE RECARGA

Distintas técnicas han sido aplicadas por milenios para gestionar los recursos hídricos disponibles. Las metodologías varían en complejidad, desde la simple recolección de agua de lluvia hasta la inyección de agua reciclada hacia el interior de un acuífero mediante pozos profundos.

Las metodologías aplicadas deben ser apropiadas para cumplir con los objetivos establecidos que, en el nivel más básico, será el almacenamiento y tratamiento de agua. Un tema muy importante es la probabilidad de colmatación de los sistemas de infiltración, aspecto que debe ser comprendido para que los impactos puedan ser minimizados y gestionados de manera que la relación costo-beneficio sea positiva.

Las metodologías utilizadas son agrupadas, a grandes rasgos, en las siguientes categorías (UNESCO, 2005):

- Métodos de distribución
- Modificaciones en el interior del canal
- Pozos y perforaciones
- Infiltración inducida

A.4.1 Métodos de distribución

Se utilizan cuando el acuífero está cercano a la superficie y la infiltración se produce a través del medio permeable. Estos métodos requieren que el suelo sea de alta permeabilidad y dependiendo de ésta se puede requerir más o menos superficie para infiltrar el caudal deseado.

Los principales esquemas utilizados son: Estanque de infiltración, tratamiento suelo acuífero (SAT), inundación controlada y recarga incidental.

A.4.1.1 Estanque o laguna de infiltración

Consiste en una laguna creada artificialmente mediante excavación o generando una superficie rodeada por un terraplén. El agua es conducida mediante un canal o tubería desde la fuente de abastecimiento para luego ser infiltrada. El volumen de agua recargada estará definido por la tasa de infiltración y la superficie de recarga, por lo que se requieren suelos de gran permeabilidad para disminuir la necesidad de terreno.

Cuando la fuente es un río de caudales intermitentes, éste podría contener una alta carga de sólidos en suspensión, por lo que el manejo correcto del sistema es fundamental para evitar la colmatación del suelo. Una buena alternativa es utilizar un sistema rotacional en que los estanques permiten secarse mientras otros siguen infiltrando, así los que se encuentran secos pueden ser raspados para recuperar las tasas de infiltración, mientras que el proceso de secado elimina el crecimiento biológico. Se recomienda instalar sedimentadores para la remoción de sólidos suspendidos o cubrir con vegetación el canal afluente. La base del estanque de infiltración puede ser cubierto con una capa de 0.5 [m] de arena media para que actúe como filtro.

Valores típicos de infiltración van desde los 30 [m/año] hasta los 500 [m/año] en suelo fino y arena gruesa respectivamente, mientras que la profundidad de la laguna puede variar entre 1 y 4 metros. Costos en India se estiman entre \$US 5.000 y \$US 10.000 para estanques de 10.000 a 15.000 [m³] de capacidad (Fewster, 2010).

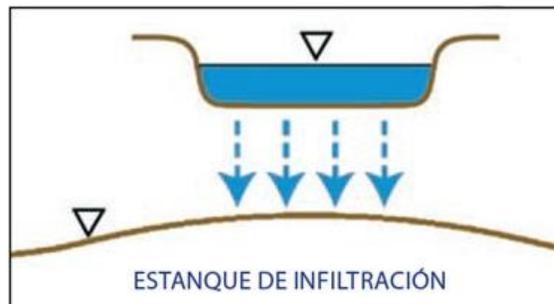


Figura A-1: Estanque de Infiltración.
Fuente: UNESCO, 2005.

Un ejemplo de sistema rotacional es el de la Figura A-2,

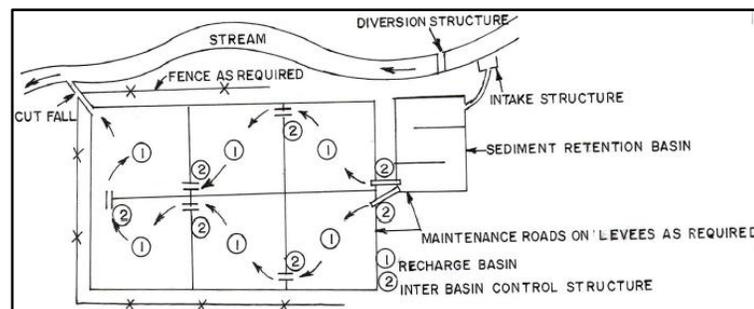


Figura A-2: Sistema rotacional.
Fuente: Government of India, 2007.

Este sistema aumenta el tiempo de contacto suelo-agua, reduce los sólidos suspendidos y facilita la mantención periódica de los estanques. La superficie seleccionada debe ser de poca pendiente, la entrada y salida de agua en cada estanque debe ser diametralmente opuesta para facilitar la circulación y el caudal afluyente debe ser ligeramente mayor a la capacidad total de infiltración de los estanques.

Otras alternativas para prevenir la colmatación incluyen la cloración para inhibir la actividad microbiana y construir crestas en la base para que los sólidos suspendidos se depositen en los valles y así mantener las tasas de infiltración en los bordes.

A.4.1.2 Tratamiento suelo acuífero (SAT)

Este sistema es similar al anterior, con la diferencia de que el principal objetivo es el tratamiento del agua de recarga. La fuente de abastecimiento son aguas residuales que provienen de las plantas de tratamiento de aguas servidas. A través del paso del agua por el suelo se produce un mejoramiento de ésta removiéndose todos los sólidos suspendidos y microorganismos, además de lograr reducción en la concentración de nitrógeno, carbono orgánico, fosfatos y metales.

En general el agua recargada puede ser utilizada para usos no potables si ésta proviene de un tratamiento secundario o para uso potable si el tratamiento es terciario o si se diluye con otro cuerpo de agua. El riesgo de colmatación es alto debido a la presencia de sólidos en suspensión, materia orgánica y químicos. Ésta es reducida mediante la alternación de ciclos de carga, donde la laguna está llena y el agua es infiltrada, y ciclos de secado, donde la laguna esta seca y mediante el resquebrajamiento del suelo éste recupera sus propiedades hidráulicas.

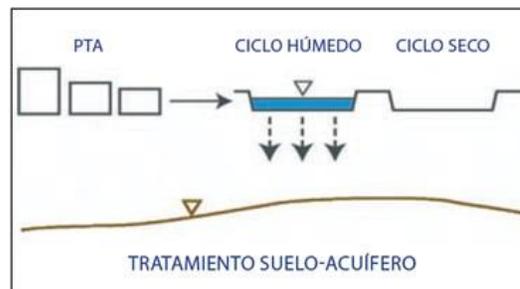


Figura A-3: Tratamiento suelo-acuífero.
Fuente: UNESCO, 2005.

El sistema puede ser diseñado para recuperar el 100% del agua recargada y así evitar la contaminación del acuífero (Figura A-4 superior) o para bombear una mezcla de agua recargada y agua subterránea natural (Figura A-4 inferior).

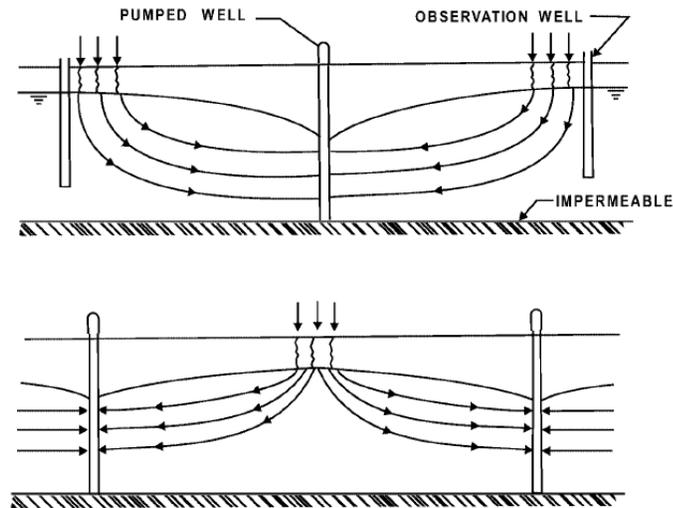


Figura A-4: Recuperación sistemas SAT.
Fuente: Bouwer, 2002.

A.4.1.3 Inundación controlada

La inundación controlada es utilizada para infiltrar caudales de crecida los cuales son conducidos mediante canales hacia lugares amplios y planos donde el agua será infiltrada. Requiere una disponibilidad importante de terrenos y se recomienda rodear el área con terraplenes o zanjas para controlar la inundación, mientras que el exceso de caudal puede ser devuelto al río mediante un canal. La idea es que una pequeña lámina de agua escurra a baja velocidad y así evitar alterar el suelo. Es el método de recarga más económico ya que requiere una mínima preparación del terreno y los costos de mantenimiento también son bajos.

Dos esquemas de construcción se muestran en la Figura A-5.

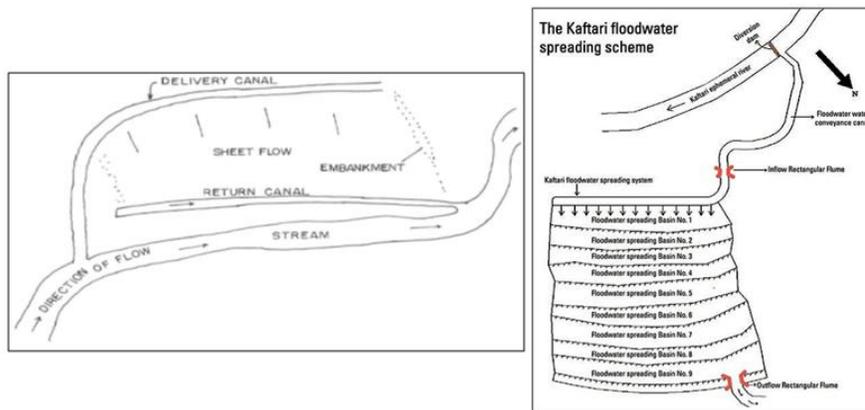


Figura A-5: Esquemas de recarga por inundación.
Fuente: Government of India, 2007. UNESCO, 2005.

A.4.1.4 Recarga incidental

Se refiere a la recarga producida con los excedentes de agua para riego. Históricamente esta recarga ha generado problemas de salinización y saturación hídrica del suelo, pero cuando el excedente es cuantificado y gestionado entonces puede convertirse en una oportunidad favorable.

A.4.2 Modificaciones en el interior del canal

A.4.2.1 Estanque de percolación

Consiste en pequeños muros construidos en el cauce del río con el mismo material depositado en el lecho. Este sistema aumenta el tiempo de retención del agua, dándole más tiempo para ser infiltrada y también aumenta la superficie de infiltración. Se pueden utilizar varios muros en un mismo río cuando estos son colocados en serie, de esta forma disminuye la energía destructiva durante crecidas intensas y aumenta la vida útil.

Son hechos de materiales temporales como tierra o vegetación, o de materiales permanentes como concreto o roca. Para evitar su destrucción ante grandes crecidas es recomendable construir un vertedero de concreto. El caudal infiltrado es recuperado aguas abajo del muro mediante pozos de bombeo. Podría requerir mantención para mantener las tasas de infiltración.

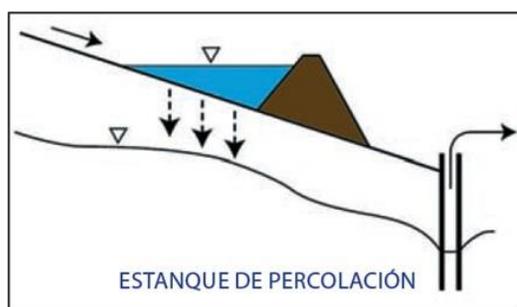


Figura A-6: Estanque de percolación.
Fuente: UNESCO, 2005

A.4.2.2 Represa de arena

Son convenientes en superficies onduladas donde el caudal es ocasional y con grandes crecidas. Consiste en un muro de arena o mampostería en piedra construido sobre roca que durante las crecidas retiene el material arrastrado y se deposita detrás del muro hasta que con el pasar del tiempo se forma un acuífero artificial.

La construcción se realiza en etapas de tal forma que la altura del muro antes de cada evento de inundación debe ser menor a la tasa de acumulación de arena gruesa a media durante ese evento, se esa forma se evita la sedimentación del material más fino. Requiere que el material depositado sea grueso, preferentemente arena, de tal forma que el agua pueda ser extraída con facilidad. Se recomienda construir paredes laterales o cubrir con hierba para disminuir la erosión en los costados. Se deben incluir vertederos para el flujo natural del río. La erosión aguas abajo del muro se evita construyendo una losa de piedra y hormigón. El agua es extraída directamente desde el acuífero artificial formado aguas arriba del muro mediante pozos.

Existen pocas pérdidas por evaporación, bajos requerimientos de operación y mantenimiento y larga vida útil. Los costos en Kenya se estiman en \$US 1,15 [$1/m^3$] para un volumen almacenado de 2.844 [m^3] de agua.

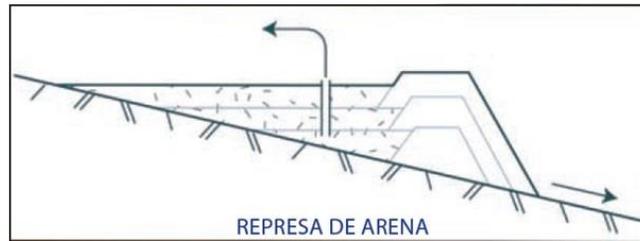


Figura A-7: Represa de arena.
Fuente: UNESCO, 2005

A.4.2.3 Represa perforada

Consiste en un muro construido en el cauce del río el cual es capaz de retener inundaciones de alta energía y alta carga de sedimentos. Mediante el almacenamiento superficial se favorece la sedimentación de sólidos suspendidos, luego el agua limpia es liberada lentamente, con el fin de que ésta pueda ser infiltrada en su totalidad, cosa que no pasaría si se dejase escurrir el caudal libremente.

Buenas prácticas en la construcción incluyen la instalación de paredes laterales para disminuir la erosión, vertederos y losas de protección para prevenir la erosión aguas abajo.



Figura A-8: Represa perforada.
Fuente: UNESCO, 2005

A.4.2.4 Diques

Cuando el río tiene poca pendiente y poca altura una alternativa es instalar diques de tierra en forma de T o L. Su principal efecto es aumentar el tiempo de retención del agua dándole más tiempo para que ésta pueda ser infiltrada.

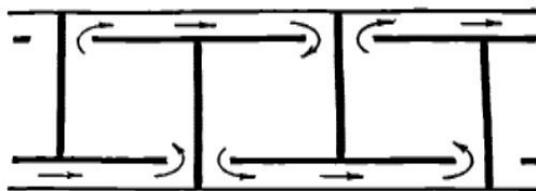


Figura A-9: Diques.
Fuente: Bouwer, 2002

A.4.3 Pozos y perforaciones

A.4.3.1 Pozo en la zona no saturada

Se utilizan cuando el suelo permeable se encuentra a una profundidad considerable y el suelo en superficie no permite la recarga por métodos superficiales. Para evitar el riesgo de colmatación se rellena el agujero del pozo con un material grueso y graduado que permita una cierta limpieza del agua cuando ésta pasa a través del relleno.

La inyección de agua se realiza normalmente mediante una tubería perforada ubicada en el centro del pozo. Para evitar que se formen burbujas de aire durante la inyección y que éstas puedan quedar atrapadas en el relleno, el agua es aplicada a través de una tubería más delgada dentro de la tubería perforada. Adicionalmente se puede incluir una válvula en la parte inferior de la tubería de suministro para evitar la caída libre de agua.

El principal problema de esta metodología, y de los pozos en general, es que el riesgo de colmatación es alto, y a la larga se colmatará. Como el pozo está en la zona no saturada, éste no puede ser lavado mediante bombeo (backwashing) o mediante limpieza manual o mecánica del suelo. Por este motivo el agua debe ser lo más limpia posible y necesariamente requiere un tratamiento previo para eliminar sólidos suspendidos o materia orgánica según sea el caso.

Desde el punto de vista económico, la decisión está entre mejorar el pretratamiento y así extender la vida útil del pozo o no invertir en tratamiento y reemplazarlo por uno nuevo. Una alternativa para disminuir la colmatación es alternar ciclos de infiltración y secado para recuperar las propiedades hidráulicas del suelo y eliminar el material biológico.

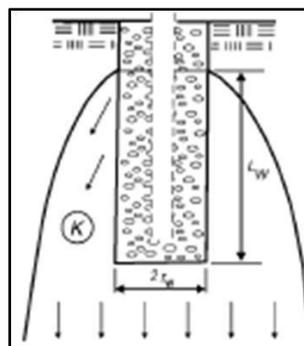


Figura A-10: Pozo en zona no saturada.
Fuente: Bouwer, 2002

A.4.3.2 Pozo al acuífero

La recarga directa al acuífero es utilizada donde no hay disponibilidad de suelo permeable y/o no hay suficiente terreno para un sistema de infiltración superficial.

Esta metodología es la que requiere la mayor calidad de agua ya que no existe limpieza natural en el transporte a través del suelo. En USA el agua es tratada para alcanzar calidades de agua potable para proteger la calidad del agua subterránea y también disminuir la probabilidad de colmatación. En otros lugares como Australia el agua residual y de tormenta es infiltrada para luego ser utilizada en riego.

También es importante conocer la composición del suelo, ya que dependiendo de la granulometría el agua obtendrá mayor o menor tratamiento dependiendo si el suelo es grueso o fino respectivamente.

Como regla general, el agua a infiltrar debería recibir al menos tratamiento terciario para eliminar sólidos suspendidos, bacterias u otros organismos patógenos, elementos químicos y materia orgánica. Geoquímicamente el agua subterránea y la de recarga deben ser compatibles para evitar procesos de precipitación, formación de hidróxidos y otros efectos.

La mejor alternativa para prevenir la colmatación, junto con mejorar la calidad del agua, es realizar sesiones de autolavado (backwashing) mediante el bombeo desde el pozo. Experiencias internacionales muestran que 2 o 3 sesiones de entre 15 a 30 minutos diarias mejoran notablemente el rendimiento y vida útil del sistema.

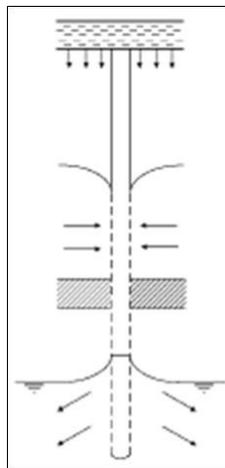


Figura A-11: Pozo al acuífero.
Fuente: Bouwer, 2002

A.4.3.3 Almacenamiento y recuperación (AAR o ASR por las siglas en Inglés)

Este sistema es utilizado para aprovechar la capacidad ociosa en las plantas de tratamiento de agua potable en lugares con alta variabilidad en la demanda dependiendo de la temporada, donde el almacenamiento superficial no es posible o es muy caro. Al igual que el caso anterior, consiste en inyectar agua directamente al acuífero mediante un pozo y luego extraerla desde el mismo lugar cuando es requerida. De este modo es posible disminuir el dimensionamiento de las plantas de tratamiento al consumo promedio diario, y así evitar diseñar para el mes de máxima demanda.

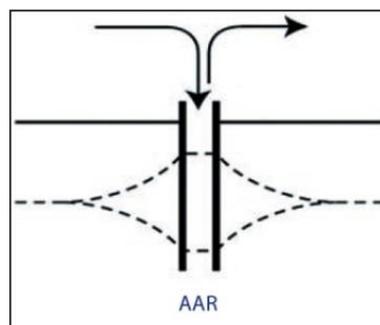


Figura A-12: Almacenamiento y recuperación.
Fuente: UNESCO, 2005

A.4.3.4 Almacenamiento, transporte y recuperación (AATR o ASTR por las siglas en inglés)

Similar al caso anterior, con la diferencia que el agua se recupera por un pozo aguas abajo del lugar de recarga aumentando el tiempo de transporte y beneficiándose de la capacidad de tratamiento del suelo.

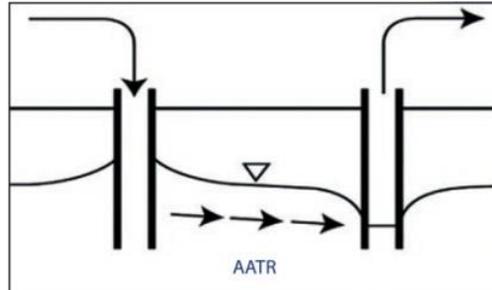


Figura A-13: Almacenamiento, transporte y recuperación.
Fuente: UNESCO, 2005

A.4.3.5 Zanja de infiltración

De características similares al pozo en la zona no saturada, es utilizada cuando el suelo en su estrato superior es de baja permeabilidad. Se excavan zanjas de entre 2 y 5 metros de profundidad las cuales son rellenadas con un material graduado con el fin de disminuir el proceso de colmatación. También se agregan geotextiles para cubrir las zonas con presencia de finos y así evitar su desprendimiento. El agua es aplicada mediante una tubería perforada en la parte superior de la zanja.

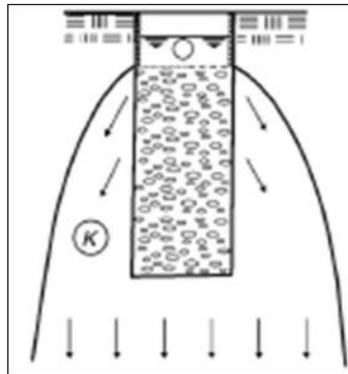


Figura A-14: Zanja de infiltración.
Fuente: Bouwer, 2002

A.4.4 Infiltración inducida

A.4.4.1 Infiltración en ríos

Consiste en un sistema de varios pozos colocados en serie, paralelos al sentido del río. Mediante el bombeo de los pozos se produce una disminución del nivel piezométrico que induce la infiltración de agua desde el río hacia el acuífero. Esta metodología es utilizada cuando se quiere efectuar un mejoramiento en la calidad del agua del río y requiere suelos de alta permeabilidad.

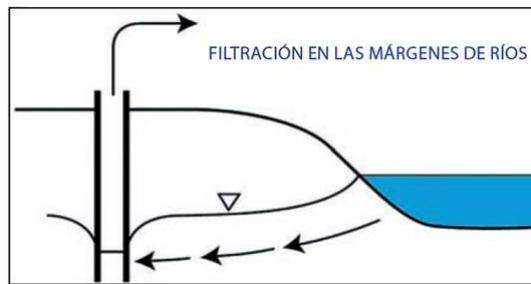


Figura A-15: Infiltración en ríos.
Fuente: UNESCO, 2005

A.4.4.2 Infiltración inter-dunar

Esta metodología es utilizada en zonas costeras. Se deposita el agua de ríos o aguas residuales en los valles que se forman en las dunas costeras, luego el agua es recogida en valles de menor altura y se aprovecha el mejoramiento en la calidad producido en el trayecto. Es ampliamente usada para disminuir la intrusión salina, además de ser una nueva fuente de agua.



Figura A-16: Infiltración inter-dunar.
Fuente: UNESCO, 2005

A.5 COLMATACIÓN

La colmatación o Clogging es producida por procesos físicos, químicos y biológicos. Físicos son principalmente la acumulación de sólidos suspendidos orgánicos e inorgánicos, pero también puede deberse al transporte de sedimento fino hasta un lugar más denso o fino del suelo donde éste forma una sub capa de colmatación. Biológicos son la acumulación de algas, bacterias y el crecimiento de microorganismo los cuales forman un biofilm. En los factores químicos se encuentran la precipitación de carbonato de calcio, yeso, fósforo u otros químicos, las cuales son inducidas por aumentos en el pH debido a la remoción de CO_2 por fotosíntesis. Otro factor importante es la acumulación de aire, el cual puede ser causado por diferencias de temperatura entre el agua de recarga y la del acuífero o por presiones negativas en la zona no saturada (Bouwer, 2002).

La temperatura también tiene un efecto en las tasas de infiltración producto de la variación en la densidad del agua. Si el sistema de recarga debe ser diseñado en base a una capacidad que se sabe con certeza, entonces se debe diseñar con las condiciones de invierno, donde la infiltración es menor. Sin embargo, la colmatación producida por la actividad biológica puede ser mayor en verano. Estos efectos son difíciles de predecir por lo que siempre la mejor alternativa es instalar plantas piloto para poder estimarlos (Bouwer, 2002).

En agua superficial la colmatación se evita mediante una pre-sedimentación para eliminar sólidos suspendidos, esto se logra mediante presas en el río, sedimentadores o agregando coagulantes

para acelerar el proceso (Bouwer, 2002). Para la recarga con pozos es recomendable utilizar filtro de arena o membrana, además de reducir nutrientes y carbono orgánico para evitar actividad biológica. También es útil desinfectar con cloro y otro desinfectante para generar un efecto residual que impida la actividad biológica.

La colmatación se ve acelerada a mayores tasas de infiltración, ya que aumenta la carga de sólidos suspendidos, nutrientes y carbono orgánico. Por este motivo, aumentar la presión de inyección para aumentar el volumen recargado en pozos que han mostrado signos de colmatación, en realidad acelera el proceso, además de comprimir la capa colmatante y por ende disminuye la permeabilidad y tasa de infiltración (Bouwer, 2002).

En sistemas de infiltración superficial, el clogging se evita secando periódicamente la superficie de recarga, de este modo se produce un resquebrajamiento que permite recuperar las tasas de infiltración. Si aun así persisten problemas de colmatación, es posible remover mecánica o manualmente la capa colmatante.

Cuando la fuente de agua son ríos de caudales muy variables, los cuales por lo general traen alta carga de sedimentos, la mejor alternativa es almacenar el máximo de agua posible mediante una presa. De esta forma los sólidos suspendidos sedimentan y se puede extraer el agua limpia para ser colocada en la superficie de infiltración. Otra opción es dejar pasar los primeros pulsos de agua los cuales contienen las mayores cargas de sedimentos.

ANEXO B: CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

La zona en 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 latitud oeste. Tiene una superficie de 16.873 [km²], lo que representa el 2.24% de la superficie del país. La población regional es de 213.595 habitantes equivalente al 1.29% de la población nacional y su densidad alcanza los 12,66 [hab/km²] (INE, 2012).

La región está dividida administrativamente en dos Provincias: Arica y Parinacota, y cuatro comunas: Arica, Camarones, Putre y General Lagos. La capital regional es Arica.

La cuenca del río San José se encuentra en la comuna de Arica y abarca una superficie de 3.187 [km²]. Las principales fuentes de agua natural de la cuenca son los ríos Belén, Seco y Tignamar, los cuales son afluentes al San José.

El recurso hídrico en la cuenca es escaso. Debido a este déficit, en la década de los sesenta se construyó el canal Lauca, que desvía los recursos del río Lauca hacia la cuenca del río San José. El agua desviada, con un promedio histórico aproximado de 600 l/s, es descargada en la cuenca del San José a través de la Central Chapiquiña, cuya capacidad de generación es de 10.2 MW. Después de unirse al caudal propio del río San José, sigue el curso principal de éste hasta el sector San José en bocatoma, desde allí pasa a llamarse canal Matriz Azapa. Sólo cuando las precipitaciones estivales son abundantes, el río sobrepasa el valle y el excedente ingresa al Océano Pacífico en la ciudad de Arica, descargando al litoral abundante sedimento, materia orgánica y basura arrastrada a su paso.

B.1 ANTECEDENTES CLIMÁTICOS

Dentro de las condiciones climáticas que afecta la cuenca de río San José, se destaca la clasificación de Koeppen tipo B, es decir, “Clima árido Subtropical”, el cual es dividido en tres tipos climáticos (JICA, 1995), entre ellos se encuentran:

Clima Desértico con Nublados Abundantes (BWn): este tipo de clima se caracteriza por la presencia de camanchacas (atardeceres y amanecidas), humedad media alta, escasas variaciones estacionales, ausencia de precipitaciones y temperaturas moderadas con variaciones

Clima Desértico Normal (BW): este tipo de clasificación climática se observa en la sección media de la cuenca, especialmente en el sector conocido como pampa, se caracteriza por presentar baja humedad relativa, limpidez del cielo, carencia de precipitaciones y finalmente no posee temperaturas altas por efecto de la altura (1.000 [m.s.n.m] apróx.).

Clima Desértico Marginal de Altura (BWH): esta subdivisión climática se ubica en las subcuencas tributarias del río San José excepto el río Iaco. Ocurre generalmente sobre los 3.000 [m.s.n.m] y se registra un aumento de las precipitaciones de origen convectivo.

Las precipitaciones se concentran en la Cordillera de los Andes, con una altura de entre 4.000 y 5.000 [m]. El promedio anual de agua caída aumenta de forma gradual, de cero en la parte baja, a 200 [mm] en lugares de mayor altitud.

B.2 HIDROLOGÍA

B.2.1 Red de monitoreo

En Azapa se cuenta con una red de 8 estaciones fluviométricas ubicadas en la parte media-alta de la cuenca. De ellas, solo 5 permaneces activas; Acueducto Azapa en Bocatoma, Río San José en Ausipar, Río Laco en Cosapilla, Río Tignamar en Angostura y Río Tignamar en Tignamar.



Figura B-1: Red de estaciones fluviométricas en la cuenca del río San José.

Fuente: Mapa interactivo DGA. Modificado para este trabajo.

Las coordenadas y período de funcionamiento de cada estación son los siguientes,

Tabla B-1: Ubicación y vigencia de estaciones pluviométricas en la cuenca del río San José.

Fuente: Mapa interactivo DGA.

Estación	UTM E	UTM N	Inicio	Término
Río San José en El Molino	402756	7944686	01/04/1947	01/05/1948
Acueducto Azapa en Bocatoma	406239	7944412	10/04/1963	Vigente
Río San José antes Bocatoma Azapa	410825	7944625	01/09/1974	01/04/0989
Río San José en Ausipar	414180	7944572	15/02/1967	Vigente
Río San José en Livilcar	424696	7953930	01/02/1937	01/07/1945
Río Laco en Cosapilla	440227	7967281	12/09/1995	Vigente
Río Tignamar en Angostura	440096	7952539	03/12/2005	Vigente
Río Tignamar en Tignamar	442448	7950426	07/12/1994	Vigente

B.2.2 Caudales

Se logró recopilar la estadística de caudales en las estaciones Ausipar, Río San José antes Bocatoma Azapa, Acueducto Azapa en Bocatoma y canal Lauca, con las cuales se generaron las respectivas Curvas de Variación Estacional de los caudales medios mensuales para las dos primeras (Figura B-2 y pag. 13).

En la Tabla B-2 se resume la información de caudales completados y corregidos disponibles en diversos estudios.

Tabla B-2: Registro de caudales utilizado.
Fuente: MN Ingenieros, 2011. Arrau, 1997.

Estación	Período	Duración [años]	Fuente	Tipo
Ausipar	1991-2008	18	MN Ingenieros, 2011	Diario
Río San José antes Bocatoma Azapa	1963-1993	31	Arrau L. 1997	Mensual
Acueducto Azapa en Bocatoma	1963-1993	31	Arrau L. 1997	Diario
Canal Lauca	1968-2009	42	MN Ingenieros, 2011	Diario

Los caudales de la Figura B-2 tienen una marcada asimetría diaria. Es decir, los promedios mensuales son el resultado de crecidas puntuales de una o dos semanas de duración, mientras que el resto del mes el río permanece seco.

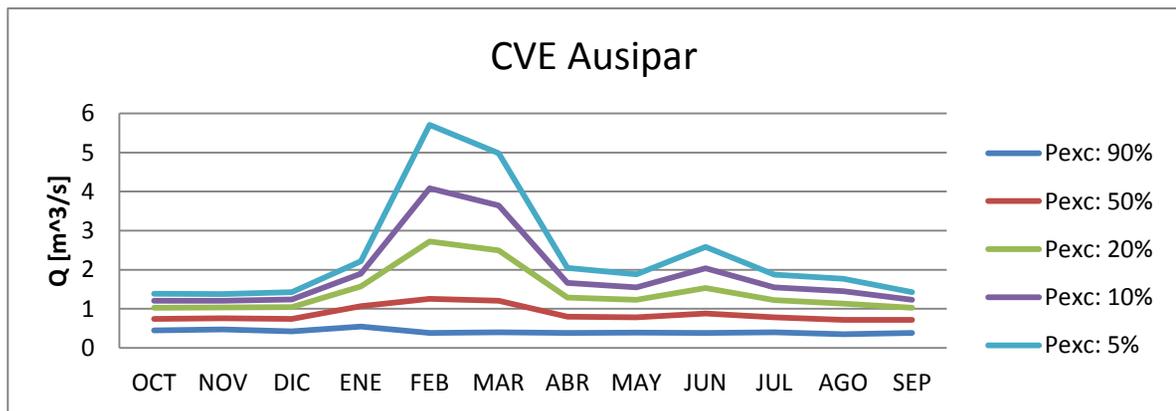


Figura B-2: Curva de variación estacional Río San José en Ausipar
Fuente: Elaboración propia.

Si bien los caudales medios mensuales son un indicador de la disponibilidad del recurso hídrico del río, la componente más importante es la que dice relación con las crecidas. En la Tabla B-3 se muestran los caudales diarios y máximos instantáneos para distintos períodos de retorno en el sector Hijos de Livilcar.

Tabla B-3: Caudales máximos instantáneos en Livilcar.
Fuente: MN Ingenieros, 2011.

T [años]	Q instantáneo [m³/s]	Q diario [m³/s]
10	59	18
20	102	26
50	197	43
100	366	69
200	589	102
500	901	147
1.000	1.267	199
10.000	2.526	438

Para el Acueducto Azapa en Bocatoma y canal Lauca no se incluyó la curva de variación estacional, ya que el caudal de estos responde a los requerimientos de los regantes y al caudal generado por la central Chapiquiña. Los promedios mensuales del Acueducto Azapa y el canal Lauca se muestran a continuación.

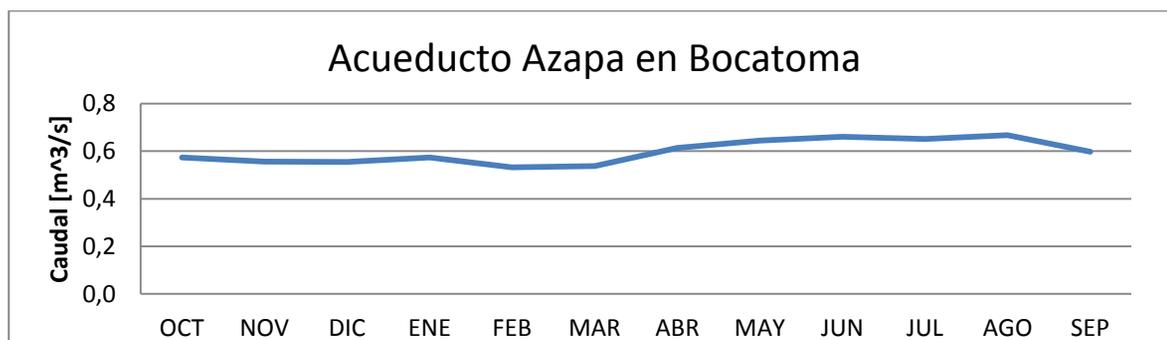


Figura B-3: Caudal medio mensual Acueducto Azapa en Bocatoma.
Fuente: Elaboración propia.

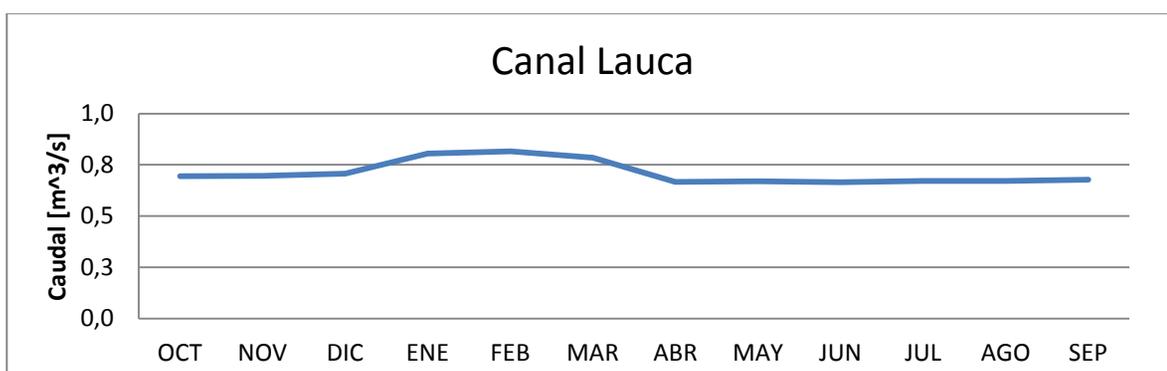


Figura B-4: Caudal medio mensual Canal Lauca.
Fuente: Elaboración propia.

También constituyen una fuente de agua superficial al valle dos grupos de vertientes localizadas dentro del valle y muy dependientes de los niveles del acuífero. El flujo máximo en conjunto alcanza los 600 l/s en períodos de recarga óptima, y cero en períodos con ausencia de ésta (AC Ingenieros, 2010).

B.3 EXPLOTACIÓN DEL ACUÍFERO

El acuífero del río San José posee buenas condiciones de cantidad y calidad, razón por la cual es intensamente utilizado. Su principal fuente de recarga proviene de la infiltración de la precipitación y la escorrentía generada por ésta, luego está la filtración en los sistemas de regadío, pérdidas en el sistema distribución de agua potable y el flujo subterráneo proveniente de la parte alta de la cuenca. Las salidas del sistema acuífero consisten en el afloramiento de vertientes, bombeo, afloramiento en el río y flujo subterráneo que pasa hacia el norte en la ciudad de Arica.

De acuerdo al estudio realizado por la AC Ingenieros (2010), si se analiza la explotación histórica, con un bombeo promedio de 567 [l/s], se puede concluir que ésta ha permanecido en una situación de equilibrio. En la Figura B-5 se muestra que si bien los niveles de agua subterránea sufren importantes descensos, éstos se recuperan después de las grandes crecidas, afectando principalmente el rendimiento de los pozos.

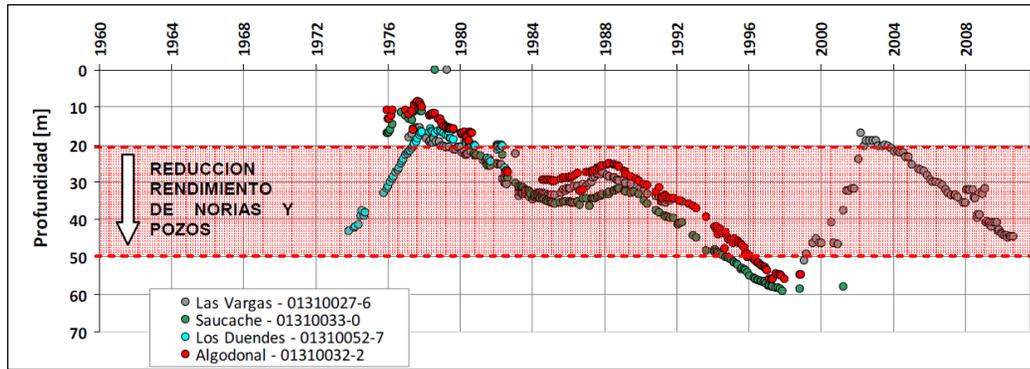


Figura B-5: Niveles de pozos en el Valle de Azapa.
Fuente: DGA, 2010.

En la Tabla B-4 se muestra en detalle el resultado de la modelación en Visual Modflow de la explotación histórica del acuífero del Río San José.

Tabla B-4: Simulación histórica de la explotación del acuífero del Río San José.
Fuente: AC Ingenieros, 2010.

ENTRADA [l/s]		SALIDA [l/s]	
Infiltración lluvia + escorrentía	548	Vertientes	199
Riego y agua potable	210	Bombeo	567
Flujo subterráneo	198	Afloramiento	174
		Flujo subterráneo	10
Total	956	Total	950

Luego se analizó la respuesta del acuífero bajo el nivel de explotación del año 2008, de 740 [l/s], obteniéndose que la demanda es sustentable, pero reduciendo de manera importante los caudales de las vertientes (89 [l/s]).

Tomando como base el escenario anterior, se simuló qué pasaría con el acuífero si se considera el bombeo actual más los 677 [l/s] solicitados mediante la regularización de derechos de agua a través de la "Ley del Mono". Como resultado la modelación arroja que no sería factible ese nivel de explotación por más de 5 años. El déficit hídrico se estima en 250 [l/s].

Diversos estudios han realizado balances hídricos en el Valle, entre ellos están: CONIC-BF en 1995 con 495 [l/s], DGA en 1995 con 300 [l/s] y JICA en 1995 con 500 [l/s]. Todos coinciden en que la cuenca sufre un déficit hídrico importante.

Por otro parte, bajo el supuesto de extracciones sustentables de largo plazo, esto es con la demanda ajustada a la recarga media, también persiste una condición de riesgo, asociada sólo a la asimetría de la recarga. Esto genera que la mayor parte del tiempo la demanda es satisfecha a través del almacenamiento del acuífero y por consiguiente, se estima que el volumen útil de éste sería de 100 MM [m³], mientras que la capacidad total alcanzaría los 350 MM [m³].

B.4 CALIDAD DEL AGUA

La red de monitoreo de calidad química del agua está compuesta por 13 estaciones, de las cuales solo 2 se encuentran en funcionamiento.

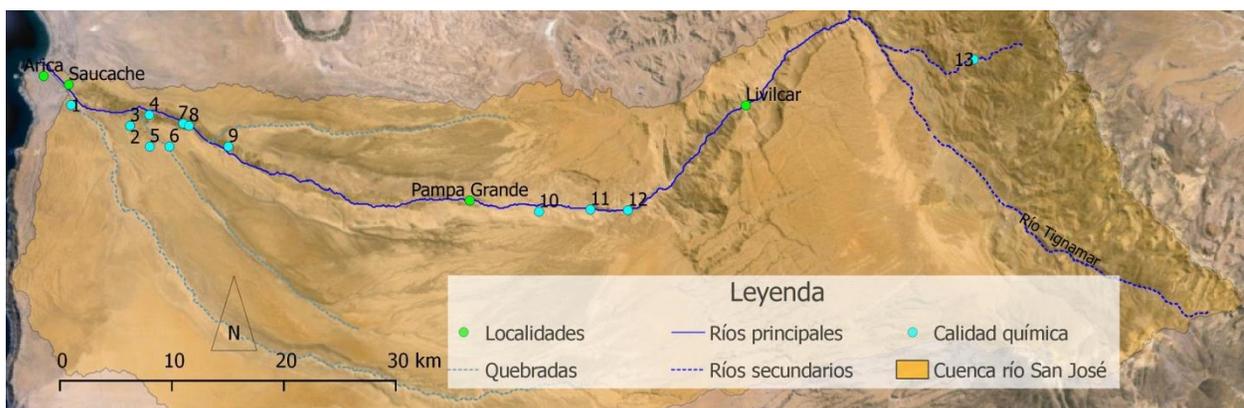


Figura B-6: Red de estaciones de calidad química del agua en la cuenca del río San José.

Fuente: Elaboración propia.

Las coordenadas y período de funcionamiento de cada estación son los siguientes,

Tabla B-5: Red de monitoreo de calidad de agua en la cuenca del Río San José.

Fuente: Mapa interactivo DGA.

N°	Estación	UTME	UTM N	Inicio	Término	Tipo
1	Río San José en Saucache	364312	7953627	31-01-1972	30-04-1977	Superficial
2	Vertiente Media Luna	369604	7951819	30-09-1968	31-07-1977	Superficial
3	Vertiente La Mita Chica	369604	7951819	30-09-1968	31-07-1977	Superficial
4	Pozo Albarracines	371316	7952792	31-12-1999	Vigente	Subterránea
5	Vertiente Los Albarracines	371376	7949987	31-01-1960	30-09-1976	Superficial
6	Vertiente San Miguel de Azapa	373135	7949998	31-01-1960	31-07-1977	Superficial
7	Río San José en puente Las Maitas	374352	7952055	31-01-1972	31-07-1977	Superficial
8	Vertiente La Concepción	374882	7951855	31-05-1974	31-07-1977	Superficial
9	Vertiente Penablanca	378413	7950033	31-08-1974	31-07-1977	Superficial
10	Acueducto Azapa en Bocatoma	406239	7944412	31-10-1970	Sin Información	Superficial
11	Río San José antes Bocatoma Azapa	410825	7944625	31-03-1967	Vigente	Superficial
12	Río San José en Ausipar	414180	7944572	31-12-1968	Sin Información	Superficial
13	Río Belén en Misana	445090	7958074	31-07-1971	30-06-1978	Superficial

B.4.1 Análisis de consistencia

Se analizó la información obtenida por cada una de las estaciones de monitoreo, realizando previamente un análisis de consistencia de los datos para verificar que las muestras hayan sido correctamente medidas. Los análisis aplicados fueron el de balance iónico y el de conductividad eléctrica medida v/s suma iónica.

El balance iónico corresponde al balance entre cationes y aniones. Basándose en el principio de electroneutralidad, la suma de cationes equivalentes en la muestra debe ser igual a la suma de

aniones equivalentes. Los cationes considerados en el estudio fueron sodio (Na^+), potasio (K^+), calcio (Ca^{+2}) y magnesio (Mg^{+2}). Los aniones más importantes considerados en este tipo de análisis son el cloruro (Cl^-), sulfato (SO_4^{-2}) y el bicarbonato (HCO_3^-), a además se agregaron nitrato (NO_3^-) y carbonato (CO_3^{-2}). Mediante la ecuación (1) se determina que si el error es inferior al 5%, entonces la muestra es confiable.

$$\text{Error Balance (\%)} = \frac{\sum \text{Cationes} - \sum \text{Aniones}}{\sum \text{Cationes} + \sum \text{Aniones}} \cdot 100 \quad (1)$$

Para aquello, las concentraciones deben ser expresadas en [meq/l], la cual se obtiene según la ecuación (2) para el caso de los elementos, o según la ecuación (3) para el caso de las moléculas.

$$\left[\frac{\text{meq}}{\text{l}} \right] = \left[\frac{\text{mg}}{\text{l}} \right] \cdot \frac{\text{Valencia}}{\text{Peso atómico}} = \frac{\left[\frac{\text{mg}}{\text{l}} \right]}{\text{Peso equivalente}} \quad (2)$$

$$\left[\frac{\text{meq}}{\text{l}} \right] = \left[\frac{\text{mg}}{\text{l}} \right] \cdot \frac{\text{Carga eléctrica}}{\text{Peso molecular}} = \frac{\left[\frac{\text{mg}}{\text{l}} \right]}{\text{Peso equivalente}} \quad (3)$$

El segundo criterio, según APHA-AWWA-WPCF 1992, consiste en que la suma tanto de cationes como de aniones debe ser 1/100 de la conductividad eléctrica medida. Es así como mediante la ecuación (4) se verifico la fiabilidad de los datos medidos, utilizando como criterio que la relación entre la suma de iones y la CE medida esté en el rango 0,9-1,1.

$$0,9 < \frac{100 \cdot \sum \text{cationes o aniones} \left[\frac{\text{meq}}{\text{l}} \right]}{\text{CE}_{\text{medida}}} < 1,1 \quad (4)$$

B.4.2 Resultados

B.4.2.1 Agua superficial

Según el balance iónico, de los 390 datos disponibles entre las 12 estaciones de monitoreo, 120 fueron excluidos ya que faltó la medición de algunos de los iones principales. De los restantes un 93% estuvo dentro del rango de valores confiables, correspondientes a un 65% del total de las muestras.

Respecto de la conductividad eléctrica, 138 datos fueron excluidos por falta de medición de alguno de los iones principales o porque no cumplió con el balance iónico. De los restantes un 82% estuvo dentro del rango de valores confiables, correspondientes al 53% del total de las muestras.

El 53% de las muestras confiables corresponde a 207 muestras. Sin embargo muchas no contaban con la medición de algunos de los elementos de interés. En la Tabla B-6 se muestran los parámetros de calidad de agua para riego, el número de muestras con medición, el valor máximo que exige la norma y porcentaje de valores que la cumplen. De los valores que no cumplen con la norma, se incluye el promedio de en qué porcentaje ésta es excedida. Lo mismo en la Tabla B-7 para el caso del agua potable.

Tabla B-6: Parámetros de calidad de agua considerando norma para riego.

Fuente: Elaboración propia.

Parámetro	Datos válidos	Norma [mg/l]	Cumplimiento	% Sobre la norma
pH	172	5.5 - 9.0	100%	Cumple
Aluminio Al	14	5,000	86%	176%
Arsénico As	107	0,100	84%	37%
Boro B	135	0,750	10%	162%
Cadmio Cd	15	0,010	100%	Cumple
Cloruro Cl	172	200,000	99%	4%
Cobalto Co	15	0,050	100%	Cumple
Cobre Cu	28	0,200	96%	45%
Cromo Cr	14	0,100	100%	Cumple
Hierro Fe	67	5,000	99%	113%
Manganeso Mn	14	0,200	93%	35%
Mercurio Hg	14	0,001	100%	Cumple
Molibdeno Mo	14	0,010	64%	320%
Níquel Ni	15	0,200	100%	Cumple
Plata Ag	14	0,200	100%	Cumple
Plomo Pb	14	5,000	100%	Cumple
Selenio Se	13	0,020	100%	Cumple
Sulfatos SO4	172	250,000	87%	14%
Zinc Zn	15	2,000	100%	Cumple

Tabla B-7: Parámetros de calidad de agua considerando norma para agua potable.

Fuente: Elaboración propia.

Parámetro	Datos válidos	Norma [mg/l]	Cumplimiento	% sobre la norma
PH	172	6.0 - 8.5	96%	N/A
Arsénico As	107	0.01	12%	505%
Cadmio Cd	15	0.01	100%	Cumple
Cloruro Cl	172	400	100%	Cumple
Cobre Cu	28	2	100%	Cumple
Cromo Cr	14	0.05	100%	Cumple
Hierro Fe	67	0.3	51%	348%
Magnesio Mg	172	125	100%	Cumple
Manganeso Mn	14	0.1	71%	68%
Mercurio Hg	14	0.001	100%	Cumple
Plomo Pb	14	1	100%	Cumple
Sulfatos SO4	172	500	100%	Cumple
Zinc Zn	15	3	100%	Cumple

Adicionalmente a la información disponible de la DGA, se cuenta con mediciones realizadas por el Instituto Nacional de Hidráulica durante el año 2013 y mediciones realizadas por Aguas del Altiplano durante el año 2011. En la Tabla B-8 se indican los valores obtenidos por el INH y en la Tabla B-9 la ubicación de las mediciones. En la Tabla B-10 se indican los valores obtenidos por Aguas del Altiplano.

Tabla B-8: Mediciones de calidad de agua Instituto Nacional de Hidráulica.

Fuente: Instituto Nacional de Hidráulica.

Parámetro	Unidad	J. Blanco	M. Madrid	G. Ritcher	R. Yampara	B. Azapa
Aluminio Total	Al mg/l	0,05	0,05	0,04	0,05	0,35
Arsénico Total	As mg/l	0,016	0,014	0,009	0,012	0,06
Bicarbonato	HCO ₃ mg/l	167	190	260	179	220
Boro Total	B mg/l	1,65	1,55	1,89	1,57	1,4
Cadmio Total	Cd mg/l	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
Calcio Total	Ca mg/l	272	288	530	233	76,8
Cloruros	Cl mg/l	260	277	611	223	42,5
Cobre Total	Cu mg/l	0,06	0,03	0,03	0,03	0,03
CE	μS/cm	1896	1952	3350	1618	795
Dureza	mg/l	799	844	1537	680	287
Fosfatos	PO ₄ mg/l	2,97	1,84	1,84	1,84	1,84
Fósforo Total	P mg/l	0,95	0,6	0,6	0,6	0,6
Hierro Total	Fe mg/l	0,01	0,01	0,01	0,13	0,17
Magnesio Total	Mg mg/l	28,7	29,4	51	23,1	22,7
Manganeso Total	Mn mg/l	0,008	0,008	0,008	0,008	0,056
Nitritos	mg/l	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43
Plomo Total	Pb mg/l	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
Potasio Total	K mg/l	9,96	6,71	8,32	6,04	6,95
Selenio Total	Se mg/l	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004
Sodio Total	Na mg/l	111	109	144	95,8	67,7
Sólidos Disueltos	mg/l	1502	1688	3312	1268	520
Sulfatos	SO ₄ mg/l	335	347	519	305	171
Turbidez	NTU	0,3	0,3	0,3	1	10
Zinc Total	Zn mg/l	0,032	0,017	0,017	0,011	0,009
pH		7,01	6,99	6,91	6,77	7,05
Carbonatos	CO ₃ mg/l	1	1	1	1	1
Alcalinidad	mg/l CO ₃ H-	167	190	260	179	220
Nitratos	NO ₃ mg/l	35,8	34,8	35	29	6,92

Tabla B-9: Ubicación mediciones de calidad de agua Instituto Nacional de Hidráulica.

Fuente: Instituto Nacional de Hidráulica.

Pozo	UTM E	UTM N	Medición
Jennifer Blanco	388488	7945776	Subterránea
Manuel Madrid	376818	7950335	Subterránea
Gladys Ritcher	366431	7954797	Subterránea
Romelio Yampara	373557	7952230	Subterránea
Bocatoma Azapa	406791	7944862	Superficial

Tabla B-10: Mediciones de calidad de agua Aguas del Altiplano.

Fuente: SEIA.

Parámetro	Unidad	Pozo 1	Pozo 2	Pozo 3	Pozo 4	Pozo 5	Pozo 6	
Arsénico Total	As	mg/l	0,0188	0,0196	0,019	0,0154	0,0149	0,0144
Bicarbonato	HCO3	mg/l	s/i	145,5	166,4	179,9	184,1	152,1
Boro Total	B	mg/l	1,1799	1,2353	1,4349	1,4562	1,4639	1,21
Calcio Total	Ca	mg/l	233,4	244,89	381,51	285,67	285,31	223,93
Cloruros	Cl	mg/l	276	296	568	380	359	275
Cobre Total	Cu	mg/l	0,00168	0,00162	0,00364	0,00186	0,0035	0,00331
CE		μS/cm	1658	1714	2701	1955	2005	1623
Dureza		mg/l	678,33	714,15	1103,77	826,18	827,83	646,34
Fosfatos	PO4	mg/l	0,015	0,018	0,009	0,015	0,021	0,031
Fósforo Total	P	mg/l	0,0105	0,013	0,009	0,01	0,011	0,013
Hierro Total	Fe	mg/l	0,02	0,03	0,08	0,05	0,02	0,02
Magnesio Total	Mg	mg/l	23,218	24,932	36,702	27,407	28,026	21,173
Manganeso Total	Mn	mg/l	0,016	0,016	0,016	0,016	0,016	0,016
Nitritos		mg/l	0,009	0,009	0,009	0,009	0,009	0,009
Potasio Total	K	mg/l	4,6	4,62	6,43	5,57	5,41	5,16
Sodio Total	Na	mg/l	81,11	81,38	126,21	97,13	92,55	106,87
Sólidos Disueltos		mg/l	1028	1011	1783	1231	1383	1033
Sulfatos	SO4	mg/l	276	293	370	330	317	265
Turbidez		NTU	0,2	0,3	0,65	0,3	0,3	0,25
Zinc Total	Zn	mg/l	0,00789	0,0239	0,0209	0,0164	0,0116	0,106
pH			7	7	7	7	7	7
Carbonatos	CO3	mg/l	3	3	3	3	3	3
Alcalinidad		mg/l CO3H-	147	145	166	180	184	152
Nitratos	NO3	mg/l	8,13	8,22	10,2	8,07	7,32	6,48

B.5 USO DE AGUA

La actividad económica más importante del Valle de Azapa actualmente es la agricultura, seguida por la industria y el turismo, mientras que la actividad minera está comenzando a desarrollarse a pequeña escala.

El área regable alcanza unas 3.200 [ha] y la demanda agrícola se estima en el orden de los 1.400 l/s, de la cual, el canal Azapa abastece entre 600 y 650 l/s con recursos trasvasados por el canal Lauca. Las proyecciones a futuro indican que la situación de demanda tiende a mantenerse relativamente estable limitada por la disponibilidad de agua, aunque pudiera esperarse que continúe el crecimiento debido a mayor tecnificación y mejoras de eficiencia en la distribución.

La demanda de abastecimiento de agua potable para Arica es del orden de 450 l/s, estimándose que se duplicará para el año 2020, mientras que las localidades interiores no generan impactos apreciables sobre el recurso.

La demanda de agua total por sector proyectada al año 2030 es la siguiente.

Tabla B-11: Demanda de agua cuenca del Río San José.
Fuente: AC Ingenieros, 2007.

Año	Agropecuario	Agua Potable	Industrial	Minero	Energía	Turismo	Caudal Ecológico	Total
2005	1228	447	247	17	6	4	90	2039
2015	1395	546	475	21	6	7	90	2540
2030	1395	751	1270	29	6	11	90	3552

B.6 CARGA DE SEDIMENTOS

La información disponible corresponde a un estudio sedimentológico realizado por MN Ingenieros en 2011 para el diseño del Embalse Livilcar. En dicho estudio se calcula la carga de sólidos suspendidos y el arrastre de fondo del río San José.

Dado que al momento del estudio no se contaba con mediciones en el Río San José, el trabajo realizado por MN Ingenieros consistió en relacionar la Curva de Descarga de gasto sólido en suspensión del Río Lluta en Tocontasi con la curva de duración de los caudales medios diarios en la estación San José en Ausipar. El gasto sólido de fondo se calculó mediante el método de Meyer, Peter y Muller.

Los resultados obtenidos son los que se muestra a continuación.

Tabla B-12: Carga de sedimentos medio anual Río San José.
Fuente: MN Ingenieros, 2011.

Sedimento	Arrastre promedio anual de sedimento [ton/año]	Volumen promedio anual de sedimento [m3/año]
En suspensión	168.185	129.373
De fondo	45.813	35.241
Total	213.999	164.614

B.7 NIVELES DE AGUA SUBTERRÁNEA

La DGA cuenta con una red de 50 pozos de monitoreo de aguas subterráneas. Para efectos de este trabajo se utilizaron 14 de ellos, correspondientes a los que presentan mayores períodos de medición.

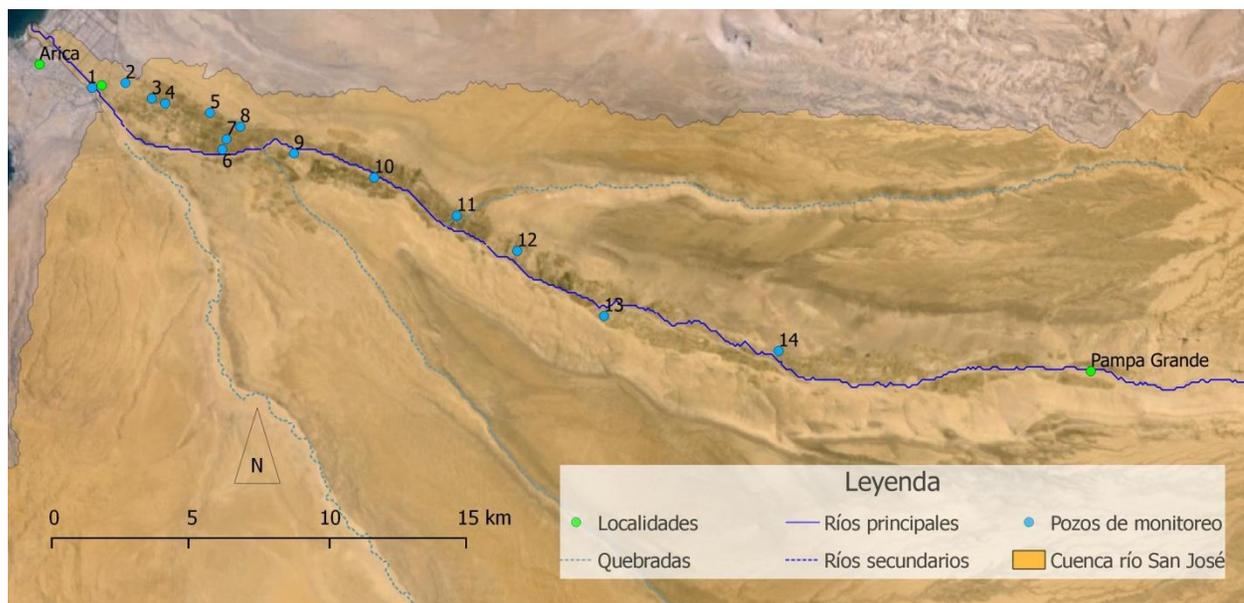


Figura B-7: Pozos de monitoreo de niveles
Fuente: Elaboración propia.

Tabla B-13: Red de monitoreo de niveles de agua subterránea en el Valle de Azapa
Fuente: DGA.

Nº	Pozo	UTM E	UTM N	Fecha inicio	Fecha término	Mediciones
1	Saucache	362570	7959507	02-12-1975	30-03-2004	170
2	Avenida Balmaceda	361990	7958581	2-12-1975	19-01-2007	205
3	Los Duendes	367731	7955547	27-9-1989	15-07-2008	33
4	Algodonal	366537	7958613	02-12-1975	31-01-2002	147
5	San Juan Ocurica	367835	7953335	13-01-2000	25-01-2012	25
6	Las Vargas	374512	7950367	22-02-1977	Presente	232
7	Pozo Gómez Las Vargas	374197	7953685	01-08-1962	12-09-2000	108
8	Las Animas	371293	7953697	20-10-1988	25-01-2012	53
9	Las Maitas Las Violetas	375111	7948527	27-11-1975	21-03-2012	170
10	Las Maitas	374821	7947910	27-11-1975	31-01-2009	78
11	Las Riveras De Madrid	383300	7951837	15-06-1962	Presente	300
12	Pascual Roco	377872	7952295	30-06-1989	Presente	88
13	Santa Irene Sur	379110	7951319	30-06-1989	Presente	133
14	Escuela Chitita n 28	387203	7946481	31-07-1985	Presente	149

ANEXO C: CAMPAÑAS DE TERRENO

C.1 GENERALIDADES

Este anexo tiene por objetivo describir los trabajos de terreno realizados durante el trabajo de título y sus respectivos resultados.

Se realizaron 4 campañas de terreno entre Enero y Mayo de 2013. La primera campaña tuvo como objetivo reconocer la zona en estudio. En los siguientes dos terrenos se apoyó al personal del INH de Arica en labores de medición de niveles de agua subterránea y conductividad eléctrica. Finalmente en Mayo se realizó una campaña para medir la capacidad de infiltración superficial en las terrazas adyacentes al río San José.

C.2 TERRENO EXPLORATORIO

C.2.1 Descripción

Entre los días 22 y 25 de Enero se realizó una primera visita a terreno junto a la geóloga del proyecto en el que se enmarca el trabajo de título. El objetivo fue determinar la composición de las terrazas adyacentes al lecho del río San José y así obtener una primera aproximación respecto de las permeabilidades del suelo.

La metodología consistió en realizar inicialmente un recorrido general del valle hasta el kilómetro 42 aproximadamente del camino Azapa. Luego en una segunda etapa se visitaron 15 puntos entre los kilómetros 2 y 26 aproximadamente, en los cuales se estudió la composición de las terrazas adyacentes al lecho del río.



Figura C-1: Zona de estudio terreno de exploración.

Fuente: Google Maps.

C.2.2 Resultados

C.2.2.1 Recorrido General

Como resultado del recorrido general del valle se obtuvo una primera impresión acerca de la zona de estudio y se tomó consciencia del desarrollo agrícola del valle. Prácticamente toda la

superficie disponible se encuentra aprovechada agrícolamente, en algunos casos incluso se utiliza parte del sector de inundación del río, y en otros, los cultivos están siendo desarrollados en los cerros a varios metros de altitud.



Figura C-2: Desarrollo agrícola Valle de Azapa.
Fuente: Terreno exploratorio.

C.2.2.2 Sedimentación

La semana del 14 de Enero el río San José experimentó su primera crecida del año con un caudal peak de 2.8 [m³/s]. Una semana después, en la fecha en que se realizó el terreno, el río traía un caudal entre 1.6 y 0.6 [m³/s] aproximadamente. Esto permitió verificar la alta carga de sedimentos que es arrastrada con cada crecida.

La situación descrita anteriormente otorgó la posibilidad conocer la sedimentación de material posterior a las crecidas. En general se comprobó que se tiende a formar una capa superficial de material fino, mayoritariamente arcilla, y luego una segunda capa de arena.

El espesor de ambas capas tiende a variar dependiendo del grado de estancamiento del agua y a la relación volumen/superficie del mismo. Es así como para estancamientos mayores, la capa de material fino tiende a ser de mayor espesor, al igual que la de arena. El espesor de la capa fina, según los lugares que se visitaron, alcanzó un espesor de hasta 9 [cm] aproximadamente en lugares de alto estancamiento, a diferencia de los lugares de bajo estancamiento donde los espesores eran inferiores a 1 [cm] (Figura C-3).



Figura C-3: Sedimentación material fino en alto estancamiento (izquierda). Sedimentación material fino en bajo estancamiento (derecha).

Fuente: Terreno exploratorio.

Se observó una clara estratificación entre la capa superficial fina y la segunda capa de arena, y el espesor de ambas en general fue de la misma magnitud.



Figura C-4: Estratificación arcilla-arena.

Fuente: Terreno exploratorio.

Dicha sedimentación proporciona información suficiente para generar una idea de lo que sería un sistema de infiltración superficial. Necesariamente se debe disponer de un sedimentador previo ingreso del agua a la superficie de infiltración. El nivel de sedimentación producido en el sedimentador sería similar al observado en la Figura C-3 (izquierda), mientras que en la superficie de infiltración sería lógico esperar sedimentación comparable a la de la Figura C-3 (derecha).

Se constató que, tal como se estudió en la revisión de antecedentes, efectivamente se produce un descascaramiento de la superficie que permitiría recuperar la tasa de infiltración.

Finalmente se encontró un lugar con agua aún estancada. Se observó la misma estratificación descrita anteriormente con un leve agrietamiento de la superficie. Lo que resulta interesante del estancamiento es encontrar evidencia del nivel de calidad de agua que se puede alcanzar luego de un período de sedimentación. El agua de la Figura C-5 es de calidad suficiente como para ser dispuesta en cualquier sistema de infiltración, en lo que a sólidos suspendidos se refiere. Sin embargo se debe tener presente que la sedimentación producida en el estancamiento lleva una duración de unos 7 días aproximadamente, tiempo considerablemente mayor al esperado en un sedimentador.



Figura C-5: Calidad de agua posterior a sedimentación
Fuente: Terreno exploratorio.

C.2.2.3 Composición terrazas aluviales

Se verificó que en general las terrazas están formadas por una capa superior de entre 60 y 5 [cm] que varía entre arena y material fino dependiendo del lugar. Bajo dicha capa se encuentra un conglomerado mal seleccionado de grava en una matriz de arena media con presencia de finos y con grados de cementación variable.



Figura C-6: Composición terrazas aluviales.
Fuente: Terreno exploratorio.

La ubicación geográfica de los puntos visitados se muestra en la Figura C-7. A partir de lo visto en terreno las terrazas se agrupan en 5 grupos.

- Grupo 1: Puntos 1, 11 y 15.

Terrazas que comienzan con grava mezclado con fino y subyace grava con contenidos variables de arena.

- Grupo 2: Puntos 2, 5, 6 y 7.

Terrazas que comienzan con una fina capa de limo, subyace grava arenosa, luego lentes de arena media y finalmente grava con contenidos variables de arena.

- Grupo 3: Puntos 3, 8, 9, 12

Terrazas que comienzan con arena fina a media con contenidos variable de limo y subyace grava con contenidos variables de arena.

- Grupo 4: 10 y 13

Terrazas que comienzan con una fina capa de arena limosa, subyace grava, luego arena finalizando con grava.

- Grupo 5: Punto 14

Terraza de grava con basura y desechos.

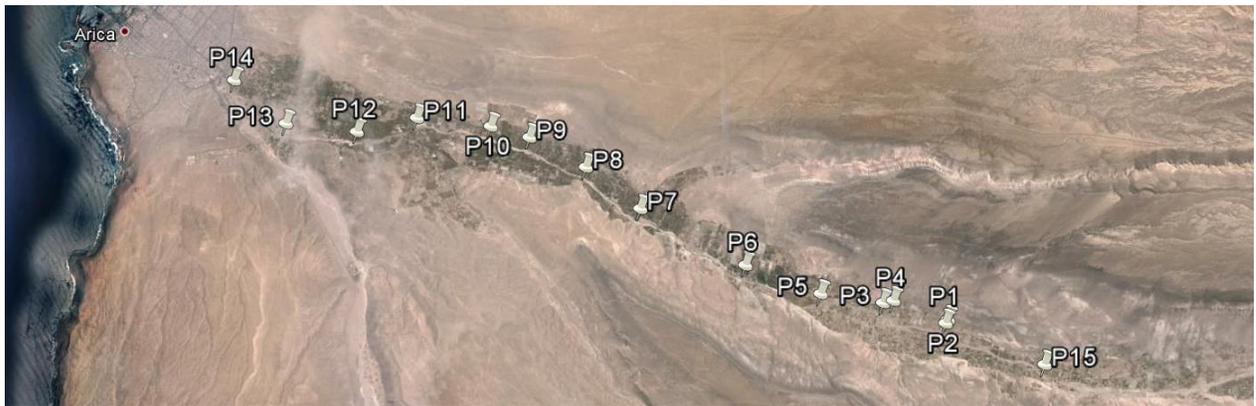


Figura C-7: Sectores de análisis de terrazas fluviales.

Fuente: Terreno exploratorio.

C.3 EXPERIENCIA EN MEDICIÓN DE NIVELES DE AGUA SUBTERRÁNEA

A continuación se indican los pozos que forman parte de la red de monitoreo de aguas subterránea del INH. La red cuenta con 20 pozos distribuidos entre el kilómetro 2 y el kilómetro 28 del Camino Azapa.

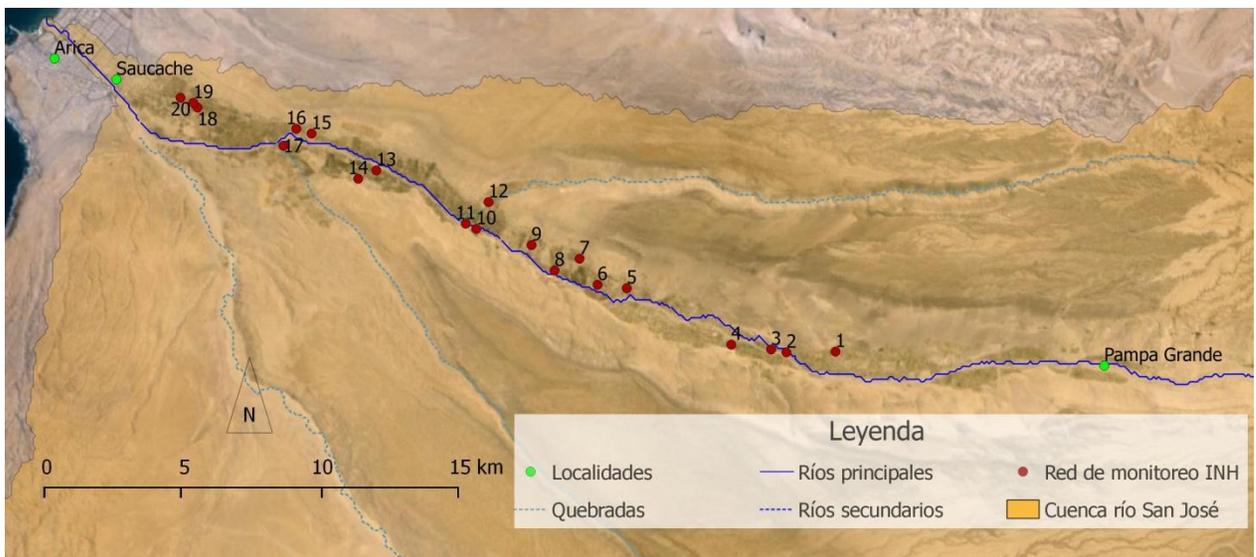


Figura C-8: Red de monitoreo de niveles de agua subterránea del Instituto Nacional de Hidráulica.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla C-1: Red de monitoreo de niveles de agua subterránea del Instituto Nacional de Hidráulica.

Fuente: INH Oficina Arica.

N°	Nombre pozo	UTM E	UTM N	Medición 1	Medición 2	Medición 3	Medición 4
1	Ricardo Peters	390273	7945819	22,7	22,6	-	22,7
2	Jennifer Blanco	388488	7945776	24,2	24,4	23,8	24,3
3	Pedro Vizcarra	387935	7945875	22,7	22,7	22,6	22,8
4	M°. Angélica Corvacho	386484	7946040	35,1	26,0	34,8	35,1
5	Pedro Vizcarra	382678	7948051	31,6	31,1	30,7	31,3
6	Mario Gutiérrez	381618	7948177	25,8	26,0	25,2	25,3
7	Félix Puña	380959	7949100	21,2	20,9	19,6	19,3
8	Carlos Díaz	380052	7948676	12,9	12,7	11,3	-
9	Pascual Rocco	379212	7949580	13,9	13,7	13,1	12,6
12	Quebrada del Diablo	377640	7951121	7,6	s/i	5,4	34,2
10	Manuel Madrid	377202	7950154	6,2	5,4	4,2	4,8
11	Manuel Madrid	376819	7950338	34,3	s/i	34,2	4,8
13	Romelio Yampara	373557	7952227	35,4	s/i	33,8	32,9
14	Mario Gregorio	372900	7951927	32,8	s/i	32,6	-
15	Roxana Dunstan	371196	7953544	36,7	s/i	32,2	36,0
16	Fabiola Ron	370641	7953710	40,4	40,5	39,9	42,0
17	Arturo Buitano	370180	7953095	36,7	s/i	36,8	35,5
18	Gabriela Sánchez	367049	7954450	42,7	s/i	42,4	41,9
19	Sonia Sajamar	366894	7954621	34,1	s/i	43,8	43,2
20	Gladys Richter	366431	7954797	43,9	s/i	43,8	43,1

C.4 EXPERIENCIA EN MEDICIÓN DE INFILTRACIÓN SUPERFICIAL

C.4.1 Generalidades

Entre los días 22 y 25 de Abril se realizó una campaña de terreno con el objetivo de obtener parámetros de infiltración superficial en el valle. Se seleccionaron 5 lugares en base a la clasificación anterior de terrazas fluviales, procurando medir en al menos un lugar de cada grupo. El grupo 5 se descartó debido a que no representa un lugar en que podría ser emplazado un sistema de infiltración. Los puntos escogidos fueron el 1, 2, 7, 9 y 10. Adicionalmente se hizo una medición en el sector de Bocatoma Azapa.

C.4.2 Marco teórico

Existen diversos métodos para evaluar o determinar la conductividad hidráulica de un medio poroso. En términos generales estos se clasifican en dos categorías: directos e indirectos. Éstos últimos consisten en estimar la conductividad en base a información bibliográfica o a partir de las características granulométricas de un determinado suelo. Los métodos directos, en cambio, miden

la velocidad de descenso del agua, con la cual mediante relaciones matemáticas se obtiene la conductividad hidráulica (Espinoza, 2008).

Entre los métodos directos para medir infiltración superficial en terreno se analizaron dos posibles alternativas para ser implementadas en el desarrollo de la experiencia: infiltrómetro simple (método de Bouwer) e infiltrómetro de doble anillo.

Los diseños son variados, en general consisten en uno o dos cilindros de entre 60 y 15 [cm] de diámetro por 30 [cm] de alto con bordes afilados por un lado de éste. Éstos son enterrados en la superficie donde se desea estimar la conductividad hidráulica, para luego medir el tiempo que demora el agua en descender una distancia determinada (infiltrómetro de carga variable) o medir el caudal infiltrado para un cierto tiempo (infiltrómetro de carga constante)

Por la forma en que se desarrolla este tipo de experiencias, el gradiente hidráulico vertical es cercano a la unidad, por lo que la conductividad hidráulica se puede estimar como la tasa de descenso observada (Espinoza, 2008). El problema de esta metodología es que la infiltración se divide en una componente horizontal producto de la succión capilar, y una componente vertical, donde sólo interesa ésta última. De no considerar este efecto se podría sobreestimar de manera significativa la conductividad hidráulica

C.4.2.1 Método de Bouwer

El método de Bouwer considera el flujo lateral; la extensión horizontal de la humedad es medida utilizando una pala, y la profundidad del frente húmedo es medida de igual forma, o es estimada a partir de la infiltración acumulada total y la porosidad rellenable (Bouwer, 2002).

La Figura C-9 ilustra esquemáticamente éste método. El infiltrómetro es llenado hasta el tope y se toma el tiempo para descensos de entre 5 y 10 [cm], para luego ser llenado nuevamente. El último descenso y_n y su tiempo Δt_n son medidos, al igual que la distancia del frente húmedo lateral x . La tasa de infiltración última i_n es calculada como $y_n/\Delta t_n$. El flujo vertical en el sector húmedo, por debajo del infiltrómetro de radio r , es calculado como:

$$i_w = \frac{i_n \pi r^2}{\pi (r + x)^2} \quad (1)$$

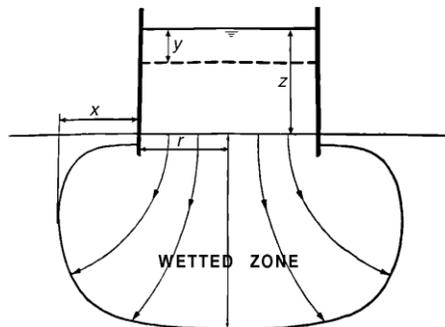


Figura C-9: Infiltrómetro simple. Método de Bouwer.
Fuente: Bouwer, 2002.

La profundidad L del frente húmedo, al final del test, es calculada a partir del descenso acumulado total del agua en el cilindro y_t .

$$L = \frac{y_t \pi r^2}{n \pi (r + x)^2} \quad (2)$$

Donde n es la porosidad rellenable del suelo, la cual puede ser estimada a partir su textura y contenido de humedad inicial. En la Tabla C-2 se indica valores típicos de n . Suelos bien graduados tienen menores valores de n que los suelos uniformes.

Tabla C-2: Porosidad rellenable según tipo de suelo.
Fuente: Bouwer, 2002.

Tipo de suelo	n
Uniformemente seco	0,3
Moderadamente húmedo	0,2
Muy húmedo	0,1

Luego aplicando la Ley de Darcy para el flujo vertical en la zona saturada y despejando se obtiene:

$$K = \frac{i_w L}{z + L - h_{we}} \quad (3)$$

Donde z es la profundidad de agua promedio en el cilindro durante la última medición. El término h_{we} indica la presión de poros en el suelo antes de ser humedecido, la cual es negativa por tratarse de un suelo no saturado. En la Tabla C-3 se indican valores típicos de h_{we} .

Tabla C-3: Presión de poros según tipo de suelo
Fuente: Bouwer, 2002.

Tipo de suelo	h_{we} [cm]
Arena gruesa	-5
Arena media	-10
Arena fina	-15
Arena limosa	-20
Limo arenoso	-25
Limo	-35
Arcillas estructuradas	-35
Arcillas dispersas	-100

La conductividad hidráulica K_w calculada mediante la ecuación (3) puede ser usada como la infiltración de largo plazo, sin considerar colmatación y sin láminas de suelo fino en profundidad. Debido a la presencia de aire en la zona húmeda, la conductividad del suelo saturado es estimada como la mitad de la conductividad húmeda, es decir, $K_s = 0,5K_w$.

C.4.2.2 Infiltrómetro de doble anillo

El infiltrómetro de doble anillo reduce parcialmente el efecto del flujo horizontal mediante un segundo anillo de mayor diámetro instalado por fuera del anillo central. Éste último es usado para medir el descenso de agua a través del tiempo; el anillo exterior minimiza el movimiento lateral del flujo. La Figura C-10 ilustra su configuración.

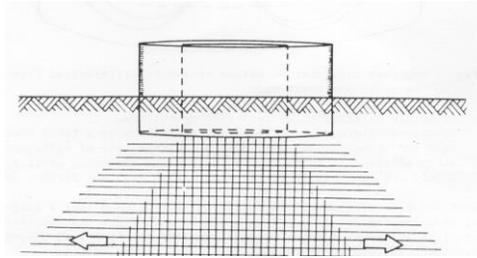


Figura C-10: Componente horizontal de la infiltración.
Fuente: Ibañez, s.f.

En este tipo de pruebas se debe tener especial precaución con el nivel de agua en los anillos, la cual debería mantenerse siempre a la misma cota. Esto para evitar una posible subestimación de la infiltración debido al flujo pasante desde el anillo exterior hacia el anillo interior (Figura C-11a), o evitar una sobreestimación de la infiltración en el caso contrario (Figura C-11b).

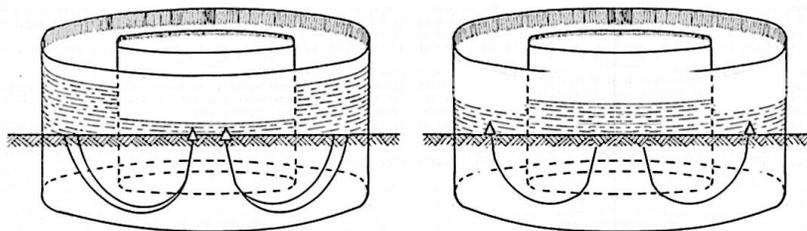


Figura C-11: Efecto de la diferencia de niveles de agua entre anillos. 10a) subestimación del flujo. 10b) sobreestimación del flujo.

Fuente: Ibañez, s.f.

En esta metodología se distinguen dos opciones de medición según la forma en que se realiza el ingreso de agua a los anillos: infiltrómetro de carga constante e infiltrómetro de carga variable.

Como su nombre lo indica, el infiltrómetro de carga constante mantiene la altura de agua en los anillos a una misma cota durante todo el desarrollo de la experiencia. Esto se logra realizando el suministro mediante el tubo de Mariotte. La tasa de infiltración es estimada midiendo el descenso de agua dentro del tubo para un determinado lapso de tiempo. De esta manera se calcula el volumen infiltrado, luego conociendo la superficie del anillo puede calcularse la tasa de infiltración. En la Figura C-12 se muestra la instalación experimental para esta metodología.



Figura C-12: Infiltrómetro de doble anillo a carga constante. Instalación experimental.
Fuente: Cahill, 2011.

El infiltrómetro de carga variable es similar al método de Bouwer. El llenado se realiza manualmente en ambos anillos y la medición consiste en anotar el tiempo transcurrido para un descenso determinado de la cota de agua.

En ambos casos, lo que se busca es estimar la tasa de infiltración última. Como lo indica la gráfica en la Figura C-13, dependiendo de la condición inicial del suelo, la tasa de infiltración tiende a decaer hasta alcanzar un punto de equilibrio al momento en que el suelo se encuentra saturado.

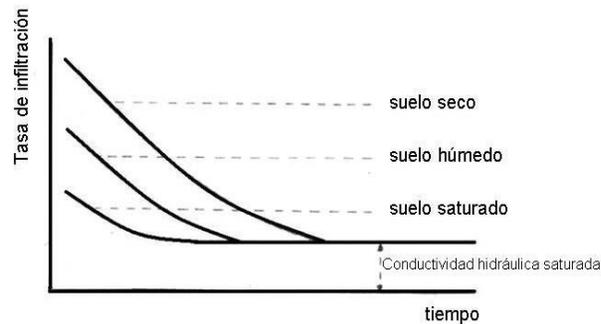


Figura C-13: Evolución de la tasa de infiltración.
Fuente: Ibañez, s.f.

C.4.2.3 Conclusiones

Luego de analizar las distintas alternativas, se optó por adoptar el infiltrómetro de doble anillo con carga variable para la experiencia de terreno. Ésta metodología ofrece algunas ventajas desde el punto de vista práctico.

Del método de Bouwer se tienen buenos antecedentes desde el punto de vista de sus resultados debido a que incluye analíticamente el efecto del frente húmedo lateral x , no obstante su medición podría presentar dificultades. Esta se produce a una cierta profundidad desconocida, por lo cual es necesario excavar con pala para obtener la medición correcta. Sin embargo, por lo visto en el terreno exploratorio, las terrazas fluviales presentan importante presencia gravas a baja profundidad, lo que haría infructuoso intentar excavar en ese tipo de terreno.

El infiltrómetro de carga constante ofrece la ventaja de que, una vez instalado, su funcionamiento es de carácter autónomo, es decir, no es necesario llenar con agua los anillos una y otra vez. Sin embargo el tubo de Mariotte es delicado y requiere cuidado especial. En ese sentido no es recomendable para este tipo de experiencias en que se requiere viajar algunos kilómetros entre los distintos puntos de medición, y que además, en algunos casos, éstos no permiten el acceso en vehículo.

C.4.3 Instalación experimental y metodología.

Se construyeron 3 anillos de 15, 30 y 60 [cm] de diámetro y 2,5 [mm] de espesor, lo cual permitió tener la opción de implementar en terreno un infiltrómetro de doble anillo de diámetros 15 y 30 [cm] o 30 y 60 [cm]. En cada medición ambos anillos fueron cuidadosamente enterrados de forma concéntrica en el suelo hasta una profundidad de entre 5 y 8 [cm]. Luego a un costado de cada anillo se instaló una regla con el objetivo de medir la cota de agua al interior de estos. En la Figura C-14.a se muestra la configuración para el infiltrómetro de anillos de 15 y 30 [cm].

Luego el agua fue añadida mediante una manguera (Figura C-14b) hasta una cota de 15 [cm]. Para no perturbar el suelo se instaló un plástico circunferencial (Figura C-14c) sobre el cual el agua fue vertida, el cual fue retirado una vez alcanzada la altura deseada.

Se dejó descender la cota hasta una altura de 5 [cm], realizando la medición del tiempo de descenso cada 2,5 [cm] en el primer sitio, y cada 1 [cm] en los 5 lugares restantes. Luego se añadió agua nuevamente hasta los 15 [cm] de altura para repetir el proceso. Lo anterior fue realizado entre 1 y 5 veces en cada sitio dependiendo de la tasa de infiltración obtenida y del tiempo disponible para realizar la prueba.

De las 6 mediciones realizadas, sólo en una se utilizó el infiltrómetro de anillos de 30 y 60 [cm] ya que esta configuración requirió un volumen de agua considerablemente superior para realizar la prueba.



Figura C-14: Instalación experimental.
Fuente: Campaña de Infiltración.

C.4.4 Resultados

A continuación se muestran los resultados obtenidos en terreno para cada uno de los sitios. En la leyenda “M” indica medición.

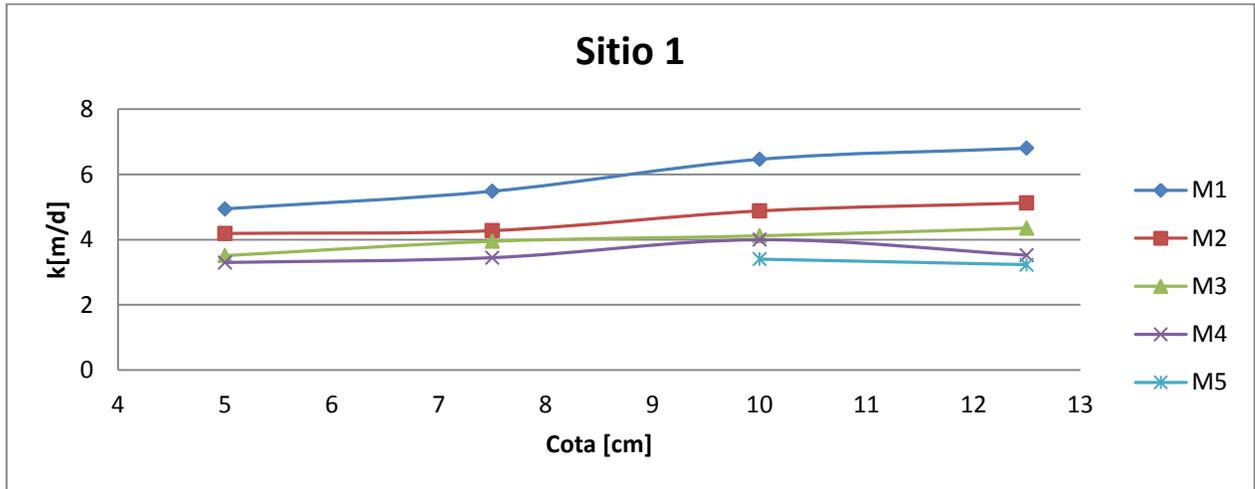


Figura C-15: Resultados Sitio 1. Anillos de 15 y 30 [cm].
Fuente: Elaboración propia.



Figura C-16: Suelo Sitio 1.
Fuente: Campaña de Infiltración.

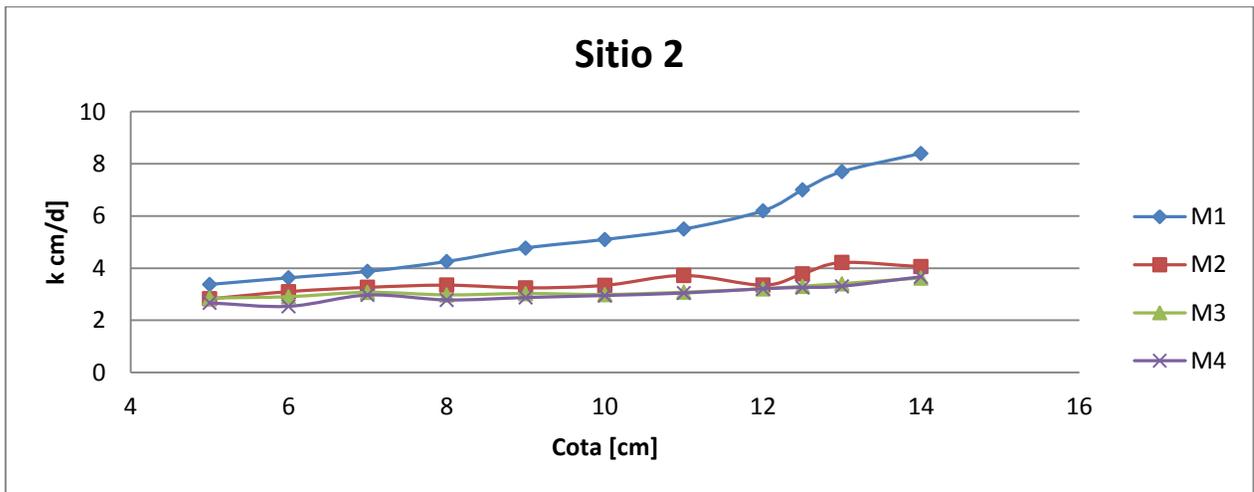


Figura C-17: Resultados Sitio 2. Anillos de 15 y 30 [cm].
 Fuente: Elaboración propia.



Figura C-18: Suelo Sitio 2.
 Fuente: Campaña de Infiltración.

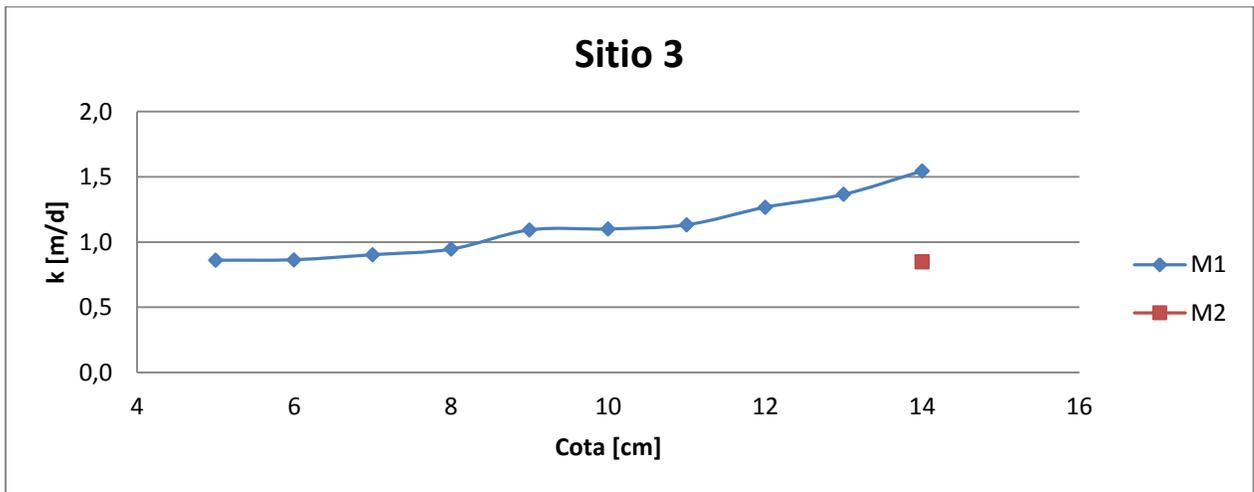


Figura C-19: Resultados Sitio 3. Anillos de 15 y 30 [cm].
 Fuente: Elaboración propia.



Figura C-20: Suelo Sitio 3.
 Fuente: Campaña de Infiltración.

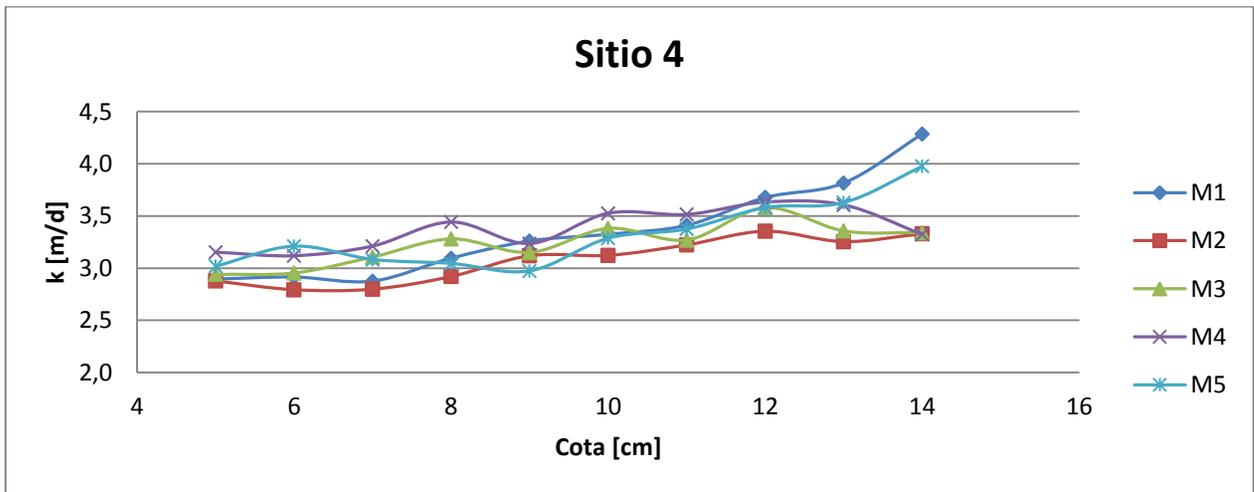


Figura C-21: Resultados Sitio 4. Anillos de 30 y 60 [cm].
Fuente: Elaboración propia.



Figura C-22: Suelo Sitio 4.
Fuente: Campaña de Infiltración.

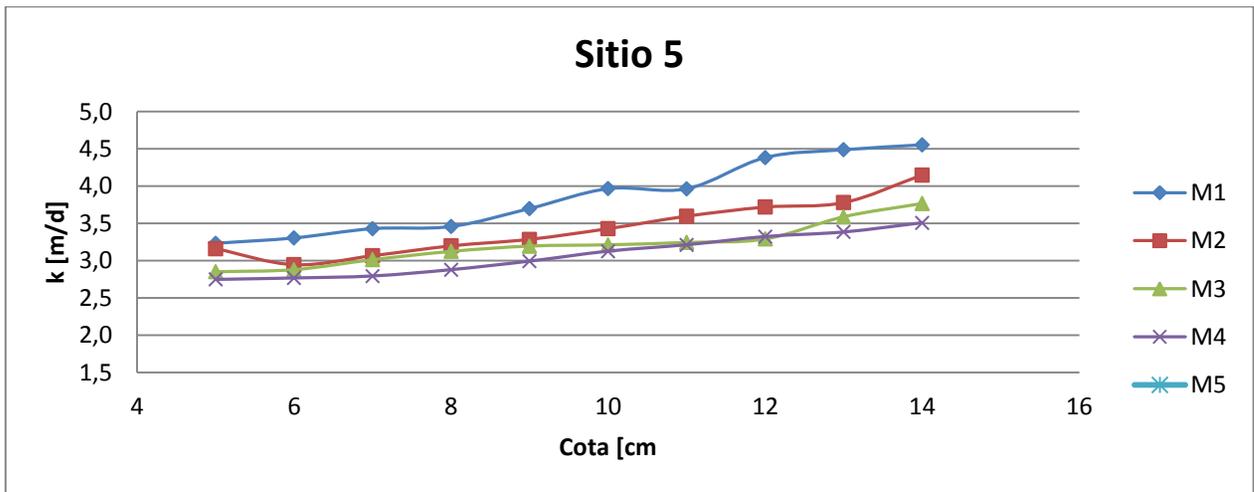


Figura C-23: Resultados Sitio 5. Anillos de 15 y 30 [cm].
Fuente: Elaboración propia.



Figura C-24: Suelo Sitio 5.
Fuente: Campaña de Infiltración.

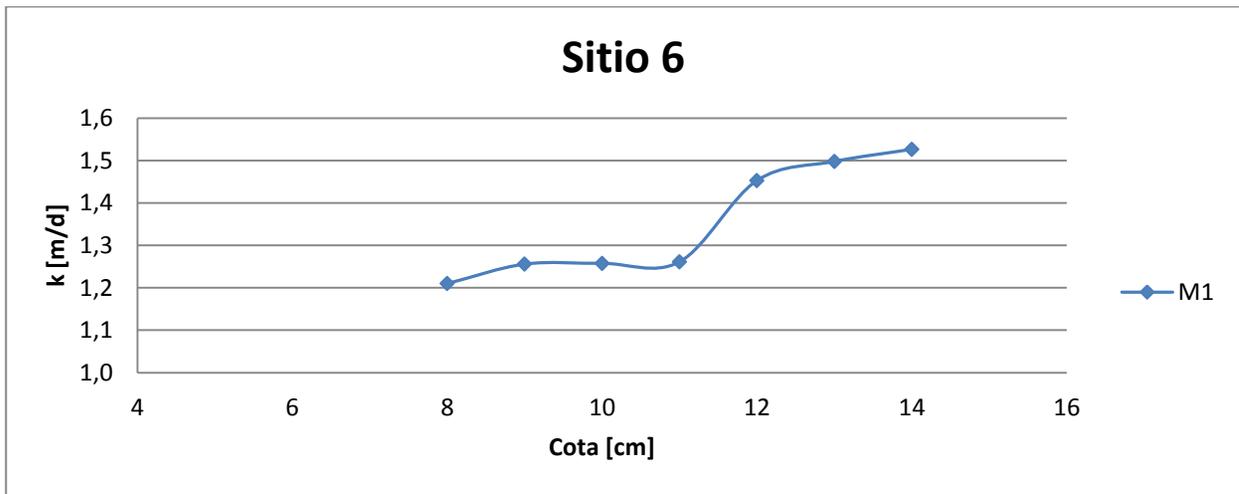


Figura C-25: Resultados Sitio 6. Anillos de 15 y 30 [cm].
Fuente: Elaboración propia.



Figura C-26: Suelo Sitio 6.
Fuente: Campaña de Infiltración.

Finalmente en la Figura C-27 se resumen los resultados obtenidos en los 6 sitios de medición.

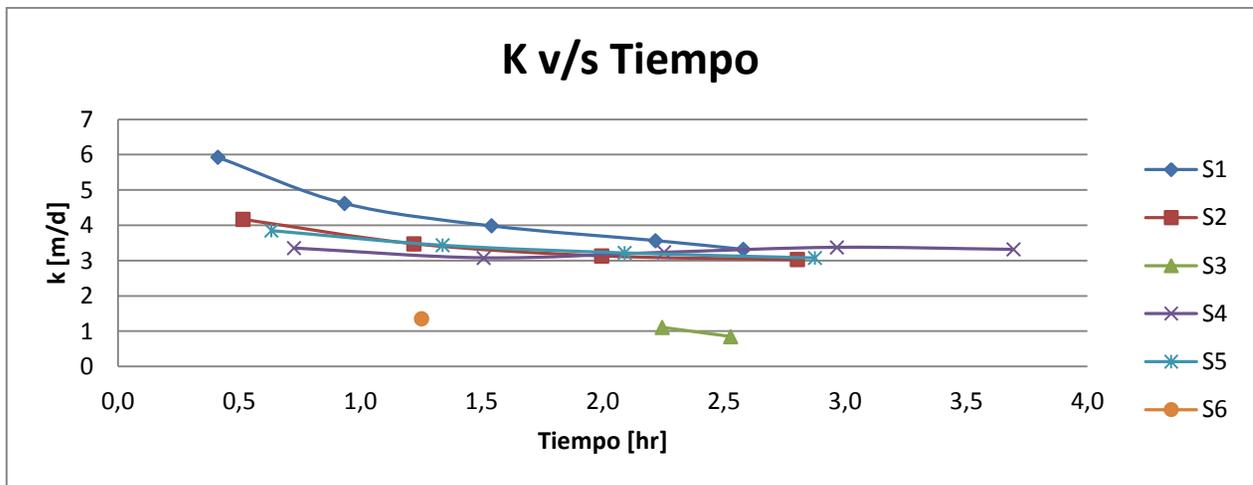


Figura C-27: Resumen tasas de infiltración.
Fuente: Elaboración propia.

Los sistemas de infiltración por laguna en general utilizan una capa de arena que actúa como filtro, por este motivo para calcular la tasa de infiltración promedio se descartaron los sitios 3 y 6 ya que correspondían a terreno compactado en el primer caso, y terreno con láminas de suelo fino en el segundo. La tasa de infiltración última promedio en los 4 sitios restantes fue de 3,18 [m/d].

La tasa de infiltración obtenida de esta forma no representa la conductividad hidráulica de largo plazo esperada en un sistema de infiltración superficial. Esto se debe principalmente a que no se considera el fenómeno de la colmatación y además la infiltración horizontal no es del todo reducida. En la bibliografía existen recomendaciones sobre qué porcentaje de reducción aplicar para estimar la infiltración de largo plazo. En este caso se consideró que un 15% de la conductividad obtenida en terreno sería representativa (Hofkes & Visscher, 1986), obteniéndose una tasa de infiltración para el largo plazo de 0,48 [m/d].

C.4.5 Conclusiones

La experiencia fue satisfactoria en el sentido de que se logró determinar la conductividad hidráulica de las terrazas fluviales adyacentes al lecho del río. Los resultados obtenidos son consistentes al ser comparados con valores obtenidos en la bibliografía para suelos de arena fina. La evolución de la infiltración en el tiempo se mostró acorde a lo que dice la teoría según la Figura C-13.

La elección de la alternativa fue la correcta debido a su simplicidad de implementar en terreno, sin embargo se recomienda utilizar la configuración de anillos de 15 y 30 [cm] de diámetro si el objetivo es estimar la infiltración para recarga artificial. Sin bien con anillos de mayor diámetro el resultado es más preciso al disminuir el porcentaje de agua que se infiltra lateralmente, éste aumento en la precisión pierde sentido al no considerar la colmatación. Por otro lado el aumento en el requerimiento de agua es considerable y cobra especial cuidado cuando no se tiene una fuente de abastecimiento cercana.

ANEXO D: LITOLOGÍA VALLE DE AZAPA

D.1 PERFILES JICA

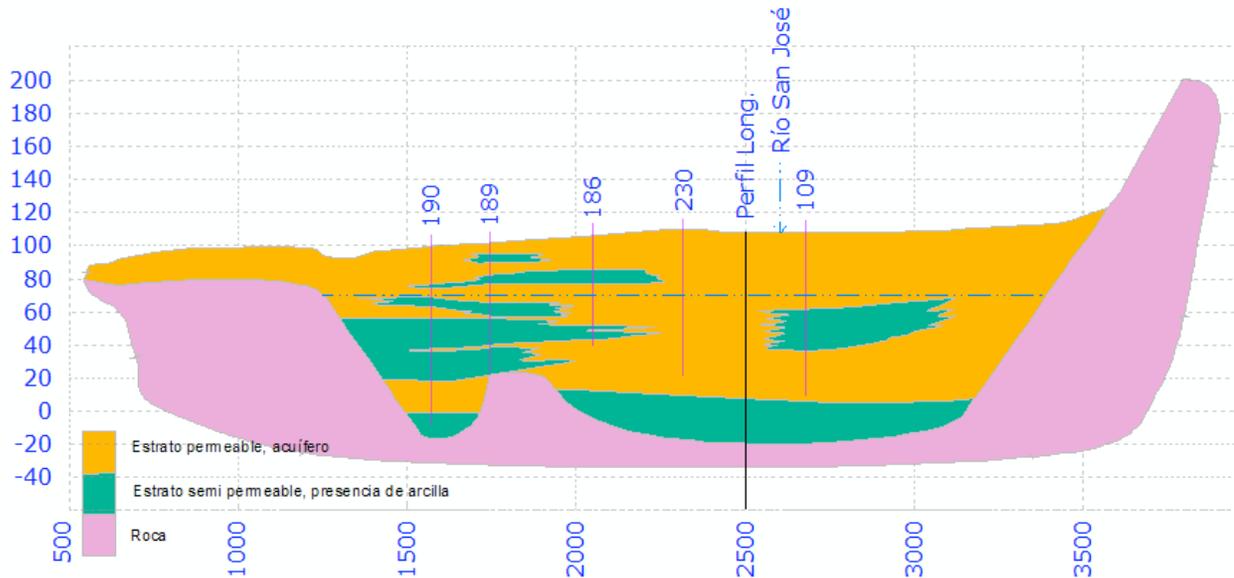


Figura D-1: Perfil transversal 1.
Fuente: AC Ingenieros, 2010, modificado de JICA, 1995.

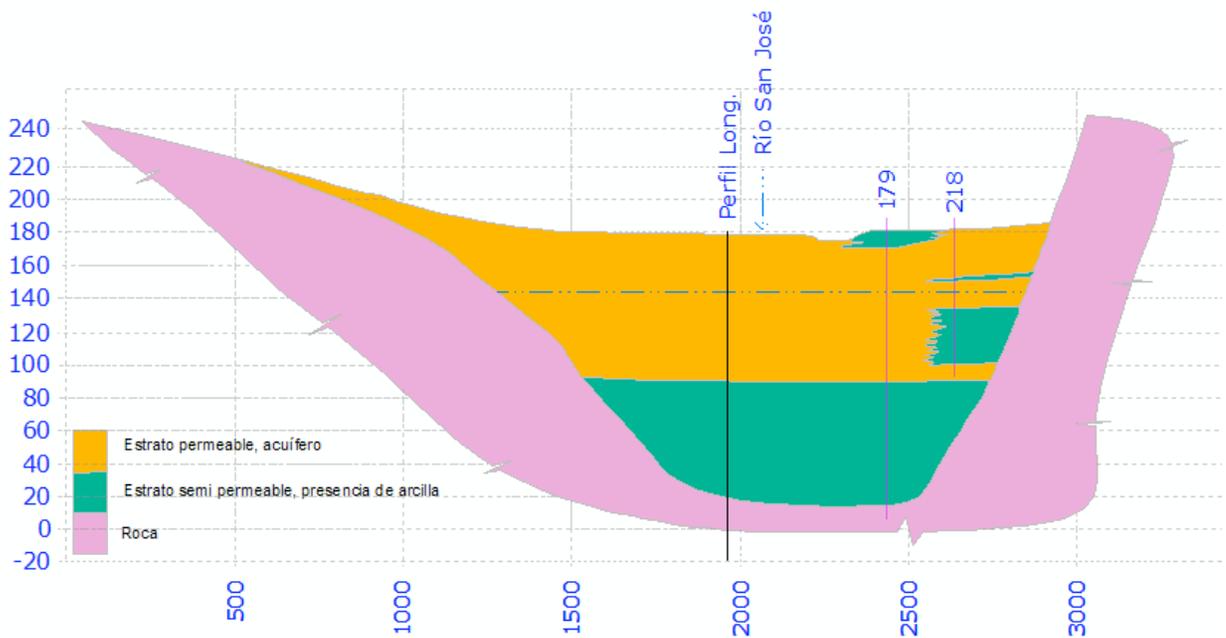


Figura D-2: Perfil transversal 2.
Fuente: AC Ingenieros, 2010, modificado de JICA, 1995.

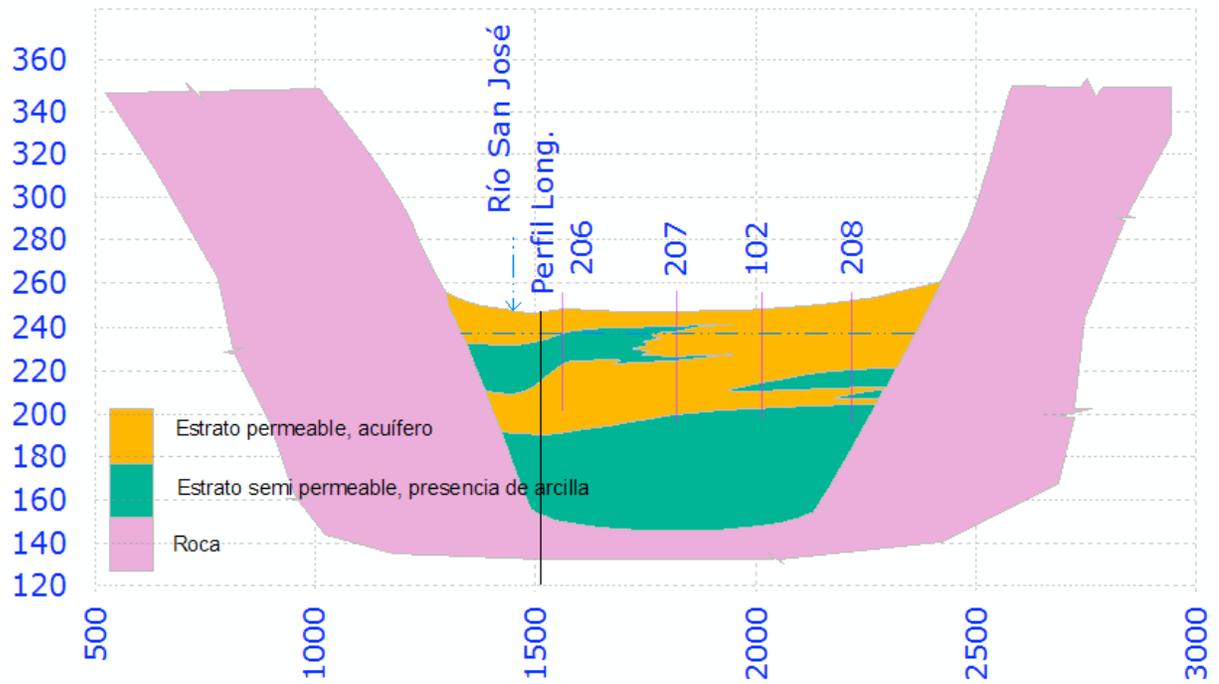


Figura D-3: Perfil transversal 3.
 Fuente: AC Ingenieros, 2010, modificado de JICA, 1995.

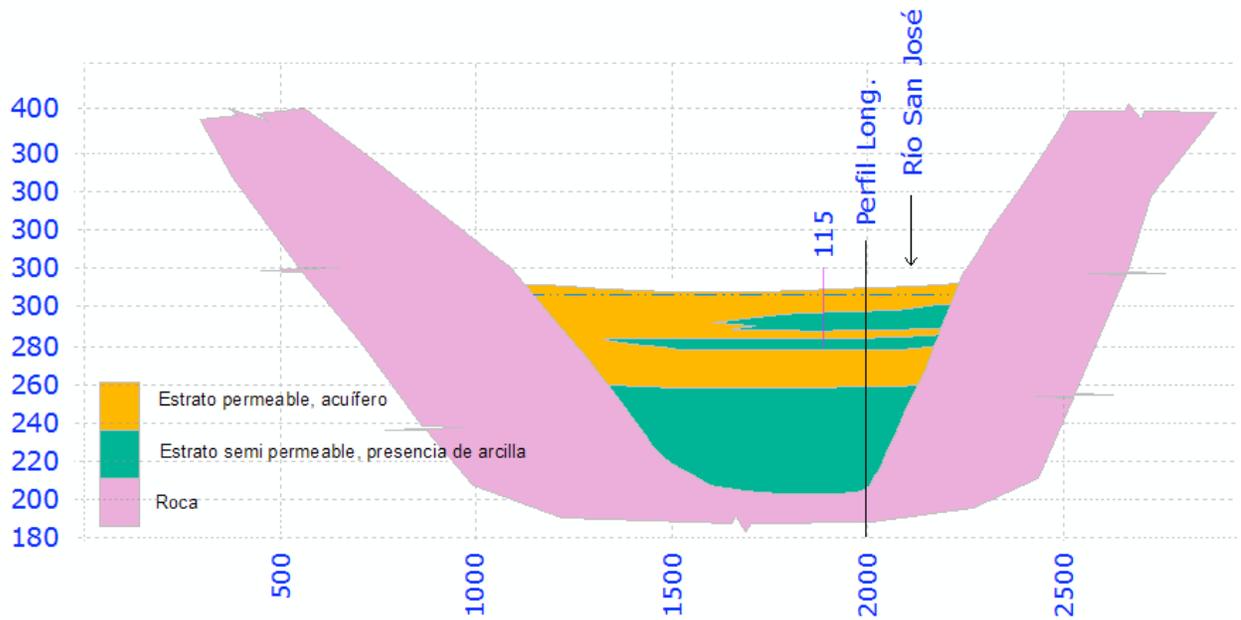


Figura D-4: Perfil transversal 4.
 Fuente: AC Ingenieros, 2010, modificado de JICA, 1995.

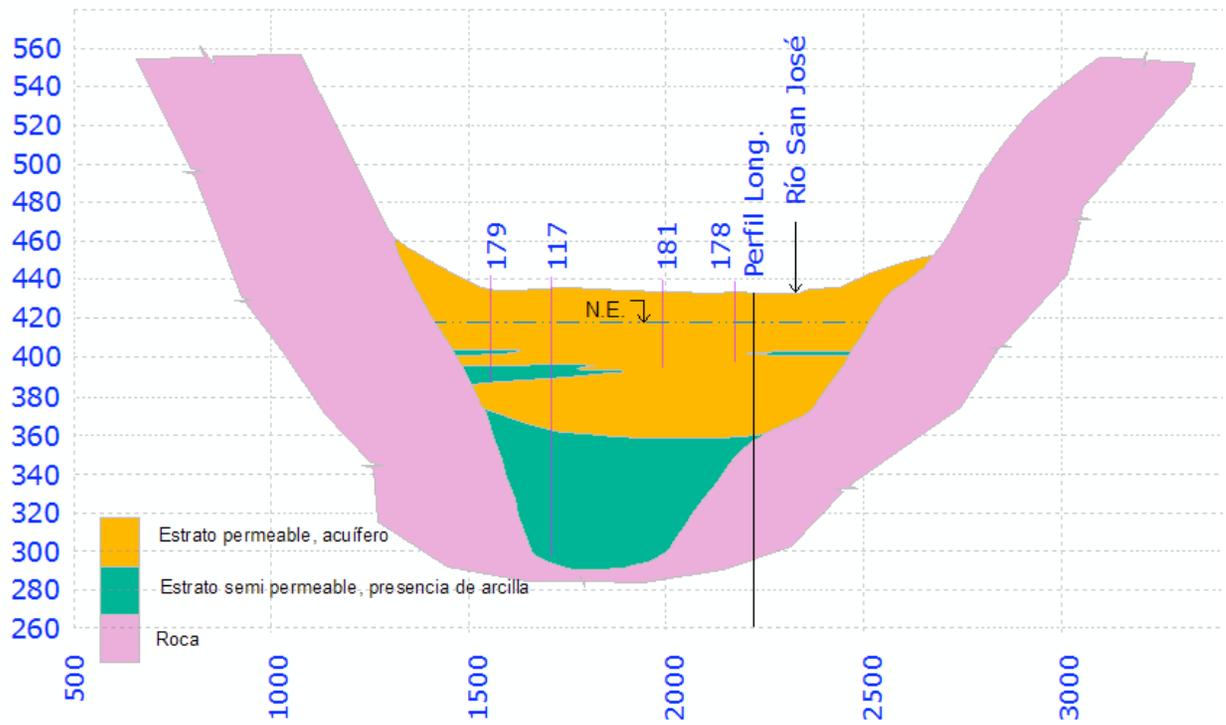


Figura D-5: Perfil transversal 5
 Fuente: AC Ingenieros, 2010, modificado de JICA, 1995.

D.2 PERFILES TEM

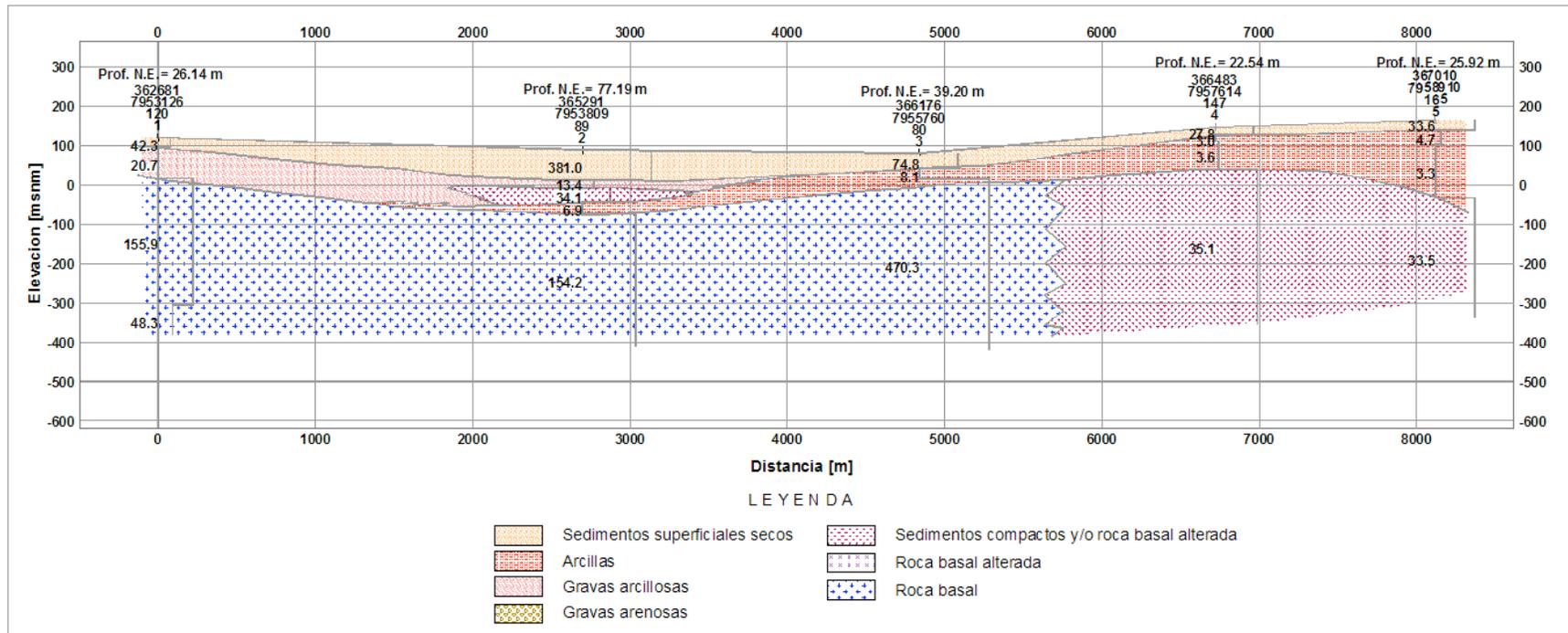


Figura D-6: Perfil TEM 1.
Fuente: AC Ingenieros, 2010.

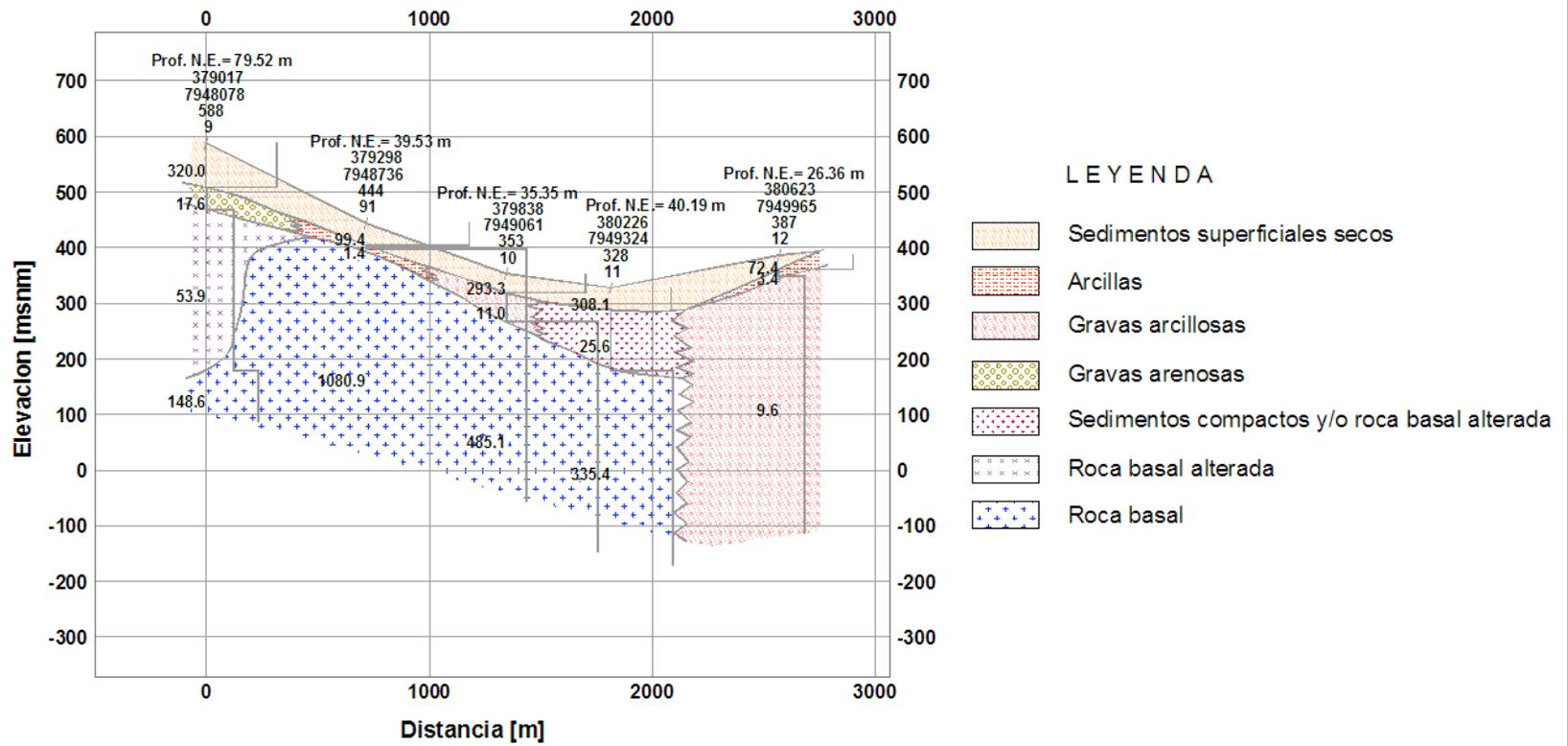


Figura D-7: Perfil TEM 2.
Fuente: AC Ingenieros, 2010.

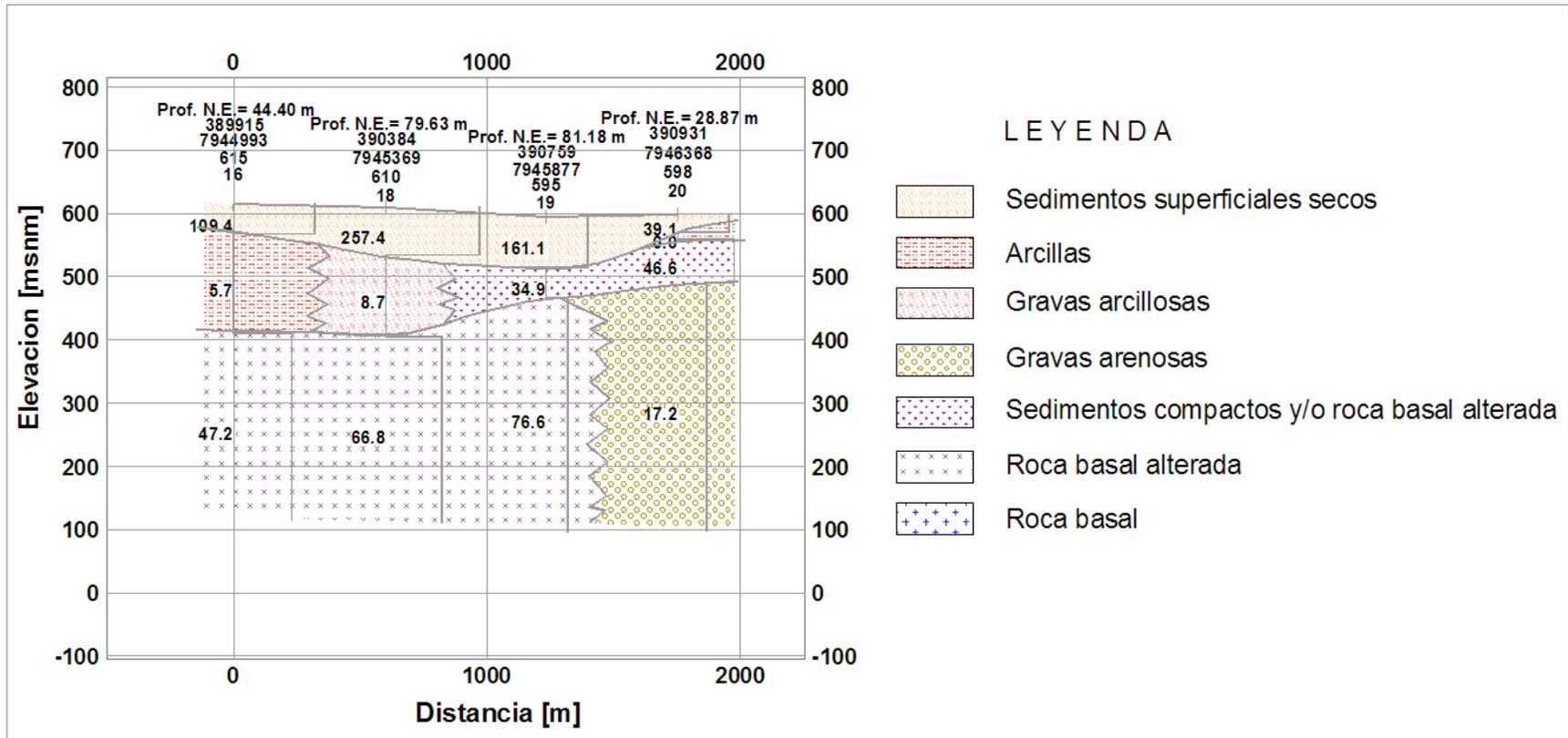


Figura D-8: Perfil TEM 3.
Fuente: AC Ingenieros, 2010.