

**GOBIERNO DE CHILE**  
**MINISTERIO DE AGRICULTURA**  
**COMISIÓN NACIONAL DE RIEGO**

**DIAGNÓSTICO DE FUENTES DE AGUA NO  
CONVENCIONALES EN EL REGADÍO INTER-REGIONAL**

**INFORME FINAL**

**TOMO I**

**REALIZADO POR**

**DEPARTAMENTO DE RECURSOS HÍDRICOS**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA**  
**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN**

**ENERO DE 2010**

# DIAGNÓSTICO DE FUENTES DE AGUA NO CONVENCIONALES EN EL REGADÍO INTER- REGIONAL

## Informe Final

### Resumen

El presente documento corresponde al Informe Final, del estudio “Diagnóstico de Fuentes de Agua No Convencionales en el Regadío Inter-Regional” Licitado por la Comisión Nacional de Riego (CNR) y ejecutado por el Departamento de Recursos Hídricos de la Universidad de Concepción. El objetivo general del estudio es analizar las distintas fuentes de agua no convencionales entre las regiones de Arica-Parinacota y del Bío-Bío, de tal forma que fuese posible realizar perfiles avanzados de proyecto que incorporen este tipo de fuentes. Los objetivos específicos considerados fueron: (1) Proyectar la oferta y la demanda de los recursos hídricos para los próximos 10 años y determinar la utilización relativa de los distintos sectores usuarios (riego, minería, sanitaria, industria, etc.); (2) Identificar y catastrar fuentes de agua no convencionales para las cuencas en estudio.; (3) Realizar un análisis de metodologías para la utilización de estas fuentes de agua no convencionales para el riego agrícola; (4) Realizar una cartera de, a lo menos, 30 perfiles avanzados de proyectos de riego, en las cuencas priorizadas en estudio, tal que utilicen una proporción de aguas no convencionales (aguas tratadas, canjes de agua entre mineras, agricultura y sanitarias, recarga artificial de acuíferos); (5) Realizar 4 pre-diseños de proyectos, incluyendo análisis de costos y propuestas de solución a los problemas legales, para materializar dichas inversiones. Los alcances del presente Estudio corresponden a un análisis de fuentes secundarias de información y la recolección de antecedentes en terreno. Por ello, la metodología usada para la elaboración de este documento consistió en una recopilación exhaustiva de información existente, selección de publicaciones relevantes, análisis y condensación de la información y consolidación de la información para la determinación del déficit hídrico. Ello

permitió realizar un análisis del déficit hídrico que presentan cada una de las cuencas consideradas en el Estudio, tomando en cuenta la oferta existente y la demanda por rubro, para cada cuenca. A partir de ello y de un trabajo en conjunto con la contraparte Técnica (CNR), se definieron las cuencas de a ser consideradas en la siguiente etapa del Estudio. Esta etapa consistió en la identificación y catastro de las Fuentes de agua no convencionales de cada cuenca. En dos campañas de terreno realizadas, se identificaron los actores relevantes y se recabó la opinión de los agricultores frente a la utilización de Fuentes de aguas no convencionales para riego agrícola. Obtenida toda la información disponible, para la caracterización de estas Fuentes y la definición de los potenciales beneficiarios, se procedió a la formulación de 30 perfiles de proyectos de riego para la utilización de estas aguas. Considerando que en algunos casos, era necesario aplicar Trenes de Tratamiento para el cumplimiento de la normativa de riego agrícola, se realizó una revisión exhaustiva en la literatura y el mercado, sobre metodologías de aprovechamiento de esta Fuentes de agua. A partir de todos los antecedentes recabados, se determinó que las alternativas de FNC que más se adaptan a la realidad de nuestro país para su utilización en riego agrícola, en orden prioritario, son: Aguas servidas tratadas y aguas residuales de la Agroindustria, Recarga artificial de acuíferos, Mezcla de aguas, Atrapanieblas, Cosecha de lluvia, Estimulación en la producción de lluvias y Desalinización de agua. Mediante la aplicación de una metodología de priorización, se determinaron los cuatro perfiles de proyecto, a los cuales se les realizó los pre-diseños de proyecto para su utilización en riego agrícola. Los criterios cuantificables considerados para la calificación y priorización de los perfiles de proyectos fueron: Número de Beneficiarios, Beneficio social de la inversión, Interés del beneficiario, Interés de la Fuente, Costo del proyecto por hectárea, Financiamiento Estatal, Factores Ambientales, Nivel de tecnificación, Eficiencia de Riego del proyecto y Factibilidad Técnica. Los pre-diseños de proyectos realizados corresponden a: Usos de aguas servidas tratadas de la empresa Agrícola Súper y recarga de acuífero (Cuenca Estero Yali, RM); Riego en invernaderos con aguas captadas por atrapanieblas (Comunidad Agrícola de Peña Blanca, IV región); Riego agrícola con

aguas tratadas de PTAs de la empresa ESVAL (Catemu, V región); y Riego agrícola con aguas tratadas de PTAs de la empresa Aguas ANDINAS (Melipilla, RM). Las conclusiones obtenidas en el presente Estudio, tienen relación con: (1) La situación actual y proyectada de la deficiencia hídrica que presentan las cuencas en estudio, como a su vez, los motivos que generan este déficit; (2) Una definición de las aguas consideradas como No Convencionales; (3) La propiedad de las aguas no convencionales; (4) Se plantea la discrepancia entre los niveles máximos permitidos de algunos parámetros de calidad de agua exigidos por el DS 90 y los permitidos por la NCh 1.333 para el uso de agua en riego; (5) Las metodologías de aprovechamiento de las aguas no convencionales que más se adaptan a las condiciones de Chile; (6) Las líneas de financiamiento que permitiría el aprovechamiento de estas aguas en la agricultura. Por último, el Consultor basado en todos los antecedentes y resultados obtenidos en el presente Estudio, sugiere las líneas de acción que la Comisión Nacional de Riego debería seguir, para aumentar la oferta de los recursos hídricos de las cuencas en estudio.

# **INDICE GENERAL**

## **DIAGNÓSTICO DE FUENTES DE AGUA NO CONVENCIONALES EN EL REGADÍO INTER- REGIONAL**

Informe Final

### **TOMO I**

		<b><u>Pág.</u></b>
<b>Capítulo I</b>	<b>ANTECEDENTES DEL ESTUDIO</b>	<b>1</b>
1	Introducción	1
2	Política General dentro de la cual se enmarca el Estudio	1
3	Objetivo General	2
4	Objetivos Específicos	2
<b>Capítulo II</b>	<b>IDENTIFICACION DE CUENCAS DEFICITARIAS</b>	<b>3</b>
1	Introducción	3
2	Definición de las cuencas en estudio	3
3	Demanda del recurso hídrico	10
3.1	Definición de usos de agua	10
3.1.1	Agropecuario y Forestal	10
3.1.2	Agua Potable	10
3.1.3	Industria	11
3.1.4	Minera	11
3.1.5	Receptor Contaminantes	11
3.1.6	Caudal Ecológico	12
3.1.7	Energía	12
3.1.8	Acuícola	12
3.1.9	Turismo	12
3.2	Demandas de agua por subcuenca	12
3.3	Otros antecedentes sobre el uso de agua	17

## Continuación Índice General...

<b>4</b>	<b>Oferta actual y futura del recurso hídrico</b>	<b>17</b>
4.1	Oferta de agua en Chile	17
4.1.1	Antecedentes Generales	17
4.1.2	Estimación de oferta	22
4.2	Aguas subterráneas	25
4.2.1	Antecedentes sobre acuíferos	25
4.2.2	Recarga de aguas subterráneas	27
4.3	Efecto de nuevos proyectos de riego	28
4.4	Conclusiones	29
<b>5</b>	<b>Determinación del déficit hídrico</b>	<b>30</b>
5.1	Análisis de antecedentes	30
5.1.1	Áreas de prohibición o restricción	30
5.1.2	Zonas de escasez	32
5.2	Comparación de oferta y demanda	33
5.3	Análisis de sensibilidad	36
<b>Capítulo III</b>	<b>ANÁLISIS DE CUENCAS DEFICITARIAS</b>	<b>40</b>
<b>1</b>	<b>Introducción</b>	<b>40</b>
<b>2</b>	<b>Evaluación de la demanda actual y futura del recurso hídrico</b>	<b>41</b>
2.1	Actores Relevantes	41
2.2	Demanda asociada a exigencias ambientales	41
2.3	Demanda futura con una proyección a 10 años	43
<b>3</b>	<b>Evaluación de la oferta actual y futura del recurso hídrico</b>	<b>45</b>
3.1	Recursos de agua existentes para fuentes convencionales	45
3.1.1	Río LLuta	46

## Continuación Índice General...

3.1.2	Río San José	51
3.1.3	Quebrada Vitor	55
3.1.4	Río Camarones	59
3.1.5	Quebrada de Camiña	61
3.1.6	Sector Chiu-Chiu	62
3.1.7	Sector San Pedro	68
3.1.8	Río Copiapó	70
3.1.9	Quebrada Totoral y cuencas costeras hasta Carrizal	76
3.1.10	Río Huasco	79
3.1.11	Río Elqui	83
3.1.12	Río Limarí	88
3.1.13	Río Petorca	92
3.1.14	Río Ligua	97
3.1.15	Río Aconcagua	101
3.1.16	Sector Casablanca	105
3.1.17	Río Maipo (Tercera Sección)	109
3.1.18	Estero Yali	114
3.1.19	Río Perquilauquén	116
3.2	Obtención de la oferta futura, proyección a 10 años	120
3.2.1	Efecto de nuevos proyectos de riego	120
3.2.2	Variabilidad climática	121
3.2.3	Glaciares	126
3.3	Conclusión general	131
<b>Capítulo IV</b>	<b>IDENTIFICACION DE METODOLOGIAS PARA EL APROVECHAMIENTO DE FUENTES NO CONVENCIONALES A NIVEL NACIONAL E INTERNACIONAL</b>	<b>133</b>
<b>1</b>	<b>Introducción</b>	<b>133</b>
1.1	Metodologías de análisis	138
<b>2</b>	<b>Trenes de Tratamiento</b>	<b>140</b>
<b>3</b>	<b>Fuentes no convencionales</b>	<b>141</b>
3.1.	Aguas Claras de Relaves	142
3.1.1	Descripción de la fuente y procesos o mecanismos de aprovechamiento	142
3.1.2	Aspectos técnicos y económicos	143
3.1.3	Aspectos ambientales	144
3.1.4	Aspectos legales	145
3.1.5	Experiencia nacional e internacional	146

## Continuación Índice General...

3.2	Aguas Servidas Tratadas y Aguas Residuales de la Agroindustria	148
3.2.1	Descripción de la fuente y procesos o mecanismos de aprovechamiento	148
3.2.2	Aspectos técnicos y económicos	150
3.2.3	Aspectos ambientales	151
3.2.4	Aspectos legales	152
3.2.5	Experiencia nacional e internacional	153
3.3	Desalinización de Agua	154
3.3.1	Descripción de la fuente y procesos o mecanismos de aprovechamiento	154
3.3.2	Aspectos técnicos y económicos	155
3.3.3	Aspectos ambientales	157
3.3.4	Aspectos legales	157
3.3.5	Experiencia nacional e internacional	157
3.4	Cosecha de Lluvia	159
3.4.1	Descripción de la fuente y procesos o mecanismos de aprovechamiento	159
3.4.2	Aspectos técnicos y económicos	161
3.4.3	Aspectos ambientales	163
3.4.4	Aspectos legales	163
3.4.5	Experiencia nacional e internacional	164
3.5	Estimulación en la producción de lluvias	165
3.5.1	Descripción de la fuente y procesos o mecanismos de aprovechamiento	165
3.5.2	Aspectos técnicos y económicos	165
3.5.3	Aspectos ambientales	167
3.5.4	Aspectos legales	168
3.5.5	Experiencia nacional e internacional	168
3.6	Atrapanieblas	169
3.6.1	Países donde se practica esta técnica	169
3.6.2	Condiciones atmosféricas que producen el fenómeno	171
3.6.3	Inversiones y rendimientos de producción de agua	172
3.7	Recarga artificial de acuíferos	173

## Continuación Índice General...

	3.7.1	Introducción	173
	3.7.2	Objetivos de la recarga artificial de acuíferos	174
	3.7.3	Consideraciones sobre la recarga artificial de acuíferos	174
	3.7.4	Estrategias de recarga artificial de acuíferos	175
	3.7.5	Ventajas y desventajas en la recarga artificial de acuíferos	179
	3.7.6	Aspecto legal	181
	3.7.7	Experiencia Nacional	181
	3.7.8	Conclusiones	181
<b>4</b>		<b>Conclusiones</b>	<b>182</b>
<b>5</b>		<b>Priorización de alternativas que más se adaptan a la realidad de nuestro país</b>	<b>184</b>

## TOMO II

<b>Capítulo V</b>		<b>CATASTRO POR CUENCA DE LAS FUENTES DE AGUA NO CONVENCIONALES</b>	<b>187</b>
	<b>1</b>	<b>Introducción</b>	<b>187</b>
	<b>2</b>	<b>Catastro de fuentes de agua no convencionales</b>	<b>187</b>
	<b>3</b>	<b>Análisis de las fuentes de agua no convencionales catastradas</b>	<b>203</b>
	3.1	Análisis legal sobre la propiedad de los derechos de agua sobre fuentes no convencionales	203
	3.1.1	Aguas Claras de Relaves	205
	3.1.2	Aguas Servidas Tratadas y Aguas Residuales de la Agroindustria	205
	3.1.3	Desalinización de agua	208
	3.1.4	Cosecha de Lluvia	208
	3.1.5	Estimulación en la Producción de Lluvia	210
	3.1.6	Atrapanieblas	210
	3.1.7	Recarga Artificial de Acuífero	210
	3.2	Análisis sobre normativa de calidad de agua	212
	3.3	Análisis Técnico a Eventuales Tratamientos Requeridos para cada Fuente que exceda la NCh 1.333	214

## Continuación Índice General...

	3.4	Modelo de negocio para cada Fuente	215
	3.4.1	Planta de Tratamiento de Aguas Servidas	216
	3.4.2	Agroindustria	221
	3.4.3	Atrapaniebla	226
	4	<b>Construcción de perfiles de proyectos de aprovechamiento de fuentes de agua no convencionales</b>	<b>227</b>
	5	<b>Priorización de los perfiles de proyectos de aprovechamiento de fuentes de agua no convencionales</b>	<b>245</b>
<b>Capítulo VI</b>		<b>PREDISEÑO DE PROYECTOS PRIORIZADOS DE APROVECHAMIENTO DE FUENTES DE AGUA NO CONVENCIONALES</b>	<b>250</b>
	1	<b>Introducción</b>	<b>250</b>
	2	<b>Uso de aguas servidas tratadas de la empresa Agrícola Súper y recarga de acuífero (Cuenca Estero Yali)</b>	<b>251</b>
	2.1	Descripción básica del proyecto	251
	2.2	Descripción de obras.	254
	2.3	Planos	254
	2.4	Análisis preliminar de expropiaciones y/o servidumbres	254
	2.5	Presupuestos	255
	2.6	Evaluación técnica del proyecto con otras FC.	256
	2.7	Evaluación económica	258
	2.8	Evaluación ambiental	260
	2.9	Evaluación legal	263
	2.10	Análisis del impacto agroproductivo, legal y económico.	270

## Continuación Índice General...

<b>3</b>	<b>Riego en invernaderos con agua captada por atrapanieblas (Comunidad Agrícola Peña Blanca)</b>	<b>272</b>
3.1	Descripción Básica del Proyecto.	272
3.2	Descripción de obras	274
3.3	Planos.	275
3.4	Análisis preliminar de expropiaciones y/o servidumbres.	275
3.5	Presupuestos.	275
3.6	Evaluación técnica del proyecto con otras FC.	276
3.7	Evaluación económica.	276
3.8	Evaluación ambiental.	278
3.9	Evaluación legal.	281
3.10	Análisis del impacto agroproductivo, legal y económico.	284
<b>4</b>	<b>Riego agrícola con aguas tratadas de PTAs ESVAL (Catemu Cuenca del Río Aconcagua)</b>	<b>285</b>
4.1	Descripción básica del proyecto	285
4.2	Descripción de las obras	286
4.3	Planos	287
4.4	Análisis preliminar de expropiaciones y/o servidumbres	288
4.5	Presupuestos	289
4.6	Evaluación técnica del proyecto con otras FC	290
4.7	Evaluación económica	291
4.8	Evaluación ambiental	293
4.9	Evaluación legal	295
4.10	Análisis del impacto agroproductivo, legal y económico	301

## Continuación Índice General...

<b>5</b>	<b>Riego agrícola con aguas tratadas de PTAs Aguas Andinas (Melipilla)</b>	<b>303</b>
5.1	Descripción Básica del Proyecto.	303
5.2	Descripción de las obras	305
5.3	Planos.	305
5.4	Análisis preliminar de expropiaciones y/o servidumbres	306
5.5	Presupuestos.	306
5.6	Evaluación técnica del proyecto con otras FC	307
5.7	Evaluación económica.	308
5.8	Evaluación ambiental.	309
5.9	Evaluación legal.	311
5.10	Análisis del impacto agroproductivo, legal y económico.	317
<b>Capítulo VII</b>	<b>Discusión y Conclusiones Generales</b>	<b>319</b>
	<b>Bibliografía</b>	<b>326</b>

# **INDICE DE FIGURAS**

## **DIAGNÓSTICO DE FUENTES DE AGUA NO CONVENCIONALES EN EL REGADÌO INTER- REGIONAL**

Informe Final

<b><u>Figura</u></b>		<b><u>Pág.</u></b>
1	Clasificación de cuencas según BNA correspondiente a las Regiones de Arica-Parinacota y Tarapacá.	4
2	Clasificación de cuencas según BNA correspondiente a la Región de Antofagasta.	5
3	Clasificación de cuencas según BNA correspondiente a la Región de Atacama.	6
4	Clasificación de cuencas según BNA correspondiente a la Región de Coquimbo.	7
5	Clasificación de cuencas según BNA correspondiente a las Regiones de Valparaíso, Metropolitana y O'Higgins.	8
6	Clasificación de cuencas según BNA correspondiente a las Regiones del Maule y Biobío Norte.	9
7	Situación sinóptica típica del cono Sur de América (Fuente: Dirección Meteorológica de Chile).	18
8	Variación de la precipitación en Chile de acuerdo a la Latitud.	19
9	Variación de los caudales en Chile de acuerdo a la Latitud (Salazar, 2003).	20
10	Disponibilidad de agua por habitante (Fuente: Salazar, 2003).	21
11	Distribución de formaciones acuíferas en Chile (adaptado de Figueroa, 2004).	26
12	Disponibilidad y demanda de aguas subterráneas (Fuente: Salazar, 2003).	28

## **Continuación Índice Figuras...**

13	Cuenca del Río Lluta	<b>49</b>
14	Caudales mensuales medidos en la estación fluviométrica Río Luta en Alcérreca (DGA, 2004)	<b>50</b>
15	Ocurrencia de aguas subterráneas en la cuenca del río Lluta	<b>50</b>
16	Cuenca del río San José	<b>54</b>
17	Ocurrencia de aguas subterráneas en la cuenca del río San José	<b>54</b>
18	Cuencas de las quebradas Vitor, Camarones y Camiña	<b>58</b>
19	Ocurrencia de aguas subterráneas en las cuencas de las quebradas de Vitor, Camarones y Camiña	<b>58</b>
20	Cuenca hidrográfica sector Chiu-Chiu	<b>66</b>
21	Curva de Variación Estacional Río Loa antes represa Lequeña (DGA, 2004)	<b>66</b>
22	Curva de Variación Estacional Río Salado en sifón de Ayquina (DGA, 2004)	<b>67</b>
23	Ocurrencia de aguas subterráneas en las cuencas de los sectores de Chiu-Chiu y San Pedro de Atacama	<b>67</b>
24	Cuenca hidrográfica sector San Pedro	<b>70</b>
25	Cuenca hidrográfica Río Copiapó	<b>74</b>
26	Curva de Variación Estacional en Río Copiapó en Pastillo (DGA, 2004)	<b>75</b>
27	Ocurrencia de aguas subterráneas en la cuenca del Río Copiapó	<b>75</b>
28	Cuencas hidrográficas Costeras entre las Quebradas del Totoral y Carrizal	<b>78</b>

## **Continuación Índice Figuras...**

29	Ocurrencia de aguas subterráneas entre las Quebradas del Totoral y Carrizal	<b>78</b>
30	Cuenca hidrográfica del Río Huasco	<b>82</b>
31	Curva de Variación Estacional en Río Huasco en Algodones (DGA, 2004)	<b>82</b>
32	Ocurrencia de aguas subterráneas en la cuenca del río Huasco	<b>83</b>
33	Cuenca hidrográfica del río Elqui	<b>86</b>
34	Curva de Variación Estacional en Río Elqui en Algarrobal (DGA, 2004)	<b>87</b>
35	Ocurrencia de aguas subterráneas en la cuenca del río Elqui	<b>87</b>
36	Cuenca hidrográfica del Río Limarí	<b>91</b>
37	Curva de Variación Estacional en Río Limarí en Panamericana (DGA, 2004)	<b>91</b>
38	Ocurrencia de aguas subterráneas en la cuenca del Río Limarí	<b>92</b>
39	Cuencas hidrográficas de los ríos Petorca y Ligua	<b>95</b>
40	Curva de Variación Estacional en Río Petorca en Hierro Viejo (DGA, 2004)	<b>96</b>
41	Ocurrencia de aguas subterráneas en las cuencas de los ríos Petorca y Ligua	<b>96</b>
42	Curva de Variación Estacional en Río Alicahue en Colliguay (DGA, 2004)	<b>100</b>
43	Curva de Variación Estacional en Río La Ligua en Quinquimo (DGA, 2004)	<b>100</b>
44	Cuenca hidrográfica del Río Aconcagua	<b>104</b>

## **Continuación Índice Figuras...**

45	Curva de Variación Estacional en Río Aconcagua en Chacabuquito (DGA, 2004)	<b>104</b>
46	Ocurrencia de aguas subterráneas en la cuenca del Río Aconcagua	<b>105</b>
47	Cuenca hidrográfica del estero Casablanca	<b>108</b>
48	Ocurrencia de aguas subterráneas en la cuenca del estero Casablanca	<b>108</b>
49	Cuencas hidrográficas del Río Maipo y Estero Yali	<b>112</b>
50	Curva de Variación Estacional en Río Maipo en el Manzano (DGA, 2004)	<b>112</b>
51	Curva de Variación Estacional en Río Maipo en Cabimbao (DGA, 2004)	<b>113</b>
52	Ocurrencia de aguas subterráneas en las cuencas del Río Maipo y estero Yali	<b>113</b>
53	Cuenca hidrográfica del Río Perquillauquén	<b>118</b>
54	Curva de Variación Estacional en Río Perquillauquén en Ñiquén (DGA, 2004)	<b>119</b>
55	Ocurrencia de aguas subterráneas en la cuenca del Río Perquillauquén	<b>119</b>
56	Ubicaciones de estaciones de referencia y cobertura de glaciares	<b>129</b>
57	Ubicaciones de estaciones de referencia y cobertura de glaciares	<b>129</b>
58	Ubicaciones de estaciones de referencia y cobertura de glaciares	<b>130</b>
59	Utilización de agua en la minería (Fuente: COCHILCO, 2008)	<b>143</b>
60	Vista aérea PTAs "El Trebal". (Fuente: Aguas Andinas)	<b>150</b>
61	Esquema de planta desaladora de Ashkelon, Israel	<b>155</b>

## **Continuación Índice Figuras...**

62	Esquema de métodos para estimulación de lluvias	<b>167</b>
63	Esquema conceptual de Torre de Niebla	<b>171</b>
64	Esquema de un sistema RAA usando serpenteo y represas	<b>176</b>
65	Vista aérea de un sistema RAA usando serpenteo y represas	<b>176</b>
66	Esquema de posibles modificaciones del cauce de un río para inducir la RAA	<b>177</b>
67	Canales realizados en un suelo arenosos para inducir RAA	<b>178</b>
68	Esquema de la RAA usando pozos de inyección	<b>179</b>
69	Cuenca del Río San José y FNC catastrada	<b>189</b>
70	Cuencas de Quebrada Vitor, Río Camarones y Quebrada de Camiña	<b>190</b>
71	Pozo Almonte y FNC identificada	<b>191</b>
72	Cuenca sector de Chiu-Chiu	<b>192</b>
73	Cuenca sector de San Pedro de Atacama y FNC catastrada	<b>193</b>
74	Cuenca Río Copiapó y FNC catastradas	<b>194</b>
75	Cuenca Quebrada Totoral y cuencas costeras hasta Carrizal	<b>195</b>
76	Cuenca Río Huasco y FNC catastrada	<b>196</b>
77	Cuenca Río Elqui y FNC catastradas	<b>197</b>
78	Cuenca Río Limarí y FNC catastradas	<b>198</b>

## **Continuación Índice Figuras...**

79	Cuenca Río Petorca , Río Ligua y FNC catastrada	<b>199</b>
80	Cuenca Río Aconcagua y FNC catastradas	<b>200</b>
81	Cuenca sector Casablanca y FNC catastradas	<b>201</b>
82	Sector Maipo Bajo, Estero Yali y FNC catastradas	<b>202</b>
83	Fundo Rinconada de Longovilo	<b>251</b>
84	Curvas de producción estimadas para nogales y almendros en el Fundo Rinconada de Longovilo.	<b>259</b>
85	Ubicación de los invernaderos y atrapanieblas en Peña Blanca.	<b>272</b>
86	Esquema de componentes del proyecto.	<b>274</b>
87	Ubicación predio Agrícola San Antonio coordenadas 314.104 m E y 6.371.894 m S y Planta de Tratamiento de Aguas (PTAS).	<b>285</b>
88	Esquema de las obras contempladas en el proyecto.	<b>287</b>
89	Ubicación del predio en estudio y Planta de Tratamiento de Aguas (PTAS)	<b>303</b>
90	Esquema general de disposición de obras del proyecto.	<b>305</b>

# **INDICE DE CUADROS**

## **DIAGNÓSTICO DE FUENTES DE AGUA NO CONVENCIONALES EN EL REGADÌO INTER- REGIONAL**

Informe Final

<b><u>Cuadro</u></b>		<b><u>Pág.</u></b>
1	Demanda consuntiva de agua al año 2006, según tipo de uso (DGA, 2007a y DGA, 2007b).	13
2	Demanda no consuntiva de agua al año 2006, según tipo de uso (DGA, 2007a y DGA, 2007b).	14
3	Demanda consuntiva de agua al año 2018, según tipo de uso (DGA, 2007a y DGA, 2007b).	15
4	Demanda no consuntiva de agua al año 2018, según tipo de uso (DGA, 2007a y DGA, 2007b).	16
5	Caudales medios y caudales medios en desembocadura para diferentes ríos de Chile (Fuente: Salazar, 2003).	21
6	Caudales medios mensuales con una excedencia del 50% del Río Lluta (Fuente: DGA, 2003).	22
7	Coefficiente de distribución de descarga para los caudales medios mensuales con una excedencia del 50% del Río Lluta.	23
8	Valores de caudal medio para los tres meses de máxima demanda con una probabilidad de excedencia de 50 y 85%.	24
9	Áreas declaradas con prohibición.	30
10	Áreas declaradas con restricción.	31
11	Cuencas declaradas como zonas de escasez durante la temporada 2007-2008.	32

## **Continuación Índice Cuadros...**

12	Resumen de caudales de demanda consuntiva, oferta para un 85% de excedencia y de caudales deficitarios por cuenca, para situación actual y un horizonte de 10 años (2018).	<b>34</b>
13	Cuencas en orden de prioridad en función de los valores de caudal de déficit hídrico por cuenca para el escenario más crítico, para oferta con un 85% de excedencia y una demanda para un horizonte de 10 años.	<b>35</b>
14	Caudales deficitarios para situación actual, bajo el análisis de demanda con un 10 y 20% de incremento, con los caudales de un 50 y 85% de excedencia.	<b>36</b>
15	Caudales deficitarios para situación proyectada a 10 años, bajo el análisis de demanda con un 10 y 20% de incremento, con los caudales de un 50 y 85% de excedencia.	<b>37</b>
16	Cuencas o sectores deficitarios seleccionados	<b>40</b>
17	Caudales ecológicos para los sectores en estudio	<b>43</b>
18	Demanda consuntiva de agua al año 2018, según tipo de uso para sectores en estudio (adaptado de DGA, 2007a y DGA, 2007b)	<b>44</b>
19	Demanda no consuntiva de agua al año 2018, según tipo de uso para sectores en estudio (adaptado de DGA, 2007a y DGA, 2007b)	<b>45</b>
20	Estaciones seleccionadas para cada sector	<b>124</b>
21	Tendencia observada del caudal medio anual, según los registros fluviométricos.	<b>125</b>
22	Tendencia observada del caudal medio anual, para el período de riego, según los registros fluviométricos	<b>128</b>
23	Pasos metodológicos para la selección de tecnología (adaptado de Landcom's WSUD Strategy (2003) y Hanbook on Feasability Studies for Water Reuse Systems (2008))	<b>139</b>

## **Continuación Índice Cuadros...**

24	Mecanismos de tratamiento y características para ARI y ARM	149
25	Experiencias reportadas en la reutilización de agua tratada	153
26	Experiencias Internacionales en desalinización	158
27	Resumen de los resultados de potencial de caudal posible de obtener en áreas afectadas por fenómeno de niebla	172
28	Ventajas y desventajas de las estrategias de recarga artificial de acuíferos	180
29	Resumen de Fuentes catastradas	188
30	Resumen de trenes de tratamiento y dilución requerida para Fuentes que excedan la norma de riego	214
31	Fuentes seleccionadas para la confección de perfiles de proyecto	227
32	Resultados de priorización de perfiles de proyecto	249
33	Presupuestos considerados en el sistema de impulsión de aguas tratadas	255
34	Presupuestos considerados en el sistema de recarga artificial	255
35	Disponibilidad de aguas subterráneas de los sectores acuíferos del estero Yali, hasta sector El Prado	257
36	Valores de cierre para el acuífero del estero Yali	257
37	Matriz de Leopold para proyecto Yali	262
38	Presupuesto considerado para el total del proyecto	275
39	Análisis de sensibilidad para el proyecto de Comunidad Agrícola Peña Blanca.	278
40	Matriz de Leopold para proyecto Peña Blanca	279
41	Presupuesto general del proyecto	289

## **Continuación Índice Cuadros...**

42	Producción e ingresos por año para duraznero	<b>291</b>
43	Matriz de Leopold para proyecto Catemu PTAs	<b>294</b>
44	Presupuesto general del proyecto.	<b>306</b>
45	Matriz de Leopold para proyecto PTAs Melipilla	<b>310</b>

# **CAPITULO I: ANTECEDENTES DEL ESTUDIO**

## **1 Introducción**

El Programa Nacional de Riego, considera dentro de sus premisas que la vida vegetal no es posible si no existe agua dulce. No es condición suficiente que en la zona existan características climáticas adecuadas, o que existan variedades de plantas cultivables que puedan resistir condiciones extremas. El agua siempre es insustituible.

Los requerimientos de agua dulce en una región, incrementados por la industrialización del país y el aumento de población, generan una fuerte tensión y sobredemanda sobre el agua disponible para uso agrícola, obligando a los usuarios a identificar nuevas fuentes de recursos hídricos, preocuparse de la relación dinámica de las aguas superficiales con las napas subterráneas en las cuencas, y a utilizar la tecnificación de los sistemas, para aumentar la eficiencia del riego.

La propia dinámica de la situación indica, que a un plazo mediano, estas acciones serán insuficientes y los agricultores deberán utilizar para la mantención y/o desarrollo del negocio agrícola aguas servidas tratadas, aguas tratadas provenientes de la agroindustria, de relaves mineros, utilización de agua de mar desalinizadas, cosecha de agua en zonas áridas, recarga artificial de acuíferos, entre otras fuentes no convencionales que puedan ser posibles de identificar.

## **2 Política General dentro de la cual se enmarca el Estudio**

Este estudio se enmarca bajo el alero de la Política de Riego y Drenaje en Chile, que constituye un conjunto de lineamientos, orientaciones y estrategias que tienen por función mejorar la calidad y disponibilidad del recurso hídrico, acorde a las necesidades propias de la agricultura del país y buscando la transformación de este en una potencia agroalimentaria. Estos dos aspectos, la calidad y la

disponibilidad, predisponen a realizar estudios básicos acotados que clarifiquen los aspectos esenciales que se deben considerar para integrar el recurso hídrico de nuevas fuentes no convencionales.

Esta Política Nacional de Riego y Drenaje solicita, en su punto 4.1.6, incentivar el uso de nuevas fuentes de agua, siendo para ello muy necesario determinar su ubicación y cuantía.

### **3 Objetivo General**

Analizar las distintas fuentes de agua no convencionales entre las regiones de Arica-Parinacota y del Bío-Bío, de tal forma que sea posible realizar perfiles avanzados de proyecto que incorporen este tipo de fuentes.

### **4 Objetivos Específicos**

- Proyectar la oferta y la demanda de los recursos hídricos para los próximos 10 años y determinar la utilización relativa de los distintos sectores usuarios (riego, minería, sanitaria, industria, etc.).
- Identificar y catastrar fuentes de agua no convencionales para las cuencas en estudio.
- Realizar un análisis de metodologías para la utilización de estas fuentes de agua no convencionales para el riego agrícola.
- Realizar una cartera de, a lo menos, 30 perfiles avanzados de proyectos de riego, en las cuencas priorizadas en estudio, tal que utilicen una proporción de aguas no convencionales, tales como; aguas tratadas, canjes de agua entre mineras, agricultura y sanitarias, recarga artificial de acuíferos, etc.).
- Realizar 4 pre-diseños de proyectos, incluyendo análisis de costos y propuestas de solución a los problemas legales, para materializar dichas inversiones.

## **CAPITULO II: IDENTIFICACIÓN DE CUENCAS DEFICITARIAS.**

### **1 Introducción**

El objetivo del presente Capítulo, es definir las cuencas o sectores que poseen una marcada situación de déficit hídrico en el área de estudio, que comprende desde la región de Arica-Parinacota a la parte norte de la región del Biobío (Cuenca del Ñuble). La determinación del déficit, se realizó mediante un análisis del balance hídrico para cada cuenca, el cual se basa en información de demanda, oferta hídrica actual y proyectada a 10 años.

Los alcances de este Capítulo corresponden a un análisis de fuentes secundaria de información. Por ello, la metodología usada consistió en una recopilación exhaustiva de información existente, selección de publicaciones relevantes, análisis y condensación de la información y consolidación de la información para la determinación del déficit hídrico de las cuencas en estudio. A partir de una priorización de cuencas según el déficit que presentan, se realiza una elección de las cuencas a las cuales se realiza un análisis más detallado en el Capítulo III.

### **2 Definición de las cuencas en estudio**

Para el análisis de la demanda, la oferta y el posterior análisis del balance hídrico se decidió utilizar la clasificación las cuencas chilenas usada por el Banco Nacional de Aguas (BNA), operado por la Dirección General de Aguas (DGA). Esta clasificación se basa en asignar las diferentes cuencas del país en 12 regiones, de acuerdo a la regionalización existente hasta el año 2005 y uniendo las regiones Metropolitana y Quinta. En el Anexo 1 se presenta el listado de cuencas y subcuencas, desde la región de Arica Parinacota hasta la Región del Maule, según la clasificación del BNA.

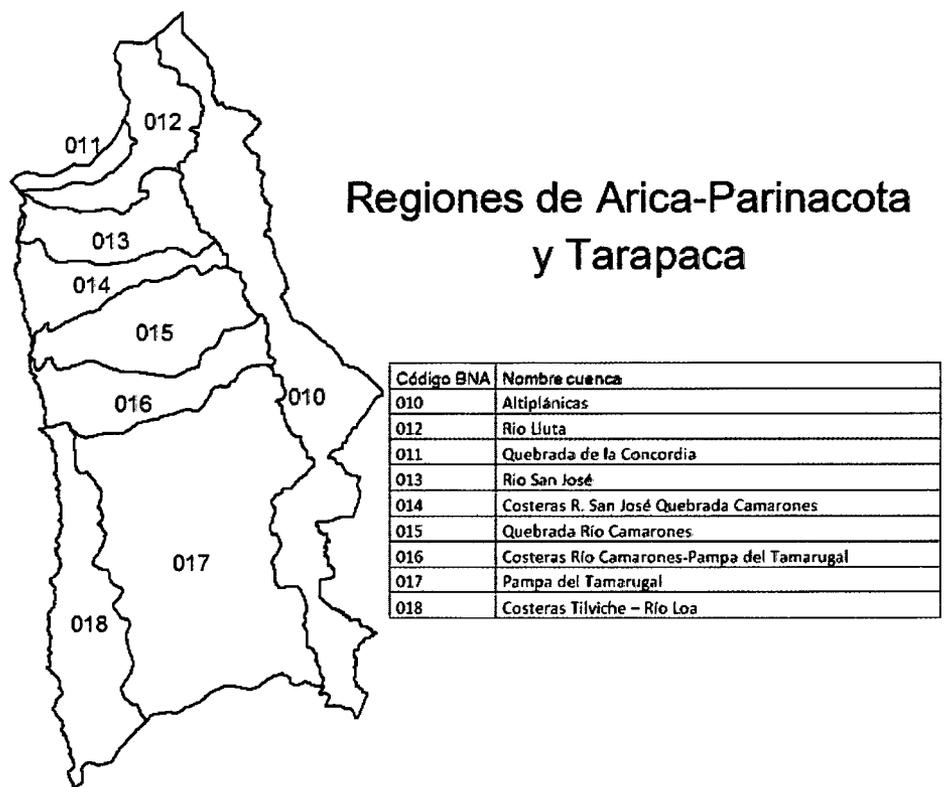


Figura 1. Clasificación de cuencas según BNA correspondiente a las Regiones de Arica-Parinacota y Tarapacá.

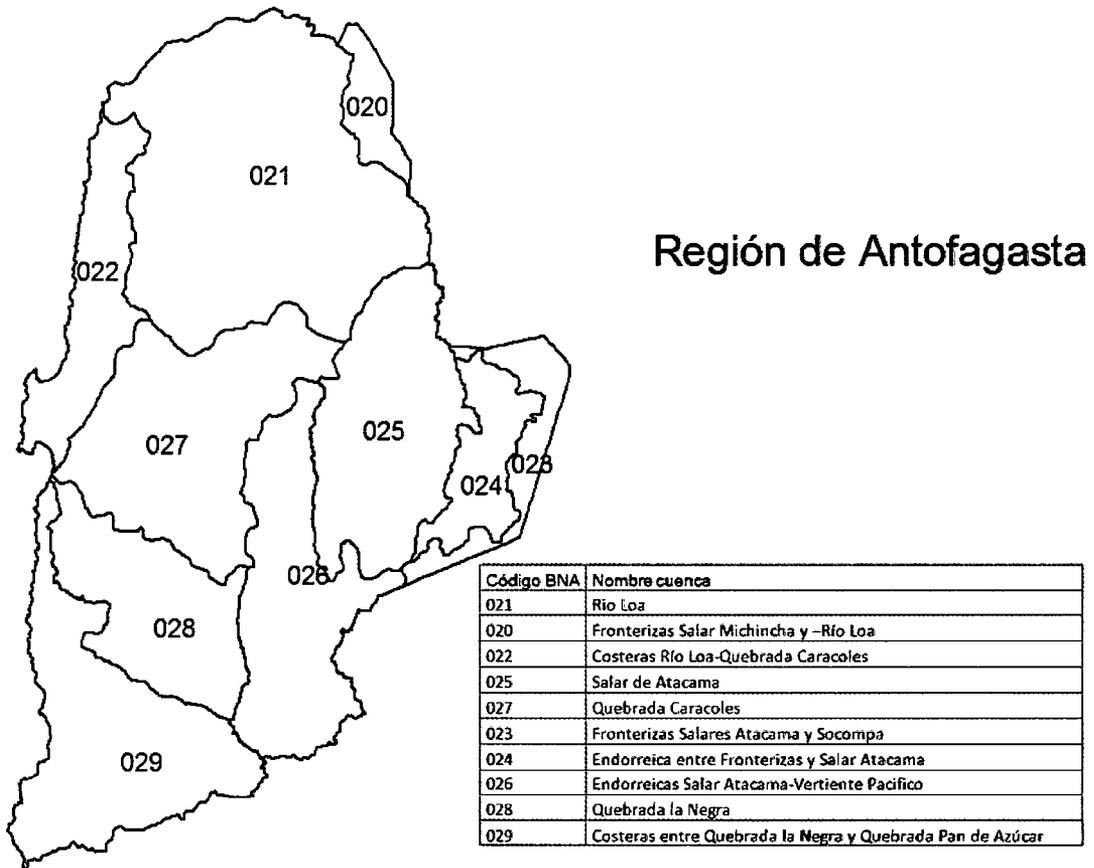


Figura 2. Clasificación de cuencas según BNA correspondiente a la Región de Antofagasta.

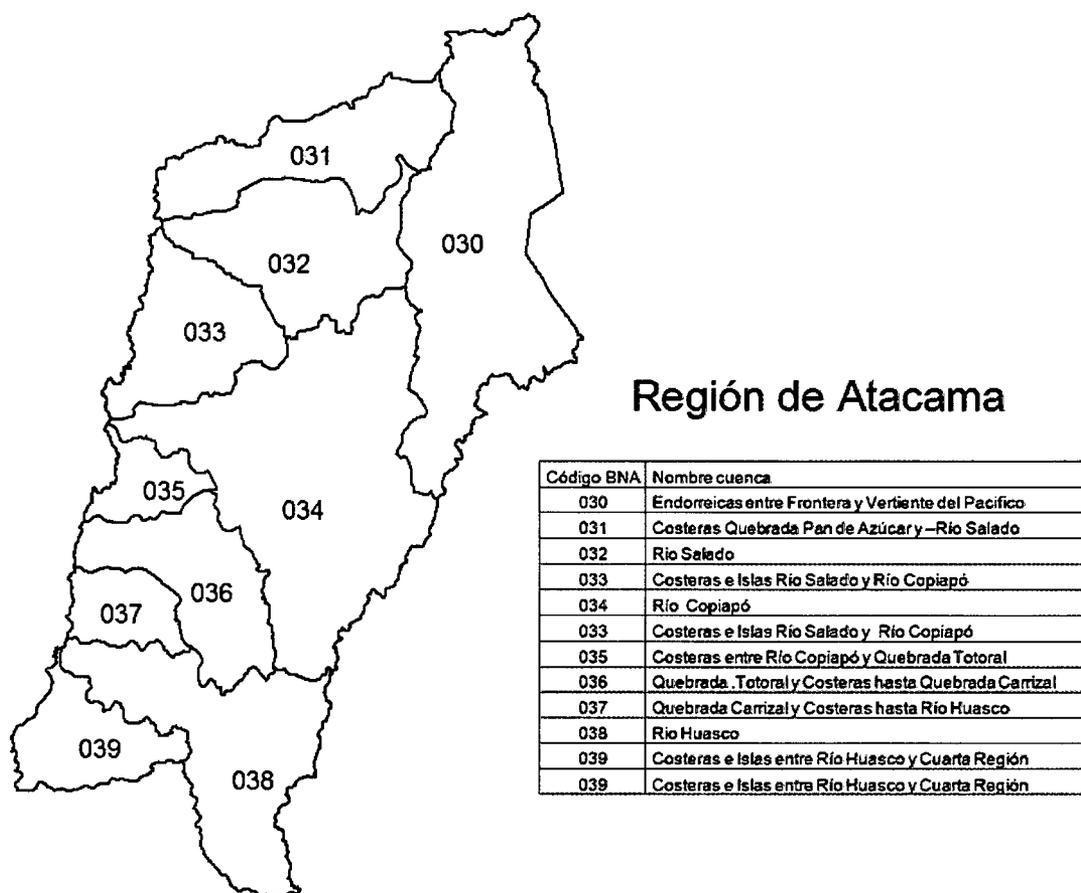


Figura 3. Clasificación de cuencas según BNA correspondiente a la Región de Atacama.

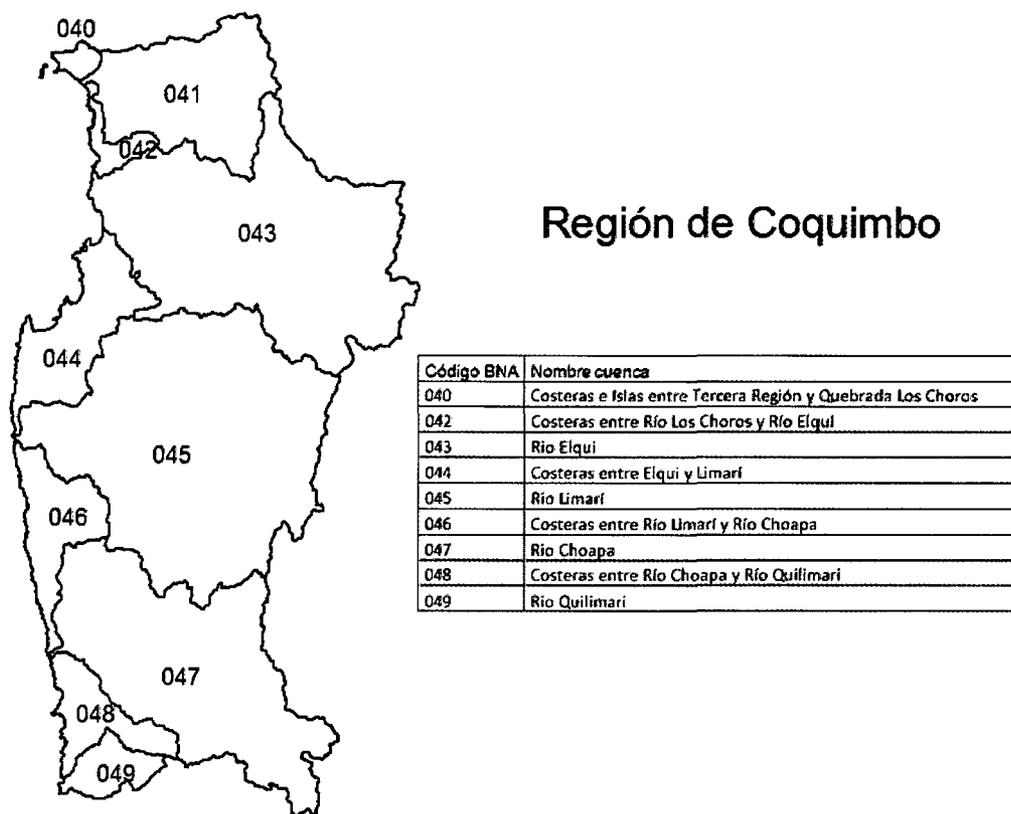
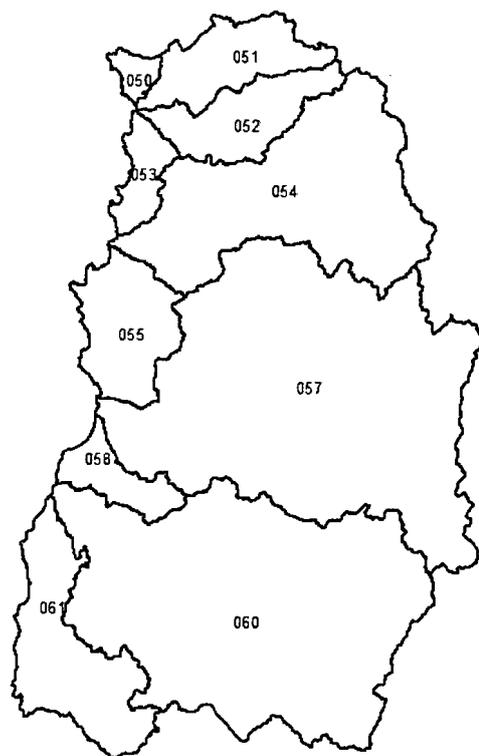


Figura 4 Clasificación de cuencas según BNA correspondiente a la Región de Coquimbo.



## Regiones de Valparaíso, Metropolitana y O'Higgins

Código BNA	Nombre cuenca
051	Río Petorca
050	Costeras Quilimari y Petorca
052	Río Ligua
054	Río Aconcagua
053	Costeras Ligua y Aconcagua
056	Islas del Pacífico
057	Río Maipo
055	Costeras entre Aconcagua y Maipo
058	Costeras entre Maipo y Rapel
060	Río Rapel
061	Costeras Rapel y Estero Nilahue

Figura 5. Clasificación de cuencas según BNA correspondiente a las Regiones de Valparaíso, Metropolitana y O'Higgins.

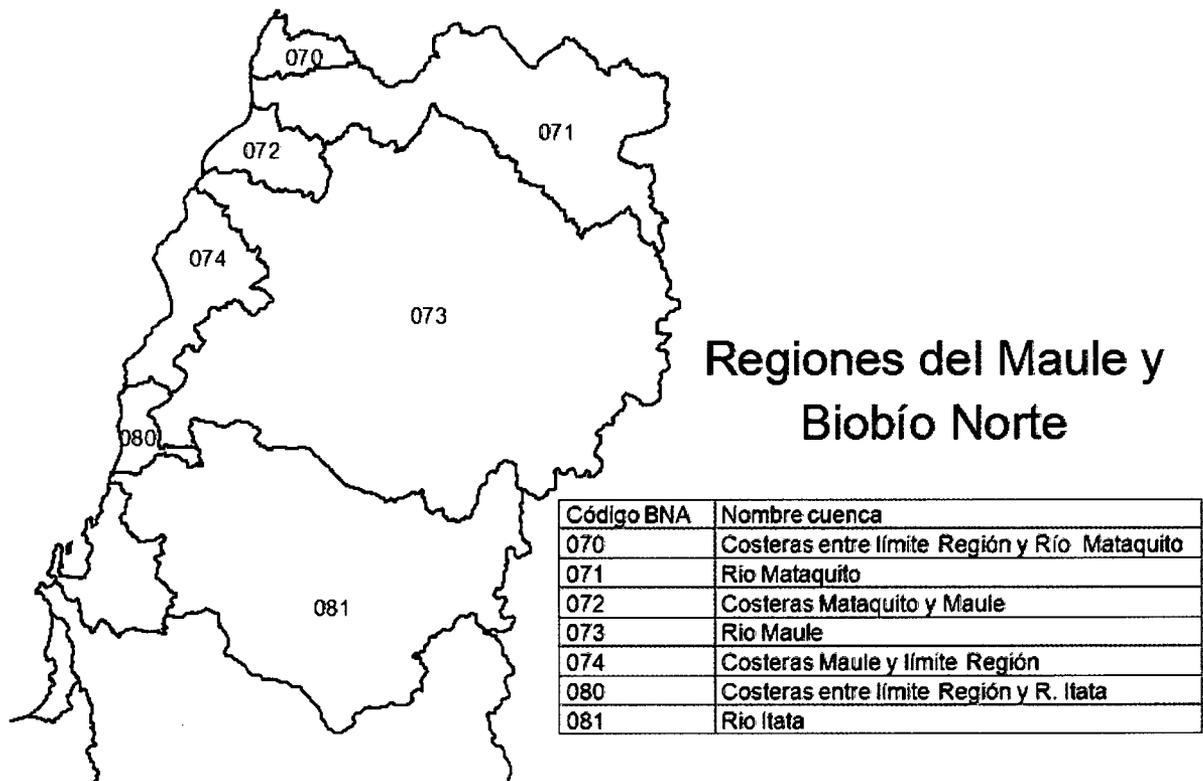


Figura 6. Clasificación de cuencas según BNA correspondiente a las Regiones del Maule y Biobío Norte.

### **3 Demanda del recurso hídrico**

Para evaluar la demanda actual y futura de recursos hídricos en la zona en estudio, y tal como se explicó anteriormente, se analizaron diferentes publicaciones, preferentemente de la Dirección General de Aguas. De estas publicaciones destaca el estudio realizado por Ayala, Cabrera y Asociados Ingenieros Consultores (DGA 2007a y DGA 2007b). En este estudio se realizó un completo y exhaustivo análisis de las demandas de agua en Chile y se efectuaron proyecciones de los cambios de demanda a 10 y 25 años.

Los antecedentes presentados por Ayala, Cabrera y Asociados (DGA 2007a y DGA 2007b), satisfacen plenamente los requerimientos de información planteados por la CNR para este estudio. Por lo tanto y considerando los alcances y objetivos de este proyecto, el presente subcapítulo se basará en transcribir información proporcionada en dichas publicaciones.

#### **3.1 Definición de usos de agua**

En las publicaciones DGA 2007a y DGA 2007b se entregan las demandas de agua para el año 2006 en cada subcuenca del área en estudio. Para ello se definieron los siguientes tipos de usos:

##### **3.1.1 Agropecuario y Forestal**

El uso agropecuario comprende el agua utilizada para riego y para el consumo pecuario (ganado y aves). El agua que se utiliza en riego corresponde a la demanda bruta de agua por cultivo que se obtiene con la tasa de riego y la superficie de cada cultivo. El uso forestal está referido específicamente a especies de álamos y eucaliptus que en el caso del álamo requiere riego constante y el eucaliptus requiere de riego de implantación.

##### **3.1.2 Agua Potable**

Corresponde al agua utilizada para consumo humano. Se clasifica según el tipo de población que abastece como agua potable urbana y agua potable rural.

### **3.1.3 Industria**

El uso industrial corresponde al agua utilizada por industrias manufactureras que engloban una serie de actividades económicas clasificadas según código CIIU (Clasificación Industrial Internacional Uniforme) de la Organización de Naciones Unidas (ONU).

### **3.1.4 Minero**

El uso minero comprende el agua utilizada en los procesos y producción asociados a la industria minera metálica y no metálica.

### **3.1.5 Receptor Contaminantes**

El uso como receptor de contaminantes se refiere principalmente a la descarga de aguas contaminadas al cauce superficial correspondiente, sean estas aguas servidas domésticas (con o sin tratamiento previo) o bien residuos industriales líquidos provenientes de las industrias.

Según la Norma de emisión para la regulación de contaminantes asociados a las descargas de residuos líquidos a aguas marinas y continentales superficiales (DS 90) un cuerpo de agua receptor o cuerpo receptor es “el curso o volumen de agua natural o artificial, marino o continental superficial, que recibe la descarga de residuos líquidos. No se comprenden en esta definición los cuerpos de agua artificiales que contengan, almacenen o traten relaves y/o aguas lluvias o desechos líquidos provenientes de un proceso industrial o minero”. Sin embargo, la misma normativa señala que las fuentes emisoras podrán aprovechar la capacidad de dilución del cuerpo receptor, incrementado las concentraciones límites establecidas. Por lo anterior, la definición de uso como cuerpo receptor es independiente del caudal que transporta el cuerpo de agua.

### **3.1.6 Caudal Ecológico**

Corresponde al caudal mínimo ambiental o ecológico para mantener el equilibrio hidroambiental del cauce. Existen diversos métodos para determinarlo, en este caso se utilizó el caudal dado por el 10% del caudal medio anual.

### **3.1.7 Energía**

Corresponde al agua utilizada por las centrales termoeléctricas del Sistema Interconectado Norte Grande (SING) y a centrales del Sistema Interconectado Central (SIC), las que utilizan recursos subterráneos (centrales térmicas) y superficiales (centrales hidroeléctricas)

### **3.1.8 Acuícola**

El uso acuícola comprende el agua utilizada en la explotación de distintos cultivos tales como algas, moluscos, crustáceos y peces. Cabe mencionar que en la zona norte del país, los cultivos desarrollados son de agua salada, por lo que los requerimientos corresponderían a labores de lavado y servicios.

### **3.1.9 Turismo**

Corresponde al uso asociado al consumo de la población flotante asociada al turismo en centros turísticos, hoteles y alojamientos en general.

## **3.2 Demandas de agua por subcuenca**

Las demandas de agua, determinadas para el año 2006 y proyectadas para el año 2018 se presentan en forma detallada en los Cuadros 1 a 4. En el Anexo 2 se presentan las zonas críticas, identificadas en los estudios realizados por Ayala, Cabrera y Asociados Ingenieros Consultores (DGA 2007a y DGA 2007b), de acuerdo a los usos de aguas.

Cuadro 1. Demanda consuntiva de agua al año 2006, según tipo de uso (DGA, 2007a y DGA, 2007b).

Región	Cuenca	Caudal por uso consuntivo (m <sup>3</sup> /s)					Caudal Ecológico
		Agropecuario y Forestal	Agua Potable	Industrial	Minero	Receptor Cont.	
I y XV	Alliuplánicas	1,570	0,003		1,543	0,000	0,020
XV	Costera- Quebrada de la Concordia	0,000	0,000		0,000	0,000	
XV	Río Lluta	2,142	0,007		0,209	0,000	0,220
XV	Río San José	1,420	0,447	0,247	0,001	0,000	0,090
XV	Costera-San José- Camarones	0,151	0,000		0,000	0,000	
I y XV	Río Camarones	2,085	0,001		0,000	0,000	0,040
I	Costera-Camarones-P. del Tamarugal	0,898	0,002		0,001	0,000	0,030
I	Pampa del Tamarugal	0,653	0,057		1,776	0,000	0,020
I	Costera- Tiliviche- Loa	0,007	0,741	1,433	0,136	0,000	
II	Fronteriza-Salar Michincha-Río Loa	0,013	0,000		0,009	0,000	
II	Río Loa	1,214	0,916	0,000	5,453	0,292	0,310
II	Costera-Loa- Caracoles	0,000	0,070	1,014	2,513	0,000	0,020
II	Fronteriza-Salar Atacama- Socompa	0,000	0,000		0,000	0,000	
II	Endorreica- entre Fronterizas y Salar de Atacama	0,001	0,000		0,000	0,000	
II	Salar de Atacama	2,013	0,002		0,602	0,000	0,090
II	Endorreica- Salar de Atacama- Vertiente Pacífico	0,001	0,000		1,041	0,000	
II	Quebrada Caracoles	0,033	0,000	0,270	2,932	0,000	
II	Quebrada La Negra	0,033	0,000	0,009	0,389	0,000	
II	Costera-Qda. La Negra- Qda. Pan de Azúcar	0,000	0,021		2,320	0,000	
III	Endorreica entre Fronterizas y Vertiente Pacífico	0,001	0,000		0,030	0,000	
III	Costera- Qda. Pan de Azúcar- Río Salado	0,000	0,000		0,189	0,000	
III	Río Salado	0,017	0,048		0,350	0,000	
III	Costera- Salado- Copiapó	0,057	0,045	0,504	0,150	0,000	
III	Río Copiapó	4,402	0,445	0,010	0,341	0,272	0,280
III	Costera- Copiapó- Totoral	0,000	0,000		0,025	0,000	
III	Qda. Totoral y Costera hasta Qda. Carrizal	0,001	0,000		0,036	0,000	
III	Qda. Carrizal y Costera hasta Río Huasco	0,000	0,001		0,061	0,000	
III	Río Huasco	7,555	0,168	0,005	0,168	0,119	0,340
III	Costera- Huasco- límite regional	0,001	0,004		0,255	0,000	0,200
IV	Costera-límite regional- Los Choros	0,002	0,002		0,000	0,000	
IV	Río Los Choros	0,038	0,004		0,076	0,000	
IV	Costera- Los Choros- Elqui	0,003	0,003		0,000	0,000	
IV	Río Elqui	6,098	0,097	0,167	0,599	0,324	0,960
IV	Costera- Elqui- Limarí	4,075	0,981	0,014	0,000	0,000	
IV	Río Limarí	10,890	0,310	0,047	0,430	0,203	1,140
IV	Costera- Limarí- Choapa	1,958	0,003		0,002	0,000	
IV	Río Choapa	3,998	0,109	0,023	0,594	0,075	1,340
IV	Costera- Choapa- Quilimarí	0,063	0,005		0,058	0,000	
IV	Costera- Quilimarí	0,101	0,011		0,012	0,000	
V norte	Costera- Quilimarí- Petorca	0,005	0,024		0,000	0,000	
V norte	Río Petorca	2,833	0,049		0,083	0,000	1,390
V norte	Río Ligua	2,769	0,114		0,670	0,062	1,680
V norte	Costera- Ligua- Aconcagua	1,247	0,125	0,354	0,007	0,000	
V sur	Río Aconcagua	22,347	1,143	3,649	0,920	4,390	14,490
V sur	Costeras Aconcagua- Maipo	5,662	3,137	0,803	0,000	0,000	0,000
V sur	Costeras Maipo- Rapel	7,637	0,002	0,000	0,000	0,000	0,000
RM	Río Maipo	82,457	18,510	10,421	0,481	15,417	50,400
VI	Río Rapel	98,150	1,989	1,232	9,396	1,226	10,060
VI	Costeras Rapel- Nihue	1,135	0,024	0,000	0,000	0,000	0,000
VII	Costeras Lim. Regional- Mataquito	0,125	0,008	0,000	0,000	0,000	0,000
VII	Río Mataquito	37,676	0,658	1,200	0,000	0,281	11,780
VII	Costeras Mataquito- Maule	0,085	0,085	0,000	0,000	0,000	0,000
VII	Río Maule	128,967	1,426	2,571	0,000	0,836	44,860
VII	Costeras Maule- Lim Regional	0,338	0,034	0,000	0,000	0,000	0,000
VIII	Costeras Lim. Regional- Itata	0,141	0,022	0,000	0,000	0,000	0,000
VIII	Río Itata	16,046	0,748	3,858	0,000	0,492	17,590

Cuadro 2. Demanda no consuntiva de agua al año 2006, según tipo de uso (DGA, 2007a y DGA, 2007b).

Región	Cuenca	Caudal por uso no consuntivo (m <sup>3</sup> /s)			Total (m <sup>3</sup> /s)
		Energía	Acuicola	Turismo	
I y XV	Altiplánicas			0,002	0,002
XV	Costera- Quebrada de la Concordia				0,000
XV	Río Lluta			0,002	0,002
XV	Río San José	0,007		0,004	0,011
XV	Costera-San José- Camarones				0,000
I y XV	Río Camarones			0,000	0,000
I	Costera-Camarones-P. del Tamarugal			0,001	0,001
I	Pampa del Tamarugal			0,001	0,001
I	Costera- Tilviche- Loa	0,204		0,003	0,207
II	Fronteriza-Salar Michincha-Río Loa				0,000
II	Río Loa			0,001	0,001
II	Costera-Loa- Caracoles	1,341		0,001	1,342
II	Fronteriza-Salar Atacama- Socompa				0,000
II	Endorreica- entre Fronterizas y Salar de Atacama				0,000
II	Salar de Atacama			0,000	0,000
II	Endorreica- Salar de Atacama- Vertiente Pacífico				0,000
II	Quebrada Caracoles	0,029			0,029
II	Quebrada La Negra				0,000
II	Costera-Qda. La Negra- Qda. Pan de Azúcar	0,123		0,002	0,125
III	Endorreica entre Fronterizas y Vertiente Pacífico				0,000
III	Costera- Qda. Pan de Azúcar- Río Salado				0,000
III	Río Salado	0,023		0,001	0,024
III	Costera- Salado- Copiapó			0,000	0,000
III	Río Copiapó			0,000	0,000
III	Costera- Copiapó- Totoral				0,000
III	Qda. Totoral y Costera hasta Qda. Carrizal			0,000	0,000
III	Qda. Carrizal y Costera hasta Río Huasco			0,000	0,000
III	Río Huasco	0,232		0,000	0,232
III	Costera- Huasco- límite regional			0,000	0,000
IV	Costera-límite regional- Los Choros				0,000
IV	Río Los Choros				0,000
IV	Costera- Los Choros- Elqui			0,000	0,000
IV	Río Elqui			0,002	0,002
IV	Costera- Elqui- Limarí			0,002	0,002
IV	Río Limarí	1,250		0,001	1,251
IV	Costera- Limarí- Choapa			0,000	0,000
IV	Río Choapa			0,000	0,000
IV	Costera- Choapa- Quilimarí			0,000	0,000
IV	Costera- Quilimarí			0,000	0,000
V norte	Costera- Quilimarí- Petorca			0,001	0,001
V norte	Río Petorca			0,001	0,001
V norte	Río Ligua			0,001	0,001
V norte	Costera- Ligua- Aconcagua	0,169		0,003	0,172
V sur	Río Aconcagua	87,795		0,002	87,797
V sur	Costeras Aconcagua- Maipo	0,035		0,005	0,040
V sur	Costeras Maipo- Rapel	0,000		0,000	0,000
RM	Río Maipo	129,040	0,000	0,002	129,042
VI	Río Rapel	653,753	0,000	0,001	653,754
VI	Costeras Rapel- Nihue	0,000	0,000	0,000	0,000
VII	Costeras Lím. Regional- Mataquito	0,000	0,000	0,000	0,000
VII	Río Mataquito	0,000	0,000	0,000	0,000
VII	Costeras Mataquito- Maule	0,000	0,000	0,000	0,000
VII	Río Maule	1342,412	0,000	0,000	1342,412
VII	Costeras Maule- Lím Regional	0,000	0,000	0,000	0,000
VIII	Costeras Lím. Regional- Itata	0,000	0,000	0,000	0,000
VIII	Río Itata	0,000	0,000	0,000	0,000

Cuadro 3. Demanda consuntiva de agua al año 2018, según tipo de uso (adaptado de DGA, 2007a y DGA, 2007b).

Región	Cuenca	Caudal por uso consuntivo (m <sup>3</sup> /s)					Caudal Ecológico
		Agropecuario y Forestal	Agua Potable	Industrial	Minero	Receptor Cont.	
I y XV	Altiplánicas	1,570	0,004		1,852	0,000	0,020
XV	Costera- Quebrada de la Concordia	0,000	0,000		0,000	0,000	
XV	Río Lluta	2,142	0,009		0,250	0,000	0,220
XV	Río San José	1,420	1,118	0,581	0,001	0,000	0,090
XV	Costera-San José- Camarones	0,151	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
I y XV	Río Camarones	2,085	0,001	0,000	0,000	0,000	0,040
I	Costera-Camarones-P. del Tamarugal	0,898	0,002		0,001	0,000	0,030
I	Pampa del Tamarugal	0,653	0,082	0,000	2,132	0,000	0,020
I	Costera- Tilviche- Loa	0,007	0,986	3,375	0,163	0,000	
II	Fronteriza-Salar Michincha-Río Loa	0,013	0,000		0,012	0,000	
II	Río Loa	1,214	1,001	0,000	7,089	0,292	0,310
II	Costera-Loa- Caracoles	0,000	0,092	1,651	3,268	0,000	0,020
II	Fronteriza-Salar Atacama- Socompa	0,000	0,000		0,000	0,000	
II	Endorreica- entre Fronterizas y Salar de Atacama	0,001	0,000		0,000	0,000	
II	Salar de Atacama	2,013	0,003		0,783	0,000	0,090
II	Endorreica- Salar de Atacama- Vertiente Pacífico	0,001	0,000		1,354	0,000	
II	Quebrada Caracoles	0,033	0,000	0,440	3,813	0,000	
II	Quebrada La Negra	0,033	0,000	0,015	0,505	0,000	
II	Costera-Qda. La Negra- Qda. Pan de Azúcar	0,000	0,022		3,015	0,000	
III	Endorreica entre Fronterizas y Vertiente Pacífico	0,001	0,000		0,084	0,000	
III	Costera- Qda. Pan de Azúcar- Río Salado	0,000	0,000		0,522	0,000	
III	Río Salado	0,017	0,042		0,968	0,000	
III	Costera- Salado- Copiapó	0,057	0,044	1,225	0,415	0,000	
III	Río Copiapó	4,292	0,436	0,023	0,940	0,272	0,280
III	Costera- Copiapó- Totoral	0,000	0,000	0,000	0,068	0,000	
III	Qda. Totoral y Costera hasta Qda. Carrizal	0,001	0,000		0,100	0,000	
III	Qda. Carrizal y Costera hasta Río Huasco	0,000	0,001		0,167	0,000	
III	Río Huasco	8,324	0,146	0,011	0,464	0,119	0,340
III	Costera- Huasco- límite regional	0,001	0,005		0,704	0,000	0,200
IV	Costera-límite regional- Los Choros	0,002	0,003		0,000	0,000	
IV	Río Los Choros	0,038	0,005		0,165	0,000	
IV	Costera- Los Choros- Elqui	0,003	0,004		0,000	0,000	
IV	Río Elqui	10,612	0,114	0,288	1,310	0,324	0,960
IV	Costera- Elqui- Limarí	4,075	1,140	0,025	0,000	0,000	
IV	Río Limarí	10,890	0,391	0,081	0,940	0,203	1,140
IV	Costera- Limarí- Choapa	1,958	0,004		0,003	0,000	
IV	Río Choapa	5,786	0,136	0,040	1,300	0,075	1,340
IV	Costera- Choapa- Quilimari	0,063	0,006		0,127	0,000	
IV	Costera- Quilimari	0,101	0,012		0,026	0,000	
V norte	Costera- Quilimari- Petorca	0,005	0,042		0,000	0,000	
V norte	Río Petorca	2,689	0,062		0,130	0,000	1,390
V norte	Río Ligua	2,528	0,119		1,054	0,062	1,680
V norte	Costera- Ligua- Aconcagua	1,247	0,155	0,558	0,011	0,000	
V sur	Río Aconcagua	22,374	1,247	5,762	2,662	4,390	14,490
V sur	Costeras Aconcagua- Maipo	5,663	3,060	1,268	0,004	0,000	0,000
V sur	Costeras Maipo- Rapel	7,638	0,002	0,000	0,000	0,000	0,000
RM	Río Maipo	80,618	23,542	17,031	1,455	15,417	52,027
VI	Río Rapel	99,030	2,136	1,770	8,597	1,226	10,060
VI	Costeras Rapel- Nihue	4,041	0,068	0,000	0,000	0,000	0,000
VII	Costeras Lím. Regional- Mataquito	0,131	0,010	0,000	0,000	0,000	0,000
VII	Río Mataquito	37,713	0,746	1,772	0,000	0,281	11,780
VII	Costeras Mataquito- Maule	0,086	0,005	0,000	0,000	0,000	0,000
VII	Río Maule	135,004	1,772	3,798	0,000	0,836	44,860
VII	Costeras Maule- Lím Regional	0,340	0,041	0,000	0,015	0,000	0,000
VIII	Costeras Lím. Regional- Itata	0,154	0,025	0,000	0,000	0,000	0,000
VIII	Río Itata	31,148	0,850	6,843	0,000	0,492	17,590

Cuadro 4. Demanda no consuntiva de agua al año 2018, según tipo de uso (adaptado de DGA, 2007a y DGA, 2007b).

Región	Cuenca	Caudal por uso no consuntivo (m <sup>3</sup> /s)			Total (m <sup>3</sup> /s)
		Energía	Acuícola	Turismo	
I y XV	Altiplánicas			0,004	0,004
XV	Costera- Quebrada de la Concordia			0,000	0,000
XV	Río Lluta			0,004	0,004
XV	Río San José	0,007		0,008	0,015
XV	Costera-San José- Camarones			0,000	0,000
I y XV	Río Camarones			0,000	0,000
I	Costera-Camarones-P. del Tamarugal			0,002	0,002
I	Pampa del Tamarugal			0,002	0,002
I	Costera- Tilviche- Loa	0,204		0,007	0,211
II	Fronteriza-Salar Michincha-Río Loa			0,000	0,000
II	Río Loa			0,001	0,001
II	Costera-Loa- Caracoles	1,341		0,001	1,342
II	Fronteriza-Salar Atacama- Socompa				0,000
II	Endorreica- entre Fronterizas y Salar de Atacama				0,000
II	Salar de Atacama			0,000	0,000
II	Endorreica- Salar de Atacama- Vertiente Pacífico				0,000
II	Quebrada Caracoles	0,029			0,029
II	Quebrada La Negra				0,000
II	Costera-Qda. La Negra- Qda. Pan de Azúcar	0,123		0,001	0,124
II	Endorreica entre Fronterizas y Vertiente Pacífico				0,000
III	Costera- Qda. Pan de Azúcar- Río Salado				0,000
III	Río Salado	0,023		0,001	0,024
III	Costera- Salado- Copiapó			0,000	0,000
III	Río Copiapó			0,000	0,000
III	Costera- Copiapó- Totoral				0,000
III	Qda. Totoral y Costera hasta Qda. Carrizal			0,000	0,000
III	Qda. Carrizal y Costera hasta Río Huasco			0,000	0,000
III	Río Huasco	0,232		0,000	0,232
III	Costera- Huasco- límite regional			0,000	0,000
IV	Costera-límite regional- Los Choros			0,000	0,000
IV	Río Los Choros			0,000	0,000
IV	Costera- Los Choros- Elqui			0,000	0,000
IV	Río Elqui			0,002	0,002
IV	Costera- Elqui- Limarí			0,003	0,003
IV	Río Limarí	1,250		0,001	1,251
IV	Costera- Limarí- Choapa			0,000	0,000
IV	Río Choapa			0,000	0,000
IV	Costera- Choapa- Quilimarí			0,000	0,000
IV	Costera- Quilimarí			0,000	0,000
V norte	Costera- Quilimarí- Petorca			0,001	0,001
V norte	Río Petorca			0,001	0,001
V norte	Río Ligua			0,002	0,002
V norte	Costera- Ligua- Aconcagua	0,169		0,003	0,172
V sur	Río Aconcagua	99,795		0,003	99,798
V sur	Costeras Aconcagua- Maipo	0,035		0,006	0,041
V sur	Costeras Maipo- Rapel	0,000		0,001	0,001
RM	Río Maipo	129,040	0,000	0,005	129,045
VI	Río Rapel	653,753	0,000	0,000	653,753
VI	Costeras Rapel- Niahue	0,000	0,000	0,000	0,000
VII	Costeras Lím. Regional- Mataquito	0,000	0,000	0,000	0,000
VII	Río Mataquito	0,000	0,000	0,000	0,000
VII	Costeras Mataquito- Maule	0,000	0,000	0,000	0,000
VII	Río Maule	1401,412	0,000	0,000	1401,412
VII	Costeras Maule- Lím Regional	0,000	0,000	0,000	0,000
VIII	Costeras Lím. Regional- Itata	0,000	0,000	0,000	0,000
VIII	Río Itata	0,000	0,000	0,000	0,000

### **3.3 Otros antecedentes sobre el uso de agua**

El estudio "Informe derechos, extracciones y tasas unitarias de consumo de agua del sector minero regiones centro - norte de Chile" elaborado para la Dirección General de Aguas por la empresa Proust Consultores, presenta un detallado análisis de los derechos y extracciones de agua del sector minero entre las regiones de Arica-Parinacota y O'Higgins. El resumen ejecutivo y los cuadros con las extracciones se presentan en el Anexo 3.

## **4 Oferta actual y futura del recurso hídrico**

De acuerdo a los objetivos de este estudio, se presenta a continuación un análisis de la disponibilidad de recursos hídricos que comprende el territorio nacional entre las regiones de Arica-Parinacota y Biobío Norte. Considerando los alcances de este Capítulo, este análisis se basa en la revisión de información secundaria y tiene una escala de estudio regional.

El año 1987 la Dirección General de Aguas publicó lo que es hasta ahora el documento más completo con respecto al balance hídrico nacional. Si bien es cierto que los resultados de este documento han sido mejorados a escala de cuencas (por ejemplo para la cuenca del río Simpson en De la Fuente, 2007), los resultados a nivel nacional siguen siendo vigentes y han sido citados por importantes estudios e informes posteriores (DGA, 1999; Salazar, 2003).

### **4.1 Oferta de agua en Chile**

#### **4.1.1 Antecedentes generales**

Debido a la ubicación geográfica de Chile, y el sistema general de circulación de la atmósfera, nuestro territorio Continental está expuesto a diferentes patrones que gobiernan la ocurrencia de precipitaciones:

- En la zona norte (Arica-Parinacota, Tarapacá Antofagasta y Atacama), los aportes de precipitaciones están asociados al Invierno Boliviano, que se produce durante los meses de verano. Las precipitaciones se producen por

sistemas frontales, provenientes del Atlántico que cruzan el continente, por lo que no son abundantes y debido al efecto orográfico se concentran principalmente en la zona andina.

- En la zona centro Norte (Atacama y Coquimbo), existe una influencia del Invierno Boliviano, pero también recibe aportes de sistemas frontales provenientes del Pacífico y que alcanzan a rodear el Anticiclón del Pacífico, especialmente durante los años en los que se producen eventos de El Niño.
- La zona central (Valparaíso a Biobío Norte) recibe aportes de precipitaciones provenientes de sistemas frontales originados en el Océano Pacífico (Figura 7).



Figura 7. Situación sinóptica típica del cono Sur de América (Fuente: Dirección Meteorológica de Chile).

La existencia de estos marcados patrones que originan precipitaciones en Chile (Invierno Boliviano y Sistemas Frontales del Pacífico), producen que el régimen de precipitaciones tenga una marcada variabilidad Norte-Sur (Figura 8), lo que se traduce también en los caudales (Figura 9).

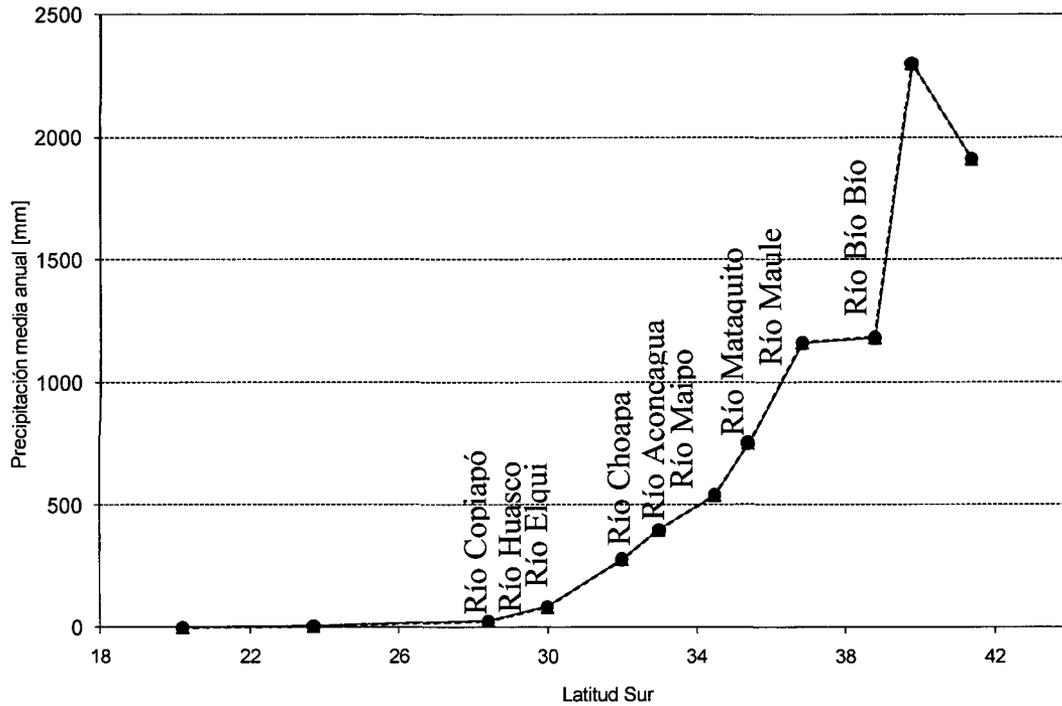


Figura 8. Variación de la precipitación en Chile de acuerdo a la Latitud.

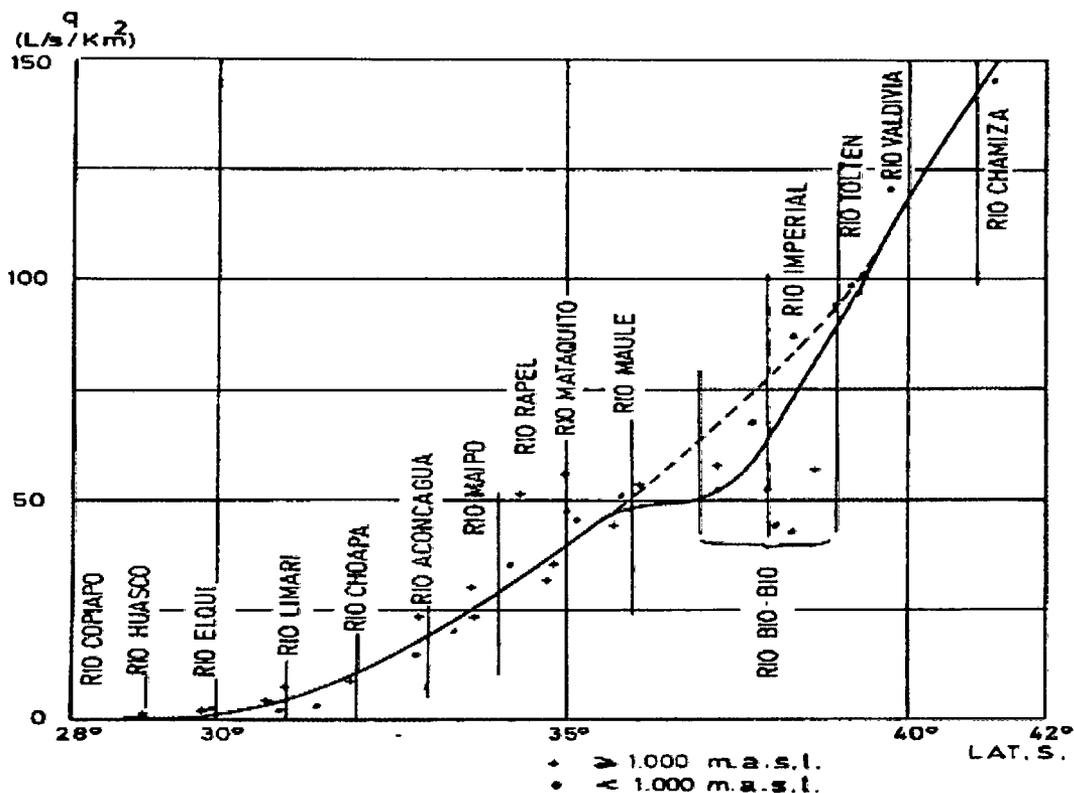


Figura 9. Variación de los caudales en Chile de acuerdo a la Latitud (Salazar, 2003).

En el estudio “Diagnostico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad” (DGA, 2004), la empresa Cade-Idepe realizó un exhaustivo análisis de la estadística fluviométrica existente. Las series de caudales mensuales asociados a las probabilidades de excedencia de 50% y 85% se presentan en los Anexos 4 y 5. Del análisis de estas series de caudales se destaca que los ríos de la zona norte del país presentan una variabilidad temporal muy alta y que los caudales con una seguridad de riego del 85% son mucho menores que los caudales medios.

En el documento presentado por Salazar (2003), se presentan dos importantes indicadores de disponibilidad de agua en Chile. El primero corresponde a la disponibilidad de agua por habitante, para las 13 regiones existentes al 2003. Como se puede apreciar en la Figura 10, la oferta de agua es crítica desde la Región Metropolitana al Norte. El segundo indicador corresponde

a los valores de caudales medios para diferentes ríos de la zona de estudio, de estas series de caudales presentes en el Cuadro 5, se puede ver que todos los ríos ubicados al Norte del Maule pueden presentar situaciones críticas de disponibilidad de agua.

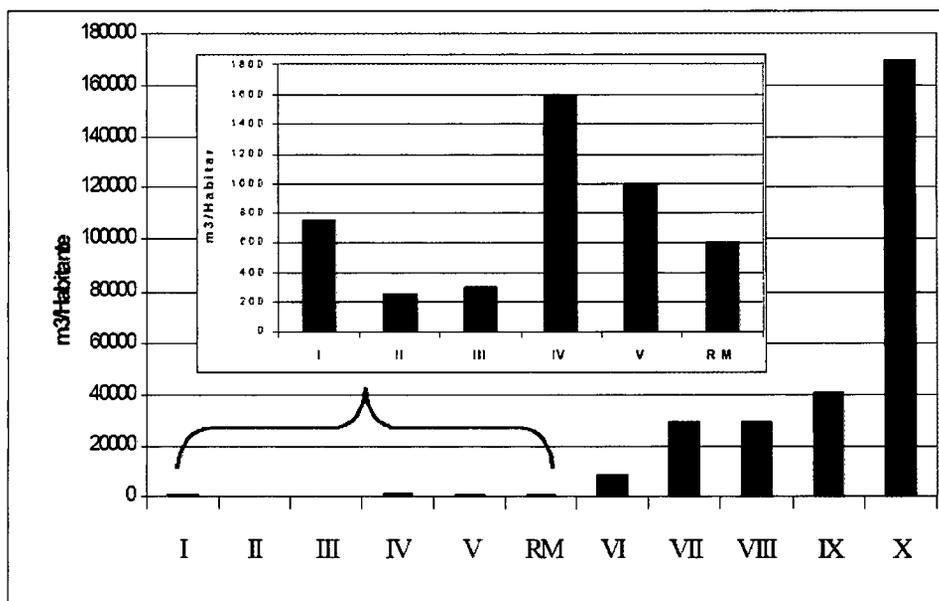


Figura 10. Disponibilidad de agua por habitante (Fuente: Salazar, 2003).

Cuadro 5. Caudales medios y caudales medios en desembocadura para diferentes ríos de Chile (Fuente: Salazar, 2003).

Región	Cuenca	Caudal medio entrada (m³/s)	Caudal medio salida (m³/s)	Caudal mínimo diario salida (m³/s)
I	Río Lluta	2,3	1,4	0,09
I	Río San José	1,5	0,0	0,0
I	Pampa Tamarugal	1,0	0,0	0,0
II	Río Loa	2,8	0,6	0,04
III	Río Copiapó	2,9	0,1	0,04
III	Río Huasco	3,5	1,7	0,30
IV	Río Elqui	8,1	1,0	0,15
IV	Río Limari	15,1	7,5	0,00
IV	Río Choapa	13,2	12,8	0,00
IV	Río Aconcagua	38,0	30,0	0,00
Reg. Metropol.	Río Maipo	116,0	100,0	1,00
VI	Río Rapel	130,0	174,0	1,00
VII	Río Maule	257,0	569,0	58,0
VIII	Río Bio Bio	639,0	1.000,0	120,0

#### 4.1.2. Estimación de oferta

Con el objetivo de obtener una estimación de la oferta hídrica para todas las cuencas consideradas en el punto 2, se utilizó una metodología basada en la estadística de caudales medios mensuales, proporcionados por el estudio de Cade-Idepe (DGA, 2004) para diferentes estaciones fluviométricas existentes en la zona de estudio. Para cada estación se calcula el promedio anual de los caudales ( $Q_p$ ), junto con el promedio de los caudales de los tres meses de mayor demanda evaporativa ( $Q_{pmin}$ ), determinados de la información climática del Balance Hídrico Nacional (DGA, 1987). Un ejemplo de la metodología utilizada para la determinación de la oferta, para los valores de la cuenca del río Lluta, con una excedencia del 50%, se presenta a partir del Cuadro 6.

Cuadro 6. Caudales medios mensuales con una excedencia del 50% del Río Lluta  
(Fuente: DGA, 2003)

Región	Cuenca	Río	Caudal Medio ( $m^3/s$ )												Qp ( $m^3/s$ )	Qpmin ( $m^3/s$ )
			Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar		
XV	Río Lluta	Estación Caracarani en Humapalca	0,31	0,31	0,32	0,38	0,32	0,25	0,22	0,21	0,25	0,58	0,51	0,40	0,34	0,45
XV	Río Lluta	Estación Colpitas en Alcérreca	0,46	0,40	0,41	0,49	0,46	0,36	0,37	0,35	0,39	0,58	0,82	0,67	0,48	0,60
XV	Río Lluta	Estación Lluta en Alcérreca	1,66	1,42	1,44	1,53	1,43	1,19	1,06	1,08	1,26	2,72	3,99	2,66	1,79	2,66
XV	Río Lluta	Estación Lluta en Chapizca	1,65	1,30	1,46	1,79	1,44	1,38	1,21	1,14	1,37	2,12	2,67	3,16	1,72	2,05
XV	Río Lluta	Estación Lluta en Panamericana	0,42	0,52	0,57	0,70	0,43	0,23	0,10	0,14	0,11	3,74	3,61	3,05	1,14	2,49

Para los valores del promedio de los caudales con un 50% de excedencia, se calculó un coeficiente ponderado ( $F_{Q_p}$ ), dividiendo cada valor de  $Q_p$  por la suma de todos los  $Q_p$  para el Río Lluta ( $5,47 m^3 s^{-1}$ ). A su vez, se obtienen los coeficientes ( $F_{Q_{pmin}}$ ), que corresponden a la división de los caudales  $Q_{pmin}$  por los caudales  $Q_p$ . De esta manera, el valor de coeficiente de distribución de descarga para la cuenca del Río Lluta para los caudales con un 50% de excedencia ( $F_{50\%\_Total}$ ), estará dado por la suma de los productos entre los coeficientes  $F_{Q_p}$  y  $F_{Q_{pmin}}$ . Estos valores se presentan en el Cuadro 7.

Cuadro 7. Coeficiente de distribución de descarga para los caudales medios mensuales con una excedencia del 50% del Río Lluta.

Región	Cuenca	Río	F <sub>Qp</sub>	F <sub>Qpmin</sub>	F <sub>50%_Total</sub>
XV	Río Lluta	Estación Caracarani en Humapalca	0,06	1,32	1,51
XV	Río Lluta	Estación Colpitas en Alcérreca	0,09	1,24	
XV	Río Lluta	Estación Lluta en Alcérreca	0,33	1,49	
XV	Río Lluta	Estación Lluta en Chapizca	0,32	1,19	
XV	Río Lluta	Estación Lluta en Panamericana	0,21	2,19	

Para los caudales con un 85% de excedencia se utilizó la misma metodología. Los valores de coeficiente de descarga de los caudales por cuenca para el 50 y 85% de excedencia, se presentan en el Anexo 6.

La estimación de los valores de Caudal de descarga (oferta) para cada cuenca, se obtienen de la multiplicación entre el coeficiente de descarga de cuenca (F<sub>50%\_Total</sub>, F<sub>85%\_Total</sub>) y el valor de escorrentía superficial al cierre de la cuenca (Es), obtenidos del Balance Hídrico Nacional (DGA, 1987). Los valores de caudales obtenidos para cada cuenca, con un 50 y 85% de excedencia, se presentan en el Anexo 7.

Dado que en este Capítulo se quiere estimar el déficit de las cuencas en estudio, se considera prudente utilizar los caudales para un 85% de excedencia como oferta disponible. Estos Caudales se presentan en el Cuadro 8.

Cabe destacar, que los valores de  $0 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  asignados para algunas cuencas costeras, sectores y ríos, pueden justificarse, según el Balance hídrico de Chile (DGA 1987), en que los valores de caudales registrados son inferiores a  $0,1 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  o no existían registros de caudales.

Cuadro 8. Valores de caudal medio (oferta) para los tres meses de máxima demanda con una probabilidad de excedencia de 85%.

COD. CUENCA	NOMBRE CUENCA	Q 85% (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )
010	Altiplanicas	10,57
011	Quebrada de la Concordia	0,00
012	Rio Lluta (en la panamericana)	1,67
013	Rio San Jose	0,00
014	Costeras R. San Jose-Q.Camarones	0,08
015	Q. Rio Camarones	0,59
016	Costeras R.Camarones-Pampa del Tamarugal	0,61
017	Pampa del Tamarugal	0,00
018	Costeras Tilviche-Loa	0,00
020	Fronterizas Salar Michincha-R.Loa	0,30
021	Rio Loa	0,61
022	Costeras R.Loa-Q.Caracoles	0,00
023	Fronterizas Salares Atacama-Socompa	0,00
024	Endorreica entre Fronterizas y Salar Atacama	0,00
025	Salar de Atacama	0,00
026	Endorreicas Salar Atacama-Vertiente Pacifico	0,00
027	Quebrada Caracoles	0,00
028	Quebrada la Negra	0,00
029	Costeras entre Q. la Negra y Q. Pan de Azucar	0,04
030	Endorreicas entre Frontera y Vertiente del Pacifico	0,00
031	Costeras Q.Pan de Azucar-R.Salado	0,00
032	Rio Salado	0,01
033	Costeras e Islas R.Salado-R.Copiapo	0,00
034	R. Copiapo	0,10
035	Costeras entre R.Copiapo y Q.Total	0,00
036	Q. Total y Costeras hasta Q.Carrizal	0,03
037	Quebrada Carrizal y Costeras hasta R. Huasco	0,00
038	Rio Huasco	1,36
039	Costeras e Islas entre R.Huasco y Cuarta Region	0,00
040	Costeras e Islas entre Tercera Region y Q. Los Choros	0,00
041	Rio los Choros	0,09
042	Costeras entre R. Los Choros y R. Elqui	0,00
043	Rio Elqui	0,25
044	Costeras entre Elqui y Limari	0,00
045	Rio Limari	5,32
046	Costeras entre R.Limari y R.Choapa	0,05
047	Rio Choapa	8,86
048	Costeras entre R.Choapa y R.Quilimari	0,10
049	Rio QuiLimari	0,10
050	Costeras Quilimari-Petorca	0,06
051	Rio Petorca	0,00
052	Rio Ligua	0,00
053	Costeras Ligua-Aconcagua	0,75
054	Rio Aconcagua	48,61
055	Costeras entre Aconcagua y Maipo	4,68
057	Rio Maipo	135,70
058	Costeras entre Maipo y Rapel	2,17
060	Rio Rapel	212,39
061	Costeras Rapel-E. Nihue	17,62
070	Costeras entre limite Region y R. Mataquito	17,62
071	Rio Mataquito	164,15
072	Costeras Mataquito-Maule	3,25
073	Rio Maule	282,53
074	Costeras Maule y Limite Region	11,84
080	Costeras entre limite Region y R. Itata	11,84
081	Rio Itata	126,74

## **4.2 Aguas subterráneas**

### **4.2.1 Antecedentes sobre acuíferos**

Los principales acuíferos en Chile se concentran en la zona Norte (I y II Región) y en los valles transversales (III y IV Región) y en el Valle Central (V a X Región). En la Figura 11 se puede apreciar un plano indicativo de los acuíferos identificados en Chile, que según antecedentes de la DGA son más de un centenar. En general los acuíferos son superficiales y de gran espesor (Figueroa, 2004).

En el Norte Grande (Regiones I y II) las formaciones acuíferas se ubican principalmente en la Pampa y en los valles costeros. La recarga está asociada a infiltraciones de aguas lluvias que caen en la parte alta de las cuencas durante el invierno Boliviano, por lo que una gran parte del almacenamiento existente en la Pampa y en la costa, corresponde a agua antigua que ha infiltrado desde las zonas de recarga.

En el Norte Chico (Regiones III y IV) los principales acuíferos se sitúan en los valles fluviales, aunque también existen acuíferos costeros. La recarga se origina por las precipitaciones y las infiltraciones de escorrentía superficial, especialmente durante el derretimiento de nieves y el invierno Boliviano.

Los acuíferos del Valle Central se sitúan sobre un relleno de tipo sedimentario, constituido por sedimentos de carácter aluvial depositados por los ríos que descienden desde la cordillera andina, de carácter eminentemente volcánico. Al llegar a las planicies del Valle Central, estos ríos ven disminuida su energía y capacidad de transporte, depositando su carga de bloques, gravas y arenas, determinando la formación de acuíferos de buena conductividad hidráulica, siendo la mayoría de ellos del tipo libre o semiconfinado. Las profundidades a las cuales se encuentra el nivel freático son variables, disminuyendo desde los sectores del valle central próximos a la cordillera de Los Andes hacia los cursos medios e inferiores de los ríos, donde llega a pocos metros (Peña et al., 1990). Además, la interacción entre aguas superficiales y subterráneas, en general en Chile, es muy activa (Peña, 1992), por lo que el nivel freático suele elevarse considerablemente en épocas invernales como

consecuencia de un mayor volumen de precipitaciones, llegando normalmente a muy poca distancia de la superficie o simplemente aflorando sobre ella.



Figura 11. Distribución de formaciones acuíferas en Chile (adaptado de Figueroa, 2004).

Estimaciones hechas por la Dirección General de Aguas, indican que la disponibilidad renovable de agua subterránea en Chile, en la zona ubicada al norte de Santiago, asciende a  $65 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ; para esta misma área los derechos solicitados al año 2000 eran de  $300 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  (Muñoz, 2000). Lo anterior implica una fuerte controversia pues la DGA no otorga más derechos que la capacidad renovable de los acuíferos, pero los intereses privados reclaman un mayor aprovechamiento del agua subterránea, lo que permitiría un mayor desarrollo económico, que esta hoy muy limitado por la escasa disponibilidad de agua. En ese aspecto cabe destacar que el mercado de los derechos de aguas funciona mucho mejor en la zona norte del país que en la zona sur.

Desde la VI Región al sur, los derechos solicitados al año 2000 ascienden a unos  $20 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  (Muñoz, 2000) lo que implica una menor presión sobre la explotación de aguas subterráneas. Esto se explica por la relativa mayor abundancia de recursos superficiales. Sin embargo es importante considerar que desde la VIII Región hacia el norte los derechos de aprovechamiento de las aguas superficiales están agotados, lo que significa que se han otorgado derechos de uso sobre todas las aguas superficiales disponibles. Esto implica que cada vez habrá una mayor demanda por los derechos de explotación del agua subterránea, lo que conlleva a la necesidad de disponer de una completa caracterización de los acuíferos, para un correcto plan de explotación sustentable.

En vista de todos los antecedentes antes mencionados, el Consultor considera fundamental el desarrollo de sistemas de recarga artificial de aguas subterráneas, como una política de mejoramiento de la sustentabilidad de los sistemas de agua subterránea a escala de cuenca. Para ello, es necesario realizar un trabajo exhaustivo en la caracterización de la interacción entre los sistemas de aguas subterráneas y superficiales, como también, definir la forma como naturalmente se recargan los acuíferos.

#### **4.2.2 Recarga de aguas subterráneas**

Para los acuíferos que se ubican desde la Región Metropolitana al norte, la recarga media estimada alcanza aproximadamente a  $55 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ . En tanto que los

derechos de agua autorizados alcanzan a  $107 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  con un uso efectivo del orden de  $60 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ . Por su parte la demanda actual por nuevos derechos llega a  $300 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  (Figura 12). El resto del país (al sur de la Región Metropolitana) no cuenta con información detallada de su potencial recarga, debido a la menor importancia de las aguas subterráneas como fuente de abastecimiento (Salazar 2003), aunque sea han realizado estudios y/o modelos hidrogeológicos en zonas acotadas.

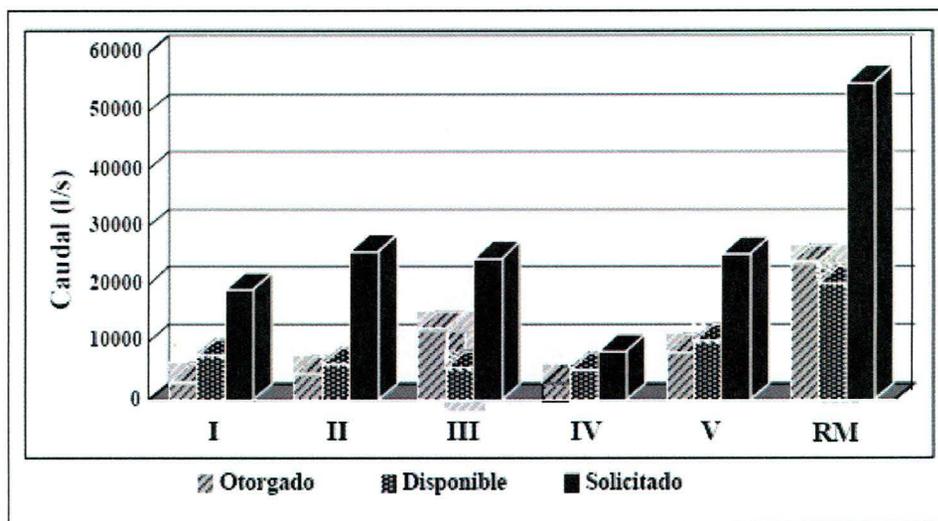


Figura 12. Disponibilidad y demanda de aguas subterráneas (Fuente: Salazar, 2003).

### 4.3 Efecto de nuevos proyectos de riego

Los proyectos con Declaraciones de Impacto Ambiental y/o Estudios de Impacto Ambiental, presentadas al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental, que se encuentran aprobadas o en calificación, se presentan en el Anexo 8. Cabe destacar que a pesar de que los volúmenes de estos embalses son significativos (Anexo 8), el efecto que pudiesen producir la mayoría de estos en el balance hídrico es de carácter local. A su vez, las fechas de inicio de operación dependen de las características de cada proyecto, así como de factores externos que puedan afectar la puesta en marcha. Por lo anterior, no es prudente considerar en esta etapa los aportes en la oferta que pudiesen generar estos proyectos en el balance hídrico de cada cuenca.

Para las cuencas deficitarias definidas en este Capítulo, se consideraran para el Capítulo III los proyectos de embalses con una mayor probabilidad de entrar en operación para un horizonte de 10 años.

#### **4.4 Conclusiones**

Aún cuando se dispone de estudios que muestran una tendencia decreciente de precipitaciones en el régimen climático a largo plazo (e.g. promedios de los últimos 30 años), la literatura técnica internacional ha prestado especial atención a la incerteza asociada a estas predicciones, dada la complejidad de los sistemas climáticos, así como la inevitable debilidad de los modelos de clima y modelos hidrológicos en la representación espacio-temporal de los procesos hidroclimáticos.

Por otra parte, el clima en Chile está fuertemente influenciado por los sistemas climáticos globales como el Fenómeno del Niño o las variaciones tropicales en la temperatura superficial del mar. Por ejemplo, en el Valle Central de Chile, para condiciones de El Niño, la precipitación puede ser hasta un 40% superior al promedio anual.

Dado el estado del arte en cuanto a confiabilidad y fiabilidad de los escenarios de cambio climático, en conjunto con técnicas de downscaling y modelación hidrológica de cuencas intervenidas, es posible establecer que la incerteza asociada a proyectar cambios en la disponibilidad de agua para los próximos 10 años a nivel de cuenca y subcuenca, es comparable, e incluso mayor, a la variabilidad intrínseca del clima asociada a, por ejemplo el Fenómeno de El Niño. En efecto, el estado actual del conocimiento permite predecir el clima con un horizonte anual, además del hecho que, en promedio, para el horizonte de 10 años se tendrán 2 eventos El Niño y 1 evento La Niña.

Dados los antecedentes anteriores se considera que la oferta por precipitaciones no variará en promedio significativamente para un horizonte de 10 años.

## 5 Determinación del déficit hídrico

Para la determinación de las zonas con déficit hídrico es necesario comparar los antecedentes de demanda y oferta hídrica, analizados en los puntos anteriores, con otros antecedentes obtenidos desde la DGA para este estudio, como son las declaraciones de áreas de restricción y los informes de sequía elaborados a principios del 2008.

### 5.1 Análisis de antecedentes

#### 5.1.1 Áreas de prohibición o restricción

Cuando se han detectado extracciones de aguas subterráneas que generan efectos medibles en los niveles de un acuífero, La Dirección General de Aguas tiene la facultad legal (artículo N°58 del Código de Aguas) de declarar áreas de prohibición o de restricción para dichos acuíferos. Las áreas declaradas a la fecha con condiciones de prohibición se presentan en el Cuadro 9 y las zonas con condición de restricción en el Cuadro 10.

Cuadro 9. Áreas declaradas con prohibición.

Región	Cuenca	Sector	Public. Oficial
Región de Arica y Parinacota	Río San José - Río Lluta	Azapa	15-5-1996
Región de Atacama	Río Copiapó	Copiapó	15-7-1994
Región de Valparaíso y Región Metropolitana	Costeras Aconcagua - Maipo	Estero El Membrillo	-

**Cuadro 10. Áreas declaradas con restricción.**

Región	Cuenca	Sector	Public. Oficial
Regiones de Arica-Parinacota y Tarapacá	Altiplánicas	Salar de Coposa	2-9-2002
Región de Tarapacá	Pampa del Tamarugal	Salar Sur Viejo	1-4-2004
Región de Antofagasta	Quebrada Caracoles	Sierra Gorda	15-4-2002
Región de Antofagasta	Quebrada La Negra	Rosario y Aguas Blancas	2-11-2005
Región de Atacama	Río Copiapó	Copiapó	30-4-2001
Región de Coquimbo	Río Los Choros	Tres Cruces	1-10-2005
Región de Coquimbo	Río Los Choros	Punta Colorada	1-10-2005
Región de Coquimbo	Río Los Choros	Quebrada Choros Alto	1-10-2005
Región de Coquimbo	Río Elqui	Elqui Bajo, Santa Gracia y Serena Norte	15-5-2007
Región de Coquimbo	Costeras Elqui - Limarí	Peñuelas	16-2-2004
Región de Coquimbo	Costeras Elqui - Limarí	Culebrón	16-2-2004
Región de Coquimbo	Costeras Elqui - Limarí	Lagunillas	17-2-2004
Región de Valparaíso	Río Petorca	Petorca	16-6-1997
Región de Valparaíso	Costeras	Estero Cachagua, Estero Papudo, Maipo Desembocadura, Sector Catapilco Subsector La Laguna, Sector Horcón, Sector Quintero Subsector Dunas de Quintero, Estero Las Salinas Sur, Estero Puchuncaví y Rocas de Sto. Dgo.	1-12-2005
Región de Valparaíso	Río La Ligua	La Ligua	15-7-2004
Región de Valparaíso	Costeras Aconcagua - Maipo	Estero San Jerónimo	15-11-2004
Región de Valparaíso y Región Metropolitana	Costeras Aconcagua - Maipo	Lo Ovalle	15-04-2002
Región de Valparaíso y Región Metropolitana	Costeras Aconcagua - Maipo	Yalí Bajo El Prado	1-2-2006
Región de Valparaíso	Costeras Aconcagua - Maipo	Lo Orozco, La Vinilla- Casablanca y Los Perales	1-10-2005
Región Metropolitana	Río Maipo	Colina Inferior	15-4-2002
Región Metropolitana	Río Maipo	Chicureo	14-3-2001
Región Metropolitana	Río Maipo	Mapocho Alto (Las Gualtatas, Lo Barnechea, Vitacura)	2-11-2004
Región Metropolitana	Río Maipo	Puange Alto, Puange Medio, Cholqui, Popeta, Melipilla y La Higuera	15-10-2008
Región Metropolitana	Río Maipo	Yalí Alto	1-12-2005
Región Metropolitana	Río Maipo	Til-Til, Chacabuco- Polpaico, Lampa, Colina Sur, Stgo. Norte y Central	1-10-2005
Región Metropolitana	Río Maipo	Alhué	16-8-2008
Región del Libertador General Bernardo O'higgins	Río Rapel	Las Cabras	16-8-2008
Región del Libertador General Bernardo O'higgins	Río Rapel	Graneros Rancagua y Olivar	15-5-2007
Región del Libertador General Bernardo O'higgins	Río Rapel	Codegua	2-1-2008
Región del Libertador General Bernardo O'higgins	Río Rapel	Estero Las Cadenas- Marchigüe	2-1-2008

### 5.1.2 Zonas de escasez

Producto de la condición de sequía que se produjo en la temporada 2007-2008, la Dirección General de Aguas emitió una serie de informes mensuales donde se establecían cuales cuencas reunían las condiciones para ser consideradas zonas de escasez, para lo cual se consideraron los siguientes antecedentes:

- Los últimos caudales comparados con caudales de referencia (medios mensuales o caudal probabilidad 50% según sea la región).
- Las precipitaciones del último período, comparadas con el promedio histórico correspondiente.
- El período de retorno de las precipitaciones registradas

Las cuencas declaradas como zonas de escasez durante la temporada 2007-2008 fueron las indicadas en el Cuadro 11. Como se puede ver, estas cuencas se ubicaron desde la región de Coquimbo al sur.

Cuadro 11. Cuencas declaradas como zonas de escasez durante la temporada 2007-2008.

Región	Cuenca	Río
Coquimbo	Río Choapa	Chilinga
		Illapel
	Río Cogoti	Cogoti
	Río Combarbala	Combarbala
	Río Pama	Pama
Valparaíso	Río Aconcagua	Aconcagua
	Río Petorca	Petorca
	Río Ligua	Ligua
Metropolitana	Río Maipú	Maipo
		Mapocho
O'Higgins	Río Cachapoal	Cachapoal
	Río Tiguiririca	Tiguiririca
Maule	Río Mataquito	Mataquito
	Río Maule	Maule
Biobío	Río Itata	Niquén
		Perquillauquén
		Changaral
		Larqui

## **5.2 Comparación de oferta y demanda**

Para la determinación de las zonas con déficit hídrico para la situación actual y para un horizonte de 10 años, se comparan los antecedentes de demanda y oferta hídrica, analizados en los puntos anteriores. Los valores de caudal de demanda, oferta y de déficit para cada cuenca, se presentan en el Anexo 9. En el Cuadro 12, se presentan los caudales deficitarios para la oferta de un 85% de excedencia para situación actual y para un horizonte de 10 años.

En el Cuadro 12, se aprecian los valores de caudal deficitario por cuenca, destacando que los valores negativos son los que presentan déficit. Se puede apreciar que desde la cuenca Costeras entre Maipo y Rapel (número 58) hacia el norte, casi la totalidad de las cuencas presentan déficit hídrico para los caudales del 85% de excedencia. Cabe destacar que para el caso de la cuenca del Río Aconcagua, presenta un cambio en su condición bajo la proyección de la demanda a 10 años y el 85% de excedencia de caudales.

Para poder seleccionar las cuencas con mayor déficit hídrico, se presenta en el Cuadro 13, en orden de prioridad en función de los valores de caudal de déficit hídrico por cuenca para el escenario más crítico, que corresponde a una oferta con un 85% de excedencia y una demanda para un horizonte de 10 años.

Cuadro 12. Resumen de caudales de demanda consuntiva, oferta para un 85% de excedencia y de caudales deficitarios por cuenca, para situación actual y un horizonte de 10 años (2018).

COD.	NOMBRE CUENCA	Oferta 85% (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )	Demanda actual (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )	Demanda 10 años (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )	Déficit Actual (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )	Déficit a 10 años (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )
010	Altiplánicas	10,57	3,14	3,45	7,44	7,13
011	Quebrada de la Concordia	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
012	Rio Lluta (en la panamericana)	1,67	2,58	2,62	-0,90	-0,95
013	Rio San Jose	0,00	2,21	3,21	-2,21	-3,21
014	Costeras R. San Jose-Q. Camarones	0,08	0,15	0,15	-0,07	-0,07
015	Q. Rio Camarones	0,59	2,13	2,13	-1,54	-1,54
016	Costeras R. Camarones-Pampa del Tamarugal	0,61	0,93	0,93	-0,32	-0,32
017	Pampa del Tamarugal	0,00	2,51	2,89	-2,51	-2,89
018	Costeras Tilviche-Loa	0,00	2,32	4,53	-2,32	-4,53
020	Fronterizas Salar Michincha-R. Loa	0,30	0,02	0,02	0,28	0,28
021	Rio Loa	0,61	8,19	9,91	-7,58	-9,30
022	Costeras R. Loa-Q. Caracoles	0,00	3,62	5,03	-3,62	-5,03
023	Fronterizas Salares Atacama-Socompa	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
024	Endorreica entre Fronterizas y Salar Atacama	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
025	Salar de Atacama	0,00	2,71	2,89	-2,71	-2,89
026	Endorreicas Salar Atacama-Vertiente Pacifico	0,00	1,04	1,35	-1,04	-1,35
027	Quebrada Caracoles	0,00	3,24	4,29	-3,24	-4,29
028	Quebrada la Negra	0,00	0,43	0,55	-0,43	-0,55
029	Costeras entre Q. la Negra y Q. Pan de Azucar	0,04	2,34	3,04	-2,30	-3,00
030	Endorreicas entre Frontera y Vertiente del Pacifico	0,00	0,03	0,08	-0,03	-0,08
031	Costeras Q. Pan de Azucar-R. Salado	0,00	0,19	0,52	-0,19	-0,52
032	Rio Salado	0,01	0,42	1,03	-0,41	-1,02
033	Costeras e Islas R. Salado-R. Copiapo	0,00	0,76	1,74	-0,76	-1,74
034	R. Copiapo	0,10	5,75	6,24	-5,65	-6,14
035	Costeras entre R. Copiapo y Q. Totoral	0,00	0,03	0,07	-0,03	-0,07
036	Q. Totoral y Costeras hasta Q. Carrizal	0,03	0,04	0,10	-0,01	-0,07
037	Quebrada Carrizal y Costeras hasta R. Huasco	0,00	0,06	0,17	-0,06	-0,17
038	Rio Huasco	1,36	8,36	9,40	-6,99	-8,04
039	Costeras e Islas entre R. Huasco y Cuarta Region	0,00	0,46	0,91	-0,46	-0,91
040	Costeras e Islas entre Tercera Region y Q. Los Choros	0,00	0,00	0,01	0,00	-0,01
041	Rio los Choros	0,09	0,12	0,21	-0,02	-0,12
042	Costeras entre R. Los Choros y R. Elqui	0,00	0,01	0,01	-0,01	-0,01
043	Rio Elqui	0,25	8,25	13,61	-7,99	-13,36
044	Costeras entre Elqui y Limari	0,00	5,07	5,24	-5,07	-5,24
045	Rio Limari	5,32	13,02	13,64	-7,70	-8,33
046	Costeras entre R. Limari y R. Choapa	0,05	1,96	1,97	-1,92	-1,92
047	Rio Choapa	8,86	6,14	8,68	2,72	0,18
048	Costeras entre R. Choapa y R. Quilimari	0,10	0,13	0,20	-0,03	-0,10
049	Rio QuiLimari	0,10	0,12	0,14	-0,03	-0,04
050	Costeras Quilimari-Petorca	0,06	0,03	0,05	0,03	0,01
051	Rio Petorca	0,00	4,36	4,27	-4,36	-4,27
052	Rio Ligua	0,00	5,30	5,44	-5,30	-5,44
053	Costeras Ligua-Aconcagua	0,75	1,73	1,97	-0,98	-1,22
054	Rio Aconcagua	48,61	46,94	50,92	1,67	-2,31
055	Costeras entre Aconcagua y Maipo	4,68	9,60	10,00	-4,92	-5,31
057	Rio Maipo	135,70	177,69	190,09	-41,99	-54,39
058	Costeras entre Maipo y Rapel	2,17	7,64	7,64	-5,47	-5,47
060	Rio Rapel	212,39	122,05	122,82	90,34	89,57
061	Costeras Rapel-E. Nihue	17,62	1,16	4,11	16,46	13,51
070	Costeras entre limite Region y R. Mataquito	17,62	0,13	0,14	17,48	17,47
071	Rio Mataquito	164,15	51,60	52,29	112,55	111,86
072	Costeras Mataquito-Maule	3,25	0,17	0,09	3,08	3,16
073	Rio Maule	282,53	178,66	186,27	103,87	96,26
074	Costeras Maule y Limite Region	11,84	0,37	0,40	11,47	11,44
080	Costeras entre limite Region y R. Itata	11,84	0,16	0,18	11,67	11,66
081	Rio Itata	126,74	38,73	56,92	88,01	69,82

Cuadro 13. Cuencas en orden de prioridad en función de los valores de caudal de déficit hídrico por cuenca para el escenario más crítico, para oferta con un 85% de excedencia y una demanda para un horizonte de 10 años.

COD.	Región	Nombre Cuenca	Deficit a 10 años (m <sup>3</sup> /s) 85% de excedencia
057	RM	Rio Maipo	-54,39
043	IV	Rio Elqui	-13,36
021	II	Rio Loa	-9,30
045	IV	Rio Limari	-8,33
038	III	Rio Huasco	-8,04
034	III	Rio Copiapo	-6,14
058	V sur	Costeras entre Maipo y Rapel	-5,47
052	V norte	Rio Ligua	-5,44
055	V sur	Costeras entre Aconcagua y Maipo	-5,31
044	IV	Costeras entre Elqui y Limari	-5,24
022	II	Costeras R.Loa-Q.Caracoles	-5,03
018	I	Costeras Tivilche-Loa	-4,53
027	II	Quebrada Caracoles	-4,29
051	V norte	Rio Petorca	-4,27
013	XV	Rio San Jose	-3,21
029	II	Costeras entre Q. la Negra y Q. Pan de Azucar	-3,00
025	II	Salar de Atacama	-2,89
017	I	Pampa del Tamarugal	-2,89
054	V sur	Rio Aconcagua	-2,31
046	IV	Costeras entre R.Limari y R.Choapa	-1,92
033	III	Costeras e Islas R.Salado-R.Copiapo	-1,74
015	I y XV	Q. Rio Camarones	-1,54
026	II	Endorreicas Salar Atacama-Vertiente Pacifico	-1,35
053	V norte	Costeras Ligua-Aconcagua	-1,22
032	III	Rio Salado	-1,02
012	XV	Rio Lluta (en la panamericana)	-0,95
039	III	Costeras e Islas entre R.Huasco y Cuarta Region	-0,91
028	II	Quebrada la Negra	-0,55
031	III	Costeras Q.Pan de Azucar-R.Salado	-0,52
016	I	Costeras R.Camarones-Pampa del Tamarugal	-0,32
037	III	Quebrada Carrizal y Costeras hasta R. Huasco	-0,17
041	IV	Rio los Choros	-0,12
048	IV	Costeras entre R.Choapa y R.Quilimari	-0,10
030	III	Endorreicas entre Frontera y Vertiente del Pacifico	-0,08
014	XV	Costeras R. San Jose-Q.Camarones	-0,07
036	III	Q.Total y Costeras hasta Q.Carrizal	-0,07
035	III	Costeras entre R.Copiapo y Q.Total	-0,07
049	IV	Rio QuiLimari	-0,04
042	IV	Costeras entre R. Los Choros y R. Elqui	-0,01
040	IV	Costeras e Islas entre Tercera Region y Q. Los Choros	-0,01
024	II	Endorreica entre Fronterizas y Salar Atacama	0,00
011	XV	Quebrada de la Concordia	0,00
023	II	Fronterizas Salares Atacama-Socompa	0,00
050	V norte	Costeras Quilimari-Petorca	0,01
047	IV	Rio Choapa	0,18
020	II	Fronterizas Salar Michincha-R.Loa	0,28
072	VII	Costeras Mataquito-Maule	3,16
010	I y XV	Altiplanicas	7,13
074	VII	Costeras Maule y Limite Region	11,44
080	VIII	Costeras entre limite Region y R. Itata	11,66
061	VI	Costeras Rapel-E.Nilahue	13,51
070	VII	Costeras entre limite Region y R. Mataquito	17,47
081	VIII	Rio Itata	69,82
060	VI	Rio Rapel	89,57
073	VII	Rio Maule	96,26
071	VII	Rio Mataquito	111,86

### 5.3 Análisis de sensibilidad

Para obtener una estimación de las condiciones de déficit hídricos a los cuales pueden estar sometidas las cuencas, se realizó un análisis de sensibilidad del déficit, en base a las variables en estudio (demanda, oferta), manteniendo constante la oferta e incrementando en un 10 y 20% la demanda para cada cuenca. Los resultados obtenidos se presentan en los Cuadros 14 y 15.

Cuadro 14. Caudales deficitarios para situación actual, bajo el análisis de demanda con un 10 y 20% de incremento, con los caudales de un 50 y 85% de excedencia.

COD.	NOMBRE CUENCA	Demanda+10% y Oferta 50% de exc.	Demanda+20% y Oferta 50% de exc.	Demanda+10% y Oferta 85% de exc.	Demanda+20% y Oferta 85% de exc.
010	Altiplanicas	8,59	8,27	7,12	6,81
011	Quebrada de la Concordia	0,00	0,00	0,00	0,00
012	Rio Lluta (en la panamericana)	-0,41	-0,92	-1,16	-1,42
013	Rio San Jose	-2,21	-2,65	-2,43	-2,65
014	Costeras R. San Jose-Q.Camarones	-0,07	-0,10	-0,09	-0,10
015	Q. Rio Camarones	-1,54	-1,96	-1,75	-1,96
016	Costeras R.Camarones-Pampa del Tamarugal	-0,32	-0,51	-0,41	-0,51
017	Pampa del Tamarugal	-2,51	-3,01	-2,76	-3,01
018	Costeras Tilviche-Loa	-2,32	-2,78	-2,55	-2,78
020	Fronterizas Salar Michincha-R.Loa	0,28	0,27	0,28	0,27
021	Rio Loa	-7,58	-9,22	-8,39	-9,21
022	Costeras R.Loa-Q.Caracoles	-3,62	-4,34	-3,98	-4,34
023	Fronterizas Salares Atacama-Socompa	0,00	0,00	0,00	0,00
024	Endorreica entre Fronterizas y Salar Atacama	0,00	0,00	0,00	0,00
025	Salar de Atacama	-2,71	-3,25	-2,98	-3,25
026	Endorreicas Salar Atacama-Vertiente Pacifico	-1,04	-1,25	-1,15	-1,25
027	Quebrada Caracoles	-3,24	-3,88	-3,56	-3,88
028	Quebrada la Negra	-0,43	-0,52	-0,47	-0,52
029	Costeras entre Q. la Negra y Q. Pan de Azucar	-2,30	-2,77	-2,54	-2,77
030	Endorreicas entre Frontera y Vertiente del Pacifico	-0,03	-0,04	-0,03	-0,04
031	Costeras Q.Pan de Azucar-R.Salado	-0,19	-0,23	-0,21	-0,23
032	Rio Salado	-0,41	-0,49	-0,45	-0,49
033	Costeras e Islas R.Salado-R.Copiapo	-0,76	-0,91	-0,83	-0,91
034	R. Copiapo	-5,63	-6,78	-6,23	-6,80
035	Costeras entre R.Copiapo y Q.Total	-0,03	-0,03	-0,03	-0,03
036	Q.Total y Costeras hasta Q.Camizal	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01
037	Quebrada Camizal y Costeras hasta R. Huasco	-0,06	-0,07	-0,07	-0,07
038	Rio Huasco	-6,71	-8,38	-7,83	-8,66
039	Costeras e Islas entre R.Huasco y Cuarta Region	-0,46	-0,55	-0,51	-0,55
040	Costeras e Islas entre Tercera Region y Q. Los Choros	0,00	0,00	0,00	0,00
041	Rio los Choros	-0,02	-0,05	-0,04	-0,05
042	Costeras entre R. Los Choros y R. Elqui	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01
043	Rio Elqui	-7,95	-9,60	-8,82	-9,64

Continuación Cuadro 14...

COD.	NOMBRE CUENCA	Demanda+10% y Oferta 50% de exc.	Demanda+20% y Oferta 50% de exc.	Demanda+10% y Oferta 85% de exc.	Demanda+20% y Oferta 85% de exc.
044	Costeras entre Elqui y Limari	-5,07	-6,08	-5,58	-6,08
045	Rio Limari	-5,35	-7,95	-9,01	-10,31
046	Costeras entre R.Limari y R.Choapa	-1,92	-2,31	-2,11	-2,31
047	Rio Choapa	4,98	3,75	2,10	1,49
048	Costeras entre R.Choapa y R.Quilimari	-0,03	-0,05	-0,04	-0,05
049	Rio QuiLimari	-0,03	-0,05	-0,04	-0,05
050	Costeras Quilimari-Petorca	0,03	0,03	0,03	0,03
051	Rio Petorca	-4,36	-5,23	-4,79	-5,23
052	Rio Ligua	-5,30	-6,35	-5,82	-6,35
053	Costeras Ligua-Aconcagua	-0,98	-1,33	-1,15	-1,33
054	Rio Aconcagua	3,71	-5,68	-3,02	-7,71
055	Costeras entre Aconcagua y Maipo	-4,92	-6,84	-5,88	-6,84
057	Rio Maipo	-34,38	-69,92	-59,76	-77,53
058	Costeras entre Maipo y Rapel	-5,47	-7,00	-6,24	-7,00
060	Rio Rapel	68,63	44,22	78,13	65,93
061	Costeras Rapel-E.Nilahue	16,46	16,22	16,34	16,22
070	Costeras entre limite Region y R. Mataquito	17,48	17,46	17,47	17,46
071	Rio Mataquito	115,63	105,31	107,40	102,24
072	Costeras Mataquito-Maule	3,08	3,05	3,07	3,05
073	Rio Maule	107,20	71,47	86,01	68,14
074	Costeras Maule y Limite Region	11,47	11,39	11,43	11,39
080	Costeras entre limite Region y R. Itata	11,67	11,64	11,66	11,64
081	Rio Itata	85,21	77,47	84,14	80,26

Cuadro 15. Caudales deficitarios para situación proyectada a 10 años, bajo el análisis de demanda con un 10 y 20% de incremento, con los caudales de un 50 y 85% de excedencia.

COD.	NOMBRE CUENCA	Demanda+10% y Oferta 50% de exc.	Demanda+20% y Oferta 50% de exc.	Demanda+10% y Oferta 85% de exc.	Demanda+20% y Oferta 85% de exc.
010	Altiplanicas	8,25	7,90	6,78	6,44
011	Quebrada de la Concordia	0,00	0,00	0,00	0,00
012	Rio Luta (en la panamericana)	-0,71	-0,97	-1,21	-1,47
013	Rio San Jose	-3,53	-3,85	-3,53	-3,85
014	Costeras R. San Jose-Q.Camarones	-0,09	-0,10	-0,09	-0,10
015	Q. Rio Camarones	-1,75	-1,96	-1,75	-1,96
016	Costeras R.Camarones-Pampa del Tamarugal	-0,41	-0,51	-0,41	-0,51
017	Pampa del Tamarugal	-3,18	-3,46	-3,18	-3,46
018	Costeras Tilviche-Loa	-4,98	-5,44	-4,98	-5,44
020	Fronterizas Salar Michincha-R.Loa	0,27	0,27	0,27	0,27
021	Rio Loa	-10,29	-11,28	-10,29	-11,28
022	Costeras R.Loa-Q.Caracoles	-5,53	-6,04	-5,53	-6,04
023	Fronterizas Salares Atacama-Socompa	0,00	0,00	0,00	0,00
024	Endorreica entre Fronterizas y Salar Atacama	0,00	0,00	0,00	0,00
025	Salar de Atacama	-3,18	-3,47	-3,18	-3,47
026	Endorreicas Salar Atacama-Vertiente Pacifico	-1,49	-1,63	-1,49	-1,63
027	Quebrada Caracoles	-4,71	-5,14	-4,71	-5,14
028	Quebrada la Negra	-0,61	-0,66	-0,61	-0,66
029	Costeras entre Q. la Negra y Q. Pan de Azucar	-3,30	-3,60	-3,30	-3,60
030	Endorreicas entre Frontera y Vertiente del Pacifico	-0,09	-0,10	-0,09	-0,10
031	Costeras Q.Pan de Azucar-R.Salado	-0,57	-0,63	-0,57	-0,63
032	Rio Salado	-1,12	-1,22	-1,12	-1,22
033	Costeras e Islas R.Salado-R.Copiapo	-1,91	-2,09	-1,91	-2,09
034	R. Copiapo	-6,75	-7,38	-6,77	-7,39
035	Costeras entre R.Copiapo y Q.Total	-0,07	-0,08	-0,07	-0,08

Continuación Cuadro 15...

COD.	NOMBRE CUENCA	Demanda+10% y Oferta 50% de exc.	Demanda+20% y Oferta 50% de exc.	Demanda+10% y Oferta 85% de exc.	Demanda+20% y Oferta 85% de exc.
036	Q.Total y Costeras hasta Q.Camizal	-0,08	-0,09	-0,08	-0,09
037	Quebrada Carrizal y Costeras hasta R. Huasco	-0,19	-0,20	-0,19	-0,20
038	Río Huasco	-8,70	-9,64	-8,98	-9,92
039	Costeras e Islas entre R.Huasco y Cuarta Region	-1,00	-1,09	-1,00	-1,09
040	Costeras e Islas entre Tercera Region y Q. Los Choros	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01
041	Río los Choros	-0,14	-0,16	-0,14	-0,16
042	Costeras entre R. Los Choros y R. Elqui	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01
043	Río Elqui	-14,68	-16,04	-14,72	-16,08
044	Costeras entre Elqui y Limari	-5,76	-6,29	-5,76	-6,29
045	Río Limari	-7,33	-8,70	-9,69	-11,06
046	Costeras entre R.Limari y R.Choapa	-2,12	-2,31	-2,12	-2,31
047	Río Choapa	1,57	0,70	-0,69	-1,56
048	Costeras entre R.Choapa y R.Quilimari	-0,12	-0,14	-0,12	-0,14
049	Río QuiLimari	-0,06	-0,07	-0,06	-0,07
050	Costeras Quilimari-Petorca	0,01	0,01	0,01	0,01
051	Río Petorca	-4,70	-5,13	-4,70	-5,13
052	Río Ligua	-5,99	-6,53	-5,99	-6,53
053	Costeras Ligua-Aconcagua	-1,42	-1,61	-1,42	-1,61
054	Río Aconcagua	-5,37	-10,46	-7,40	-12,50
055	Costeras entre Aconcagua y Maipo	-6,31	-7,31	-6,31	-7,31
057	Río Maipo	-65,80	-84,81	-73,40	-92,41
058	Costeras entre Maipo y Rapel	-6,24	-7,00	-6,24	-7,00
060	Río Rapel	55,58	43,30	77,29	65,01
061	Costeras Rapel-E.Niñahue	13,10	12,68	13,10	12,68
070	Costeras entre limite Region y R. Mataquito	17,46	17,45	17,46	17,45
071	Río Mataquito	109,70	104,47	106,63	101,40
072	Costeras Mataquito-Maule	3,15	3,14	3,15	3,14
073	Río Maule	80,96	62,34	77,64	59,01
074	Costeras Maule y Limite Region	11,40	11,36	11,40	11,36
080	Costeras entre limite Region y R. Itata	11,64	11,62	11,64	11,62
081	Río Itata	61,33	55,64	64,13	58,44

En el Cuadro 14, se puede observar que si se genera un incremento en la demanda de hasta un 20%, sólo la cuenca del Río Aconcagua estaría en condiciones deficitarias para la situación actual, bajo los caudales del 50 y 85% de excedencia. Para el caso en que se proyecta la demanda a 10 años (Cuadro 15), se puede apreciar que la cuenca del Río Choapa presenta déficit solo para el caudal del 85% de excedencia, en cambio la cuenca del Río Aconcagua, presenta déficit para los dos caudales.

Cabe señalar que la selección final de las cuencas deficitarias, no se basa sólo en valores de caudal, sino también en aspectos entre los cuales se encuentran:

- Asentamientos indígenas
- Tamaño de cuenca
- Potencial de desarrollo agrícola

En trabajo conjunto con la contraparte técnica de la CNR, y tomando en cuenta todos los antecedentes mostrados en los puntos anteriores, se seleccionaron las siguientes cuencas y sectores deficitarios:

- Río San José (sector Azapa)
- Quebrada Vitor (Sectores Codpa – Vitor)
- Río Camarones
- Quebrada de Camiña
- Sector de San Pedro de Atacama
- Sector de Chiu Chiu
- Río Copiapó
- Río Huasco
- Río Elqui
- Quebrada Totoral y cuencas costeras hasta Carrizal
- Río Limarí
- Río Petorca
- Río Ligua
- Río Aconcagua
- Costeras Aconcagua- Maipo (sector Casablanca)
- Río Maipo (Tercera sección “Maipo bajo”)
- Estero Yali
- Río Perquillauquén

## CAPITULO III: ANÁLISIS DE CUENCAS DEFICITARIAS

### 1 Introducción

En el presente Capítulo, se realiza un análisis más detallado de las características de los sectores seleccionados en el Capítulo II. Las características que se destacan corresponden a las demandas de agua, oferta de recursos hídricos, obras hidráulicas existentes y proyectadas, conflictos existentes por los recursos hídricos, influencia de la variabilidad climática y glaciares sobre la oferta de recursos hídricos. A partir de estos antecedentes se plantea la necesidad de la búsqueda de fuentes de agua no convencionales para el riego agrícola, como también la recolección de antecedentes sobre metodologías para el aprovechamiento de estas fuentes de agua (Capítulo IV). Los sectores seleccionados, se presentan en el Cuadro 16.

Cuadro 16. Cuencas o sectores deficitarios seleccionados.

Región	Nombre de Cuenca o Sector
XV	Río San José (sector Azapa)
XV	Quebrada Vitor (Sectores Codpa - Vitor)
XV	Río Camarones
I	Quebrada de Camiña
II	Sector de Chiu Chiu
II	Sector de San Pedro de Atacama
III	Río Copiapó
III	Quebrada Totoral y cuencas costeras hasta Carrizal.
III	Río Huasco
IV	Río Elqui
IV	Río Limarí
V	Río Petorca
V	Río Ligua
V	Río Aconcagua
V	Costeras Aconcagua - Maipo (sector Casablanca)
V	Sector Maipo bajo (Tercera Sección)
RM y V	Estero Yali
VI y límite con VIII	Río Perquillauquén

## **2 Evaluación de la demanda actual y futura del recurso hídrico**

### **2.1 Actores relevantes**

Los actores relevantes identificados para cada sector en estudio se presentan en el Apéndice 1. La información fue obtenida de registros en SEIA, Superintendencia de Servicios Sanitarios, DGA y en trabajo realizado en campaña de terreno.

Para poder disponer de un mejor punto de vista sobre el desarrollo agrícola, industrial y social de los sectores en estudio, se realizó la primera campaña de terreno en el mes de marzo, en la cual, se sostuvieron entrevistas con jefaturas de PTAS, consultores, juntas de vigilancia de ríos, especialistas en el área de la minería y atrapaniebla, en oficinas regionales de DGA, INDAP y CONADI. Un resumen de las entrevistas realizadas, se presentan en el Apéndice 2.

Posterior a la campaña de terreno, se realizó un trabajo telefónico para recabar información sobre los usuarios de agua de los sectores de interés que no fueron visitados en la campaña de terreno, para lo cual se presenta en el Apéndice 3 el resumen de contactos y resultados obtenidos.

En las entrevistas sostenidas en instituciones Estatales, se realizó la presentación de estudio y se solicitó información relevante para la caracterización de los sectores en estudio.

En las entrevistas sostenidas con agricultores, se les entregó un resumen de los alcances del estudio y se les preguntó su opinión en la utilización de fuentes de agua no convencional para el riego agrícola. Los resultados obtenidos de estas entrevistas, se describen en el Capítulo V del presente estudio.

### **2.2 Demanda asociada a exigencias ambientales**

En el Artículo 129 bis 1 de la Ley 20.017 que modificó el Código de Aguas en el año 2005, se señala el caudal ecológico de acuerdo al siguiente párrafo:

“al constituir los derechos de aprovechamiento de aguas, la Dirección General de Aguas velará por la preservación de la naturaleza y la protección del medio ambiente, debiendo para ello establecer un caudal ecológico mínimo, el cual sólo afectará a los nuevos derechos que se constituyan, para lo cual deberá considerar también las condiciones naturales pertinentes para cada fuente superficial”.

Históricamente la DGA ha considerado como caudal mínimo ecológico un determinado porcentaje del caudal del río, establecido en forma constante, utilizando para ello un mínimo de 25 años hidrológicos, con una estadística a nivel medio mensual según los siguientes criterios:

- Caudal igual al 10% del caudal medio anual
- Caudal igual al 50% del caudal mínimo de estiaje del año 95%

La integridad de un ecosistema acuático no se asegura con el mantenimiento de un caudal mínimo constante a través de todo el año. Por eso, al momento de definir el caudal ecológico la DGA busca considerar las variaciones en los caudales, a lo menos en un período anual, estableciendo un caudal variable que permita mantener en forma proporcional al cauce sin intervención, las variaciones de caudal estacional.

Por otro lado, la Ley Sobre Bases Generales del Medio Ambiente, señala que el uso o aprovechamiento de los recursos naturales en un área determinada debe considerar la mantención de caudales de agua. La problemática que surge entonces es el cálculo del caudal ecológico para cada cuenca, ya que este valor será diferente dependiendo del lugar geográfico en donde se realice la medición. Por lo anterior, el caudal ecológico es característico para una sección específica (Sector), por lo tanto, realizar una estimación de un caudal ecológico general para un cauce, carece de exactitud en su estimación. Por ello, el valor de este caudal debe ser considerado, a la escala de este estudio, como un caudal de referencia. En este caso se ha considerado valores adaptados del trabajo realizado por Ayala, Cabrera y Asociados (DGA, 2007a y 2007b). Los valores de caudal ecológicos de los sectores de interés en el estudio de FNC, se presentan en el Cuadro 17.

Cuadro 17. Caudales ecológicos para los sectores en estudio.

Región	Nombre Cuenca y/o Sector	Caudal Ecológico (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )
XV	Río San José (sector Azapa)	0,090
XV	Quebrada Vitor (Sectores Codpa – Vitor)	0,000
XV	Río Camarones	0,040
I	Quebrada de Camiña	0,030
II	Sector de Chiu Chiu	0,140
II	Sector de San Pedro de Atacama	0,090
III	Río Copiapó	0,280
III	Quebrada Totoral y cuencas costeras hasta Carrizal	0,000
III	Río Huasco	0,340
IV	Río Elqui	0,960
IV	Río Limarí	0,000
V	Río Petorca	1,394
V	Río Ligua	1,680
V	Río Aconcagua	6,880
V	Costeras Aconcagua- Maipo (sector Casablanca)	0,000
RM y V	Sector Maipo bajo (Tercera Sección)	16,940
RM y V	Estero Yali	0,000
VII y límite con VIII	Río Perquillauquén	0,760

Se observa que los valores obtenidos de demanda total y de oferta, presentaron un déficit considerable para los sectores de interés, por lo tanto, se concluye que no existe la condición de caudal ecológico en estos cauces para los periodos de máxima demanda. Finalmente, se considera necesario formular un registro de caudales ecológicos por secciones de los cauces principales de Chile.

### **2.3 Demanda futura con una proyección a 10 años**

Para estimar las demandas futuras por uso, se ha utilizado las proyecciones incluidas en los informes DGA (2007a y 2007b), en los cuales se consideran las distintas tasas de crecimiento por rubro. Cuando las fechas de las proyecciones requeridas no aparecían explícitamente en los informes, se interpoló o extrapoló a la fecha de interés. Los valores obtenidos fueron contrastados con información

recolectada de la DGA, SISS y VII Censo Nacional Agropecuario del INE. Las demandas futuras con una proyección de 10 años (2018), se presentan en los siguientes Cuadros.

El incremento de la demanda de los recursos hídricos, es el centro de los conflictos entre los distintos actores relevantes de cada uso, cuando la disponibilidad (oferta) de los recursos hídricos presenta una disminución con el transcurso de los años. Es por ello que la optimización de los recursos, juega un factor preponderante para el crecimiento armónico de todos los rubros presentes en cada cuenca. A su vez, la inversión del Estado en obras de conducción y acumulación, favorece significativamente al cumplimiento de las demandas de uso agrícola, pero cabe destacar, que en muchos sectores no es posible suplir esta demanda, es por ello que la utilización de fuentes de agua no convencionales, se presenta como una alternativa atractiva para estos casos.

Cuadro 18: Demanda consuntiva de agua al año 2018, según tipo de uso para sectores en estudio (adaptado de DGA, 2007a y DGA, 2007b).

Región	Nombre Cuenca y/o Sector	Caudal por uso (m <sup>3</sup> /s)				Caudal Ecológico	Total
		Agropecuario y Forestal	Agua Potable	Industrial	Minero		
XV	Rio San José (sector Azapa)	1,420	1,136	0,634	0,001	0,090	3,281
XV	Quebrada Vitor (Sectores Codpa – Vitor)	0,151	0,000	0,000	0,000	0,000	0,151
XV	Rio Camarones	2,085	0,001	0,000	0,000	0,040	2,126
I	Quebrada de Camiña	0,898	0,002	0,000	0,001	0,030	0,931
II	Sector de Chiu Chiu	0,648	0,011	0,000	0,927	0,140	1,726
II	Sector de San Pedro de Atacama	2,013	0,003	0,000	0,804	0,090	2,910
III	Rio Copiapó	3,457	0,443	0,026	0,640	0,224	4,790
III	Quebrada Totoral y cuencas costeras hasta Carrizal	0,001	0,000	0,000	0,103	0,000	0,104
III	Rio Huasco	8,324	0,147	0,012	0,477	0,340	9,300
IV	Rio Elqui	10,612	0,117	0,304	1,347	0,960	13,340
IV	Rio Limari	5,275	0,241	0,000	0,468	0,000	5,985
V	Rio Petorca	2,689	0,063	0,000	0,134	1,390	4,276
V	Rio Ligua	2,528	0,120	0,000	1,083	1,680	5,411
V	Rio Aconcagua	22,374	1,234	6,017	2,740	6,880	39,244
V	Costeras Aconcagua- Maipo (sector Casablanca)	5,663	3,079	1,324	0,004	0,000	10,070
RM y V	Sector Maipo bajo (Tercera Sección)	30,934	0,484	0,027	0,047	19,380	50,871
RM y V	Estero Yali	7,638	0,002	0,000	0,000	0,000	7,640
VII y límite con VIII	Rio Perquillauquén	29,724	0,338	0,007	0,000	0,760	30,829

Cuadro 19: Demanda no consuntiva de agua al año 2018, según tipo de uso para sectores en estudio (adaptado de DGA, 2007a y DGA, 2007b).

Región	Nombre Cuenca y/o Sector	Caudal por uso (m <sup>3</sup> /s)			Total
		Energía	Acuícola	Turismo	
XV	Río San José (sector Azapa)	0,007	0,000	0,008	0,015
XV	Quebrada Vitor (Sectores Codpa – Vitor)	0,001	0,000	0,000	0,001
XV	Río Camarones	0,000	0,000	0,000	0,000
I	Quebrada de Camiña	0,000	0,000	0,002	0,002
II	Sector de Chiu Chiu	0,000	0,000	0,000	0,000
II	Sector de San Pedro de Atacama	0,000	0,000	0,000	0,000
III	Río Copiapó	0,000	0,000	0,000	0,000
III	Quebrada Totoral y cuencas costeras hasta Carrizal	0,000	0,000	0,000	0,000
III	Río Huasco	0,232	0,000	0,000	0,232
IV	Río Elqui	0,000	0,000	0,002	0,002
IV	Río Limarí	0,000	0,000	0,001	0,001
V	Río Petorca	0,000	0,000	0,001	0,001
V	Río Ligua	0,000	0,000	0,002	0,002
V	Río Aconcagua	99,795	0,000	0,003	99,798
V	Costeras Aconcagua- Maipo (sector Casablanca)	0,035	0,000	0,006	0,041
RM y V	Sector Maipo bajo (Tercera Sección)	0,000	0,000	0,000	0,000
RM y V	Estero Yali	0,000	0,000	0,001	0,001
VII y límite con VIII	Río Perquillauquén	0,000	0,000	0,000	0,000

### 3. Evaluación de la oferta actual y futura del recurso hídrico

#### 3.1 Recursos de agua existentes, para fuentes convencionales

En este punto se presenta una descripción general del sistema hidrológico de cada sector que considera la identificación de los principales cursos de agua, los acuíferos y los mecanismos de recarga de las aguas subterráneas. Por petición de la contraparte técnica de la CNR, se incorporó el análisis del Río Lluta, con el objetivo de destacar el último estudio realizado sobre calidad de las aguas a lo largo de esta cuenca.

### **3.1.1 Río Lluta**

#### **Características físicas**

El río Lluta tiene una longitud de 147 km, siendo sus principales tributarios el río Azufre y las Quebradas de Caunume, Jurase e Iquilla (Figura 13). La cuenca de este río tiene una superficie de 421 km<sup>2</sup> y como se trata de una cuenca preandina no posee glaciares.

#### **Régimen de precipitaciones**

El régimen de precipitaciones en la cuenca está dominado por el Invierno Boliviano, por lo que estas se concentran en los meses de diciembre a abril. Estas precipitaciones tienen su origen en sistemas frontales, provenientes desde el Atlántico, que cruzan la selva del Amazonas y que precipitan sobre la cordillera. Existe una fuerte correlación entre la altura y la precipitación, encontrándose que en la parte alta de la cuenca la precipitación media anual llega a 350 mm, bajando esta cantidad a 10 mm en la parte media y siendo despreciable en la costa.

#### **Régimen de caudales**

El régimen hídrico es pluvial y la distribución de caudales está directamente relacionada con las precipitaciones (Figura 14). Por esa razón la disponibilidad de agua es mayor durante los meses de verano, llegando a valores de 4 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>. Durante el resto del año, el flujo tiende a ser constante, lo que evidencia que este caudal es alimentado por los depósitos de aguas subterráneas.

#### **Descripción hidrogeológica**

Desde el punto de vista hidrogeológico, en la cuenca del Lluta existen formaciones acuíferas asociadas a rellenos permeables en la parte baja y en el sector alto. Además existe un sistema de rocas fracturadas que presentan grados variables de permeabilidad (Figura 15). De los acuíferos presentes en la parte baja de la cuenca, sólo existe información del valle donde se identifican dos unidades: i) Un acuífero superficial, de tipo no confinado, está contenido en las unidades superiores de los depósitos fluviales y ii) la formación Concordia, con profundidades del orden de 10m a 30m y ancho considerable (DGA, 2004).

## **Mecanismo de recarga de acuíferos**

Los mecanismos de recarga de los acuíferos están asociados principalmente a la infiltración de aguas lluvias sobre la cuenca y posible a infiltración que se produzca en algunos sectores del cauce. Al igual que en todas las zonas áridas y semi-áridas de nuestro territorio, es probable que la recarga de los sistemas de agua subterránea sea altamente dependiente de la ocurrencia de eventos hidrológicos extremos, los cuales permiten que exista un aporte suficiente de agua que infiltre y posteriormente se transforme en recarga.

## **Calidad de agua**

El río Lluta es reconocido por los problemas de calidad de agua que existen en su cuenca, en especial por las altas concentraciones de boro y arsénico. Estos problemas de calidad se originan principalmente en las características geológicas de la cuenca y en la escasez de precipitaciones y son comunes a aquellos que ocurren en otras partes del planeta, como lo es el caso de Laguneras en México.

El volcanismo existente en la cuenca genera sistemas como el Volcán Tacora y afloramientos hidrotermales como los existentes en la quebrada Colpitas. Estos sistemas aportan compuestos químicos a la cuenca los que no pueden ser diluidos por la falta de precipitaciones. Cuando ocurren eventos importantes de precipitaciones se pueden producir diluciones temporales (DGA, 2008), pero estos eventos producen aluviones conocidos localmente como “bajadas del río”, que ocasionan destrucción de caminos, el embanque del Puerto de Arica y el deterioro de las playas (Ortega et al., 2007).

Un estudio realizado por la Dirección General de Aguas (DGA, 2008) analizó posibles medidas de mitigación de los problemas de calidad de agua del Lluta. Este estudio determinó que existen quebradas cuyas aguas tienen una mejor calidad, por lo que recomienda interceptar esas aguas antes de que se mezclen con las aguas de calidad inferior, lográndose contar de esta forma con unos  $600 \text{ L s}^{-1}$  de agua de calidad apta para el riego.

## **Riego**

En la cuenca del río Lluta existen aproximadamente unas 7.600 hectáreas potenciales para la producción agrícola bajo riego, sin embargo en la actualidad se dedican a la agricultura unas 2.790 hectáreas debido a limitaciones de agua y en algunas zonas a limitaciones de drenaje. De la superficie agrícola, se estima que son regadas unas 1.700 hectáreas, dedicadas principalmente al maíz, alfalfa y hortalizas (DGA, 2004).

## **Obras hidráulicas**

La Dirección de Obras Hidráulicas, desarrolló un estudio para evaluar la factibilidad de construir el Embalse Chironta en el río Lluta, que tendría como funciones el reducir el impacto de las “bajadas del río” y acumular agua para riego. Sin embargo el estudio elaborado por la DGA (2008) concluye que la construcción de dicho embalse no es una alternativa adecuada pues las aguas acumuladas serían de mala calidad y los sedimentos tendrían una alta toxicidad.

## **Conclusión**

Desde el punto de vista hidrológico, la cuenca del río Lluta, es un sector deficitario, pero su principal problema está asociado a la mala calidad del agua.

Encuestas realizadas en el estudio de la DGA (2008), establece que el principal interés de los productores agrícolas es contar con aguas libres de boro. A pesar de que existe preocupación por las descargas de aguas servidas de Putre, el estudio demostró que estas no afectan la calidad del agua del río Lluta, frente a los problemas asociados al alto contenido de boro, arsénico, azufre y magnesio (DGA, 2008). Se debe tener presente que la remoción de boro demanda sistemas tecnológicos considerablemente caros para la escala de aplicación requerida para el riego.

La idea de interceptar las aguas limpias que llegan al río Lluta, se considera como una opción poco aconsejable, dado que al interceptar estas aguas, la capacidad de dilución del río se verá reducida, provocando un aumento en concentración de boro y arsénico en las aguas superficiales y subterráneas.

Si bien existen tecnologías de tratamiento que permitirían el utilizar aguas del río Lluta y las aguas servidas de localidades como Putre y Arica, los costos asociados a los tratamientos requeridos, tanto de inversión y principalmente de operación, dificultan el financiamiento del uso de esta agua para riego. En cambio el sector minero e industrial puede pagar dichos tratamientos. Sin embargo la demanda energética requerida para dichos tratamientos puede ser una limitante, lo que explica el actual interés del sector minero por la construcción de una central nuclear en el Norte de Chile.

Finalmente este consultor comparte la conclusión plateada en el estudio de la DGA (2008) en el sentido de que la construcción del embalse Chironta no será una solución al riego del Valle del Lluta, sino que más bien un problema al acumular aguas de mala calidad y sedimentos tóxicos.

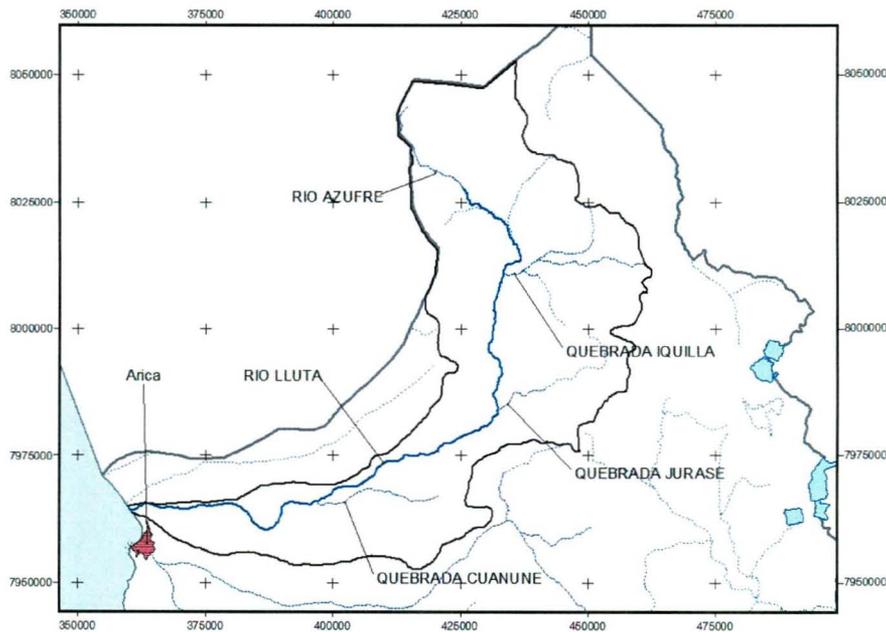


Figura 13. Cuenca del Río Lluta.

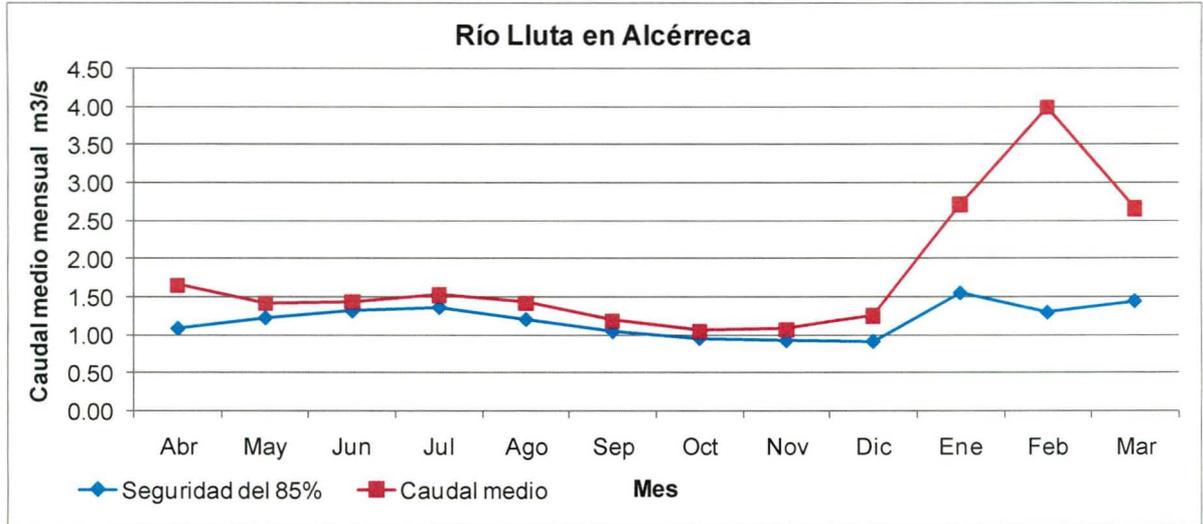


Figura 14. Caudales mensuales medidos en la estación fluviométrica Río Lluta en Alcérreca (DGA, 2004).

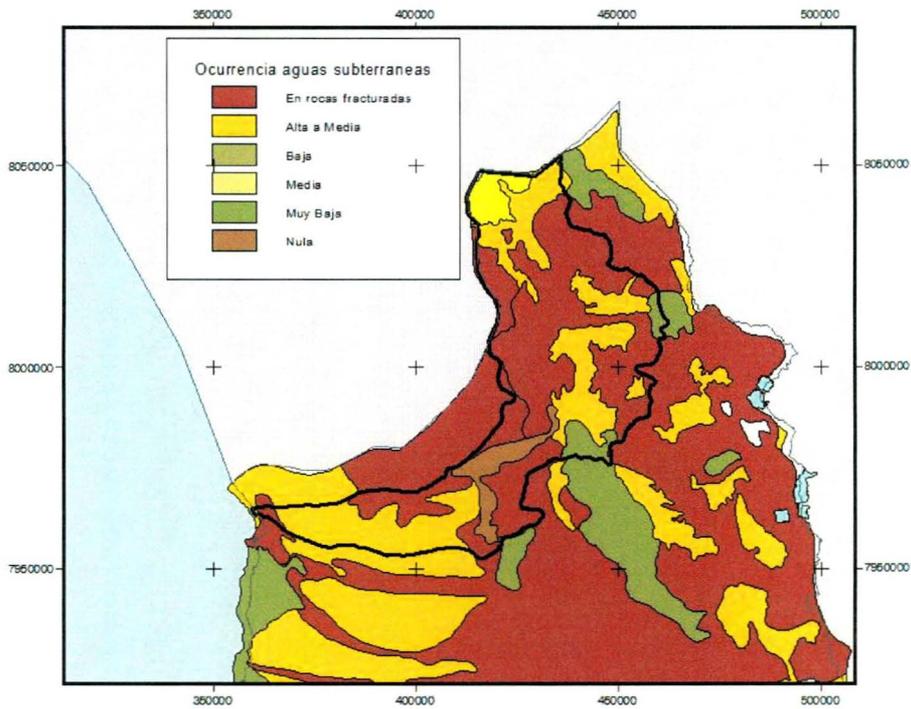


Figura 15. Ocurrencia de aguas subterráneas en la cuenca del Río Lluta.

### **3.1.2 Río San José**

#### **Características físicas.**

El río San José es la principal fuente de agua del Valle de Azapa y drena una cuenca de 907 km<sup>2</sup>. Los principales afluentes del río San José son el río Seco y el río Tignamar que al unirse forman el río Livilcar, el cual posteriormente cambia su nombre a río San José. Casi al llegar a la costa, este río recibe los eventuales aportes de la quebrada la Higuera (Figura 16). El conjunto San José-Livilcar, tiene un largo de 77 Km aproximadamente.

Al igual que el río Lluta, el río San José se puede identificar como un río Preandino, en el que no existen glaciares. Los cursos superiores de este río se caracterizan por sus cauces estrechos, encajonados y sinuosos, que permiten un limitado desarrollo del suelo y la agricultura. En su curso medio y una vez pasada la sierra de Huaylillas, el cauce se ensancha permitiendo un adecuado proceso de edafogénesis que permite generar suelos aptos para uso agropecuario (Ortega et al 2007).

#### **Régimen de precipitaciones**

El régimen de precipitaciones en la cuenca está dominado por el Invierno Boliviano, por lo que estas se concentran en los meses de diciembre a abril. Estas precipitaciones tienen su origen en sistemas frontales, provenientes desde el Atlántico, que cruzan la selva del Amazonas y que precipitan sobre la cordillera. Existe una fuerte correlación entre la altura y la precipitación, encontrándose que en la parte alta de la cuenca la precipitación media anual llega a 250 mm, bajando esta cantidad a 10 mm en la parte media y siendo despreciable en la costa.

#### **Régimen de caudales**

El río San José presenta caudales muy reducidos en la parte alta de la cuenca. Solo ocasionalmente y tras eventos extremos, logra alcanzar el mar, en la forma de aluviones que llegan a la ciudad de Arica (Ortega et al 2007).

## **Descripción hidrogeológica.**

Desde el punto de vista hidrogeológico, en la cuenca del San José existen formaciones acuíferas asociadas a rellenos permeables en la parte baja y un sistema de rocas fracturadas que presentan grados variables de permeabilidad (Figura 17) en el resto de la cuenca. Este sistema de aguas subterráneas alimenta varias vertientes ubicadas a lo largo del Valle.

## **Mecanismo de recarga de acuíferos.**

Los mecanismos de recarga de los acuíferos están asociados principalmente a la infiltración de aguas lluvias sobre la cuenca y a posible infiltración que se produzca en algunos sectores del cauce, especialmente en los años asociados a eventos hidrológicos extremos.

## **Riego**

En la cuenca del río San José, se encuentra ubicado el Valle de Azapa que es la principal zona agrícola del norte de Chile. Este valle tiene una superficie agrícola potencial de 4.450 hectáreas de las que actualmente se riegan unas 2.620 (Ortega et al., 2007).

## **Obras hidráulicas**

Al igual que en la cuenca del Lluta, asociados a la ocurrencia de eventos importantes de precipitaciones se pueden producir aluviones, conocidos localmente como “bajadas del río”, que ocasionan destrucción de caminos, el embanque del Puerto de Arica y el deterioro de las playas (Ortega et al., 2007). Frente a la necesidad de controlar los aluviones asociados a las bajadas del río y acumular agua para riego, la Dirección de Obras Hidráulicas ha propuesto la construcción del embalse Livilcar que sería una presa de 87 metros de altura y 8,7 millones de metros cúbicos de capacidad de acumulación. Según las informaciones de prensa, este proyecto tendría aprobado el financiamiento. Sin embargo una búsqueda en el sistema de evaluación de impacto ambiental, arrojó que aun no ingresa a calificación. Cabe destacar que el embalse Livilcar, es una

obra considerada solo para el control de crecidas, por lo cual, no generaría un aporte en la disponibilidad de agua para uso en riego.

### **Antecedentes generales**

Un importante conflicto que existe en el Valle de Azapa es la sobreexplotación de los sistemas de aguas subterráneas, debido al extensivo uso de pozos ilegales, lo cual afecta significativamente el control y administración de las extracciones de agua en este valle.

Compartiendo con la cuenca del Lluta, existe un proyecto para el tratamiento de las aguas servidas de la ciudad de Arica, que actualmente son descargadas al Océano a través de un emisario submarino, apuntando a utilizar las aguas para regar 1500 hectáreas. Sin embargo no es clara la factibilidad económica del uso de estas aguas para riego, debido a que no es posible obligar a la Empresa Sanitaria a aumentar su nivel de tratamiento, pues descarga al Océano, debiendo los usuarios del agua financiar el tratamiento adicional.

### **Conclusión**

Desde el punto de vista hidrológico, la cuenca del río San José, es claramente un sector deficitario donde la demanda de agua excede largamente la escasa oferta existente. Si bien existen tecnologías de tratamiento que permitirían el utilizar las aguas servidas de Arica, los costos asociados a los tratamientos requeridos, tanto de inversión y principalmente de operación, dificultan el financiamiento del uso de esta agua para riego.

En el caso del Valle de Azapa, la construcción del embalse Livilcar, si bien no estaría considerada para uso agrícola, este sería una atractiva fuente de agua que permitiría mejorar la seguridad de riego para el valle, o bien, mejorar la disponibilidad del acuífero mediante obras de recarga, para lo cual sería necesario considerar modificaciones en el diseño y operación de este embalse.

Una segunda opción, que permitiría mejorar la eficiencia de conducción y distribución de las aguas en el valle de Azapa, es el entubamiento del Canal

Azapa. Esta alternativa, posee el estudio de prefactibilidad finalizado y actualmente se encuentra en licitación el estudio de factibilidad.

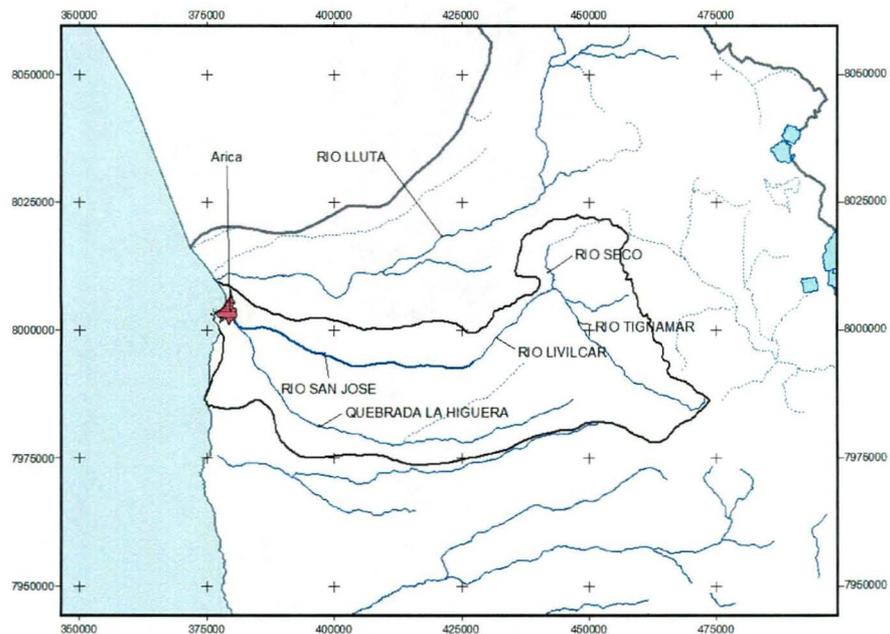


Figura 16: Cuenca del río San José.

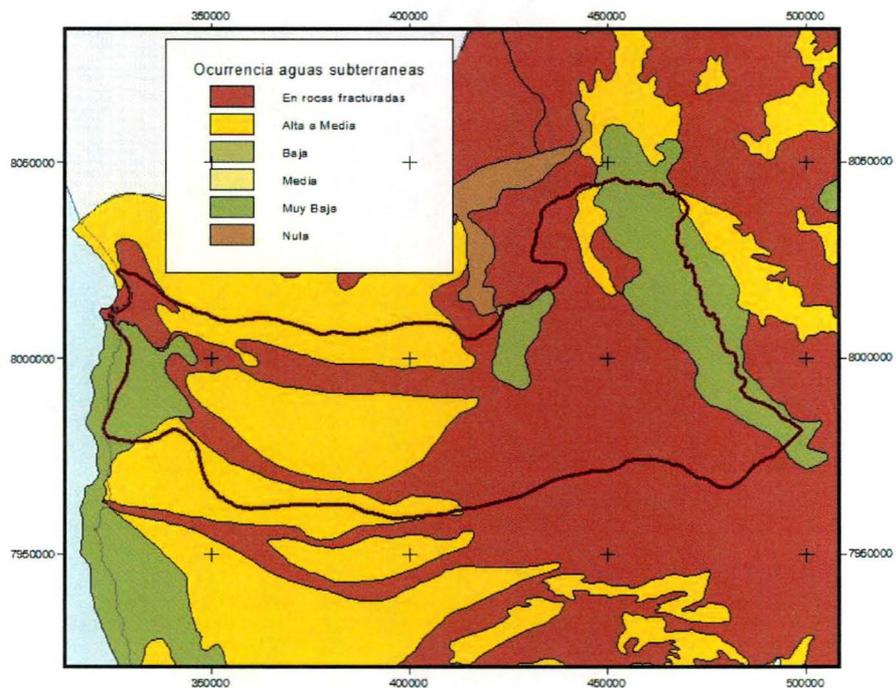


Figura 17: Ocurrencia de aguas subterráneas en la cuenca del río San José.

### **3.1.3 Quebrada Vítor**

#### **Características físicas**

La quebrada tiene una orientación Este-Oeste, drena una superficie de 1.623 Km<sup>2</sup> y tiene un largo de 49 km. Su principal afluente es la quebrada de Calizama que tiene 80 km de largo.

#### **Régimen de precipitaciones**

El régimen de precipitaciones en la cuenca está dominado por el Invierno Boliviano, por lo que estas se concentran en los meses de diciembre a abril. Estas precipitaciones tienen su origen en sistemas frontales, provenientes desde el Atlántico, que cruzan la selva del Amazonas y que precipitan sobre la cordillera. Existe una fuerte correlación entre la altura y la precipitación, encontrándose que en la parte alta de la cuenca la precipitación media anual llega a 250 mm, bajando esta cantidad a 10 mm en la parte media y siendo despreciable en la costa. Debido a la forma de la quebrada Vítor, el área que recibe precipitaciones es reducida.

#### **Régimen de caudales.**

Hidrológicamente la quebrada corresponde a un sistema conocido internacionalmente como Wadi, donde la escorrentía superficial es limitada y asociada a eventos extremos. Normalmente en el lecho del Wadi existe vegetación que contrasta con las riberas que son desérticas. En el caso de la quebrada Vítor, existe una reducida escorrentía en la parte alta, pero esta no llega al Océano.

A modo de referencia la Cuenca Chaca – Vítor, cuenta con limitados recursos hídricos, tanto superficiales como subterráneos, los cuales provienen de la hoya hidrográfica que drena la quebrada de Vítor. El río Codpa, quebrada Vítor o quebrada de Chaca, que con los tres nombres se conoce, posee una hoya hidrográfica relativamente pequeña, en comparación con sus ríos homólogos de sólo 1.660 km<sup>2</sup>.

Este río constituye la red principal de drenaje y su caudal es permanente hasta Codpa; aguas abajo profundiza en las arenas y sólo lleva superficialmente los excedentes en los años muy lluviosos, variando según la estación del año (con un mínimo en el mes de diciembre y un máximo en el periodo de lluvias estivales entre enero y abril). Estas fluctuaciones pueden ocasionar una fuerte variación en los caudales, desde cifras superiores a  $1.000 \text{ L s}^{-1}$  a valores de  $50 \text{ L s}^{-1}$  y menos.

Según antecedentes obtenidos desde Conadi, en esta quebrada, sólo se conducen excedentes superficiales en años muy lluviosos. El volumen de descarga al mar se estima de 2,3 millones de  $\text{m}^3$  por año medio. Para este valle se ha calculado una tasa de riego de  $14.700 \text{ m}^3$  (equivalente a  $0.46 \text{ L s}^{-1}$ ) como gasto medio anual. A esto se le debe añadir: la falta de un manejo adecuado y eficiente del recurso hídrico escaso, alta dispersión geográfica en la Cuenca, distribución ineficiente entre los regantes y falta de Agua Potable.

### **Descripción hidrogeológica**

Desde el punto de vista hidrogeológico a pesar de que existen zonas con permeabilidad, la disponibilidad de agua subterránea es limitada. Esto sólo permite alimentar la vegetación existente en el fondo de la quebrada.

### **Mecanismo de recarga de acuíferos**

Los mecanismos de recarga de los acuíferos están asociados principalmente a la infiltración de aguas lluvias sobre la cuenca. La escasez de lluvia provoca que la recarga sea muy reducida.

### **Riego**

En el sector de quebrada de Vitor existe una pequeña superficie de riego asociada a comunidades indígenas.

### **Obras hidráulicas**

Se ha planteado la idea de construir el Embalse Umirpa, que abastecería de agua a las familias de los valles de Codpa y Chaca. La idea es almacenar unos

5,4 millones de metros cúbicos de agua, para abastecer una superficie de 300 ha de riego. Sin embargo, este año, el Gobierno Regional respectivo no aprobó las inversiones para iniciar los estudios, por lo que este proyecto sigue en espera.

### **Antecedentes generales**

En la Quebrada Vítor han existido conflictos asociados al uso de aguas subterráneas de pozos ilegales, los que han sido clausurados por la autoridad pertinente.

La Comisión Nacional de Riego y Conadi, están trabajando para la formación y fortalecimiento de las juntas de vigilancia y comunidades de agua de las cuencas de Quebrada Vítor y Camarones.

### **Conclusión**

Desde el punto de vista hidrológico, la Quebrada de Vítor, es claramente un sector deficitario donde la demanda de agua excede largamente la escasa oferta existente. Esta situación es compleja para la agricultura, pues frente a la escasez de agua para riego debe competir con las demandas del sector minero, que es capaz de ofrecer mejores precios por los derechos de agua.

La única alternativa factible para esta zona es la construcción del embalse Umirpa, pero este proyecto debe competir con otros proyectos prioritarios para la región.

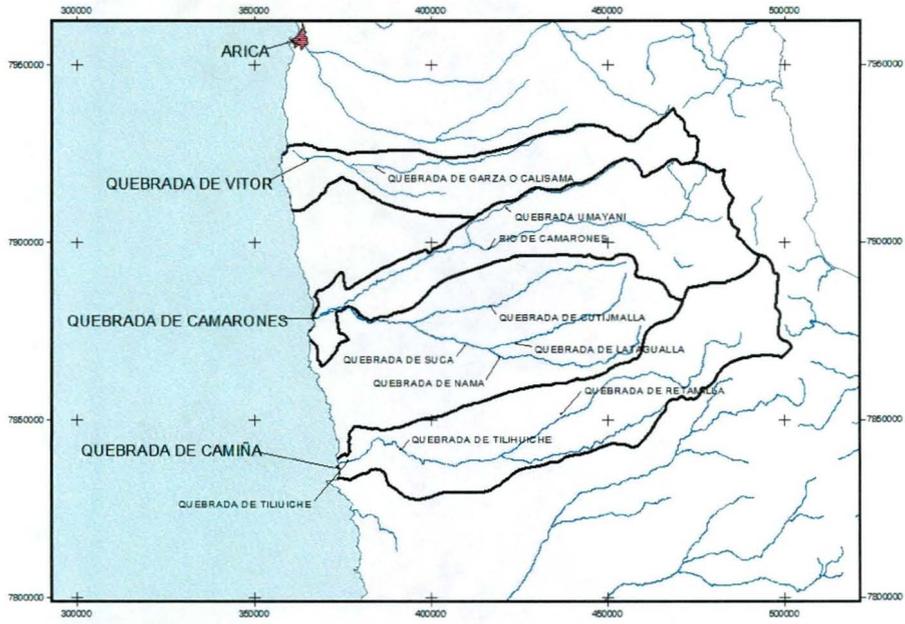


Figura 18: Cuencas de las quebradas Vitor, Camarones y Camiña.

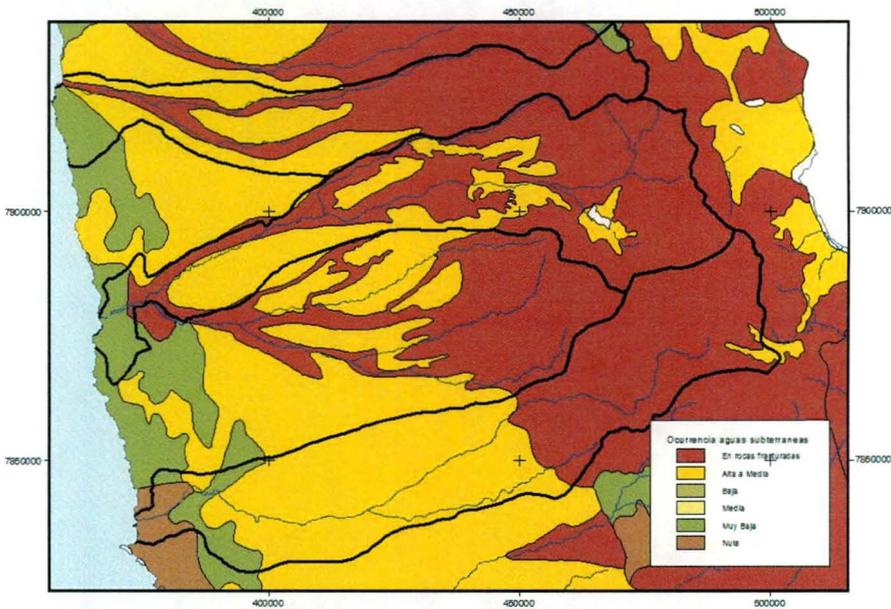


Figura 19: Ocurrencia de aguas subterráneas en las cuencas, las quebradas de Vitor, Camarones y Camiña.

### **3.1.4 Río Camarones**

#### **Características físicas**

La quebrada tiene una orientación Este-Oeste, drena una superficie de 1.412 Km<sup>2</sup> y tiene un largo de 110 km. Sus principales afluentes son la quebrada de Umayani que tiene 27 km de largo, el río Caritaya que tiene 20 km y el río Ajatama de 20 km.

#### **Régimen de precipitaciones**

El régimen de precipitaciones en la cuenca está dominado por el Invierno Boliviano, por lo que estas se concentran en los meses de diciembre a abril. Estas precipitaciones tienen su origen en sistemas frontales, provenientes desde el Atlántico, que cruzan la selva del Amazonas y que precipitan sobre la cordillera. Existe una fuerte correlación entre la altura y la precipitación, encontrándose que en la parte alta de la cuenca la precipitación media anual llega a 300 mm, bajando esta cantidad a 10 mm en la parte media y siendo despreciable en la costa.

#### **Régimen de caudales.**

Hidrológicamente la quebrada corresponde a un sistema conocido internacionalmente como Wadi, donde la escorrentía superficial es limitada y asociada a eventos extremos. Normalmente en el lecho del Wadi existe vegetación que contrasta con las riberas que son desérticas. En el caso del río Camarones, según los registros de la Dirección General de Agua, los caudales varían en el orden de 0,4 a 0,6 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>.

#### **Descripción hidrogeológica.**

Desde el punto de vista hidrogeológico, se puede afirmar que existen zonas de alta permeabilidad en rellenos y de permeabilidad variable en los sistemas de rocas fracturadas. La presencia de agua subterránea permite alimentar la vegetación existente en el fondo del río y el caudal que en él se observa.

### **Mecanismo de recarga de acuíferos.**

Los mecanismos de recarga de los acuíferos están asociados principalmente a la infiltración de aguas lluvias sobre la cuenca. La escasez de lluvia provoca que la recarga sea muy reducida.

### **Riego**

Según el Censo Agropecuario del 2007, en la Comuna de Camarones existen 714 hectáreas regadas. De acuerdo al catastro realizado por el SAG, esta superficie debería ser regada con aguas del Embalse Caritaya.

### **Obras hidráulicas**

La Dirección de Riego construyó, entre los años 1931 y 1935 el embalse Caritaya en el río Caritaya, con una capacidad máxima de 42 millones de m<sup>3</sup> para regar terrenos del valle del río Camarones y para control de crecidas. Décadas de manejo deficiente y el terremoto del año 2005, causaron el deterioro del embalse, por lo que la DOH realizó una reparación de esta estructura que fue entregada el año 2008. Esta reparaciones permitirán aumentar la superficie de riego y a su vez dar seguridad a la agricultura ya establecida, potenciando de esta manera el desarrollo agrícola y social de la zona.

### **Antecedentes generales**

Según información de las instituciones respectivas, CNR y Conadi están trabajando para la formación y fortalecimiento de las juntas de vigilancia y comunidades de agua de las cuencas de Quebrada Vitor y Camarones.

### **Conclusión**

Desde el punto de vista hidrológico, la cuenca del río Camarones, es claramente un sector deficitario donde la demanda de agua excede largamente la escasa oferta existente. Es muy importante para la zona la operación del embalse Caritaya, para lo cual es fundamental el trabajo que se realice con las organizaciones de usuarios.

### **3.1.5 Quebrada de Camiña**

#### **Características físicas**

La quebrada, llamada Retamilla y Tilihuiche, tiene una orientación Este-Oeste, drena una superficie de 2.800 Km<sup>2</sup> y tiene un largo de 148 km. Su principal afluente es la quebrada de Pinonave que tiene 54 km de largo.

#### **Régimen de precipitaciones**

El régimen de precipitaciones en la cuenca está dominado por el Invierno Boliviano, por lo que estas se concentran en los meses de diciembre a abril. Estas precipitaciones tienen su origen en sistemas frontales, provenientes desde el Atlántico, que cruzan la selva del Amazonas y que precipitan sobre la cordillera. Existe una fuerte correlación entre la altura y la precipitación, encontrándose que en la parte alta de la cuenca la precipitación media anual llega a 300 mm, bajando esta cantidad a 10 mm en la parte media y siendo despreciable en la costa.

#### **Régimen de caudales.**

Hidrológicamente la quebrada de Camiña posee un sistema similar al que presenta la quebrada de Vítor, el que corresponde a un sistema conocido internacionalmente como Wadi, donde la escorrentía superficial es limitada y asociada a eventos extremos. En el caso de la quebrada de Camiña, existe una reducida escorrentía en la parte alta, pero esta no llega al Océano.

#### **Descripción hidrogeológica.**

Desde el punto de vista hidrogeológico a pesar de que existen zonas con permeabilidad, la disponibilidad de agua subterránea es limitada. Esto sólo permite alimentar la vegetación existente en el fondo de la quebrada.

#### **Mecanismo de recarga de acuíferos.**

Los mecanismos de recarga de los acuíferos están asociados principalmente a la infiltración de aguas lluvias sobre la cuenca. La escasez de lluvia provoca que la recarga sea muy reducida.

## **Riego**

Según el Censo Agropecuario del 2007, en la Comuna de Camiña existen 270 hectáreas regadas.

## **Obras hidráulicas**

En marzo del año 2009 se anunció que se realizarán estudios de factibilidad de la construcción del embalse Umiña con una capacidad de 15 millones de metros cúbicos, que beneficiará a los agricultores de la cuenca de Camiña y también cumplirá la función de control de crecidas. A la fecha aun no existe una definición del emplazamiento o de las características de esta obra. Se estima que este embalse permitirá un aumento de la superficie de riego a 600 ha, lo que conlleva al beneficio económico de la comuna y de los agricultores.

## **Conclusión**

Desde el punto de vista hidrológico, la cuenca de Camiña, es claramente un sector deficitario donde la demanda de agua excede largamente la escasa oferta existente. Es muy importante para la zona la futura construcción del embalse Umiña, pero será crítico para el éxito de ese proyecto el trabajo que se realice con las organizaciones de usuarios.

### **3.1.6 Sector Chiu Chiu**

#### **Características físicas**

Este sector se encuentra ubicado en la cuenca alta del río Loa, definida a partir de la confluencia del río Salado (Figura 20). El río Loa tiene una longitud de 440 km, siendo sus principales tributarios los ríos Salado y San Salvador. La cuenca del río Loa tiene una superficie de 33.080 km<sup>2</sup> y posee algunos glaciares en la parte norte del río (Figura 20).

## **Régimen de precipitaciones**

El régimen de precipitaciones en la cuenca está dominado por el Invierno Boliviano, por lo que estas se concentran en los meses de diciembre a abril. Estas precipitaciones tienen su origen en sistemas frontales, provenientes desde el Atlántico, que cruzan la selva del Amazonas y que precipitan sobre la cordillera. Existe una fuerte correlación entre la altura y la precipitación, encontrándose que en la parte alta de la cuenca la precipitación media anual llega a 300 mm, bajando esta cantidad a 10 mm en la parte media.

## **Régimen de caudales**

El régimen hídrico es pluvial y la distribución de caudales está ligeramente relacionada con las precipitaciones (Figuras 21 y 22). La disponibilidad de agua es mayor durante los meses de verano, llegando a valores de  $0,6 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ , valor que no varía significativamente durante el año, lo que evidencia que este caudal es alimentado por los depósitos de aguas subterráneas.

## **Descripción hidrogeológica**

Desde el punto de vista hidrogeológico, en la cuenca alta del río Loa existen formaciones acuíferas asociadas a rellenos permeables en el valle y un sistema de rocas fracturadas que presentan grados variables de permeabilidad en el resto de la cuenca (Figura 23).

Según el informe de Cade-Idepé realizado para DGA (2004), en la parte alta del Loa, la cuenca hidrogeológica posee orientación distinta a la hidrológica drenando a la república de Bolivia. En la parte alta, destacan rocas volcánicas fracturadas formada por coladas, brechas y tobas andesíticas de permeabilidad media que corresponden al periodo Terciario y Cuaternario que coincide con el período de formación del macizo andino. El acuífero en esta sección sigue orientación norte - sur por un lecho de rocas no consolidadas o rellenos hasta el sector de San Pedro. En este sector se reúne con aguas subterráneas procedentes desde el oriente que siguen la trayectoria del río San Pedro.

## **Mecanismo de recarga de acuíferos**

Los mecanismos de recarga de los acuíferos están asociados principalmente a la infiltración de aguas lluvias sobre la cuenca y posible a infiltración que se produzca en algunos sectores del cauce. Al igual que en todas las zonas áridas y semi-áridas de nuestro territorio, es probable que la recarga de los sistemas de agua subterránea sea altamente dependiente de la ocurrencia de eventos hidrológicos extremos, los cuales permiten que exista un aporte suficiente de agua que infiltre y posteriormente se transforme en recarga.

En el caso de la cuenca del Loa, se han identificado zonas de recarga de aguas subterráneas en la parte alta de la cuenca, la que está conectada aguas abajo, mediante un sistema de rocas fracturadas, con un sistema de bofedales.

## **Riego**

La actividad agrícola en este sector está centrada en pequeñas explotaciones campesinas. Recientemente INDAP gestionó la construcción y operación de invernaderos e inversiones en el mejoramiento de la infraestructura de riego. Actualmente entre el sector de Chiu Chiu y el valle de Lasana poseen una superficie de 250 ha productivas, las cuales abastecen de hortalizas a supermercados y ferias libres.

## **Obras hidráulicas**

La principal obra de riego de la zona es el embalse Conchi, terminado en 1975 y que tiene un volumen de regulación de 25 millones de metros cúbicos. Otra obra más pequeña es la represa Lequeña, construida para el abastecimiento de agua potable. A la vez, se cuenta con obras de revestimiento de canales con un total de 1.700 m, obras de distribución, unidades de control y aforadores.

## **Características generales**

Según Molina (2006), la cuenca del río Loa, aguas arriba del sector de Chiu Chiu, ha sido fuertemente intervenida por la extracción de aguas para la actividad minera, varios afluentes como el río San Pedro se han secado y esto ha causado

el abandono de algunos sectores. La afirmación anterior refleja el mayor conflicto existente en el norte de Chile, que es la competencia por el uso del agua entre el sector agrícola, normalmente constituido por comunidades campesinas y/o indígenas, y el sector minero, constituido por grandes empresas como Codelco o Escondida. La disponibilidad de agua es nula, el sector minero desea expandir sus operaciones y es capaz de ofrecer mucho dinero por derechos de agua. Frente a esto se plantea la posibilidad de que los agricultores vendan sus aguas y que la agricultura desaparezca de esta área.

### **Conclusión**

Desde el punto de vista hidrológico, la zona de Chiu Chiu, es claramente un sector deficitario donde la demanda de agua excede largamente la escasa oferta existente. Es importante destacar la escala de la producción agrícola de esta zona, donde los caudales se miden en litros por segundo, los cuales son muy apetecidos por el sector minero. Por lo anterior, para la sobrevivencia de las comunidades agrícolas, es muy importante la gestión del recurso y que se deben hacer esfuerzos en la formación y fortalecimiento de organizaciones de usuarios de agua.

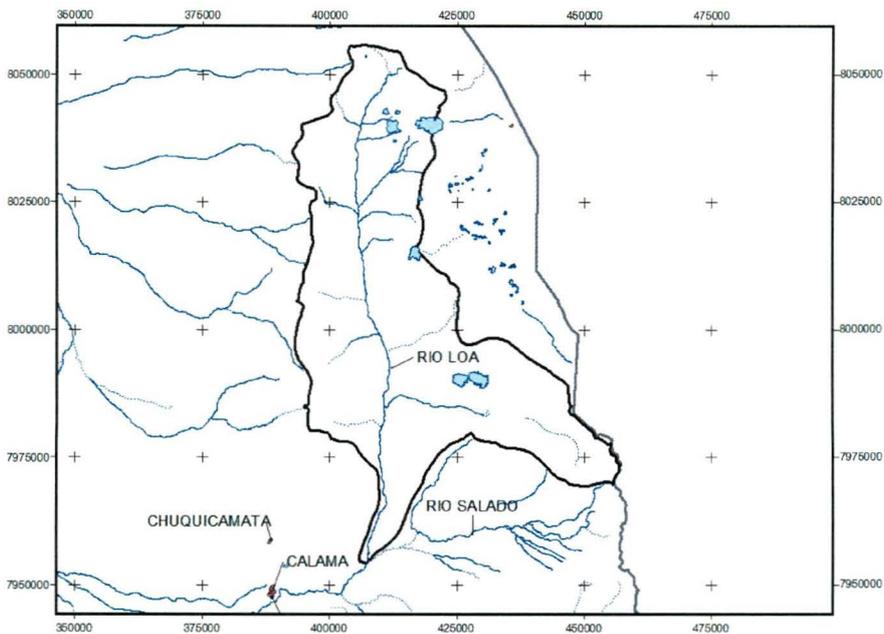


Figura 20: Cuenca hidrográfica sector Chiu-Chiu.

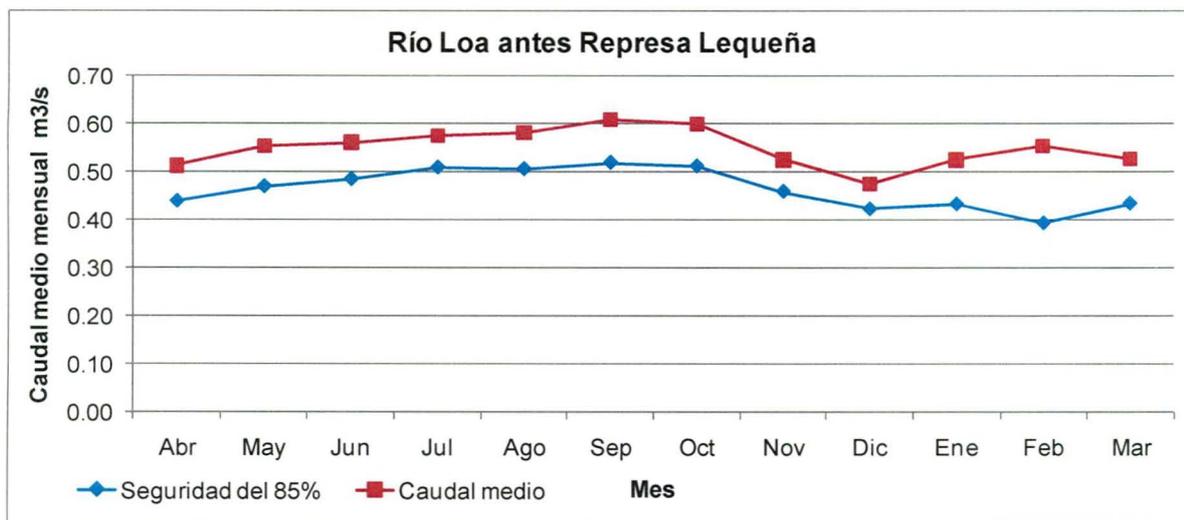


Figura 21: Curva de Variación Estacional Río Loa antes represa Lequeña

(DGA, 2004).

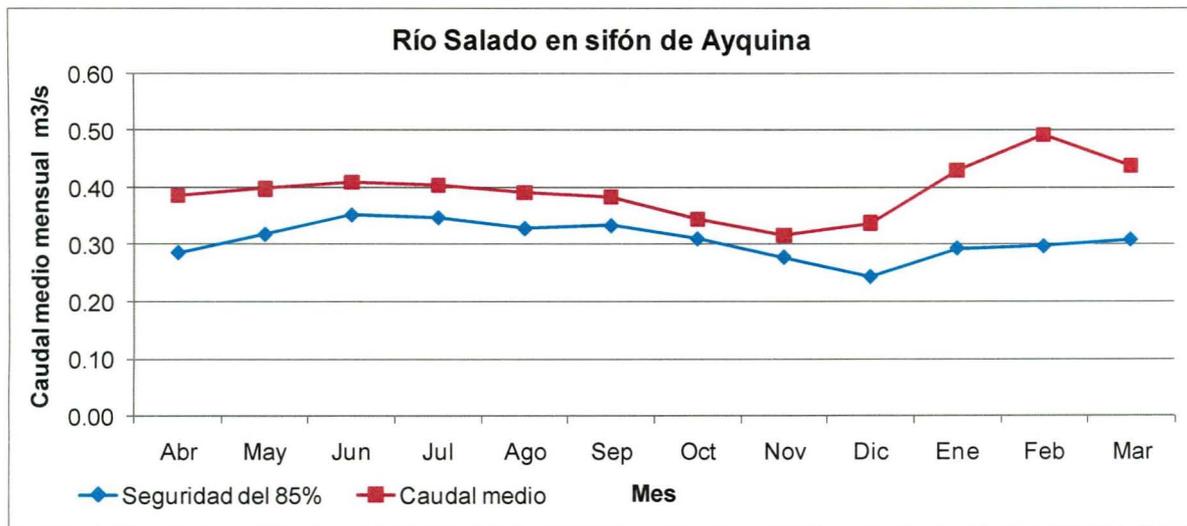


Figura 22: Curva de Variación Estacional Río Salado en sifón de Ayquina (DGA, 2004).

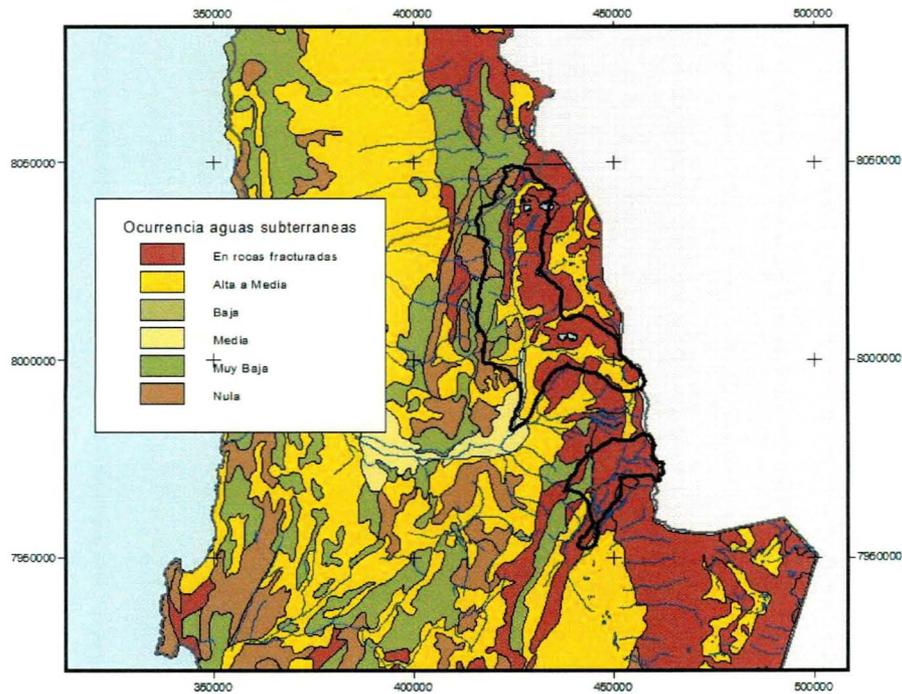


Figura 23: Ocurrencia de aguas subterráneas en las cuencas de los sectores de Chiu-Chiu y San Pedro.

### **3.1.7 Sector San Pedro**

#### **Características físicas**

Este sector se encuentra ubicado en el Salar de Atacama, que corresponde a una cuenca endorreica, de 1.417 km<sup>2</sup> de superficie, drenada por el río San Pedro. Este río tiene una longitud de 168 km y sus principales afluentes son el río Grande, el río Salado y la Quebrada de Abra Pampa (Figura 24).

#### **Régimen de precipitaciones**

El régimen de precipitaciones en la cuenca está dominado por el Invierno Boliviano, por lo que estas se concentran en los meses de diciembre a abril. Estas precipitaciones tienen su origen en sistemas frontales, provenientes desde el Atlántico, que cruzan la selva del Amazonas y que precipitan sobre la cordillera. Existe una fuerte correlación entre la altura y la precipitación, encontrándose que en la parte alta de la cuenca la precipitación media anual llega a 250 mm, bajando esta cantidad a 25 mm en el cierre de la cuenca.

#### **Régimen de caudales**

En el caso del río San Pedro, según los registros de la Dirección General de Agua, los caudales varían en el orden de 0,5 a 1,8 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>.

#### **Descripción hidrogeológica**

Desde el punto de vista hidrogeológico, la cuenca del río Grande no cuenta con importantes unidades de rellenos sedimentarios y en general en toda la cuenca existen sistemas de rocas fracturadas que presentan grados variables de permeabilidad en el resto de la cuenca (Figura 23).

#### **Mecanismo de recarga de acuíferos**

Los mecanismos de recarga de los acuíferos están asociados principalmente a la infiltración de aguas lluvias sobre la cuenca y a posible infiltración que se produzca en algunos sectores del cauce. Al igual que en todas las zonas áridas y semi-áridas de nuestro territorio, es probable que la recarga de

los sistemas de agua subterránea sea altamente dependiente de la ocurrencia de eventos hidrológicos extremos, los cuales permiten que exista un aporte suficiente de agua que infiltre y posteriormente se transforme en recarga.

## **Riego**

La comuna de San Pedro de Atacama la actividad agrícola en este sector está centrada en pequeñas explotaciones campesinas. Según el Censo Agropecuario del año 2007, en la Comuna de San Pedro de Atacama, se registraron 1.467 hectáreas bajo riego.

## **Obras hidráulicas**

Recientemente la DOH gestionó proyectos de mejoramiento de la infraestructura de riego en la cuenca. Entre las obras de mejoramiento para el riego, se encuentra el revestimiento de 13.924 m de canales, en el área agrícola de San Pedro de Atacama.

## **Características generales**

El ministerio de agricultura, recientemente comprometió la asignación de recursos para el desarrollo del riego en la comuna, partiendo de la regulación de los títulos de dominio de las tierras, hasta avanzar en la construcción de un embalse que permita dar seguridad y aumentar la superficie de riego.

## **Conclusión**

Desde el punto de vista hidrológico, la comuna de San Pedro de Atacama, es claramente un sector deficitario donde la demanda de agua excede largamente la escasa oferta existente. Los escasos recursos disponibles son muy apetecidos por el sector minero. Por lo anterior, para la sobrevivencia de las comunidades agrícolas, es muy importante la inversión en obras de acumulación, la gestión del recurso y se deben hacer esfuerzos en el fortalecimiento de las organizaciones de usuarios.

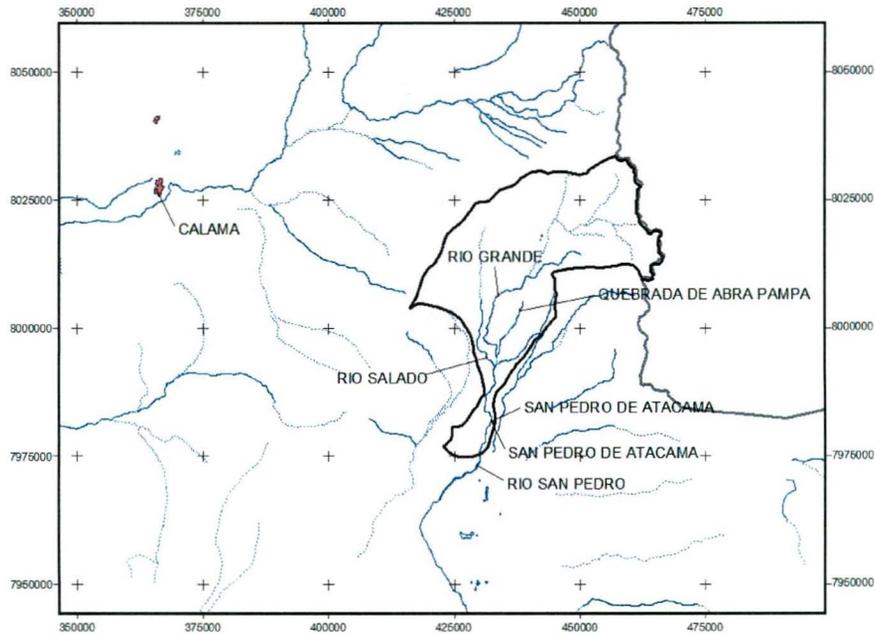


Figura 24: Cuenca hidrográficas sector San Pedro.

### 3.1.8 Río Copiapó

#### Características físicas

El río Copiapó se forma a partir de la confluencia de los ríos Jorquera y Pulido. Dos y medio kilómetros aguas abajo de La Junta se agrega el río Manflas, que proviene del sur con un reducido caudal. Prácticamente estos ríos son los únicos que aportan caudales superficiales, lo que implica que sólo aproximadamente un tercio de la hoya hidrográfica es activa (DGA 2004). El río Copiapó tiene una longitud de 152 km, el río Jorquera 79 km, el río Pulido 36 km y el río Manflas 95 km. El río que entrega el mayor aporte es el Pulido pese a que su hoya (2.100 km<sup>2</sup>) es aproximadamente la mitad que la del Jorquera (4.160 km<sup>2</sup>). Esto se debe a la existencia en las cabeceras de un sistema de Glaciares (Figura 25).

## **Régimen de precipitaciones**

El régimen de precipitaciones de la cuenca del Copiapó está gobernado por los sistemas frontales que provienen del Pacífico y que ingresan al territorio principalmente durante los meses de mayo a agosto, produciendo escasas precipitaciones en la parte baja de la Cuenca y que llega a 500 mm anuales en el sector cordillerano.

## **Régimen de caudales**

Los caudales registrados en la cabecera de la cuenca del río Copiapó son estables a lo largo del año, alcanzando pequeños valores máximos durante el período de deshielos y eventualmente hay otro valor mayor durante los meses invernales. La estabilidad de los caudales implica que la escorrentía es alimentada por los sistemas de aguas subterráneas (Figura 26).

## **Descripción hidrogeológica**

Desde el punto de vista hidrogeológico, en el sector alto de la cuenca del río Copiapó, destaca la existencia de permeabilidad muy baja debido a la existencia de rocas volcánicas, sedimentario - volcánicas y plutónicas (Figura 27). En la cuenca se han identificado dos sistemas de aguas subterráneas. Un sistema corre paralelo a la quebrada de Paipote por un lecho de rocas del período terciario sedimentario volcánico y cretácico mixto sedimentario y volcánico de muy baja permeabilidad hasta su confluencia con el río Copiapó. El segundo sistema se origina de la confluencia de las aguas subterráneas desde los ríos Manflas a Jorquera que se unen en el sector de Embalse Lautaro. El lecho por el cual escurre las aguas subterráneas son principalmente de rocas plutónicas del paleozoico plutónico y jurásicas sedimentario - volcánicas. A partir del sector Embalse Lautaro, escurre paralelo al río Copiapó en dirección NNW hasta la altura de Copiapó con profundidades freáticas que varían de los 53 a 11 m (Copiapó). Esta zona se destaca por tener un intenso uso para riego. (DGA, 2004)

## **Mecanismo de recarga de acuíferos**

Los mecanismos de recarga de los acuíferos están asociados principalmente a la infiltración de aguas lluvias sobre la cuenca y posiblemente a infiltración que se produzca en algunos sectores del cauce. Al igual que en todas las zonas áridas y semi-áridas de nuestro territorio, es probable que la recarga de los sistemas de agua subterránea sea altamente dependiente de la ocurrencia de eventos hidrológicos extremos, los cuales permiten que exista un aporte suficiente de agua que infiltre y posteriormente se transforme en recarga.

## **Riego**

Según el Censo Agropecuario del año 2007, en la Provincia de Copiapó se registraron 10.981 hectáreas bajo riego.

## **Obras hidráulicas**

El embalse Lautaro fue construido en la década de 1920, al interior del valle del río Copiapó, 98 km. al sureste de Copiapó. Es una obra con un muro hecho en tierra y uno de los más antiguos embalses de Chile aún en funciones. Tiene una capacidad de almacenar cerca de 25 millones de m<sup>3</sup> de agua y permite regular los caudales para el regadío del valle de Copiapó.

El sistema de riego del río Copiapó, consta de un sistema de conducción de una longitud que bordea los 300 Km, con una capacidad nominal de 1200 l/s, está compuesta de 3 canales matrices y 66 canales reconocidos bajo la jurisdicción de la Junta de Vigilancia del Río Copiapó y sus Afluentes.

Las principales acciones en esta cuenca, esta orientadas al mejoramiento de la conducción para garantizar la seguridad de riego, mediante el revestimiento de canales, un mejor control y administración en la entrega de sus aguas a los agricultores.

## **Características generales**

La cuenca del río Copiapó es la zona más crítica de Chile en cuanto al manejo de los recursos hídricos. Actualmente hay zonas donde los niveles freáticos se reducen constantemente, lo que evidencia la sobreexplotación del recurso. La actividad minera actual busca ampliar sus operaciones, existiendo millonarios proyectos como la mina de cobre de Caserones. Por otro lado el valle tiene un gran potencial productivo agrícola, donde existe una importante agricultura campesina y empresarial.

Sobre la base de la información de diferentes estudios técnicos revisados, queda claro que la cuenca ha sido extensivamente sobreexplotada. La extracción de aguas subterránea sobrepasó largamente la recarga del acuífero, reduciendo las recuperaciones de aguas superficiales y por lo tanto secando también los cauces superficiales.

Se han propuesto diferentes soluciones para este valle, que abarcan prácticamente el uso de todas las tecnologías disponibles. Entre estas soluciones están las construcciones de atrapanieblas, la desalinización de aguas de mar, la estimulación de lluvias, recarga artificial de acuíferos, la construcción de un nuevo embalse y la exportación de aguas desde la cuenca del Huasco.

Esta situación crítica motivó la formación de una mesa público-privada que tuvo como meta proponer medidas para paliar la escasez de agua. Actualmente se están desarrollando diferentes iniciativas, destacando entre ellas el programa para modernizar la infraestructura de riego y mejorar las capacidades existentes en materia de administración del recurso hídrico en el territorio.

## **Conclusión**

La Cuenca del río Copiapó presenta una situación muy compleja, pues no sólo es deficitaria, sino que ha sido sobreexplotada hasta llegar a niveles críticos. Por la misma razón la cuenca es el centro de atención actual de todos los organismos que tienen relación con el manejo de recursos hídricos.

Las principales acciones están dirigidas al mejoramiento de las obras de conducción, las cuales presentan serias ineficiencias en conducción.

La búsqueda de fuentes de agua no convencionales, se presentan como una atractiva fuente de abastecimiento para sectores que actualmente no disponen de aguas convencionales, o a su vez, disponer de seguridad de riego para la superficie agrícola ya existente. Cualquier iniciativa que se realice en esta cuenca será de interés nacional.

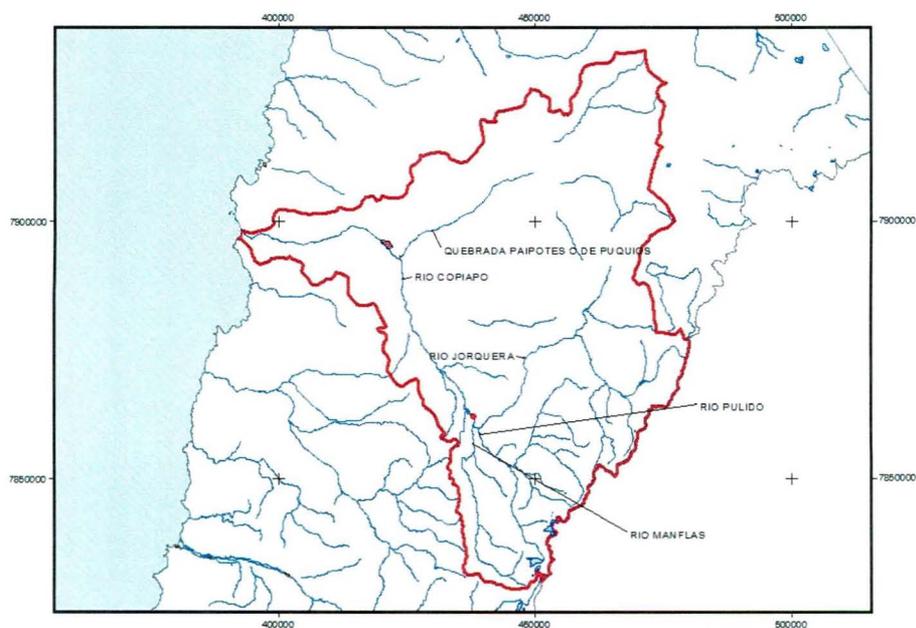


Figura 25: Cuenca hidrográfica Río Copiapó.

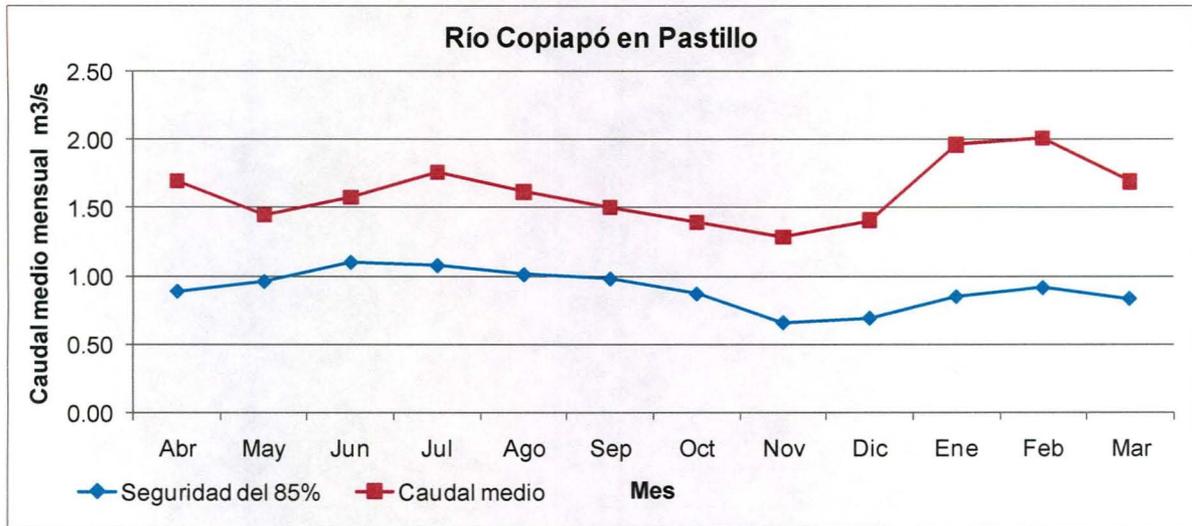


Figura 26: Curva de Variación Estacional en Río Copiapó en Pastillo (DGA, 2004).

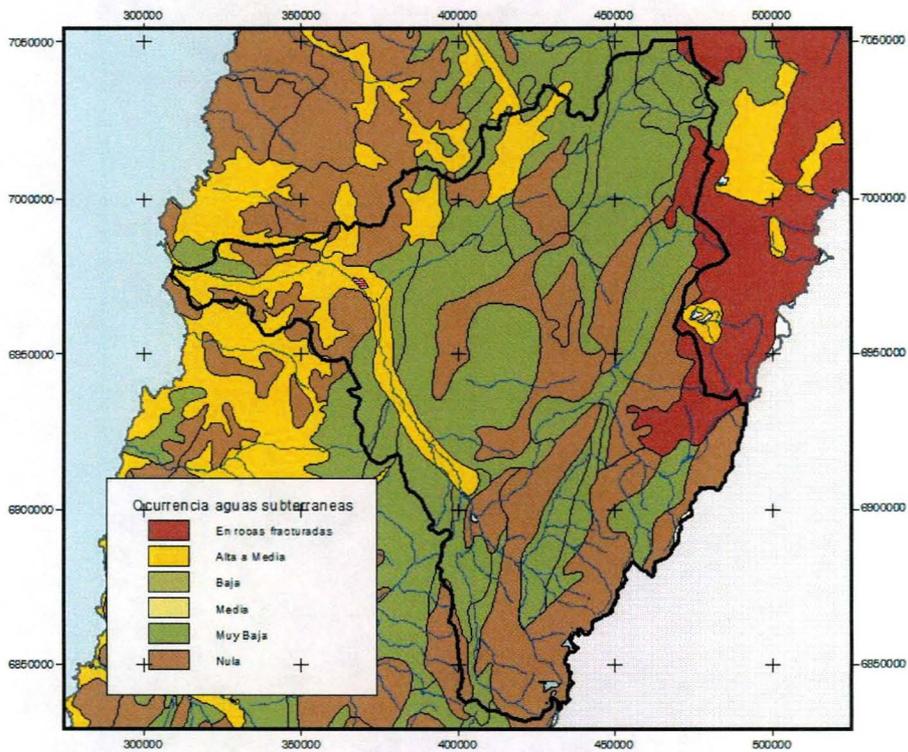


Figura 27: Ocurrencia de aguas subterráneas en la cuenca del Río Copiapó.

### **3.1.9 Quebrada Totoral y cuencas costeras hasta Carrizal**

#### **Características físicas**

Hidrológicamente este sector corresponde a una serie de cuencas costeras ubicadas al Sur del río Copiapó. La Quebrada Totoral tiene una cuenca aportante de 5.690 Km<sup>2</sup>, y un largo de 55 km. Sus principales tributarios son las Quebradas de Boquerón (3 km.) y Cachiyuyo (68 km.). La Quebrada Carrizal tiene una cuenca de 1.342 km<sup>2</sup> y un largo de 12 km., siendo su principal afluente la Quebrada de Tamarico con 17 km de largo (Figura 28).

#### **Régimen de precipitaciones**

Las precipitaciones se originan por los escasos sistemas frontales que logran llegar a este territorio. Según el Balance Hídrico Nacional (DGA, 1987) las precipitaciones en la cuenca van desde 25 mm al año en la parte central hasta 200 mm en la parte alta.

#### **Régimen de caudales**

Hidrológicamente la quebrada corresponde a un sistema conocido internacionalmente como Wadi, donde la escorrentía superficial es limitada y asociada a eventos extremos. Normalmente en el lecho del Wadi existe vegetación que contrasta con las riberas que son desérticas. En el caso de la quebrada Carrizal, existe una reducida escorrentía en la parte alta, pero esta no llega al Océano.

#### **Descripción hidrogeológica**

Los sistemas de aguas subterráneas corresponden a unidades de depósitos sedimentarias ubicadas en la parte superior de la cuenca y aparentemente conectadas hacia el río Copiapó. En la parte baja de la cuenca existen sistemas de rocas fracturadas que podrían almacenar agua (Figura 29).

### **Mecanismo de recarga de acuíferos**

Los mecanismos de recarga de aguas subterráneas son predominantemente infiltración de las lluvias que ocurren durante los eventos hidrológicos extremos (Años de el Niño).

### **Riego**

Este sector es compartido por las comunas de Huasco, Copiapó y Vallenar. De acuerdo a los derechos de agua constituidos se estima una superficie de riego de unas 200 hectáreas

### **Obras hidráulicas**

En estas cuencas no se registran antecedentes de obras hidráulicas existentes y en proyección para el uso en riego agrícola.

### **Características generales**

Esta es una zona donde existen más de 100 pequeños asentamientos, pero ninguna ciudad. La Dirección General de Aguas ha otorgado principalmente derechos de uso de aguas subterráneas y sólo un derecho en un cauce superficial, pero de un caudal reducido. El único proyecto del que se encontró información fue sobre la limpieza del humedal de Carrizal Bajo.

### **Conclusión**

Como todas las zonas del norte del país esta área es deficitaria. Sin embargo no fue posible encontrar informes sobre proyectos relacionados al riego en la zona. En el Sistema de Información Integral de Riego no aparece información sobre esta zona. Por ello se estima que no existe una actividad agrícola importante.

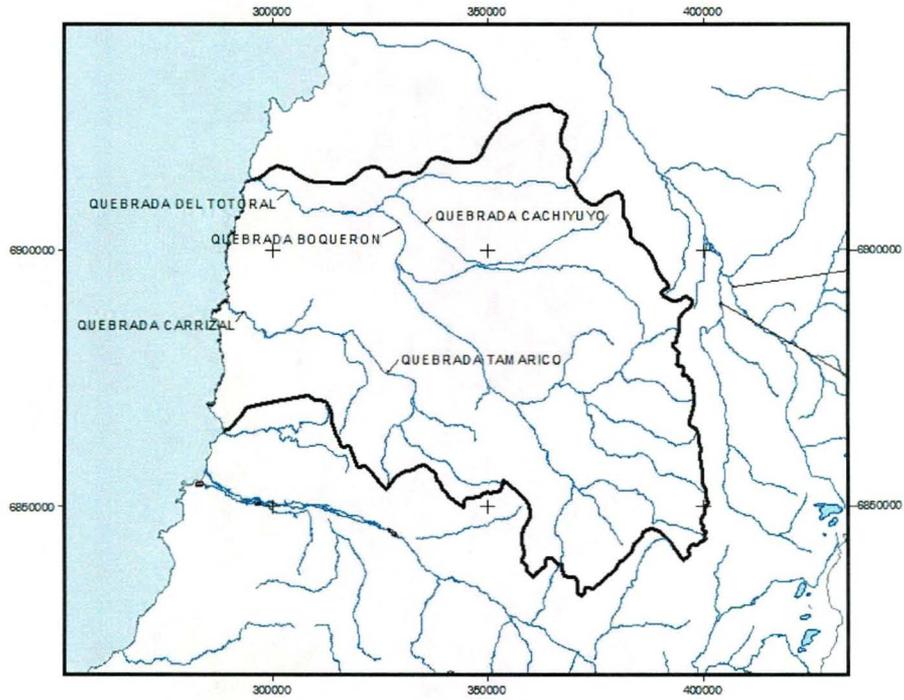


Figura 28: Cuencas hidrográficas Costeras entre las Quebradas del Totoral y Carrizal.

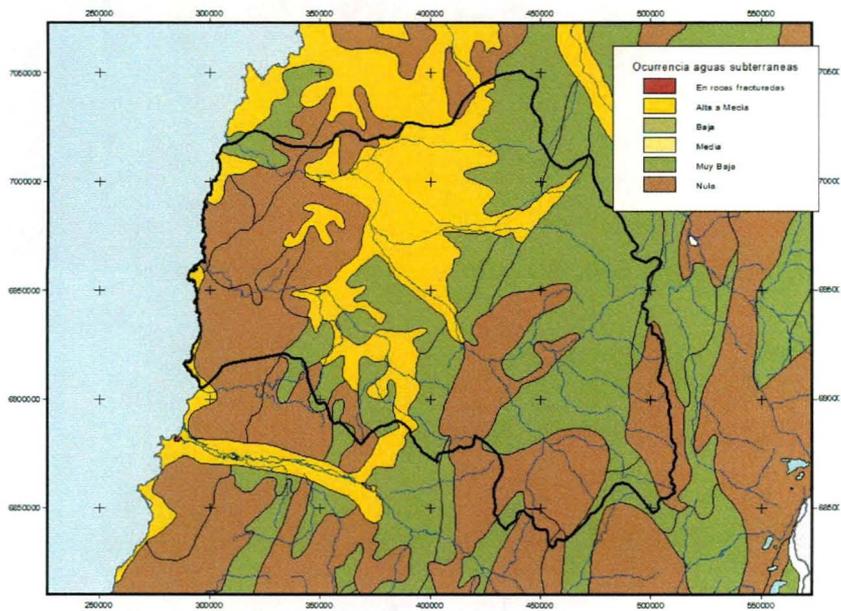


Figura 29: Ocurrencia de aguas subterráneas entre las Quebradas del Totoral y Carrizal.

### **3.1.10 Río Huasco**

#### **Características físicas**

El río Huasco se forma a partir de la confluencia de los ríos Del Carmen y Del Tránsito. El río Huasco tiene una longitud de 148 km y una cuenca de 9.850 km<sup>2</sup>. El río Del Tránsito posee una cuenca de 4.135 km<sup>2</sup> y una longitud de 50 km y tiene algunos glaciares en la alta Cordillera. El río del Carmen tiene una longitud de 109 km (Figura 30).

#### **Régimen de precipitaciones**

Las precipitaciones en la cuenca son originadas por sistemas frontales y se concentran entre los meses de abril a octubre. La precipitación anual que cae sobre la cuenca varía desde 50 a 300 mm al año (DGA, 1987).

#### **Régimen de caudales**

Si bien es cierto, el río Huasco presenta sus mayores crecidas asociadas a los períodos de deshielo, según la información disponible (DGA, 2004) que se presenta en la Figura 31, existe una mayor disponibilidad media durante los meses invernales y la disponibilidad durante los meses de verano varía entre 1 y 3 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>.

#### **Descripción hidrogeológica**

Desde el punto de vista hidrogeológico, el único sector donde existen formaciones acuíferas de interés corresponde a la parte baja del valle del río Huasco. (Figura 32). En la parte alta destaca la existencia de permeabilidad muy baja, debido a la existencia de rocas plutónicas del paleozoico formado por intrusivos graníticos y basamentos impermeables junto con rocas volcánicas, coladas y depósitos piroclásticos reolíticos, dacíticos, andesíticos y basálticos del período jurásico de muy baja permeabilidad (DGA, 2004).

#### **Mecanismo de recarga de acuíferos**

Los mecanismos de recarga de los acuíferos están asociados principalmente a la infiltración de aguas lluvias sobre la cuenca y posiblemente a

infiltración que se produzca en algunos sectores del cauce. Al igual que en todas las zonas áridas y semi-áridas de nuestro territorio, es probable que la recarga de los sistemas de agua subterránea sea altamente dependiente de la ocurrencia de eventos hidrológicos extremos, los cuales permiten que exista un aporte suficiente de agua que infiltre y posteriormente se transforme en recarga.

## **Riego**

Este sector es compartido por las comunas de Huasco, Freirina, Vallenar y Alto del Carmen. De acuerdo al Censo Agropecuario del 2007, se estima una superficie de riego de unas 8.326 hectáreas

## **Obras hidráulicas**

La cuenca del río Huasco posee un sistema de regulación formado por tres embalses, de los cuales el mayor es el embalse Santa Juana que tiene un volumen de regulación de 160 millones de m<sup>3</sup>. Los otros dos embalses son los embalses Laguna Grande y Laguna Chica con volúmenes de 6 y 4,5 millones de m<sup>3</sup>. Los recursos hídricos de la cuenca son controlados por la Junta de Vigilancia del río Huasco.

En la cuenca del río Huasco, se está desarrollado el proyecto minero Pascua Lama, que despertó gran controversia en los últimos años. Sin embargo la Junta de Vigilancia del Río Huasco firmó un protocolo de vigilancia de la Cuenca del río Huasco, con la Compañía minera Barrick Gold, bajo el cual la compañía se comprometió a financiar un sistema de monitoreo hídrico y glaciológico bajo el control de la Junta de Vigilancia y la creación de un fondo de compensación ambiental por un total de USD 60 Millones para proyectos asociativos de desarrollo hídrico y del riego de los usuarios de la Junta de Vigilancia.

Estás inversiones deben enmarcarse en proyectos de mejoramiento de sistemas de riego, mejoramientos en proyectos de construcción, reparación y/o modernización de obras de infraestructura hidráulica, desarrollo de proyectos de obtención de nuevas fuentes hídricas, financiar estudios técnicos necesarios para

diseñar y construir uno o más embalses de regulación de aguas, entre otras obras importantes en el área de influencia del proyecto minero Pascua-Lama.

Actualmente se encuentra en ejecución el mejoramiento de canales del Huasco, lo cual beneficiará una superficie de 4.400 ha.

### **Características generales**

En la cuenca del río Huasco se mantienen los conflictos entre las necesidades de agua del sector agrícola y del sector minero. Este conflicto es asimétrico, pues las compañías mineras pueden pagar grandes sumas de dinero por los derechos de agua.

### **Conclusión**

Esta cuenca presenta déficit hídrico, pero en ella se introducen dos factores muy interesantes desde el punto de vista de la administración de los recursos hídricos. El impacto del Embalse Santa Juana que dio seguridad de riego a la agricultura y la buena gestión de la Junta de Vigilancia que supo sacar provecho a la instalación de un gran proyecto productivo. Por lo anterior, se considera que en esta cuenca sería totalmente factible el desarrollo de proyectos que usen fuentes no convencionales para el riego.

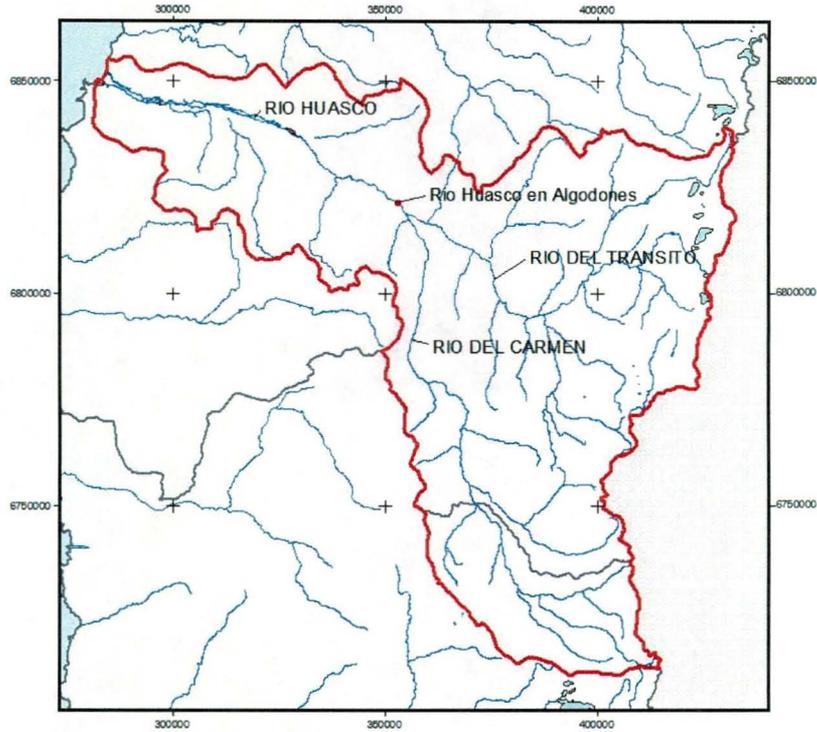


Figura 30: Cuenca hidrográfica del Río Huasco.

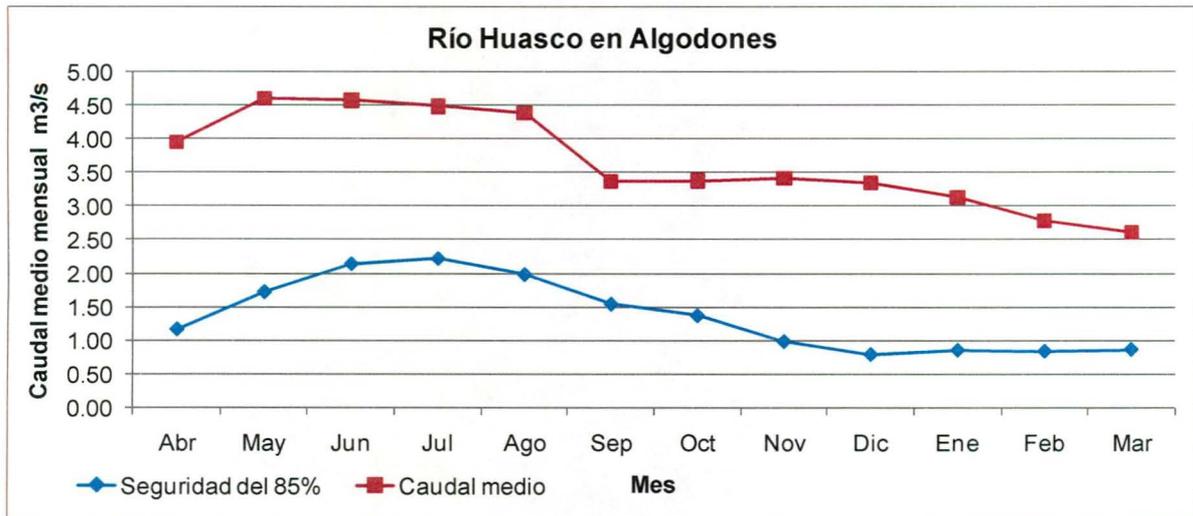


Figura 31: Curva de Variación Estacional en Río Huasco en Algodones (DGA, 2004).

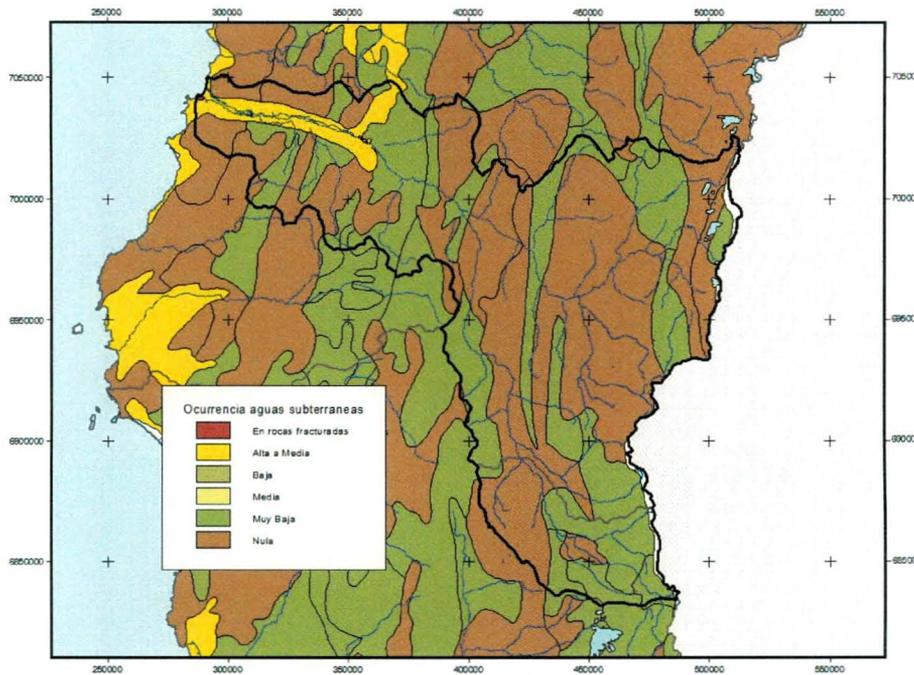


Figura 32: Ocurrencia de aguas subterráneas en la cuenca del Río Huasco.

### 3.1.11 Río Elqui

#### Características físicas

El río Elqui tiene 132 km de largo y nace de la unión de los ríos Turbio y Claro, ubicada a unos 2 kilómetros de la localidad de Rivadavia. Aguas abajo de esta localidad las quebradas tributarias al río no aportan aguas, excepto durante eventos de lluvia importantes. Normalmente, de la cuenca total del Elqui (9.826 km<sup>2</sup>), un tercio no contribuye con aguas a la escorrentía superficial (DGA, 2004). En la parte baja del río, este recibe el aporte de numerosas vertientes.

El río Turbio es el principal afluente del Elqui con una cuenca de 4.196 km<sup>2</sup> y con un largo de 143 km, posee glaciares en la parte alta de su cuenca (Figura 33). El río Claro, con una longitud de 95 km, no posee aporte de glaciares. Las precipitaciones en la cuenca son originadas por sistemas frontales y se concentran entre los meses de abril a octubre.

## **Régimen de precipitaciones**

Las precipitaciones en la cuenca son originadas por sistemas frontales y se concentran entre los meses de abril a octubre. La precipitación anual que cae sobre la cuenca varía desde 100 a 500 mm al año (DGA, 1987).

## **Régimen de caudales**

Como lo presenta la Figura 34, el río Elqui presenta un régimen nival con sus mayores caudales durante los meses de deshielo (DGA, 2004).

## **Descripción hidrogeológica**

Desde el punto de vista hidrogeológico, en la parte alta, destaca la existencia de permeabilidad muy baja debido a la existencia de rocas metamórficas y sedimentarias, volcánicas y plutónicas del período paleozoico motivo por el cual el escurrimiento subterráneo ocurre paralelo a los cauces. Desde Rivadavia hasta la desembocadura en La Serena existe una formación acuífera asociada al valle del río Elqui formada por depósitos no consolidados o rellenos con profundidades freáticas que varían de los 17 a los 3 metros, encajonados por rocas sedimentario - volcánicas de muy baja productividad. En este sector del valle, el acuífero freático que se extiende ininterrumpidamente a lo largo de todo el valle, sólo muestra un leve grado de semiconfinamiento en el sector terminal (La Serena). Dicho acuífero presenta valores de transmisividad variables entre  $4.200$  y  $100 \text{ m}^2 \text{ día}^{-1}$ , estimándose como valor medio unos  $500 \text{ m}^2 \text{ día}^{-1}$ . Existe un último acuífero que escurre en dirección NSW paralelo a la cordillera de la Costa por rocas volcánico - sedimentarias del período cretácico, para juntarse al flujo subterráneo principal en las cercanías de la Serena (DGA, 2004).

## **Mecanismo de recarga de acuíferos**

Los mecanismos de recarga de los acuíferos están asociados principalmente a la infiltración de aguas lluvias sobre la cuenca y posiblemente a infiltración que se produzca en algunos sectores del cauce. Al igual que en todas

las zonas áridas y semi-áridas de nuestro territorio, es probable que la recarga de los sistemas de agua subterránea sea altamente dependiente de la ocurrencia de eventos hidrológicos extremos, los cuales permiten que exista un aporte suficiente de agua que infiltre y posteriormente se transforme en recarga.

## **Riego**

Este sector es compartido por las comunas de La Serena, Vicuña y Paihuano. De acuerdo al Censo Agropecuario del 2007, se estima una superficie de riego de unas 18.200 hectáreas

## **Obras hidráulicas**

En la cuenca del río Elqui destaca la construcción del embalse Puclaro que tiene un volumen de regulación de 200 millones de m<sup>3</sup> y beneficia potencialmente 20.000 hectáreas. También existe el embalse la Laguna que posee una capacidad de 40 millones de m<sup>3</sup>. Por lo anterior, llama la atención que en toda la provincia de Elqui la superficie regada, según el Censo Agropecuario del 2007, sea de 18.200 hectáreas.

En un estudio desarrollado por Cazalac (2006) para el Gobierno Regional de Coquimbo, se propusieron diferentes medidas para aumentar la eficiencia en el uso del agua en la región. En el caso de la Cuenca del Elqui, se estimó que el área regada de la cuenca puede llegar a unas 33.400 hectáreas, siempre y cuando se desarrolle un sistema de distribución de aguas acorde con las demandas y minimizando las pérdidas de distribución. En la actualidad, las aguas de la cuenca son distribuidas para el uso agrícola mediante 152 canales.

## **Características generales**

En la cuenca del río Elqui se han generado distintos tipos de conflictos relacionados con el manejo de los recursos hídricos. En esta cuenca se generaron las primeras oposiciones al otorgamiento de derechos de aprovechamientos de aguas subterráneas, basadas en las interferencias que estas explotaciones harían en los caudales superficiales. El éxito de los regantes al demostrar la interacción

entre las aguas subterráneas y las aguas superficiales fue determinante en la formulación de las modificaciones del código de Aguas, aprobadas el año 2005.

Al igual que en todo el resto del norte de Chile, en esta cuenca existen conflictos entre la minería y los otros usuarios del agua. Estos conflictos se relacionan tanto con la competencia por los derechos de agua como por el impacto de la actividad minera en la calidad de las aguas del valle del Elqui. En especial, la contaminación de las aguas por lixiviaciones asociadas a faenas mineras abandonadas es la principal preocupación ambiental de la cuenca.

### Conclusión

La cuenca del Elqui es deficitaria en recursos hídricos. Sin embargo, existe un interesante potencial de mejorar los sistemas de distribución de agua y aplicación de riego. Por lo anterior, se considera que en esta cuenca sería totalmente factible el desarrollo de proyectos que usen fuentes no convencionales para el riego.

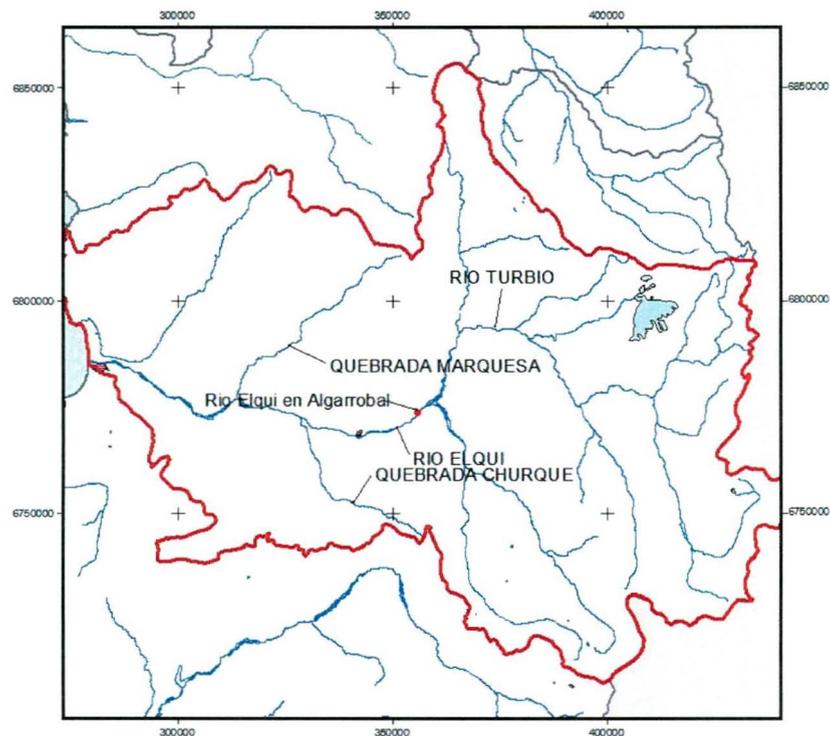


Figura 33: Cuenca hidrográfica del Río Elqui.

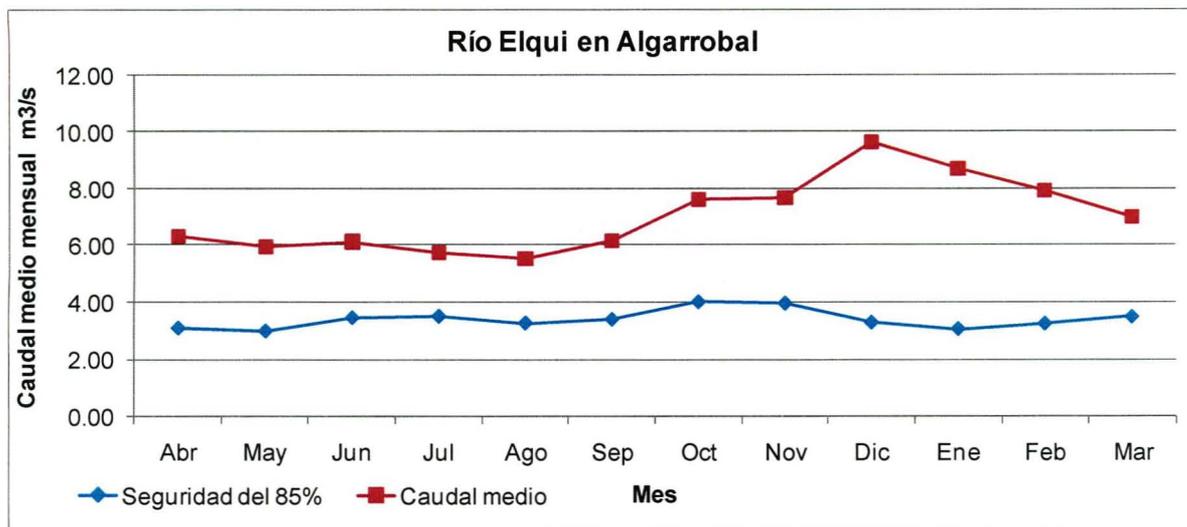


Figura 34: Curva de Variación Estacional en Río Elqui en Algarrobal (DGA, 2004).

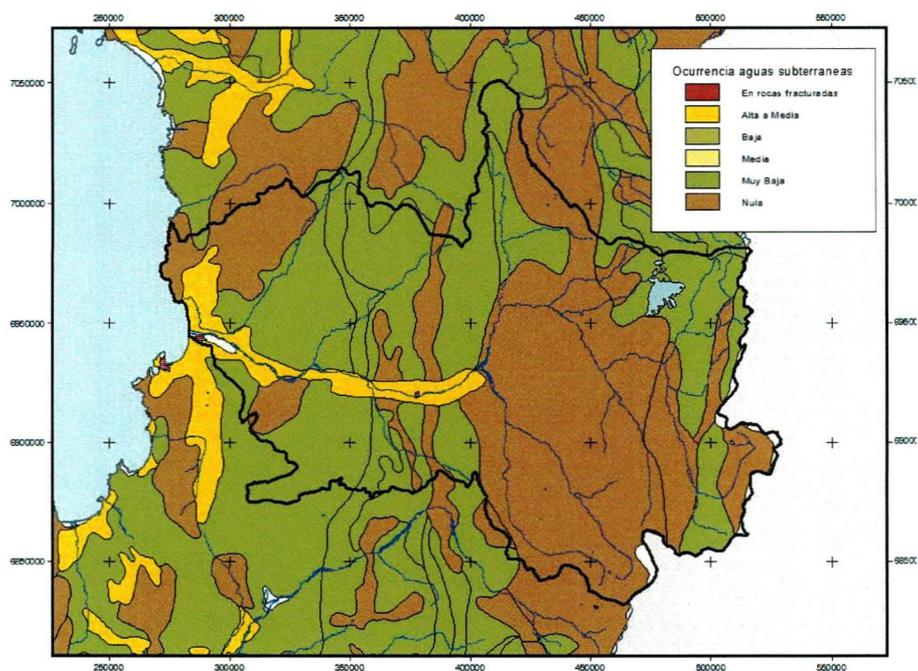


Figura 35: Ocurrencia de aguas subterráneas en la cuenca del Río Elqui.

### **3.1.12 Río Limarí**

#### **Características físicas**

La cuenca del río Limarí posee una superficie de 11.696 km<sup>2</sup>. El río Limarí, con una longitud de 171 km, se forma por la confluencia de los ríos Grande y Hurtado. Si bien es cierto que ambos ríos nacen en la Cordillera de los Andes, ninguno recibe aportes de glaciares (Figura 36). El río Grande, con una longitud de 317 km, recibe una serie de afluentes de importancia, entre los cuales cabe mencionar: el río Rapel, el río Mostazal y el río Guatulame (con sus afluentes Cambarbalá, Pama y Cogotí). El río Guatulame está regulado por el embalse Cogotí de 150 millones m<sup>3</sup> de capacidad y en la confluencia de ese río con el río Grande se encuentra el embalse La Paloma, con un volumen de regulación de 750 millones m<sup>3</sup>.

Los ríos Grande y Hurtado se juntan aproximadamente 4 km, aguas arriba de la ciudad de Ovalle. A partir de la confluencia de ambos toma el nombre de río Limarí, el que luego de recorrer alrededor de 60 Km para desembocar al mar en la localidad denominada Punta Limarí. Entre la ciudad de Ovalle y su desembocadura, el río Limarí recibe dos afluentes de escasa importancia, ellos son los esteros Ingenio por el norte y Punitaqui por el sur, teniendo ambos sus orígenes en la cordillera de la Costa (DGA, 2004).

#### **Régimen de precipitaciones**

Las precipitaciones en la cuenca son originadas por sistemas frontales y se concentran entre los meses de abril a octubre. La precipitación anual que cae sobre la cuenca varía desde 100 a 700 mm al año (DGA, 1987).

#### **Régimen de caudales**

Como lo presenta la Figura 37, el río Limarí posee un régimen nivo-pluvial con sus mayores caudales durante los meses de deshielo, pero con un importante flujo durante los meses de invierno (DGA, 2004).

## **Descripción hidrogeológica**

Desde el punto de vista hidrogeológico, en la parte alta destaca la existencia de permeabilidad muy baja debido a la existencia de rocas plutónicas e hipabisales del Paleozoico Plutónico, de muy baja permeabilidad hidráulica (Figura 38). En la sección media, predominan las rocas volcánico - sedimentarias del cretácico - terciario con algunas intrusiones de Terciarias plutónicas de muy baja permeabilidad. Existe un acuífero paralelo al río Grande, hasta la confluencia con el río Hurtado en Ovalle, que presenta niveles freáticos entre 17 a 4,5 m. Otro acuífero, paralelo al río Combarbalá, está constituido por rocas sedimentarias-volcánicas, con profundidades freáticas de 3 a 1,5 m. Desde la confluencia del Limarí con el Hurtado a la altura de Ovalle hasta la desembocadura el acuífero escurre en dirección SWW por un lecho de depósitos no consolidados y rellenos hasta el sector de Barraza, lugar donde atraviesa un lecho de rocas plutónicas del Jurásico hasta la desembocadura al mar con profundidades someras (DGA, 2004).

## **Mecanismo de recarga de acuíferos**

Los mecanismos de recarga de los acuíferos están asociados principalmente a la infiltración de aguas lluvias sobre la cuenca y posiblemente a infiltración que se produzca en algunos sectores del cauce. Al igual que en todas las zonas áridas y semi-áridas de nuestro territorio, es probable que la recarga de los sistemas de agua subterránea sea altamente dependiente de la ocurrencia de eventos hidrológicos extremos, los cuales permiten que exista un aporte suficiente de agua que infiltre y posteriormente se transforme en recarga.

## **Riego**

La cuenca del río Limarí comprende la provincia del mismo nombre y según el Censo Agropecuario del 2007, se registraron 44.000 hectáreas bajo riego.

## **Obras hidráulicas**

La Cuenca del Limarí, dispone de 462 canales de riego que se abastecen de un importante sistema de regulación conformado por los embalses Recoleta, La

Paloma y Cogotí que almacenan 100, 750 y 150 millones de m<sup>3</sup> respectivamente. Este volumen de regulación, es aprovechado por una organización que permite la existencia de reglas claras de operación de los embalses, y la entrega de agua de acuerdo a las necesidades incluyendo el traslado de derechos de agua (Cazalac, 2006).

Para mejorar la seguridad de riego de unas 5.000 hectáreas ubicadas aguas arriba de los embalses existentes actualmente, se están desarrollando proyectos para la construcción de nuevos embalses: Murallas Viejas en el río Combarbalá, Las Trancas en río Cogotí y Valle Hermoso en el río Pama.

### **Características generales**

Al igual que en todo el resto del norte de Chile, en esta cuenca existen conflictos entre la minería y los otros usuarios del agua. Estos conflictos se relacionan tanto con la competencia por los derechos de agua como por el impacto de la actividad minera en la calidad de las aguas del valle del Elqui. En especial, la contaminación de las aguas por lixiviaciones asociadas a faenas mineras abandonadas es la principal preocupación ambiental de la cuenca.

### **Conclusión**

La cuenca del Limarí posee un sistema de distribución de aguas muy bien administrado. Sin embargo, este sistema no puede expandirse mas allá de lo que permiten los embalses existentes y por ello se ha generado un mercado de aguas operativo. Por lo anterior, se considera que en esta cuenca sería totalmente factible el desarrollo de proyectos que usen fuentes no convencionales para el riego.

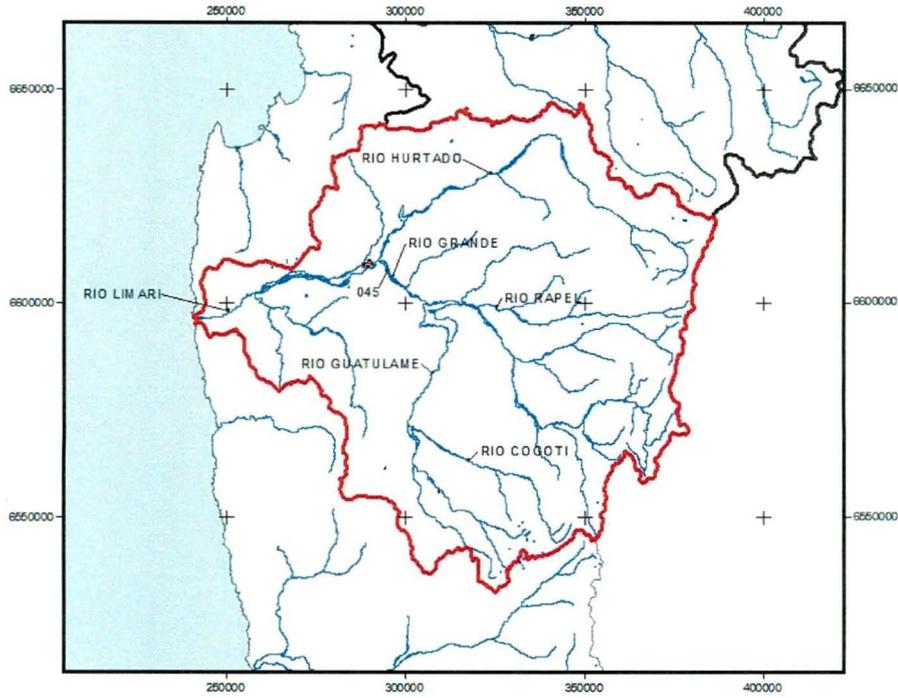


Figura 36: Cuenca hidrográfica del Río Limarí.

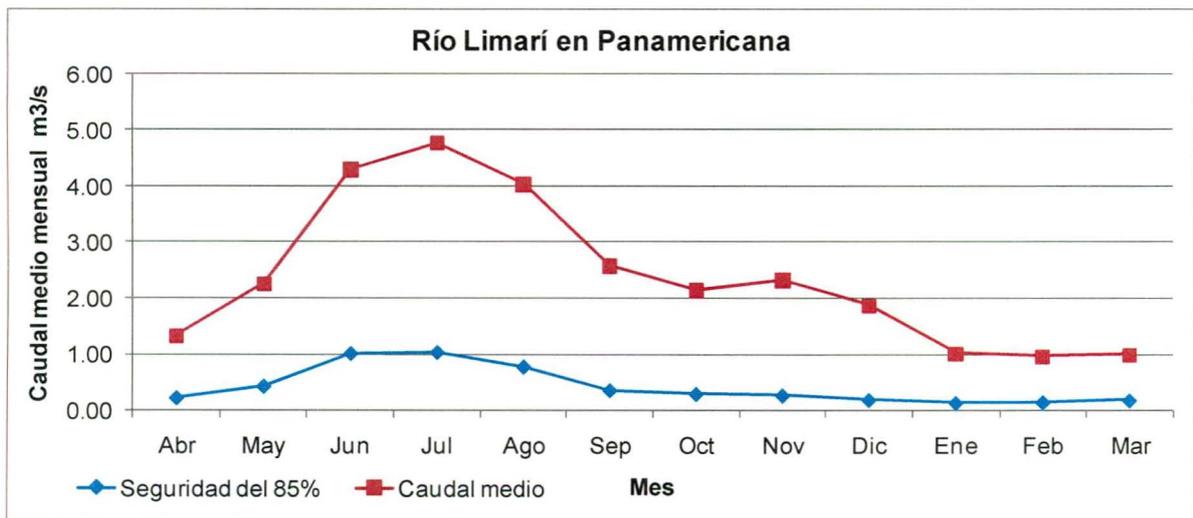


Figura 37: Curva de Variación Estacional en Río Limarí en Panamericana (DGA, 2004).

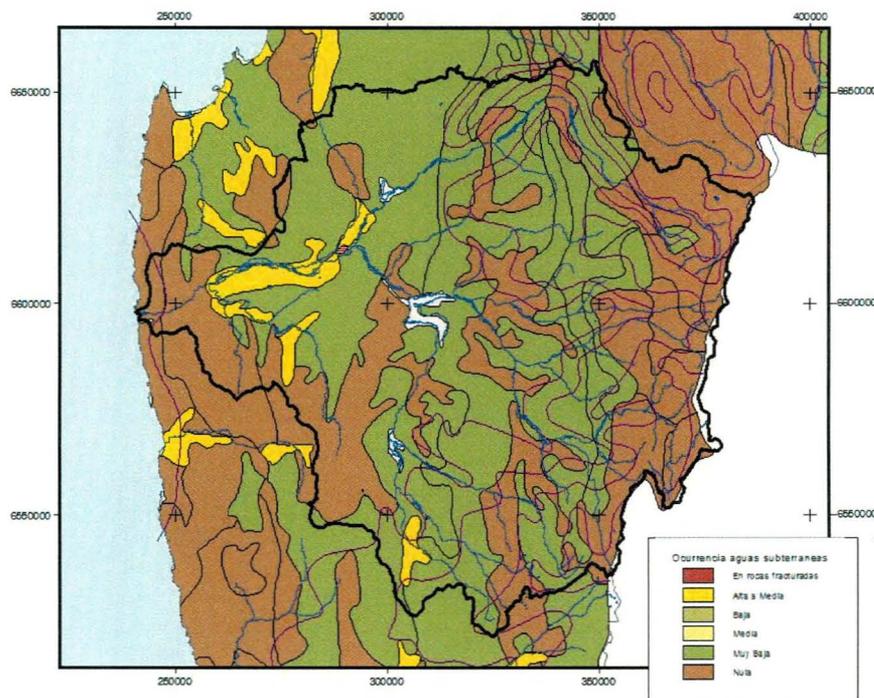


Figura 38: Ocurrencia de aguas subterráneas en la cuenca del Río Limarí.

### 3.1.13 Río Petorca

#### Características físicas

La cuenca del río Petorca nace en la precordillera andina, drena una superficie de aproximadamente 1.986 km<sup>2</sup> y tiene una longitud de 76 km (Figura 39). En la parte alta de la cuenca el río Petorca recibe el nombre de río Del Sobrante, nombre que cambia a la altura de la ciudad de Petorca. Los principales afluentes de este río son el río Pedernal y los esteros Yerba Loca, La Laguna, Las Palmas y la quebrada Denker.

#### Régimen de precipitaciones

Las precipitaciones en la cuenca son originadas por sistemas frontales y se concentran entre los meses de abril a octubre. La precipitación anual que cae sobre la cuenca varía desde 300 a 700 mm al año (DGA, 1987).

## **Régimen de caudales**

Como lo presenta la Figura 40, el río Petorca presenta un régimen nivopluvial con valores de caudales similares durante los meses de invierno y deshielo (DGA, 2004).

## **Descripción hidrogeológica**

Desde el punto de vista hidrogeológico, en la mayor parte de la cuenca existen formaciones de roca asociadas a bajos valores de permeabilidad. En el valle de los esteros se presentan rellenos permeables que forman acuíferos. Los acuíferos subterráneos, se ubican solamente alrededor del cauce del río Petorca y en la desembocadura. En el valle, se presenta un acuífero libre que se desarrolla prácticamente a lo largo de todo el valle principal del río Petorca. Los rellenos, de espesores variables entre 8 a 25 metros, están constituidos por sedimentos granulares, desde bolones hasta arenas finas, con frecuente presencia de estratos de arcilla que van minando su potencial hídrico. En el sector de Longotoma, próximo a la Ruta 5 Norte, existe además un acuífero confinado, reconocido a partir de los 30 metros de profundidad. El confinamiento es provocado por estratificaciones de arcilla que sobreyacen a sedimentos granulares más profundos. En el borde costero presenta una alta permeabilidad de roca. (Figura 41).

## **Mecanismo de recarga de acuíferos**

Los mecanismos de recarga de los acuíferos están asociados principalmente a la infiltración de aguas lluvias sobre la cuenca y posiblemente a infiltración que se produzca en algunos sectores del cauce. Es probable que la recarga de los sistemas de agua subterránea sea altamente dependiente de la ocurrencia de eventos hidrológicos extremos, los cuales permiten que exista un aporte suficiente de agua que infiltre y posteriormente se transforme en recarga.

## **Riego**

La cuenca del río Petorca se desarrolla principalmente en las comunas de Petorca y la Ligua. Según el Censo Agropecuario del 2007, la superficie regada de ambas comunas es de 3.600 hectáreas en la comuna de Petorca y 3.800 en la comuna de la Ligua.

## **Obras hidráulicas**

La cuenca del Petorca fue severamente afectada por la sequía durante la temporada de riego 2008-2009. Por esta razón, se ha acentuado la petición de construir un embalse en la cuenca. Frente a esta necesidad, el Estado se encuentra realizando los estudios de factibilidad para la construcción del embalse Las Palmas, el cual tendría un volumen de acumulación de 55 millones de m<sup>3</sup> y beneficiaría a una superficie de 3.800 ha. También se proyectaría la construcción del embalse Alicahue (al 2015-2020), el cual tendría una capacidad de 56 millones de m<sup>3</sup> y beneficiaría a 2.300 ha.

## **Características generales**

Al igual que en todo el resto del norte de Chile, en esta cuenca existen conflictos entre la minería y los otros usuarios del agua. Estos conflictos se relacionan tanto con la competencia por los derechos de agua como por el impacto de la actividad minera en la calidad de las aguas del Petorca. En especial, la contaminación de las aguas por lixiviaciones asociadas a faenas mineras abandonadas es la principal preocupación ambiental de la cuenca.

## **Conclusión.**

Desde el punto de vista hidrológico, la cuenca del Petorca, es claramente un sector deficitario donde la demanda de agua excede largamente la escasa oferta existente. Es por ello, que la proyección de las obras de acumulación consideradas para esta cuenca, permitiría remediar a mediano plazo gran parte de la demanda que actualmente no se satisface. Tomando en cuenta estos

antecedentes, se considera atractiva la utilización de aguas no convencionales para cubrir la demanda de riego agrícola a corto plazo.

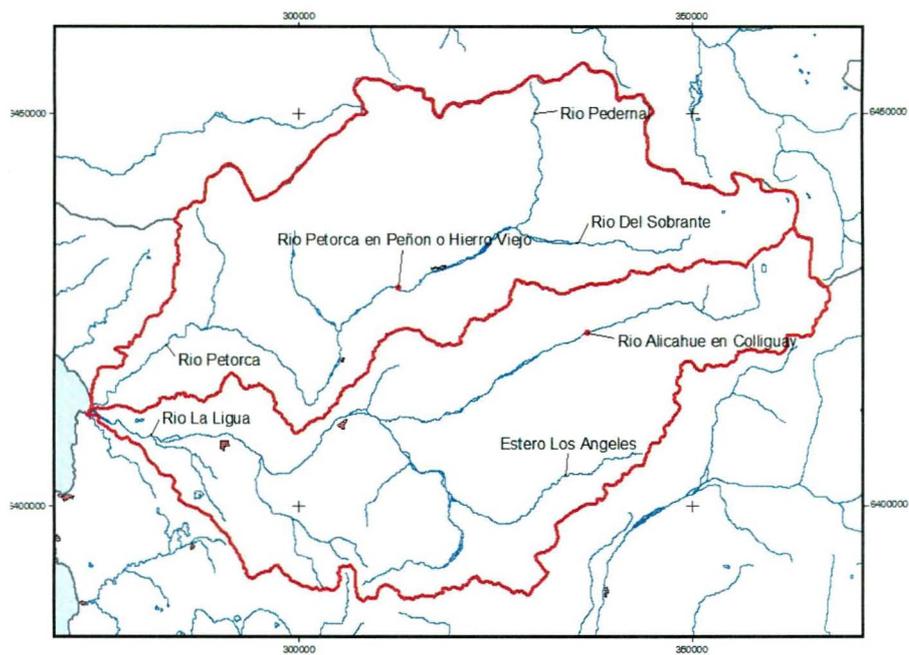


Figura 39: Cuencas hidrográficas de los ríos Petorca y Ligua.

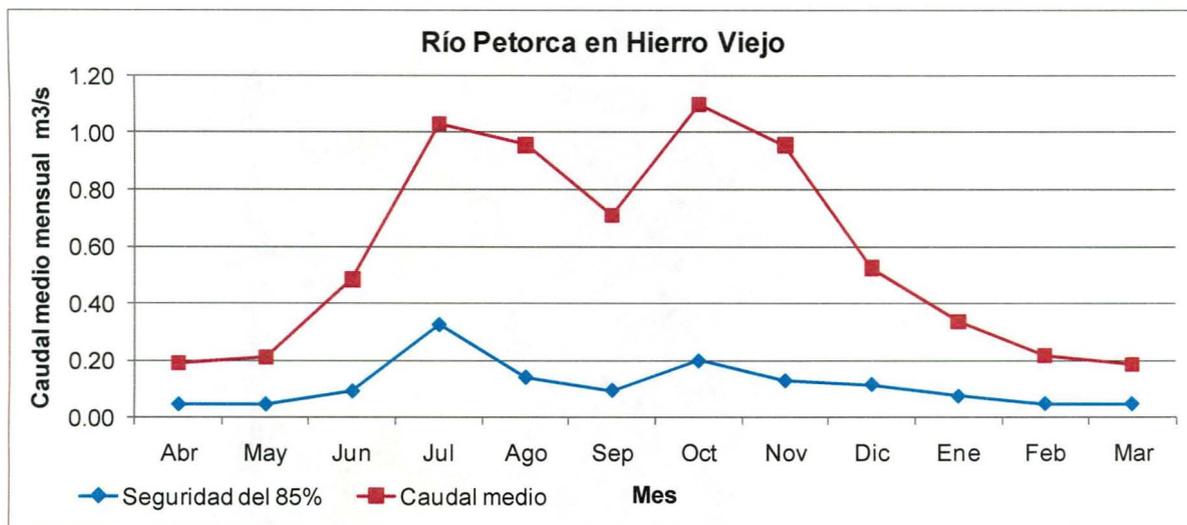


Figura 40: Curva de Variación Estacional en Río Petorca en Hierro Viejo (DGA, 2004).

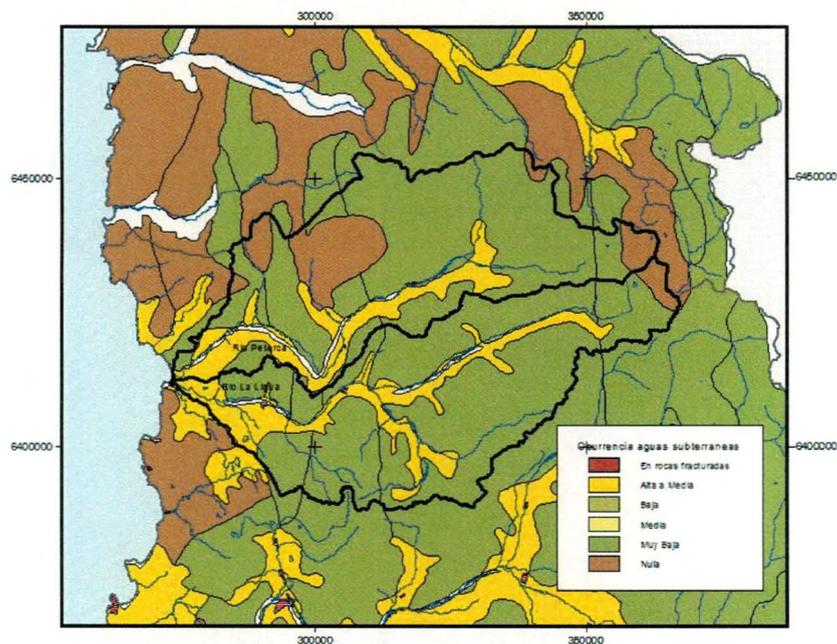


Figura 41: Ocurrencia de aguas subterráneas en las cuencas de los ríos Petorca y Ligua.

### **3.1.14 Río Ligua**

#### **Características físicas**

La cuenca del río Ligua nace en la precordillera andina y drena una superficie de aproximadamente 1.980 km<sup>2</sup> (Figura 39). Por su similar orientación y área, esta cuenca es considerada como gemela de la del río Petorca. El río la Ligua se forma en la confluencia del río Alicahue con el estero Cajón de Los Ángeles. El sistema Alicahue-La Ligua tiene una longitud aproximada de 106 km y una pendiente media de 1,1%. El afluente más importante que recibe hacia aguas abajo es la quebrada La Patagua, que se le une aguas arriba de la ciudad de La Ligua. Luego de un recorrido de 24 km desde este último punto, desagua al mar, frente a la laguna de Longotoma (DGA, 2004).

#### **Régimen de precipitaciones**

Las precipitaciones en la cuenca son originadas por sistemas frontales y se concentran entre los meses de abril a octubre. La precipitación anual que cae sobre la cuenca varía desde 300 a 700 mm al año (DGA, 1987).

#### **Régimen de caudales**

Como lo presenta la Figura 42, el río Alicahue, en la parte alta, presenta un régimen nival con importantes valores de caudales durante los meses de deshielo. En la parte baja de la cuenca, el sistema hidrológico recibe aportes pluviales, que generan un mayor caudal en invierno, lo que se aprecia en la Figura 43 (DGA, 2004).

#### **Descripción hidrogeológica**

Desde el punto de vista hidrogeológico, en la mayor parte de la cuenca existen formaciones de roca asociadas a bajos valores de permeabilidad. En el valle de los esteros se presentan rellenos permeables que forman acuíferos. Los acuíferos subterráneos, se ubican solamente alrededor del cauce del río Ligua y en la desembocadura. En el valle, se presenta un acuífero libre que se desarrolla

prácticamente a lo largo de todo el valle principal del río Ligua. Los rellenos, de espesores variables entre 8 a 25 metros, están constituidos por sedimentos granulares, desde bolones hasta arenas finas, con frecuente presencia de estratos de arcilla que van minando su potencial hídrico. En el sector de Longotoma, próximo a la Ruta 5 Norte, existe además un acuífero confinado, reconocido a partir de los 30 metros de profundidad. El confinamiento es provocado por estratificaciones de arcilla que sobreyacen a sedimentos granulares más profundos. En el borde costero presenta una alta permeabilidad de roca (Figura 41).

### **Mecanismo de recarga de acuíferos**

Los mecanismos de recarga de los acuíferos están asociados principalmente a la infiltración de aguas lluvias sobre la cuenca y posiblemente a infiltración que se produzca en algunos sectores del cauce. Es probable que la recarga de los sistemas de agua subterránea sea altamente dependiente de la ocurrencia de eventos hidrológicos extremos, los cuales permiten que exista un aporte suficiente de agua que infiltre y posteriormente se transforme en recarga.

### **Riego**

Según el Censo Agropecuario del 2007, la superficie regada es de 3.800 ha en la comuna de la Ligua.

### **Obras hidráulicas**

La cuenca del Ligua fue severamente afectada por la sequía durante la temporada de riego 2008-2009. Por esta razón, se ha acentuado la petición de construir un embalse en la cuenca. Frente a esta necesidad, el Estado se encuentra realizando los estudios de factibilidad para la construcción del embalse Los Ángeles, con una capacidad de acumulación de 50 millones de m<sup>3</sup> que beneficiaría a una superficie de 3.500 ha. También se encuentra proyecta la construcción del embalse Pedernal (al 2015-2020), con una capacidad de 31 millones de m<sup>3</sup> que beneficiaría una superficie de 1.800 ha.

## **Características generales**

En esta cuenca existen conflictos entre la minería y los otros usuarios del agua. Estos conflictos se relacionan tanto por la competencia de los derechos de agua, como por el impacto en la calidad de los recursos hídricos. La contaminación del río La Ligua es el principal motivo de los distintos conflictos que se generan entre los distintos actores relevantes del agua. La contaminación de estas aguas se asocia a efectos de la minería, contaminación difusa por la agricultura y por condiciones naturales de la cuenca.

## **Conclusión**

Desde el punto de vista hidrológico, La cuenca del Ligua, es claramente un sector deficitario donde la demanda de agua excede largamente la escasa oferta existente.

Tomando en cuenta que se considera la construcción de embalses para el abastecimiento de agua para el riego agrícola, debe tenerse en consideración que la naturaleza de los contaminantes presentes en el agua del río, pudiesen generar un mal mayor en condiciones en que estas aguas generen lodos con altos niveles de toxicidad en los embalses proyectados.

Debido a que existen organizaciones de agua bien constituidas, se considera que en esta cuenca sería totalmente factible el desarrollo de proyectos que usen fuentes no convencionales para el riego.

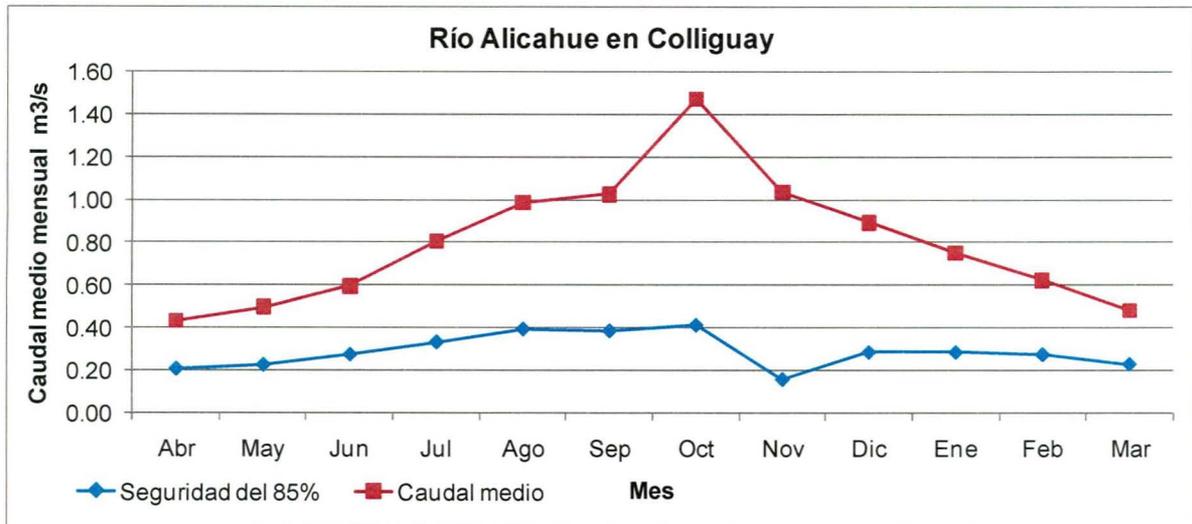


Figura 42: Curva de Variación Estacional en Río Alicahue en Colliguay (DGA, 2004).

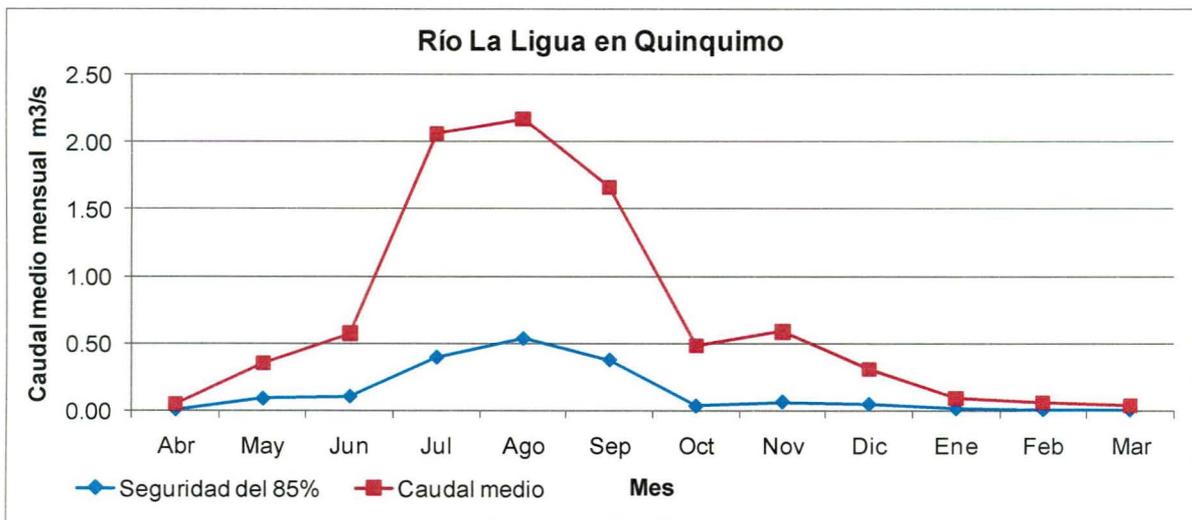


Figura 43: Curva de Variación Estacional en Río La Ligua en Quinquimo (DGA, 2004).

### **3.1.15 Río Aconcagua**

#### **Características físicas**

La cuenca del río Aconcagua, que drena una superficie de 7.340 km<sup>2</sup>, nace en la Cordillera de los Andes donde alcanza elevaciones excepcionales sobre los 6.000 metros de altitud. El Aconcagua, con una longitud de 253 km, se forma en la confluencia de los ríos Juncal y Blanco. Sus principales afluentes son los ríos Colorado, y los esteros Pocuro, Putaendo, Catemu y Limache.

Tanto el río Juncal como el Blanco nacen en cordones montañosos que los separan de la cuenca del Maipo y en donde existen formaciones glaciales como el glaciar Juncal Norte y los del cerro Alto los Leones (Figura 44).

#### **Régimen de precipitaciones**

Las precipitaciones en la cuenca son originadas por sistemas frontales y se concentran entre los meses de abril a octubre. La precipitación anual que cae sobre la cuenca varía desde 500 a 1.500 mm al año (DGA, 1987).

#### **Régimen de caudales**

Como lo presenta la Figura 45, el río Aconcagua, presenta un régimen predominantemente nival. Sin embargo en la parte baja de la cuenca recibe el aporte de esteros netamente fluviales como es el caso del Limache.

#### **Descripción hidrogeológica**

Desde el punto de vista hidrogeológico, las principales unidades hidrogeológicas se ubican alrededor de los cauces de los ríos Aconcagua y Putaendo. En el resto de la cuenca existen zonas de permeabilidades muy bajas.

En el sector de la desembocadura, se han identificados dos acuíferos claramente diferenciados. A nivel superficial y hasta una profundidad variable, se ubica el acuífero libre constituido por materiales fluviales como gravas y arenas, formando un relleno bastante permeable y de buena capacidad de almacenamiento, en el cual se encuentra en contacto directo con la recarga proveniente del río Aconcagua. Desde el sector de la junta entre el estero Limache

y río Aconcagua hasta la desembocadura, se ubica el acuífero confinado, el que se encuentra separado del anterior por una capa predominantemente arcillosa. El acuífero confinado presenta buenos rendimientos, pues tiene una alta transmisibilidad y se recarga directamente por infiltraciones provenientes del río aguas arriba de la confluencia del estero Limache.

### **Mecanismo de recarga de acuíferos**

Los mecanismos de recarga de los acuíferos están asociados principalmente a la infiltración de aguas lluvias sobre la cuenca y a infiltración que se produzca en algunos sectores del cauce. Es probable que la recarga de los sistemas de agua subterránea sea dependiente de la ocurrencia de eventos hidrológicos extremos, los cuales permiten que exista un aporte suficiente de agua que infiltre y posteriormente se transforme en recarga.

### **Riego**

La cuenca del río Aconcagua se desarrolla principalmente en las provincias de Quillota y Los Andes. Según el Censo Agropecuario del 2007, la superficie regada de ambas provincias es de 33.000 hectáreas.

### **Obras hidráulicas**

En la actualidad existen dos embalses destinados para uso en riego. Estos corresponderían al embalse los Aromos y Lliu-Lliu, con capacidades de acumulación de 35 y 2 millones de m<sup>3</sup> respectivamente. La cuenca del río Aconcagua cuenta con una amplia infraestructura de riego, constituida por una red de 46 canales principales.

Frente a la escasez de agua, el gran avance que ha tenido la agricultura, la necesidad de abastecer de agua potable a grandes ciudades y las demandas del sector industrial y minero, se ha hecho necesario la construcción de embalses. El principal proyecto para la zona es el embalse Puntilla del Viento que tiene un volumen de 120 millones de m<sup>3</sup>, que beneficiará a una superficie de 40.000 ha. Otro importante embalse proyectado es el Chacrillas que tendrá un volumen de

regulación de 27 millones de m<sup>3</sup> y que embalsará las aguas del río Rocín, afluente del Putaendo. Con este embalse se pretende beneficiar una superficie de 7.000ha. A la fecha de este informe, el proyecto de Puntilla del Viento se encuentran en etapa de calificación ambiental y el proyecto del embalse Chacrillas se encuentra aprobado.

### **Características generales**

Según antecedentes proporcionados por la Dirección General de Aguas, el mayor número de conflictos se relaciona con la asignación de derechos de agua subterránea e interferencia aguas superficiales y subterráneas. Los recursos superficiales se encuentran agotados y gran parte de los acuíferos de la cuenca están bajo zona de restricción.

### **Conclusión**

Desde el punto de vista hidrológico, la cuenca del Aconcagua, es claramente un sector deficitario donde la demanda de agua excede largamente la escasa oferta existente. Los escasos recursos disponibles son requeridos para la agricultura y muy apetecidos por el sector minero, industrial y para el abastecimiento de agua potable. Debido a que existen organizaciones de agua bien constituidas, se considera que en esta cuenca sería totalmente factible el desarrollo de proyectos que usen fuentes no convencionales para el riego.

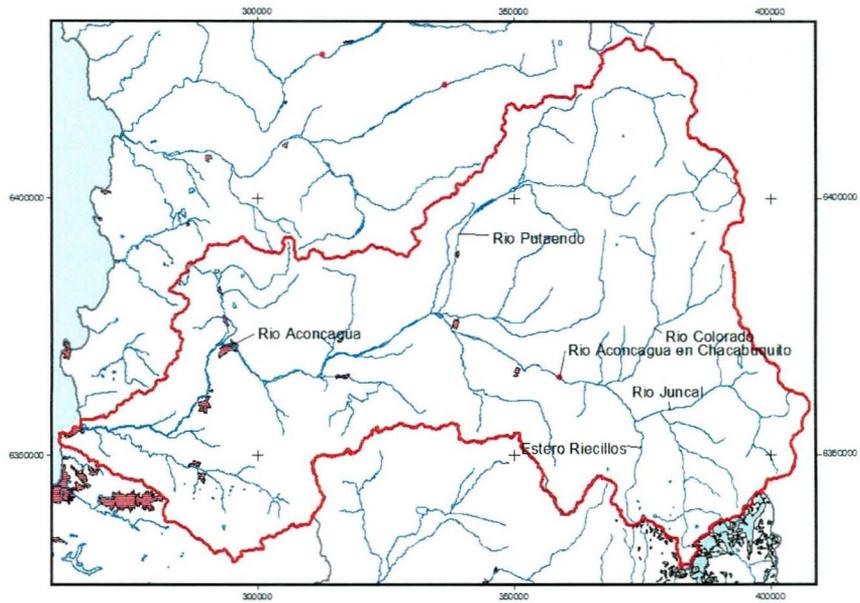


Figura 44: Cuenca hidrográfica del Río Aconcagua.

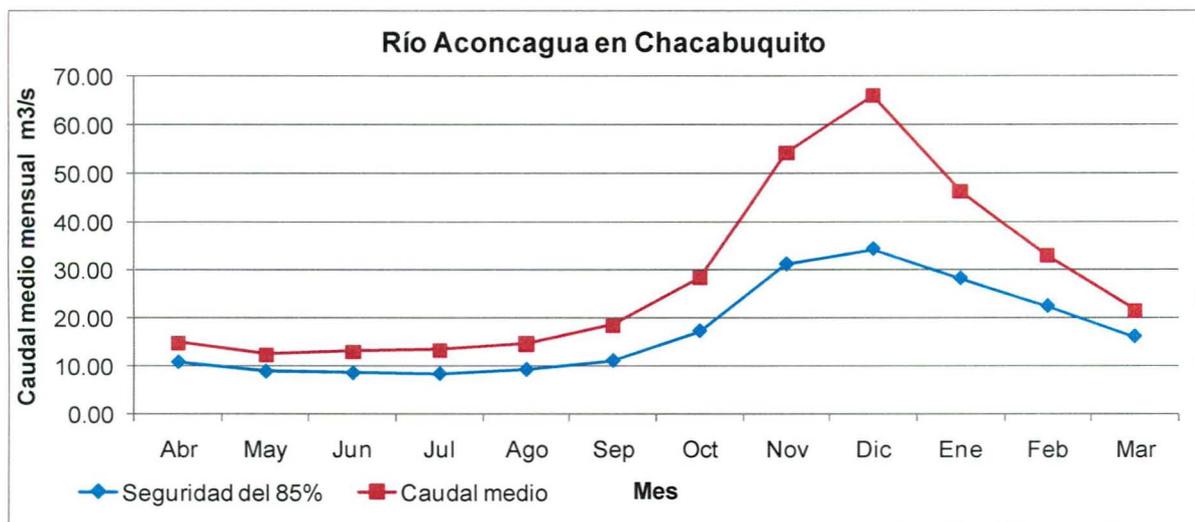


Figura 45: Curva de Variación Estacional en Río Aconcagua en Chacabuco (DGA, 2004).

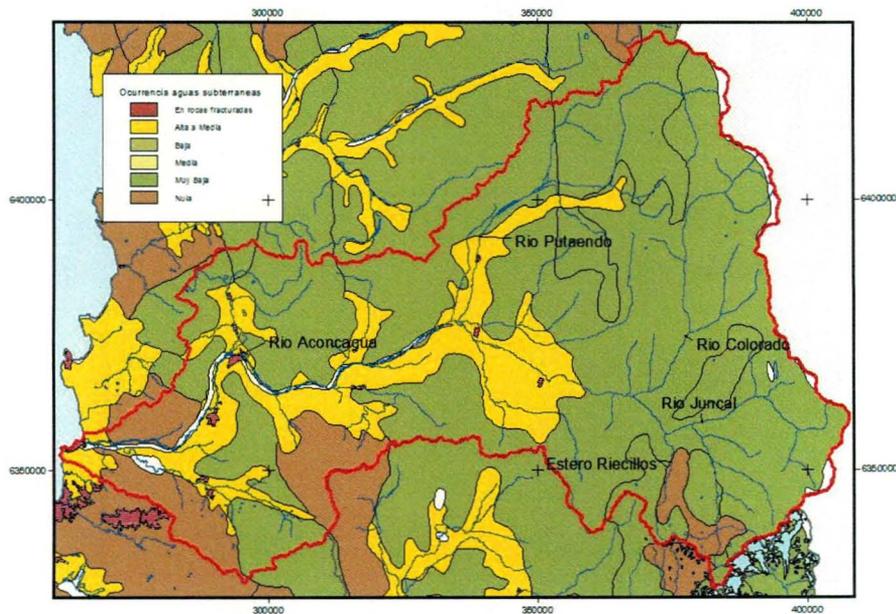


Figura 46: Ocurrencia de aguas subterráneas en la cuenca del Río Aconcagua.

### 3.1.16 Sector Casablanca

#### Características físicas

La cuenca del estero Casablanca, que drena una superficie de 900 km<sup>2</sup>, pertenece a la vertiente occidental de la Cordillera de la Costa (Figura 47). Este estero tiene 50 km de largo y no posee afluentes importantes y desemboca al Océano Pacífico en la localidad de Tunquén.

#### Régimen de precipitaciones

Las precipitaciones en la cuenca son originadas por sistemas frontales y se concentran entre los meses de abril a octubre. La precipitación anual que cae sobre la cuenca es de aproximadamente 500 mm al año (DGA, 1987).

## Régimen de caudales

No existe un control fluviométrico en la cuenca, sin embargo sobre la base del Balance Hídrico Nacional (DGA, 1987), se puede estimar un caudal medio de  $0,7 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ .

## Descripción hidrogeológica

Desde el punto de vista hidrogeológico, en la cuenca del Casablanca existe un sector formado por rellenos permeables ubicados alrededor de la ciudad del mismo nombre (Figura 48). La explotación de las aguas subterráneas existentes en dichos rellenos permitió transformar la zona generando una importante industria vitivinícola. Sin embargo existen interrogantes sobre si esta situación sea sustentable a largo plazo.

## Mecanismo de recarga de acuíferos

Los mecanismos de recarga de los acuíferos están asociados principalmente a la infiltración de aguas lluvias sobre la cuenca y a infiltración que se produce en algunos sectores del cauce. Las precipitaciones en la cuenca son originadas por el sistema de vientos alisios que en el sector de Casablanca, es de alrededor de  $566 \text{ mm}$  al año (DGA, 1987). En esta zona, al igual que en todo el resto del país, existe una explotación centralizada que presenta un carácter importante de aguas residuales y de los hidrogeólogos en los acuíferos.

## Riego

La cuenca del estero Casablanca se desarrolla principalmente en la comuna del mismo nombre. Según el Censo Agropecuario del 2007, la superficie regada en dicha comuna es de  $7.660$  hectáreas. Los principales recursos utilizados para el riego, son subterráneos.

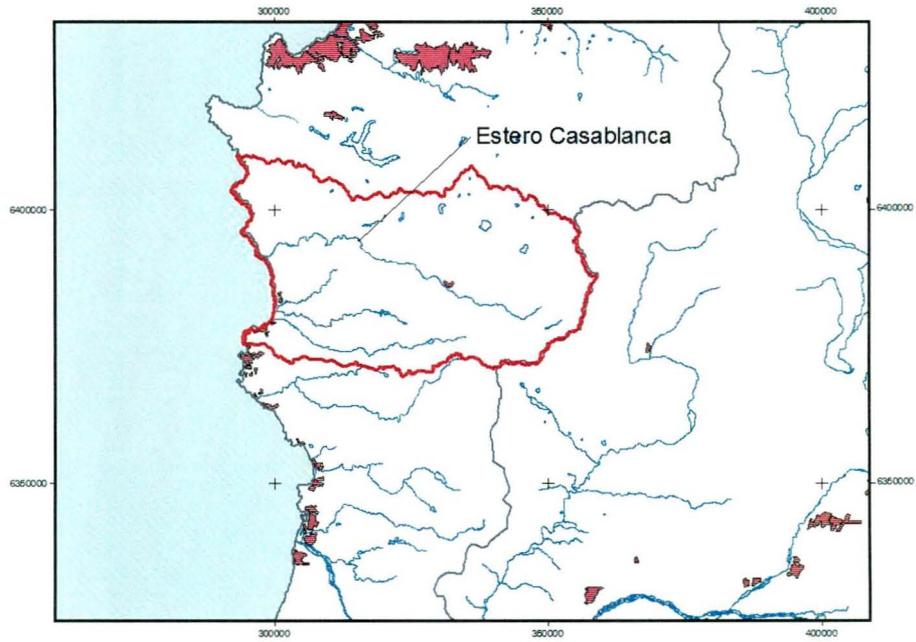


Figura 47: Cuenca hidrográfica del estero Casablanca.

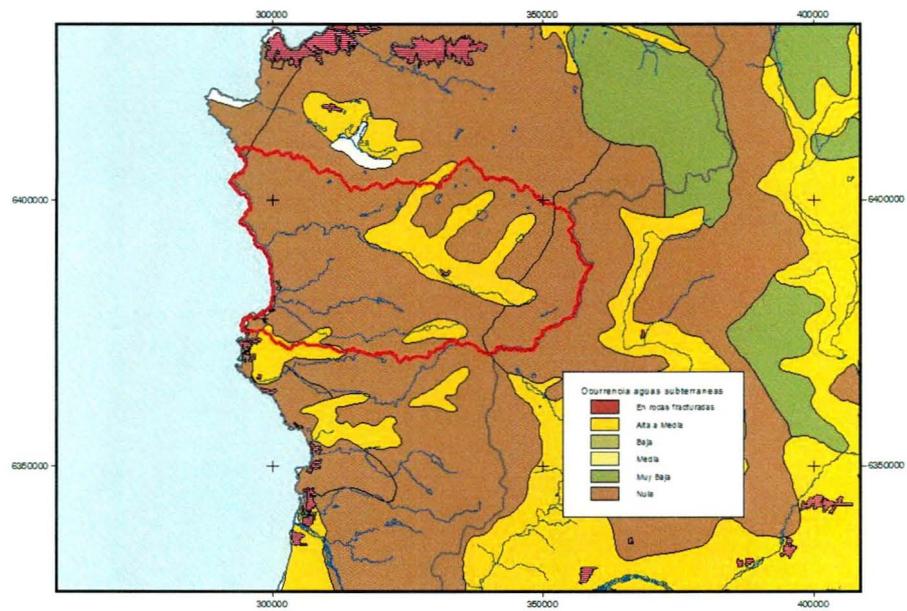


Figura 48: Ocurrencia de aguas subterráneas en la cuenca del estero Casablanca.

### **3.1.17 Río Maipo (Tercera Sección)**

#### **Características físicas**

La cuenca del río Maipo es de origen andino y drena una superficie de 15.274 km<sup>2</sup>. En esta cuenca existe un importante número de glaciares porque la Cordillera de los Andes alcanza importantes alturas (Figura 49). El río Maipo tiene un largo de 250 km y sus principales afluentes son los ríos Volcán, Yeso, Colorado, Olivares, Angostura, Mapocho, San Francisco y Molina; y los esteros Yerba Loca, Arrayán, Colina, Polpaico y Puangue.

La tercera sección del río Maipo, comprende desde la confluencia de los ríos Maipo y Mapocho, hasta el Océano Pacífico. Esta sección de río no posee fuentes propias que la abastezcan y sus recursos de agua provienen principalmente de recuperaciones producto de retornos de riego, así como de excedentes aportados por el estero Puangue.

#### **Régimen de precipitaciones**

Las precipitaciones en la cuenca son originadas por sistemas frontales y se concentran entre los meses de abril a octubre. La precipitación anual que cae sobre la cuenca varía desde 500 a 1.500 mm al año (DGA, 1987).

#### **Régimen de caudales**

Como lo presenta la Figura 50, el río Maipo, la parte alta de la cuenca presenta un régimen predominantemente nival. Sin embargo en la parte media y baja el río recibe el aporte de esteros netamente fluviales como es el caso del Puangue y Angostura, transformando su régimen hídrico a nivo-pluvial (Figura 51).

#### **Descripción hidrogeológica**

Desde el punto de vista hidrogeológico, la parte alta de la cuenca está compuesta por rocas volcánicas de baja permeabilidad, en cambio la depresión intermedia está formada por rellenos de permeabilidad media alta (Figura 52) que conforman un sistema acuífero importante denominado acuífero de Santiago (DGA, 2004). Los rellenos que conforman los principales esteros afluentes en la

parte baja de la cuenca conforman otros sistemas acuíferos de menor volumen, pero que también son importantes fuentes de agua.

### **Mecanismo de recarga de acuíferos**

Los mecanismos de recarga de los acuíferos están asociados principalmente a la infiltración de aguas lluvias sobre la cuenca y a infiltración que se produzca en algunos sectores del cauce. En esta cuenca, no se espera que el efecto de eventos hidrológicos extremos sobre la recarga de los sistemas de agua subterránea sea relevante, producto del aumento de la precipitación.

### **Riego**

La cuenca del río Maipo se desarrolla principalmente en la Región Metropolitana y según el Censo Agropecuario del 2007, la superficie regada en dicha región fue de 136.000 hectáreas.

### **Obras hidráulicas**

La principal obra de regulación existente en la cuenca del Maipo es el embalse El Yeso, que está ubicado a 2500 metros de altura y que tiene un volumen de regulación de 253 millones de m<sup>3</sup>. Otro embalse de menor tamaño es el embalse Rungue de 2.2 millones de m<sup>3</sup>.

Los canales pertenecientes a la tercera sección son: 11 canales que tienen su toma directamente en el río Maipo; 4 del Estero Amestica; 1 del Estero Cholqui y 16 del Estero Puangue (DGA, 2003).

### **Características generales**

Según antecedentes proporcionados por la Dirección General de Aguas, el mayor número de conflictos se relaciona con la asignación de derechos de agua subterránea e interferencia aguas superficiales y subterráneas. Los recursos superficiales se encuentran agotados y gran parte de los acuíferos de la cuenca están bajo zona de restricción. En la Región Metropolitana la competencia por los derechos de agua se originan en la importancia agrícola de la zona, la necesidad

de abastecer de agua potable al Gran Santiago y otras ciudades, que incluyen el principal centro industrial del país y además la existencia de varios proyectos mineros en operación y en desarrollo.

La principal preocupación para los usuarios de agua de riego es la calidad de este recursos, pues ellos se encuentran amenazados por contaminaciones provenientes de fuentes tan diferentes como las descargas industriales, mineros, urbanos y últimamente de las autopistas, que evacuan las aguas lluvias a los canales.

En el caso de la Región Metropolitana, la agricultura no sólo debe competir por el uso del agua, sino que además por el uso de suelo. Cada día se pierden nuevas hectáreas ante el avance de la urbanización. En la región existen canales en los cuales se ha reducido la superficie agrícola hasta a un 20% del valor original. Esto produce que un gran porcentaje del agua captado en bocatoma, según los derechos originales, sea devuelta al río porque no son usadas en la agricultura.

## **Conclusión**

Desde el punto de vista hidrológico, la cuenca del Maipo, es un sector deficitario donde la demanda de agua excede la escasa oferta existente. Sin embargo se estima que existe un gran número de derechos de uso asociados a la agricultura que no son ejercidos y que incluso existan derechos cuyos actuales titulares no conozcan que tienen ese patrimonio. Es importante realizar una actualización del catastro de usuarios de dicha cuenca.

Debido a la importante actividad económica existente en la Región Metropolitana y al hecho de que los derechos de agua están agotados, el uso de fuentes no convencionales se puede transformar en una atractiva fuente de negocios.

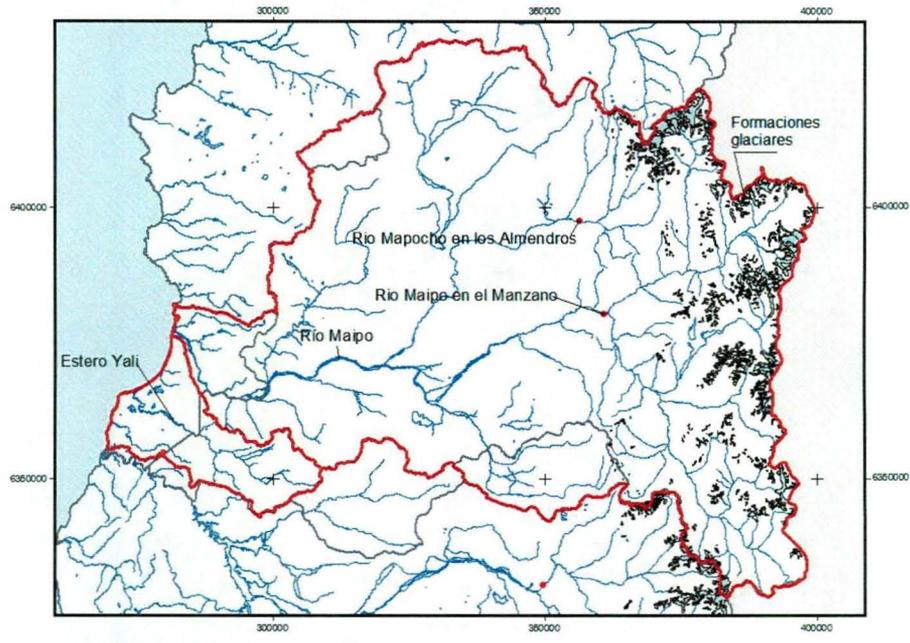


Figura 49: Cuencas hidrográficas del Río Maipo y Estero Yali.

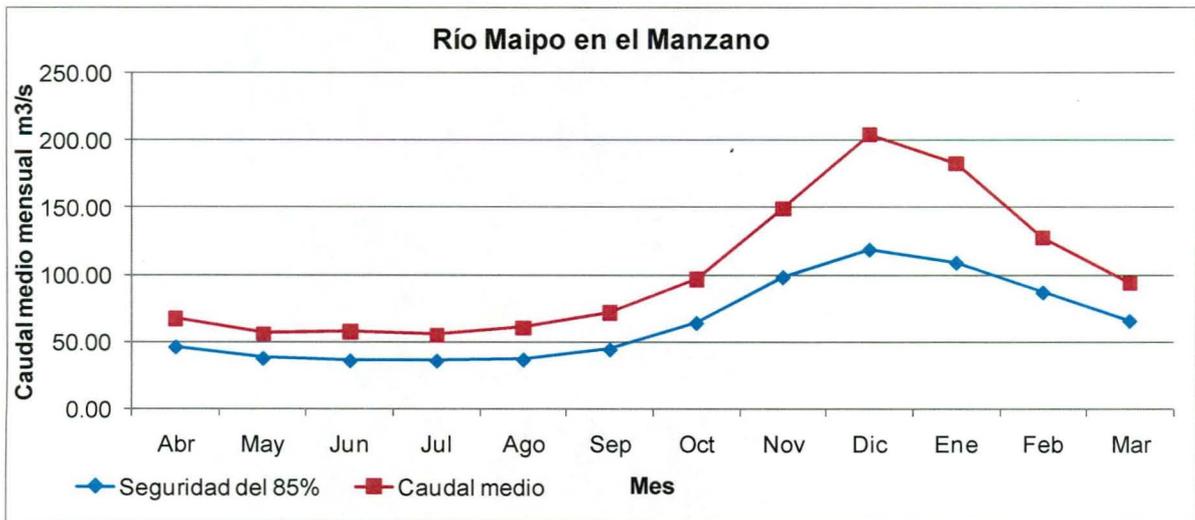


Figura 50: Curva de Variación Estacional en Río Maipo en el Manzano (DGA, 2004).

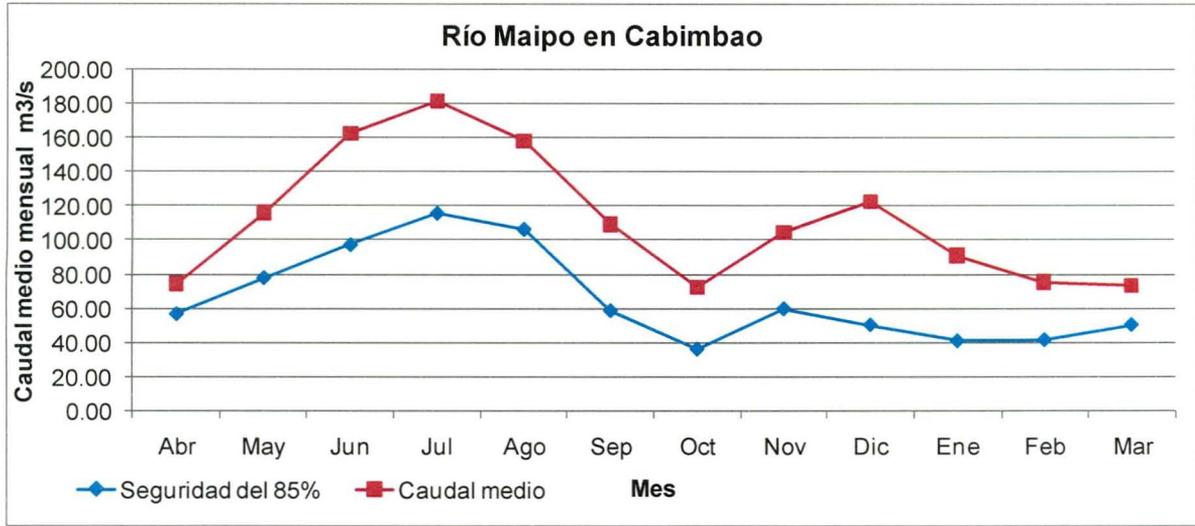


Figura 51: Curva de Variación Estacional en Río Maipo en Cabimbao (DGA, 2004).

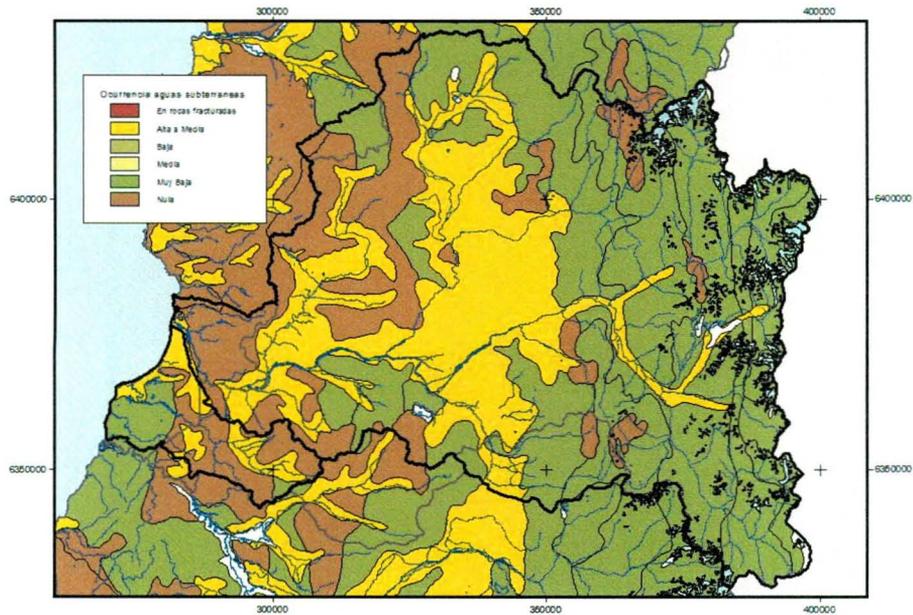


Figura 52: Ocurrencia de aguas subterráneas en las cuencas del Río Maipo y e Estero Yali.

### **3.1.18 Estero Yali**

#### **Características físicas**

La cuenca del estero Yali drena una superficie de aproximadamente 800 km<sup>2</sup> y pertenece a la vertiente occidental de la Cordillera de la Costa. Este estero se forma en la confluencia de los esteros Lo Chacón y Loica. Otros afluentes son los esteros del Cerro, las Diucas y el Sauce.

#### **Régimen de precipitaciones**

Las precipitaciones en la cuenca son originadas por sistemas frontales y se concentran entre los meses de abril a octubre. La precipitación anual que cae sobre la cuenca es de aproximadamente 500 mm al año (DGA, 1987).

#### **Régimen de caudales**

No existe un control fluviométrico en la cuenca, sin embargo un estudio realizado por Dussaillant et. al. (2009) estima un caudal medio anual de 1,5 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>. Considerando la variabilidad del régimen hídrico en las cuencas costeras, este consultor estima que el caudal medio durante la temporada de verano es del orden de 150 L s<sup>-1</sup>.

#### **Descripción hidrogeológica**

Desde el punto de vista hidrogeológico, en la cuenca del Yali existen dos sectores con rellenos permeables donde existen formaciones acuíferas de interés. El Primer sector se ubica en la parte alta de la cuenca y se puede interpretar como un antiguo paleocauce asociado a la cuenca del Maipo (Figura 52). El segundo sector corresponde a la zona costera donde existen un sistema de lagunas y humedales muy conocidos.

#### **Mecanismo de recarga de acuíferos**

Los mecanismos de recarga de los acuíferos están asociados principalmente a la infiltración de aguas lluvias sobre la cuenca y a infiltración que se produzca en algunos sectores del cauce. Las precipitaciones en la cuenca son

originadas por sistemas frontales y se concentran entre los meses de abril a octubre. La precipitación anual que cae sobre la cuenca es del orden de 500 mm al año (DGA, 1987). El estero Yali, al igual que todos los esteros costeros de la zona Central de Chile presenta un régimen pluvial con importantes crecidas asociadas a eventos hidrológicos extremos.

## **Riego**

La cuenca del estero Yali se desarrolla principalmente en las comunas de Santo Domingo y San Pedro. Según el Censo Agropecuario del 2007, la superficie regada en dichas comunas fue 2.176 y 4.800 hectáreas, respectivamente.

## **Obras hidráulicas**

En esta cuenca, no se registran antecedentes de obras hidráulicas existentes y/o en proyección, para su uso en riego agrícola.

## **Características generales**

En el Valle del Yali existe una gran cantidad de explotaciones agropecuarias, basadas principalmente en el uso de aguas subterráneas, pues los recursos superficiales son escasos.

En la parte baja de este sector existe un sistema de humedales, denominado Humedal del Yali, que es una reserva nacional y es un sector protegido que se encuentra inscrito en la lista de Humedales de Importancia Internacional en el marco de la Convención RAMSAR. La Dirección General de Aguas constató que las extracciones de agua, han ocasionado que el nivel del humedal haya descendido mas del límite aceptable y por eso se ha decretado zona de restricción al sector Yali Bajo.

Posteriormente, en la parte superior de la cuenca, un estudio desarrollado por la DGA, demostró que las demandas sobre el acuífero del Valle superan la recarga del sistema de aguas subterráneas. Por ello se restringió la explotación del sistema.

## **Conclusión.**

Desde el punto de vista hidrológico, La cuenca del Yali, es claramente un sector deficitario donde la demanda de agua excede largamente la escasa oferta existente. Debido a las características de la zona donde existen muchas explotaciones agrícolas basadas en el uso de pozos, resulta interesante el uso de aguas residuales tratadas y la recarga artificial de acuíferos.

### **3.1.19 Río Perquilauquén**

#### **Características físicas**

Este río es el afluente más austral que posee el río Maule, pero administrativamente pertenece a la Región del Biobío. El río Perquilauquén nace en la precordillera de los Andes y sigue un curso sureste-Noroeste, cruzando la depresión intermedia, hasta enfrentar la Cordillera de la Costa, donde cambia su curso a Sur-Norte. Al confluir con el río Liguay, el río cambia su nombre pasando a ser el río Loncomilla (Figura 53).

La cuenca del río Perquilauquén tiene un área de aproximadamente 6.000 km<sup>2</sup>. Los principales afluentes del río Perquilauquén son los ríos Catillo, Cauquenes y Purapel; y los esteros Cuyuemu, Mallocaven, Unicaven, Bureo, Torreón, Zanjón Grande, Huinganes, Belco y Piguchén.

#### **Régimen de precipitaciones**

Las precipitaciones en la cuenca son originadas por sistemas frontales y se concentran entre los meses de abril a octubre. La precipitación anual que cae sobre la cuenca varía desde 800 a 3.000 mm al año (DGA, 1987).

#### **Régimen de caudales**

Como lo presenta la Figura 54, el río Perquilauquén presenta un régimen predominantemente pluvial.

## **Descripción hidrogeológica**

Desde el punto de vista hidrogeológico, la parte alta de la cuenca está compuesta por rocas volcánicas de baja permeabilidad, en cambio la depresión intermedia está formada por rellenos de permeabilidad media alta (Figura 55) que conforman un sistema acuífero importante que drena hacia el río Maule (DGA, 2004).

## **Mecanismo de recarga de acuíferos**

Los mecanismos de recarga de los acuíferos están asociados principalmente a la infiltración de aguas lluvias sobre la cuenca y a infiltración que se produzca en algunos sectores del cauce.

## **Riego**

La cuenca del Perquilauquén se desarrolla en las comunas de Ñiquén, Parral, Retiro y Cauquenes. Según el Censo Agropecuario del 2007, la superficie regada en dichas comunas fue 12.016, 20.800, 15.355 y 2.690 hectáreas respectivamente.

## **Obras hidráulicas**

En la cuenca del Perquilauquén existen importantes obras de acumulación de aguas de riego como son los embalses Bullileo (60 millones de m<sup>3</sup>), Digua (220 millones de m<sup>3</sup>), y Tutuven (15 millones de m<sup>3</sup>). De estos embalses, el Tutuven ha sido ampliado en 3 millones de m<sup>3</sup> y fue modernizado su sistema de compuertas.

La zona de Perquilauquén cuenta con una extensa y compleja red de canales de riego, constituidos por 179 canales matrices con una superficie regada de 5.678 ha. A su vez, existe un sistema 13 canales que son abastecidos del sistema Digua, que aporta una superficie de riego de 4.570 ha.

Inmediatamente al norte de la cuenca del Perquilauquén se está construyendo el embalse Ancoa, que tendrá una capacidad de acumulación de 80 millones de m<sup>3</sup> para el beneficio de una superficie 36.000 ha.

## Características generales

La zona de Perquillauquén cuenta con una extensa y compleja red de canales de riego, los cuales reciben aguas de diferentes ríos, incluyendo del Melado mediante un túnel que cruza las montañas. Debido a estos trasvases, el régimen hídrico de los tributarios de la cuenca se encuentra totalmente alterado por la acción antrópica durante los meses de la temporada de riego. Desde el punto de vista de las organizaciones de usuarios, existen organizaciones muy bien implementadas como lo son el caso de Digua y Longaví.

## Conclusión.

Debido a su ubicación geográfica, por el hecho de que existen importantes trasvases y grandes proyectos de embalses que influirán en la zona, no se considera que sean de interés para la zona el desarrollo de proyectos basados en el uso de fuentes no convencionales para riego.

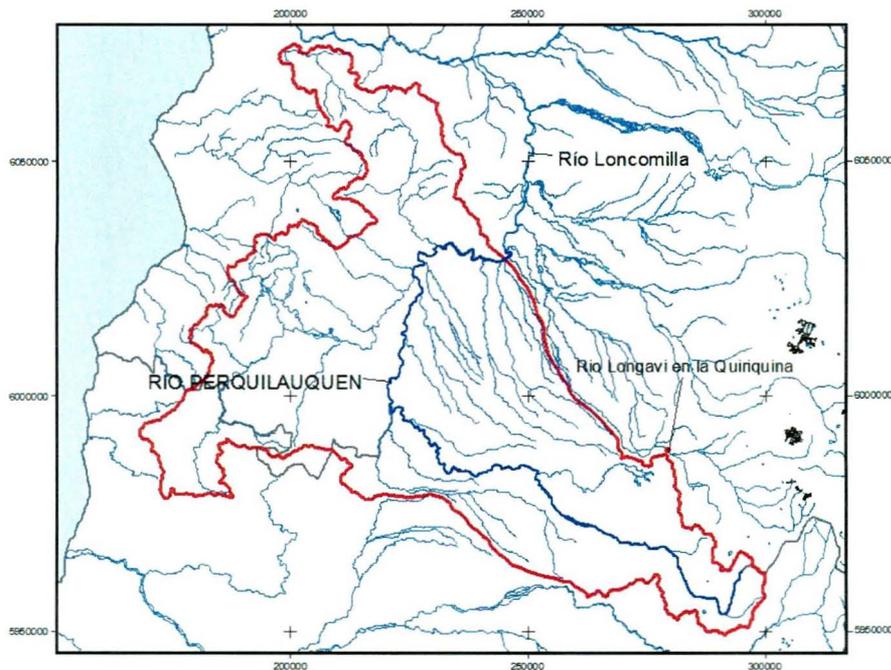


Figura 53. Cuenca hidrográfica del Río Perquillauquén.

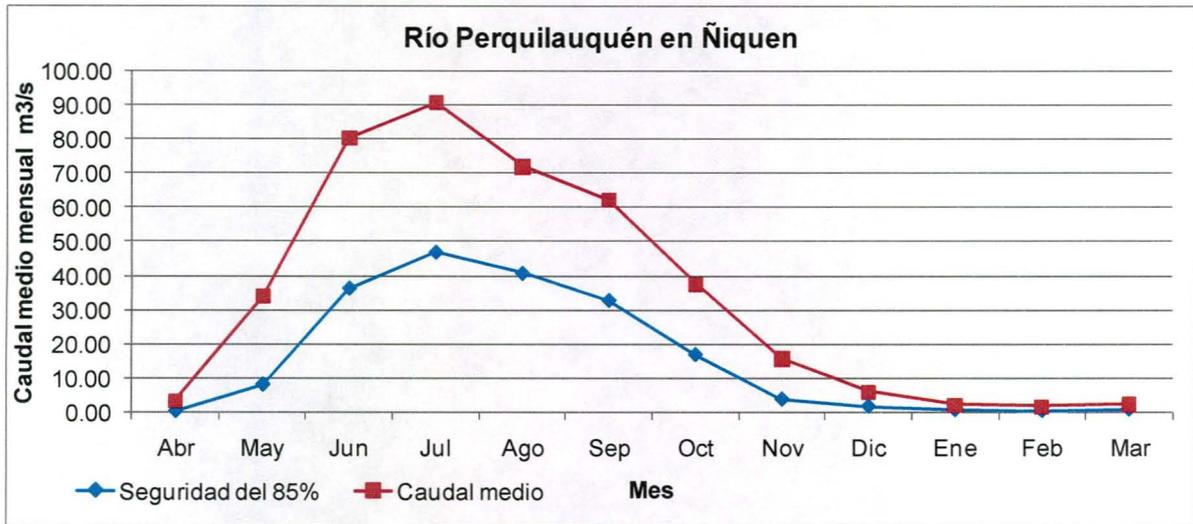


Figura 54. Curva de Variación Estacional en Río Perquilauquén en Ñiquén (DGA, 2004).

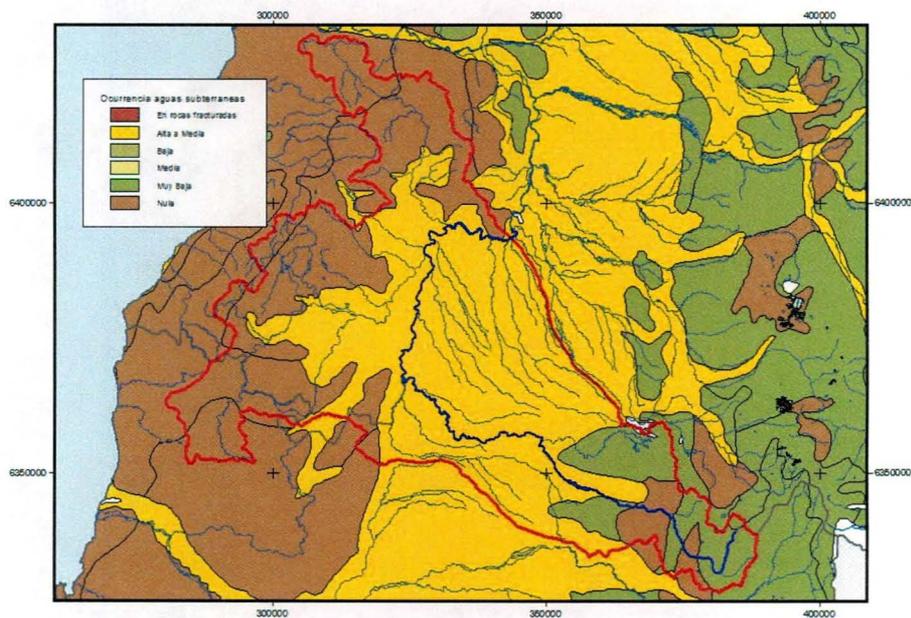


Figura 55. Ocurrencia de aguas subterráneas en la cuenca del Río Perquilauquén.

### **3.2 Obtención de la oferta futura, proyección a 10 años**

En los últimos años se ha instalado en la comunidad una preocupación generalizada sobre cuánta agua habrá disponible en el futuro próximo. Esta preocupación se basa en alarmantes reportes sobre cambio climático que parte del mundo científico y la prensa han divulgado. Frente a esta situación, se presenta un análisis sobre la variabilidad que se podría experimentar en la oferta de recursos hídricos, durante los próximos diez años, en los sectores en estudio. Para realizar este análisis se consideran los siguientes aspectos: proyectos de grandes obras de regulación; variabilidad climática y derretimiento de los glaciares.

#### **3.2.1 Efecto de nuevos proyectos de riego.**

Frente a la incertidumbre que generan los posibles escenarios de cambio climático, la medida más sensata que debemos realizar como sociedad es asegurar el suministro de agua mediante la construcción de nuevos embalses. Sin embargo, los proyectos requieren de un largo proceso de desarrollo, desde que se idea el proyecto, hasta que se construye. Por esa razón, se prevé que durante el horizonte de análisis de este proyecto, entrarán en operación los embalses cuyas declaraciones de impacto ambiental se encuentran aprobadas o en calificación, en el Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental. En el caso de los sectores en estudio, sólo existen cuatro proyectos que pueden aumentar la disponibilidad de recursos hídricos en los próximos 10 años:

- Embalse Puntilla del Viento, que se construirá en la cuenca del río Aconcagua y que tendrá un volumen de 120 millones de m<sup>3</sup>, que beneficiará a 40.000 ha.
- Embalse Ancoa, que se construirá en la cuenca del Maule con un volumen de regulación de 80 millones de m<sup>3</sup>. Si bien es cierto no está directamente en la cuenca del Perquilauquén, debido al

trasvase que se realiza mediante los canales de riego, este embalse beneficiará a este sector.

- Embalse Punilla, que se construirá en el río Ñuble con un volumen de 600 millones de m<sup>3</sup>. Si bien es cierto no está directamente en la cuenca del Perquilauquén, debido al trasvase que se realiza mediante los canales de riego, este embalse beneficiará a este sector.
- Embalse Chacrillas que tendrá un volumen de regulación de 27 millones de m<sup>3</sup> y que embalsará las aguas del río Rocín, afluente del Putaendo, que beneficiará a 7.000 ha.

A los proyectos antes mencionados, hay que agregar otros embalses cuya construcción está anunciada, pero que no están en el sistema de evaluación ambiental como son los embalses Livilcar en la cuenca de San José, Murallas Viejas en el río Combarbalá, Las Trancas en río Cogotí y Valle Hermoso en el río Pama (estor tres en la Cuenca del Limari).

Es necesario tener presente que se requiere de al menos 10 años, desde que se anuncie la construcción a que se finalicen los estudios ambientales, la construcción de los embalses, de los canales de conducción, los sistemas de distribución y la puesta en riego. Por ello el único sistema que se prevee esté operativo al año 2018 será el Embalse Ancoa.

### **3.2.2 Variabilidad climática.**

En este punto se debe aclarar que este consultor no se referirá al Cambio Climático, pues este concepto implica que alguna vez el clima fue constante, situación que nunca ha sucedido. En efecto, las series hidroclimatológicas generalmente presentan tendencias y variaciones, por lo que no existe una razón a priori para que las series se mantengan fijas o invariables de un año a otro. Por lo tanto en este punto del estudio nos referiremos a un análisis sobre la variabilidad climática.

En el Valle Central de Chile, para mantener los incrementos en producción de cultivos de alto valor, la agricultura utiliza de manera intensiva recursos hídricos superficiales y subterráneos, los cuales son altamente dependientes del régimen de precipitaciones. El fenómeno del Niño y la Niña incide fuertemente en la variabilidad temporal de la oferta de agua en Chile con fuertes implicancias en la disponibilidad de agua para la agricultura. En la zona Central de Chile, en presencia de eventos El Niño y La Niña se observa una tendencia a que ocurran precipitaciones sobre y bajo el promedio, respectivamente. El conocimiento del rango o dominio interanual de las variables hidroclimáticas y la reducción de la incerteza asociada a eventos hidrológicos son importantes en el momento de planificar y manejar los recursos hídricos en la actividad agrícola.

Por otro lado, la ocurrencia de alta temperatura en Chile tiene una fuerte implicancia en la disponibilidad de agua, ya que un aumento en las temperaturas implica una menor cantidad de nieve en la Cordillera de Los Andes. La nieve cordillerana es un elemento clave, sin embargo hay una falta preocupante de datos, estudios y especialistas, lo que provoca una crisis para determinar el balance hídrico en Chile, con una fuerte componente estratégica en cuanto a la generación de energía y el desarrollo de la agricultura.

Bajo los supuestos de comportamiento determinístico del clima, el comportamiento futuro del clima puede predecirse a partir de las condiciones actuales con un nivel de confianza dependiente de la complejidad y capacidad de cálculo. Dado que a partir de estas predicciones se diseñan las políticas de prevención, mitigación o control de las causas del cambio climático, el nivel de incerteza debe ser conocido y controlado, de tal manera que no se produzcan reacciones no ajustadas a la realidad o que se aplique el Principio de Prevención independientemente de la evidencia científica. La principal crítica señala de una parte creciente de la comunidad científica respecto los escenarios futuros de cambio climático, radica en la debilidad de informar que para el futuro cercano se observarán aumentos de temperatura de 0,6 °C, si la incerteza o error asociado a esta predicción es superior a la predicción misma.

A partir del III Informe del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático, la Comisión Nacional del Medioambiente dio a conocer un informe sobre los efectos del cambio climático en Chile que informa un aumento de la temperatura, decreciente de norte a sur del país, de 4 °C en la región andina del norte del país, a 2 °C en el extremo sur, además de una disminución significativa en las precipitaciones en el centro-sur, lo cual implica un corrimiento de las condiciones climáticas del norte hacia el sur. Para el caso de las precipitaciones, estas disminuciones son similares a las que se observan en años bajo la influencia del fenómeno de La Niña, pero los pronósticos señalan que esta disminución será permanente.

Actualmente, se encuentra en ejecución el estudio Sistematización de las políticas y estrategias de adaptación, nacional e internacional, al Cambio Climático del sector silvoagropecuario y de los recursos hídricos y edáficos, que se enmarca en el convenio CONAMA-FIA-ODEPA cuyo objetivo es determinar la vulnerabilidad de la agricultura nacional al cambio climático y definir medidas de adaptación.

Dado el estado del arte en cuanto a confiabilidad y fiabilidad de los escenarios de cambio climático, en conjunto con técnicas de downscaling y modelación hidrológica de cuencas intervenidas, se concluye que la incerteza asociada a proyectar cambios en la disponibilidad de agua para los próximos 10 años a nivel de cuenca y subcuenca, es comparable, e incluso mayor, a la variabilidad intrínseca del clima, especialmente considerando la influencia de los sistemas climáticos globales como el Fenómeno del Niño o las variaciones tropicales en la temperatura superficial del mar. En efecto, el estado actual del conocimiento permite predecir el clima con un horizonte anual, además del hecho que, en promedio, para el horizonte de 10 años se tendrán 2 eventos El Niño y 1 evento La Niña.

### **Análisis de sectores**

Para estudiar la variabilidad que ha experimentado la disponibilidad de recursos hídricos en los sectores seleccionados, se utilizará información histórica

de caudales. Para ello, se seleccionaron estaciones fluviométricas que cumplieran los siguientes requisitos:

- Fueran representativas de una cuenca o de un sector.
- No existieran importantes obras de regulación aguas arriba de ellas.
- Fueran estaciones satelitales, lo cual permite extraer información desde la base de datos de la Dirección General de Aguas.

Las estaciones seleccionadas se presentan en el Cuadro 20, para cada estación se obtuvieron las series de caudales medios mensuales, actualizadas hasta marzo del año 2009, de estas series se extrajeron los caudales medios anuales y los caudales medios para la temporada de riego, considerando que esta se extiende entre los meses de septiembre y abril. Estos valores presentan una considerable dispersión, por ello se usaron promedios móviles de tres años para establecer líneas de tendencia, que permiten establecer si ha existido una reducción o aumento del caudal medio en el tiempo. Esta información es presentada en el Apéndice 4.

Cuadro 20. Estaciones seleccionadas para cada sector.

	Nombre Cuenca	Estación satelital
1	Río San José (sector Azapa)	Lluta en Alcerreca
2	Quebrada Vitor (Sectores Codpa – Vitor)	
3	Río Camarones	
4	Quebrada de Camiña	
5	Sector de Chiu Chiu	Río Loa Antes Represa Lequeña
6	San Pedro de Atacama	Río Salado en Sifón Ayquina
7	Río Copiapó	Copiapó en Pastillo
8	Quebrada Totoral y cuencas costeras hasta Carrizal	
9	Río Huasco	Huasco en Algodones
10	Río Elqui	Elqui en Algarrobal
11	Río Limarí	Río Grande en las Ramadas
12	Río Petorca	Petorca en Peñón o Hierro Viejo
13	Río Ligua	Río Alicahue en Colliguay
14	Río Aconcagua	Aconcagua en Chacabuquito
15	Costeras Aconcagua- Maipo (sector Casablanca)	Maipo en el Manzano
16	Río Maipo (sector Maipo bajo, estero Yali)	Mapocho en los Almendros
17	Río Perquilauquén	Río Longaví en La Quiriquina

## Conclusiones

Los resultados, que se presentan en el Cuadro 21, indican que, entre la Cuenca del Maipo y la Cuenca del Loa, existe una tendencia a que el caudal medio anual se incremente. En contraste a lo anterior, existe una fuerte disminución del caudal medio anual en la estación ubicada en la cuenca del Maule.

En lo referente a la disponibilidad de agua durante la temporada de riego, tres estaciones registran una disminución del valor medio, otras tres mantienen el mismo valor medio y las otras siete aumentan su caudal, sin embargo esta posible tendencia está asociada al derretimiento de glaciares, por lo que no será permanente.

Cuadro 21. Tendencia observada del caudal medio anual, según los registros fluviométricos.

Estación satelital	Caudal medio anual	Temporada de riego
Lluta en Alcerreca	creciente	decreciente
Río Loa Antes Represa Lequeña	neutra	neutra
Río Salado en Sifón Ayquina	creciente	creciente
Copiapó en Pastillo	creciente	neutra
Huasco en Algodones	creciente	creciente
Elqui en Algarrobal	creciente	creciente
Río Grande en las Ramadas	neutra	creciente
Petorca en Peñón o Hierro Viejo	neutra	decreciente
Río Alichahue en Colliguay	creciente	creciente
Aconcagua en Chacabuquito	creciente	creciente
Maipo en el Manzano	creciente	creciente
Mapocho en los Almendros	neutra	neutra
Río Longaví en La Quiriquina	decreciente	decreciente

En este punto, se concluye que no existirá un aumento sostenido en la disponibilidad de agua durante la temporada de riego debido al cambio climático. Posiblemente, debido al cambio de la dinámica del derretimiento de nieves y a la disminución de las reservas almacenadas en los glaciares, la disponibilidad de agua durante la temporada de riego tenderá a disminuir.

### **3.2.3 Glaciares.**

En Chile, el origen de los glaciares de montaña o de latitudes medias (alejadas de los polos), se debe primero a la elevación de los Andes, comenzada en el Neógeno, generándose un macizo montañoso de gran altura que luego, debido a las últimas glaciaciones del Cuaternario, permitieron la formación de glaciares en las regiones altas de las zonas templadas, manteniéndose hasta hoy debido a las bajas temperaturas presentes en los sectores alto andinos.

La altitud en que se encuentra la isoterma 0°C en una región determinada, puede ser usada para inferir el comportamiento de la línea de nieve. Por lo tanto, es uno de los factores principales que dan origen, provocan el carácter de fuente permanente de agua y generan avances y retrocesos de los glaciares, ya que esta línea imaginaria será la que provocará que las precipitaciones sobre ella caigan en forma de nieve y bajo ellas lo hagan en estado líquido. Además, en los periodos estivales, donde la fusión de las nieves aumenta debido al aumento estacional de las temperaturas, esta fusión estará en directa relación con la altura en que se encuentre la isoterma 0°C, provocando por un lado, el derretimiento de las nieves no permanentes, es decir, de aquellas que se depositan sobre la zona cordillerana no formando parte de un cuerpo glaciar, y por otro, siendo un causante de la fusión o sublimación de los glaciares (Carrasco, 2006).

Los glaciares proveen de estabilidad a los ecosistemas y seguridad en el abastecimiento de agua, debido principalmente a que funcionan como reguladores hídricos naturales, siendo esenciales en periodos en donde la ausencia de precipitaciones puede provocar pérdidas sustanciales y crisis intensas en los sistemas naturales y antrópicos, debido a un estrés hídrico que puede poner en jaque a la sustentabilidad de una región. De esta manera, los glaciares cumplen diversas funciones, tanto para los ecosistemas circundantes como para aquellos que se encuentran aguas abajo, prestando una serie de servicios ambientales tanto locales como regionales.

Si bien, tanto los glaciares como los embalses, cumplen la misma función de regulación hídrica, la gran diferencia que existe entre ellos es que el funcionamiento del primero no es mayormente influenciado por las fluctuaciones

interanuales de precipitación, cosa que si ocurre con los embalses, quedando muy dependientes de la cantidad de agua y nieve caída en el año.

El análisis nacional de Glaciares se divide en cuatro macro-zonas: Norte, Centro, Sur y Austral. La zona norte posee un área reducida de glaciares en comparación al centro, sur y zona austral del país. Sin embargo, al momento de interpretar estos datos se debe considerar un aspecto relevante, en el norte del país no se han realizado catastros de glaciares descubiertos para todas las cuencas, y además, los inventarios existentes no incluyen la identificación de glaciares de roca o glaciares cubiertos, los estudios de estos cuerpos se han realizado sólo en algunas cuencas, las demás investigaciones se han focalizado en estudios específicos de algunos glaciares.

El estudio de Rivera et al. (2000), marca cierta tendencia a nivel país, aun cuando considere sólo al 5,6% de los glaciares de Chile, con una mínima representación de las zonas norte, centro y sur. De las investigaciones realizadas hasta la fecha, se puede concluir en términos generales que las tendencias de aumento en las temperaturas y la disminución de las precipitaciones seguirán afectando en forma negativa a los glaciares de la Cordillera de los Andes. Ello hace prioritaria la investigación para analizar la evolución de la mayor parte de los glaciares.

### **Análisis de sectores**

Para estudiar el posible efecto que el derretimiento de glaciares tenga sobre la disponibilidad de recursos hídricos en los sectores seleccionados, se utiliza la información hidrológica presentada en el punto anterior. Considerando que desde la cuenca del Huasco, hacia el Sur, no existe el efecto del Invierno Boliviano, los únicos aportes de agua que se generen entre los meses de septiembre a abril son las infiltraciones de agua subterráneas (flujo base) y el derretimiento de nieve y glaciares. Por lo anterior, la tendencia del caudal promedio durante dicho período de tiempo puede ser un indicador de un aporte de derretimiento de glaciares a la escorrentía.

En el Cuadro 22, se presenta la tendencia del caudal medio durante el período de riego (septiembre a abril), la superficie cubierta por glaciares en cada cuenca aportante (Figuras 56 a 58). Para este análisis sólo se consideraron las tendencias cuando estas superaban el 5% de cambio.

Considerando estos resultados, se puede observar que existe una tendencia, asociada al derretimiento de glaciares, que incrementa el caudal de los ríos de régimen andino, especialmente en las cuencas del Aconcagua y el Maipo. Sin embargo, producto del derretimiento, las reservas de los glaciares disminuyen, por lo que esta tendencia debería revertirse en el futuro.

**Cuadro 22. Tendencia observada del caudal medio para el periodo de riego, según los registros fluviométricos.**

<b>Estación satelital</b>	<b>% Tendencia</b>	<b>Superficie de glaciares</b>
Huasco en Algodones	creciente (14%)	media
Elqui en Algarrobal	creciente (18%)	media
Río Grande en las Ramadas	menor al 10 %	nula
Petorca en Peñón o Hierro Viejo	menor al 10 %	nula
Río Alicahue en Colliguay	menor al 10 %	nula
Aconcagua en Chacabuquito	creciente (20%)	media*
Maipo en el Manzano	creciente (38%)	alta
Mapocho en los Almendros	menor al 10 %	media *
Río Longaví en La Quiriquina	decreciente (-20%)	baja

\*no está claro si los glaciares drenan hacia el Mapocho o al Aconcagua



Figura 56. Ubicaciones de estaciones de referencia y cobertura de glaciares.

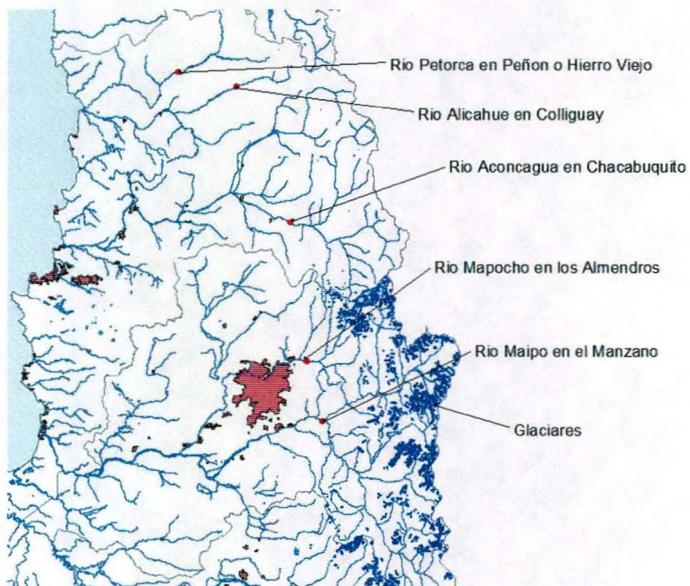


Figura 57. Ubicaciones de estaciones de referencia y cobertura de glaciares.

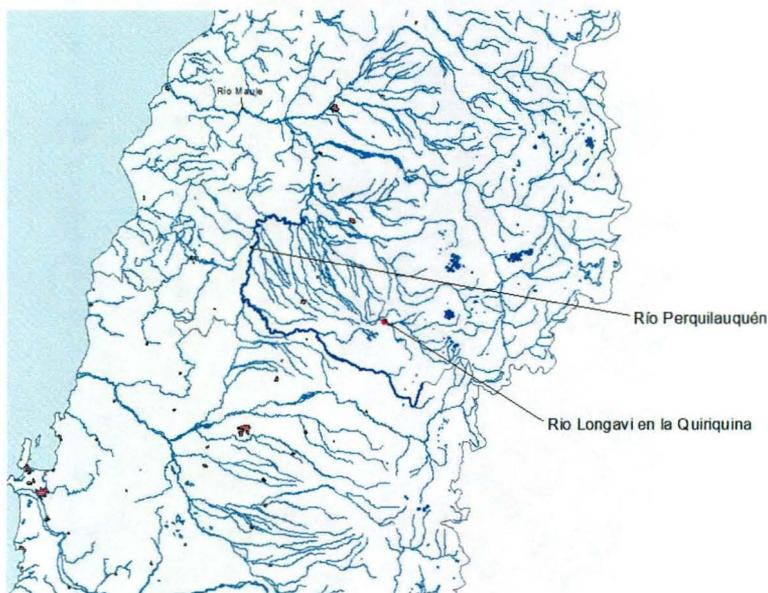


Figura 58. Ubicaciones de estaciones de referencia y cobertura de glaciares.

### Conclusión

Este consultor concluye que, según los antecedentes analizados, aun cuando existe un aumento en el caudal por derretimiento, no existirá un aumento sostenido en la disponibilidad de agua durante la temporada de riego debido al derretimiento de Glaciares.

En Chile, falta mucho por investigar sobre glaciares, pues existen muchas incógnitas y vacíos que limitan el conocimiento sobre estas fuentes perennes de agua dulce; en especial, en la zona norte y centro del país, donde son un pilar fundamental para el abastecimiento de agua de las cuencas (Bórquez, 2007).

### **3.3 Conclusión general**

Este consultor concluye que, según los antecedentes analizados, no existirá una variación significativa de la disponibilidad de agua durante la temporada de riego en los próximos diez años.

En el largo plazo, debido al cambio de la dinámica del derretimiento de nieves y a la disminución de las reservas almacenadas en los glaciares, la disponibilidad de agua durante la temporada de riego tenderá a disminuir. Es por ello, que será necesario incrementar fuertemente la capacidad de embalsamiento de aguas para uso en riego.

En todas las cuencas anteriormente analizadas, la demanda de agua es mayor que la oferta disponible y por lo tanto son deficitarias. En estas cuencas existe una gran diversidad de explotaciones agrícolas, que van desde las comunidades indígenas ubicada en los valles de la zona norte a las grandes unidades agropecuarias de la zona central. Esta actividad depende fuertemente del riego y se encuentra presionada por la competencia por el uso del agua, especialmente debido a que las compañías mineras están dispuestas a pagar altos precios por derechos de agua.

Frente a los conflictos existentes en torno al agua, especialmente en la cuenca del Río Copiapó, se han fortalecido las mesas del agua, medida que a juicio de este consultor es adecuada y que puede conducir a una mejor administración de los recursos hídricos en cada cuenca. Para que esto ocurra es necesario fortalecer las Organizaciones de Usuarios de Agua (OUA) y continuar con la construcción de grandes obras, tanto de conducción como de acumulación.

La Comisión Nacional de Riego tiene un papel fundamental, tanto en fortalecer las OUA como en subsidiar, mediante la Ley 18.450, el desarrollo de proyectos de mejoramiento de conducción y aplicación de agua. Un punto notable que este consultor pudo apreciar directamente en terreno, es que la infraestructura de conducción de agua en gran medida es deficitaria. Muchos canales presentan pérdidas de agua por conducción o tienen estructuras deficientes.

A juicio de este consultor, las medidas que se están tomando para mejorar la eficiencia en el uso del agua son acertadas, pero la demanda por el uso del

agua será siempre creciente, debido al aumento de la población y su nivel de vida. Además existen zonas que actualmente no son posibles de ser abastecidas de agua porque se encuentran sobre la cota de los canales existentes o fuera de las áreas de cobertura de las redes de canales. Por ello, existe una gran oportunidad para el desarrollo de fuentes de aguas no convencionales que aumenten la disponibilidad hídrica. Entre estas fuentes se encuentran las aguas claras de relaves mineros, aguas servidas tratadas y aguas residuales de la agroindustria, desalinización de agua, cosecha de lluvia, estimulación en la producción de lluvias, atrapanieblas y recarga artificial de acuíferos.

En entrevistas sostenidas con agricultores de la zona en estudio, se les preguntó su opinión en la utilización de fuentes de agua no convencional para el riego agrícola. La totalidad de los entrevistados manifestaron su interés en la utilización de estas aguas, pero con la inquietud sobre su calidad y los mecanismos de fiscalización para garantizar que estas aguas sean aptas para riego, como a su vez, de cuál sería la institución responsable de estas fiscalizaciones.

Otro aspecto abordado por los agricultores, tiene relación con los costos asociados a la inversión y operación de los sistemas de aducción de las aguas no convencionales. Dado que en la actualidad uno de los puntos críticos para la producción agrícola es el costo de la electricidad, es fundamental que la conducción de estas aguas desde la fuente hasta sector de uso agrícola sea gravitacional.

En general, los agricultores consideran que los puntos claves en la utilización de estas aguas, son la definición de los sistemas de tratamientos requeridos para disponer de un agua que cumpla con la normativa de riego (NCh 1.333) y las condiciones de comercialización de esta agua entre la Fuente y el agricultor.

Como se detallará en los próximos capítulos de este estudio, existen diferentes metodologías para el aprovechamiento de fuentes no convencionales de agua que presentan diferentes ventajas y desventajas para su uso en las cuencas identificadas para este proyecto.

# CAPITULO IV: IDENTIFICACIÓN DE METODOLOGÍAS PARA EL APROVECHAMIENTO DE FUENTES NO CONVENCIONALES A NIVEL NACIONAL E INTERNACIONAL

## 1. Introducción

En este capítulo se presentan las bases conceptuales para el diseño, evaluación e implementación de Esquemas de Aprovechamiento de Fuentes No Convencionales (EAFNC). Una vez que se ha definido la Fuente No Convencional (FNC) se requiere establecer la relación entre la oferta potencial, en cuanto a calidad y cantidad, y la demanda potencial de agua para uso agrícola. Luego, es necesario definir el Tren de Tratamiento, i.e. la secuencia y procesos de tratamiento físico, biológico y/o terciario necesarios para alcanzar la calidad objetivo. Un EAFNC se compone de la FNC, el Tren de Tratamiento, la Red de Distribución; además, deben considerarse los costos de implementación y operación de los mecanismos administrativos y de gestión. Es necesario indicar que:

1. En especial en la etapa de diseño de los EAFNC, la literatura sugiere incorporar variables socio-culturales, principalmente asociadas a la demanda, como son la capacidad técnica de los operarios, la capacidad administrativa y la rentabilidad de los cultivos.
2. La calidad objetivo está determinada por la legislación vigente, que en el caso de Chile es la NCh 1333.Of78, que regula la calidad física, química y microbiológica de las aguas de riego. Mientras mayor es la brecha entre la calidad inicial y la calidad objetivo, mayores son los costos y mayor es el nivel tecnológico requerido. Esta brecha define el Tren de Tratamiento.
3. Los requisitos establecidos por un determinado Tren de Tratamiento pueden ser cumplidos por distintas alternativas tecnológicas. De esta manera, una técnica específica, e.g. filtración, puede incluirse en distintos Trenes de Tratamiento. Generalmente, la elección de equipos

está determinada por aspectos económicos y de disponibilidad en el mercado.

4. Bajo este marco conceptual, la elección tecnológica es posterior a la definición de la FNC y del punto de demanda. En general, la elección *a priori* de tecnologías no garantiza eficiencia económica.
5. Dadas las complejidades técnicas, económicas, sociales y culturales de la implementación y operación EAFNC, el diseño de estos sistemas es altamente sitio específico y dependiente del contexto de operación.
6. Desde el punto de vista económico, las economías de escala tienen una importancia determinante en los costos de EAFNC. Este punto queda determinado por la relación entre la ubicación y volumen requerido por el (los) punto(s) de demanda.

Para fines de uso agrícola, la calidad del agua requerida está determinada por la normativa vigente (NCh 1333.Of78), lo que asociado a la calidad del agua de los efluentes provenientes de FNC determinará el tren de tratamiento idóneo. Sin embargo, la implementación de esquemas de reuso debe considerar aspectos estructurales (infraestructura disponible, sistemas de tratamiento existentes, redes de distribución), así como aspectos no estructurales (percepción pública, existencia de demanda, valores de mercado) y de manejo (propiedad del sistema de tratamiento y distribución, tipo de organización, modalidad de administración) (Bixio et al., 2008; Salgot, 2008; Cortacánts, 2008). Dentro de los aspectos no-estructurales, uno de los puntos importantes corresponde al sistema de control y monitoreo que es necesario diseñar, implementar y operar.

En zonas con escasez de agua, las FNC corresponden a la desalinización de agua de mar o aguas subterráneas salinas, cosecha de agua (water harvesting) y aguas de calidad marginal como las aguas residuales urbanas e industriales o aguas subterráneas con contenidos altos de sales, las cuales deben ser controladas sobre la base de la protección de la salud humana y del ambiente (Qadir et al., 2007).

Las aguas residuales han sido recicladas en la agricultura durante siglos como medio de disposición en ciudades como Berlín, Londres, Milán y París. En China, India y Vietnam, las aguas residuales han sido utilizadas para proporcionar nutrientes y mejorar la calidad del suelo; en los últimos años han adquirido mayor importancia en regiones con escasez de agua: en Pakistán, el 26% de la producción de hortalizas es regada con aguas residuales; en Hanoi el 80% de la producción de hortalizas es regada con aguas residuales de las zonas urbanas y peri-urbanas y agua del Delta del Río Rojo, que recibe el desagüe de efluentes de la ciudad; en México aproximadamente 260.000 hectáreas se riegan con aguas residuales, en su mayoría sin tratamiento; en los Estados Unidos, la reutilización de aguas municipales representaron el 1,5% de agua el año 2000; en Túnez, las aguas residuales representaban el 4,3% de los recursos hídricos disponibles en 1996 y podría alcanzar 11% en 2030; en Israel las aguas residuales representan el 15% de los recursos hídricos en el 2000 y podría alcanzar el 20% en 2010 (Qadir et al. 2007b); finalmente, en Europa el reuso de aguas residuales en el año 2005 alcanzaba anualmente los 721.5 Mm<sup>3</sup> (Angelakis y Durham, 2008).

Actualmente se dispone de los conocimientos y las tecnologías para proporcionar equipamiento adecuado (*fit-to-purpose*, es decir, la elección de un equipamiento determinado no restringe el diseño) para utilizar FNC. Sin embargo la calidad del agua (química, físico-química y biológica) debe ser controlada y monitoreada respecto a los posibles efectos en el suelo, las aguas subterráneas y los cultivos. Para el uso y manejo adecuado de estas fuentes deben considerarse aspectos institucionales, legales, regulatorios, económicos y ambientales. En estos últimos puntos, la elección adecuada de tecnologías, determinan la relación costo - beneficio y el nivel de riesgo a considerar. Para evaluar económicamente el uso de Aguas Residuales (y FNC en general) y las posibles implicancias en el ambiente y la salud humana, pueden aplicarse los precios de mercado y las técnicas canónicas de análisis económico. Los agricultores pueden aumentar sus ganancias al disminuir los costos por fertilizantes y por aumento de producción, como también, por fertilizantes y por aumento de la oferta de agua. Más aún, Qadir et al. (2007) basado en una experiencia en Pakistán, señala que cada metro cúbico de agua residual

utilizada para riego, libera de tres a cuatro metros cúbicos de agua dulce para otros usuarios o usos, generando una ganancia neta para la sociedad. Sin embargo, existen costos y beneficios no considerados por el mercado, como la salud y los efectos ambientales, por lo cual la valoración<sup>1</sup> debe incluir los beneficios (impactos) a la salud y el medio ambiente por la reducción (aumento) de los riesgos; la totalidad de los costos y beneficios (incluidos los impactos en la productividad), políticas de Estado, y los factores culturales y sociales (Qadir et al., 2007b). Debe en cualquier caso considerarse que el uso de FNC involucra tanto cambios tecnológicos como en las prácticas y políticas, por lo cual deben considerarse en detalle los efectos sociales y la generación de propuestas e instrumentos que soporten los cambios (Marks, 2006). Respecto a la percepción pública en cuanto al reuso de agua, Hartley (2006) señala como puntos necesarios para construir y mantener la confianza en el manejo de los recursos hídricos y su reuso: manejo de la información por parte de todos los actores, mantener la motivación y mostrar compromiso, promover la comunicación, el diálogo, asegurar la equidad y solidez del proceso de toma de decisión.

Como se ha señalado, la definición de los Trenes de Tratamiento depende de la brecha entre la calidad del agua de la FNC y la calidad objetivo. Aún cuando en Chile la normativa aplicable es la Nch 1.333 Of78, es interesante analizar las bases conceptuales y la importancia de la definición de la calidad de agua objetivo. Más allá del hecho que se tienen directrices por parte de organismos internacionales como la Organización de las Naciones Unidas para la agricultura y la alimentación y Organización Mundial de la Salud (e.g. FAO, WHO) acerca del uso de aguas residuales en la agricultura, se deben integrar variados enfoques y técnicas; pero, sin una estrategia a largo plazo, adaptable a las condiciones económicas, climáticas, sociales, edáficas e hidrogeológicas, será difícil subsanar los desafíos futuros. En todos los casos, los niveles de calidad requeridos deben proveer de un cierto nivel de seguridad

---

<sup>1</sup> Una profunda revisión sobre valoración económica considerando aguas residuales en el riego puede encontrarse en Hussain et al. (2002). Este artículo muestra además un marco de análisis de impactos y beneficios del uso de aguas residuales en la agricultura, complementada por una extensa lista bibliográfica.

según el uso potencial. Salgot et al (2008) proponen diferentes categorías de calidad microbiológica y química según los usos (e.g. riego o recarga de acuíferos). Los mismos autores señalan que los parámetros químicos deben ser adaptados y minimizados en su número respecto a la FNC y el sistema de tratamiento a aplicar.

Los objetivos de calidad, deben además ser adecuados o adaptados dependiendo de los sistemas de tratamiento a aplicar, los cultivos, los métodos de aplicación de las aguas residuales (u otras derivadas de FNC) y el control de la exposición humana (Kamizoulis, 2008). Respecto a la directrices dadas por la WHO, Campos (2008) propone incluir en las evaluaciones, además de coliformes fecales y huevos de helmintos, a patógenos como virus, protozoos y otros microorganismos “emergentes” y Blumenenthal et al. (2000) definen las concentraciones de, por ejemplo, coliformes fecales, dependiendo del nivel de exposición. Por su parte Weber et al. (2007) sugieren la inclusión de parámetros químicos, los cuales en cuanto a su nivel de riesgo y nivel requerido de tratamiento, dependen las características de calidad del agua según la fuente a reusar.

Los países que están desarrollando sistemas de reuso en un marco institucional, han elaborado e implementado sus propias normas. Países como Francia y Túnez, y regiones como Andalucía, Islas Baleares (España) y Sicilia (Italia) han optado por los criterios propuestos por la WHO, mientras que países como Chipre, Italia e Israel han elaborado normativas más cercanas a los criterios más conservadores del Estado de California (EEUU). Los factores que pueden explicar estas discrepancias, uno de los más importantes es la falta de datos claros y establecidos científicamente (Brissaud, 2008).

De esta manera, el análisis del estado del arte no sólo debe sustentarse en los sistemas tecnológicos, sino además en la definición y análisis de las metodologías de planificación y selección de alternativas y los requerimientos de calidad (Urkiaga et al., 2008). En la mayoría de los casos, las soluciones a seleccionar son altamente sitio específico y contexto-dependientes.

## **1.1 Metodologías de análisis**

Landcom, una agencia público-privada de New South Wales en Australia, en una extensa revisión sobre tecnologías disponibles para el reuso en ambientes urbanos, señala que los principales puntos en la selección de tecnologías de tratamiento son (Landcom's WSUD Strategy, 2003): uso potencial del agua y perfil de la demanda, calidad y cantidad de agua, espacio disponible, interacción con el medioambiente, receptividad de la comunidad (consideraciones sociales), condiciones económicas, condiciones climáticas, operación y mantención y propiedad del sistema. El Cuadro 23 muestra los pasos metodológicos propuestos en la referencia anterior para seleccionar una tecnología, luego de completar los análisis económicos, ambientales y sociales, en el contexto del sitio (Landcom's WSUD Strategy, 2003).

La definición del proyecto debe comenzar con la evaluación de la condición “cero” (no reuso), para luego aumentar la complejidad y costos de los esquemas de reuso (Huertas et al, 2008). Por ejemplo, Min et al. (2007) utilizaron un modelo de crecimiento de arroz para evaluar distintos escenarios de uso de aguas residuales.

Cuadro 23. Pasos metodológicos para la selección de tecnología (adaptado de Landcom's WSUD Strategy (2003) y Hanbook on Feasibility Studies for Water Reuse Systems (2008)).

MACROACTIVIDAD	ACTIVIDADES
Identificar las características del sitio y la interacción el ambiente	Identificar la escala, tipo y ubicación de uso.
	Evaluar la capacidad actual.
	Evaluar potenciales mejoras para satisfacer la demanda.
	Comparar posibles mejoras en sistema actual respecto a FNC.
Realizar un balance hídrico	Comparar los usos actuales con los recursos disponibles (incluyendo aguas lluvias, precipitaciones y agua potable) para cada uso.
	Evaluar las demandas de los usuarios finales.
	Calcular el balance hídrico.
	Comparar los perfiles de demanda y oferta.
Identificar las alternativas de reuso	In situ.
	Plantas de tratamiento centralizadas.
	Doble línea de suministro.
Considerar aspectos sociales y de salud pública	Análisis de riesgo para definir métodos de transporte y calidad de agua requerida.
	Definir monitoreo y demostración de cumplimiento con normativa.
	Identificar la receptividad de la comunidad.
Evaluación de Impacto Ambiental	Impacto en la calidad de las aguas receptoras directas y/o indirectas.
	Gases invernadero.
	Disponibilidad y conveniencia del terreno.
Análisis económico	Análisis de costo para la vida útil.
	Economías de escala.
	Capital, costos operacionales, reemplazo y retiro.

Generalmente, los estudios de factibilidad de proyectos de reuso de agua se enfocan principalmente en los costos internos del proyecto. Sin embargo, la literatura señala la conveniencia de incluir costos y beneficios externos (e.g. ambientales y sociales) en la valoración económica (Hernández et al, 2006; Mekala et al, 2008). Una referencia importante a considerar son los resultados del proyecto europeo AQUAREC<sup>2</sup> (Integrated Concepts for Reuse of Upgraded Wastewater). Este consorcio publicó el *Handbook on Feasibility Studies for Water Reuse Systems* (Gaiker, 2006), el cual es una guía sobre estudios de factibilidad de proyectos de reuso, útil para los diferentes actores

<sup>2</sup> En el sitio web [www.aquarec.org](http://www.aquarec.org) puede encontrarse una gran cantidad de material técnico de alta calidad, incluyendo casos de estudio, manuales de manejo, sistemas de soporte de decisión y métodos de selección tecnológica.

involucrados, tanto públicos como privados, en la planificación y manejo de sistemas de reuso de aguas o sistemas que aprovechen FNC. El enfoque metodológico propuesto por este grupo de trabajo considera una perspectiva multidisciplinaria considerando, tal y como se ha señalado, aspectos hidrogeológicos, técnicos, económicos, ambientales, sociológicos de calidad y de riesgo para la salud. La experiencia en Estados Unidos, incluyendo requerimiento de claridad y análisis de casos a nivel global, se presenta extensamente en la publicación *Guidelines for Water Reuse* (2004).

## 2. Trenes de Tratamiento

Desde el punto de vista tecnológico, la oferta de sistemas de tratamiento es amplia y variada en cuanto a eficiencia, costos, operación y manejo. Dado lo anterior es necesario categorizar los trenes de tratamiento (*treatment trains*) respecto al uso potencial o deseado, por cuanto este aspecto determina la calidad objetivo. **Este es un concepto sustentado por la literatura que determina los procesos, no las técnicas o métodos, que permitan cerrar la brecha entre calidad inicial y calidad objetivo.** Los trenes de tratamiento corresponden a la secuencia de operaciones unitarias: tratamiento primario, tratamiento secundario, tratamiento terciario o procesos avanzados y desinfección.

Para cada operación unitaria se tiene un conjunto de procesos y técnicas que, en general, tienen resultados similares. Por lo anterior, un mismo tren de tratamiento, o incluso una misma técnica (con distintos niveles de complejidad o volúmenes de operación) pueden ser aplicadas en el tratamiento de aguas de diferentes fuentes. La elección del proceso o técnica dependerá de los costos de diseño, operación y mantención además de estar fuertemente influenciado por economías de escala.

La literatura es extensa en cuanto a manuales y compendios de sistemas de tratamiento. Por ejemplo, el proyecto AQUAREC publicó el reporte *Water treatment options in reuse systems* (AQUAREC, 2006) en el cual se detallan distintos esquemas de reuso en cuanto a eficiencias, costos de instalación y costos de operación. Para aplicaciones de reuso en ambientes urbanos puede consultarse el manual Landcom's WSUD strategy (2003). Sin

embargo, dada la amplia oferta, es necesario tanto diseñar como optimizar los esquemas de reuso a partir de los factores anteriormente descritos (oferta, demanda y objetivo de calidad). La elección de los esquemas puede realizarse a través de Sistemas de Soporte a la Decisión (Salgot, 2008), como el Decision support software (DSS) for Water Treatment for Reuse with Network Distribution (WTRNet) descrito en Joksimovic (2006) y Joksimovic et al (2008).

En general, los trenes de tratamiento utilizados para las aguas residuales domésticas (Primario, secundario, desinfección) son suficientes para su posterior uso en riego, dado que cumple con la normativa vigente (SAG, 2005), pero es necesario controlar cuidadosamente la calidad microbiológica de las aguas de reuso. Como ejemplo de estos Trenes de Tratamiento, en el Anexo 10 se presentan algunos ejemplos dependientes del uso y en el Anexo 11 se presenta un resumen de las tecnologías de reutilización de aguas crudas y/o tratadas en ambientes urbanos. Por otra parte, además de los parámetros de calidad estándar (e.g. Sólidos Suspendidos, pH, Coliformes fecales, DBO), la literatura sugiere tener en consideración los llamados “contaminantes emergentes” como los derivados de medicamentos y productos de cuidado personal, disruptores endocrinos, metales pesados, pesticidas y antibióticos. Los sistemas de tratamiento requeridos para estos contaminantes son altamente específicos, dependiendo de las características físico-químicas, persistencia y concentración presente en el efluente. Además, debe considerarse el nivel y riesgo de exposición para los seres humanos (Weber et al., 2008).

### **3. Fuentes no convencionales**

A continuación se presentan diferentes FNC considerando la descripción de la fuente, los procesos y mecanismos de aprovechamiento, así como los aspectos técnicos, económicos, ambientales y legales. Como se ha expuesto anteriormente, lo que a su vez es sustentado por la literatura, el diseño, evaluación e implementación de EAFNC corresponde a un enfoque *top-down*, es decir, se parte de las generalidades para establecer casos específicos, en etapas sucesivas. Por lo anterior, la definición EAFNC a partir de, por ejemplo, patrones de cultivos corresponde al enfoque opuesto, es decir, desde lo

específico a lo general, lo cual no asegura eficiencia técnico-económica. La normativa vigente busca evitar la degradación de los recursos de suelo y agua, por lo que toda vez que se cumpla la NCh 1.333 se previene la degradación de estos recursos. Sin embargo, las excepciones deben ser cuidadosamente analizadas en lo particular.

### **3.1 Aguas Claras de Relaves**

#### **3.1.1 Descripción de la fuente y procesos o mecanismos de aprovechamiento**

El Decreto Supremo 89 de 1970 define a los depósitos de relaves como "disposición de almacenamiento de los relaves que cumple la función de ubicar la fracción sólida en una estructura estable y disponer, a la vez, de la suspensión parcial de sólidos en líquidos y de una fracción líquida, capaces de mantenerse en condiciones seguras respecto a eventuales rebalses u otras perturbaciones" (CONAMA 2002).

Los relaves mineros en Chile son desechos generados en el procesamiento por flotación de la mina de cobre u otros minerales, los que luego son depositados en embalses donde las partículas finas (o arenas de relave) son separadas del agua por sedimentación (Santibáñez et al 2007). De acuerdo a una estadística interna de SERNAGEOMIN se encuentran en operación activa un total de 107 depósitos de relave. De este total un 72% recircula sus efluentes hacia su sistema productivo, un 12,1% descarga los efluentes hacia el ambiente, y un 4,6% realiza algún tipo de tratamiento. Un total de 12 sitios activos no informa sobre el manejo de efluentes (CONAMA 2002).

En cuanto a los relaves derivados del cobre, estos residuos provienen de un proceso predominantemente alcalino ( $\text{pH} = 8 - 11$ ) y corresponden a una mezcla alcalina de sólidos en suspensión cuyos componentes solubles principales son los aniones sulfatos y molibdatos. El catión  $\text{Ca}^{+2}$  y metales pesados presentes en estos relaves se encuentran precipitados y coprecipitados, con lo que una vez que se depositan estos sólidos en suspensión acuosa, se genera un residuo líquido denominado "agua clara de

relave” que, si no es posible reciclarlo dentro del proceso industrial, genera un excedente que debe ser evacuado al medio ambiente (Delpiano 1998).



Figura 59. Utilización de agua en la minería (Fuente: COCHILCO, 2008)

### 3.1.2 Aspectos técnicos y económicos

El método más adecuado para la disposición de relaves es específico para cada proyecto y ubicación, la mejor solución puede ser obvia o puede requerir considerable investigación dependiendo de las circunstancias únicas de la mina, las cuales incluyen (CONAMA 2002): (1) Ubicación de la mina y topografía (2) Método de minado y geología del cuerpo mineralizado (3) Métodos de procesamiento y características físicas resultantes de los relaves (4) Características químicas de los relaves y su potencial generador de ARD y (5) Factibilidad económica.

De lo anterior queda de manifiesto que la capacidad de uso de las aguas claras son altamente sitio específicas (Younger y Wolkersdorfer 2004). Sin embargo, los costos de reuso dependerán de la calidad de las aguas claras, comparadas con la norma de riego, la disponibilidad de demanda, los costos de transporte y la disponibilidad de oferta. La oferta es un punto importante a considerar, ya que actualmente se pueden encontrar proyectos que utilizan las aguas claras como fuente de riego para especies forestales, pero consideradas como parte del sistema de tratamiento o procesos de disposición final de los residuos generados. Como ejemplo de estas tecnologías se tiene la fitoestabilización y la fitoextracción (Méndez y Maier 2008).

### **3.1.3 Aspectos ambientales**

La mayor preocupación del uso de relaves mineros radica en los posibles efectos o impactos de su disposición y uso en los ecosistemas receptores. Por ejemplo, Lee et al (2006) indican una disminución de densidad y taxa en la zona costera receptora de aguas provenientes de relaves. Además, los efectos de los residuos pueden expandirse aguas abajo de las descargas en situaciones en las cuales las aguas son descargadas a aguas superficiales que luego son utilizadas como aguas de riego (Blecker et al 2009). En efecto, el uso de aguas superficiales impactadas por la minería del tungsteno en China, con altos contenidos de Cadmio, establece una vía de riesgo toxicológico para las personas a través de la comida y el agua de bebida (Cai et al 1995). La situación anterior también es reportada por Miller et al (2004) para la minería del oro en Bolivia, agregando como vía de ingesta la inhalación de partículas de suelo con altos contenidos de Cadmio. Los efectos ecotoxicológico de metales como cadmio, Cromo, Plomo y Zinc, entre otros, pueden estudiarse a través de ensayos sobre cultivos tipo como cebollas betarragas, arroz o rabanitos (Iannacone y Alvaríño 2005, Rabelo 2002).

El uso de aguas derivadas de relaves en riego, ya sea directamente o captada de cuerpos de agua superficiales intervenidos, puede impactar negativamente las aguas subterráneas. Adnani y colaboradores (2007) encontraron altos niveles de Conductividad Eléctrica CE, además de altos contenidos de iones como Calcio, magnesio, Sodio y Cloro en las aguas subterráneas ubicadas aguas abajo a una zona de riego con aguas de relaves.

El aumento de la concentración de cobre en los suelos debido a distintas fuentes antrópicas puede producir efectos de toxicidad en las especies vegetales sensibles. Sin embargo, se ha postulado que diversos factores edáficos podrían determinar la biodisponibilidad del cobre y, por lo tanto, la intensidad del efecto fitotóxico, tales como el contenido de materia orgánica y el pH del suelo, además del grado de solubilidad de la forma química en la cual el cobre es incorporado, con lo cual la respuesta de las plantas a la incorporación de cobre en el sustrato de crecimiento es multifactorial y no puede ser evaluada a partir de los niveles totales de cobre presentes (Ginocchio y Narváez 2002, Sidenko et al 2006, Gonocchio et al 2007), además del hecho que la captación

de metales pesados por parte de las plantas es dependiente de la biodisponibilidad más que la concentración en las aguas de riego (para el Cobre, ver Badilla-Ohlbaum et al 2001).

En Sudáfrica, se estudió el efecto del riego de praderas y maíz, con aguas moderadamente salinas y altamente mineralizadas provenientes del cierre de una mina, estableciéndose un aumento de Calcio, Magnesio y sulfatos en los suelos (Idoww et al 2008). Sin embargo, el riego con aguas provenientes de la actividad minera no tratadas puede tener efectos severos en la salud de las personas y del ecosistema receptor (Yang et al 2006).

Actualmente, la investigación se ha centrado en las técnicas de estabilización de los depósitos mediante, por ejemplo, fitoestabilización mediante especies forestales (Valenzuela 2005) o cultivos como ballica (Santibáñez et al 2007). Sin embargo, el uso combinado de biosólidos (desechos estabilizados de plantas de tratamiento) y relaves tiene el potencial de generar lixiviados de nitrato (Santibáñez et al 2007). Para una revisión sobre la fitoremediación de relaves de cobre ver Santibáñez et al (2008), González et al (2008).

#### **3.1.4 Aspectos legales**

En 1970 se dicta el Decreto Supremo N°86 del Ministerio de Minería, norma aplicada a la disposición de residuos de la minería a través de depósitos o tranques de relave. Este cuerpo legal tiene relación directa con la construcción y operación de tranques de relaves, controlando sus aspectos estructurales, la estabilidad sísmica y estática de los tranques, e incluyendo además el riesgo sobre la zona de emplazamiento del depósito. En 1994 se dicta la Ley de Bases del Medio Ambiente (19.300), que crea la Comisión Nacional del Medio Ambiente, y en 1997 el Reglamento que establece el Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental o SEIA. Este último permite incorporar las componentes ambientales dentro de proyectos de inversión, entre los que se encuentran los del ámbito minero, con el objeto de mitigar los impactos negativos y potenciar los que benefician al medio ambiente en cada una de las fases por las que atraviesa el proyecto.

A partir de estos antecedentes y considerando que los parámetros de estas aguas exceden los establecidos por la NCh 1.333, queda claramente de manifiesto que estas aguas no pueden ser utilizadas para riego agrícola en forma directa.

### **3.1.5 Experiencia nacional e internacional**

Los efluentes de relaves de las Divisiones Andina y El Teniente de CODELCO sobrepasan los estándares de la actual Norma de Riego, NCh 1.333, en molibdatos, sulfatos y pH (SAG 2005, Delpiano 1998). En conocimiento de que ambos componentes no presentan en sí riesgos para los cultivos, se ha buscado aprovechar estas aguas en el sector agropecuario (Delpiano 1998).

Aguas claras de relaves Tranque Carén (SAG 2005), corresponde a una experiencia de más de 10 años de investigación que ha realizado Codelco, División El Teniente, usando aguas claras de relave con altas concentraciones de molibdeno y sulfato ( $Mo=2.1$  ppm;  $SO_4 =1648$  ppm;  $pH=8.0$ ;  $CE= 2294\mu mho\ cm^{-1}$ ), en el riego de alfalfa. Los resultados obtenidos muestran que al ingresar el molibdeno al suelo, éste es retenido en los primeros 35 cm, alcanzándose el nivel de equilibrio o saturación a los 4 años de riego. El sulfato no se acumula en el suelo porque lixivia fácilmente. La concentración de molibdeno en alfalfa resulta dependiente de su concentración en el agua de riego y no de los niveles existentes en el suelo. Los resultados indican que el riego con agua de estas características no produce fitotoxicidad y la producción obtenida es satisfactoria. El uso de alfalfa, cultivada bajo estas condiciones, en alimentación de ganado mostró que los rumiantes serían más sensibles a dietas desbalanceadas respecto a Cu y Mo, pero el  $SO_4$  presente en el agua ejercería una acción mitigadora de este efecto.

Aguas claras del Depósito de Relaves Ovejería (SAG 2005), corresponde a experiencias de Codelco, División Andina, en el período 1993-1997, con aguas claras de relaves con elevado contenido de molibdeno, sulfato, calcio y pH alcalino, con seguimiento permanente de variables químicas (metales pesados y sales solubles) y biológicas (crecimiento y productividad) sobre cultivos de alfalfa (pradera bioacumuladora de molibdeno),

duraznero y vid (especie de hojas decidua representativa de los cultivos frutícolas de la zona), eucaliptos (especie perenne que muestra altas tasas evapotranspirativas) y cultivos hortícolas papas, tomates, pepinos y cebollas permitieron obtener interesantes resultados y comprobar algunos conocimientos de tipo teórico. Los resultados muestran que los suelos regados, con aguas claras de este relave, incrementaron sus contenidos de molibdeno, sulfato, calcio y conductividad específica. El molibdeno se inmoviliza en los primeros horizontes y una vez que éstos se saturan, lixivia hacia los horizontes más profundos. Los sistemas vegetales presentaron selectividad en la absorción de los metales, los cuales se distribuyen dentro del vegetal según el rol que cumplen a nivel fisiológico. Se recomienda no regar especies de la familia Fabacea (alfalfa, habas, porotos verdes) por su significativa afinidad con el molibdeno.

Dada la poca disponibilidad de estudios sobre la utilización de las aguas claras de relaves mineros en el riego agrícola en Chile, bajo distintos escenarios de condiciones ambientales, de suelo, variedad de cultivo y considerando las nuevas políticas de optimización del recurso hídrico en la minería, el Consultor considera que la utilización de esta FNC no es apta para riego agrícola en Chile. A su vez, deja de manifiesto la necesidad de realizar estudios de investigación aplicada, en los cuales se analice la toxicología de los cultivos y los impactos que se pudiesen generar en los cuerpos de agua subterráneos, bajo distintas prácticas de manejo agrícola, permitiendo de esta manera sustentar la factibilidad de utilización de estas aguas para riego.

## **3.2 Aguas Servidas Tratadas y Aguas Residuales de la Agroindustria**

### **3.2.1 Descripción de la fuente y procesos o mecanismos de aprovechamiento**

Las aguas residuales municipales o urbanas (ARM), corresponden a una mezcla de efluentes domésticos (aguas negras y aguas grises), efluentes de instituciones y establecimientos comerciales. Las aguas residuales industriales (ARI) corresponden a los efluentes de industrias de diferentes tipos. (Qadir et al. 2007). Las ARM tratadas representan la más confiable y significativa fuente no convencional, comparado con aguas agrícolas, aguas lluvias o descargas industriales (Asano et al 2007).

El Informe de Gestión del Sector Sanitario, elaborado por la Superintendencia de Servicios Sanitarios (SISS), indica que en el año 2007, existían descargas que alcanzaron aproximadamente un total de  $23 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  con una cobertura promedio del sector del 85,52% (para el territorio en estudio), de los cuales  $5,3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  corresponden a descargas de emisarios submarinos. Se considera una proyección para el año 2018 de  $28 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ , con una cobertura promedio del 98,54% lo que indica un alto potencial de uso de estas aguas.

Las aguas residuales, tanto urbanas como industriales, son tratadas en plantas de tratamiento considerando al menos tratamiento secundario y desinfección. Según el estudio Criterios de calidad de aguas o efluentes tratados para uso en riego, las ARM provenientes de plantas de tratamiento cumplen, en general, con el DS 90. Sin embargo, en un esquema de reuso, la normativa a aplicar corresponde a la NCh 1.333, que establece los criterios de calidad para el uso de aguas en riego. Dado que las plantas de tratamiento se diseñan para el cumplimiento del D.S. 90, en algunos casos no necesariamente cumplirán con los límites establecidos para el agua de riego y la evaluación debe hacerse para cada condición en particular. Este tema sin embargo, no debería considerarse como una contradicción dado que el D.S. 90 corresponde a una norma de emisión (obligatoria) y la NCh 1.333 corresponde a criterios de calidad de agua para diferentes usos, con carácter referencial (SAG 2005).

Las ARM contienen nutrientes y micronutrientes necesarios para el crecimiento del cultivo, por lo cual es posible utilizar esta fuente para suplir la demanda tanto de agua como de fertilizante (López et al 2006). Sin embargo, uno de los parámetros de calidad de aguas de riego de mayor importancia es la calidad microbiológica.

En esta sección se analiza la literatura respecto a aspectos técnicos, económicos y ambientales. Debe tenerse en cuenta que los esquemas de reuso de ARM consideran sólo aguas tratadas, por lo cual no se incluye la descripción de procesos de tratamiento de aguas residuales, ya que este tópico corresponde a Ingeniería sanitaria y es ampliamente tratado en la literatura (ver Asano et al 2007, AQUAREC 2006a, AQUAREC 2006b, AQUAREC 2006c, AQUAREC 2006d). En general, los efluentes de sistemas secundarios son usados en riego restringido, y los efluentes de sistemas terciarios (que consideran filtración, ultrafiltración o desinfección como UV, ozono y cloración) son utilizados en riego irrestricto (Bixio et al 2006, Toze 2006). El Cuadro 24 presenta los trenes de tratamiento comunes para en el reuso de aguas residuales, industriales o urbanas, las cuales son aplicables dependiendo de las características de la fuente.

**Cuadro 24. Mecanismos de tratamiento y características, para ARI y ARM.**

Mecanismo	Caudal o Volumen	Vida útil	Calidad efluente	Remoción	Comentario	Referencias
Humedal artificial+lagonaje	10 m <sup>3</sup>	s/i	RI	N(50), P(50), CF(90)	Proceso a pequeña escala	Kocaman et al. (2007)
Físico	30 m <sup>3</sup> /d	si	RR	-	Aumento de producción, sin tratamiento biológico	López et al 2006
Almacenaje	100000 m <sup>3</sup>	si	RI	TSS, DBO, CF	Proveniente de lodos activados	López et al 2006
Humedal artificial	2000 m <sup>2</sup>	si	RR	N(49),P(30),DBO(65),TS S(65)	Proveniente de lodos activados	López et al 2006
Membrana	0,7 m <sup>3</sup> /h	si	RI	CF(100)	Costos de bombeo	López et al 2006
Filtrado+LJV	si	si	RI	CF, TSS	Aumento de producción, ARM	Kang et al 2007
Reactor anaerobio y biofiltro	si	si	RR	DBO(70)	Desechos de planta de pelado	Lehto et al 2009
Biofiltro, recarga y humedales	11000 ha	si	RR	si	ARM tratadas y no tratadas	Van de Graff et al 2002
Almacenamiento subterráneo	200-600 Gm <sup>3</sup> /año	si	RI	CE	Regulación estacional CE ca. 2000 mg/L	Dillon et al 2006
Membrana	0,7 m <sup>3</sup> /h	si	RI	CF, metales pesados	Necesidad de almacenaje de 15 m <sup>3</sup>	Lonigro et al 2007

En paréntesis se indica la eficiencia de reposición del sistema.

s/i indica sin información.

RR corresponde a riego restringido.

RI corresponde a riego irrestricto.



Figura 60. Vista aérea PTAs “El Trebal”. (Fuente: Aguas Andinas)

### 3.2.2 Aspectos técnicos y económicos

Los esquemas de reuso para esta fuente no convencional, deben considerar un monitoreo constante de la calidad del efluente, especialmente la relacionada (en orden decreciente de importancia relativa) a la calidad microbiológica, Conductividad Eléctrica (CE) y metales pesados y metales traza, y cada vez con mayor frecuencia los llamados contaminantes emergentes, como son los contaminantes orgánicos y biocidas (Weber et al 2006). Lo anterior dado que la calidad del agua a reusar es altamente dependiente de la calidad y funcionamiento de la planta de tratamiento.

Sin embargo, debe tenerse en cuenta el uso de sistemas naturales de tratamiento, especialmente en pequeñas comunidades o empresas de producción pecuaria, tales como humedales artificiales y lagunas de estabilización. Para esquemas locales, es posible utilizar técnicas asociadas al reuso urbano. Por otra parte, los esquemas de reuso pueden también considerar el uso indirecto, es decir, la recarga artificial de acuíferos, que a su vez permite aprovechar las capacidades naturales de ecosistemas para purificar el agua, como también su capacidad de regulación (Dillon et al 2006).

Es necesario realizar un balance de nutrientes para aprovechar económicamente el contenido nutricional de las aguas residuales. Sin embargo, los principales aspectos técnico-económicos a considerar son: (1) el establecimiento y operación de un sistema de monitoreo, tanto de la calidad del

efluente como de los suelos y cultivos, dado que los efectos son dependientes del tren de tratamiento y su funcionamiento (Bixio et al 2006); (2) el establecimiento y operación de una red de distribución de las aguas a reusar. La definición de un sistema de reuso debe combinar aspectos de disponibilidad de agua residual, ubicación y volumen de la demanda, normativa aplicable, participación pública y de la sociedad civil (Hochstrat et al 2008).

### **3.2.3 Aspectos ambientales**

La producción, distribución y uso de aguas residuales puede resultar en variados impactos ambientales como alteraciones del uso de suelo, conflictos con planes y políticas, efectos sobre humedales y flora y fauna, desplazamiento de persona y efectos sobre el paisajes y patrimonios (Asano et al 2007). Los constituyentes de las AR tales como nutrientes, sales, y compuestos orgánicos e inorgánicos puede afectar el suelo, las plantas y los cuerpos superficiales y las aguas subterráneas. Además la flora microbiana presente en el agua puede presentar un riesgo a la salud humanada, tanto de los consumidores como de los trabajadores.

El aumento de nutrientes y metales pesados en suelos regados con AR, tanto domésticas como industriales, ha sido ampliamente reportado, señalando acumulación de metales pesados en el suelo y plantas, sin llegar a niveles tóxicos o riesgosos. Sin embargo, se debe tener especial cuidado en el control y monitoreo de los procesos en el continuo suelo-planta-agua-atmósfera, tanto a corto como a largo plazo, dadas las posibilidades de lixiviación y bioacumulación (Tijani 2009). Pueden existir efectos genotóxicos en los suelos regados con ARM durante 40 años (Yu et al 2008). Sin embargo, también se reportan aumentos de producción sin diferencias significativas en la calidad de los cultivos como arroz (Kang et al 2007), maíz (Mohammad y Ayadi 2004) además de aumentos en la disponibilidad de MO, Zn, Cu, Mn y Fe dependiendo de los cambios en pH asociados a la CE del agua (Bahmanyar 2008) y acumulación de metales pesados como Cd, Cr, Pb y Hg en los primeros estratos de suelo, con una tasa de lixiviación lenta (Van oort et al 2008, Dong et al 2009). También se reporta riego de especies forestales con ARM (Vissikirsky et al 2005, Kalavrouziotis et al 2006).

Dado que las AR en general poseen altos valores de CE (sobre 1500 dS m<sup>-1</sup>), y que la salinidad del suelo tiende a aumentar con la CE de las aguas, es necesario en casos específicos de cambios en las prácticas culturales y de riego para controlar este riesgo, que pueden llevar a cambios fenológicos y disminuciones de productividad (Abou-Hadid 2003). Entre estas prácticas se puede mencionar el uso secuencial, uso cíclico, mezcla, pero manteniendo los requerimientos ambientales y económicos (Grattan y Oster 2003). En el Anexo 12, se presentan los efectos sobre el suelo, agua, aire y cultivos de algunas experiencias en la utilización de estas aguas.

#### **3.2.4 Aspectos legales**

Es éste, el gran problema de las aguas no convencionales de ASM. Confluyen aquí el Código de Aguas, en especial art. 43, las reglas generales de la propiedad civil y la Ley de Servicios Sanitarios en especial art, 61 y 71 de la misma.

La propiedad de las aguas tratadas efluentes de una Planta de Tratamiento es un tema que ha sido analizado por casi todos los juristas especialistas del área con opiniones disímiles.

La respuesta sobre la propiedad de las aguas, en general, es favorable a las Sanitarias. De acuerdo a la legislación vigente, ellas no están obligadas a generar excedentes ni a depositarlos siempre en el mismo lugar. Ellas son dueñas de su derecho de aprovechar las aguas y por tanto de usarlas de la manera que decidan, conforme a la garantía de la propiedad, definida en el art. 19 n° 24 de la Constitución Política y el art. 43 del Código de Aguas. Solo una ley expresa podría limitar este derecho, fundados en la función social.

De acuerdo a la situación vigente, la factibilidad en la utilización de las aguas provenientes de las PTAs, para su uso en riego agrícola, pasa por la necesidad de establecer un acuerdo de venta o arriendo de agua entre la Agroindustria o Empresa Sanitaria y los agricultores.

### 3.2.5 Experiencia Nacional e Internacional

Algunas experiencias internacionales reportadas en la reutilización de aguas residuales de ciudades, se presentan el Cuadro 25.

Cuadro 25. Experiencias reportadas en la reutilización de agua tratada.

Cultivo	Origen	Resultados	Referencia
Arroz	Biológico, con remoción de N y cloración	Reducción del 10 % en costos de producción sin diferencia de calidad.	Papadopoulos et al 2009
Múltiples	Tratamiento secundario	Tratamiento de 300.000 m <sup>3</sup> /d provenientes de París que riegan alrededor de 1200 ha. 100 años de experiencia.	Van Oort et al 2008
Múltiples	Tratamiento Primario avanzado	Uso de 30 a 45 m <sup>3</sup> /s de aguas servidas de Ciudad de México para regar 85.000 ha de suelos marginales. Alto contenido de CF (1,2e6/100 mL). Protección de huevos de helmintos. 100 años de experiencia.	Jiménez- Cisneros & Chávez-Mejía 1997

En Chile, existen experiencias en la utilización en riego con aguas residuales crudas, es decir, sin tratamiento previo, como fue el caso del uso de las aguas del Zanjón de la Aguada en riego de hortalizas consumidas por la población de Santiago. Esto originó al país un gran problema sanitario por la gran incidencia de enfermedades gastrointestinales que esta práctica generó.

El agua rica también en N, P y otros nutrientes ha constituido un excelente fertilizante, cuyos excesos han alcanzado también el nivel freático, contaminando con nitrato las fuentes de agua subterránea de la zona.

El problema más grave que presentan estas aguas es de tipo sanitario por la abundancia de microorganismos patógenos, lo que constituye un constante riesgo para los agricultores mismos que manipulan estos cultivos y para el público que luego los consume.

Varios investigadores chilenos han publicado, en revistas internacionales, los antecedentes que avalan estas conclusiones y que fueron, en alguna medida, los que orientaron a las autoridades sanitarias a tomar la decisión de tratar las aguas residuales generadas en la ciudad de Santiago.

Para la ciudad de Calama se presentó un proyecto que se encuentra en la DOH para la utilización de una fracción de las aguas tratadas que se generan en la planta de tratamientos de aguas servidas TRATACAL. Esta agua sería conducida mediante tubería a los sectores Verdes Campiñas y Cerro Negro.

El Consultor, considera que tomando en cuenta la exigencia en el cumplimiento del Decreto Supremo 90 por todas las plantas de tratamiento de aguas servidas como también por las agroindustrias, existe la factibilidad técnica, económica y legal para que los agricultores pudiesen utilizar estas aguas en el riego agrícola. Cabe destacar que existiría la necesidad en algunos casos de aplicar trenes de tratamiento para cumplir con la NCh 1.333, dado que entre estas dos normativas (DS90 y NCh 1333) existen diferencias en los niveles máximos permitidos de algunos parámetros.

### **3.3 Desalinización de Agua**

#### **3.3.1 Descripción de la fuente y procesos o mecanismos de aprovechamiento**

Se consideran aguas salinas, aquellas que tiene un contenido de Sólidos Disueltos Totales (TDS, incluyendo metales, cationes y aniones) mayor a 1.000 mg L<sup>-1</sup> (como referencia, el agua de mar tiene una valor de TDS de 50.000 mg L<sup>-1</sup>), pero los efectos sobre los cultivos y el suelo son sitio específicos, es decir, existen cultivos más o menos tolerantes a ser regados con aguas salinas.

Las sales disueltas no pueden ser removidas mediante métodos convencionales como coagulación o filtración (Younos 2005 1), por lo que, en general, los tratamientos de desalinización se refieren a la remoción de sales contenidas en agua de mar o aguas salinas por medio de (Para una revisión detallada de procesos ver Al-Karaghoulí et al 2009):

- Membranas
- Intercambio iónico
- Procesos termales o de destilación

Las condiciones críticas para la implementación de sistema de desalinización incluye el tipo de tecnología, los impactos ambientales, las consideraciones de normativas, la disponibilidad y consumo de energía, así como los costos de implementación y operación (Younos 2005 1), dado que la eficiencia de los procesos de desalinización son proporcionales a la

concentración de TDS en el agua a tratar (Younos y Tulous 2005 1). Además, debe considerarse que existen diferencias en el diseño, evaluación y operación de sistemas de desalinización de aguas salinas, superficiales o subterráneas, en zonas alejadas, dadas la diferencias en composición entre las aguas salinas y el agua de mar (Brady et al 2005), además de la fuente de agua a tratar, ya que, por ejemplo, en el caso de aguas subterráneas, los costos de bombeo aumentan.

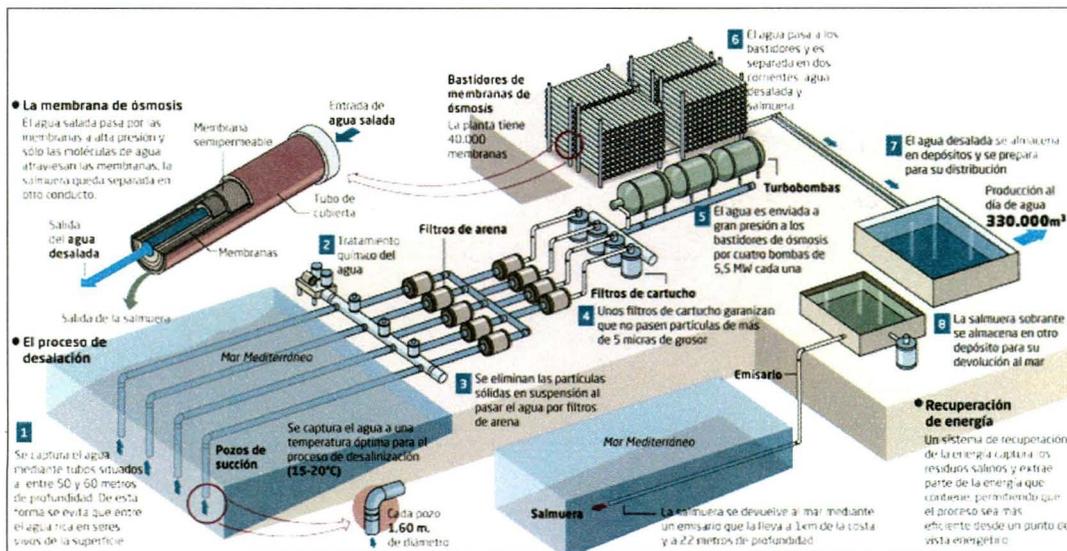


Figura 61. Esquema de planta desaladora de Ashkelon, Israel.

### 3.3.2 Aspectos técnicos y económicos

Aún cuando para el tratamiento de estas aguas se utilizan membranas que tienen una corta vida útil con altos costos de reemplazo y es necesario un plan de limpieza para evitar el taponamiento (Younos y Tulous 2005 1), es generalmente recomendable para el tratamiento de aguas salinas (Miller 2003, Reddy y Ghaffour 2007).

El gasto energético en los procesos de desalinización corresponde principalmente a costos de bombeo para generar los diferenciales de presión (Younos y Tulous 2005 2). Como se ha mencionado, la técnica o método de tratamiento es sólo una parte del EAFNC, el cual incluye a su vez la infraestructura de distribución y administración. Por lo anterior, el precio de la energía es importante en el costeo, pero no determinante, si, por ejemplo, es

necesario bombear y transportar el agua tratada a largas distancias. Por lo anterior, en los últimos años se ha comenzado a investigar fuertemente en la cogeneración de energía y en sistemas de desalinización impulsados por fuentes de energía renovables, como la solar, eólica (Mathioulakis et al 2007, Blanco et al 2008, García-Rodríguez 2002, Khaydarov y Khaydarov 2007), las que pueden ser competitivas a pequeña escala (Qiblawey y Banat 2008) y de las mareas (en etapa inicial de experimentación, Davies 2005).

Los costos, tanto de inversión como de operación, son determinantes en la factibilidad de sistemas de desalinización, además de ser sitio específicos, dependiente de la calidad del agua a tratar, la capacidad de la planta (economías de escala y la localización y disponibilidad energética (Younos 2005 3). Cada sistema de desalinización es único en cuanto a su diseño y operación, por lo cual es difícil comparar costos (Younos y Tulou 2005 2), pero actualmente se dispone de softwares que realizan un análisis de costos en la etapa de diseño, como el WTcost® del Bureau of Reclamation de EE.UU.

La experiencia en la región arábiga, incluidos los Emiratos Árabes, respecto a desalinización de agua de mar es extensa, sin embargo debe considerarse que estos países poseen en gran cantidad el insumo esencial para estos procesos, como lo son los combustibles (gas natural y petróleo) para generar energía (Lattemann y Höpner 2008, Elhassadi 2008).

Para sistemas de Osmosis Inversa (RO) a pequeña escala (ca.  $250 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$ ), Majali et al (2008) reportan eficiencias de un 90% para el tratamiento de aguas salinas ( $\text{TDS}=3.500 \text{ mg L}^{-1}$ ), además de entregar algunas técnicas de diseño y costeo. Reddy y Ghaffour (2007) señala que los costos de inversión de sistemas RO para aguas salinas es de  $1.500 \text{ US}\$/(\text{m}^3 \text{ d}^{-1})$  con costos de producción menores a  $0,5 \text{ US}\$ \text{ m}^{-3}$ . En los Anexos 13 al 19, se presenta un resumen de características para la aplicación de procesos de membrana impulsados por presión, costos de desalinización para varias tecnologías de desalinización, capacidad de la unidad y costo de la desalinización del agua producida, varias plantas de PV/RO instaladas, tipo de sistema de suministro de energía y costo del agua producida, métodos termales y costo de agua producida, métodos de membrana (RO) y costo del agua desalinizada.

### **3.3.3 Aspectos ambientales**

Las plantas de desalinización generan 2 productos: agua limpia y concentrado. El concentrado corresponde al desecho del proceso y contiene una alta concentración de sales, por lo que su disposición final es un punto importante a considerar (Younos 2005 2). En EE.UU. un 48% de las plantas de desalinización descarga los concentrados en cuerpos de agua superficial, pero también pueden ser dispuestos en terreno mediante inyección, entregados a plantas de tratamiento o en riego de cultivos tolerantes. Debe sin embargo considerarse que no existe una guía de calidad de efluentes de plantas de desalinización, aunque la WHO está trabajando en estos temas (Lattemann y Höpner 2008).

Las aguas producidas son de alta calidad, por lo cual no se presentan en la literatura efectos sobre el suelo o cultivos regados.

### **3.3.4 Aspectos legales**

En la actualidad, un problema es la ausencia de reglamentos al uso de las aguas exteriores o marinas. El Código de Aguas expresamente no se aplica a ellas.

Respecto de las subterráneas saladas, si el punto de extracción esta en territorio continental quedará regido por el Código de Aguas y deberá pedirse el correspondiente derecho de aprovechamiento a la DGA.

En vista de lo anterior, si se trata de aguas de mar, nada impide tomarlas y desalinizarlas para el uso que se quiera, contando con la correspondiente licencia ambiental por la instalación de una planta desalinizadora.

### **3.3.5 Experiencia nacional e internacional**

En Australia, los sistemas de reuso están orientados a sustituir con aguas recicladas el agua potable en procesos en los cuales se requiere una calidad inferior (Radcliffe 2006). Para el año 2004 en los estados de Melbourne y Adelaida alrededor de un 20% del agua usada correspondía a agua reciclada, además de que existe una política y estructura institucional (estudios e incentivos) orientada a aumentar este porcentaje (Radcliffe 2006).

**Cuadro 26: Experiencias Internacionales en desalinización.**

Pais	Origen	Caudal	Proceso	Eficiencia	Comentario	Referencia
Emiratos Árabes Unidos	AR de sistema terciario	10.000 m3/d	Membrana como pre-tratamiento y MSF	TDS(95%)	Análisis de factibilidad	Madwar & Tarazi 2002
Kuwait	Agua de mar	56.000 m3/d	MSF	si	Se producen en total 1,92x10 <sup>6</sup> m3/d	Al-Bahou et al 2007
España	Aguas salinas	20-70 m3/d	RO	si	Energía solar para la generación	García-Rodríguez & Delgado-Torres 2007
España, Plataforma Solar de Almería	Aguas salinas	3 m3/h	MSF, MED	si	Costos de Ca. 4 US\$/m3	Blanco et 2008
-	AR secundarias	-	RO	sobre 90 % para Cd,Cr,Cu,Ni,Zn	-	Kumiawan et al 2006

En Chile, existen experiencias en la utilización de agua desalinizada, por ejemplo, Minera Escondida comenzó a operar su primera planta en 2006 (Puerto Coloso) y hoy generan 525 L s<sup>-1</sup> de agua desalinizada. Existe en carpeta el proyecto El Morro, de la minera Xstrata Copper, en la Región de Atacama, que contempla la instalación de una desalinizadora que genere 650 L s<sup>-1</sup>. Minera Esperanza también tiene considerado utilizar agua de mar desalinizada con un caudal proyectado de 600 L s<sup>-1</sup>. La Minera Michilla utiliza 8 mil m<sup>3</sup> día<sup>-1</sup> en sus procesos productivos de los cuales 2 mil m<sup>3</sup> día<sup>-1</sup> son desalinizados.

El 2001 en Arica, Desalant S.A. se adjudicó la construcción y operación de la primera planta de desalinización a gran escala en Chile, que hoy produce 26 mil m<sup>3</sup> d<sup>-1</sup> de agua potable y que pretende llegar al doble a 2010. Nunca se ha dejado de producir menos de la cantidad acordada, abasteciendo al 30% de la población.

La Presidenta Michelle Bachelet anunció la pronta construcción de una nueva desalinizadora de agua de mar, como parte del Plan Hídrico para Arica-Parinacota. El objetivo de esta nueva planta desalinizadora es "Mitigar la sobreexplotación de Azapa y al 2014 cubrir la demanda de agua del 100% de la población".

El Consultor considera que en un escenario optimista, la construcción de plantas desalinizadoras para las ciudades costeras del norte, favorecería la liberación de derechos de aprovechamiento que pudiesen ser un gran aporte para el desarrollo de la agricultura en los valles interiores. En el caso pesimista, existe una gran posibilidad que las empresas de agua potable al encontrarse con el escenario que existieran plantas que se abastecieran de agua de mar, estas podrían optar por vender sus derechos de aprovechamiento

a las empresas mineras, con lo cual, la agricultura del norte de Chile no presentara mejoras en su disponibilidad de agua.

Tomando en cuenta todos los antecedentes antes mencionados, el Consultor considera que la desalinización de agua de mar y continental, es una opción poco factible para la agricultura, dado sus altos costos de inversión y operación. Esta alternativa se considera atractiva para el abastecimiento de agua potable para población y para las mineras, lo cual permitiría liberar derechos de agua para la agricultura en un escenario optimista.

### **3.4 Cosecha de Lluvia**

#### **3.4.1 Descripción de la fuente y procesos o mecanismos de aprovechamiento**

La cosecha de agua (Water harvesting, WH) puede describirse como la recolección de recursos hídricos disponibles, almacenando temporalmente los excesos de agua para uso cuando sea requerido, donde las principales fuentes son: lluvia, aguas lluvias urbanas, escorrentía superficial, niebla, aguas subterráneas e incluso aguas residuales (NPW 2007). Siguiendo lo señalado por Yuen y colaboradores (2001), a la definición anterior es necesario agregar que la recolección debe considerar algún medio artificial y no dependiendo solamente de procesos naturales.

A su vez, las técnicas de cosecha de agua son una opción en pequeñas comunidades, con la consiguiente reducción en los costos de uso de aguas subterráneas y/o es establecimiento de redes de distribución. Además, las técnicas de WH pueden tener efectos positivos en la conservación de suelos, prevención de la erosión, sobre explotación de aguas subterráneas y en la preservación de ecosistemas; sin embargo estas técnicas son generalmente consideradas como poco sofisticadas o tradicionales, además de requerir un alto grado de flexibilidad y adaptación hacia y por parte de las comunidades intervenidas (NPW 2007). Incluso, Pandey y colaboradores (2003) sostienen la hipótesis que los asentamientos humanos durante la historia de la humanidad adaptaban sus estrategias de cosecha y recolección de agua frente a escenarios de alta variabilidad o cambio climático. Por ejemplo, en Israel en las

laderas se encuentran antiquísimos montículos de piedra en patrones definidos que aumentan la infiltración en la ladera (Lavee et al 1997). Más aún, en zonas altamente influenciadas por la variabilidad climática a escala global, como es la influencia del Fenómeno del Niño en Chile, la implementación de técnicas de WH permite disminuir los riesgos agrícolas en temporadas de baja pluviometría (Tsubo y Walker 2007).

Las técnicas de WH pueden agruparse en recolección de aguas lluvias y niebla, recolección de aguas superficiales y recolección de aguas subterráneas (NPW 2007).

**Recolección de aguas lluvias (*Rainwater harvesting*) y atrapanieblas**, que corresponden a la recolección de precipitación mediante una superficie limpia e impermeable (lluvia o nieve) y niebla mediante sistemas que atrapen las gotas de agua. En ambos casos es necesario establecer almacenamiento y un sistema de distribución. Esta agua son generalmente de buena calidad pero pueden verse afectadas por contaminación del aire o compuestos presentes en los techos en el caso de recolección de agua lluvia desde techos. Si se toman medidas preventivas, estas aguas pueden ser utilizadas incluso como agua de bebida. Este tipo de sistemas es especialmente importante en zonas áridas donde es necesario almacenar la mayor cantidad de agua en la temporada de lluvias (NPW 2007). Estas técnicas son buenas alternativas para uso doméstico y tiene una importante componente social en la operación y mantención.

**Recolección de aguas superficiales**, que corresponden a las técnicas que interceptan y almacenan la escorrentía superficial o los excesos de caudal luego de lluvias en: ríos, esteros o humedales. La calidad de esta agua es idónea para riego, no obstante, eventualmente requiere monitoreo de la calidad microbiológica, debido al arrastre de partículas. El área de influencia es determinada por el volumen de agua recolectado (NPW 2007). Sin embargo en este tipo de técnicas se tiene aspectos normativos a salvaguardar.

**Recolección de aguas subterráneas (NPW 2007)**, corresponden a técnicas que permite incrementar (artificialmente) el agua que se infiltra (recarga) y/o mantienen la disponibilidad de agua por periodos mayores. Entre estas técnicas se puede mencionar la construcción de pequeños muros, zanjas en contorno o zanjas de infiltración, embalses subterráneos o mediante el aumento de superficie vegetada. Sus usos principales son el riego y el doméstico.

**Recolección de aguas lluvias urbanas (*Stormwater harvesting*)**, que corresponde a una aplicación más amplia del concepto de cosecha de agua, considerando técnicas para disminuir la escorrentía superficial, especialmente en áreas urbanas (Yuen et al 2001). También, estas técnicas pueden ser adaptadas a otras condiciones. La recolección de aguas lluvias urbanas, tienen como consecuencia un aumento en la infiltración y recarga de las aguas subterráneas con usos a corto plazo, en el caso de disponer de almacenaje, o mediano plazo para reuso en riego o abastecimiento de agua potable.

### **3.4.2 Aspectos técnicos y económicos**

La elección de un esquema de aprovechamiento mediante WH debe considerar (NPW 2007): (1) la disponibilidad de agua; (2) opciones de recolección, almacenaje, tratamiento y uso; (3) aspectos sociales y administrativos en la operación, y sustentabilidad de los sistemas (Pilar Cereceda, Comunicación Personal, NWP 2007).

Las condiciones físicas (porosidad, textura), topográficas (pendiente, red de drenaje) e hidrogeológicas (régimen de lluvias y caudales, capacidad de los acuíferos, salinidad, presencia de estratos impermeables) deben ser cuidadosamente estudiadas antes del establecimiento de esquemas de WH. Una buena fuente de principios de diseño hidrológicos con fines de recolección de escorrentía puede encontrarse en Pizarro et al (2004a; 2004b). En cualquier caso, la evaluación de zonas potenciales para la WH debe incorporar un balance de agua, cuyo nivel de detalle dependerá de la escala espacio-temporal de aplicación, considerando los ingresos de agua (precipitación), la

capacidad de almacenaje del suelo y los requerimientos evapotranspirativos de los cultivos (Ngigi et al 2005).

Para planes de aprovechamiento mediante WH a escala de cuenca, se hace necesaria la aplicación de métodos de identificación y evaluación de zonas con potencial. Esta tarea puede desarrollarse en plataformas de Sistemas de Información Geográfica considerando información de suelos, uso de suelo, lluvia, pendiente, con acople a modelos hidrológicos, principalmente en la estimación de escorrentía mediante el Método de la Curva Número por ejemplo, además de, modelos económicos, ecológicos y sociales (Kahinda et al 2008, Mbilinyi et al 2007, Sekar y Randhir 2007). La información puede obtenerse de estaciones meteorológicas, bases de datos actualizadas y datos satelitales (Forzieri et al 2008).

Una excelente compilación de costos, métodos de diseño e información necesaria respecto a técnicas de intercepción de escorrentía con fines agrícolas en zonas áridas y semi-áridas puede encontrarse en Critchley y Siegert (1991).

En cuanto a las zanjas de infiltración en laderas, debe tenerse en cuenta que las opciones más eficientes en la mantención de humedad en el suelo corresponden a zanjas rellenas de arena o surcos con pretilos cubiertos de material impermeable (Li et al 2006).

En el análisis econométrico de sistemas de aprovechamiento mediante WH, He y colaboradores (2007) identifican como puntos críticos en la adopción de estas técnicas: (1) nivel educacional de los potenciales beneficiarios; (2) disponibilidad de mano de obra; (3) disponibilidad de asistencia técnica y transferencia tecnológica; (4) actitudes hacia las nuevas técnicas; (5) acceso a créditos. Estos puntos deben ser considerados en el análisis costo beneficio para la evaluación de alternativas.

Fooladmand y Sepaskhah (2004), realizaron un análisis económico en uvas de mesa en Irán (variabilidad de las lluvias de 50 a 1.000 mm anuales), considerando microcatchment de 9 m<sup>2</sup> como técnica de WH, concluyendo que el uso de esta técnica aumentó en un 40% la producción, pero mostrando a su vez que las ganancias marginales son mayores en periodos de sequías ya que se reduce el riesgo, o bien por uso de zonas de suelos marginales (Yuan et al

2003, véase también Xialong et al 2008a,b y Fleskens et al 2005, Xiao et al 2007, Fox et al 2005). La elección debe realizarse sobre la evaluación de diferentes prácticas y los costos netos del proyecto (Hatibu et al 2006). Goel y Kumar (2005) estimaron en US\$15.000.000 los costos para la implementación de sistemas WH de aguas superficiales mediante estructuras mayores, en un área de 527 km<sup>2</sup> en India (150 mm anuales); a su vez, estiman que la inversión puede ser recuperada luego de 13 años, pero debe considerarse que estos terrenos tienen una baja productividad en la actualidad. En el Anexo 20, se presentan mecanismos de cosecha de lluvia.

### **3.4.3 Aspectos ambientales**

Según Vohland y Barry (2009) y Ngigi (2003), aún cuando se reconoce su utilidad y factibilidad, aún no se ha estudiado la sustentabilidad a largo plazo de estas prácticas, dado que podrían modificar algunas funciones del paisaje, como la hidrología (infiltración y recarga), edáficas (fertilidad del suelo) y ecológicas (productividad y salud de los ecosistemas ribereños, biodiversidad). Uno de los impactos inmediatos que puede tener la implementación de técnicas de WH es la disminución en la disponibilidad de agua, aguas abajo, pero en general se asume que la ganancia neta a nivel de cuenca justifica la implementación de estos esquemas (Ngigi 2003). Lo anterior deja de manifiesto la necesidad de planes y políticas que permitan un manejo adecuado a nivel de cuenca y no sólo la implantación aislada de técnicas a nivel de predio.

### **3.4.4 Aspectos legales**

Las aguas lluvias se definen como las que “precipitan naturalmente del cielo” o las que “proviene inmediatamente de las lluvias”. Son conocidas también como aguas pluviales. Se consideran pluviales mientras conserven dicho carácter y no se confundan con otras al caer en ríos o lagos.

Nadie adquiere el dominio de ellas mientras no caen o se depositan, cuestión que es evidente dada su naturaleza. Una vez que caen debe determinarse a quién pertenecen y en su caso quien puede hacer uso de ellas.

El régimen de las aguas lluvias en todas las formas en que esta se capte está contemplado expresamente en el Código de Aguas.

El principio es el de LIBRE CAPTACIÓN mientras no caigan o se precipiten en cauce público. El único límite es ser dueño del terreno o contar con la autorización del dueño (si es ciudad la Municipalidad, o si es bien público el Ministerio de Bienes Nacionales) del terreno donde se instalarán las obras de captación de ellas.

No se requiere obtener permiso alguno si se realizan en suelo propio y no se requiere tener derecho de aprovechamiento pues el uso de las aguas lluvias es un derecho absoluto e intrínseco del dueño del terreno donde se precipitan.

Deberá tenerse presente que si los mecanismos de generación y captación del agua lluvias son susceptibles de producir impacto en el ambiente, para su aplicación deberá contarse con los permisos ambientales respectivos legalmente tramitados.

#### **3.4.5 Experiencia nacional e internacional**

En el sur de España, desde los tiempos de Roma, se almacena lluvia en cisternas subterráneas llamadas aljibes, lo que corresponde a una técnica de WH de esorrentía superficial. Estos sistemas pueden almacenar de 50 a 150 m<sup>3</sup> para zonas de captura de 1 ha, hasta 100 a 300 m<sup>3</sup> para zonas de captura de 10 ha en zonas de piedmont con pluviometrías anuales de 250 mm (van Wesemael et al 1998, Frot et al 2008).

El Consultor, basado en la literatura consultada sobre WH y Estudios sobre la hidrogeología de Chile, considera que esta FNC posee un gran potencial de aplicabilidad para garantizar el abastecimiento de agua para la agricultura en Chile. El Consultor considera que no existe limitación legal y técnica en realizar WH en terrenos propios de los agricultores, con la limitación de los costos asociados a las construcciones necesarias para la captación, las cuales son caso específico y de los efectos negativos que pudiesen generar esta obras al medioambiente.

### **3.5 Estimulación en la producción de lluvias**

#### **3.5.1 Descripción de la fuente y procesos o mecanismos de aprovechamiento**

Este método consiste básicamente en la estimulación de la formación de gotas de agua de mayor tamaño mediante la incorporación en las nubes de partículas que produzcan núcleos de coalescencia. Estas partículas atraen las gotas de agua que conforman las nubes uniéndolas y formando gotas de mayor tamaño que tienen un peso suficiente que las haga precipitar. El material usado para formar estos núcleos es el Yoduro de Plata, (Ag.), el hielo seco (CO<sub>2</sub>), agua y sal (cloruro de sodio). Los métodos para hacer llegar este material a las nubes han sido mediante bombardeo usando cañones, cohetes y aviones.

#### **3.5.2 Aspectos técnicos y económicos**

La estimulación de precipitaciones interviene en el ciclo del agua, aumentando artificialmente la cantidad de “núcleos de condensación” al interior de la nubosidad. Con ello se logra aumentar la cantidad de gotas de lluvia y, por consiguiente, incrementar la cantidad de precipitación que llega a tierra.

El núcleo de condensación o “nucleante” más utilizado es el Yoduro de Plata, (Ag.) el que, además de servir para multiplicar el proceso de coalescencia, cumple con otra importante función como es la de congelar las partículas de agua “sobreenfriadas”, es decir, partículas que se mantienen en estado líquido a pesar de estar a temperaturas bajo los 0 °C. Este cambio de estado (líquido a sólido), libera el calor latente de condensación a la atmósfera, produciendo un calentamiento en la nube y aumentando su inestabilidad, haciendo que las corrientes ascendentes de aire dentro de ellas la haga crecer, principalmente en la vertical. Ello conduce a una intensificación general de la actividad tormentosa en la nubosidad, y a un aumento de la precipitación que cae de ella.

Una característica fundamental de los eventos de mal tiempo es que están asociados a una extensa área de Baja Presión. Las bajas presiones se caracterizan por tener intensas corrientes ascendentes de aire. Esta característica es aprovechada por la técnica de siembra de nubes mediante generadores terrestres, ya que son estas corrientes ascendentes las que se

encargan de transportar el nucleante (Ag.) desde la superficie terrestre al interior de la nubosidad en pocos minutos, alcanzando los niveles propicios de temperatura para desarrollar el máximo de potencialidad del sistema.

Cada gramo de Yoduro de Plata, aporta  $10^{13}$  núcleos de condensación. Con la introducción en la nubosidad de esta enorme cantidad de núcleos extras, se obtiene un incremento promedio de precipitación del orden de 10 a 15%, dependiendo de muchos factores, como lo son la oportunidad de la siembra, el grado de actividad de los sistemas nubosos, la intensidad de las corrientes ascendentes, la cantidad de agua sobreenfriada presente en la nubosidad, etc.

Existen diversos métodos para introducir el nucleante en la nubosidad, siendo los más conocidos y usados el sistema de "Generadores Terrestres" y la "Siembra Aérea".

**El sistema aéreo:** asegura en un 100% la introducción del nucleante en la nubosidad. Sus principales desventajas son el alto costo, el riesgo de la operación y la restringida superficie que puede abarcar. Lo encarece el utilizar material aéreo por una parte, y la necesidad de apoyo de un radar meteorológico, por otra, para determinar las áreas dentro de la nubosidad con adecuada cantidad de agua sobre enfriada.

**Generadores terrestres:** no asegura que la totalidad del nucleante ingrese a la nubosidad, pudiendo perderse algo en el trayecto. Si bien requiere de un costo inicial de implementación de la red, cuando ésta se instala en forma definitiva y una vez amortizado, el costo de operación es varios órdenes más bajo que el sistema aéreo. Es útil tanto para superficies extensas como reducidas y no requiere equipamiento tan sofisticado como un radar, pues no es necesario determinar qué sectores dentro de la banda nubosa son los más apropiados, ya que se siembra y estimula la totalidad de la banda o sistema frontal asociado al área de baja presión.

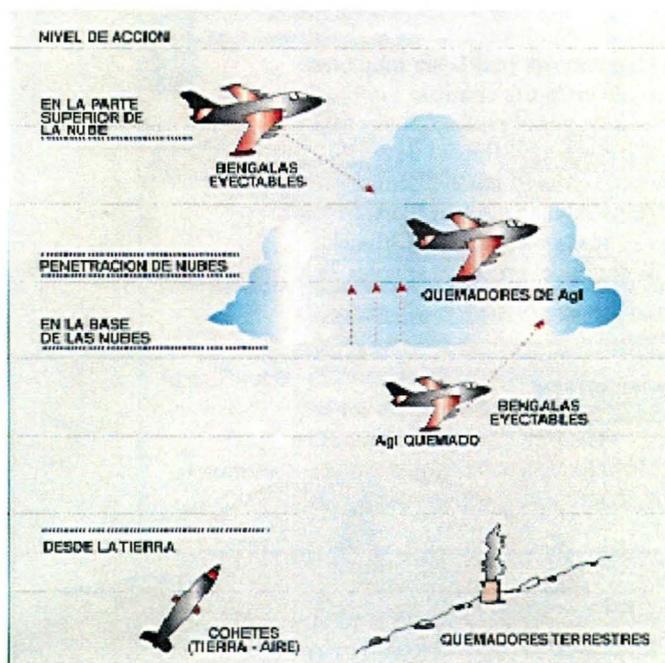


Figura 62. Esquema de métodos para estimulación de lluvia.

La restricción general de la estimulación de lluvia, está en que es necesaria la presencia de nubes. En el caso de las zonas Centro Norte y Central de Chile, las grandes masas de nubes, asociadas a los sistemas frontales alcanzan el territorio durante los meses de invierno. La estimulación de lluvias durante ese período sólo sería útil para fines de riego si existieran obras de acumulación de aguas invernales. Además si estas obras existieran se podrían aprovechar los excedentes de agua invernal, por lo que tampoco sería necesario estimular las lluvias.

Sólo en el caso de la zona norte de Chile, influenciada por el Invierno Boliviano, resulta interesante realizar estimulación de lluvias, pues es en este caso cuando la nubosidad coincide con el período de riego.

### 3.5.3 Aspectos ambientales

Los efectos ambientales por la estimulación de lluvia, están centrados en la disponibilidad de agua en toda la superficie de la cuenca o sector de interés. Esto incide directamente en un aumento en la biodiversidad, según la persistencia del programa de estimulación.

### **3.5.4 Aspectos Legales**

La estimulación de lluvia, se realiza con el fin de generar un aumento en las precipitaciones, lo cual, incrementaría los caudales de los cuerpos de agua superficiales, como también se producirán aportes a los cuerpos subterráneos. Es por ello que desde el punto de vista legal, la solicitud de derechos de aprovechamiento sobre estos incrementos en los caudales, está sujeto al tipo de programa de estimulación de lluvia. Es decir, si la estimulación se realiza continuamente o solo en eventos puntuales, lo cual cambia el escenario de disponibilidad de caudal en los cursos superficiales y subterráneos (recarga). Aspectos legales sobre el aprovechamiento de las aguas que se generan por estas prácticas, son similares a las consideradas en el punto 3.4.4 sobre Cosecha de Lluvia.

### **3.5.5 Experiencia Nacional e Internacional**

En la cuenca del río Copiapó se ha desarrollado un interesante programa de estimulación de lluvias. Este proyecto dirigido por INIA y Financiado por el Gobierno Regional de la Tercera Región, se basa en el bombardeo de las nubes asociadas al Invierno Boliviano, con Ioduro de Plata. Hasta la fecha, los estudios del INIA, no presentan resultados claros al comparar los caudales históricos del río Copiapó (cuya cuenca ha recibido estimulación desde los años 90) con los del cercano río El Tránsito (en donde no se ha efectuado similar tratamiento)<sup>3</sup>.

Lo que se espera lograr es aumentar los niveles de disponibilidad de agua en la cuenca, para dar seguridad de riego en el sector medio y bajo del valle de Copiapó; la regeneración de la pradera natural en sectores cordilleranos, en beneficio directo de las familias de criaderos de ganado menor, y el aumento de los depósitos de nieve en el sector cordillerano.

La empresa TRC North American Weather Consultants de EU de NA, ha desarrollado más de 55 programas de estimulación desde 1950 a la fecha, utilizando ambos sistemas por separado y también en forma combinada<sup>4</sup>.

---

<sup>3</sup> Información suministrada por el Sr. Leoncio Martínez Barrera (INIA), en entrevista telefónica.

<sup>4</sup> La información anterior es posible acceder en el sitio [www.nawcinc.com](http://www.nawcinc.com).

Actualmente desarrolla 7 programas, cinco de los cuales son en base a generadores terrestres y los dos restantes mixtos.

Entre los años 2000 al 2003, HIDROMET S.A. aplicó un programa de estimulación de precipitaciones en la cuenca del Cachapoal, VI Región, Chile. Durante esos 4 años se lograron resultados altamente satisfactorios, comprobados con las mediciones de las estaciones meteorológicas de Sewel, Graneros, Rancagua y Machalí, así como a través de un estudio comparativo entre el río Cachapoal y el Tinguiririca, pocos kilómetros al sur. Los resultados obtenidos en este estudio arrojó un cambio importante en el sistema hídrico de la Cuenca del Cachapoal, desde el año 2000 en adelante, alterando fuertemente la tendencia histórica que venía presentando (negativa).

El consultor, considera que la estimulación de lluvia es una práctica poco factible para la zona norte, donde existe una reducida presencia de nubes en los periodos de riego agrícola. Al igual, sus costos son significativos para ser financiados por los agricultores, es por ello que estas prácticas tendrían que ser subsidiadas por el Estado.

### **3.6 Atrapanieblas**

Por atrapanieblas se entiende a un sistema de estructuras que utiliza el proceso de formación de rocío para capturar el agua atmosférica que está presente en formaciones de nubes. El rocío se produce cuando las pequeñas gotitas de agua que forman la neblina son fijadas en superficies planas como hojas o vidrios. La idea de los atrapanieblas es construir estructuras que presenten una gran superficie expuesta a la neblina, logrando de esta forma que las gotitas de agua queden atrapadas y posteriormente sean conducidas a un sistema colector.

#### **3.6.1 Países donde se practica esta técnica**

Proyectos de recolección de niebla han comenzaron a funcionar en Yemen, Guatemala, Haití y Nepal<sup>5</sup>. En los anales de la 4ª Conferencia

---

<sup>5</sup> [http://www.idrc.ca/es/ev-30617-201-1-DO\\_TOPIC.html](http://www.idrc.ca/es/ev-30617-201-1-DO_TOPIC.html)

Internacional de Niebla, Captación de neblina y rocío, realizada en Chile en el 2007, se presentaron diferentes experiencias internacionales, las cuales se presentan a continuación:

- En Guatemala, el año 2005, se construyeron cuatro atrapanieblas en la comunidad de la Ventosa, localizada a 3.300 metros de altitud. La evaluación inicial de estas estructuras determinó que entregan 800 Litros por día, que cubren las necesidades de agua para dos familias. El proyecto seguirá creciendo en etapas para cubrir las necesidades de las 50 familias que viven en la localidad.
- En Marruecos, se desarrolló un proyecto para capturar agua desde la neblina que se produce en las costas de dicho país. El resultado permitió estimar tasa de  $5,5 \text{ L m}^{-2} \text{ día}$  a 1.225 metros de altura y de sólo  $1 \text{ L m}^{-2} \text{ día}$  a 300 metros de altura.
- En Sudáfrica, se desarrolló un estudio que demostró la factibilidad de utilizar atrapanieblas para abastecer de agua comunidades de la Costa Oeste.

En Chile existen casos que se han desarrollado, siendo el más conocido el construido en el Tofo, que abasteció de agua a la localidad de Chungungo, con un rendimiento de  $15 \text{ m}^3 \text{ día}^{-1}$ . Este fue un proyecto muy conocido y publicado, que finalmente fracasó porque la Comunidad no lo aceptó. Ellos prefirieron que se construyera una tubería de 20 kilómetros para abastecerse de agua, pues esto le garantizaba seguridad y además pudo asegurar el crecimiento poblacional, debido irónicamente al éxito de los atrapanieblas.

Una nota especial se debe realizar sobre el proyecto "Torre de Niebla Costera". Este proyecto obtuvo el premio Next Generation, para la construcción sostenible, otorgado por la compañía Holcim a su diseño de una torre recolectora de agua de niebla para la región de Huasco, al oeste del desierto de Atacama (Figura 63).

Básicamente el proyecto consiste en la futura construcción de una torre de 200 metros de altura que logra capturar en forma pasiva el agua que es transportada en la Camanchaca. La estrategia consiste en la construcción de

torres cubiertas de plástico de alta densidad que capturaría las gotas de agua y las trasladaría a la base de madera donde se eliminaría la sal con un proceso de ósmosis inversa. Así se capturarían hasta 50.000 litros de agua al día.



Figura 63: Esquema conceptual de la Torre de Niebla.

### **3.6.2 Condiciones atmosféricas que producen el fenómeno**

Para que sea factible el uso de atrapanieblas es necesario que exista dicha niebla. Para ello es necesaria una fuente importante de agua que, en nuestro país, solo es el Océano. Por ello los atrapanieblas son factibles en zonas costeras donde ocurra con frecuencia el fenómeno conocido como Camanchaca. Este fenómeno es un tipo de niebla costera muy densa que tenga características dinámicas: condensación en la altura que es desplazada hacia zonas costeras por el viento. Su origen está en el anticiclón del Pacífico cubriendo en forma persistente la franja costera al norte chileno. Las bases de esta clase de nube son a partir de 400 metros (con una variación de 200 metros) sobre el nivel del mar, existiendo además humedad bajo esta cota.

Estas segundas capas de niebla bajo los 400 metros tienen minerales, pero en menos concentración que el agua directamente extraída del mar. Es por ello que se recomienda que las estructuras de captación deban estar instaladas sobre los 400 metros sobre el nivel del mar.

### 3.6.3 Inversiones y rendimientos de producción de agua

El Centro del Desierto de Atacama de la Pontificia Universidad Católica de Chile, ha mantenido una permanente línea de investigación sobre el uso de atrapanieblas como fuente de abastecimiento de agua para pequeñas localidades Chilenas. En el Cuadro 27, se presenta un resumen de los resultados de potencial de caudal posible de obtener en áreas afectadas por fenómeno de niebla que ellos han estimado. Estos resultados tienen un rango que va desde los 1.000 hasta 30.000 L día<sup>-1</sup>, en términos de riego esto implicaría la posibilidad de regar superficies de 200 a 7.000 m<sup>2</sup>. Por ello se considera que el uso de atrapanieblas puede ser una alternativa interesante para el desarrollo de riego en invernaderos o pequeñas chacras.

Cuadro 27. Resumen de los resultados de potencial de caudal posible de obtener en áreas afectadas por fenómeno de niebla (L m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>).

Lugar	CU	1 Colector	20 Colector	50 Colector	100 Colector
Alto Patache	7,81	312,4	6.248	15.620	31.240
Cerro Guatalaya	0,93	37,2	744	1.860	3.720
Cerro Moreno	8,26	330,4	6.608	16.520	33.040
Paposo	3,36	134,4	2.688	6.720	13.440
Falda Verde	1,43	57,2	1.144	2.860	5.720
El Tofo	2,98	119,2	2.384	5.960	11.920

Nota: Cada colector tiene 40 m<sup>2</sup>.

CU corresponde al volumen colectado por área unitaria diaria.

## **3.7 Recarga artificial de acuíferos**

### **3.7.1 Introducción**

En las últimas décadas, la recarga artificial de acuíferos (RAA) ha sido una estrategia de gestión del recurso hídrico de gran efectividad, resultando una actividad prioritaria en países como Holanda, España, Estados Unidos y Australia (Escalante, 2005). Al precisar el significado de "recarga artificial", diversos autores plantean un consenso definiéndolas como prácticas de abastecimiento de agua, que garanticen la cantidad, calidad y durabilidad en el tiempo del recurso hídrico, tanto para consumo humano y agrícola como para consumo industrial. Sahuquillo (1983), planteó que la recarga artificial de acuíferos constituye una tipología del uso conjunto, en la práctica totalidad, de sus aplicaciones puesto que maneja recursos superficiales que almacena en un medio subterráneo a la espera de ser puestos a disposición del usuario en el momento en que este lo requiera. Según Custodio (1997), la recarga artificial es una herramienta de la gestión hídrica planificada en la que aguas superficiales ocasionales, sobrantes o especialmente destinadas se almacenan en los acuíferos para incrementar los recursos hídricos y para mantener o constituir una reserva disponible para situaciones de escasez estacional o para sequías.

En Chile, no existen antecedentes adecuados sobre RAA, por lo que, según Escalante (2005), la divulgación de la recarga de acuíferos puede ayudar a conocer mejor esta técnica, y, por tanto, a que pueda ser aplicada en un mayor número de experiencias. La recarga artificial de acuíferos no es universal, sino que es más bien, una estrategia aplicada en sectores específicos en los cuales es necesario y posible recargar, para optimizar el uso del recurso hídrico disponible. A pesar de que se considera que la RAA es una alternativa válida para garantizar el abastecimiento de agua, especialmente para épocas secas, existe cierta incertidumbre sobre su efectividad a largo plazo.

### **3.7.2 Objetivos de la recarga artificial de acuíferos**

Dentro de los objetivos involucrados en el desarrollo de estrategias para recargar un acuífero artificialmente, pueden citarse los siguientes:

- Almacenamiento subterráneo de escorrentías superficiales no reguladas.
- Reducción o eliminación del descenso piezométrico.
- Mantenimiento hídrico de enclaves ecológicos o medioambientales.
- Reducción de costos de transporte, almacenamiento o bombeo.
- Actuaciones sobre problemas de insuficiencia.
- Disminución o corrección de problemas de intrusión marina.
- Aprovechamiento de las propiedades del suelo y de, la zona no saturada como elemento de tratamiento tanto para aguas potable como residuales.
- Dilución del excesivo contenido en nitratos, cloruros u otros constituyentes químicos.

Por lo tanto, el desarrollo de un sistema de RAA dependerá, principalmente, del objetivo que se desee cumplir al desarrollar ésta estrategia.

### **3.7.3 Consideraciones sobre la recarga artificial de acuíferos**

Un proyecto de recarga artificial debe considerarse como una alternativa para atender la demanda de agua. A este respecto deben contemplarse, antes de considerar cualquier hipótesis de recarga artificial, los siguientes aspectos:

- Estudio de los excedentes disponibles para la recarga, en el que se determina el origen del agua de recarga, su régimen temporal, en cuanto a caudales y volúmenes, y su calidad físico-química y bacteriológica.
- Estudio hidrogeológico de detalle del acuífero a recargar, cuyo objetivo es evaluar la aptitud y respuesta del acuífero frente a la recarga.
- Análisis de alternativas de la operación de recarga, selección de las zonas más favorables y evaluación del efecto de la operación de recarga.

En cuanto a la formulación de un proyecto que involucre el desarrollo de una estrategia para recargar artificialmente un acuífero, según Murillo (2000), debería considerarse lo siguiente:

- Análisis de las diferentes instalaciones de infiltración.
- Necesidad y tipo de instalaciones auxiliares.
- Métodos y equipos de control y seguimiento.
- Instalación de transporte del agua de recarga.

### **3.7.4 Estrategias de recarga artificial de acuíferos**

Los medios para poner en práctica esta técnica son diversos, sin embargo, pueden agruparse en tres grandes métodos, siendo el primero, aquella recarga que se efectúe por infiltración a través de la superficie del terreno, y el segundo, la recarga realizada por introducción directa del agua hasta el acuífero mediante una perforación que lo cruce. Finalmente, el tercer grupo es conocido como recarga inducida, la cual consiste en provocar la infiltración natural, que tiene lugar desde ríos, lagos o embalses, mediante pozos de bombeo situados cerca de dichas concentraciones del recurso hídrico.

A continuación, se exponen las principales estrategias que pueden implementarse para recargar artificialmente un acuífero.

#### **a) Estrategias superficiales en cauces**

**Serpenteos y represas:** Se fundamentan en aumentar el tiempo y la superficie de contacto entre el agua y el terreno, ya sea por la construcción de diques, o bien por muros de tierra en forma de “L”.

**Escarificación:** Consiste en escarificar el lecho de un río eliminando finos y mejorando la infiltración.

**Vasos permeables:** Son embalses de superficie confinada y permeables, que permiten el traspaso de agua desde éste hacia el acuífero.

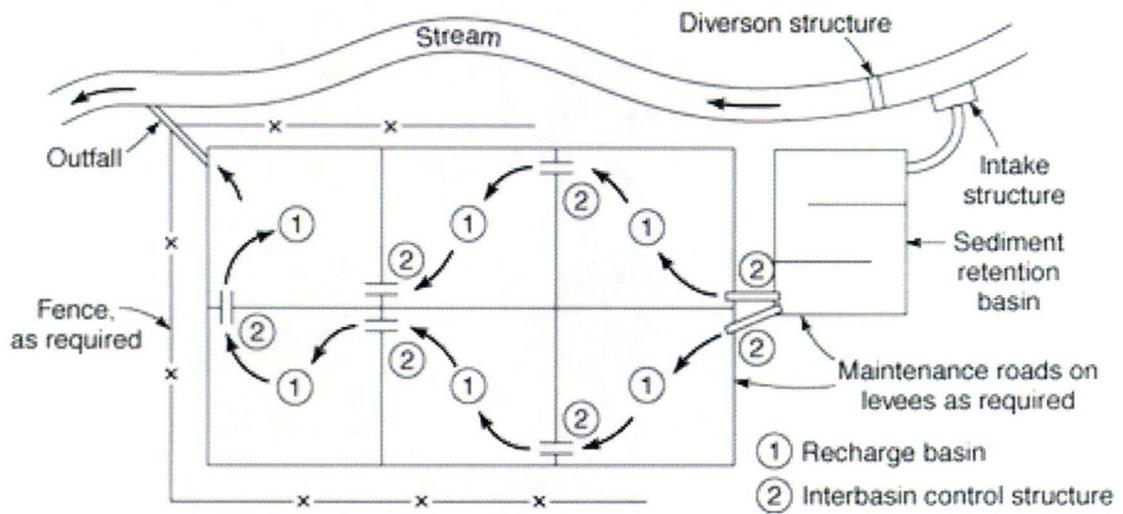


Figura 64. Esquema de un sistema RAA usando serpenteo y represas.

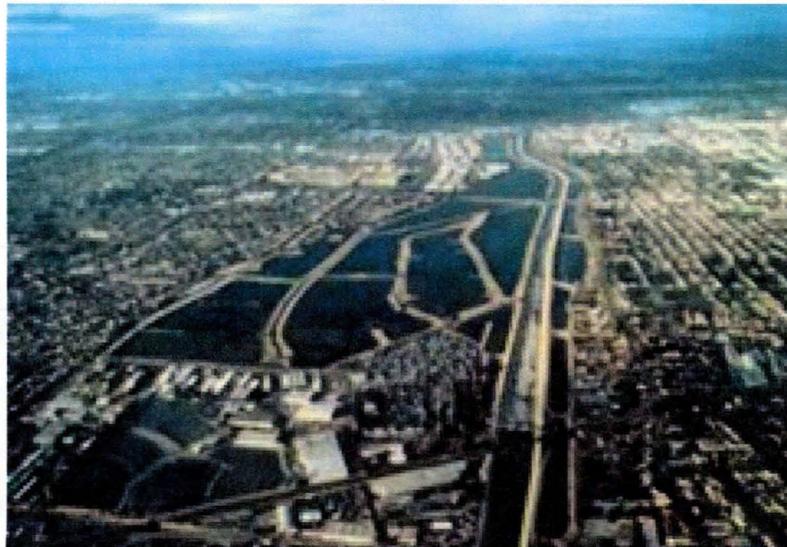


Figura 65. Vista aérea de un sistema RAA usando serpenteo y represas.

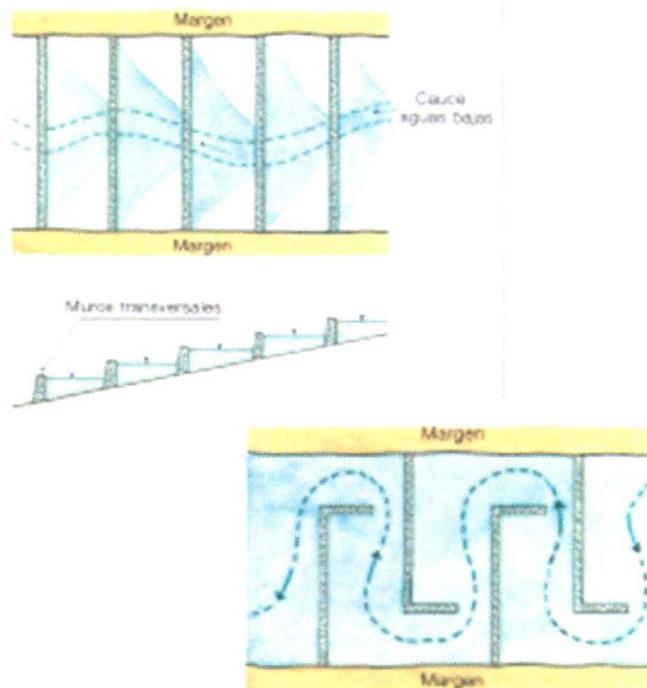


Figura 66. Esquema de posibles modificaciones del cauce de un río para inducir la RAA.

### b) Estrategias superficiales fuera cauces

**Balsas:** Son dispositivos alargados, poco profundos y de gran superficie, en los cuales, la infiltración se produce principalmente por el fondo de las balsas.

**Fosas:** Semejantes a las balsas, con mayor permeabilidad en las paredes laterales, determinando que la infiltración se lleve a cabo principalmente a través de éstas.

**Canales:** Son dispositivos poco profundos que siguen la topografía del terreno, en los cuales, la infiltración se produce tanto por su fondo como por sus paredes laterales.



Figura 67. Canales realizados en un suelo arenoso para inducir RAA.

### c) Estrategias en profundidad

**Sondeos de inyección:** Se inyecta agua hacia el acuífero mediante la construcción de sondeos profundos, siendo éstos muy similares a un pozo de inspección.

**Simas y colinas:** Consisten en aprovechar las simas y colinas de la topografía en terrenos calcáreos, con el objetivo de introducir agua hacia el acuífero.

**Drenes y galerías:** Se llevan a cabo realizando, en el fondo de un pozo, drenes y galerías que posibiliten la infiltración de agua desde éste hacia el acuífero.

**Zanjas y sondeos:** Consiste en una gran zanja de infiltración, de escasa profundidad, rellena de grava calibrada, dentro de la cual se ubican sondeos de recarga (Figura 68).

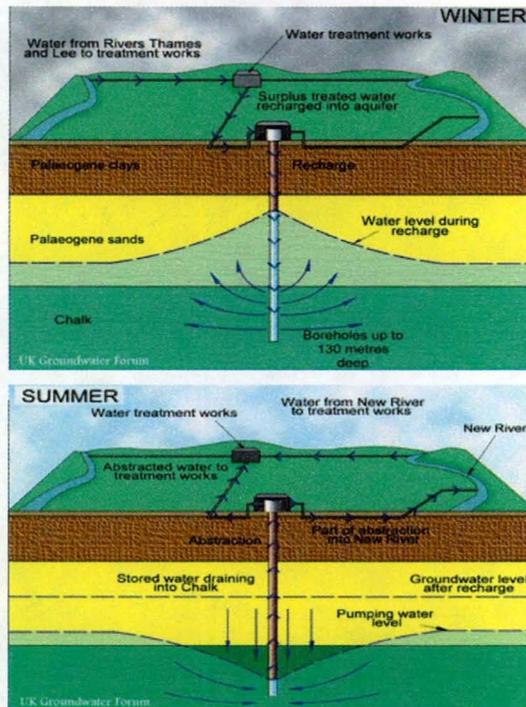


Figura 68 Esquema de la RAA usando pozos de inyección.

Recientemente, nuevas estrategias se han desarrollado para la recarga artificial de acuíferos, destacándose el uso de los pozos secos, las trincheras y los acuíferos artificiales que se emplean para recarga de acuíferos libres. Los pozos secos o pozos en zona no saturada o pozos colgados son perforaciones o excavaciones de 10 a 50 metros de profundidad y de 1 ó 2 metros de diámetro, mientras que las trincheras de recarga, son excavaciones alargadas de 1 m de ancho y cerca de 10 m de profundidad.

### 3.7.5 Ventajas y desventajas en la recarga artificial de acuíferos

El Cuadro 28, resume las principales ventajas y desventajas de las diversas estrategias involucradas en la recarga artificial de acuíferos.

Se destaca que la colmatación es identificada como el mayor problema que enfrenta la recarga artificial de acuíferos, especialmente en sus plantas de recarga (Murillo, 2000), siendo ésta referida a la disminución de la permeabilidad del medio poroso como resultado de procesos físicos, químicos y biológicos (Olsthoorn, 1982) y teniendo un impacto significativo sobre el desempeño de los sistemas de recarga artificial de acuíferos superficiales o en

profundidad. Según Pérez-Paricio (2001), se identifican los siguientes mecanismos de colmatación:

**Colmatación física:** Por unión y separación de partículas en suspensión, transportadas por el agua de recarga o generadas por fuerzas hidrodinámicas o hidroquímicas en el acuífero.

**Bío-Colmatación:** Por acumulación de células microbianas y sus productos extracelulares.

**Generación de Gas:** Por presión de gotas o aumento de la temperatura, entrapamiento de gases emitidos bacterias, entre otros.

**Compactación:** Compresión de capa de suelo colmatada que se forma sobre la capa superior de un sistema superficial de recarga.

Cuadro 28. Ventajas y desventajas de las estrategias de recarga artificial de acuíferos.

Factor	Estrategia de recarga artificial de acuífero	
	Superficiales	En profundidad
Precio y disponibilidad de terreno	Dificultad de establecimiento y son de alto costo	De bajo costo y requieren poco espacio
Factores estéticos y ambientales	Proliferación de insectos y roedores	Escasos
Permeabilidad del acuífero	Media grande	Variable
Construcción de instalaciones	Requiere de nivelaciones, acondicionamiento a la permeabilidad, y de	No requieren de estructuras complejas
Caudal recargable	Puede llegar a ser muy alto	Muy inferior a instalaciones superficiales
Pérdidas por evaporación	Dependen del tamaño de la instalación, llegando a ser importantes	Nulas
Requisitos de calidad de agua	Pequeños, aprovechándose el poder auto depurador de la zona no saturada	Grandes, ya que el agua se introduce directamente en el acuífero
Colmatación	Puede ser importante, ya que el agua introducida debe estar libre de sólidos en suspensión	Muy susceptibles a la colmatación
Depuración del agua en terreno	Alto, debido a que el agua por el medio no saturado elimina contaminantes	Pequeño o nulo

### **3.7.6 Aspectos legales**

En Chile la RAA está regulada a través del Código de Aguas (Decreto con fuerza de Ley N° 1.112), en los artículos 66, 67 y 68, los cuales hacen referencia a lo siguiente:

En Artículo 66 se hace referencia a que cualquier persona podrá ejecutar obras para la recarga artificial de acuíferos, teniendo por ello la preferencia para que se le constituya un derecho de aprovechamiento provisional sobre las aguas subterráneas derivadas de tales obras y mientras ellas se mantengan.

En Artículo 67 se indica que los derechos otorgados bajo el artículo anterior, siempre subsistirán los derechos provisionales mientras persista la recarga artificial y en ningún momento podrán adquirir el carácter de definitivos.

En Artículo 68, la Dirección General de Aguas podrá exigir la instalación de sistemas de medida en las obras y requerir la información que se obtenga.

### **3.7.7 Experiencia nacional**

Como ya se comentó, en Chile no existen obras hidráulicas que aseguren una recarga artificial efectiva, pero si está regula a través del Código de Aguas, descrito en el punto anterior.

### **3.7.8 Conclusiones**

En Chile, la recarga artificial de acuíferos es una estrategia en incipiente desarrollo, pudiendo implementarse de acuerdo a lo estipulado en el Código de Aguas (Decreto con fuerza de Ley N° 1.112), en sus artículos 66, 67 y 68.

Lo anterior significa que, para las zonas declaradas bajo restricción, la recarga artificial de acuíferos sea una estrategia válida de desarrollo urbano, agrícola e industrial, sobre la base de lograr un abastecimiento de agua, que avale la cantidad, calidad y durabilidad en el tiempo del recurso hídrico, en zonas en que éste se encuentra bajo condiciones de baja disponibilidad.

En cuanto a las estrategias que pueden implementarse, para recargar artificialmente un acuífero, se destacaron tres métodos siendo el primero, aquella recarga que se efectúe por infiltración a través de la superficie del terreno, el segundo, la recarga realizada por introducción directa del agua hasta el acuífero mediante una perforación que lo cruce, y el tercero, conocido

como recarga inducida, consiste en provocar la infiltración natural, que tiene lugar desde ríos, lagos o embalses, mediante pozos de bombeo situados cerca de dichas concentraciones del recurso hídrico.

En consecuencia, el modelo adecuado de recarga artificial de aguas subterráneas dependerá, especialmente, del objetivo que se desee cumplir al desarrollar ésta estrategia, siendo lo anterior función del rubro involucrado y beneficiario de la recarga artificial de acuíferos, ya sea para consumo urbano, agrícola, o bien, industrial.

Finalmente, es de consideración, que la divulgación de la recarga de acuíferos puede ayudar a conocer mejor esta técnica, y, por tanto, a que pueda ser aplicada en un mayor número de experiencias. Esta divulgación debe realizarse a nivel de toda la población, siendo la institución responsable de lo anterior, la Dirección General de Aguas, permitiendo así, facilitar los mecanismos de participación pública, mejorar el nivel de información y de promover nuevas investigaciones que permitan desarrollar adecuadas estrategias de recarga artificial de acuíferos a nivel nacional, lo cual significaría un beneficio continuo y sostenible, tanto para el desarrollo urbano y agrícola, como industrial de una zona determinada.

## **4 Conclusiones**

Como se ha expuesto en este capítulo, se debe hacer énfasis en la caracterización de las FNC, los Trenes de Tratamiento que cierran la brecha entre la calidad inicial y objetivo, y los aspectos socio-económicos involucrados en el uso de las FNC. La elección de técnicas o métodos específicos es una etapa posterior a la decisión al cruce entre oferta y demanda. Por lo anterior, las conclusiones, ventajas o potenciales se enfocan en las FNC y no a los tratamientos. Luego de analizar una amplia base de datos que incluye publicaciones en revistas especializadas, libros técnicos e informes o reportes de centros de investigación y agencias gubernamentales, es posible establecer las siguientes conclusiones:

- La localización, diseño y operación de esquemas de reuso o aprovechamiento de fuentes no convencionales (EAFNC) es sitio específica.
- El compromiso entre la calidad de las aguas provenientes de la FNC y la calidad objetivo, en este caso la normativa de calidad de agua de riego, determina el tren de tratamiento requerido.
- La implementación de un tren de tratamiento, y la elección de las técnicas, en la mayoría de los casos, es una cuestión económica y no una cuestión técnica o de disponibilidad tecnológica.
- El éxito en la operación de EAFNC requiere el compromiso e involucramiento de la comunidad en cuanto al uso y mantenimiento de los sistemas.
- Respecto a las fuentes convencionales de recursos hídricos, las FNC requieren de cantidades marginales de mano de obra calificada y capacitada en los sistemas implementados.
- Existe la necesidad de un marco institucional y de políticas por parte del Estado para el incentivo e implementación de EAFNC.
- Existe una necesidad de una definición clara respecto a los roles de los diferentes actores en los EAFNC en cuanto a la propiedad, administración, operación y mantención.
- Se deben establecer sistemas de control y monitoreo respecto los posibles impactos (directos e indirectos) en el suelo, aire, aguas superficiales y subterráneas, cultivos y riego a la salud humana. Es conveniente además establecer líneas de monitoreo ecotoxicológico.
- En las evaluaciones de los EAFNC se hace necesario incluir aspectos sociológicos y ecológicos.
- Los costos asociados al establecimiento de EAFNC es altamente dependiente de los volúmenes de agua generados, dad las economías de escala en la instalación de infraestructura de distribución y costos en los sistema se de tratamiento.

## **5 Priorización de alternativas que más se adaptan a la realidad de nuestro país**

A continuación se presenta un análisis de las diferentes alternativas discutidas en los puntos anteriores enfocando en la aplicabilidad para aumentar la superficie de riego en nuestro país.

**Aguas claras de relaves.** Dada la poca disponibilidad de estudios sobre la utilización de las aguas claras de relaves mineros en el riego agrícola en Chile, bajo distintos escenarios de condiciones ambientales, de suelo, variedad de cultivo y considerando las nuevas políticas de optimización del recurso hídrico en la minería, el Consultor considera que la utilización de esta FNC no es apta para riego agrícola en Chile. A su vez, deja de manifiesto la necesidad de realizar estudios de investigación aplicada, en los cuales se analice la toxicología de los cultivos y los impactos que se pudiesen generar en los cuerpos de agua subterráneos, bajo distintas prácticas de manejo agrícola, permitiendo de esta manera sustentar la factibilidad de utilización de estas aguas para riego.

**Aguas servidas tratadas y Aguas residuales de la Agroindustria.** El elevado número de plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas y de agroindustrias hace que esta sea la FNC más factible para ser usada como fuente de agua para riego en las zonas agrícolas de Chile. Su única limitación se centra en la obtención de los permisos ambientales, pues en muchos casos las empresas que producen estas aguas tratadas no están dispuestas a modificar sus sistemas de tratamiento y disposición de aguas residuales. Lo anterior, debido a que esta modificación implica nuevos trámites y fiscalizaciones.

**Desalinización de agua.** Es una técnica ampliamente utilizada para el abastecimiento de agua potable. En el caso del riego su única limitante es el costo y la necesidad de elevar agua desde el mar hasta las zonas de riego.

**Cosecha de lluvia.** Esta es una técnica que puede ser novedosa sólo a pequeña escala y que podría ser interesante para su uso en huertos o invernaderos. Debido a la necesidad de operar y mantener estos sistemas, la implementación exitosa de estas técnicas requiere de un fortalecimiento de las organizaciones de usuarios que manejen estos recursos.

**Estimulación en la producción de lluvias.** Debido a las condiciones climáticas de Chile, esta alternativa es recomendable para la zona norte, donde existirá nubosidad asociada al Invierno Boliviano que pueda ser estimulada para la producción de lluvia durante la temporada de riego.

**Mezcla de aguas.** Esta alternativa tiende a confundirse con el concepto de dilución establecida en el DS 90-2000 “norma de emisión para la regulación de contaminantes asociados a las descargas de residuos líquidos a aguas marinas y continentales superficiales”. Por ello no es claro como se aplicaría esta alternativa y como sería fiscalizada por la autoridad. Considerando en este marco, la utilización de aguas de buena calidad para la dilución de aguas que exceden los parámetros de la norma de riego (NCh 1.333), favorecería significativamente la utilización de la FNC para el riego agrícola. Cabe destacar que esta práctica es dependiente de la disponibilidad de agua de buena calidad, por lo cual, en las zonas con déficit hídrico no será siempre una alternativa.

**Atrapanieblas.** Esta es una técnica que puede ser novedosa sólo a pequeña escala y que podría ser interesante para su uso en huertos o invernaderos. Debido a la necesidad de operar y mantener estos sistemas, la implementación exitosa de estas técnicas requiere de un fortalecimiento de las organizaciones de usuarios que manejen estos recursos.

**Recarga artificial de acuíferos.** Esta es una alternativa interesante de ser utilizada, desde que la modificación del Código de Aguas del año 2005 solucionó su factibilidad legal. Desde el punto de vista de su uso para riego, esta alternativa presenta la ventaja de poder ser implementada directamente en las zonas agrícolas.

### **Recomendación y priorización**

En opinión de este consultor, se recomiendan, en forma priorizada las siguientes alternativas de FNC:

- Aguas servidas tratadas y aguas residuales de la Agroindustria.
- Recarga artificial de acuíferos.
- Mezcla de aguas.

- Atrapanieblas.
- Cosecha de lluvia.
- Estimulación en la producción de lluvias.
- Desalinización de agua.

No se recomienda considerar la siguiente FNC:

- Aguas claras de relaves.