



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

ESTIMACIÓN DE LA DEMANDA ACTUAL, PROYECCIONES FUTURAS Y CARACTERIZACIÓN DE LA CALIDAD DE LOS RECURSOS HÍDRICOS EN CHILE

VOLUMEN I

INFORME FINAL

REALIZADO POR:

**UNIÓN TEMPORAL DE PROVEEDORES
HÍDRICA CONSULTORES SPA Y AQUATERRA INGENIEROS LTDA**

S.I.T. Nº 419

Santiago, Agosto 2017

MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS

Ministro de Obras Públicas
Ingeniero Comercial Sr. Alberto Undurraga Vicuña

Director General de Aguas
Abogado Sr. Carlos Estévez Valencia

Jefe División de Estudios y Planificación
Ingeniero Civil Adrián Lillo Zenteno

Inspectora Fiscal
Ingeniera Civil Andrea Osses Vargas

Inspectores Fiscales Subrogantes
Ingeniero en Recursos Naturales Renovables Nicolás Ureta Parraguez
Geógrafo Paul Dourojeanni Schlotfeldt

HÍDRICA CONSULTORES SPA Y AQUATERRA INGENIEROS LTDA (UTP)

Jefe de Proyecto
Ingeniero Civil Félix Pérez Soto

Profesionales
Ingeniero Civil Jaime Vargas P.
Ingeniero Civil Jorge Castillo G.
Ingeniera Civil Maricel Gibbs R.
Ingeniera Civil en Geografía Karen Beltrán S.
Ingeniero Civil Julio Faúndes S.
Ingeniero Civil Felipe Orellana M.
Ingeniero Civil Sergio Duarte M.
Ingeniera Agrónoma Irene Bernaus L.
Ingeniero Civil Darío Vargas G.
Ingeniera Agrónoma Alba Llavona F.
Ingeniero Ambiental Matías Faúndes S.
Ingeniero Civil Alejandro de la Barra R.
Ingeniero Civil Iván Fuentes O.

ÍNDICE GENERAL

VOLUMEN I. ASPECTOS GENERALES DEL ESTUDIO Y DESCRIPCIÓN METODOLÓGICA

- PARTE I. Aspectos globales del estudio.
- PARTE II. Enfoque metodológico de la demanda hídrica por rubro o actividad económica.
- PARTE III. Enfoque metodológico de la calidad de las aguas y presiones ambientales.

VOLUMEN II. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE LA ESTIMACIÓN DE LA DEMANDA HÍDRICA ACTUAL Y CALIDAD DEL AGUA

- PARTE IV. Estimación de demandas actuales por rubro o actividad económica.
- PARTE V. Resumen de la estimación de demandas actuales a nivel regional y nacional.
- PARTE VI. Análisis de calidad de agua.
- PARTE VII. Análisis de presiones ambientales.

VOLUMEN III. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE LA PROYECCIÓN DE LA DEMANDA HÍDRICA FUTURA A LOS AÑOS 2030 Y 2040

- PARTE VIII. Proyección de demandas futuras por rubro o actividad económica:
- PARTE IX. Resumen de la proyección de demandas futuras a nivel regional y nacional.
- PARTE X. Conclusiones del Estudio.
- PARTE XI. Bibliografía y Anexos.

GLOSARIO

ORGANISMOS

BCN	Biblioteca del Congreso Nacional
BID	Banco Interamericano de Desarrollo
CDEC-SIC	Centro de Despacho Económico de Carga - Sistema Interconectado Central
CDEC-SING	Centro de Despacho Económico de Carga - Sistema Interconectado Norte Grande
CEPAL	Comisión Económica para América Latina y el Caribe
CIREN	Centro de Información de Recursos Naturales
CNE	Comisión Nacional de Energía
CNR	Comisión Nacional de Riego
COCHILCO	Comisión Chilena del Cobre
CONADI	Corporación Nacional de Desarrollo Indígena
CONAF	Corporación Nacional Forestal
CONAMA	Comisión Nacional del Medio Ambiente
CORFO	Corporación de Fomento de la Producción
DGA	Dirección General de Aguas
DOH	Dirección de Obras Hidráulicas
FENAPRU	Federación Nacional de Agua Potable Rural
INE	Instituto Nacional de Estadísticas
INFOR	Instituto Forestal de Chile
IPCC	Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>)
MINAGRI	Ministerio de Agricultura
MMA	Ministerio de Medio Ambiente
MOP	Ministerio de Obras Públicas
NNUU	Naciones Unidas
ODEPA	Oficina de Estudios y Políticas Agrarias
SAG	Servicio Agrícola y Ganadero
SEC	Superintendencia de Electricidad y Combustibles
SERNAGEOMIN	Servicio Nacional de Geología y Minería
SERNAPESCA	Servicio Nacional de Pesca y Acuicultura

SERNATUR	Servicio Nacional de Turismo
SISS	Superintendencia de Servicios Sanitarios
SMA	Superintendencia del Medio Ambiente
SOCHID	Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica
SOFOFA	Sociedad de Fomento Fabril

ABREVIATURAS TÉCNICAS

APR	Agua Potable Rural
BNA	Banco Nacional de Aguas
CE	Conductividad Eléctrica
CF	Coliformes Fecales
CPA	Catastro Público de Aguas
CT	Coliformes Totales
DAA	Derechos de Aprovechamiento de Agua
DBO	Demanda Bioquímica de Oxígeno
DIA	Declaración de Impacto Ambiental
DQO	Demanda Química de Oxígeno
EIA	Estudio de Impacto Ambiental
GEI	Gases de Efecto Invernadero
IP	Instructivo Presidencial
OD	Oxígeno Disuelto
PNUD	Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo
SEIA	Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental
SIG	Sistema de Información Geográfica
SIIR	Sistema de Información Integral de Riego
SINIA	Sistema Nacional de Información Ambiental
SITHA	Sistema de Información Territorial de Humedales Altoandinos
SNASPE	Sistema Nacional de Áreas Silvestres Protegidas del Estado
SST	Sólidos Solubles Totales
STD	Sólidos Totales Disueltos
ZOIT	Zona de Interés Turístico

VOLUMEN I. ASPECTOS GENERALES DEL ESTUDIO Y DESCRIPCIÓN METODOLÓGICA

CONTENIDO

CUADROS.....	IX
FIGURAS.....	XIII
PARTE I. ASPECTOS GLOBALES DEL ESTUDIO.....	1
CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN, OBJETIVOS Y ALCANCE DEL ESTUDIO.....	3
1.1 INTRODUCCIÓN.....	3
1.2 OBJETIVOS.....	4
1.2.1 Objetivo General.....	4
1.2.2 Objetivos Específicos	4
1.3 ALCANCES GENERALES DEL ESTUDIO.....	4
1.3.1 Demanda actual y futura de agua.....	4
1.3.2 Calidad de agua.....	5
1.3.3 Localización Geográfica	5
CAPÍTULO 2 REVISIÓN Y ANÁLISIS DE ANTECEDENTES.....	7
2.1 RECOPIACIÓN Y ANÁLISIS DE ANTECEDENTES BIBLIOGRÁFICOS	7
2.1.1 Recopilación de estudios adicionales	10
2.1.2 Análisis de Antecedentes.....	14
2.2 INFORMACIÓN SOLICITADA A ORGANISMOS Y/O ENTIDADES DE INTERÉS.....	14
PARTE II. ENFOQUE METODOLÓGICO DE LA DEMANDA HÍDRICA POR RUBRO O ACTIVIDAD ECONÓMICA	15
CAPÍTULO 3 METODOLOGÍA PARA EL ESTUDIO DE LA DEMANDA HÍDRICA DEL USO: AGUA POTABLE URBANA	17
3.1 INTRODUCCIÓN.....	17
3.2 ENFOQUE METODOLÓGICO DE LA ESTIMACIÓN DE LA DEMANDA ACTUAL	18
3.2.1 Generalidades	18
3.2.2 Fuentes documentales utilizadas	20
3.2.3 Metodología.....	20

3.3	ENFOQUE METODOLÓGICO DE LA PROYECCIÓN DE LA DEMANDA FUTURA	21
3.3.1	Generalidades	21
3.3.2	Fuentes documentales utilizadas	26
3.3.3	Metodología.....	27
CAPÍTULO 4	METODOLOGÍA PARA EL ESTUDIO DE LA DEMANDA HÍDRICA DEL USO: AGUA POTABLE RURAL	33
4.1	INTRODUCCIÓN	33
4.2	ENFOQUE METODOLÓGICO DE LA ESTIMACIÓN DE LA DEMANDA ACTUAL	35
4.2.1	Generalidades	35
4.2.2	Fuentes documentales utilizadas	38
4.2.3	Metodología.....	38
4.3	ENFOQUE METODOLÓGICO DE LA PROYECCIÓN DE LA DEMANDA FUTURA	40
4.3.1	Generalidades	40
4.3.2	Fuentes documentales utilizadas	40
4.3.3	Metodología.....	41
CAPÍTULO 5	METODOLOGÍA PARA EL ESTUDIO DE LA DEMANDA HÍDRICA DEL USO: AGRÍCOLA	43
5.1	INTRODUCCIÓN	43
5.2	ENFOQUE METODOLÓGICO DE LA ESTIMACIÓN DE LA DEMANDA ACTUAL	44
5.2.1	Generalidades	44
5.2.2	Fuentes documentales utilizadas	45
5.2.3	Metodología.....	47
5.2.3.1	Estimación de la Demanda Hídrica Agrícola actual.....	48
5.2.3.2	Estimación de la Demanda de Riego actual	59
5.3	ENFOQUE METODOLÓGICO DE LA PROYECCIÓN DE LA DEMANDA FUTURA	64
5.3.1	Generalidades	64
5.3.2	Fuentes documentales utilizadas	66
5.3.3	Metodología.....	66
5.3.3.1	Proyección de la Demanda Hídrica Agrícola futura	66
5.3.3.2	Proyección de la Demanda de Riego futura.....	72
CAPÍTULO 6	METODOLOGÍA PARA EL ESTUDIO DE LA DEMANDA HÍDRICA DEL USO: PECUARIO	75
6.1	INTRODUCCIÓN	75
6.2	ENFOQUE METODOLÓGICO DE LA ESTIMACIÓN DE LA DEMANDA ACTUAL	75
6.2.1	Generalidades	75
6.2.1.1	Antecedentes	75

6.2.1.2	Alcance	77
6.2.2	Fuentes documentales utilizadas	77
6.2.3	Metodología.....	78
6.3	ENFOQUE METODOLÓGICO DE LA PROYECCIÓN DE LA DEMANDA FUTURA	83
6.3.1	Generalidades	83
6.3.2	Fuentes documentales utilizadas	83
6.3.3	Metodología.....	83
CAPÍTULO 7	METODOLOGÍA PARA EL ESTUDIO DE LA DEMANDA HÍDRICA DEL USO: FORESTAL	85
7.1	INTRODUCCIÓN	85
7.2	ENFOQUE METODOLÓGICO DE LA ESTIMACIÓN DE LA DEMANDA ACTUAL. (I) USO PRODUCTIVO: PLANTACIONES FORESTALES.....	86
7.2.1	Generalidades	86
7.2.1.1	Antecedentes	88
7.2.1.2	Alcance	92
7.2.2	Fuentes documentales utilizadas	92
7.2.3	Metodología.....	92
7.3	ENFOQUE METODOLÓGICO DE LA ESTIMACIÓN DE LA DEMANDA ACTUAL. (II) USO NO PRODUCTIVO: BOSQUE NATIVO Y OTRAS COBERTURAS VEGETALES	94
7.3.1	Generalidades	94
7.3.1.1	Antecedentes	94
7.3.1.2	Alcance	96
7.3.2	Fuentes documentales utilizadas	96
7.3.3	Metodología.....	97
7.3.3.1	Demanda en bosque nativo	98
7.3.3.2	Demanda en humedales	98
7.4	ENFOQUE METODOLÓGICO DE LA PROYECCIÓN DE LA DEMANDA FUTURA	99
7.4.1	Generalidades	99
7.4.2	Fuentes documentales utilizadas	100
7.4.3	Metodología.....	100
CAPÍTULO 8	METODOLOGÍA PARA EL ESTUDIO DE LA DEMANDA HÍDRICA DEL USO: ACUÍCOLA	103
8.1	INTRODUCCIÓN	103
8.2	ENFOQUE METODOLÓGICO DE LA ESTIMACIÓN DE LA DEMANDA ACTUAL	104
8.2.1	Generalidades	104
8.2.1.1	Antecedentes	104
8.2.1.2	Alcance	106

8.2.2	Fuentes documentales utilizadas	107
8.2.3	Metodología.....	108
8.3	ENFOQUE METODOLÓGICO DE LA PROYECCIÓN DE LA DEMANDA FUTURA	111
8.3.1	Generalidades	111
8.3.2	Fuentes documentales utilizadas	114
8.3.3	Metodología.....	114
CAPÍTULO 9	METODOLOGÍA PARA EL ESTUDIO DE LA DEMANDA HÍDRICA DEL USO: MINERO	119
9.1	INTRODUCCIÓN	119
9.2	ENFOQUE METODOLÓGICO DE LA ESTIMACIÓN DE LA DEMANDA ACTUAL	121
9.2.1	Generalidades	121
9.2.2	Fuentes documentales utilizadas	128
9.2.3	Metodología.....	129
9.2.3.1	Identificación catastral georreferenciada de las faenas mineras	130
9.2.3.2	Estimación de la demanda hídrica en la minería del cobre	131
9.2.3.3	Estimación de la demanda hídrica en la minería metálica no-cuprífera	138
9.2.3.4	Estimación de la demanda hídrica en la minería no metálica	141
9.2.3.5	Estimación de la demanda hídrica en la explotación de hidrocarburos mediante fractura hidráulica	143
9.3	ENFOQUE METODOLÓGICO DE LA PROYECCIÓN DE LA DEMANDA FUTURA	146
9.3.1	Generalidades	146
9.3.1.1	Antecedentes	147
9.3.1.2	Alcance	148
9.3.2	Fuentes documentales utilizadas	148
9.3.3	Metodología aplicada a la proyección de demanda hídrica de aguas continentales	149
9.3.3.1	Proyección de la demanda minera de agua desalada	152
CAPÍTULO 10	METODOLOGÍA PARA EL ESTUDIO DE LA DEMANDA HÍDRICA DEL USO: INDUSTRIAL	157
10.1	INTRODUCCIÓN.....	157
10.2	ENFOQUE METODOLÓGICO DE LA ESTIMACIÓN DE LA DEMANDA ACTUAL	158
10.2.1	Generalidades	158
10.2.2	Fuentes documentales utilizadas	160
10.2.3	Metodología.....	161
10.3	ENFOQUE METODOLÓGICO DE LA PROYECCIÓN DE LA DEMANDA FUTURA	165
10.3.1	Generalidades	165
10.3.1.1	Antecedentes	166

10.3.1.2 Alcance	166
10.3.2 Fuentes documentales utilizadas	167
10.3.3 Metodología.....	167
CAPÍTULO 11 METODOLOGÍA PARA EL ESTUDIO DE LA DEMANDA HÍDRICA DEL USO: GENERACIÓN ELÉCTRICA.....	171
11.1 INTRODUCCIÓN.....	171
11.2 ENFOQUE METODOLÓGICO DE LA ESTIMACIÓN DE LA DEMANDA ACTUAL	173
11.2.1 Generalidades	173
11.2.2 Fuentes documentales utilizadas	177
11.2.3 Metodología.....	178
11.3 ENFOQUE METODOLÓGICO DE LA PROYECCIÓN DE LA DEMANDA FUTURA	184
11.3.1 Generalidades	185
11.3.1.1 Antecedentes	187
11.3.1.2 Alcance	187
11.3.2 Fuentes documentales utilizadas	188
11.3.3 Metodología.....	188
11.3.3.1 Cálculo de la demanda futura para centrales hidroeléctricas	189
11.3.3.2 Cálculo de la demanda futura para centrales termoeléctricas.....	190
CAPÍTULO 12 METODOLOGÍA PARA EL ESTUDIO DEL CAUDAL PARA USOS TURÍSTICO Y DE PROTECCIÓN AMBIENTAL	193
12.1 CAUDAL PARA USO TURÍSTICO	193
12.1.1 Introducción.....	193
12.1.2 Enfoque Metodológico de la estimación de la Demanda Actual	194
12.1.2.1 Generalidades	194
12.1.2.2 Fuentes documentales utilizadas.....	199
12.1.2.3 Metodología	199
12.1.3 Enfoque Metodológico de la proyección de la Demanda Futura.....	200
12.1.3.1 Generalidades	200
12.2 CAUDAL PARA PROTECCIÓN AMBIENTAL	201
12.2.1 Introducción.....	201
12.2.2 Enfoque Metodológico de la estimación de la Demanda Actual	202
12.2.2.1 Generalidades	202
12.2.2.2 Fuentes documentales utilizadas.....	203
12.2.2.3 Metodología	204
12.2.3 Enfoque Metodológico de la proyección de la Demanda Futura.....	205
12.2.3.1 Generalidades	205

PARTE III. ENFOQUE METODOLÓGICO DE LA CALIDAD DE LAS AGUAS Y PRESIONES AMBIENTALES	209
CAPÍTULO 13 METODOLOGÍA PARA EL ESTUDIO DE LA CALIDAD DE LAS AGUAS.....	211
13.1 INTRODUCCIÓN	211
13.2 ENFOQUE METODOLÓGICO	211
13.2.1 Fuentes documentales utilizadas	211
13.2.1.1 Sistematización y depuración de la información	212
13.2.1.2 Análisis preliminar de datos	213
13.2.2 Caracterización hidroquímica	214
13.2.3 Análisis de isótopos ambientales	217
13.2.4 Caracterización de acuíferos según el Índice de Calidad (IC)	218
CAPÍTULO 14 METODOLOGÍA PARA EL ESTUDIO DE LAS PRESIONES AMBIENTALES	223
14.1 GENERALIDADES	223
14.2 RECOPIACIÓN DE ANTECEDENTES	224
14.3 METODOLOGÍA	226

CUADROS

Cuadro 2.1-1	Listado de Estudios Recopilados.....	8
Cuadro 2.1-2	Listado de Antecedentes Adicionales I	10
Cuadro 3.2-1	Listado de empresas sanitarias	19
Cuadro 3.3-1	Correlación lineal (R^2) entre consumo de agua potable urbana ($m^3/año$) y número de clientes en localidades de la VII Región del Maule.	22
Cuadro 3.3-2	Registros históricos del consumo de agua potable de Clientes Otros	25
Cuadro 3.3-3	Tendencias de proyección del consumo anual de agua potable urbana en la VII Región del Maule	28
Cuadro 4.1-1	Resumen de sistemas APR	34
Cuadro 4.1-2	Resumen de la tipología de los sistemas APR	35
Cuadro 4.2-1	Resumen de sistemas APR	36
Cuadro 5.2-1	Información de cultivos recopilados del VII Censo Agrícola	48
Cuadro 5.2-2	Estimación de superficies agrícolas al año 2015, por región, grupo de cultivo y manejo en riego/secano (hectáreas)	52
Cuadro 5.2-3	Coeficiente de cultivo (K_c) para diferentes especies agrícolas	56
Cuadro 5.2-4	Eficiencia de riego según método de aplicación	62
Cuadro 5.2-5	Eficiencia de riego según método de aplicación	62
Cuadro 5.2-6	Eficiencia de riego considerado en datos de INE (1997)	63
Cuadro 5.2-7	Eficiencia de aplicación de riego, por regiones, años 1997, 2007 y 2015	64
Cuadro 5.3-1	Proyección de superficies agrícolas al año 2020, por región, grupo de cultivo y manejo en riego/secano (hectáreas)	68
Cuadro 5.3-2	Proyección de superficies agrícolas al año 2030, por región, grupo de cultivo y manejo en riego/secano (hectáreas)	69
Cuadro 5.3-3	Proyección de superficies agrícolas al año 2040, por región, grupo de cultivo y manejo en riego/secano (hectáreas)	70
Cuadro 5.3-4	Proyección de la eficiencia de aplicación de riego, por regiones, años 2020, 2030 y 2040 (nivel inferior, central y superior)	74
Cuadro 6.2-1	Tabla de equivalencia de requerimientos de agua para producción avícola ..	75
Cuadro 6.2-2	Tabla de equivalencia de requerimientos de agua para producción porcina .	76

Cuadro 6.2-3	Tabla de equivalencia de requerimientos de agua para producción ovina ..76
Cuadro 6.2-4	Tabla de equivalencia de requerimiento de agua para producción lechera 76
Cuadro 6.2-5	Categorías de ganado en el cálculo de demanda hídrica pecuaria78
Cuadro 6.2-6	Variación de existencia de ganado bovino por categoría, según región seleccionada (%), 2007/2015.79
Cuadro 6.2-7	Variación de existencia de ganado ovino por categoría, según región seleccionada (%), 2007/2015.80
Cuadro 6.2-8	Variación de existencia de ganado caprino por categoría, según región seleccionada (%), 2007/2015.80
Cuadro 6.2-9	Variación de existencia de broilers en criaderos, según región seleccionada (%), 2007/2015.81
Cuadro 6.2-10	Variación de existencia de cerdos en criaderos, según región seleccionada (%), 2007/2015.81
Cuadro 6.2-11	Tabla de equivalencia de requerimientos de agua para producción pecuaria82
Cuadro 7.2-1	Evapotranspiración según algunos estudios experimentales en Chile90
Cuadro 7.2-2	Catastros regionales de Usos de Suelo y Vegetación93
Cuadro 7.3-1	Coeficiente de cultivo para especies de humedales.....95
Cuadro 7.3-2	Selección de Usos y Sub Usos de Cubiertas del catastro de CONAF97
Cuadro 8.2-1	Número de centros inscritos en el Registro Nacional de Acuicultura, por grupo de especie (2015)105
Cuadro 8.2-2	Centros de cultivo “en tierra” con inscripción vigente en RNA (año 2016) con uso de agua dulce107
Cuadro 8.2-3	Requerimiento de agua para acuicultura por cultivo109
Cuadro 8.3-1	Grupos de especies acuícolas cultivadas en Chile112
Cuadro 8.3-2	Estimación del requerimiento de agua dulce en los procesos productivos de los centros de tierra para salmón y trucha, periodo 2015-2040116
Cuadro 9.2-1	Principal minería metálica en Chile, además de la producción cuprífera125
Cuadro 9.2-2	Usos de agua considerados en el cálculo y estimación de la demanda hídrica minera127
Cuadro 9.2-3	Catastro de faenas de la gran y mediana minería del cobre con uso de agua de mar133
Cuadro 9.2-4	Evolución de la tasa unitaria de consumo de agua según proceso (m^3/ton mineral procesado)134
Cuadro 9.2-5	Tasa unitaria de consumo de agua según centro de demanda (promedio nacional a 2015)135
Cuadro 9.2-6	Consumo de agua fresca por tonelada de mineral procesado ($m^3/t_{mineral_procesado}$) - valores a 2012.....135
Cuadro 9.2-7	Tasas unitarias de consumo de aguas continentales por región y proceso, actualizados a 2015 (m^3/ton de mineral procesado)136

Cuadro 9.2-8	Tasas unitarias para el proceso de minerales de oro, plata y fierro	140
Cuadro 9.2-9	Leyes de mina según producto minero	141
Cuadro 9.2-10	Tasas unitarias de consumo de agua para principales productos de la minería no-metálica	143
Cuadro 9.2-11	Proyectos de fractura hidráulica para la explotación de hidrocarburos en la XII Región (declarados en SEA a 2017) y volúmenes de demanda hídrica asociados	144
Cuadro 10.1-1	Secciones de la clasificación CIU (Rev IV)	157
Cuadro 10.2-1	Grado de Recirculación y Porcentaje de Uso Consuntivo en los Principales Sectores Industriales.....	159
Cuadro 10.2-2	Parámetros de uso del agua en las industrias manufactureras, por grupo industrial, 2011	163
Cuadro 10.2-3	Factores Efluente/Demanda de diferentes actividades industriales	163
Cuadro 11.2-1	Tipos de consumos de agua para generar energía que se imputarán dentro del análisis de demanda hídrica	175
Cuadro 11.2-2	Eficiencias de turbinas según tipo	180
Cuadro 11.2-3	Uso calculado de agua (Mgal/día) en centrales generadoras, según tipo de combustible (EE.UU., 2009)	182
Cuadro 11.2-4	Uso calculado de agua (m ³ /MWh) en centrales térmicas, según tipo de combustible (EE.UU., 2009)	183
Cuadro 11.2-5	Uso calculado de agua (m ³ /MWh) en centrales térmicas, según tipo de combustible (España, 2010).....	183
Cuadro 11.2-6	Valores de V _R y V _C adoptados, en m ³ /MWh	184
Cuadro 13.2-1	Clases de Calidad y sus Valores de Corte según Parámetros Considerados.	220
Cuadro 13.2-2	Consideraciones para el Cálculo del IC General.	220

FIGURAS

Figura 1.3-1	Ubicación Geográfica de Zona de Estudio. Entre la XV Región de Arica y Parinacota y la XII de Magallanes.	6
Figura 3.3-1	Proyección de la tasa de crecimiento poblacional de Chile, periodo 2020-2040 ..	24
Figura 3.3-2	Esquema general de la metodología de proyección de la demanda futura de Agua Potable Urbana en Clientes Residenciales.....	27
Figura 5.2-1	Evapotranspiración de referencia. Región de Arica y Parinacota. Región de Tarapacá.	55
Figura 5.3-1	Principales relaciones entre variables influyentes en la demanda hídrica del sector agrícola	65
Figura 5.3-2	Superficie regada según censos agropecuarios	71
Figura 7.2-1	Redistribución de las precipitaciones	87
Figura 7.2-2	Relación entre precipitación media anual y evapotranspiración anual de plantación forestal (a) y pradera (b).....	89
Figura 7.2-4	Modelo de Zhang con datos de estudios nacionales incorporados.	91
Figura 8.1-1	Producción mundial de la pesca de captura y la acuicultura	104
Figura 8.2-1	Evolución de la producción de salmón y trucha en centros acuícolas en tierra entre 1999 y 2015 (en toneladas/año).	109
Figura 8.3-1	Ciclo de los salmónidos cultivados en forma intensiva en Chile	113
Figura 9.2-1	Consumo de agua fresca en la minería; valores actualizados a nivel nacional	122
Figura 9.2-2	Distribución porcentual de los principales usos del agua en la minería	124
Figura 9.2-3	Ley promedio faenas de cobre en Chile 2000-2014 y proyección a 2016, según tipo de recurso	137
Figura 10.2-1	Fuentes de agua, vertidos de efluentes y fiscalización de agua industrial.....	160
Figura 10.2-2	Diagrama de Flujo Metodología Cálculo Demandas Industriales.....	162
Figura 11.2-1	Uso del agua en centrales generadoras de EE.UU. a 2008, por tipo de combustible y tecnología de refrigeración	182
Figura 11.3-1	Serie de Tiempo generación histórica central Chapiquiña, XV Región.....	185
Figura 11.3-2	Serie de Tiempo generación histórica central Cavancho, I Región.....	186
Figura 12.1-1	Clasificación de Tipos de Usos de Agua	195
Figura 12.2-1	Caudal de reserva para conservación ambiental.....	204

Figura 12.2-2	Portafolio Optimización del Sistema Nacional de Áreas Silvestres Protegidas del Estado (SNASPE): Subcomité del CNAP	206
Figura 13.2-1	Diagrama de Piper para interpretación hidroquímica.....	215
Figura 13.2-2	Diagrama de Stiff para interpretación hidroquímica.....	215
Figura 13.2-3	Ejemplo de Diagrama de Schoeller	216
Figura 13.2-4	Diagrama de Box-Whisker para interpretación hidroquímica.....	216
Figura 13.2-5	Esquema General y Diagrama de Flujo de la Metodología para IC	218

PARTE I. ASPECTOS GLOBALES DEL ESTUDIO

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN, OBJETIVOS Y ALCANCE DEL ESTUDIO

1.1 INTRODUCCIÓN

En el marco de la iniciativa "Análisis para el Desarrollo de Plan Nacional de Recursos Hídricos (PNRH)" se requiere contar con un conjunto de estudios complementarios que generen la base de información para la preparación del anteproyecto del plan y su desarrollo. Entre ellos se encuentran los siguientes:

- a) Estimación de la demanda actual y proyectada de los recursos hídricos a nivel nacional.
- b) Caracterización de la calidad de las aguas a nivel nacional, estado de ecosistemas asociados y fuentes de contaminación.

En el caso del primer tema, han transcurrido 10 años desde el último estudio de demandas (DGA-AC, 2007), siendo necesario actualizar esta información. Además, se detectaron algunas discrepancias en las estimaciones realizadas. Para efectos del desarrollo del PNRH se requiere conocer las demandas y consumos de agua actualizados para los distintos usos asociados a distintos sectores económicos (agua potable, agrícola, minero, industrial, hidroeléctrico, forestal, turístico y acuícola), en todas las regiones y cuencas/subcuencas del país. Asimismo, es necesario realizar un análisis de las tendencias y cambios esperados a futuro como resultado del desarrollo económico y social, y los cambios tecnológicos, culturales y legales, para los años 2030 y 2040.

En cuanto al tema de caracterización de la calidad de aguas, el último estudio data del año 2014 (DGA-IE, 2014), el cual se elaboró para evaluar solamente la red de monitoreo de calidad de aguas de la DGA, y no contempló otras fuentes de información (estudios aislados por región, información APRs, líneas base SEIA, monitoreos SEIA, monitoreo normas secundarias, etc.). Dentro del presente estudio se pretende actualizar el análisis de la información de calidad de aguas disponible en el BNA e incorporar otras fuentes de datos (APR, DOH, SEA, SMA, MMA) para la caracterización de la calidad del agua (superficial y subterránea) de las distintas cuencas y/o subcuencas.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo General

El objetivo general del estudio es obtener una estimación de la demanda de agua actual y proyectada para los años 2030 y 2040, para los distintos usos, además de disponer de una caracterización de la situación actual de los cuerpos de agua superficiales y subterráneos, en relación a su calidad. Para esto se considera una escala espacial a nivel de todas las regiones y cuencas y/o subcuencas del país.

1.2.2 Objetivos Específicos

Como objetivos específicos se identifican los siguientes:

- Efectuar una actualización de la situación actual de la demanda de recursos hídricos, a nivel regional y de cuencas y/o subcuencas principales, en relación a su uso por los distintos sectores económicos.
- Realizar un análisis de las tendencias y cambios esperados en la demanda de los recursos hídricos como resultado del desarrollo económico y social, y los cambios tecnológicos, culturales y legales, considerando un horizonte para los años 2030 y 2040.
- Caracterización de los cuerpos de agua de acuerdo a su calidad física, química y microbiológica.
- Caracterizar la salud ambiental de cauces y lagos mediante indicadores de la calidad de las aguas.
- Identificar y evaluar actividades y procesos de carácter antrópico que afectan actualmente la calidad de las aguas y/o en las condiciones medioambientales de los cuerpos de agua, y su proyección temporal.
- Identificar y evaluar acciones e instrumentos diseñados para el control del deterioro ambiental en este tema, su implementación en la práctica y su efectividad para dicho propósito.

1.3 ALCANCES GENERALES DEL ESTUDIO

1.3.1 Demanda actual y futura de agua

Atendiendo a los objetivos específicos del estudio, en el presente Volumen Nº 1 se presenta la metodología para la estimación de la demanda actual y futura de agua, para cada uno de los usos principales del país, productivos y no productivos:

- uso en agua potable urbana,
- uso en agua potable rural,
- uso agrícola,
- uso pecuario,

- uso forestal (plantaciones, bosque nativo y otras coberturas vegetales),
- uso acuícola,
- uso minero,
- uso industrial,
- uso en generación eléctrica,
- uso turístico, y protección ambiental.

Se expone la metodología aplicada en cada uso, tanto en el caso de la estimación de demanda actual como las proyecciones de demanda a los años 2030 y 2040. El análisis y resultados a nivel de subcuencas, cuencas ya escala regional se recopila en el Volumen N° 2 del presente estudio.

Es importante destacar que si bien es cierto que en el SEA existe información de proyectos mineros, hidroeléctricos o industriales, ya sea de producción estimada, períodos de puesta en marcha y operación, no existe certeza que el inicio de los proyectos informados se cumpla a cabalidad, ya que las inversiones que requieren este tipo de proyectos dependen de múltiples variables, tales como económicas, políticas, etc., las que están fuera de los alcances de los propios estudios aprobados o presentadas en el SEA.

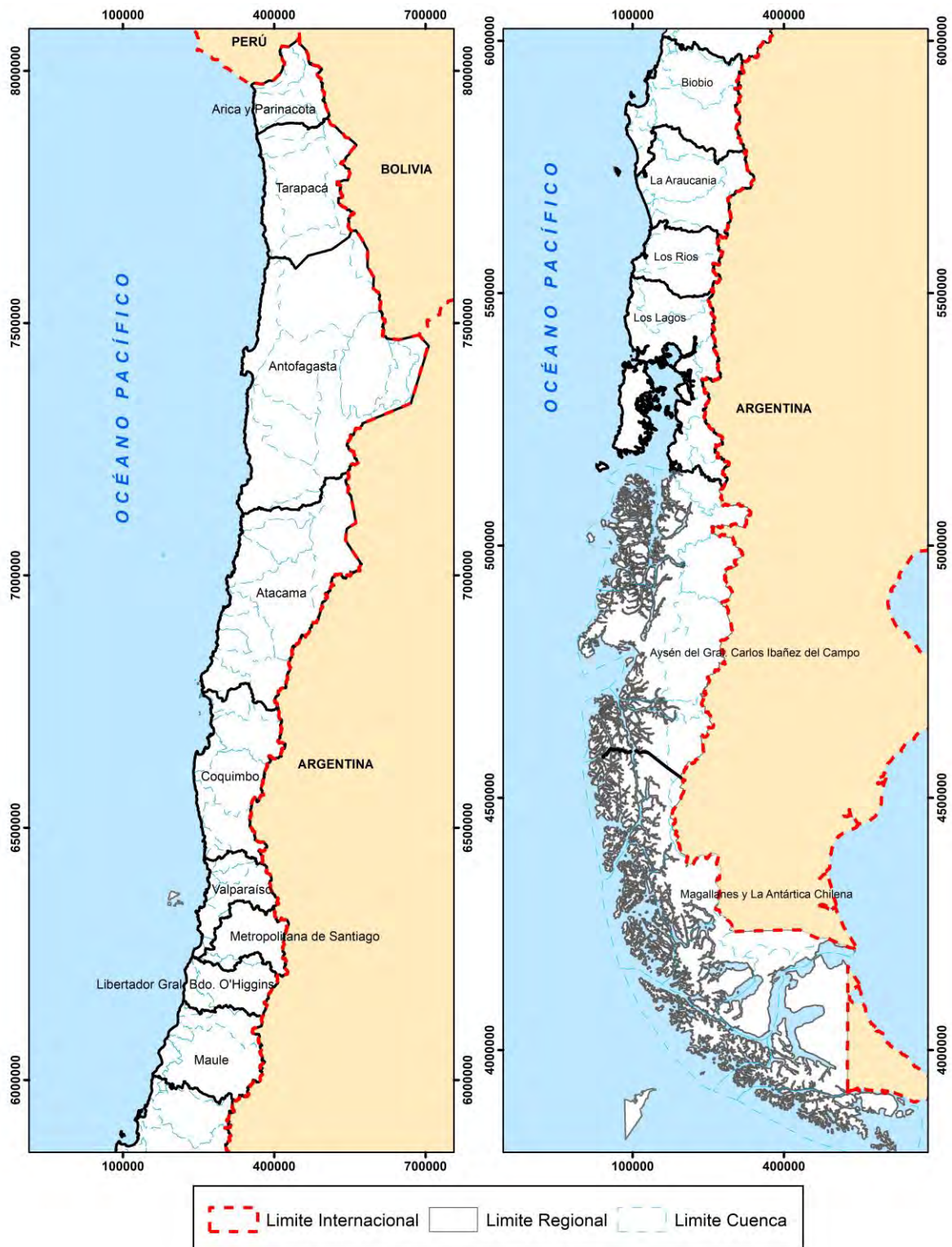
1.3.2 Calidad de agua

En el presente volumen se expone la metodología, respecto de la calidad de agua, aplicada en la caracterización hidrogeoquímica de los cuerpos de agua superficiales y subterráneos de Chile. El detalle de la misma se expone en el Capítulo 14. De forma análoga a la demanda, este procedimiento se aplica a lo largo del país y sus resultados se presentan en el Volumen II.

1.3.3 Localización Geográfica

El estudio tiene alcance nacional, considerando una escala espacial a nivel de regiones, cuencas y/o subcuencas a lo largo de todo Chile. En la **Figura 1.3-1** se presentan las cuencas identificadas en Chile por la DGA.

Figura 1.3-1 Ubicación Geográfica de Zona de Estudio. Entre la XV Región de Arica y Parinacota y la XII de Magallanes.



Fuente: Elaboración Propia

CAPÍTULO 2 REVISIÓN Y ANÁLISIS DE ANTECEDENTES

Se revisaron una serie de estudios y publicaciones, disponibles en diversas instituciones, que se consideran especialmente necesarios para el desarrollo del estudio.

La revisión de antecedentes se enfocó principalmente en los siguientes aspectos:

- Recopilación de Antecedentes Bibliográficos, solicitados en las bases de licitación, y que se deben revisar según metodología –Bases Técnicas. En este caso, corresponden 31 estudios.
- Recopilación de Estudios Adicionales que se propusieron revisar, así como otros documentos recomendados por la DGA y que se dispongan digitalmente, tanto de temática general de demandas de agua y/o calidad como estudios u otro tipo de fuentes específicos de cada uso.
- Recopilación de las coberturas bases a utilizar en el SIG (lo anterior se refiere a cuencas, subcuencas, ubicación estaciones de calidad, APR, límites comunales, provinciales, regionales, sitios de protección ambiental, ubicación faenas mineras, localidades abastecidas por empresas sanitarias, etc.).

Adicionalmente, se ha solicitado información a la DGA, para ser requerido mediante Ordinario interno a los organismos que pudieran contar con información relevante para el estudio.

De esta manera, en los acápite que siguen, la información recopilada se separó de acuerdo a la clasificación descrita, a partir de la cual se generó fichas que resumen la principal información disponible.

2.1 RECOPIACIÓN Y ANÁLISIS DE ANTECEDENTES BIBLIOGRÁFICOS

Se recopilaron antecedentes señalados en las bases de licitación. En el Cuadro 2.1-1 se presenta un listado de los documentos recopilados y revisados, ordenados de forma cronológica.

Cuadro 2.1-1 Listado de Estudios Recopilados

Ref.	Documento	ID	Año	Elaborador por	Autor
01	Análisis crítico de la red fluviométrica nacional: red de calidad de aguas, III, IV y V región	-	1983	BF Ingenieros Civiles	DGA
02	Caudales ecológicos en regiones IV, V y Metropolitana: informe final	-	1993	R&Q Ingeniería Ltda.	DGA
03	Análisis uso actual y futuro de los recursos hídricos de Chile: informe final	SIT Nº 26	1996	IPLA Ltda.	DGA
04	Caudales ecológicos caracterización hidroambiental: Etapa I informe final	SIT Nº 33	1996	AC Ingenieros Consultores Ltda.	DGA
05	Análisis de criterios hidroambientales en el manejo de recursos hídricos: pautas para la determinación de caudales ecológicos y diseño de plan de monitoreo para la determinación de caudales ecológicos	SIT Nº 56	1998	Universidad de Chile	DGA
06	Análisis de criterios hidroambientales en el manejo de recursos hídricos: monitoreo en una cuenca piloto para determinación de caudales mínimos aconsejables	SIT Nº 89	2000	Universidad de Chile	DGA
07	Diseño de un sistema de medición del estado de contaminación difusa de los cuerpos de aguas superficiales y subterráneas.	-	2002	Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA) - La Platina	MINAGRI
08	Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad	SIT Nº 104	2004	Cade Idepe	DGA
09	Sistematización, espacialización y análisis de datos isotópicos en muestras de agua del norte de Chile	SIT Nº 221	2005	Departamento de Estudios y Planificación (DEP) - DGA	DGA
10	Estimaciones de Demanda de agua y Proyecciones Futuras. Zona I norte: regiones I a IV	SIT Nº 122	2007	AC Ingenieros Consultores Ltda.	DGA
11	Estimaciones de Demanda de agua y Proyecciones Futuras. Zona II: regiones V a XII y Región Metropolitana	SIT Nº 123	2007	AC Ingenieros Consultores Ltda.	DGA
12	Derechos, extracciones y tasas unitarias de consumo de agua del sector minero: regiones centro-norte de Chile	SIT Nº 146	2008	Proust Consultores	DGA
13	Levantamiento hidrogeológico para el desarrollo de nuevas fuentes de agua en áreas prioritarias de la zona norte de Chile, regiones XV, I, II y III. Etapa 1	SIT Nº 157	2008	Pontificia Universidad Católica de Chile	DGA
14	Determinación de caudales ecológicos en cuencas con fauna íctica nativa y en estado de conservación crítica	SIT Nº 187	2008	Centro de Ecología Aplicada Ltda.	DGA
15	Diagnóstico y clasificación de sectores acuíferos	SIT Nº 183	2009	Geohidrología Consultores Ltda.	DGA
16	Redefinición de la red mínima de lagos	SIT Nº 192	2009	Poch Ambiental, S.A.	DGA
17	Levantamiento hidrogeológico para el desarrollo de nuevas fuentes de agua en áreas prioritarias de	SIT Nº 195	2009	Pontificia Universidad de Chile	DGA

Ref.	Documento	ID	Año	Elaborador por	Autor
	la zona norte de Chile, regiones XV, I, II y III. Etapa 2				
18	Lineamientos y criterios sobre pronunciamientos de la Dirección General de Aguas, en materia de caudal ecológico, en el marco del SEIA	MIN Nº 173	2009	Departamento de Conservación y Protección de Recursos Hídricos (DCPRH) - DGA	DGA
19	Análisis de metodología y determinación de caudales de reserva turísticos	SIT Nº 206	2010	Aquaterra Ingenieros Ltda.	DGA
20	Temas prioritarios para una Política Nacional de Recursos Hídricos	-	2011	Instituto de Ingenieros de Chile (IICh) - Comisión de Aguas	IICh
21	Mejoramiento del cálculo de evapotranspiración y propuestas de programación del riego, para aumentar la eficiencia en el uso del agua y disminuir el impacto de la sequía en Chile.	-	2014	Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN)	CORFO - CIREN
22	Caracterización Hidrogeoquímica de la cuenca del Loa Alto, región de Antofagasta, Chile: informe final	SIT Nº 335	2014	Matraz Consultores Asociados Ltda.	DGA
23	Análisis crítico de la red de calidad de aguas superficiales y subterráneas de la DGA	SIT Nº 337	2014	Infraestructura y Ecología S.A.	DGA
24	Diagnóstico de la condición trófica de cuerpos lacustres utilizando nuevas herramientas tecnológicas	SIT Nº 347	2014	Centro de Ecología Aplicada Ltda.	DGA
25	Evaluación de la condición trófica de la red de control de lagos de la DGA	SIT Nº 348	2014	M&W Ambientales	DGA
26	Análisis y sistematización de información regional para plan estratégico para gestión de recursos hídricos región de Antofagasta	SIT Nº 360	2014	Aquaterra Ingenieros Ltda.	DGA
27	Evapotranspiración de referencia para la determinación de las demandas de riego en Chile	-	2015	Centro de Agricultura y Medio Ambiente (AGRIMED) - Universidad de Chile	AGRIMED
28	Proyección del consumo de agua en la minería del cobre al 2026	-	2015	Dirección de Estudios y Políticas Públicas (DEPP) - COCHILCO	COCHILCO
29	Diagnóstico de la calidad de aguas subterráneas de la región de Lib. Bernardo O'Higgins	SIT Nº 368	2015	Departamento de Conservación y Protección de Recursos Hídricos (DCPRH) - DGA	DGA
30	Diagnóstico de la calidad de aguas subterráneas de la región de Valparaíso.	SIT Nº 382	2016	Departamento de Conservación y Protección de Recursos Hídricos (DCPRH) - DGA	DGA

Ref.	Documento	ID	Año	Elaborador por	Autor
31	Diagnóstico de la calidad de aguas subterráneas de la región de Lib. Bernardo O'Higgins	SIT N° 383	2016	Departamento de Conservación y Protección de Recursos Hídricos (DCPRH) - DGA	DGA

Fuente: Elaboración propia.

2.1.1 Recopilación de estudios adicionales

Se recopilaron antecedentes desarrollados por diversas instituciones, tanto públicas como privadas, universidades, entre otros, los cuales se presentan en el Cuadro 2.1-2, ordenados de forma cronológica.

Cuadro 2.1-2 Listado de Antecedentes Adicionales I

Ref.	Documento	ID	Año	Elaborador por	Autor
32	La demanda de agua: procedimientos y metodologías para proyectar las demandas de agua en el contexto de la planificación regional y nacional	-	1976	Departamento de Asuntos Económicos y Sociales - Naciones Unidas (NNUU)	NNUU
33	Geoquímica de aguas en cuencas cerradas: I, II III regiones - Chile	SIT N° 51	1999	Risacher, Alonso y Salazar	DGA – UCN - IRD
34	Uso Eficiente de Aguas en la Industria Minera y Buenas Prácticas	-	2002	Consejo Minero	Ministerio de Minería
35	Decreto 743. Fija Tabla de Equivalencias entre caudales de agua y usos, que refleja las prácticas habituales en el país en materia de aprovechamiento de aguas	-	2005	Ministerio de Obras Públicas (MOP)	MOP
36	VII Censo Agropecuario y Forestal	-	2007	Instituto Nacional de Estadística (INE)	INE
37	Gestión del Recurso Hídrico y la Minería en Chile. Diagnóstico para Mesa Público-Privada Nacional	-	2007	Comisión Chilena del Cobre (COCHILCO)	COCHILCO
38	Análisis de vulnerabilidad del sector silvoagropecuario y de los recursos hídricos y edáficos de Chile frente a escenarios de cambio climático	-	2008	Centro de Agricultura y Medio Ambiente (AGRIMED) - Universidad de Chile	CONAMA
39	Proyecciones de impacto del cambio climático sobre cuencas andinas de Chile central: aplicación a cuencas de Maule Alto y Laja	-	2009	Universidad de Chile	Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica (SOCHID)
40	Gestión integrada de los recursos hídricos en Chile	-	2010	Universidad de Chile	BCN - BID

Ref.	Documento	ID	Año	Elaborador por	Autor
41	Propuesta de Proyecto de Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica del Guadalquivir, Usos y Demandas de Agua	-	2010	Confederación Hidrográfica del Guadalquivir (CHG), España	MAGRAMA (España)
42	Decreto 75. Establece Normas Secundarias de Calidad Ambiental para la protección de las aguas continentales superficiales de la cuenca del río Serrano	-	2010	Ministerio Secretaría General de la Presidencia	Ministerio Secretaría General de la Presidencia
43	Estudio de estimación de flujos de inversión y financieros para la adaptación en el sector silvoagropecuario, la mitigación en el sector transporte y la adaptación en el subsector hídrico de la infraestructura	-	2011	Universidad de Chile	MMA - PNUD
44	Impactos del cambio climático sobre la operación del sistema hídrico de la laguna Laja	-	2011	Ayala, A.	Universidad de Chile
45	Catastro de Usos de Suelo y Recursos Vegetacionales	-	2011	Corporación Nacional Forestal (CONAF)	CONAF
46	Diagnóstico Plan Maestro de Recursos Hídricos, Región de Tarapacá	SIT Nº 290	2012	Geohidrología Consultores Ltda.	DGA
47	Diagnóstico Plan Estratégico para la Gestión de Recursos Hídricos, Región de Antofagasta	SIT Nº 291	2012	Arrau Ingeniería E.I.R.L	DGA
48	Levantamiento topográfico y parámetros físico-químicos de fuentes de agua potable en Isla de Pascua	SDT Nº 333	2012	Departamento de Estudios y Planificación (DEP) - DGA	DGA
49	Proyección de la superficie regada al año 2020	-	2012	José Lagos	CNR
50	La economía del cambio climático en Chile	-	2012	Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL)	MMA
51	Análisis de vulnerabilidad del sector hidroeléctrico frente a escenarios de cambio climático en Chile	-	2012	McPhee et al.	CEPAL
52	Estudio de Cambio Climático y Servicios de Agua Potable	-	2012	UNTEC - Universidad de Chile	SISS
53	Consultoría para la elaboración de un estudio sobre el estado del arte de modelos para la investigación del calentamiento global	-	2012	Maisa Rojas - DGF - Universidad de Chile	Gobierno de Chile
54	Decreto 177. Aprueba usos no contemplados en la Tabla de Equivalencia entre caudales de agua y usos del Decreto nº 743, de 2005, y rectifica definición de uso en generación hidroeléctrica por centrales de pasada	-	2012	Ministerio de Obras Públicas (MOP)	MOP
55	Diagnóstico Plan Maestro para la gestión de recursos hídricos, Región de Coquimbo	-	2013	Conic-BF Ingenieros Civiles Consultores	Gobierno Regional-DGA

Ref.	Documento	ID	Año	Elaborador por	Autor
56	Proyección de demanda de agua fresca en la minería del cobre 2013-2021	-	2013	Dirección de Estudios y Políticas Públicas (DEPP) - COCHILCO	COCHILCO
57	Marco estratégico para la adaptación de la infraestructura al cambio climático	-	2013	Pontificia Universidad de Chile - Centro Cambio Global	MOP - MMA
58	Producción minera no metálica de Chile	-	1991-2014	Comisión Chilena del Cobre (COCHILCO)	COCHILCO
59	Infraestructura de Obras Hidráulicas y Agua Potable Rural	-	2014	Dirección de Obras Hidráulicas (DOH)	DOH
60	Anuario Estadístico de Pesca	-	2014	Servicio Nacional de Pesca y Acuicultura (SERNAPESCA)	SERNAPESCA
61	Proyección de demanda de agua fresca en la minería del cobre 2014-2025	-	2014	Dirección de Estudios y Políticas Públicas (DEPP) - COCHILCO	COCHILCO
62	Análisis de los Procedimientos y Metodologías de la Dirección General de Aguas para la Adaptación al Cambio Climático	-	2014	Eridanus Ltda.	MMA - MOP - PNUD
63	Propuesta de un portafolio de medidas para elaborar el Plan de Adaptación al Cambio Climático para la infraestructura	-	2014	Pontificia Universidad de Chile - Centro Cambio Global	MMA
64	Resolución 2655. Aprueba uso no contemplado en la Tabla de Equivalencia entre caudales de agua y usos del Decreto nº 743, de 2005	-	2014	Dirección General de Aguas (DGA)	DGA
65	Decreto 53. Establece Normas Secundarias de Calidad Ambiental para la protección de las aguas continentales superficiales de la cuenca del río Maipo	-	2014	Ministerio del Medio Ambiente (MMA)	MMA
66	Diagnóstico Plan Maestro de Recursos Hídricos, Región Metropolitana de Santiago	SIT Nº 371	2015	Arrau Ingeniería E.I.R.L	DGA
67	Catastro Vitícola Nacional 2014	-	2015	Servicio Agrícola y Ganadero (SAG)	SAG
68	Cumplimiento Normativo de Establecimientos Emisores según D.S.609/98	-	2015	Superintendencia de Servicios Sanitarios (SISS)	SISS
69	Resolución 1431. Aprueba uso no contemplado en la Tabla de Equivalencia entre caudales de agua y usos del Decreto Supremo nº 743, de 2005	-	2015	Dirección General de Aguas (DGA)	DGA
70	Decreto 9. Establece Normas Secundarias de Calidad Ambiental para la protección de las aguas continentales superficiales de la cuenca del río Biobío	-	2015	Ministerio del Medio Ambiente (MMA)	MMA

Ref.	Documento	ID	Año	Elaborador por	Autor
71	Decreto 1. Establece Normas Secundarias de Calidad Ambiental para la protección de las aguas continentales superficiales de la cuenca del río Valdivia	-	2015	Ministerio del Medio Ambiente (MMA)	MMA
72	Plan Maestro de Recursos Hídricos Región del Maule (<i>En ejecución</i>)	-	2016	Everis Chile S.A.	DGA
73	Reporte Huella Hídrica en Chile. Sectores prioritarios de la cuenca del río Rapel	-	2016	Fundación Chile (FCh)	DGA
74	Diagnóstico de calidad de aguas subterráneas en la región Metropolitana - complementario Diagnóstico Plan Maestro de Recursos Hídricos región Metropolitana de Santiago	SIT N° 390	2016	SGA S.A.	DGA
75	Determinación de impacto del cambio climático en el potencial esperado de Generación Hidroeléctrica en la cuenca del Maule	-	2016	Eridanus Ltda.	Subsecretaría de Energía - Ministerio de Energía
76	Anuario Forestal	BE N° 154	2016	Instituto Forestal de Chile (INFOR)	INFOR
77	Consumos de Agua en la Minería del Cobre. Del 2010 al 2015	-	2011-2016	Dirección de Estudios y Políticas Públicas (DEPP) - COCHILCO	COCHILCO
78	Catastro de Superficie Frutícola Regional	-	2014-2016	Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN)	ODEPA
79	Anteproyecto del Plan de Acción Nacional de Cambio Climático 2017-2022	-	2016	Ministerio de Medio Ambiente	MMA
80	Análisis efecto en el régimen hídrico por cambio en patrones meteorológicos (<i>En Etapa de Edición Final</i>)	-	2016	Hídrica Consultores SpA	DGA
81	Resolución 1567 Exenta. Aprueba uso no contemplado en la Tabla de Equivalencia entre caudales de agua y usos del Decreto Supremo MOP n° 743, de 30 de agosto de 2005	-	2016	Dirección General de Aguas (DGA)	DGA
82	Resolución 2525. Aprueba uso no contemplado en la Tabla de Equivalencia entre caudales de agua y usos del Decreto Supremo MOP n° 743, de 2005	-	2016	Dirección General de Aguas (DGA)	DGA

Fuente: Elaboración propia.

Adicionalmente, en la etapa de desarrollo de las metodologías y análisis del estudio, se han recopilado nuevos antecedentes, los cuales se presentan en cada uno de los capítulos de metodología de la demanda hídrica por sector productivo.

2.1.2 Análisis de Antecedentes

Se revisaron los estudios y otros antecedentes enlistados en los acápite 2.1 y 2.2, con el fin de obtener la información necesaria para abarcar dos tópicos principales: uno metodológico referente a las demandas actuales de agua y sus proyecciones futuras; y otro asociado a los aspectos de calidad de agua de fuentes superficiales y subterráneas, en función de la información disponible.

Conforme a lo anterior, una vez que los estudios se revisaron, se clasificaron de acuerdo a los aspectos descritos, para así archivar la información de manera adecuada. En el Anexo A se presenta un mayor detalle de la revisión de antecedentes realizada a la fecha por medio de fichas asociadas a cada uno de los estudios contenidos en el Cuadro 2.1-1 y el Cuadro 2.1-2.

2.2 INFORMACIÓN SOLICITADA A ORGANISMOS Y/O ENTIDADES DE INTERÉS

Con el fin de disponer de información validada y vigente para el estudio, se ha solicitado información adicional a los organismos que pudieran contar con datos relevantes. Este trámite se ha llevado a cabo mediante remisión a la DGA de cartas, para formalizar las solicitudes mediante oficio interno. Las entidades consultadas, además de la propia Dirección General de Aguas (DGA), fueron:

- Superintendencia de Servicios Sanitarios (SISS)
- Federación Nacional de Agua Potable Rural (FENAPRU)
- Dirección de Obras Hidráulicas (DOH)
- Comisión Chilena del Cobre (COCHILCO)
- Sociedad de Fomento Fabril (SOFOFA)
- Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN)
- Superintendencia de Electricidad y Combustibles (SEC)
- Comisión Nacional de Energía (CNE)
- Centro de Despacho Económico de Carga - Sistema Interconectado Central (CDEC SIC)
- Centro de Despacho Económico de Carga - Sistema Interconectado Norte Grande (CDEC SING)
- Ministerio de Medio Ambiente (MMA)
- Superintendencia del Medio Ambiente (SMA)
- Servicio Nacional de Turismo (SERNATUR)
- Comisión Nacional de Riego (CNR)

El detalle de la información requerida se recoge en el Anexo B. Cartas de solicitud de información.

PARTE II. ENFOQUE METODOLÓGICO DE LA DEMANDA HÍDRICA POR RUBRO O ACTIVIDAD ECONÓMICA

CAPÍTULO 3 METODOLOGÍA PARA EL ESTUDIO DE LA DEMANDA HÍDRICA DEL USO: AGUA POTABLE URBANA

3.1 INTRODUCCIÓN

El análisis de la demanda de agua potable urbana se refiere a la necesidad de agua para consumo humano -principalmente- en los núcleos urbanos de Chile abastecidos a través de las empresas sanitarias, reguladas por la Superintendencia de Servicios Sanitarios (SISS).

Así, el agua potable urbana es suministrada por empresas que poseen concesión sobre determinados territorios a lo largo del país. Al año 2015, un 99,7% de la población está cubierta con sus necesidades de agua potable por las empresas sanitarias (SISS, 2015c). Gran parte de dicha población, 99,6% del total de clientes, es atendida por 28 empresas concesionarias a lo largo del país, mientras que el resto de población es abastecida por empresas de menor envergadura.

Mirando hacia el futuro, es indudable que en todas las actividades humanas el uso del recurso hídrico está presente y que todo indica que la dinámica no cambiará en tiempos venideros. La cantidad de agua que se provee y que se usa en las viviendas cumple un rol importante en la salud pública de una comunidad; es por esto que el Estado ha puesto especial énfasis en cubrir casi por completo la necesidad de agua potable en la población urbana de nuestro país, la cual al año 2015 alcanza al 99,97% de cobertura, según datos entregados en SIFAC II (SISS, 2015c). La tendencia mundial prevé que la demanda de agua al año 2050 habrá aumentado un 55% debido principalmente a la creciente urbanización (OECD, 2012) y Chile, siendo un país en vías de desarrollo, no estará al margen de esta situación. A su vez, es prudente asumir que, a medida que el país crezca tanto económica como demográficamente, la demanda de agua potable para el resto de actores participantes en la demanda de agua potable, tales como clientes industriales, comerciales, institucionales y no asociados a inmuebles, aumente también, aún sin presentar una caracterización tan definida en la información dispuesta como el caso de los clientes residenciales.

Queda fuera del alcance de este capítulo la valoración de la demanda de agua potable que alimenta a la población rural, reflejada en un apartado específico para ello (Capítulo 4, relativo al uso de Agua Potable Rural).

3.2 ENFOQUE METODOLÓGICO DE LA ESTIMACIÓN DE LA DEMANDA ACTUAL

3.2.1 Generalidades

La Superintendencia de Servicios Sanitarios (SISS) es el organismo normativo y fiscalizador de las empresas concesionarias que prestan los servicios de agua potable y alcantarillado. Esta entidad se encarga, respecto al agua potable, tal como indica en su web (<http://www.siss.cl/>), de:

- i. El otorgamiento de concesiones de servicios sanitarios;
- ii. La fijación de tarifas por los servicios de agua potable y alcantarillado de aguas servidas que prestan las empresas sanitarias;
- iii. La fiscalización de las empresas sanitarias, particularmente respecto de la calidad del servicio prestado.
- iv. La fiscalización de los establecimientos industriales generadores de residuos industriales líquidos (RILes) que efectúan descargas a las redes públicas de alcantarillado.

En este contexto, la SISS actúa como organismo *centralizador* de la actividad de las empresas sanitarias en lo que respecta a la recopilación de antecedentes útiles para la estimación de la demanda hídrica urbana. Los principales documentos a tener en cuenta fueron:

- i. Registros del Sistema de Facturación Clientes Regulados, Clientes no regulados (52 BIS) y Coberturas (SIFAC II),
- ii. Estudios tarifarios de agua potable y alcantarillado, y
- iii. Planes de desarrollo de concesiones sanitarias vigentes.

El SIFAC II aglutina información del servicio que entregan las empresas sanitarias en el territorio chileno, y será la base para la determinación de la demanda actual de agua potable urbana. A partir de la revisión del SIFAC II, se elaboró un listado de empresas y su cobertura territorial, tal como se muestra a continuación.

Cuadro 3.2-1 Listado de empresas sanitarias

Empresa	Región	Empresa	Región
AGUAS DEL ALTIPLANO	I - XV	AGUAS MAGALLANES	XII
AGUAS DE ANTOFAGASTA	II	AGUAS ANDINAS S.A.	XIII
AGUAS CHAÑAR	III	AGUAS COLINA	XIII
AGUAS DEL VALLE	IV	AGUAS CORDILLERA S.A.	XIII
AGUAS LA SERENA	IV	AGUAS MANQUEHUE	XIII
ESETO S.A.	IV	ASP	XIII
ESSSI	IV - V - IX - XIII	BCC S.A.	XIII
ALGARROBO NORTE	V	COSSBO	XIII
BRISAS DE MIRASOL	V	EMAPAL S.A.	XIII
COOPAGUA LTDA.	V	HUERTOS FAMILIARES	XIII
ESVAL S.A.	V	IZARRA DE LO AGUIRRE	XIII
MIRASOL DE ALGARROBO	V	LA LEONERA	XIII
SASIPA	V	MELIPILLA NORTE	XIII
ESSBIO S.A.	VI - VIII	NOVAGUAS	XIII
AGUAS DEL CENTRO	VII	SANTA ROSA DEL PERAL	XIII
AGUAS SARMIENTO	VII	SELAR S.A.	XIII
COOPERATIVA MAULE	VII	SEMBICORP AGUAS CHACABUCO	XIII
COOPERATIVA SAGRADA FAMILIA	VII	SEMBICORP AGUAS LAMPA	XIII
NUEVOSUR S.A.	VII	SEMBICORP AGUAS SANTIAGO	XIII
AGUAS SAN PEDRO	VIII - X - XIII	SEPPRA S.A.	XIII
AGUAS ARAUCANIA	IX	SERVICIOS SANITARIOS DE LA ESTACIÓN S.A.	XIII
AGUAS QUEPE S.A.	IX	SMAPA	XIII
ESSAL S.A.	X - XIV	AGUAS DÉCIMA	XIV
AGUAS PATAGONIA	XI		

Fuente: Elaboración propia, a partir de SISS (2015c).

De igual manera, el sistema SIFAC II recoge información de los Clientes 52 BIS¹ que corresponde a clientes No Regulados, por encontrarse fuera del territorio operacional de las empresas sanitarias.

¹ Las Prestaciones No Reguladas son todos aquellos servicios en cuya ejecución la empresa de servicios sanitarios no tiene exclusividad, es decir, que pueden ser realizados por terceros o por la empresa sanitaria, donde el usuario decide quien los realiza. El Artículo 52º bis del DFL 382, correspondiente a la Ley General de Servicios Sanitarios, establece que “los prestadores podrán establecer, construir, mantener y explotar sistemas de agua potable, alcantarillado y tratamiento de aguas servidas en el ámbito rural, bajo la condición de no afectar o comprometer la calidad y continuidad del servicio público sanitario”.

3.2.2 Fuentes documentales utilizadas

Las fuentes de información consultadas referentes al cálculo de la demanda de agua potable en zonas urbanas son las siguientes:

- Superintendencia de Servicios Sanitarios (SISS). La SISS, en su base de datos técnicos, mantiene actualizada la información de cada sistema sanitario. Como información relevante para este estudio, se cuenta con:
 - PR027001. Formulario correspondiente al Sistema de Facturación Clientes Regulados, 52 BIS y Coberturas (SIFAC II), del año 2015 (SISS, 2015c).
 - PR018001. Formulario que controla la información de producción de agua de las fuentes, del año 2015 (SISS, 2015b).
- Superintendencia de Servicios Sanitarios (SISS). La SISS dispone de un *shapefile* de las áreas de Territorio Operacional de las empresas sanitarias. Extraído del geoportal de la SISS (<http://geo.siss.cl/geonodo30/index.php?r=site/start&geoprofileId=34><http://geo.siss.cl/geonodo30/index.php?r=site/start&geoprofileId=21>)(página disponible y visitada el 13/04/2018).

3.2.3 Metodología

A partir de listado de empresas del Cuadro 3.2-1, se estructura la búsqueda de antecedentes históricos, utilizando para esto las bases de datos presentadas en SIFAC II, de Clientes Regulados (al interior del territorio operacional) y Clientes No Regulados 52 BIS (fuera del territorio operacional). Dicha base de datos, cuenta con información de consumos totales (m³/año) y número de clientes, por cada localidad donde las empresas sanitarias entregan sus servicios.

Además, se detalla en cada registro, el tipo de cliente y el tipo de servicio otorgado. En la categoría “Tipo de cliente” se describen los siguientes:

- i. Residencial
- ii. Comercial
- iii. Industrial
- iv. Institucional, y
- v. No Asociado a Inmueble.

Respecto al “Tipo de servicio”, se dispone la siguiente diferenciación:

- i. Clientes de Agua Potable (AP), en los que se incluye:
 - a. agua potable y alcantarillado,
 - b. agua potable y alcantarillado con pozo, y

c. sólo agua potable.

ii. Clientes de Aguas Servidas (AS), que corresponde a sólo alcantarillado.

Para la determinación de la demanda de agua potable urbana, se han considerado los datos separados en dos categorías: consumo “residencial” y consumo “otros”, el cual incluye a los clientes comercial, industrial, institucional y no asociado a inmueble. A su vez, se han seleccionado los consumos únicamente de los Clientes de Agua Potable indicados anteriormente. En el caso de los Clientes de Aguas Servidas, se estima que ellos disponen de fuentes propias de abastecimiento de agua.

Con los datos anteriores se estructura una hoja de cálculo en la cual se determinan los consumos totales y el consumo unitario por localidad. Para llevar la información obtenida a nivel subcuenca, se utilizan los *shapefile* de territorios operacionales de cada empresa y de subcuencas, realizando una intersección entre ambas capas. Para el caso de ciudades que se encuentran geográficamente en dos subcuencas, se procedió a dividir el área objeto de análisis mediante una intersección con la cobertura de subcuencas; se asumió una distribución de la población homogénea y esta se ponderó en las nuevas áreas generadas.

Por medio de la tabla generada, es posible estimar los consumos locales de los Clientes Regulados y No Regulados 52 Bis a nivel de subcuenca, separando en consumo “Residencial” y consumo “Otros”. Además, se ha sintetizado la información de la producción de las fuentes, entendida como el volumen de producción de agua requerido en cada subcuenca.

3.3 ENFOQUE METODOLÓGICO DE LA PROYECCIÓN DE LA DEMANDA FUTURA

3.3.1 Generalidades

La demanda futura del recurso hídrico en este uso, considerara la demanda en la fuente como también la demanda en la puerta del cliente para un periodo de tiempo proyectado al año 2030 y 2040 en cada una de las localidades identificadas con consumo de agua potable urbana.

Como bien se mencionó en el apartado correspondiente a la estimación de la demanda actual, los clientes se pueden separar en Clientes Regulados y Clientes No Regulados, principalmente según se ubiquen dentro o fuera del territorio operacional de las empresas sanitarias. Adicionalmente dichos Clientes se dividen las categorías de Clientes Residenciales, Comerciales, Industriales, Institucionales y No asociados a inmueble. Debido a las características de cada tipo de cliente y tendencias observadas en los registros, para esta metodología se considerarán y analizarán los Clientes Residenciales, Clientes Otros (Comerciales, Industriales, Institucionales y No asociado a inmueble) y Clientes 52 BIS de forma separada.

i. Clientes Regulados Residenciales

Respecto a los clientes residenciales y de acuerdo a lo observado en la información recopilada para estimar la demanda actual de este uso, se asume el supuesto de que el volumen anual consumido de agua potable es completamente dependiente del número de clientes asociado a la localidad donde se lleva a cabo dicho consumo. A su vez, el número de clientes es directamente proporcional a la población de la localidad abastecida. A pesar de esto, a medida que la localidad crece (en población y en el nivel de urbanización, y por consiguiente, aumenta el volumen de agua consumida anualmente), un hecho evidente que se observa es que el consumo por habitante tiende a estabilizarse en el tiempo, alcanzando volúmenes donde los requerimientos mínimos de un ser humano sean satisfechos.

Basándose en lo anterior, se analizan los consumos anuales versus el número de clientes² promedio al año en todas las localidades, agrupadas por región. A raíz de ello se observa que existe una diferencia en el comportamiento de estas variables cuando la localidad corresponde a una ciudad más urbanizada y grande; por esto se supuso en el análisis un corte adicional, constituido por las localidades que poseen más de 10.000 clientes. Ejemplo de lo anterior se presenta el siguiente cuadro, el cual muestra el nivel de correlación lineal que presentan las variables en la VII Región del Maule.

Cuadro 3.3-1 Correlación lineal (R^2) entre consumo de agua potable urbana ($m^3/año$) y número de clientes en localidades de la VII Región del Maule.

	R^2
Menos de 10.000 clientes	0,9817
Más de 10.000 clientes	0,9753

Fuente: Elaboración propia basado en datos del SIFAC II (periodo 2011-2015).

Los altos valores obtenidos en los coeficientes de correlación sugieren que las tendencias aplicadas poseen una alta representatividad de los datos. En el caso particular de la XIII Región Metropolitana, en localidades con menos de 10.000 clientes, existe una notoria diferencia en los hábitos de consumo de ciertas localidades, pudiendo generar un desglose mayor.

² De acuerdo al Artículo 53 letra j del DFL MOP N°382/88 Ley General de Servicios Sanitarios, el concepto de cliente corresponde a la persona natural o jurídica que habita y/o reside en el inmueble que recibe el servicio público de distribución de agua potable o de recolección de aguas servidas.

Con la determinación del supuesto previo sobre la existencia de una proporcionalidad directa entre la población y el número de clientes de una respectiva localidad, el análisis se enfocará en la proyección de este último parámetro. Para ello, el Instituto Nacional de Estadística de Chile (INE) cuenta con una proyección de la población al 2020 (INE, 2012), basada en el último censo válido elaborado en el año 2002. Cabe mencionar que esta proyección incluye el desglose regional, lo cual permite analizar particularmente la dinámica poblacional en cada región.

Un antecedente importante a considerar es que, según CEPAL (2004), la tendencia demográfica que experimentaron los países hoy desarrollados estuvo ligada a las transformaciones tanto económicas como a las mejoras en las condiciones de vida de la población, y caracterizada por pasar inicialmente de una alta mortalidad y natalidad a un fase donde la disminución de la mortalidad y permanencia de la natalidad generaron aumentos en las tasas de crecimiento poblacional, para finalmente llegar a un equilibrio con baja mortalidad, natalidad y una bajada en las tasas de crecimiento. Además, en relación a los países de América Latina, expone que se puede identificar que experimentan el mismo proceso demográfico, pero haciendo énfasis en que los cambios ocurrieron de forma mucho más rápida, ya que mientras a países desarrollados les tomó dos siglos en completar el proceso, en la región se está produciendo en pocas décadas.

Observando los datos de población (INE, 2012), en los últimos diez años la tendencia tanto regional como nacional ha sido a la baja en términos de tasas de crecimiento poblacional. En consecuencia con lo descrito anteriormente, se espera seguir con la baja hasta alcanzar un punto de equilibrio. Es por esto que la tendencia de decrecimiento exponencial de los datos resulta la más adecuada para proyectar el crecimiento poblacional. A modo de ejemplo, en la siguiente figura se expone la tendencia a nivel nacional de la tasa de crecimiento utilizando una proyección exponencial; los resultados muestran unas tasas del 0,746% y 0,601% para los años 2030 y 2040, respectivamente.

Figura 3.3-1 Proyección de la tasa de crecimiento poblacional de Chile, periodo 2020-2040



Fuente: Elaboración propia basado en datos INE (INE, 2012).

Por lo tanto, la aplicación de una tendencia de decrecimiento exponencial ($R^2=0,957$) a los datos confirma lo previsto por CEPAL, generando tasas de crecimiento menores a medida que avanzan los años.

Por otra parte, de manera sintética y comparativa, en el anterior estudio de demandas de agua de Chile (DGA-AC, 2007a y 2007b) se utilizó la información descrita en los Planes de Desarrollo existentes para cada localidad, asumiendo la tasa de crecimiento del último año de forma constante hasta la fecha de proyección (2015 y 2030); ante la eventualidad de no tener dicha tasa, se asumió un 2% de crecimiento para tales efectos. En cuanto a la dotación, se asumió como valor constante la última dotación de la cual se tuviese registro, y cuando no se conocía, se asumió 200 L/habitante/día. En perjuicio de lo aplicado en ese estudio, asumir tasas de crecimiento poblacional constante para proyectar en el tiempo se aleja de la dinámica demográfica mundial; por otro lado, la asunción de un patrón de consumo también constante para cada localidad deja de lado lo expuesto anteriormente sobre la variación que presentan los hábitos de consumo a medida que una ciudad se densifica en términos de población.

ii. Clientes Regulados Otros

Respecto a esta agrupación de clientes, es necesario especificar que, según los análisis efectuados en los registros de clientes regulados, las tendencias de cada localidad varían de manera completamente aleatoria y no se identifican patrones de comportamiento de consumo a través del tiempo. Sin embargo, una característica general de la agrupación Cliente Otros, es que analizando los registros existentes (SISS, 2015c), la localidad del Gran Santiago comprende el 42,1% del consumo total al año 2015, siendo éste un patrón reiterado en años anteriores. De hecho, en las bases de los procesos tarifarios, se indica el criterio de que si el consumo de clientes distintos de residenciales (esto es, *Clientes Otros*) es menor al 20% del consumo total de la localidad, la proyección se hace considerando el consumo total, y por lo tanto, no se efectúa una diferenciación entre tipos de clientes para estos casos.

Otro aspecto relevante del consumo de esta categoría de clientes es que, según los registros del total país desde 2006 al 2015 (SISS, 2015c), estos van en aumento, tal como se muestra en el siguiente cuadro.

Cuadro 3.3-2 Registros históricos del consumo de agua potable de Clientes Otros

Año	Consumo Clientes Otros (m ³ /año)
2006	238.858.658
2007	240.080.122
2008	241.614.740
2009	243.407.168
2010	240.653.403
2011	250.234.307
2012	255.377.207
2013	255.846.976
2014	258.937.089
2015	264.579.678

Fuente: Elaboración propia basado en SIFAC II (SISS, 2015c).

Por otra parte, se asume que el PIB nacional está influenciado en gran medida por el sector industrial y comercial. De acuerdo a los registros históricos del Banco Central de Chile (BCN, 2011/2015) en el periodo comprendido entre el año 2008 y el 2015, el PIB ha mostrado un comportamiento de constante aumento. Utilizando la herramienta “REGRESIÓN” de Excel para analizar la correlación del consumo anual de Clientes Otros respecto del PIB nacional en el periodo entre los años 2008-2015, se obtiene la siguiente ecuación de regresión lineal múltiple:

$$Y = 203.549.068,4 - 674391,7781 X_1 + 4,21 \times 10^{-7} X_2$$

Con un coeficiente de correlación múltiple de 0,965 y una significación de F-test de $8,66 \times 10^{-5}$ ($< 0,05$), se puede decir que sí existe relación lineal significativa entre la variable dependiente (consumo anual) y el conjunto de variables independientes (PIB anual y tiempo).

iii. Clientes No Regulados 52 Bis

Tal como se mencionó en la metodología correspondiente a la demanda actual de agua potable urbana, los Clientes 52 Bis corresponden a clientes que poseen servicios sanitarios pero que se encuentran fuera del área de concesión de las empresas sanitarias. Esto quiere decir que estos clientes están principalmente dentro del ámbito rural y/o periurbano, y cuando existen recursos hídricos, capacidad técnica, holguras en la infraestructura sanitaria existente para prestar servicios, las empresas sanitarias pueden ofrecer sus servicios, siempre y cuando la calidad además de la continuidad no se vean afectadas al interior de la zona de concesión.

Las prestaciones que otorgan las concesionarias en estos casos se enmarcan en el ámbito de prestaciones relacionadas no obligatorias. Se rigen por las normas del derecho común, no están sujetas a tarifas fijadas por la autoridad como tampoco le son aplicables las normas que rigen los servicios públicos de agua potable y alcantarillado. Además, cabe destacar que estas condiciones son fiscalizadas por la SISS.

De los registros extraídos del sistema SIFAC II (SISS, 2015c), no es posible encontrar una tendencia generalizada del consumo de estos Clientes, debido principalmente a los diferentes patrones entre localidades de una misma región como también por que se cuenta solo con registros de tres años (2013 – 2015). Sin embargo, analizando localidad por localidad y considerando solo los datos existentes, se puede observar una tendencia del porcentaje del consumo de estos clientes respecto del consumo total.

3.3.2 Fuentes documentales utilizadas

- PR027001. Formulario correspondiente al Sistema de Facturación Clientes Regulados, Coberturas, 52 BIS y Producción (SIFAC II) del periodo 2006-2015 (SISS, 2015c).
- Superintendencia de Servicios Sanitarios (SISS). La SISS dispone de un shapefile de las áreas de Territorio Operacional de las empresas sanitarias. Extraído del geoportal de la SISS: <http://geo.siss.cl/geonodo30/index.php?r=site/start&geoprofileId=21>.

- Proyecciones y estimaciones INE (1990-2002), basado en los resultados del Censo Poblacional 2002 (INE, 2012).
- PIB Regional, periodo 2008 – 2015, extraído de los informes de cuentas nacionales del año 2011 y 2015 (BCN, 2011/2015).

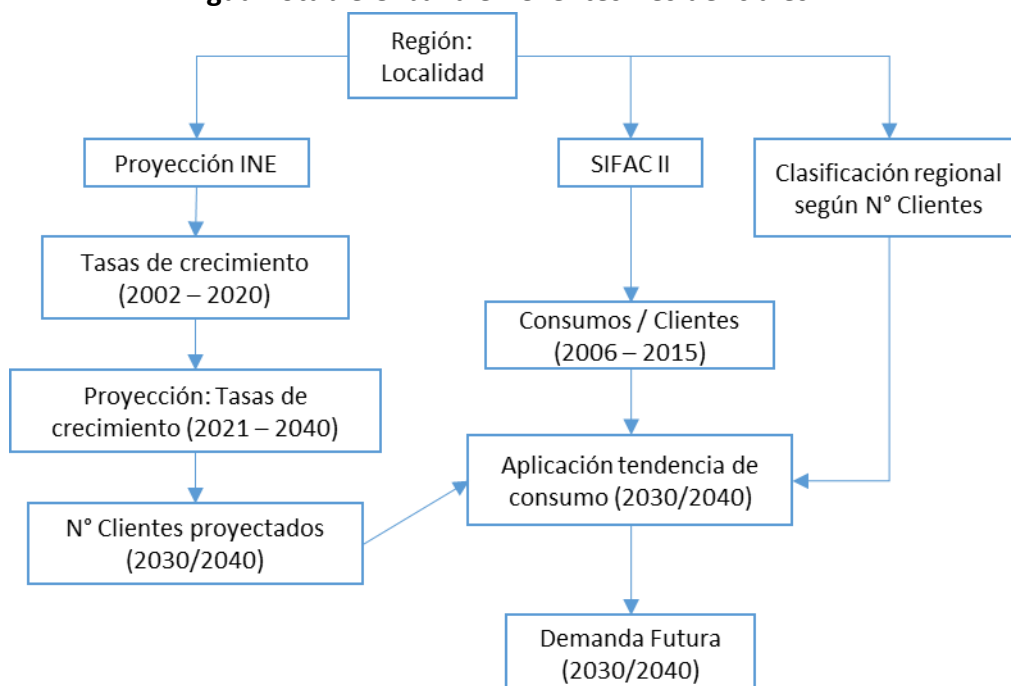
3.3.3 Metodología

De acuerdo a los tres tipos de clientes detectados en el análisis anterior, la metodología para estimar la demanda total de agua potable en el futuro corresponde a la sumatoria de las demandas de cada tipo de cliente. A continuación, se especifican cada una de las metodologías aplicadas por tipo de cliente.

iv. Proyección de demanda de Clientes Regulados Residenciales

Para crear una imagen general de la metodología y las fuentes de información para llevarla a cabo, la siguiente figura esquematiza los procesos que serán descritos más adelante.

Figura 3.3-2 Esquema general de la metodología de proyección de la demanda futura de Agua Potable Urbana en Clientes Residenciales



Fuente: Elaboración propia.

Inicialmente, desde los registros de clientes regulados (SISS, 2015c) se obtienen los consumos y número de clientes anuales de clientes residenciales en cada localidad, durante el periodo 2006 – 2015. Esta información fue la base para estimar las proyecciones.

Por otra parte, y de acuerdo a la región bajo estudio en cada caso, se extraen desde las proyecciones del INE los registros de población para el periodo 2011 – 2020, y se calcula la tasa de crecimiento año a año. Dichas tasas, se proyectan utilizando una tendencia exponencial hasta el año 2040, mediante la función “CRECIMIENTO” de Excel, tal como se mostró en la Figura 3.3-3. Una vez obtenidas las tasas anuales de crecimiento proyectadas, estas son aplicadas al número de clientes y así se obtiene el número de clientes a los años 2030 y 2040.

De acuerdo a la localidad analizada, esta se clasifica según el número de clientes como también por la región a la cual pertenece y se le asocia la ecuación de la función que le corresponda para proyectar el consumo de agua potable (en m³/año), según el número de clientes previamente proyectados. La ecuación de la función en cada caso se determina según el ejemplo analizado en el acápite i. y puede ser fácilmente calculado utilizando las funciones de Excel “TENDENCIA” en el caso de ecuaciones de la recta y “CRECIMIENTO” en el caso de exponenciales. El siguiente cuadro agrupa todas las ecuaciones de la función según el criterio empleado para el caso de ejemplo en la VII Región del Maule.

Cuadro 3.3-3 Tendencias de proyección del consumo anual de agua potable urbana en la VII Región del Maule

	Ecuación de tendencia	R ²
Menos de 10.000 clientes	$y = 126,7x + 4521.1$	0,9817
Más de 10.000 clientes	$y = 163,51 x + 263466$	0,9753

Fuente: Elaboración propia.

v. Proyección de demanda de Clientes Regulados Otros

Desde los registro de Clientes Regulados Otros (SISS, 2015c) en el periodo 2008 - 2015 y siguiendo el criterio establecido en las bases de elaboración de los procesos tarifarios en relación a los Clientes Otros³, inicialmente se aplica un filtro a partir del cálculo del porcentaje del consumo de Clientes Otros respecto del consumo total de clientes regulados de cada localidad , dejando solo los consumos que sean mayores o iguales al 20% del total para

³ Ver comentario al respecto en acápite 3.3.1.1., apartado relativo a Clientes Regulados Otros.

proyectarlos según esta metodología. Los consumos que representen menos del 20% del total fueron incluidos en la proyección de Clientes Residenciales.

Una vez identificadas las localidades que cumplen con la condición anterior, se utiliza la sumatoria de sus consumos totales en cada año de Clientes Otros para el periodo 2008 – 2015 en cada región, en conjunto con los registros del PIB regional extraídos del Banco Central (BCN 2011/2015) para el mismo periodo, según corresponda cada región. A partir de estos datos registrados, se establece una ecuación de regresión múltiple utilizando la herramienta Excel “REGRESIÓN” para cada región.

De los datos registrados de PIB Regional en el periodo 2008 – 2015 y mediante la función “PRONOSTICO.ETS”, se proyecta el crecimiento del PIB regional hasta el año 2040. Con el PIB regional proyectado y los coeficientes de regresión previamente obtenidos, se estima el consumo hasta el año 2040. A partir de esta proyección, se extraen las tasas de crecimiento anual de cada región.

Para estimar el consumo anual de cada localidad separada por el filtro inicial en cada región y en los años previstos, se aplicarán las tasas de crecimiento anual a nivel regional a partir del último registro del SIFAC II en cada localidad.

vi. Proyección de demanda de Clientes No Regulados 52 Bis

Dada la naturaleza de los registros obtenidos desde el SIFAC II para los Clientes No Regulados 52 Bis, no es posible observar una tendencia en los consumos anuales que permitan proyectarlos al futuro. Además, es inherente en esta categoría una variabilidad en cuanto a tipo de cliente (comercial, industrial, institucional o no asociado a inmueble) se refiere. Por esto, se utiliza una relación porcentual promedio respecto del consumo total anual en cada localidad donde existan Clientes 52 Bis.

Para determinar dicha relación porcentual promedio del consumo anual de Clientes 52 Bis respecto del consumo total anual, se utilizan los registros de Clientes Regulados y Clientes 52 Bis de cada localidad en el lapso de tiempo comprendido entre el año 2013 y 2015⁴ (SISS, 2015c).

Los consumos anuales de Clientes Residenciales y Clientes Otros a los años 2030 y 2040, se obtienen de la proyección efectuada previamente según la metodología aplicada para esos tipos de clientes (Acápites iv y v) y se aplica la siguiente ecuación para obtener el consumo anual de Clientes 52 BIS de la localidad estudiada.

⁴ Periodo en el cual se cuenta con información de Clientes 52 Bis.

$$C_{52BIS(i)} = \frac{(C_{R(i)} + C_{O(i)}) \cdot \%_{52BIS}}{(1 - \%_{52BIS})}$$

Donde:

$C_{52BIS(i)}$ Consumo al año i de Clientes 52 Bis por localidad ($m^3/año$).

$C_{R(i)}$ Consumo al año i de Clientes Residenciales por localidad ($m^3/año$).

$C_{O(i)}$ Consumo al año i de Clientes Otros en la localidad ($m^3/año$).

$\%_{52BIS}$ Porcentaje promedio del consumo de Clientes 52 Bis respecto del consumo total anual de localidad en el periodo 2013 – 2015.

vii. Proyección de la demanda en la puerta del cliente

Una vez obtenidos los consumos anuales de cada tipo de cliente (residencial, otros y 52 Bis), estos son sumados para obtener el consumo total anual de cada localidad para los años objetivos (2030 y 2040).

Finalmente, para llevar la información obtenida a nivel subcuenca, se utilizan los *shapefile* de territorios operacionales de cada empresa (localidades) y de subcuencas, realizando una intersección entre ambas capas. Para el caso de ciudades que se encuentran en dos subcuencas, en cada región se hizo el chequeo correspondiente en busca de estos casos y se procedió a dividir el área de la ciudad mediante la intersección del *shapefile* de subcuencas. Se asume una distribución de la población homogénea y esta se ponderó en cada nueva área generada, pudiendo así determinar la proyección de la demanda futura en cada subcuenca involucrada.

viii. Proyección de producción

Las empresas sanitarias realizan permanentemente control de volumen de agua producida a nivel de fuente de agua cruda, lo que se indica como “producción-AP”. Esta información se mantiene vigente y disponible a través del sistema SIFAC (2015c) de la SISS. Asimismo, y tal como se indicó anteriormente, el consumo a nivel de facturación se obtiene también a través del sistema SIFAC (2015c).

De acuerdo a lo definido en la SISS, la pérdida a nivel de producción se define como *“la diferencia entre la producción y la facturación. No toda el agua producida por las empresas llega a ser facturada, debido a pérdidas que se producen en las etapas de producción y distribución, que dependen de múltiples factores, tales como la antigüedad y materiales de los sistemas de agua potable, especialmente conducciones y redes de distribución; el tipo de fuentes de abastecimiento de agua cruda que incide en las necesidades de tratamiento las que a su vez inciden en el nivel de pérdidas; y factores de comercialización como robos y*

hurto, entre otros". A partir de estos registros, se obtuvieron los porcentajes correspondientes a las pérdidas en cada localidad, restándole los consumos también registrados en SIFAC. Con esto se calcula un promedio para el periodo registrado. Finalmente se estima que las pérdidas a futuro se comportaran de manera similar y por tanto el promedio de pérdida de cada región es aplicado a cada valor estimado de consumo.

CAPÍTULO 4 METODOLOGÍA PARA EL ESTUDIO DE LA DEMANDA HÍDRICA DEL USO: AGUA POTABLE RURAL

4.1 INTRODUCCIÓN

En este apartado se analizan las localidades abastecidas a través de los sistemas de Agua Potable Rural (APR) y se pretende realizar la estimación de la demanda hídrica necesaria para cubrir las necesidades de agua potable en el sector rural de Chile.

Los sistemas APR son gestionados por las propias comunidades, prestando servicio en zonas declaradas no urbanas por los respectivos Planos Reguladores Comunes, y organizados mediante Comités y Cooperativas. Estos sistemas se construyen con fondos generalmente públicos y se engloban en el llamado Programa APR de la Dirección de Obras Hidráulicas (DOH) del MOP.

La Subdirección de Agua Potable Rural de la DOH dispone de una base de datos de los sistemas APR, actualizada a fecha de agosto 2016, la cual se obtuvo mediante solicitud formal a dicho organismo. La información proporcionada en el mencionado archivo de DOH (2016) es:

- ✓ Código APR
- ✓ Región, provincia y comuna
- ✓ Tipo de servicio (comité o cooperativa)
- ✓ Nombre APR
- ✓ Año de puesta en marcha
- ✓ Nº de arranques
- ✓ Tipo de APR (concentrada o semiconcentrada)
- ✓ Fondos (FNDR, sectorial)
- ✓ Beneficiarios/as estimado/as

En la tabla siguiente se resume la cantidad de APR presentes por región, los cuales ascienden a 1.736 sistemas a nivel nacional.

Cuadro 4.1-1 Resumen de sistemas APR

Región	Nº sistemas APR	Nº Arranques	Nº Beneficiarios Estimados
XV Arica y Parinacota	25	3.362	13.448
I Tarapacá	21	3.117	12.396
II Antofagasta	10	2.705	10.820
III Atacama	39	4.532	18.062
IV Coquimbo	187	39.302	156.784
V Valparaíso	158	41.282	165.128
XIII Metropolitana	103	45.221	180.884
VI Lib. B. O'Higgins	219	70.529	282.116
VII Maule	273	67.425	269.717
VIII Bío Bío	202	48.602	194.984
IX Araucanía	193	30.509	122.036
XIV Los Ríos	91	16.819	67.285
X Los Lagos	167	30.272	120.895
XI Aysén	38	5.497	21.988
XII Magallanes	10	823	3.292
Total	1.736	409.997	1.639.835

Fuente: Elaboración propia, a partir de DOH (2016).

El número de arranques identificados asciende a 409.997, abasteciendo a una población estimada de más de 1,6 millones de personas. En términos generales, para la determinación de la población beneficiaria, esta base considera un índice habitacional de 4 habitantes por vivienda en todas las regiones del país.

Los sistemas APR se gestaron en sus orígenes para abastecer de agua potable a poblaciones rurales “concentradas”, que actualmente corresponden a localidades con una población entre 150 y 3.000 habitantes y una concentración mínima de 15 viviendas por km de red de agua potable⁵. Habiendo cubierto aproximadamente el 99,8% de esta demanda en el año 2008 (Villaroel, 2012), el Programa se amplió a partir del año 2010 para las localidades “semiconcentradas”, que se definen como aquellas constituidas por un mínimo de 80 habitantes y con una densidad de a lo menos 8 viviendas por cada km de futura red (DOH-Donoso, 2015).

⁵ Dicha definición no coincide, o no se corresponde, necesariamente, con las definiciones de ruralidad que establece el Estado de Chile a través del INE (DOH-DONOSO, 2005).

Cuadro 4.1-2 Resumen de la tipología de los sistemas APR

Región	Nº APR concentrados	Nº APR semiconcentrados	Nº sistemas APR total
XV Arica y Parinacota	21	4	25
I Tarapacá	16	5	21
II Antofagasta	8	2	10
III Atacama	34	5	39
IV Coquimbo	171	16	187
V Valparaíso	152	6	158
XIII Metropolitana	102	1	103
VI Lib. B. O'Higgins	213	6	219
VII Maule	266	7	273
VIII Bío Bío	176	26	202
IX Araucanía	187	6	193
XIV Los Ríos	71	20	91
X Los Lagos	124	43	167
XI Aysén	31	7	38
XII Magallanes	10	0	10
Total	1.582	154	1.736

Fuente: Elaboración propia, a partir de DOH (2016).

Aquellas localidades que no cumplen con los parámetros mínimos de población y viviendas definidas anteriormente formarían parte de la población “dispersa”, la cual constituye un nuevo desafío para el MOP (DOH, 2014b), ya que en la actualidad no está conectada a ningún sistema de agua potable rural en el marco del Programa APR de la DOH.

4.2 ENFOQUE METODOLÓGICO DE LA ESTIMACIÓN DE LA DEMANDA ACTUAL

4.2.1 Generalidades

Los sistemas de APR tienen la misión de administrar, operar y mantener los servicios de agua potable. La asistencia técnica de los servicios APR la realizan empresas externas, llevada a cabo principalmente por las empresas sanitarias privadas que operan en cada región del país.

La Superintendencia de Servicios Sanitarios (SISS) solicita a las empresas sanitarias, entre otros, la remisión de información relativa a los sistemas de agua potable rural a los que se proporcionó asesoría técnica en cada ejercicio. Los datos recopilados en el formulario correspondiente son:

- ✓ Identificación del sistema APR
- ✓ Localidades atendidas
- ✓ Comuna

- ✓ Tipo de servicio (AP, AS, TAS)
- ✓ N° de arranques
- ✓ Estimación de población atendida

Lo anterior se recoge en los formularios PR039001 denominados *Informe APR*. A partir de la revisión de estos formularios de las empresas sanitarias presentados ante la SISS, para el año 2015, se obtienen los siguientes resultados sobre sistemas APR, número de arranques y población atendida:

Cuadro 4.2-1 Resumen de sistemas APR

Región	Nº sistemas APR	Nº Arranques	Nº Beneficiarios Estimados	Índice hab./vivienda
XV Arica y Parinacota	19	3.764	14.705	3,91
I Tarapacá	21	3.224	8.822	2,74
II Antofagasta ⁽¹⁾	-	-	-	-
III Atacama ⁽¹⁾	-	-	-	-
IV Coquimbo	185	42.379	169.348	4,00
V Valparaíso	158	48.457	218.057	4,50
XIII Metropolitana	103	53.892	269.460	5,00
VI Lib. B. O'Higgins	219	84.572	380.619	4,50
VII Maule	276	84.779	339.116	4,00
VIII Bío Bío	200	57.960	289.800	5,00
IX Araucanía	210	34.066	143.152	4,20
XIV Los Ríos	87	20.208	101.040	5,00
X Los Lagos	164	34.890	174.450	5,00
XI Aysén	37	6.049	24.196	4,00
XII Magallanes	10	992	4.193	4,23
Total	1.689	475.232	2.136.958	4,50

⁽¹⁾ No se registran empresas sanitarias que realicen asistencia técnica en estas regiones.

Fuente: Elaboración propia, a partir de SISS (2015d).

Al respecto, cabe mencionar las siguientes consideraciones:

- Número de sistemas APR. Se contabilizan 1.689 sistemas, y adicionando los 49 APR presentes en las regiones de Antofagasta y Atacama (existentes según datos de DOH (2016)), alcanzan los 1.736 sistemas APR.
- Número de arranques. Según DOH (2016), el número de arranques asciende a 409.997, mientras que las empresas reportan un total de 475.232. Añadiendo los correspondientes a las regiones de Antofagasta y Atacama (7.237 unidades según DOH (2016)), resulta un total de 482.469 arranques a nivel nacional. Según lo observado en

estas fuentes de información, se cree que la diferencia entre ambas radica principalmente en que DOH (2016) tiene el registro de los APR a agosto 2016, pero con información de diseño de estos según el año de puesta en marcha, mientras que SISS (2015d), presenta el registro de sistemas hasta 2015 pero con información de arranques actualizada. Por lo tanto, la diferencia entre sistemas de una fuente y otra corresponden a los APR construidos entre el 2015 y agosto 2016.

- Respecto al número de beneficiarios estimados e índice de habitabilidad, cabe señalar que, si bien la DOH considera un índice de 4 habitantes por vivienda, las empresas sanitarias manejan generalmente ratios superiores, tal como se muestra en la tabla anterior, con un valor promedio de 4,5 hab./viv. Esto puede ser una de las causas por las que el resultado arrojado por DOH en cuanto a población bajo sistemas APR es inferior a la totalidad estimada por las empresas sanitarias.

Respecto de las dotaciones, se analizaron varias Declaraciones de Impacto Ambiental (DIA) de sistemas de agua potable rural a lo largo de todo el país y se extrajeron los valores de dotación (l/hab./día) utilizados en los diseños. Adicionalmente, se analizaron los consumos unitarios de agua potable urbana en varias localidades con menos de 1000 clientes, tomando el supuesto de que una localidad con estas características se asemeja a una localidad con APR. De acuerdo a la información recopilada, se elaboró el siguiente cuadro resumen con promedios de dotación agrupados en zonas, considerando además un índice de 4,5 habitante/vivienda promedio según lo comentado anteriormente.

Cuadro 4.2-2 Dotaciones promedio observadas

	Regiones	DIA (l/hab./día)	APU (l/hab./día)
Norte	XV-I-II-III-IV	100	94
Centro	V-XIII-VI-VII	150	140
Sur	VIII-IX-XIV-X-XI-XII	130	82

Fuente: Elaboración propia.

Además, el “Manual de soluciones de saneamiento sanitario para zonas rurales” (SUBDERE, 2009), propone adoptar un nivel de dotación media anual que fluctúe aproximadamente entre 100 y 140 l/hab./día, dependiendo de la zona del país en la cual se sitúen.

4.2.2 Fuentes documentales utilizadas

Las principales fuentes de información en la estimación de la demanda hídrica de los sistemas APR son las siguientes:

- Superintendencia de Servicios Sanitarios (SISS). La SISS, en su base de datos técnicos, mantiene actualizada la información de los sistemas APR donde presta asesoría técnica a Comités y Cooperativas:
 - PR039001. Formulario correspondiente a los Informes APR. Año 2015.
- Sistemas APR de la Subdirección de Agua Potable Rural de la DOH. Dispone de una base de datos georreferenciada (*shapefile*), con fecha de actualización hasta agosto de 2016, de estos sistemas a nivel nacional y escala comunal, identificando el año de puesta en marcha, el número de arranques y los beneficiarios estimados⁶. Este archivo registra los sistemas instalados desde 1960 hasta 2016.
- Base de datos DOH de agosto de 2016 con el registro de los sistemas APR a la fecha.
- Localidades a nivel nacional. Disponible en un *shapefile* en la mapoteca de DGA.
- Manual de soluciones de saneamiento sanitario para zonas rurales, editado por la SUBDERE (2009). Incluye referencia de dotaciones en sistemas APR de Chile.
- Estudio DOH - Identificación de brechas para la disponibilidad de agua potable rural, Chile: todos con agua / Dirección de Obras Hidráulicas - Dirección de Planeamiento, Ministerio de Obras Públicas, Chile.

4.2.3 Metodología

Se tomarán los sistemas de APR de la base de datos DOH (2016) para cada región, donde por medio de los códigos de cada APR se georreferenciarán utilizando el *shapefile* de DOH del año 2015. Para los sistemas de DOH (2016) que no se encuentren en el *shapefile* 2015, se utilizará el *shapefile* de localidades para georreferenciarlos. Se consideran, además, sólo los sistemas puestos en marcha del año 2015 hacia atrás, por el contrario, los que tengan fecha 2016 serán estimados en la demanda futura de este mismo uso.

Una vez georreferenciados en su totalidad, se utiliza la información de SISS (2015d) para actualizar la información de arranques y población beneficiaria en los casos que el año de

⁶ Sobre este *shapefile* cabe mencionar que no existe certeza si la georreferenciación corresponde a la fuente (sondaje o toma de agua superficial) o bien al estanque y/o caseta del servicio.

puesta en marcha sea más antiguo que esta fuente de información. En caso de no encontrar información de algún sistema APR en esta fuente, se utilizará la información de DOH (2016). Posteriormente se utilizan geoprocetos para asignar subcuencas a cada sistema APR.

De acuerdo a los datos observados en el Cuadro 4.2-2 y el “Manual de soluciones de saneamiento sanitario para zonas rurales” (SUBDERE, 2009), el consultor estima conveniente adoptar los siguientes valores de dotación para cada zona.

Cuadro 4.2-3 Dotaciones a emplear en el cálculo de la demanda APR

	Regiones	Dotación (l/hab./día)
Norte	XV-I-II-III-IV	100
Centro	V-XIII-VI-VII	140
Sur	VIII-IX-XIV-X-XI-XII	120

Fuente: Elaboración propia.

Debido a que la metodología de caudales de reserva de la DGA y la propuesta para determinar demandas efectivas por tipo de uso difieren y tienen objetivos distintos, el consultor estimó necesario la búsqueda de criterios más ajustados a las dotaciones a emplear. Es por esto que, se analizaron distintas fuentes de información referidas a dotaciones de consumo en diversas localidades del país, llegando así a un valor promedio y representativo de cada zona Norte, Centro y Sur.

La demanda de APR se determina como el producto de los beneficiarios estimados por la dotación correspondiente a la región bajo estudio.

ix. Localidades sin sistema APR

Por otra parte, se cuenta con la existencia de localidades que no son abastecidas por APR y que tampoco están en proceso de construir uno, estas localidades sin sistema APR, fueron reconocidas por medio de fichas presentadas en el estudio DOH (2014b), donde se extrae todos los datos relevantes presentados, tales como, Comuna, Nombre o Localidad, Abastecimiento actual, número de viviendas y coordenadas. A partir de esto se esquematiza la información y se georreferencia para su posterior asociación a Subcuencas.

El número de beneficiarios se estima a partir del número de viviendas y un factor arbitrario de 4,5.

La dotación utilizada corresponde a la de la región bajo estudio, pero se le asigna un factor según el tipo de abastecimiento actual, utilizando el siguiente criterio:

- Camión Aljibe + APR: 0,8
- Camión Aljibe, Red Artesanal, Sin información u otro: 0,5

Finalmente, la demanda de localidades sin APR se calcula del producto entre el número de beneficiarios y la dotación ajustada según el factor correspondiente.

4.3 ENFOQUE METODOLÓGICO DE LA PROYECCIÓN DE LA DEMANDA FUTURA

4.3.1 Generalidades

Tal como se mostró anteriormente, los sistemas APR se pueden clasificar en sistemas concentrados y semiconcentrados, según el número de población abastecida y la densidad de esta en relación a los kilómetros de red de agua potable, por lo tanto, estas características son determinadas por las localidades donde abastecen los APR. A la fecha, según la información entregada por la DOH es posible cuantificar el número y cada tipo de sistema a lo largo del país. Otro dato importante es que las empresas sanitarias deben prestar asesoría técnica a los sistemas de agua potable rural, por lo cual estas mantienen el registro para posteriormente declararlo a la SISS.

Cuando una localidad alcanza una densidad habitacional suficiente para ser categorizada de *dispersa a localidad semiconcentrada*, esta pasa a ser parte del Programa Nacional de Agua Potable Rural bajo el Plan de Localidades Semiconcentradas (PLS). Para concretar un sistema APR tomaba aproximadamente 3 años y medio, pero en la actualidad gracias a la nueva metodología planificada por la DOH, se estima un periodo de 2 años para la desarrollar un sistema APR hasta su construcción. La metodología actual propone 2 fases de desarrollo: Fase 1, comprende la pre factibilidad, factibilidad y el diseño de ingeniería de los proyectos. Fase 2, se ejecutan las obras civiles incluyendo las pruebas de instalaciones y equipos.

En el estudio de DOH (2014b), se pueden identificar los sistemas APR que se encuentran en alguna de las dos fases mencionadas anteriormente, además de los que se encuentra solo como iniciativa, especificados en el documento como “Idea”. Además, en este estudio se identifican las zonas desprovistas de abastecimiento de agua potable rural con el estándar MOP, ya que no poseen APR instalados o en funcionamiento ni tampoco planeados a futuro cercano.

4.3.2 Fuentes documentales utilizadas

- Base de datos DOH de agosto de 2016 con el registro de los sistemas APR a la fecha.

- PR039001. Formulario correspondiente al informe de Sistemas de Agua Potable Rural (SIFAC II) de el periodo 2012-2015. APR existentes, diferenciando entre concentrados y semiconcentrados.
- *Shapefiles*: APR existentes, APR en Plan de Localidades Semiconcentrados (PLS), Entidades Rurales (polígonos).
- Proyecciones y estimaciones INE (1990-2002), basado en los resultados del Censo Poblacional 2002.
- Estudio DOH - Identificación de brechas para la disponibilidad de agua potable rural, Chile: todos con agua / Dirección de Obras Hidráulicas - Dirección de Planeamiento, Ministerio de Obras Públicas, Chile.

4.3.3 Metodología

Como se identificó en la metodología anterior, es posible utilizar la información ya extraída de los sistemas APR que se encuentran en funcionamiento hasta el año 2016 con información actualizada respecto al número de arranques y beneficiarios al 2015, para proyectar la demanda asociada. Además de estos sistemas, del estudio DOH (2014b) es posible extraer información de localidades PLS y localidades sin suministro de agua por medio de sistemas rurales. Por lo tanto, esta metodología consta de la proyección de:

- Localidades con APR Concentrados y Semiconcentrados al 2015.
- Localidades pertenecientes al PLS.
- Localidades sin sistema APR.

Por otra parte, se cuenta con la proyección de la población rural del último censo válido, correspondiente al año 2002 (INE, 2002), de los datos entregados en este documento, se calculan las tasas de crecimiento anual. Para años posteriores se utilizan una proyección exponencial de la tendencia de las tasas de crecimiento histórico (entre el año 2010 y el 2020), apreciándose en la mayoría de los casos un decrecimiento de las tasas, lo que quiere decir, que la población crece, pero cada vez a un ritmo menor. Así por último se desarrolla la metodología de acuerdo a la clasificación de localidades entregadas más arriba.

x. Localidades con APR Concentrados y Semiconcentrados al 2015.

De la información generada en la metodología para demanda actual, se aplican las tasas de crecimiento poblacional hasta el año 2040 a partir del número de beneficiarios al 2015. Del

producto entre esta proyección del número de beneficiarios y la dotación asociada a la región, se obtiene la demanda proyectada hasta el año 2040.

xi. Localidades pertenecientes al PLS.

Se extraen las localidades PLS desde el estudio DOH (2014b) y se georreferencian mediante el shapefile asociado a esta información, siguiendo con un geoproceto (SIG) para asignar cada localidad a una Subcuenca. Existen localidades en PLS donde ya han sido construidos y puesto en marcha los sistemas APR, por lo tanto, estos registros se eliminan ya que están siendo considerados en *“Localidades con APR Concentrados y Semiconcetrados al 2015”*.

Según la fase en que se encuentra el proyecto en cada localidad, se procederá de manera diferenciada. Siendo la proyección de Fase I iniciada en el año 2020, Fase II iniciada en el 2016 e Idea iniciada en el 2025.

Estas localidades cuentan con el número de arranques y beneficiarios de diseño, por lo tanto, según el año que corresponda iniciar la proyección, se utilizan estos datos para proyectar el número de beneficiarios estimados hasta el año 2040, para posteriormente calcular la demanda mediante el producto de beneficiarios en cada año y la dotación que corresponda a la región estudiada.

xii. Localidades sin sistema APR

La información para estas localidades se obtiene de las fichas presentadas en el estudio DOH (2014b), donde se extrae todos los datos relevantes presentados, tales como, Comuna, Nombre o Localidad, Abastecimiento actual, número de viviendas y coordenadas. A partir de esto se esquematiza la información y se georreferencia para su posterior asociación a Subcuencas.

El número de beneficiarios se estima a partir del número de viviendas y un factor de 4, y se proyecta usando las tasas de crecimiento poblacional hasta el año 2040.

La dotación utilizada corresponde a la de la región bajo estudio, pero se le asigna un factor según el tipo de abastecimiento actual, utilizando el siguiente criterio:

- Camión Aljibe + APR: 0,8
- Camión Aljibe, Red Artesanal, Sin información u otro: 0,5

Finalmente, la demanda se calcula del producto entre el número de beneficiarios en cada año y la dotación ajustada según el factor correspondiente.

CAPÍTULO 5 METODOLOGÍA PARA EL ESTUDIO DE LA DEMANDA HÍDRICA DEL USO: AGRÍCOLA

5.1 INTRODUCCIÓN

Los suelos de cultivo en Chile según el último censo nacional agropecuario, en el año 2007, superaron los 2 millones de hectáreas⁷(INE, 2009). La producción agrícola está extendida en la mayor parte del país, excepto las regiones extremas. Para contextualizar este panorama agrícola, a continuación, se resumen los rubros con mayor superficie plantada (ODEPA, 2017):

- *Cereales.* La superficie cultivada es de aproximadamente 576 mil hectáreas, de las cuales un 44% corresponde a trigo, un 24% a maíz y un 22% a avena. Las siembras se concentran entre las regiones de O'Higgins hasta La Araucanía.
- *Frutas frescas.* La superficie frutícola nacional alcanza a 294.000 hectáreas, entre las regiones de Atacama y Los Lagos. El sector produce cerca de 5 millones de toneladas, de las cuales se exportan 2,6 millones como fruta fresca, generando más de USD 4.000 millones anualmente. Chile es el primer exportador frutícola del hemisferio sur y líder exportador mundial de uva de mesa y arándanos.
- *Viñedos.* Las viñas para vinificación actualmente ocupan más de 125 mil hectáreas, de las cuales se están obteniendo producciones del orden de 1.200 millones de litros. Las exportaciones de vinos y mostos de 2012 se aproximaron a 700 millones de litros, por un valor superior a USD 1.700 millones. Chile está ocupando el quinto lugar entre los exportadores mundiales de vino.
- *Cultivos industriales.* La superficie cultivada es de aproximadamente 100 mil hectáreas, principalmente raps, lupino y remolacha. Las siembras se concentran en las regiones del Bío Bío y La Araucanía.
- *Hortalizas frescas.* De acuerdo a las estimaciones del INE, la superficie hortícola nacional alcanzó casi 70 mil hectáreas el año 2014 y el 84% se encuentra entre las regiones de Coquimbo y del Maule. Las hortalizas con mayor superficie cultivada son el choclo, la lechuga y el tomate para consumo fresco.

⁷ En esta cifra están incluidos los cultivos anuales y permanentes, forrajeras permanentes y de rotación, y suelos en barbecho y descanso.

- *Papas.* Anualmente se cultivan alrededor de 50 mil hectáreas con papas. La producción es destinada casi totalmente al mercado interno. Chile tiene variedades nativas de papa, lo que constituye un patrimonio genético para el país.

Por otro lado, la superficie ocupada por praderas, tanto naturales como mejoradas, ascendió a más de 11,8 millones de hectáreas (INE, 2009).

5.2 ENFOQUE METODOLÓGICO DE LA ESTIMACIÓN DE LA DEMANDA ACTUAL

5.2.1 Generalidades

La demanda hídrica del sector agrícola constituye un ítem de gran importancia en los usos consuntivos de Chile. El sector agrícola es el principal usuario de agua, con extracciones de alrededor de un 73% del total país (MOP, 2013), por lo que el peso de este sector en el cómputo global de requerimientos hídricos es de alta importancia. Al respecto, cabe mencionar que, según el VII Censo Agropecuario y Forestal del año 2007, la superficie regada fue de 1,09 millones de hectáreas. Por otro lado, cabe señalar que existe una agricultura de secano de considerable proporción, la cual, si bien no se abastece del recurso hídrico superficial o subterráneo a través del riego, se desarrolla al amparo de las precipitaciones; lo anterior implica que, a nivel de subcuenca (y cuenca y región, por extensión), estas hectáreas cultivadas también tienen una demanda hídrica potencialmente cuantificable.

Por ello, la estimación de la demanda hídrica del sector agrícola se establecerá a dos escalas, atendiendo a la utilidad de los resultados obtenidos:

- Determinación de la demanda hídrica agrícola. Constituye la necesidad de agua, en términos brutos, que requiere la superficie agrícola del país en la actualidad, a partir de la estimación de los requerimientos evapotranspirativos de los cultivos, según su tipología. No contempla aportaciones por precipitación ni riego; por tanto, tampoco refleja las eficiencias de aplicación que pudieran derivarse de este último. De esta forma, esta valoración refleja la cantidad de agua necesaria para el desarrollo de las áreas cultivadas en cada unidad territorial (subcuenca, cuenca, región), entendida únicamente en concepto de evapotranspiración.
- Determinación de la demanda de riego. Cabe diferenciar acá dos términos distintos, los cuales se exponen a continuación:
 - Demanda neta de riego. Este concepto tiene en cuenta las aportaciones de las lluvias a lo largo del año productivo; básicamente constituye la diferencia, de forma mensual, entre la demanda hídrica agrícola expuesta anteriormente y las precipitaciones efectivas en el área de estudio.

- o Demanda bruta de riego. Corresponde a la demanda neta por un coeficiente que refleja la eficiencia de aplicación de riego; éste es variable en función del método de riego empleado.

Del universo agrícola expuesto en el acápite de introducción, cabe señalar una gran diferencia en la forma de producción: si se trata de zonas de riego o de secano. Lo anterior implica que las superficies en riego necesitan un aporte hídrico extra a las precipitaciones, mientras que las áreas agrícolas de secano se abastecen únicamente de los aportes de lluvia.

Por lo anterior, para el caso de las áreas de secano, aplica únicamente la estimación de la demanda hídrica agrícola; mientras que para las áreas bajo riego se obtendrá además la demanda de riego (neta y bruta, o tasa de riego). En el acápite 5.2.3 se expone en detalle el proceso de cálculo en cada caso.

5.2.2 Fuentes documentales utilizadas

Las referencias utilizadas en la estimación de la demanda hídrica agrícola se indican a continuación:

- El VII Censo Nacional Agropecuario, año 2007, realizado por el INE, constituye la fuente de información principal sobre la superficie agrícola y tipología de cultivos. Éste aporta información a nivel de *distrito censal*, para las diferentes clases de producción, estructurada en grupos de cultivos. Además, el censo aporta información sobre el tipo de riego empleado, también por *distrito censal*, recogiendo información de:
 - ✓ Superficie bajo riego.
 - ✓ Superficie de secano.
- El VI Censo Nacional Agropecuario, año 1997, realizado por el INE. Dispone, igual que el VII Censo, de la información de superficies agrícolas (de riego y de secano) estructurada según cultivos a escala de distrito censal.
- La publicación “Agricultura en cifras. Análisis del VII Censo nacional agropecuario y forestal” (ODEPA, 2009). Resume las variaciones en el uso del suelo agropecuario y forestal chileno, a través de la comparación de los censos agropecuarios de 1976, 1997 y 2007.
- Los Catastros Frutícolas de ODEPA-CIREN de los años 2014-2016. Proporcionan información de superficie por tipo de frutal, con información georreferencia (aproximada) de la ubicación de los predios, accesible desde la web icet.odepa.cl.

Aporta también detalle del sistema de riego empleado (si aplica). Concretamente, los documentos son:

- o Catastro Frutícola de la Región de Valparaíso (ODEPA-CIREN, 2014a).
 - o Catastro Frutícola de la Región Metropolitana (ODEPA-CIREN, 2014b).
 - o Catastro Frutícola de la Región de Atacama (ODEPA-CIREN, 2015a).
 - o Catastro Frutícola de la Región de Coquimbo (ODEPA-CIREN, 2015b).
 - o Catastro Frutícola de la Región de O'Higgins (ODEPA-CIREN, 2015c).
 - o Catastro Frutícola de la Región de Arica y Parinacota (ODEPA-CIREN, 2016a).
 - o Catastro Frutícola de la Región de Aysén (ODEPA-CIREN, 2016b).
 - o Catastro Frutícola de la Región de Biobío (ODEPA-CIREN, 2016c).
 - o Catastro Frutícola de la Región de La Araucanía (ODEPA-CIREN, 2016d).
 - o Catastro Frutícola de la Región de Los Lagos (ODEPA-CIREN, 2016e).
 - o Catastro Frutícola de la Región de Los Ríos (ODEPA-CIREN, 2016f).
 - o Catastro Frutícola de la Región de Maule (ODEPA-CIREN, 2016g).
 - o Catastro Frutícola de la Región de Tarapacá (ODEPA-CIREN, 2016h).
- El Catastro Vitícola Nacional 2014 (SAG, 2015). Proporciona valores de superficies viníferas y pisqueras por comuna en las regiones vitícolas de Chile. También recopila datos del régimen hídrico (riego/secano) de las plantaciones a escala regional.
- Estadísticas productivas agrícolas publicadas en la web de ODEPA (<http://www.odepa.gob.cl/estadisticas-del-sector/estadisticas-productivas>) (página disponible y visitada el 13/04/2018).:
 - o Estadística de frutales: Evolución de la superficie frutícola por región. Hectáreas catastradas totales regionales, periodo variable según región (1997-2016). (ODEPA, 2016a).
 - o Estadística de cultivos: Información regional de superficie sembrada, producción y rendimientos anuales. Incluye una estimación de superficie regional sembrada de cultivos anuales (IV a XIV regiones), años 2007-2015. (ODEPA, 2016b).
 - o Estadística de hortalizas: Superficie cultivada con hortalizas. Incluye la estimación de la superficie cultivada con hortalizas por región, año 2015. (ODEPA, 2016c).
 - o Estadística de vides: Superficie y producción de vides. Proporciona la evolución de la superficie para vinificación, de mesa y pisqueras entre 1990 y 2015. (ODEPA, 2016d).
- Evapotranspiración de referencia para la determinación de las demandas de riego en Chile (CNR AGRIMED, 2015).

- Coeficientes de cultivo (K_c) de la publicación FAO en su Boletín N° 56 para la determinación de las necesidades de agua de riego.
- Fichas Productivas y Económicas de las Zonas Homogéneas Agropecuarias (ZHA) incluidas en el documento “Diagnóstico Perfil Agroeconómico mediante Estándares de Producción” (CNR-MdeA, 2013).
- Isoyetas del estudio “Balance Hídrico de Chile” (DGA, 1987). Se utiliza el *shapefile* correspondiente incluido en la mapoteca de la DGA.
- Registros históricos de precipitaciones mensuales de la red meteorológica de la DGA, extraídos desde la plataforma web del Explorador Climático del Centro de Ciencias del Clima y la Resiliencia (CR)² de la Universidad de Chile (<http://explorador.cr2.cl/>).
- Eficiencias de aplicación de agua según método de riego, establecidas por el “Manual Técnico de presentación de proyectos de obras de tecnificación de riego” en el ITT-02 de la Comisión Nacional de Riego (CNR, 2015).
- Estadística Ley 18.450, publicada en la web de la Comisión Nacional de Riego (<http://www.cnr.gob.cl/Home/Paginas/EstadisticasConcursos.aspx>) (CNR, 2017).

5.2.3 Metodología

La estimación de la demanda de agua del sector agrícola se determina de forma indirecta calculando sus necesidades evapotranspirativas, a partir de superficies y tipología de cultivo. Con ello se obtiene la demanda hídrica agrícola, equivalente a lo que se considera agronómicamente la demanda bruta de riego, pero aplicada tanto a zonas bajo riego como a superficies productivos agrícolas en secano.

Posteriormente, y exclusivamente para la superficie regada, en base a las precipitaciones de cada subcuenca, se calcula la demanda neta de riego, esto es, la diferencia entre la demanda bruta y las aportaciones de lluvia, obteniendo valores de demanda neta de riego. Finalmente, aplicando las eficiencias en la aplicación de riego, se determina la demanda bruta de riego.

Las etapas para su determinación, tanto de la *demanda agrícola* como la *demanda de riego*, se exponen a continuación.

5.2.3.1 Estimación de la Demanda Hídrica Agrícola actual

En primer lugar, se debe estimar la superficie agrícola actual del año de referencia (2015), considerando tanto las hectáreas bajo riego como aquellas cultivadas en secano. Posteriormente, la demanda hídrica agrícola corresponde a las necesidades evapotranspirativas de los cultivos de dicha superficie agrícola.

A continuación, se expone el proceso de cálculo aplicado.

xiii. Estimación de la superficie agrícola actual

- **Superficies agrícolas del VII Censo Agropecuario (año 2007) y tipología de cultivos**

Se toma como base de cálculo las planillas del VII Censo Agropecuario y Forestal, el cual corresponde al año 2007, en que se identifica, para cada distrito censal, la superficie de los diferentes grupos de cultivos, tal como se resume en el Cuadro 5.2-1.

Cuadro 5.2-1 Información de cultivos recopilados del VII Censo Agrícola

Grupo de cultivo	Tipología de producción (y unidades)
(1) Cereales, Leguminosas, Tubérculos y Cultivos Industriales, y (2) Forrajeras Anuales	Riego (ha) / Secano (ha)
(3) Forrajeras Permanentes	Riego (ha) / Secano (ha)
(4) Hortalizas, (5) Flores, y (6) Semilleros	Aire libre (ha) / Invernadero (m ²) / No regadas (ha)
(7) Viñas, y (8) Parronales	Riego (ha) / Secano ⁸ (ha)
(9) Frutales ⁹	En formación (ha) / En producción (ha) / No regadas (ha)
(10) Praderas Mejoradas	- (ha)
(11) Praderas Naturales	- (ha)
(12) Barbechos y Descanso	- (ha)

Fuente: Elaboración propia.

Para sistematizar la información del censo, se procedió a determinar las cifras a escala distrital siguientes:

- Superficie de riego (ha). A partir de la suma de los ítems:
 - Cultivos y Forrajeras Anuales (Superficie Física), en riego (ha).

⁸ La categoría "Parronales" corresponde íntegramente a superficie en riego.

⁹ Corresponde a los valores de Superficie Física Plantación Compacta de Frutales; incluye Huertos Caseros.

- Forrajeras Permanentes, en riego (ha).
 - Hortalizas, Flores y Semilleros (Superficie Física), en riego (ha) = aire libre (ha) + invernadero (ha) – secano¹⁰ (ha).
 - Viñas (Tintas y Blancas), en riego (ha); y Parronales, en riego (ha).
 - Frutales (Superficie Física Plantación Compacta), en riego (ha) = en formación (ha) + en producción (ha) – no regados (ha).
- o Superficie de secano (ha). A partir de la suma de los ítems:
- Cultivos y Forrajeras Anuales (Superficie Física), en secano (ha).
 - Forrajeras Permanentes, en secano (ha).
 - Hortalizas, Flores y Semilleros (Superficie Física) = en secano¹¹ (ha).
 - Viñas (Tintas y Blancas), en secano (ha).
 - Frutales (en producción), no regados (ha).
 - Praderas Mejoradas (ha).
 - Praderas Naturales (ha).
 - Barbechos y Descansos (ha).

La información obtenida está referida al año 2007, procedente de “datos duros” del censo agrícola más reciente al momento de elaboración del presente estudio. Para estimar la demanda hídrica al año 2015 es necesario, por tanto, proyectar dichas superficies agrícolas del 2007 al 2015, tal como se expone en el siguiente apartado.

▪ Estimación de las superficies agrícolas al año 2015 por distrito censal

Para estimar las superficies agrícolas al año 2015, a partir de los registros del VII Censo Agrícola (año 2007), se recopilan datos más recientes, así como también precedentes al mismo para establecer una tendencia histórica donde no se disponga de mayor información.

Los datos posteriores al VII Censo utilizados son:

- o Catastros frutícolas de ODEPA-CIREN, años 2014, 2015 o 2016 según región. Se trabajan los datos disponibles de la siguiente forma:
 - i. Se cruza el *shapefile* de cada catastro regional con el *shapefile* de distrito censal; a partir de la tabla de atributos generada, se suman las superficies en riego/en secano por distrito. Señalar que los catastros disponibles corresponden a las regiones: XV, I, III, IV, V, XIII, VI, VII, VIII, IX, XIV, X y XI.

¹⁰, Superficies en secano en hortalizas, flores y semilleros determinadas proporcionalmente a los valores de hectáreas en secano para superficies “cultivadas” de cada una de las categorías.

- ii. Si el catastro recoge datos del 2014 o del 2016, se ajustan las cifras tendencialmente al año 2015 a partir de las hectáreas catastradas en años anteriores (ODEPA, 2016a), y se aplica la variación regional obtenida de forma homogénea a todos los valores distritales. Lo anterior aplica a las regiones: V, XIII, VI, VIII, IX, XIV y X.
 - iii. Si el catastro es del año 2015, se consideran directamente las superficies obtenidas (regiones III, IV y VI) en la categoría de “Frutales”.
- o Catastro vitícola del SAG, año 2014. Se procede de la siguiente manera:
 - i. Se calculan las superficies vitícolas totales por comuna, y se proyectan al año 2015 aplicando uniformemente la variación anual 2014/15 a escala nacional (correspondiente al 3,2%), extraída de ODEPA (2016d).
 - ii. Se determina a partir de los datos de régimen hídrico de SAG (2015), a escala regional, el porcentaje de superficie en riego o en secano de vides y parronales. Esta proporción se distribuye en las cifras obtenidas en el paso i.
 - iii. Para estimar una desagregación de los datos hasta distrito censal, se mantiene la distribución porcentual obtenida en el censo del 2007 para viñas y parronales.
 - iv. Las regiones con información en el Catastro Vitícola son: I, II, III, IV, V, XIII, VI, VII, VIII, IX, XIV y X.
- o Estimación de superficie con hortalizas (ODEPA, 2016c). Se estima la superficie al año 2015 de la siguiente forma:
 - i. Se toman los valores de superficie total cultivada (hectáreas) a escala regional de hortalizas, y se determina la variación 2007/2015 a partir del total regional recogido en el censo.
 - ii. Se traslada dicha variación a la superficie física de hortalizas, manteniendo la proporción riego/secano del censo. Por último, se transpone la proporción de hortalizas obtenidas junto con la categoría flores y semilleros. Esta estimación se aplica en las regiones: XV, III, IV, V, XIII, VI, VII, VIII y IX.
- o Estimación de superficie con cultivos anuales (ODEPA, 2016b). Se procede de forma análoga al caso de las hortalizas:
 - i. Cabe señalar que los datos de ODEPA reflejan cereales, leguminosas y tubérculos, y cultivos industriales (no forrajeras anuales, de forma similar al caso de flores o semilleros del punto anterior).
 - ii. Las regiones con información disponible son: IV, V, XIII, VI, VII, VIII, IX, XIV y X.

Para el resto de casos (grupos de cultivo y/o regiones), se calculará una superficie agrícola al 2015 de forma tendencial con registros históricos, mediante la función “TENDENCIA” de Excel. Así, la información utilizada anterior al VII Censo consiste en:

- o VI Censo Nacional Agropecuario (INE, 1997), del cual se toman los mismos registros a escala de distrito censal que los expuestos para el caso del VII Censo¹².
- o Tablas de superficies agrícolas de la publicación de comparativa entre los censos de los años 1976, 1997 y 2007 (ODEPA, 2009)¹³. Se extraen los datos de hectáreas contenidas en las tablas siguientes:
 - i. Uso del suelo en explotaciones agropecuarias y forestales (1976-1997-2006) (Tabla 1 de ODEPA, 2009). Se toman los valores de superficies del total nacional de praderas y barbecho y descanso de 1976. Como estimación, se asocian dichas hectáreas de forma proporcional a lo recogido en el censo de 1997 a escala de distrito censal.
 - ii. Número de explotaciones y superficie sembrada con cereales, Número de explotaciones y superficie sembrada con leguminosas y tubérculos, y Número de explotaciones y superficie sembrada con especies forrajeras (Tablas 3, 4 y 5 de ODEPA, 2009). Datos a escala regional, que se desagregan a nivel distrital según la distribución superficial y tipo de manejo (riego/secano) recogida en el censo del 1997 para las categorías de Cultivos (cereales, leguminosas, tubérculos y cultivos industriales) y Forrajeras Anuales, y Forrajeras Permanentes.
 - iii. Número de explotaciones y superficie plantada con frutales, y Número de explotaciones y superficie plantada con viñas y parronales viníferos (Tablas 7 y 8, respectivamente, de ODEPA, 2009). Se procede igual que en el punto b anterior.

Así, con las superficies de los años 1976, 1997 y 2007, se proyecta las hectáreas estimadas para el año 2015, por grupo de cultivo, tipo de producción (riego/secano), a escala de distrito censal, para aquellos casos en que no se dispone de información actual procedente de los catastros y/o estadísticas productivas¹⁴. Los resultados obtenidos se resumen en el cuadro siguiente:

¹² El VI Censo dispone la información desagregada en distritos censales, pero los códigos de distrito utilizados en 1997 difieren de los de 2007, por lo que se realizó una adecuación y ordenación de los datos en base a la equivalencia entre ambos.

¹³ Si bien se solicitó formalmente al INE la base de datos en forma digital (Excel o similar) del V Censo Agropecuario y Forestal (año 1976), no se recibió información sistematizada oportuna para utilizarla tal como se procedió con la relativa al VI Censo del año 1997. Por ello, se optó por recopilar los datos disponibles al respecto de otras fuentes, siendo la información de ODEPA (2009) la más adecuada, considerando que las estimaciones realizadas a partir de ésta constituyen una aproximación para aportar en la determinación de las superficies de cultivo al año 2015.

¹⁴ Para el caso de praderas naturales, en vista a los resultados obtenidos inicialmente, la tendencia se limitó para no exceder la superficie total de la explotación recogida en el censo de 2007 (excepto en lo relativo a bosques nativos, infraestructuras y terrenos estériles), priorizando los cultivos agrícolas en el cambio de uso del suelo.

Cuadro 5.2-2 Estimación de superficies agrícolas al año 2015, por región, grupo de cultivo y manejo en riego/secano (hectáreas)

Región	Cultivos y Forraj. Anual.		Forrajeras Permanentes		Hortalizas, Flores y Semilleros		Viñas y Parronales		Frutales		Prad. Mejor.	Prad. Natur.	Barb. Y Descans.	Total Riego	Total Secano
	Riego	Secano	Riego	Secano	Riego	Secano	Riego	Secano	Riego	Secano	Secano	Secano	Secano		
XV	25	2	1.688	2	2.515	2	0	0	995	0	4.904	170.393	3.569	5.223	178.872
I	6	1.309	187	1	589	5	5	0	235	0	11	424.157	3.938	1.023	429.420
II	114	0	1.167	0	379	3	5	0	170	0	242	617.294	428	1.835	617.967
III	369	0	2.092	0	599	1	570	0	10.796	0	205	86.428	3.107	14.426	89.742
IV	2.131	366	7.960	85.360	7.006	162	11.506	0	27.649	0	13.635	2.983.870	52.535	56.251	3.135.928
V	3.611	4.253	8.467	3.475	7.384	155	10.422	28	49.387	574	27.668	341.508	8.678	79.271	386.339
XIII	19.526	1.343	17.903	194	18.921	131	13.710	115	49.955	38	14.621	169.119	11.243	120.015	196.803
VI	57.551	9.226	6.121	865	21.588	670	46.840	2.050	77.278	19	11.847	361.641	18.652	209.379	404.971
VII	83.629	1.783	36.516	3.872	21.618	1.207	43.645	11.554	63.143	7	87.816	853.174	39.102	248.551	998.516
VIII	65.737	70.716	39.132	11.055	6.596	1.460	1.498	8.374	13.220	404	56.311	549.980	42.489	126.184	740.788
IX	10.678	175.387	13.179	47.612	3.119	8.625	54	3	7.564	2.018	135.886	660.786	21.311	34.595	1.051.628
XIV	1.530	34.080	636	50.794	675	1.786	19	0	2.337	387	151.825	189.889	3.836	5.196	432.596
X	424	33.820	584	60.554	580	3.135	1	0	1.481	46	346.427	373.348	990	3.070	818.320
XI	3	880	297	8.251	79	113	0	0	213	0	39.756	656.997	1.189	592	707.187
XII	43	191	525	2.638	36	38	0	0	10	1	48.338	4.098.760	28.005	614	4.177.971
Total	245.376	333.356	136.453	274.673	91.687	17.493	128.274	22.124	304.434	3.492	939.494	12.537.344	239.071	906.224	14.367.047

Fuente: Elaboración propia.

El resultado arroja un total de 906.224 hectáreas de superficie bajo riego el año 2015, levemente inferior a la obtenida para el año 2007 (936.769 ha). Respecto la superficie en secano, ésta asciende a 14,4 millones de hectáreas en 2015, frente a 14,8 M en 2007. Esta situación puede haberse visto condicionada, entre otros, por los siguientes factores:

- Los datos utilizados para la estimación proceden, en parte, de catastros y estadísticas que pueden no arrojar valores “duros” tal como los que representa la universalidad de un censo nacional. Además, la distribución espacial de los datos del censo de 1976 fue realizada bajo supuestos de similitud con el censo de 1997, con las limitantes e incertidumbres asociadas a la misma.
- Los años precedentes al 2015 vinieron marcados por una sequía generalizada en Chile, hecho que puede haber repercutido claramente en la evolución de las superficies agrícolas.

Aun así, se considera que las cifras obtenidas representan una aproximación adecuada para la determinación de los requerimientos hídricos asociados a este sector productivo.

▪ **Cálculo de las superficies agrícolas al año 2015 por subcuenca**

Cabe recordar que la unidad territorial de análisis de las demandas hídricas es la subcuenca. Para ello, se toma el *shapefile* de subcuencas de la mapoteca DGA y se cruza con el correspondiente a las superficies agrícolas del año 2015 por distrito censal (obtenidas anteriormente) mediante herramientas SIG. De esta forma, se obtiene la superficie a escala subcuenca por tipología de cultivo y de producción (riego/secano) como base para los siguientes pasos.

xiv. Determinación de la demanda hídrica agrícola

La demanda hídrica agrícola pretende dar una visión de las necesidades brutas de agua que requiere la superficie agrícola, atendiendo a parámetros evapotranspirativos según tipología del cultivo. Por ello, conceptualmente se define esta demanda, a nivel mensual, como:

$$NB_{mes\ j} = ET_{c\ mes\ j}$$

donde:

$NB_{mes\ j}$ Necesidades brutas del mes j (mm/mes).

$ET_{c\ mes\ j}$ Evapotranspiración del cultivo del mes j (mm/mes).

Para obtener la demanda hídrica agrícola de una subcuenca, se calcula como el cociente de la evapotranspiración por la superficie de la subcuenca:

$$DHA_{i,j} = \frac{ET_{c,i,j} \cdot A_i}{100}$$

donde:

- DHA_{i,j} Demanda hídrica agrícola de la subcuenca *i* del mes *j* (Mm³/mes).
- ET_{c,i,j} Evapotranspiración del cultivo de la subcuenca *i* del mes *j* (mm/mes).
- A_i Superficie agrícola de la subcuenca *i* (hectáreas).

A continuación se describe cómo se obtiene la evapotranspiración de cultivo. La determinación de las superficies se describió en el acápite 5.2.3.1 apartado i.

▪ Cálculo de la evapotranspiración de cultivo (ET_c) por subcuenca

Se determina la demanda hídrica agrícola a partir de la *evapotranspiración de cultivo* (ET_c), expresada en mm. La ET_c se calcula según la siguiente ecuación:

$$ET_c = ET_0 \times K_c$$

donde:

- ET₀ Evapotranspiración potencial o de referencia (mm)
- K_c Coeficiente de cultivo (adimensional)

Para la estimación de la demanda hídrica, se determinan los valores de ET_c mensuales de cada subcuenca, los cuales son función de la ET₀ y el K_c mensuales representativos de las subcuencas. Seguidamente se muestra el cálculo de estos dos parámetros.

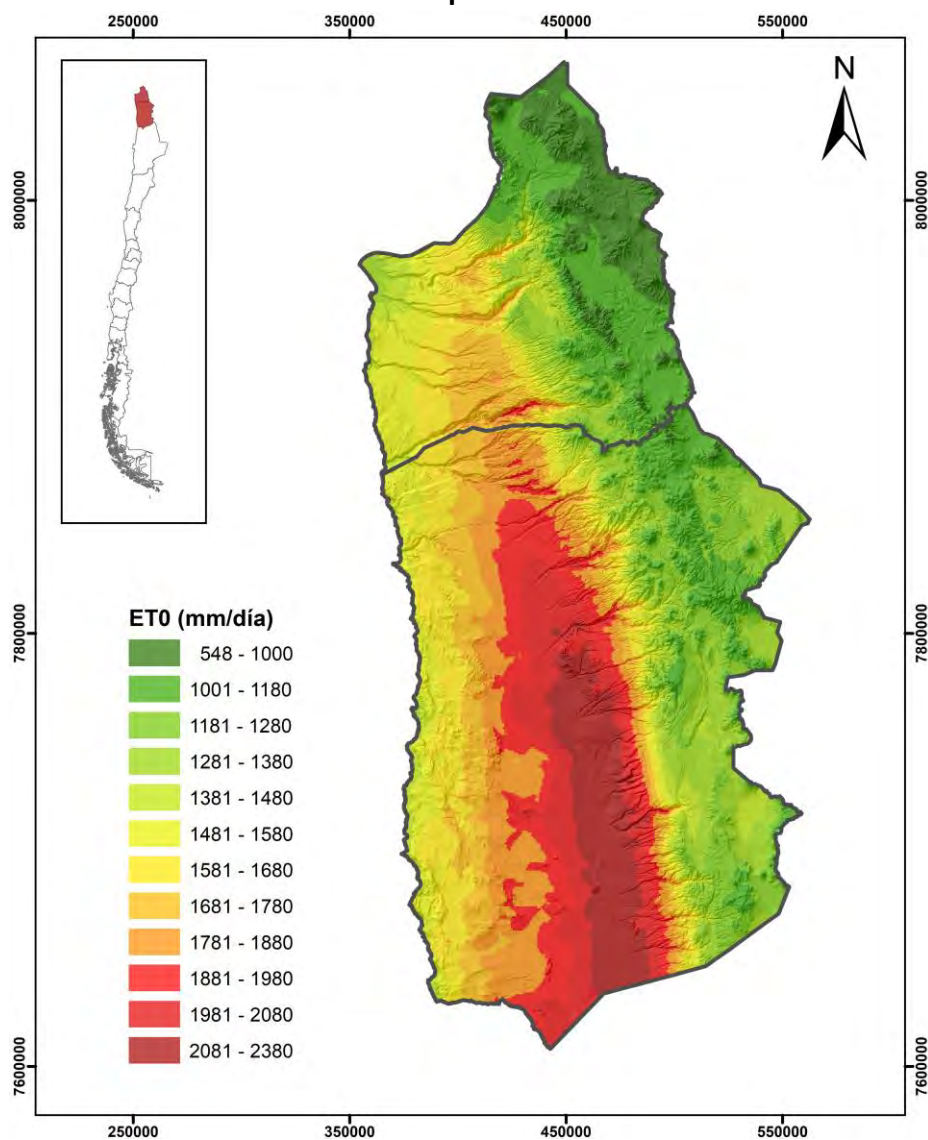
▪ Determinación de la evapotranspiración de referencia (ET₀) por subcuenca

La ET₀ corresponde a la pérdida de agua por evaporación y transpiración desde un cultivo de referencia (pasto) en producción y sin déficit de agua en el suelo. Es un parámetro relacionado con el clima y entrega una referencia sobre los aportes hídricos requeridos por la planta, ya sea a través de la precipitación o por riego complementario.

Se toma como referencia el ráster de evapotranspiración de referencia elaborado por AGRIMED (2015), el cual tiene cobertura para todo Chile; éste fue elaborado según el método de Penman-Monteith, en base a datos recopilados del período 1980-2010¹⁵, obteniendo una cartografía climática de alta resolución espacial (1 x 1 km). En la figura siguiente se muestra a modo de ejemplo el ráster de ET₀ para las regiones de Arica y Parinacota, y de Atacama:

¹⁵ Según AGRIMED (2010), en la construcción de la línea base climática se compiló información de temperatura, precipitación, radiación solar y humedad relativa de estaciones de la DMC, la DGA y las pertenecientes a diversas instituciones públicas y privadas, con datos de aproximadamente 600 estaciones.

Figura 5.2-1 Evapotranspiración de referencia. Región de Arica y Parinacota. Región de Tarapacá.



Fuente: AGRIMED (2015).

De esta forma, a partir del ráster de AGRIMED (2015), con valores mensuales (expresados en mm/día), se calcula la ET_0 mensual total de cada subcuenca, cruzando dicha fuente con el *shapefile* de subcuencas y ponderando los datos con la superficie proporcionalmente ocupada.

▪ **Determinación de los coeficientes de cultivo (K_c)**

Respecto de los coeficientes de cultivo, generalmente, éstos son similares para especies de un mismo grupo, debido a la similitud de la altura de los cultivos, área

foliar, grado de cobertura del suelo y manejo del agua (FAO, 2006). Por lo anterior, para cada región, se calcula un valor de K_c por grupo de cultivo identificado en el análisis de superficies agrícolas¹⁶.

El valor de K_c por grupo de cultivo y región se establece a partir de la identificación de la especie o cultivo (o cultivos) mayoritario(s) de la zona de análisis. Para ello, se consideran las siguientes fuentes de información:

- Las Fichas Productivas de las Zonas Homogéneas Agropecuarias (ZHA) recopiladas en CNR-MdeA (2013).
- Las tablas por secciones de cultivos del VII Censo Agropecuario (INE, 2007).

Una vez seleccionado el cultivo representativo del grupo, se toman los valores de K_c indicados en el Cuadro 5.2-2. En caso de más de un cultivo característicos por grupo, se pondera su peso dentro del mismo según la superficie ocupada.

Cuadro 5.2-3 Coeficiente de cultivo (K_c) para diferentes especies agrícolas

Cultivos	Kc Inicial		Kc Transición y Término										
Cereales y Chacras (Cultivos Anuales)													
Arroz	1,05	1,1	1,15	1,2	1,2	1,2	0,75						
Arveja Grano	0,5	0,83	1,15	1,1	0,5								
Avena Grano	0,4	0,82	0,99	1,15	1,15	1,15	0,75	0,33					
Cebada Cervecera	0,4	0,82	0,99	1,15	1,15	1,15	0,75	0,33					
Cebada Forrajera	0,4	0,82	0,99	1,15	1,15	1,15	0,75	0,33					
Centeno	0,4	0,82	0,99	1,15	1,15	1,15	0,75	0,33					
Garbanzo	0,4	0,8	1,05	1,05	0,3								
Lenteja	0,4	0,8	1,05	1,05	0,3								
Maíz Grano	0,45	0,83	1,2	1,2	0,84	0,48							
Papa	0,38	0,42	1	1,12	0,98	0,74							
Poroto	0,5	0,68	0,86	1,05	0,9	0,85							
Quínoa	0,4	0,8	1,05	1,1	0,9	0,6							
Trigo	0,64	0,65	0,83	1,06	1,11	1,11	1,04	0,64					
Otras Especies	0,2	0,2	0,3	0,4	0,4	0,7	0,7	0,8					
Cultivos Industriales													
Maravilla	0,35	0,75	1,15	1	0,75	0,35							
Raps	0,35	0,75	1,15	1,15	1	1	0,75	0,35					
Remolacha	0,35	0,87	1,39	1,2	1,2	0,95	0,7						
Soya	0,15	0,3	0,5	1,1	0,85	0,3							
Tabaco	0,15	0,35	0,35	0,4	0,45	0,45	15						
Hortalizas													
Acelga	0,35	0,85	0,9	0,85									
Ají	0,5	0,78	1,05	1	0,9								
Ajo	0,7	0,8	0,85	0,95	1	1	0,85	0,75	0,7				
Alcachofa	0,75	0,8	0,8	0,9	0,95	0,95	0,95	0,95	0,9	0,15	0,45	0,65	

¹⁶ Los grupos de cultivo son: a) cultivos y forrajeras anuales, b) forrajeras permanentes, c) hortalizas, flores y semilleros, d) viñas y parronales, e) frutales, f) praderas mejoradas, g) praderas naturales, y h) barbechos y descansos.

Cultivos	Kc Inicial		Kc Transición y Término											
Apio	0,79	0,93	1	1,01	1,01	1	0,96	0,7						
Arveja Verde	0,5	0,83	1,15	1,1										
Betarraga	0,35	0,75	1,15	0,95										
Brócoli	0,3	0,5	0,7	1,05	1,05	1								
Cebolla	0,7	0,85	1	1	1	1								
Choclo	0,45	0,8	1,15	1,15	1,05									
Cilantro	0,35	0,85	0,9	0,85										
Coliflor	0,27	0,32	0,4	0,65	0,94	0,95								
Espárrago	0,5	0,73	0,95	0,95	0,3									
Espinaca	0,35	0,85	0,9	0,85										
Haba	0,7	0,79	0,93	0,7	0,79	0,93	1	1	0,96					
Huerta Casera	0,13	0,04	0,11	0,24	0,35	0,35	0,37	0,49	0,58	0,6	0,5	0,31		
Lechuga	0,15	0,8	0,9	0,9	0,9									
Melón	0,4	0,6	0,8	1	1	0,75								
Orégano	0,3	0,55	0,9	1,05	0,8	0,5								
Pepino Ensalada	0,4	0,6	0,8	1	0,85									
Pepino Dulce	0,4	0,6	0,8	1	0,85									
Perejil	0,35	0,85	0,9	0,85										
Pimentón	0,5	0,78	1,05	1	0,9									
Poroto Granado	0,5	0,68	0,86	1,05	0,9									
Poroto Verde	0,5	0,68	0,86	1,05	0,45									
Repollo	0,15	0,8	0,9	0,9	0,9									
Sandía	0,4	0,6	0,8	1	1									
Tomate Consumo Fresco	0,68	0,92	1,15	1,15	0,98									
Tomate Industrial	0,68	0,92	1,15	1,15	0,98									
Zanahoria	0,4	0,75	0,8	1	1	0,7								
Zapallito Italiano	0,5	0,65	0,8	0,95	0,75									
Zapallo Guarda	0,4	0,4	0,8	0,98	1,01	1,11	0,7	0,35						
Otras Hortalizas	0,1	0,1	0,1	0,2	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,7	0,3	0,2		
Frutales														
Almendro	0,55	0,55	0,65	0,75	0,9	0,9	0,8	0,75	0,65					
Arándano	0,21	0,35	0,45	0,49	0,49	0,36								
Avellano Europeo	0,5	0,7	0,9	1,1	1,1	1,1	0,87	0,65						
Caqui	0,5	0,7	0,9	1,1	1,1	1,1	0,87	0,65						
Castaña	0,5	0,7	0,9	1,1	1,1	1,1	0,87	0,65						
Chirimoyo	1,1	1,03	0,95	0,85	0,75	0,65	0,5	0,75	0,87	0,95	1	1,06		
Ciruelo Europeo	0,58	0,72	0,86	0,98	0,98	0,7								
Ciruelo Japonés	0,58	0,72	0,86	0,98	0,98	0,7								
Damasco	0,55	0,65	0,75	0,9	0,9	0,8	0,75	0,65						
Duraznero	0,55	0,65	0,75	0,9	0,9	0,8	0,75	0,65						
Frambuesa	0,3	0,55	0,8	1,05	1,05	0,78	0,5							
Frutilla	0,4	0,63	0,85	0,85	0,8	0,75								
Cerezo	0,48	0,66	0,84	1,03	1,03	0,78								
Huerto Casero	0,2	0,2	0,1	0,1	0,3	0,6	0,7	0,9	0,9	0,9	0,8	0,6		
Kiwi	0,4	0,73	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05							
Limonero	0,65	0,65	0,65	0,65	0,64	0,64	0,62	0,6	0,6	0,62	0,64	0,65		
Lúcumo	0,75	0,75	0,6	0,6	0,6	0,65	0,75	0,85	0,85	0,85	0,82	0,78		
Mandarina	0,65	0,65	0,65	0,65	0,64	0,64	0,62	0,6	0,6	0,62	0,64	0,65		
Mango	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73	0,68		
Manzano Rojo	0,48	0,68	0,88	1,08	1,08	0,96	0,83							
Manzano Verde	0,48	0,68	0,88	1,08	1,08	0,96	0,83							
Membrillo	0,48	0,68	0,88	1,08	1,08	0,96	0,83							
Naranja	0,65	0,65	0,65	0,65	0,64	0,64	0,62	0,6	0,6	0,62	0,64	0,65		

Cultivos	Kc Inicial	Kc Transición y Término											
Nectarino	0,55	0,65	0,75	0,9	0,9	0,8	0,75	0,65					
Níspero	0,58	0,72	0,86	0,98	0,98	0,7							
Nogal	0,5	0,7	0,9	1,1	1,1	1,1	0,87	0,65					
Olivo	0,41	0,41	0,41	0,41	0,41	0,41	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,41	
Dátiles o Palma Datilera	0,17	0,38	0,54	0,58	0,54	0,3	0,21	0,12					
Palto	0,75	0,75	0,6	0,6	0,6	0,65	0,75	0,85	0,85	0,85	0,82	0,78	
Papayo	0,55	0,65	0,7	0,74	0,78	0,8	0,8	0,8	0,75	0,7	0,69	0,68	
Peral Asiático	0,48	0,68	0,88	1,08	1,08	0,96	0,83						
Peral Europeo	0,48	0,68	0,88	1,08	1,08	0,96	0,83						
Pomelo	0,65	0,65	0,65	0,65	0,64	0,64	0,62	0,6	0,6	0,62	0,64	0,65	
Rosa Mosqueta	0,3	0,55	0,8	1,05	1,05	0,78	0,5						
Tuna	0,5	0,5	0,45	0,45	0,5	0,5	0,5	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	
Uva de Mesa	0,3	0,48	0,65	0,85	0,85	0,75	0,65	0,45					
Uva Vinífera	0,3	0,55	0,8	1,05	1,05	0,95	0,85						
Uva Pisquera	0,35	0,45	0,6	0,7	0,7	0,65	0,55	0,4	0,35				
Otras Especies	0,2	0,2	0,1	0,1	0,3	0,6	0,7	0,9	0,9	0,9	0,8	0,6	
Flores													
Flores	0,2	0,2	0,1	0,1	0,3	0,6	0,7	0,9	0,9	0,9	0,8	0,6	
Praderas													
Maíz Silo	0,4	0,83	1,05	1,05	1,05								
Cereal Forrajero	0,4	0,82	0,99	1,15	1,15	1,15	0,75	0,33					
Alfalfa/Trébol	0,4	0,4	0,7	0,8	0,85	0,95	0,95	0,95	0,95	0,9			
Pastos de Pastoreo	0,3	0,5	0,65	0,7	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75			

Fuente: FAO (1990), citado en DGA-AC (2007).

Por otra parte, se requiere el valor de K_c , además de por grupo de cultivo, por mes, puesto que los cultivos están asociados a un desarrollo fenológico variable dentro del año o de su período de crecimiento. Además, cabe recordar que se pretende determinar las evapotranspiraciones de cultivo asociadas a cada mes del año. Por ello, se ubican los valores seleccionados del Cuadro 5.2-2 temporalmente a lo largo de los meses de año, siguiendo el criterio de siembra y cosecha propia de cada región¹⁷.

En definitiva, la demanda hídrica agrícola anual en una subcuenca se determina a partir de la siguiente expresión:

$$\begin{aligned}
 DHA_i &= DHA_{riego_i} + DHA_{secano_i} = \sum_{j=m}^n DHA_{riego_{i,j,k}} + \sum_{j=m}^n DHA_{secano_{i,j,k}} = \\
 &= \sum_{j,l=m}^n \left(\frac{ET_{0\ i,j} \cdot K_{c\ j,k,l} \cdot A_{riego_{i,l}}}{100} \right) + \sum_{j,l=m}^n \left(\frac{ET_{0\ i,j} \cdot K_{c\ j,k,l} \cdot A_{secano_{i,l}}}{100} \right)
 \end{aligned}$$

donde:

¹⁷ La distribución de los valores de K_c entre las fechas de siembra, crecimiento y cosecha o recolección de cada especie en cada región se tomaron mayoritariamente a partir de la información recopilada en las fichas de CNR-MdeA (2013).

DHA_i	Demanda hídrica agrícola de la subcuenca i ($Mm^3/año$).
$ET_{0\ i,j}$	Evapotranspiración de referencia de la subcuenca i del mes j (mm/mes).
$K_{c\ j,k,l}$	Coefficiente de cultivo del mes j de la región k para el grupo de cultivo l (adimensional), donde $i \in k$.
$A_{i,l}$	Superficie agrícola de la subcuenca i del grupo de cultivo l (hectáreas).

5.2.3.2 Estimación de la Demanda de Riego actual

En este acápite se expone el cálculo para la estimación de la demanda de riego, la cual atañe a la superficie agrícola con riego y, por tanto, queda excluida aquella superficie en secano (que únicamente se produce gracias a las precipitaciones). Esta demanda corresponde al requerimiento hídrico en parcela (a nivel de “potrero”).

xv. Determinación de la demanda neta de riego (DN_{riego})

Las necesidades netas de riego se determinan a partir de la ecuación siguiente:

$$NN_{mes\ j} = ET_{c\ mes\ j} - P_{ef\ mes\ j}$$

donde:

$NN_{mes\ j}$	Necesidad neta de riego del mes j (mm/mes)
$ET_{c\ mes\ j}$	Evapotranspiración del cultivo del mes j (mm/mes)
$P_{ef\ mes\ j}$	Precipitación efectiva del mes j (mm/mes)

Una consideración aplicada es que en caso de que la precipitación efectiva sea mayor a la evapotranspiración real o de cultivo, se asume que la NN es nula.

La estimación de la evapotranspiración del cultivo se ha descrito en el acápite 5.2.3.1 apartado ii. A continuación, se expone el cálculo de la precipitación efectiva.

▪ Cálculo de la precipitación efectiva (P_{ef}) por subcuenca

Respecto de las precipitaciones, éstas corresponden a las aguas aportadas por la lluvia y el rocío. La precipitación efectiva (P_{ef}) es aquella fracción de la precipitación total que es aprovechada por las plantas. Depende de múltiples factores como pueden ser la intensidad de la precipitación o la aridez del clima, y también de otros como la inclinación del terreno, contenido en humedad del suelo o velocidad de infiltración.

En la obtención de la P_{ef} se utilizó la metodología de Blaney y Criddle modificada por Horacio Merlet y Fernando Santibáñez el año 1986. Ésta relaciona la precipitación efectiva (P_{ef}) con la precipitación media mensual (P_{mm}) por medio de una curva representada mediante la expresión siguiente:

$$P_{ef} = -0,0015 * P_{mm}^2 + 0,9981 * P_{mm} - 4,4574$$

Las precipitaciones características de cada subcuenca se han obtenido a partir del *shapefile* de las isoyetas del estudio “Balance Hídrico de Chile” (DGA, 1987) de la mapoteca de la DGA. Éste se cruza con los límites del *shapefile* de subcuencas en cada región de estudio, obteniendo para cada una el valor de la precipitación promedio anual, mediante herramientas SIG.

Para obtener la serie de precipitaciones promedios mensuales (P_{mm}) a partir del promedio anual determinado anteriormente, a cada subcuenca se le asoció la estadística de precipitación de las estaciones pluviométricas de la red hidrométrica de la DGA, de acuerdo a su cercanía geográfica. Esta estadística fue extraída desde la plataforma web del Explorador Climático del (CR)² (<http://explorador.cr2.cl/>), considerando un registro histórico de precipitaciones mensuales desde el 01/1990 hasta 12/2015 inclusive siempre que fuera posible.

Así, se selecciona una estación representativa por subcuenca y se aplica la distribución mensual en cada caso sobre los valores de precipitación promedio mensual. En subcuencas con más de una estación meteorológica característica, se toma el valor promedio para obtener la distribución de las lluvias a lo largo del año. A las subcuencas sin presencia de estación de la DGA se les asigna la más cercana y/o representativa.

Resumiendo, la demanda neta (DN_{riego}) de riego se estima como la diferencia entre los valores mensuales de ET_c y los valores de P_{ef} determinados a partir de las isoyetas de precipitación; estos valores deben multiplicarse por la superficie de riego correspondiente para obtener los requerimientos de agua en cada subcuenca:

$$DN_{riego_i} = \sum_{j,l=m}^n \left(\frac{((ET_{0\ i,j} \cdot K_{c\ j,k,l}) - P_{ef\ i,j}) \cdot A_{riego\ i,l}}{100} \right)$$

donde:

- $DN_{riego\ i}$ Demanda neta de riego de la subcuenca i ($Mm^3/año$).
- $ET_{0\ i,j}$ Evapotranspiración de referencia de la subcuenca i del mes j (mm/mes).
- $K_{c\ j,k,l}$ Coeficiente de cultivo del mes j de la región k para el grupo de cultivo l (adimensional), donde $i \in k$.
- $P_{ef\ i,j}$ Precipitación efectiva de la subcuenca i del mes j (mm/mes).
- $A_{i,l}$ Superficie agrícola de la subcuenca i del grupo de cultivo l (hectáreas).

xvi. Determinación de la demanda bruta de riego (DB_{riego})

Finalmente, para cada subcuenca se determinan las demandas brutas de riego (DB_{riego}), mediante la multiplicación de las tasas de riego por la superficie bajo riego. Esta demanda constituye el aporte hídrico necesario a nivel de parcela a incorporar mediante riego para el correcto desarrollo productivo de las superficies agrícolas, con un rendimiento óptimo.

A continuación, se presenta cada uno de estos conceptos.

▪ Cálculo de la tasa de riego por subcuenca (TR)

En las áreas bajo riego, se determina la tasa de riego (TR), la cual se ve influenciada por el método de riego aplicado en cada caso, esto es:

$$TR_{\text{mes } j} = \frac{NN_{\text{mes } j}}{Ef} \times 10$$

donde:

$TR_{\text{mes } j}$	Tasa de riego del mes j ($\text{m}^3/\text{ha}/\text{mes}$).
$NN_{\text{mes } j}$	Necesidades netas de riego del mes j (mm/mes).
Ef	Eficiencia de aplicación de riego (%).

▪ Determinación de la eficiencia de aplicación de riego (Ef)

En el cálculo de la demanda bruta cabe señalar la influencia del método de riego utilizado en cada caso. Lo anterior se cuantifica mediante la aplicación del factor de *eficiencia de riego*.

La eficiencia de riego de los cultivos será la correspondiente a nivel intrapredial, esto es, a nivel de potrero. La Ef varía según el método de riego empleado (tecnificado o tradicional, y a su vez por tipología: goteo, aspersión, surco, tendido, etc.). A cada uno de estos métodos se le ha asignado un determinado coeficiente de eficiencia.

Las eficiencias de aplicación de riego de referencia en el presente estudio corresponden a las aplicadas en los proyectos postulantes a la Ley nº 18.450 de Fomento al Riego, que se presentan en el cuadro siguiente:

Cuadro 5.2-4 Eficiencia de riego según método de aplicación

Método de riego	Eficiencia de aplicación ¹⁸
Tendido	30%
Surcos	45%
Bordes	50-60%
Pretilles	60%
Tazas	65%
Borboteo	70%
Aspersión	75%
Microjet	85%
Microaspersión	85%
Goteo	90%

Fuente: CNR (2015).

Para adaptar estos valores a las categorías de riego establecidas en el VII Censo, las eficiencias consideradas en este estudio se clasifican en:

Cuadro 5.2-5 Eficiencia de riego según método de aplicación

Método de riego	Eficiencia de aplicación
Tendido	30%
Surcos	45%
Otro tradicional	60%
Aspersión	75%
Carrete o pivote	75%
Microaspersión y Microjet	85%
Goteo o cinta	90%

Fuente: Elaboración propia a partir de CNR (2015).

Para estimar las eficiencias al año 2015, se toman los registros del VII Censo Agrícola (año 2007) y se recopilan datos antecedentes y posteriores al mismo para establecer una tendencia histórica donde no se disponga de mayor información.

Los datos posteriores al VII Censo utilizados son:

- o Estadística Ley 18.450 publicada en la web de la Comisión Nacional de Riego (CNR, 2017). Proporciona un registro histórico, entre otros, de los proyectos

¹⁸ Eficiencias según método de riego “normal”, sin considerar “conducción californiana”.

tecnificados a través de esta herramienta, incluyendo datos de superficie tecnificada. Se procede de la siguiente forma:

- i. Se seleccionan los proyectos entre 2007-2015 de obras de tecnificación ejecutados registrados por comunas.
 - ii. Se toman las superficies tecnificadas, con un supuesto de eficiencia promedio del 80%, y se calcula el peso de estas superficies mejoradas respecto el año 2007, obteniendo una estimación de eficiencia mínima de aplicación de riego para el 2015 a escala comuna.
- O Catastros frutícolas de ODEPA-CIREN, años 2014, 2015 o 2016 según región. Se trabajan los datos disponibles de la siguiente forma:
- i. Se cruza el *shapefile* de cada catastro regional con el *shapefile* de distrito censal; a partir de la tabla de atributos generada, se determinan las eficiencias promedio por distrito. Señalar que los catastros disponibles corresponden a las regiones: XV, I, III, IV, V, XIII, VI, VII, VIII, IX, XIV, X y XI.
 - ii. Se aplica dicha eficiencia promedio considerando el peso de la superficie de frutales en el conjunto del área del distrito.

Para el resto de casos sin información, se estimará una eficiencia al 2015 de forma tendencial con registros históricos de 1997 y 2007, mediante la función “TENDENCIA” de Excel, ya que la información utilizada anterior al VII Censo consiste en:

- O VI Censo Nacional Agropecuario (INE, 1997), del cual se toman los mismos registros a escala de distrito censal que los expuestos para el caso del VII Censo. Hay que señalar que, en dicha publicación, no se desagregaba el método de riego en detalle como en el año 2007; por ello, el supuesto de % considerado fue:

Cuadro 5.2-6 Eficiencia de riego considerado en datos de INE (1997)

Método de riego	Eficiencia de aplicación
Riego Tradicional (surcos, tendido u otra forma)	35%
Riego Mecanizado Mayor (aspersión o similar)	75%
Micro Riego Localizado (goteo, microjet o similar)	85%

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados de los censos y la estimación al año 2015, a escala regional, se resumen en el cuadro siguiente:

Cuadro 5.2-7 Eficiencia de aplicación de riego, por regiones, años 1997, 2007 y 2015

Región	Eficiencia promedio (%)		
	1997	2007	2015
XV	47%	56%	59%
I	44%	48%	54%
II	36%	32%	36%
III	62%	71%	80%
IV	50%	66%	77%
V	49%	68%	74%
XIII	41%	57%	68%
VI	37%	54%	65%
VII	36%	46%	57%
VIII	36%	40%	53%
IX	41%	50%	70%
XIV	64%	77%	85%
X	46%	77%	85%
XI	30%	40%	70%
XII	30%	58%	63%
Total	40%	53%	64%

Fuente: Elaboración propia.

No existe información desagregada en los Censos que especifique eficiencia de riego por grupo de cultivo, por lo que en todos los casos la eficiencia estimada será únicamente a nivel territorial.

Así, la demanda bruta de riego (DN_{bruta}) -o simplemente, Demanda de Riego (DR)- se expresa de la siguiente forma para el caso de una subcuenca:

$$DR_i = DB_{riego\ i} = \sum_{j,l=m}^n \left(\frac{TR_{i,j,l} \cdot A_{riego\ i,l}}{1000} \right)$$

donde:

$DB_{riego\ i}$ Demanda bruta de riego de la subcuenca i ($Mm^3/año$).

$TR_{i,j,l}$ Tasa de riego de la subcuenca i del mes j para el grupo de cultivo l ($m^3/ha/mes$).

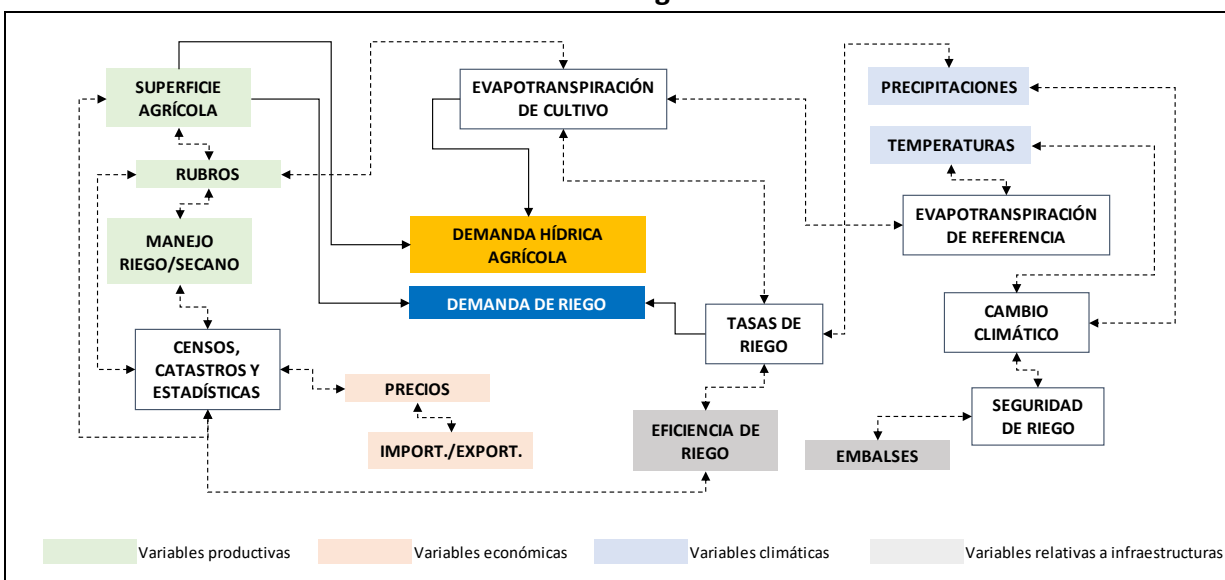
$A_{i,l}$ Superficie agrícola de la subcuenca i del grupo de cultivo l (hectáreas).

5.3 ENFOQUE METODOLÓGICO DE LA PROYECCIÓN DE LA DEMANDA FUTURA

5.3.1 Generalidades

La demanda hídrica del sector agrícola puede verse influenciado por diversos factores, de carácter propiamente productivo, climático, económico, etc. La mayoría de ellos están interrelacionados, tal como se muestra en la figura siguiente:

Figura 5.3-1 Principales relaciones entre variables influyentes en la demanda hídrica del sector agrícola



Fuente: Elaboración propia.

Las variables de carácter productivo y geográfico son aquellas relativas a la caracterización de la superficie agrícola, considerando cultivos y manejo de éstos bajo riego o producción en secano. Esta información está, generalmente, plasmada en los censos agrícolas.

A su vez, la coyuntura económica propiciará la productividad de uno u otro cultivo, atendiendo a precios, márgenes brutos, volumen de importaciones y/o exportaciones y acuerdos comerciales internacionales. La tendencia en los cambios económicos se refleja en la evolución de las especies cultivadas históricamente, las cuales se registran en los censos, catastros u otros como estadísticas.

Por otro lado, las características climáticas de cada zona o valle productivo condicionarán el desarrollo productivo de los diferentes rubros agrícolas. Las principales variables son las precipitaciones y las temperaturas, ambas repercuten en las necesidades hídricas de las plantas, de forma directa (como precipitación efectiva en zonas de riego) como indirecta a través de la evapotranspiración. En el caso de las precipitaciones, en la proyección de demanda futura, de forma análoga a la estimación de demanda actual, se ha mantenido el cálculo con el dato de partida existente -isoyetas de DGA (1987)-, puesto que en el momento de generar los resultados no se disponía de una actualización de las mismas. Respecto las temperaturas, éstas tienen relación directa con la evapotranspiración de referencia; esta última se mantiene la ya utilizada en la determinación de la demanda actual, puesto que se encuentra en la misma situación que las precipitaciones (actualización pendiente de

finalización y publicación). Cabe señalar que estos parámetros podrían verse afectados por el cambio climático, aspecto tratado en el Capítulo 32 del Volumen II del presente informe.

Finalmente, las infraestructuras hidráulicas y los sistemas tecnológicos asociados al riego constituyen un factor a considerar en la estimación de la demanda futura. Hay que considerar que el volumen de agua en embalses tiene una incertidumbre de disponibilidad en función de las precipitaciones, y que estas estructuras cumplen una ayuda en brindar seguridad de riego principalmente frente a cambios hidrológicos y climáticos, por lo que se podría pensar que no repercutirán de forma contundente en el futuro sobre un incremento en la superficie agrícola, sino más bien a conservarla.

Por todo ello, las variables que se tratan en la proyección de las demandas futuras de este sector productivo son principalmente las superficies agrícolas (la variación de las mismas), y en el caso de la demanda de riego, la evolución de las eficiencias de aplicación de riego, en base a la implementación de sistemas tecnificados de riego.

5.3.2 Fuentes documentales utilizadas

Las fuentes de información utilizadas en la proyección de la demanda hídrica agrícola se corresponden con aquellas consideradas en la estimación de la demanda actual (ver acápite 5.2.2.).

5.3.3 Metodología

La proyección de la demanda de agua futura del sector agrícola se determina a partir de la variación de superficies y tipología de cultivo, tal como se expone en el acápite 5.3.1. Adicionalmente, para el caso de las subcuencas (y cuencas) que contienen superficies en riego, también considerará la evolución de la eficiencia en la aplicación de riego.

A continuación, se expone el proceso de cálculo aplicado.

5.3.3.1 Proyección de la Demanda Hídrica Agrícola futura

xvii. Estimación de la superficie agrícola futura

▪ Proyección de las superficies agrícolas al año 2020, 2030 y 2040 por distrito censal

La proyección de la demanda hídrica agrícola se ha llevado a cabo a partir de los datos de superficie agrícola, por grupo de cultivo y manejo en riego/secano, de los años 1976, 1997, 2007 y 2015 a escala de distrito censal. La metodología de obtención de dichos datos se ha expuesto en el acápite 5.2.3.1. apartado i.

Con la anterior serie histórica, se ha procedido a determinar la estimación futura de superficies a los años 2020, 2030 y 2040 con la función “TENDENCIA” de Excel. Los resultados resumidos se presentan en el cuadro siguiente:

Cuadro 5.3-1 Proyección de superficies agrícolas al año 2020, por región, grupo de cultivo y manejo en riego/secano (hectáreas)

Región	Cultivos y Forraj. Anual.		Forrajeras Permanentes		Hortalizas, Flores y Semilleros		Viñas y Parronales		Frutales		Prad. Mejor.	Prad. Natur.	Barb. Y Descans.	Total Riego	Total Secano
	Riego	Secano	Riego	Secano	Riego	Secano	Riego	Secano	Riego	Secano	Secano	Secano	Secano		
XV	20	2	1.597	0	2.613	2	13	0	1.448	1	5.623	164.136	4.035	5.692	173.799
I	7	1.502	156	1	640	6	3	0	350	0	13	450.054	4.394	1.156	455.969
II	130	0	1.063	0	442	2	6	0	182	0	268	668.250	490	1.823	669.011
III	327	0	2.178	0	639	2	531	0	14.470	0	224	82.568	2.525	18.145	85.319
IV	749	361	8.837	95.627	7.581	222	13.636	0	34.435	39	15.268	3.016.681	55.568	65.237	3.183.766
V	1.716	1.529	8.407	3.361	6.068	219	9.364	24	59.596	472	30.933	302.261	6.689	85.152	345.488
XIII	12.566	850	17.191	203	16.433	172	12.912	113	60.426	176	14.878	157.718	10.694	119.528	184.803
VI	50.656	6.859	4.961	940	21.912	918	44.893	1.901	91.335	185	12.038	355.104	16.847	213.758	394.793
VII	74.179	1.921	35.773	4.057	21.906	1.554	41.484	9.477	70.612	824	88.005	867.383	40.918	243.955	1.014.139
VIII	66.300	60.255	38.817	11.436	7.036	1.765	1.696	5.968	12.745	1.695	53.416	539.437	41.914	126.594	715.887
IX	11.540	180.461	13.036	44.974	3.909	10.197	25	3	7.211	5.132	132.144	665.008	21.819	35.722	1.059.738
XIV	1.938	34.759	665	50.049	814	1.978	13	0	2.087	1.739	147.256	183.645	4.394	5.517	423.820
X	491	33.856	578	58.259	706	3.332	1	3	1.559	3.756	331.903	373.905	1.127	3.335	806.140
XI	3	808	218	7.288	91	137	0	0	192	51	40.926	671.494	1.364	505	722.067
XII	47	185	596	2.166	38	43	0	0	11	1	50.119	4.317.054	32.101	691	4.401.668
Total	220.670	323.347	134.074	278.362	90.828	20.549	124.578	17.489	356.658	14.070	923.012	12.814.698	244.880	926.808	14.636.407

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 5.3-2 Proyección de superficies agrícolas al año 2030, por región, grupo de cultivo y manejo en riego/secano (hectáreas)

Región	Cultivos y Forraj. Anual.		Forrajeras Permanentes		Hortalizas, Flores y Semilleros		Viñas y Parronales		Frutales		Prad. Mejor.	Prad. Natur.	Barb. Y Descans.	Total Riego	Total Secano
	Riego	Secano	Riego	Secano	Riego	Secano	Riego	Secano	Riego	Secano	Secano	Secano	Secano		
XV	12	3	1.475	0	2.629	3	39	0	1.480	1	7.069	138.362	5.063	5.635	150.500
I	7	1.888	103	1	743	9	4	0	341	0	16	450.107	5.315	1.198	457.336
II	164	0	970	0	627	1	8	0	204	0	321	668.070	614	1.973	669.006
III	377	0	2.372	0	531	3	435	0	17.153	0	262	78.592	2.243	20.867	81.100
IV	561	407	10.591	116.163	7.580	300	15.509	0	41.259	40	18.552	2.939.440	63.188	75.501	3.138.091
V	1.239	929	8.434	3.728	4.713	294	11.097	23	69.934	586	37.739	291.299	5.365	95.418	339.963
XIII	10.341	716	16.353	243	15.085	225	14.489	141	69.344	191	16.049	147.419	11.150	125.612	176.133
VI	43.012	4.532	4.446	1.091	23.191	1.233	53.919	2.196	106.482	198	12.996	335.776	16.797	231.050	374.819
VII	61.620	945	34.648	4.741	23.792	2.046	47.003	8.568	85.106	894	92.546	885.974	47.015	252.169	1.042.729
VIII	62.364	42.434	38.864	12.960	7.080	2.009	2.027	2.999	15.075	1.807	51.093	516.486	46.616	125.410	676.403
IX	12.056	159.296	13.256	41.898	4.958	12.433	23	4	8.587	5.212	128.907	665.243	23.941	38.879	1.036.934
XIV	2.368	30.518	781	48.984	1.091	2.439	0	0	2.466	1.354	139.429	171.383	5.511	6.706	399.619
X	591	26.882	668	55.008	963	3.916	1	4	1.820	3.618	312.440	375.299	1.402	4.043	778.569
XI	4	820	197	6.283	117	184	0	0	233	59	45.141	697.038	1.715	550	751.239
XII	55	186	736	2.052	45	53	0	0	14	1	55.621	4.645.150	40.293	850	4.743.357
Total	194.771	269.555	133.893	293.151	93.144	25.148	144.552	13.934	419.500	13.961	918.182	13.005.639	276.227	985.860	14.815.798

Fuente: Elaboración propia.

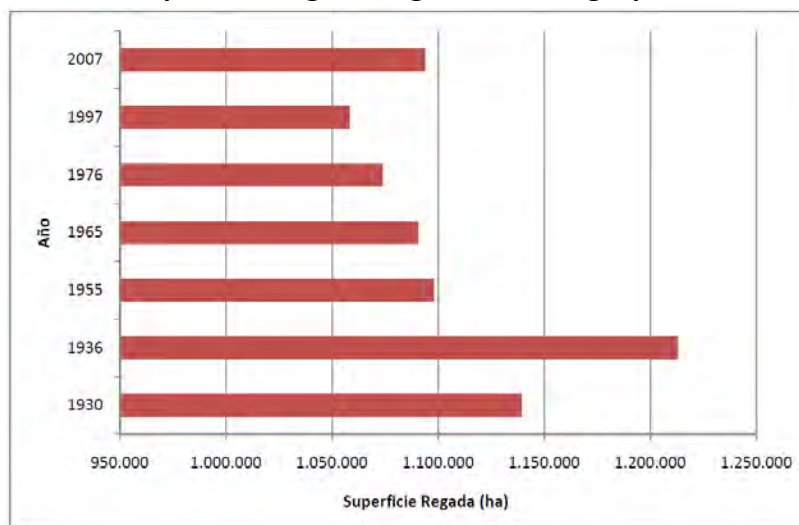
Cuadro 5.3-3 Proyección de superficies agrícolas al año 2040, por región, grupo de cultivo y manejo en riego/secano (hectáreas)

Región	Cultivos y Forraj. Anual.		Forrajeras Permanentes		Hortalizas, Flores y Semilleros		Viñas y Parronales		Frutales		Prad. Mejor.	Prad. Natur.	Barb. Y Descans.	Total Riego	Total Secano
	Riego	Secano	Riego	Secano	Riego	Secano	Riego	Secano	Riego	Secano	Secano	Secano	Secano		
XV	12	3	1.384	0	2.647	3	39	0	1.513	1	8.515	111.361	6.090	5.595	125.974
I	8	2.274	80	1	850	11	5	0	336	0	19	450.108	6.256	1.280	458.669
II	198	0	910	0	816	1	9	0	229	0	373	667.830	738	2.162	668.943
III	453	0	2.596	0	460	3	387	0	19.836	0	301	76.894	2.280	23.730	79.480
IV	561	477	12.346	136.698	7.892	379	17.399	0	48.091	46	21.859	2.858.010	71.952	86.289	3.089.421
V	1.233	771	8.631	4.204	4.407	370	12.840	22	80.290	705	44.839	295.703	5.499	107.401	352.113
XIII	10.228	694	16.200	283	16.068	281	16.182	170	78.312	220	18.256	149.719	12.342	136.991	181.964
VI	39.883	3.404	4.836	1.243	25.556	1.548	63.024	2.518	121.654	232	14.401	325.260	17.789	254.952	366.396
VII	53.230	903	34.317	5.515	26.683	2.544	52.738	7.937	99.602	981	99.743	892.872	53.585	266.571	1.064.081
VIII	59.942	33.860	39.435	14.734	7.376	2.296	2.357	1.554	17.475	1.966	51.138	496.467	52.837	126.585	654.852
IX	12.767	143.992	13.759	41.552	6.046	14.871	27	4	10.088	5.456	130.377	660.812	27.014	42.688	1.024.078
XIV	2.797	28.662	912	48.736	1.371	2.982	0	0	2.854	1.237	136.437	163.618	6.629	7.934	388.301
X	694	23.064	765	54.387	1.220	4.630	2	4	2.156	3.521	301.635	376.706	1.676	4.836	765.623
XI	4	908	194	6.020	142	232	0	0	273	69	50.079	708.419	2.066	613	767.793
XII	64	196	877	2.284	52	64	0	0	16	1	61.124	4.709.540	48.486	1.010	4.821.695
Total	182.075	239.209	137.242	315.658	101.587	30.216	165.010	12.210	482.724	14.434	939.097	12.943.321	315.239	1.068.638	14.809.383

Fuente: Elaboración propia.

El resultado arroja, para el caso de la superficie de riego, un total de 926.808 hectáreas al año 2020, 985.860 ha en 2030 y 1.068.638 ha en el año 2040. En la figura siguiente se presenta la evolución histórica de la superficie de riego de los censos agropecuarios, las cuales son coherentes con las cifras obtenidas¹⁹:

Figura 5.3-2 Superficie regada según censos agropecuarios²⁰



Fuente: CNR-LAGOS (2012).

Al respecto cabe señalar también la incertidumbre sobre los datos finales de los censos más antiguos, dados los recursos y medios disponibles en ese momento para el levantamiento de superficies.

▪ Cálculo de las superficies agrícolas al año 2020, 2030 y 2040 por subcuenca

Cabe recordar que la unidad territorial de análisis de las demandas hídricas es la subcuenca. Para ello, se toma el *shapefile* de subcuencas de la mapoteca DGA y se cruza con el correspondiente a las superficies agrícolas del año 2015 por distrito censal (obtenidas anteriormente) mediante herramientas SIG. De esta forma, se obtiene la superficie a escala subcuenca por tipología de cultivo y de producción (riego/secano) como base para los siguientes pasos.

¹⁹ Señalar que la superficie cultivada considera las hectáreas plantadas, y por tanto, rotaciones de cultivo en un mismo año o cultivos intercalados; por ello, estas cifras podrían ser ligeramente superiores a la superficie física agrícola, parámetro de referencia utilizado en el presente estudio.

²⁰ La figura representa las superficies cultivadas o plantadas que cuentan con riego, en base a Censos de 1930, 1936, 1955, 1965, 1976, 1997 y 2007.

xviii. Determinación de la demanda hídrica agrícola

La proyección de demanda hídrica agrícola futura se determina de igual forma que la llevada a cabo para los requerimientos hídricos en situación actual, pero considerando obviamente, las nuevas superficies de riego para los años futuros 2020, 2030 y 2040.

5.3.3.2 Proyección de la Demanda de Riego futura

xix. Determinación de la demanda neta de riego (DN_{riego})

La demanda neta de riego futura se calcula siguiendo la misma metodología expuesta en la estimación del consumo actual, tomando las superficies de riego determinadas para los años futuros 2020, 2030 y 2040.

xx. Determinación de la demanda bruta de riego (DB_{riego})

La demanda bruta de riego y la tasa de riego por subcuenca en situación futura siguen de forma general el mismo procedimiento establecido en la metodología de la demanda actual, tomando las cifras de superficie futura; un punto diferencial en este caso es el parámetro *eficiencia de riego*, factor que se ha considerado variable temporalmente a lo largo de la proyección.

A continuación, se explica el proceso de determinación de los valores de eficiencia de aplicación de riego hasta el año 2040.

▪ Determinación de la eficiencia de aplicación de riego (E_f)

Los porcentajes futuros de eficiencia en la aplicación de riego se han calculado a partir de los datos de los años 1997, 2007 y 2015 a escala de distrito censal. La metodología de obtención de dichos datos se ha expuesto en el acápite 5.2.3.1. apartado ii.

Con la anterior serie histórica, se ha procedido a determinar la estimación futura de eficiencias a los años 2020, 2030 y 2040 con la función “TENDENCIA” de Excel. Sin embargo, se ha tenido en cuenta las siguientes observaciones:

- La pendiente tendencial histórica arroja, al año 2040, una eficiencia promedio en el conjunto de la superficie bajo riego de Chile del 89%. Esta cifra representa una muy alta tecnificación de los suelos agrícolas a nivel nacional²¹.
- Los sistemas de tecnificación de riego tienen una vida útil establecida, por lo que periódicamente los regantes deben realizar inversiones para renovar los equipos y/o tuberías de riego obsoletos (que a su vez van perdiendo eficiencia a lo largo de los años de uso).

²¹ Recordar que la eficiencia en aspersión es del 75%, en microaspersión/microjet del 85% y en goteo/cinta el 90%.

- Existen factores edafológicos y/o socioeconómicos que hacen difícil la implantación de tecnificación en los predios; por lo que esta mejora no se llevaría de forma universal al conjunto de la agricultura chilena.

Por lo anterior, se han tomado los siguientes supuestos, atendiendo a la determinación de un valor central y unos niveles de confianza en la evolución de la eficiencia de riego:

- Los resultados de una aplicación puramente tendencial de los datos históricos corresponderían a la situación de mínima demanda de riego (máxima eficiencia de riego esperada), esto es, el nivel de confianza superior. Arroja una eficiencia del 71%, 84% y 89% al año 2020, 2030 y 2040 respectivamente, lo que significaría instalación de riego por goteo o cinta al final del periodo de proyección en toda la superficie bajo riego (poco probable).
- El nivel de confianza inferior, es decir, la posición más desfavorable respecto la cantidad de agua de riego demandada considera que la eficiencia de riego no se incrementa, sino que se mantienen constantes los valores determinados para el año 2015. Lo anterior se traduce en una eficiencia promedio entorno al 65%.
- El valor central corresponde a una situación intermedia, el cual considera una evolución de la eficiencia al 30% de la proyectada tendencialmente. Ésta supone unos valores del 66%, 72% y 76% a los años 2020, 2030 y 2040 respectivamente.

Los resultados resumidos a escala regional se presentan en los cuadros siguientes:

Cuadro 5.3-4 Proyección de la eficiencia de aplicación de riego, por regiones, años 2020, 2030 y 2040 (nivel inferior, central y superior)

Región	2020			2030			2040		
	NC inf	Valor centr.	NC sup	NC inf	Valor centr.	NC sup	NC inf	Valor centr.	NC sup
XV	60%	63%	68%	61%	68%	77%	62%	74%	83%
I	57%	59%	63%	60%	66%	76%	62%	72%	83%
II	36%	37%	41%	37%	41%	52%	38%	45%	67%
III	79%	81%	83%	80%	83%	88%	80%	84%	89%
IV	77%	80%	84%	77%	84%	89%	77%	86%	90%
V	74%	77%	83%	74%	83%	90%	75%	88%	90%
XIII	68%	70%	76%	68%	76%	87%	69%	81%	90%
VI	65%	67%	72%	65%	73%	86%	66%	78%	90%
VII	57%	59%	64%	58%	64%	80%	58%	69%	89%
VIII	53%	55%	60%	53%	59%	74%	54%	64%	87%
IX	70%	73%	78%	71%	78%	88%	71%	82%	90%
XIV	84%	87%	90%	84%	89%	90%	84%	90%	90%
X	82%	83%	85%	84%	87%	87%	84%	87%	87%
XI	69%	72%	78%	70%	78%	87%	71%	83%	89%
XII	63%	66%	71%	63%	71%	79%	63%	75%	82%
Total	64%	66%	71%	65%	72%	84%	65%	76%	89%

Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO 6 METODOLOGÍA PARA EL ESTUDIO DE LA DEMANDA HÍDRICA DEL USO: PECUARIO

6.1 INTRODUCCIÓN

La demanda de agua del sector pecuario está referida específicamente al consumo de agua para ganado bovino, porcino, ovino, caprino, producción avícola y otras de menor entidad (equinos, camélidos, etc.).

En Chile, según ODEPA (2016e), la producción de carne está liderada por el sector avícola, el cual se concentra en un reducido número de productores, alcanzando 740 mil toneladas en el año 2016. En segundo lugar, se encuentra la producción de carne de cerdo, que llega a 507 mil toneladas. Luego se ubica la producción bovina (215 mil toneladas de carne en vara), orientada principalmente al mercado interno y muy relevante, ya que cuenta con sobre 120 mil productores.

6.2 ENFOQUE METODOLÓGICO DE LA ESTIMACIÓN DE LA DEMANDA ACTUAL

6.2.1 Generalidades

6.2.1.1 Antecedentes

Para la determinación de la demanda de agua pecuaria se considera un consumo unitario por animal o cabeza de ganado. Por lo anterior, en primer lugar, se han recopilado tasas de consumo características de diferentes tipos de producción pecuaria.

Se ha considerado, entre otros, lo establecido en el Decreto nº 177 (MOP, 2012) sobre requerimientos de agua para producción de pollos y pavos:

Cuadro 6.2-1 Tabla de equivalencia de requerimientos de agua para producción avícola

Usos	Valor (l/ave/día)
Producción de Pollos	0,31
Producción de Pavos	0,76

Fuente: MOP (2012).

En el caso de la producción porcina, se considera lo establecido en la Resolución 1431 de la DGA (2015b) sobre tasas de consumo de agua (Cuadro 6.2-2). Adicionalmente, y según lo indicado en la misma fuente, se considera una tasa de 0,3 litros/día por especie en concepto de agua para el personal.

Cuadro 6.2-2 Tabla de equivalencia de requerimientos de agua para producción porcina

Fase del ciclo productivo	Tasa (l/día/especie)
Verracos	38,5
Cerdas en gestación	35
Cerdas en lactancia	56
Lechones maternidad	3,5
Lechones destetados	10,5
Lechones en crecimiento	15,5
Cerdos en finalización	25

Fuente: DGA (2015b).

Para la producción ovina, se toma en cuenta lo establecido en el documento “Fundamentos de la producción ovina en la Región de la Araucanía” (INIA, 2012), el cual indica:

Cuadro 6.2-3 Tabla de equivalencia de requerimientos de agua para producción ovina

Usos	Rango de consumo (l/animal/día)
Ovejas	2-3,5
Ovejas lactando	4-7
Corderos	2

Fuente: INIA (2012).

En el caso de la producción bovina lechera, se toma como referencia lo establecido en la ficha de producción del Bovino Lechero del “Reporte Huella Hídrica en Chile” (DGA-FCH, 2016):

Cuadro 6.2-4 Tabla de equivalencia de requerimiento de agua para producción lechera

Usos	Valor (l/animal/día)
Bovino lechero	55

Fuente: DGA-FCH (2016).

En el resto de producciones pecuarias, en ausencia de tasas de consumo reglamentadas, ésta se corresponde con el 10% de su peso vivo o valores habituales para cada especie.

6.2.1.2 Alcance

El alcance de la estimación de la demanda de agua para uso pecuario engloba los requerimientos de recurso hídrico en la producción animal nacional. Quedan excluidos aquellos consumos relativos a los centros de procesamiento animal, como mataderos, los cuales están clasificados como actividad industrial, en el Capítulo 10 del presente informe.

6.2.2 Fuentes documentales utilizadas

Las fuentes de información en la estimación de la demanda hídrica pecuaria son las siguientes:

- El VII Censo Nacional Agropecuario, año 2007, realizado por el INE, constituye la fuente de información principal sobre la cantidad y tipo de cabezas de ganado existentes. Éste aporta información a nivel de *distrito censal*, para las diferentes clases de animal por grupo productivo pecuario, estructurada en:
 - ✓ Bovinos (bueyes, toros, novillos, terneros/as, vaquillas, vacas y vacas lecheras).
 - ✓ Ovinos (corderos/as, borregos/as, carneros, capones, ovejas).
 - ✓ Caprinos (cabritos/as, machos, hembras).
 - ✓ Aves (gallos, gallinas, pollos/as, pavos, patos, gansos, avestruces, emús, codornices, faisanes, otras aves).
 - ✓ Otras especies (cerdos, caballares, alpacas, llamas, mulares, asnales, jabalíes, ciervos, conejos, cuyes, chinchillas, huarizos, otro tipo de ganado).
- El VI Censo Nacional Agropecuario, año 1997, también realizado por el INE, se ha utilizado como información complementaria al censo del 2007 para la estimación de las cabezas de ganado en la actualidad. Aporta información a nivel de *distrito censal* para las diferentes especies por tipo de ganadería.
- Encuestas de ganado bovino, ovino y caprino, y existencias de porcinos y broilers, del INE del año 2015, disponibles desde la web de ODEPA (<http://www.odepa.gob.cl/estadisticas/productivas/>). Cabe mencionar que estas fuentes disponen de la información con carácter regional (no a nivel comunal y/o de distrito censal), y en ocasiones de forma sectorial (no para la totalidad de las regiones de Chile).
- Tablas de equivalencia de requerimientos de agua para diferentes producciones pecuarias:
 - o Decreto 177 del MOP (2012). Aprueba usos no contemplados en la Tabla de Equivalencia entre caudales de agua y usos del Decreto nº 743, de 2005, y

rectifica definición de uso en generación hidroeléctrica por centrales de pasada. Proporciona ratios de consumo en producción avícola.

- o Resolución 1431 de la DGA (2015). Aprueba uso no contemplado en la Tabla de Equivalencia entre caudales de agua y usos del Decreto Supremo nº 743, de 2005. Especifica ratios de consumo en producción porcina.
- o Fundamentos de la producción ovina en la Región de La Araucanía, publicación del INIA (2012).
- o Reporte Huella Hídrica en Chile: Sectores prioritarios de la cuenca del Río Rapel (DGA-FCH, 2016). Proporciona equivalencia de consumo de agua en producción bovina lechera.

6.2.3 Metodología

A partir de los datos de cabezas de ganado por distrito censal, se calcula la demanda de agua diaria aplicando una tasa de consumo unitaria.

Para ello, se toman en primer lugar los datos de cabezas de ganado a escala de distrito del Censo Agropecuario del año 2007. Las categorías de ganado y especies consideradas son:

Cuadro 6.2-5 Categorías de ganado en el cálculo de demanda hídrica pecuaria actual.

Tipo de ganadería	Especies
Bovino	Ternero/a
	Vaquilla
	Novillo
	Vaca de carne, toro, buey
	Vaca lechera
Ovino	Oveja, carnero, capón, borrego/a
	Cordero/a
Caprino	Cabra
	Cabrito/a
Avícola	Broiler, gallo, gallina
	Otras aves ²²
Porcino	-
Equino	(varios) ²³
Camélidos	(varios) ²⁴
Otras especies	(varios) ²⁵

Fuente: Elaboración propia.

²² Otras aves incluye: pavo, pato y ganso, avestruz, emú, y codorniz y faisán.

²³ Los equinos consideran: caballo, mula y asno.

²⁴ Los camélidos incluyen: alpaca, llama y huarizo.

²⁵ Las otras especies incluidas son: jabalí, ciervo, conejo y chinchilla, y cuy.

Para actualizar las cifras de ganado a la fecha de referencia actual (año 2015), se determina la tendencia a partir de dos fuentes adicionales: las encuestas de ODEPA y el censo del año 1997.

- i. Respecto la información disponible de ODEPA, se toman en consideración la evolución de las existencias de ganado de las encuestas periódicas del INE entre los años 2007 y 2015. Éstas se realizan sobre determinadas explotaciones pecuarias (de cierto tamaño) de carácter bovino, ovino, caprino, porcino y aves, si bien sólo en las regiones con producción relevante en cada caso. Así, la información recopilada para el cálculo de la estimación de las cabezas de ganado fue la variación 2007/2015 de la existencia de ganado (en %) por categoría (según Cuadro 6.2-4) a escala regional.

Así, se extrae en cada caso el porcentaje de variación regional y se aplica sobre los valores distritales del censo del año 2007, obteniendo una estimación de la actualización de las cabezas de ganado al año 2015:

- Ganado bovino:
 - La encuesta reflejó rebaños/explotaciones con 10 cabezas o más.
 - Regiones incluidas: V, XIII, VI, VII, VIII, IX, XIV, X, XI y XII.

Cuadro 6.2-6 Variación de existencia de ganado bovino por categoría, según región seleccionada (%), 2007/2015.

Región	Ternero/a	Vaquilla	Novillo	Vaca carne, toro, buey	Vaca lechera
Valparaíso	-27%	-24%	-39%	-37%	20%
Metropolitana	-49%	-49%	17%	-55%	18%
O'Higgins	-21%	-15%	-14%	-33%	-13%
Maule	-13%	-29%	10%	-19%	-97%
Biobío	-22%	-18%	-36%	-25%	-5%
La Araucanía	-43%	-27%	-36%	-32%	-8%
Los Ríos	-31%	-27%	14%	-62%	69%
Los Lagos	-13%	11%	-36%	-52%	87%
Aysén	-31%	-16%	-55%	-16%	-100%
Magallanes	-15%	-8%	47%	-15%	16%

Fuente: Elaboración propia a partir de ODEPA (2015).

- Ganado ovino:
 - La encuesta reflejó rebaños/explotaciones con 60 cabezas o más.
 - Regiones incluidas: VI, VII, VIII, IX, XIV, X, XI y XII.

Cuadro 6.2-7 Variación de existencia de ganado ovino por categoría, según región seleccionada (%), 2007/2015.

Región	Oveja, carnero, capón, borrego/a	Cordero/a
O'Higgins	-26%	709%
Maule	-44%	202%
Biobío	-55%	285%
La Araucanía	-53%	58%
Los Ríos	35%	114%
Los Lagos	-58%	37%
Aysén	-26%	-8%
Magallanes	-23%	-30%

Fuente: Elaboración propia a partir de ODEPA (2015).

- Ganado caprino:
 - La encuesta reflejó rebaños/explotaciones con 20 cabezas o más.
 - Regiones incluidas: III, IV, V, XIII, VI, VII, VIII y IX.

Cuadro 6.2-8 Variación de existencia de ganado caprino por categoría, según región seleccionada (%), 2007/2015.

Región	Cabra	Cabrito/a
Atacama	-33%	32%
Coquimbo	-45%	-9%
Valparaíso	-44%	-21%
Metropolitana	-53%	-35%
O'Higgins	3%	53%
Maule	14%	-31%
Biobío	-24%	-40%
La Araucanía	-26%	-59%

Fuente: Elaboración propia a partir de ODEPA (2015).

- Existencia de broilers:
 - La encuesta reflejó aves en criaderos.
 - Regiones incluidas: XV/I/II, IV, V, XIII, VI, VII, VIII y IX.

Cuadro 6.2-9 Variación de existencia de broilers en criaderos, según región seleccionada (%), 2007/2015.

Región	Broilers
Arica y Parinacota, Tarapacá y Antofagasta	-10%
Coquimbo	-44%
Metropolitana	0%
O'Higgins	16%
Biobío	-62%
La Araucanía	-60%

Fuente: Elaboración propia a partir de ODEPA (2015).

- Existencia porcina:
 - La encuesta reflejó criaderos con 40 cerdos masa o 20 vientres reproductores.
 - Regiones incluidas: V, XIII, VI, VII, VIII y IX.

Cuadro 6.2-10 Variación de existencia de cerdos en criaderos, según región seleccionada (%), 2007/2015.

Región	Cerdos
Valparaíso	-39%
Metropolitana	-8%
O'Higgins	-6%
Maule	9%
Biobío	-39%
La Araucanía	-7%

Fuente: Elaboración propia a partir de ODEPA (2015).

- ii. En el resto de casos, es decir, en las regiones y/o tipos de ganadería donde no se disponga de datos actuales (2015) de ODEPA, éstos se estiman por la tendencia de los registros de los censos de los años 1997 y 2007. Esto es, del VI Censo Agropecuario se extrajo el número de cabezas de ganado a nivel de distrito censal, de forma análoga a lo realizado para el VII Censo del año 2007 y con ambos valores se proyectó la cantidad de animales a 2015 en cada distrito, mediante la función de cálculo "TENDENCIA" de Excel.

Se cruzan, mediante herramientas de SIG, los datos referentes al número de cabezas de ganado²⁶ de los distritos censales determinados como se ha expuesto anteriormente con las subcuencas establecidas como unidad de análisis territorial. En el caso de distritos censales pertenecientes a dos (o más) subcuencas, se asigna la parte proporcional según superficie ocupada.

Posteriormente, se determina los valores de demanda anuales, por subcuenca, multiplicando las cifras resultantes por las tasas de consumo unitarias. Con ello se obtienen los valores de demanda hídrica en el sector pecuario para el año 2015, en miles de metros cúbicos al año (Mm³/año):

$$Demanda\ pecuaria = \sum_{i,j=m}^n (Cab_{i,j} \cdot Tasa_j) / 10^3$$

donde:

$Cab_{i,j}$ Número de cabezas de ganado asociadas a una i -ésima subcuenca, de tipología animal j -ésima (animales)

$Tasa_j$ Tasa de consumo por tipología animal j -ésima (m³/animal/año).

Las tasas de consumo diario por animal consideradas en el estudio, de acuerdo a los antecedentes analizados, para cada especie, se resumen en la tabla siguiente:

Cuadro 6.2-11 Tabla de equivalencia de requerimientos de agua para producción pecuaria

Producción	Tipología animal	Consumo (l/animal/día)
Bovina	Ternero/a	22,5
	Vaquilla	27
	Novillo	35
	Vaca (carne), toro, buey	45
	Vaca lechera	55
Ovina	Oveja, carnero, capón, borrego/a	4,5
	Cordero/a	2
Caprina	Cabra	3,5
	Cabrito/a	1,5
Avícola	Pollo/a, gallo, gallina	0,31
	Pavo	0,76
	Pato, ganso	0,5
	Avestruz	10
	Emú	5

²⁶ No se considera en la estimación de la demanda hídrica pecuaria la clase “otro tipo de ganado”, por falta de información al respecto y por el reducido n° de ganado clasificado como tal en el VII Censo, que corresponden a 5.924 cabezas (inferior al 0,01% sobre el total).

Producción	Tipología animal	Consumo (l/animal/día)
	Codorniz, faisán	0,05
Otras especies	Porcina	30
	Caballo, mula, asno	45
	Alpaca, llama, huarizo	3
	Jabalí	40
	Ciervo	5
	Conejo, chinchilla	0,35
	Cuy	0,85

Fuente: Elaboración propia.

En el caso de la clase “Otras aves” u “Otras especies” en que se cuenta con tasas diferentes según la especie que se considere, se determina una tasa unitaria ponderada por región según el peso de cada tipo de animal en dicha área.

6.3 ENFOQUE METODOLÓGICO DE LA PROYECCIÓN DE LA DEMANDA FUTURA

6.3.1 Generalidades

La proyección de la demanda pecuaria futura se ha planteado a partir de la evolución histórica del número de cabezas de ganado. De esta forma, los datos de partida para la estimación de animales hasta el año 2040 coinciden con aquellas cifras ya trabajadas en la determinación del ganado actual.

Los valores de tasas unitarias de consumo de agua por especie se mantienen constantes para esta estimación, sin considerar cambios o modificaciones en el uso de agua unitaria por animal.

6.3.2 Fuentes documentales utilizadas

Los datos utilizados son los mismos que se usaron en la determinación de la demanda hídrica pecuaria actual (acápite 6.2.2.).

6.3.3 Metodología

La metodología para determinar la proyección consiste en calcular la tendencia de las cabezas de ganado futura, utilizando la herramienta de análisis “TENDENCIA” de Excel. Para ello, se toman los valores de cantidad de animales por grupo de ganadería en los años 1997, 2007 y 2015 a escala de distrito censal y se proyectan anualmente hasta el año 2040. Las categorías analizadas son:

- Bovino
- Ovino

- Caprino
- Avícola (pollos/otras aves)
- Equinos
- Camélidos
- Otros

Las tasas de consumo unitarias, para este cálculo, se calculan de forma ponderada por región según la distribución de las especies en una misma categoría al año 2015 o 2007 en su defecto.

La demanda anual de agua para fines pecuarios resulta de la multiplicación del número de cabezas de ganado por subcuenca con la tasa de consumo correspondiente, tal como se determinó en el cálculo de la demanda actual.

CAPÍTULO 7 METODOLOGÍA PARA EL ESTUDIO DE LA DEMANDA HÍDRICA DEL USO: FORESTAL

7.1 INTRODUCCIÓN

Chile posee una de las mayores superficies de bosques templados lluviosos del mundo. Los bosques templados lluviosos del sur de Chile y parte de Argentina, localizados entre los paralelos 35º y 48º S, corresponden a la *Ecorregión del Bosque Lluvioso Valdiviano*, que ha sido recientemente incluida entre las ecorregiones más amenazadas del mundo por la Iniciativa 200 de WWF (*World Wildlife Fund*) y el Banco Mundial (Dinerstein, 1996; citado en Oyarzún *et al.*, 2005).

Históricamente, los bosques nativos en Chile han sido considerados casi exclusivamente como una fuente de madera y como tierras para la expansión de la agricultura y ganadería después de la deforestación y quema. Durante las últimas décadas estos bosques nativos han sido reemplazados masivamente por plantaciones exóticas de *Pinus radiata* y *Eucalyptus* spp. (Oyarzún *et al.*, 2005).

Como la mayoría de los negocios latinoamericanos que se basan en la exportación de materias primas, la industria forestal de Chile disfrutó de un auge extraordinario durante la mayor parte de esta década. A pesar de que, en los últimos años, producto de crisis económicas, la industria ha mostrado una reducción en cuanto a sus exportaciones, ésta sigue llena de potencial de crecimiento.

En los anteriores estudios de demandas a nivel nacional (DGA-IPLA, 1996; DGA-AC, 2007a y 2007b), respecto las necesidades de agua para uso forestal, se consideró únicamente el volumen de recurso necesario en concepto de *riego*, teniendo en cuenta que el agua aportada por las precipitaciones cubría los requerimientos en las plantaciones propiamente y por tanto quedaron fuera de su cuantificación. Esta metodología limitaba la demanda exclusivamente a las plantaciones forestales con riego de implantación y viveros forestales.

En el presente estudio, el consultor considera que debe contemplarse la demanda de agua del conjunto de plantaciones forestales con fines de producción, esto es, el establecimiento de

explotaciones con el propósito de obtener bienes tales como madera u otros derivados forestales. Lo anterior con el propósito de incluir esa demanda en el cómputo de necesidades de agua de una subcuenca o cuenca, puesto que es recurso que deja de estar disponible para otros usos productivos del territorio.

Por otro lado, el objetivo original de este capítulo era la estimación de la demanda forestal, entendida como aquella correspondiente a las zonas con carácter económico-productivo, esto es, plantaciones forestales. Sin embargo, desde una óptica más integrativa, el consultor cree conveniente considerar otro uso que, si bien no es estrictamente productivo, se debería tener presente en el conjunto de las necesidades del país; éste es el *uso forestal no productivo*.

En resumen, con la finalidad de acotar una estimación del recurso hídrico requerido en este ámbito, el presente capítulo se centra en dos aspectos: la demanda de agua (actual y futura) de las plantaciones forestales y las necesidades hídricas de bosques nativos y otras coberturas vegetales de otros ecosistemas. Por lo anterior a continuación, se presentan cada una de las metodologías seguidas para la determinación de estos volúmenes de recurso hídrico en cada subcuenca, cuenca y región del país.

7.2 ENFOQUE METODOLÓGICO DE LA ESTIMACIÓN DE LA DEMANDA ACTUAL. (I) USO PRODUCTIVO: PLANTACIONES FORESTALES

7.2.1 Generalidades

El sector forestal es el segundo sector primario de exportaciones del país, detrás de la gran minería del cobre. Las exportaciones de productos forestales en 2015 disminuyeron en un 10,8% respecto del año anterior, siendo la celulosa seguido de los tableros y chapas, los principales rubros forestales de exportación (CORMA, 2016).

En la actualidad la superficie cubierta de bosques representa casi el 23% del territorio nacional con 17,3 millones de hectáreas, donde la industria forestal, consta de aproximadamente 3 millones de hectáreas, equivalentes al 17,1% del total de bosques del país y a un 3,9% del territorio nacional (CONAF, 2016).

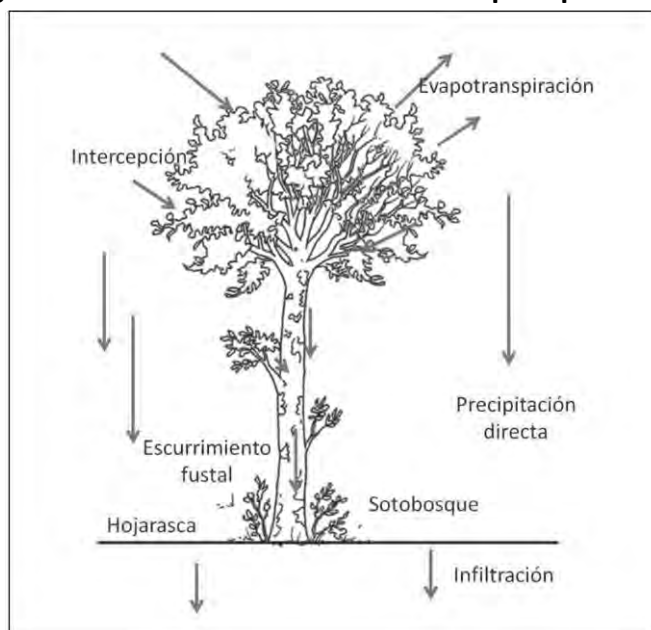
Como se mencionó anteriormente, en Chile el sector forestal cultiva principalmente especies exóticas de rápido crecimiento, siendo éstas el pino insignie (*Pinus radiata*) y el eucalipto (*Eucalyptus globulus* y otras spp.), y en muy menor medida, especies de bosque nativo.

El recurso hídrico es estratégico para la industria forestal, ya que las plantaciones forestales consumen agua, como cultivos en sí mismo. En el contexto que vive el país, el efecto de la escasez hídrica en dichas plantaciones no es despreciable, ya que incluso se podría ver afectada la productividad de una explotación, con menor crecimiento bajo estas condiciones.

En términos generales, diferentes autores (INFOR, 2013) en distintos países indican que entre las principales variables que intervienen en la relación agua-plantación forestal están: la precipitación anual, la especie, las variables de estado del rodal, las características de los suelos, la topografía y la proporción y distribución de la superficie plantada en una cuenca determinada.

La precipitación efectiva en una cuenca está ampliamente condicionada por la cubierta vegetal, la cual permite la entrada de ésta, su aumento o disminución y su distribución en el sistema. La redistribución de las precipitaciones en el sistema se inicia al entrar en contacto con la cubierta vegetal, produciéndose un cambio en los montos, intensidad y lugar que el agua alcanza el suelo (Huber-Oyarzún, 1992; citado en INFOR, 2013). En este caso, las componentes del balance hídrico determinantes (entre otras) son la evapotranspiración y la intercepción, tal como se muestra en la figura a continuación.

Figura 7.2-1 Redistribución de las precipitaciones



Fuente: INFOR (2013).

Si bien en el país se han realizado algunos estudios sobre el balance de agua en varias parcelas experimentales para ambas especies exóticas (*Pinus radiata* y *Eucalyptus* spp.), son escasos los antecedentes que indican la magnitud de los consumos de agua que se registran a nivel de superficies forestadas en el global de las cuencas chilenas. Aun así, es parte de esta metodología recopilar y analizar la utilidad de dichos antecedentes y su aplicación para establecer una metodología de estimación de la demanda forestal.

7.2.1.1 Antecedentes

El mayor término dentro del balance hídrico es la precipitación, la cual varía temporal y espacialmente (Zhang *et al.*, 2001). Constituye la entrada de agua en el balance y se puede expresar como precipitación directa, resultante de los diferentes eventos lluviosos, o como precipitación oculta, que resulta del efecto de la captación de neblina.

Siendo parte de las salidas del balance hídrico, la evapotranspiración (ET) es definida como el proceso de transferencia de agua desde superficies con vegetación hacia la atmósfera, que en términos de flujos puede ser expresada en la siguiente ecuación:

$$ET = I + T + E$$

donde:

- I Intercepción
- T Transpiración
- E Evaporación del suelo

Analizando estos parámetros:

- La pérdida por intercepción (I) corresponde a la cantidad de precipitación retenida por parte de la vegetación y evaporada directamente a la atmósfera. Es un proceso hidrológico importante, especialmente en cuencas boscosas, ya sean especies nativas o exóticas. El agua interceptada puede ser retenida por las hojas hasta evaporarse, escurrir a través de las ramas y tronco hasta llegar al suelo (precipitación fustal), o simplemente precipitar desde el dosel del bosque hasta el suelo (precipitación interna).
- La transpiración (T) es el proceso por el cual el agua contenida en la vegetación es transferida a la atmósfera en forma de vapor de agua.
- En periodos largos, es razonable asumir que los cambios en el suelo como evaporación (E) o aportes a flujos base son despreciables (Zhang *et al.*, 2001).

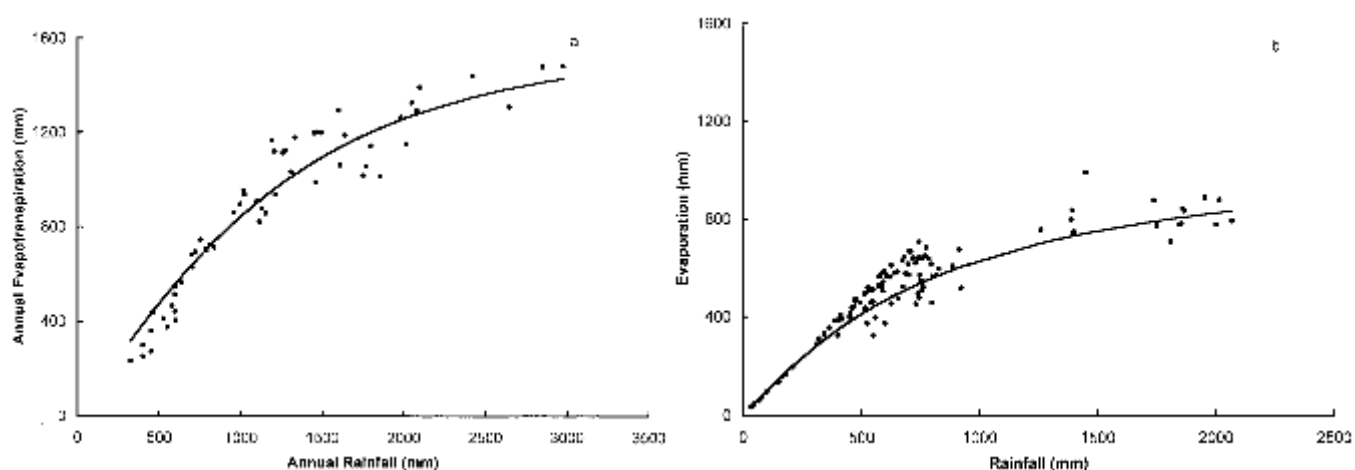
Por lo tanto, las principales vías para la pérdida de agua desde los ecosistemas forestales corresponden a la transpiración del propio espécimen y a la evaporación del agua retenida desde la copa.

En este contexto, los estudios extranjeros existentes se han enfocado en los efectos de las plantaciones en el balance hídrico, bajo una gran variedad de climas. Entre ellos destaca el estudio de Zhang *et al.* (2001), citado en CORMA (2015), que, considerando más de 250

estudios de cuencas experimentales, llega a la conclusión de ciertos patrones generales en algunos componentes del balance.

Concretamente, el autor relaciona la precipitación media anual con la evapotranspiración anual para diferentes plantaciones forestales y praderas, incluyendo el volumen de intercepción de los árboles en el modelo. Se presenta seguidamente el gráfico y la ecuación del modelo planteado por el autor:

Figura 7.2-2 Relación entre precipitación media anual y evapotranspiración anual de plantación forestal (a) y pradera (b)



Fuente: Zhang *et al.* (2001).

El valor de ET, según los autores, se puede determinar según la fórmula:

$$ET = \left(f \frac{1 + 2 \frac{1410}{P}}{1 + 2 \frac{1410}{P} + \frac{P}{1410}} + (1 - f) \frac{1 + 0,5 \frac{1100}{P}}{1 + 0,5 \frac{1100}{P} + \frac{P}{1100}} \right) P$$

donde:

- ET Evapotranspiración anual, incluyendo intercepción (mm/año)
- P Precipitación media anual (mm/año)
- f Fracción de cobertura forestal, valor entre 0 y 1 (adimensional)

Sobre los estudios en Chile, se cuenta con algunos estudios experimentales ejecutados por universidades nacionales, entre los que cabe resaltar las investigaciones sobre balance hídrico en sistemas forestales. Éstos permiten conocer la variación entre entradas y salidas de agua en la parcela forestal y cómo se redistribuyen las aportaciones por precipitación

al entrar al sistema. Estas investigaciones se han desarrollado en las zonas que presentan altas concentraciones de superficies plantadas con especies de rápido crecimiento, abarcando desde la VII hasta la X Región.

Con motivo de este estudio, se ha realizado una revisión bibliográfica al respecto, donde se han rescatado ciertas investigaciones que determinan la evapotranspiración mediante el balance hídrico para las especies *Pinus radiata* y *Eucalyptus globulus*, considerando valores de precipitación medidos generalmente en un año.

A modo resumen, se presentan los resultados de los estudios recopilados con información relevante, tal como precipitación medida (PP) y la evapotranspiración (ET) para ambas especies. Es importante mencionar que todos los valores registrados de evapotranspiración incluyen las pérdidas por intercepción. Se presenta también el porcentaje de ET respecto de la precipitación.

Cuadro 7.2-1 Evapotranspiración según algunos estudios experimentales en Chile

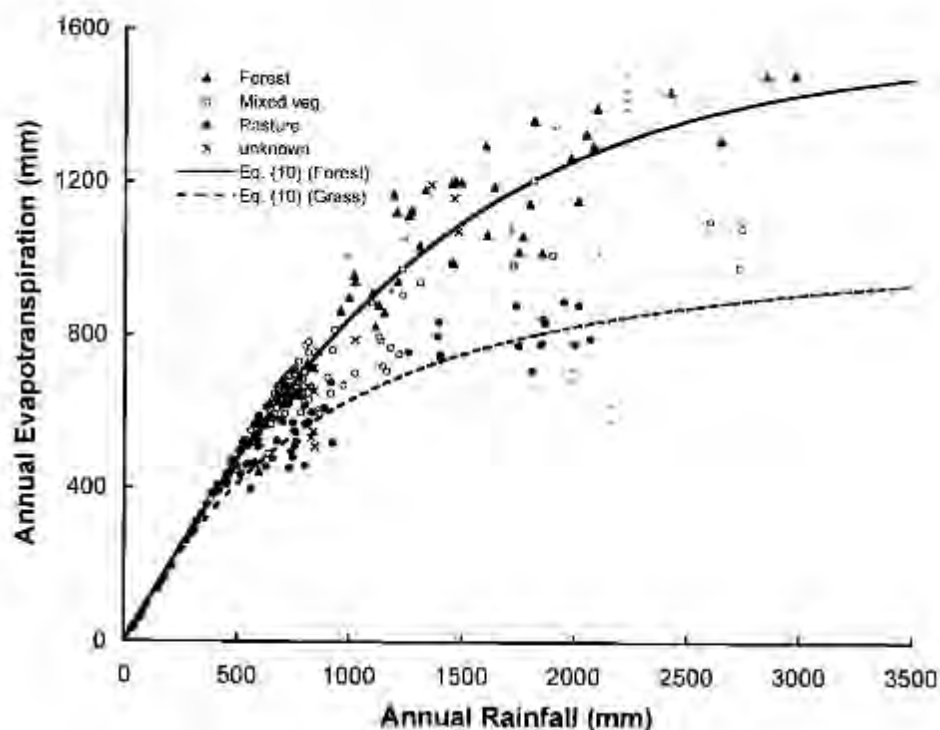
Referencia bibliográfica	Región	PP (mm/año)	<i>P. radiata</i>		<i>E. globulus</i>	
			ET (mm/año)	ET (%)	ET (mm/año)	ET (%)
Huber <i>et al.</i> , 1985.	XIV	1.717	1.300	76%		
Oyarzún y Huber, 1999.	XIV	1.981	700	35%	667	34%
	XIV	2.128	509	24%	557	26%
	XIV	1.689	1.012	60%	1.020	60%
Huber <i>et al.</i> , 2008.	VII	1.015	951	94%		
	VIII	1.137	859	76%		
	VIII	1.189	989	83%		
	XIV	2.081	972	47%		
Huber <i>et al.</i> , 2010.	VIII	2.149	1.762	82%	1.845	86%
	VIII	2.149	1.725	80%	1.746	81%

Fuente: Elaboración propia, a partir de referencias indicadas.

En la Figura 7.2-3, con el fin de contrastar los resultados anteriores en el modelo de Zhang *et al.* (2001), se sitúan sobre el gráfico los valores resultantes; en color rojo corresponden aquellos relativos a *P. radiata*, y en color azul, a *E. globulus*. Es conveniente señalar que, para el caso del estudio de Huber (2010), se determinaron valores anuales para equipararlos al resto de registros²⁷.

²⁷ Cabe destacar que el estudio de Huber (2010) es el único que considera un periodo de precipitaciones por más de un año, específicamente utiliza registros de 14 meses.

Figura 7.2-3 Modelo de Zhang con datos de estudios nacionales incorporados.



Fuente: Elaboración propia, a partir de Zhang *et al.* (2001) y referencias del Cuadro 7.2-1.

En general, se puede asumir que los datos presentan cierto grado de coherencia en su distribución respecto a la nube de registros del estudio de Zhang *et al.* (2001), excepto algunos de los casos relativos al estudio Oyarzún-Huber (1999), en que se detectan valores por debajo de la curva correspondiente a la pradera. Cabe señalar que en ese estudio se trataban de plantaciones jóvenes (4 años para *Pinus radiata* y 2 años para *Eucalyptus globulus*), por lo que los niveles de cobertura forestal son inferiores a las explotaciones de edades mayores o cerca de la edad de corte (7,5% y 5,7% respectivamente para cada especie).

En conclusión, debido a las pocas investigaciones orientadas al estudio del balance hídrico en la realidad forestal de Chile, y la pobre representatividad territorial a nivel nacional, los estudios existentes resultan insuficientes para adoptar un parámetro con un grado de confiabilidad elevado. Por lo anterior, y observando una tendencia general en los datos expuestos sobre el modelo de Zhang *et al.* (2001), la consultora considera que la forma más acertada para la estimación de la demanda forestal, sería la aplicación de la relación entre precipitación y evapotranspiración (e interceptación) dada por la fórmula propuesta por Zhang *et al.* (2001).

7.2.1.2 Alcance

Por el contrario, a lo realizado en estudios anteriores, esta consultora considera que de forma análoga al uso agrícola, debe valorarse la demanda forestal como la cantidad de agua que consumen las plantaciones forestales en concepto de evapotranspiración, puesto que estas explotaciones productivas se desarrollan en cada subcuenca gracias a la pluviometría característica, incidiendo sobre la disponibilidad del recurso para otros usos.

Por lo tanto, la demanda del recurso hídrico en el uso forestal, considerara las superficies plantadas con especies forestales exóticas, las cuales son principalmente *Pinus radiata* y *Eucalytus* spp. a lo largo de todo el territorio nacional. Estas superficies se relacionarán con las necesidades hídricas evapotranspirativas, mediante las precipitaciones anuales de cada subcuenca.

7.2.2 Fuentes documentales utilizadas

Para los efectos de todos los análisis, las principales fuentes de consulta corresponden a la documentación y datos aportados por las siguientes referencias:

- Cubiertas del Catastro de Usos del Suelo y Vegetación, de la Corporación Nacional Forestal (CONAF). Las fechas de actualización de los archivos formato *shapefile* varían entre 1997 y 2015 (ver Cuadro 7.2-2). Contienen el levantamiento de los usos de suelo; el interés de esta fuente recae en el objetivo de identificar espacialmente las plantaciones forestales a lo largo del país.
- Isoyetas del estudio “Balance Hídrico de Chile” (DGA, 1987) ²⁸. Se utiliza el *shapefile* correspondiente incluido en la mapoteca de la DGA.
- Relación entre precipitación media anual y evapotranspiración anual en plantaciones forestales del estudio *Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale* de Zhang *et al.* (2001).

7.2.3 Metodología

Para estimar la demanda de agua de uso forestal, se tomarán como dato de partida las Cubiertas del Catastro de Usos del Suelo y Vegetación de la Corporación Nacional Forestal (CONAF), disponibles en el Sistema de Información Territorial (SIT CONAF) en formato *shapefile*. Éstas están disponibles en diferentes años de actualización, tal como se presenta en el cuadro siguiente.

²⁸ Esta metodología está adaptada para que una vez que el Balance Hídrico se actualice, se puedan cambiar las Isoyetas del año 87 por las nuevas.

Cuadro 7.2-2 Catastros regionales de Usos de Suelo y Vegetación

Región	Año
XV. Arica y Parinacota	Actualización 2015
I. Tarapacá	1997 v2
II. Antofagasta	1997
III. Atacama	1997
IV. Coquimbo	2003
V. Valparaíso	Actualización 2013
XIII. Metropolitana	Actualización 2013
VI. L. B. O'Higgins	Actualización 2013
VII. Maule	2009
VIII. Biobío	Actualización 2008
IX. La Araucanía	Actualización 2014
XIV. Los Ríos	Actualización 2014
X. Los Lagos	Actualización 2013
XI. Aysén	Actualización 2011
XII. Magallanes y Antártica Chilena	2005

Fuente: CONAF (1997-2015).

Desde estos catastros, se seleccionarán las coberturas de interés para este uso forestal, correspondiente a los *campos* “Uso: Bosques” y “Subuso: Plantación”. De ahí se extraerán los datos de superficie (expresadas en hectáreas) asociados, considerando la superficie para cada especie específica como dato adicional, dato contenido en la misma base.

Una vez identificadas las superficies que califican como *plantación forestal*, éstas pueden ser ubicadas en la cartografía digital mediante SIG y asociarse a una subcuenca dentro de la región del territorio analizado.

Por otro lado, se procede a realizar una superposición espacial de *shapefiles* de *subcuencas* e *isoyetas* (DGA, 1987) con el fin de asignar a cada subcuenca una precipitación anual promedio, proporcional al área que ocupa cada isoyeta dentro de la superficie de la subcuenca. Para ello, se cuenta con la mapoteca de la DGA, la cual dispone de las líneas de isoyetas a nivel nacional. Si bien éstas corresponden al año 1987, se espera su actualización en un futuro próximo.

De la ecuación del modelo de Zhang *et al.* (2001) que relaciona la precipitación media anual y la evapotranspiración anual (ver acápite 7.2.1.1), se obtendrán valores de evapotranspiración para cada subcuenca con presencia de plantaciones forestales. Para la aplicación de la relación, atendiendo a la ausencia de información detallada sobre el grado de cobertura forestal en cada explotación forestal de Chile, se considerará un valor

f igual a 0,75²⁹, atendiendo a la existencia de un porcentaje de plantaciones jóvenes o recién taladas en el conjunto de las superficies forestales del país.

Finalmente, con los datos de evapotranspiración (mm/año) correspondientes a cada superficie (hectáreas) de plantación forestal, se aplica la siguiente ecuación para calcular la demanda hídrica del uso forestal en metros cúbicos al año:

$$Demanda = \sum_{i,j=1}^n (ET_i \cdot A_i \cdot 10)$$

donde:

ET_i Evapotranspiración asociada a una i -ésima subcuenca (mm/año)

A_j Superficie j -ésima de plantación forestal en una subcuenca analizada (hectáreas)

7.3 ENFOQUE METODOLÓGICO DE LA ESTIMACIÓN DE LA DEMANDA ACTUAL. (II) USO NO PRODUCTIVO: BOSQUE NATIVO Y OTRAS COBERTURAS VEGETALES

7.3.1 Generalidades

7.3.1.1 Antecedentes

Con alrededor de un 19% de superficie cubierta del país al año 2013 (CONAF, 2016), el bosque nativo es un componente fundamental de la biodiversidad autóctona dentro de los ecosistemas nacionales. Al igual que en las plantaciones forestales, las variables que intervienen en la relación agua-plantación son las mismas para bosques nativos. Por lo tanto, la precipitación como elemento de entrada en el balance hídrico juega un papel clave en análisis de la demanda de este uso.

En la metodología de demanda hídrica del bosque nativo se hará uso de los mismos antecedentes descritos en el acápite 7.2. respecto de la evapotranspiración en el balance hídrico y sus componentes; el modelo propuesto que relaciona precipitación anual y evapotranspiración anual (Zhang *et al.*, 2001), como también la información catastrada por CONAF (1997-2015), respecto de los usos del suelo en Chile. Respecto las investigaciones de balance hídrico realizadas en el país en temas forestales, se encuentran algunas referidas a especies nativas. Tal es el caso del “Estudio comparativo de los componentes del balance hídrico en un bosque nativo y una pradera en el sur de Chile” (Echeverría *et al.*, 2007), donde se comparó la evapotranspiración de una pradera y un bosque nativo.

²⁹ El valor f corresponde a la fracción de cobertura forestal, variable entre 0 y 1, correspondiendo a 1 para superficies boscosas y 0 para coberturas herbáceas.

Desde un punto de vista amplio del paisaje, cabría no olvidar el resto de ecosistemas característicos presentes en el territorio, tal como se ha indicado anteriormente. A partir de los Catastros de Usos de Suelo (CONAF, 1997-2015), se han seleccionado los siguientes usos objeto de estudio, además del bosque nativo:

- Humedales

Para el caso de los humedales, es necesario recopilar antecedentes que permitan un análisis y estimación más precisos de sus requerimientos hídricos.

Consecuente con esta idea, se pretende determinar la demanda en humedales a partir de la *evapotranspiración de cultivo* (ET_c) en estas áreas. La ET_c se refiere a la evapotranspiración en condiciones óptimas presentes en parcelas con un excelente manejo y adecuado aporte de agua y que logra la máxima producción de acuerdo a las condiciones climáticas (FAO, 2006). La relación entre ET_0 (*evapotranspiración de referencia*, parámetro relacionado con el clima y que expresa el poder evaporante de la atmosfera) y ET_c que puede ser determinada experimentalmente para diferentes cultivos es conocida como *coeficiente de cultivo* (K_c) y se expresa de la siguiente manera:

$$\frac{ET_c}{ET_0} = K_c$$

Generalmente, los coeficientes para los miembros de un mismo grupo son parecidos, debido a la similitud de la altura de los cultivos, área foliar, grado de cobertura del suelo y manejo del agua (FAO, 2006). En el Cuadro 7.3-1 se presentan algunos valores de K_c que se han recopilado del análisis bibliográfico al respecto:

Cuadro 7.3-1 Coeficiente de cultivo para especies de humedales

Cultivo	K_c	Referencias
Anea, Junco	1,2	FAO, 2006
Vegetación pequeña	1,1	FAO, 2006
Carrizo	1,2	FAO, 2006
Juncos	1,3 - 1,4	Roberts <i>et al.</i> , 2000
Hierba acuática	1,1 - 1,3	Roberts <i>et al.</i> , 2000
Plantas sumergidas	1,15	Roberts <i>et al.</i> , 2000

Fuente: Elaboración propia, a partir de referencias indicadas.

Los coeficientes finalmente adoptados en el estudio se especifican en el acápite 7.3.3.2 referente al desarrollo de la metodología para humedales.

7.3.1.2 Alcance

La demanda del recurso hídrico del bosque nativo y otras coberturas vegetales estará dada por la cantidad de agua que un determinado ecosistema necesita para conservarse y asegurar su estado en el tiempo sin que sus características inherentes sean degradadas. Por lo tanto, la estimación de esta demanda corresponderá a las necesidades de agua para conservar las actuales superficies de bosque nativos, matorrales y humedales a lo largo de todo el país.

7.3.2 Fuentes documentales utilizadas

Las principales fuentes de consulta corresponderán a la documentación y datos aportados por las siguientes referencias:

- Cubiertas del Catastro de Usos del Suelo y Vegetación, de la Corporación Nacional Forestal (CONAF). Las fechas de actualización de los archivos formato *shapefile* varían entre 1997 y 2015 (ver Cuadro 7.2-2). Contienen el levantamiento de los usos de suelo; el interés de esta fuente recae en el objetivo de identificar espacialmente las superficies de interés.
- Áreas de protección SNASPE, Sitios Prioritarios para la Conservación de la Diversidad Biológica y Sitios Ramsar, en todas las regiones del país, correspondientes a:
 - Mapoteca de la DGA, Unidad SIG, actualizada al año 2016.
 - Ministerio del Medio Ambiente, División de Recursos Naturales y de Biodiversidad.
- Isoyetas del estudio “Balance Hídrico de Chile” (DGA, 1987)³⁰. Se utiliza el *shapefile* correspondiente incluido en la mapoteca de la DGA.
- Relación entre precipitación media anual y evapotranspiración anual en plantaciones forestales del estudio *Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale* de Zhang *et al.* (2001).
- Estudio comparativo de los componentes del balance hídrico en un bosque nativo y una pradera en el sur de Chile (Echeverría *et al.*, 2007).
- Evapotranspiración de referencia para la determinación de las demandas de riego en Chile (AGRIMED, 2015).
- Coeficiente de cultivo (Kc) obtenidos de:

³⁰ Esta metodología está adaptada para que una vez que el Balance Hídrico se actualice, se puedan cambiar las Isoyetas del año 87 por las nuevas

- o Evaporación del cultivo: guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos (FAO, 2006).
- o *Estimating the water requirements for plants of floodplain wetlands: a guide* (Roberts *et al.*, 2000).

7.3.3 Metodología

Para estimar la demanda de agua de uso forestal no productivo, se toman como dato de partida las Cubiertas del Catastro de Usos del Suelo y Vegetación de la Corporación Nacional Forestal (CONAF), disponibles en el Sistema de Información Territorial (SIT CONAF). Como se expuso anteriormente, esta fuente de información posee distintos años de actualización (ver Cuadro 7.2-2).

En esta ocasión, mediante el uso de SIG, la información se agrupa según los campos *Uso* y *Sub-Uso*³¹, y se seleccionan solo los siguientes, tal como refleja el Cuadro 7.3-2:

Cuadro 7.3-2 Selección de Usos y Sub Usos de Cubiertas del catastro de CONAF

USO	SUBUSO
Bosque	Nativo
	Mixto
Humedales	Marismas herbáceas
	Ñadis herbáceos y arbustivos
	Otros terrenos húmedos
	Bofedales
	Turbales
	Vegas
	Vegetación herbácea en orillas de ríos

Fuente: Elaboración propia, a partir de CONAF (1997-2015).

Una vez separadas las áreas correspondientes a los Usos y Subusos mencionados en el cuadro anterior, se procede a sobreponer las *shapefiles* de SNASPE, Sitios Ramsar y Sitios Prioritarios de la Conservación de la Biodiversidad sobre las anteriores. Ello responde a la finalidad de obtener las áreas de estudio de los Usos del catastro de CONAF mencionadas sin considerar zonas de protección, la demanda de la cual está reflejada como caudal para protección ambiental en el Capítulo X.

De esta nueva capa generada, se extrae información de superficie (hectáreas) asociada. Una vez identificadas las superficies de cada Sub-Uso, estas se pueden relacionar a una subcuenca dentro de la región del territorio analizado.

³¹ El nombre de los campos con la información necesaria puede variar en algunas regiones, puede llamarse *USO TIERRA* o *USO ACTUAL*.

Desde este punto, la información se agrupa en dos metodologías distintas para calcular la evapotranspiración, la cual se emplea para estimar la demanda en cada subcuenca:

- i. Bosque: se utiliza la metodología en base al modelo de Zhang *et al.* (2001) para estimar la evapotranspiración anual (incluida interceptación).
- ii. Humedales: se usa un método fundamentado en la evapotranspiración de referencia y la aplicación de un coeficiente de cultivo.

A continuación, se detallan estos procesos.

7.3.3.1 Demanda en bosque nativo

Una vez identificadas las superficies correspondientes a *bosque nativo*, se procede a realizar una superposición espacial de *shapefiles* de *subcuencas* e *isoyetas* (DGA, 1987) con el fin de asignar a cada subcuenca una precipitación anual promedio, proporcional al área que ocupa cada isoyeta dentro de la superficie de la subcuenca. Para ello, se cuenta con la mapoteca de la DGA, la cual dispone de las líneas de isoyetas a nivel nacional. Cabe señalar que, a raíz de futuras actualizaciones del Balance Hídrico de Chile, los valores de isoyetas empleados actualmente pueden ser reemplazados por los nuevos valores manteniendo la metodología propuesta en el presente documento.

De la ecuación del modelo de Zhang *et al.* (2001) que relaciona la precipitación media anual y la evapotranspiración anual (ver acápite 7.2.1.1), se obtienen valores de evapotranspiración para cada subcuenca. Para bosque nativo, se aplica un valor de cobertura f de 0, incrementando el valor resultante de evapotranspiración en un 20%³². El parámetro anterior se fundamenta en el estudio de Huber *et al.* (2007), en el cual se concluye que los bosques nativos evapotranspiran un 20% más que una pradera. Para el caso de los bosques mixtos, esta consultora adoptó un valor igual al bosque nativo (20%).

7.3.3.2 Demanda en humedales

Para el caso de superficies correspondiente a *humedales*, se utilizan los valores de evapotranspiración de referencia obtenidos de AGRIMED (2015) y se aplica la ecuación del coeficiente de cultivo para cada Sub-Uso. Considerando la ausencia de mayor detalle

³² Es importante destacar que, para precipitaciones anuales menores a 475 mm, la ET determinada por la aplicación de esta medida será mayor a la precipitación. Aun así, la metodología propuesta se sustenta debido a que este estudio tiene el objetivo de estimar la demanda, y en ningún caso analizar si esta demanda es o no satisfecha; por lo tanto, si una superficie de bosque nativo o mixto se encuentra en una zona con precipitación inferior a 475 mm/año, es posible que dicho bosque se encuentre bajo estrés hídrico y su tasa de crecimiento o supervivencia se pueda ver afectada.

al caracterizar cada Sub-Uso dentro del Uso: Humedales, se aplicará un valor de K_c igual a 1,2 correspondiente al promedio de entre todos los registrados en el Cuadro 7.3-1.

Finalmente, con los datos de evapotranspiración (mm/año) correspondientes a cada superficie (hectáreas), se aplica la siguiente ecuación para calcular la demanda hídrica de los humedales en metros cúbicos al año:

$$Demanda = \sum_{i,j=1}^n (ET_i \cdot A_i \cdot 10)$$

donde:

ET_i Evapotranspiración asociada a una i -ésima subcuenca (mm/año).
 A_j Superficie j -ésima de humedales en una subcuenca analizada (hectáreas).

7.4 ENFOQUE METODOLÓGICO DE LA PROYECCIÓN DE LA DEMANDA FUTURA

7.4.1 Generalidades

Con la intención de generar la información cartográfica vegetacional de Chile, CONAF ha estado desarrollando desde hace 20 años el Catastro Nacional de usos de tierra y formaciones vegetales. Este catastro se ha mantenido en constante actualización, a través de proyectos de continuidad de alcance regional, monitoreando los cambios de uso ocurridos entre periodos de medición e identificando las causas asociadas. Como se comentó anteriormente, según la última actualización, en la actualidad la superficie cubierta de bosques representa casi el 23% del territorio nacional con 17,3 millones de hectáreas, donde la industria forestal, consta de aproximadamente 3 millones de hectáreas, equivalentes al 17,1% del total de bosques del país y a un 3,9% del territorio nacional (CONAF, 2016). Si bien esta fuente de información posee distintos grados de actualización, esta se ha transformado en la fuente cartográfica principal de consulta a la hora de estudiar a las comunidades vegetales de Chile.

Un punto importante a considerar en esta metodología es la susceptibilidad a eventos ocasionales como es principalmente el caso de los incendios forestales, donde cada año en periodo estival la frecuencia e intensidad de estos fenómenos aumenta considerablemente. Tal es el caso del último incendio forestal ocurrido entre enero y febrero del año 2017, el cual afectó a varias regiones y con gran severidad. Ante este fenómeno, CONAF dispuso, posterior al evento, de un catastro de áreas afectadas por dicho incendio forestal. Dada la importancia y magnitud que este fenómeno tuvo, se considera como parte de esta metodología.

Por último, además de la información cartográfica que CONAF desarrolla, esta corporación posee un registro temporal, año a año, especificando especies forestadas y reforestadas en

un nivel comunal, lo cual facilita de manera sustancial la posterior bajada de información a nivel de subcuenca.

7.4.2 Fuentes documentales utilizadas

- Catastro CONAF de la Región bajo estudio en formato Shapefile.
- Áreas incendios 2017 en formato Shapefile.
- Áreas de SNASPE, Sitios prioritarios para la conservación y Sitios RAMSAR en formato Shapefile.
- Límites de Comunas y Subcuencas en formato Shapefile.
- Estadísticas comunales CONAF, base de dato Excel con estadísticas comunales por cada región.

7.4.3 Metodología

A partir de los insumos requeridos para esta metodología, se realiza lo siguiente en cada caso: Del *Catastro CONAF de la Región bajo estudio*, por medio de la sobreposición de capas, se elimina de las áreas del catastro, las áreas correspondientes a SNASPE, Sitios prioritarios para la conservación o Sitios RAMSAR, debido a que estas áreas son analizadas en el capítulo de Uso Ambiental. De las nuevas áreas resultantes, se extraen solo las que hace referencia a usos forestales y se normalizan los atributos de las tablas con el fin de unificar criterios, así se obtienen las siguientes categorías:

- Bosque Nativo
- Plantación Forestal
- Humedales

Posteriormente, a cada área de uso forestal se le asigna una comuna de la región en estudio por medio del geoprocesamiento de capas (SIG) y se calcula el área en hectáreas (ha) de cada uso forestal en cada comuna. De esta capa obtenida se genera en paralelo otra en la cual se reste las áreas quemadas por consecuencia del incendio forestal ocurrido en febrero del 2017. Así finalmente se obtienen las áreas en hectáreas (ha) de los usos forestales en las comunas durante el año del catastro y post incendio 2017.

De las áreas comunales del catastro obtenidas, se realiza un nuevo geoprocesamiento de capas (SIG) pero esta vez con el shapefile de Subcuencas y se calcula el área en hectáreas (ha) de cada uso forestal en cada comuna y en cada subcuenca.

Por otra parte, de las *Estadísticas comunales de CONAF*, se extrae la tabla de áreas forestadas y reforestadas por especie correspondiente a la región estudiada. Los datos se agrupan según nativas o exóticas, forestado o reforestado y se expresan en totales anuales.

Para continuar con esta metodología de estimación de demanda hídrica del Uso Forestal, se establecen los siguientes supuestos generales:

- Áreas Forestadas Exóticas corresponden a las áreas plantadas que no eran bosque previamente, por lo tanto, se adicionan al total de área de Plantación Forestal año a año.
- Áreas Reforestadas Exóticas corresponden a áreas cortadas y vueltas a plantar, por lo tanto, no afectan el total de área Plantación Forestal.
- Sustitución corresponde a áreas de Bosque Nativo reemplazadas con plantaciones forestales (exóticas), por tanto, aumenta el área total Plantación Forestal y disminuye el área Bosque Nativo.

A partir de lo anterior, se utilizan las áreas del Catastro de CONAF como base en conjunto con los datos obtenidos de las Estadísticas de CONAF para estimar los aumentos o disminuciones en las áreas anuales de Plantación Forestal y Bosque Nativo. De estas variaciones se calcula la tasa porcentual anual de variación. Para proyectar los años posteriores hasta el 2040, se utilizan las tasas de crecimiento de los últimos 5 años.

Desde el año 2017 es posible que ciertas regiones presenten una disminución en las áreas de Plantación Forestal y Bosque Nativo, para estos casos se considerara lo siguiente:

- El área quemada de especies nativas se sustituirá con especies exóticas.
- A partir del año 2018 hasta el 2022 se prevé que el área quemada se recuperara en un 60% como áreas exóticas.
- Desde el 2023 hasta el 2027 se recuperará el 100% de la superficie quemada como áreas exóticas.
- Para áreas nativas entre el año 2018 al 2027, la tasa de disminución producto de la sustitución se mantendrá en 0%, debido a que se prevé que el área quemada pasará a ser sustituida.
- A partir del año 2028 se usarán las tasas de crecimiento de los años 2011 a 2015, repitiendo el ciclo hasta el 2040 para áreas exóticas.
- Para áreas nativas, a partir de 2028 se utilizará la misma tasa del 2015 hasta el 2040.

Posteriormente las áreas se ordenan por Comunas y se proyectan utilizando las tasas de variación anual hasta el 2040, dejando el año 2017 con los datos obtenidos de las áreas post incendios.

Para proyectar las áreas correspondientes a Humedales al año 2040, se establecen los siguientes supuestos:

- El área de Humedales se mantendrá constante en el tiempo.

Para estimar las áreas a nivel subcuenca, se utiliza la proporción entre el área a nivel subcuenca y el área a nivel comunal calculadas previamente por medio de SIG. Una vez se estimen todas las áreas de los distintos usos en todo el periodo analizado, se procede con la aplicación de la metodología actual según sea Uso productivo o Uso no productivo.

CAPÍTULO 8 METODOLOGÍA PARA EL ESTUDIO DE LA DEMANDA HÍDRICA DEL USO: ACUÍCOLA

8.1 INTRODUCCIÓN

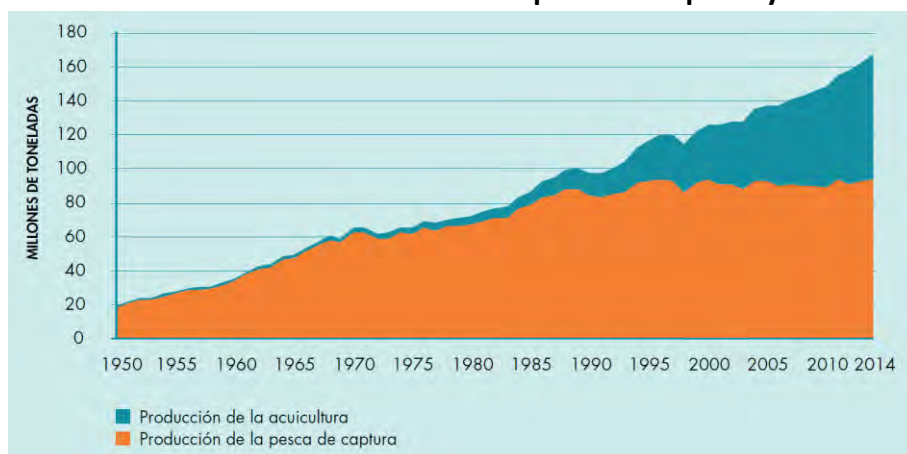
Chile, tanto en términos pesqueros (desembarque) como en acuicultura (cosechas), se ubica en una de las zonas marinas más productivas del planeta, desde donde se extraen cerca de 160 especies hidrobiológicas. La acuicultura comercial se inició en la década de los años 60 con algunos centros de ostricultura y miticultura³³, especialmente en la zona de Chiloé. Posteriormente, en la década de los años 80 comenzó el despegue de la industria salmonera, impulsándose en la década de los años 90 con la generación de las primeras ovas locales de salmónes. Actualmente Chile es reconocido como el segundo productor mundial de salmón después de Noruega, a pesar de los problemas por los que ha tenido que atravesar debido a la emergencia sanitaria producto del virus ISA (anemia infecciosa del salmón) (EDITEC-AQUA, 2015). Otro contratiempo en el sector es el fenómeno FAN (floraciones de algas nocivas), comúnmente conocido como *marea roja*.

De cualquier forma, según cifras del Anuario del año 2015 del Servicio Nacional de Pesca y Acuicultura (SERNAPESCA), la producción pesquera total en Chile alcanzó los 3,3 millones de toneladas, de las cuales el 36% correspondió a cosechas acuícolas (SERNAPESCA, 2015). En términos de exportaciones, 1,2 millones de toneladas fueron enviadas al exterior, por un monto superior a los US\$ 5.106 millones; de lo anterior, 778 millones de toneladas corresponden al sector acuícola, aportando US\$ 3.970 millones (SUBPESCA, 2015).

Según FAO (2016), a nivel mundial, la producción de alimentos de procedencia acuática ha dejado de basarse principalmente en la captura de peces para comprender la cría de un número creciente de especies cultivadas. Así, en 2014 se alcanzó un hito cuando la contribución del sector acuícola al suministro de pescado para consumo humano superó por primera vez la del pescado capturado en el medio natural. En la siguiente figura se muestra la tendencia mundial creciente en la producción acuícola de los últimos 20 años:

³³ Miticultura o mitilicultura: cría o cultivo de moluscos del género *Mytilus* (choro zapato, cholga, choro, chorito).

Figura 8.1-1 Producción mundial de la pesca de captura y la acuicultura



Fuente: FAO (2016).

Chile posee enormes oportunidades para seguir creciendo en esta actividad económica, considerando, entre otros, la calidad y cantidad de ambientes disponibles, la consolidación de la institucionalidad pública, la inversión en investigación, desarrollo y transferencia tecnológica y las políticas orientadas a desarrollar y diversificar la actividad acuícola (FAO, 2017). Sin embargo, y según esta fuente, el sector acuicultor chileno deberá también enfrentar las crecientes interacciones con otros usuarios (tanto de espacio como de recurso hídrico), desarrollándose sustentablemente, y lidiando con la competencia de otros países productores.

8.2 ENFOQUE METODOLÓGICO DE LA ESTIMACIÓN DE LA DEMANDA ACTUAL

8.2.1 Generalidades

8.2.1.1 Antecedentes

El Registro Nacional de Acuicultura (RNA) registra un total de 3.821 centros al año 2015, de los cuales 2.237 registraron operación (con o sin cosecha). La mayor representación de los centros corresponde a peces, seguido por moluscos y finalmente por algas (SERNAPESCA, 2015). La distribución regional de los centros por grupo de especie se presenta en la siguiente tabla:

Cuadro 8.2-1 Número de centros inscritos en el Registro Nacional de Acuicultura, por grupo de especie (2015)

Región	Microalgas	Algas	Crustáceos	Moluscos	Peces	Otros	Total Centros
XV	0	0	4	9	4	0	17
I	7	1	0	16	1	1	26
II	0	5	0	9	3	0	17
III	0	40	0	50	3	0	93
IV	2	6	3	63	10	4	88
V	0	1	7	5	13	2	28
RM	0	0	0	0	21	0	21
VI	0	0	2	1	2	0	5
VII	0	0	0	0	15	0	15
VIII	0	6	0	11	35	2	54
IX	0	2	0	50	98	0	150
XIV	0	6	0	15	53	0	74
X	0	534	4	1.186	678	11	2.413
XI	0	2	0	5	760	0	767
XII	0	0	1	4	117	0	122
Total	9	603	21	1.424	1.813	20	3.890

Nota: Hay centros que tienen autorizados más de un grupo de especie, por lo tanto, se contabilizan en cada uno de ellos.

Fuente: SERNAPESCA (2015).

De la tabla anterior, se visualiza que, si bien existen centros acuícolas en todas las regiones de Chile, éstos se concentran principalmente en las regiones X Los Lagos y XI Aysén. Se analiza a continuación en mayor detalle este sector:

- La zona geográfica del norte del país (regiones de la XV a la IV) está marcadamente enfocada hacia los productos del mar; esto es, sin necesidad de agua dulce dentro de su proceso productivo. Los cultivos de la zona están representados principalmente por moluscos, algas y algunas especies de peces y crustáceos. Por ello, los requerimientos de aprovechamiento de agua dulce en sí mismo serían mínimos o casi nulos.
- En la zona centro (regiones V a VII), los centros son mayoritariamente piscícolas, con presencia de productores de crustáceos y moluscos.
- En las regiones del sur del país (VIII a XII), igualmente hay una mayoría de centros dedicados a piscicultura, si bien también existe una buena representación de explotaciones de moluscos, y en menor medida, algas y crustáceos. Cabe señalar una separación general entre los productos de origen marítimo (como moluscos, crustáceos y algas y microalgas) y los de agua dulce (como piscícolas de salmón y

trucha arcoíris). De hecho, estas últimas especies en realidad se desarrollan, a lo largo de su ciclo productivo, en un ambiente acuícola mixto (agua dulce y salada).

8.2.1.2 Alcance

La acuicultura consiste en el cultivo y la reproducción de especies acuáticas en agua dulce o salada. En este estudio se analiza únicamente los centros que desarrollan sus cultivos en agua dulce.

El sector piscícola, en Chile, presenta las más altas demandas de agua dulce, debido a sus elevados volúmenes productivos. Estas demandas corresponden al uso de recursos superficiales (y en menor medida subterráneos), a través del ejercicio de derechos de aprovechamiento mayoritariamente de tipo no consuntivo³⁴, principalmente en el sur de nuestro país.

Según lo anterior, se han localizado los centros acuícolas “en tierra” del RNA, de los cuales se han seleccionado exclusivamente aquellos en que la *fuentes hídrica* utilizada no proviene de agua de mar, siendo considerados los que utilizan agua proveniente de río, estero, arroyo, pozo, vertiente, lago, laguna o canal. Se han descartado aquellos centros en que el origen de la fuente es desconocido.

³⁴ Los derechos concedidos en el Registro Público de Derechos de Aprovechamientos de Aguas, a fecha de actualización 06/01/2017, para el uso del agua “piscicultura”, ascienden a 877.537,76 l/s de tipo “no consuntivo” frente a 13.758,62 l/s de tipo “consuntivo”.

**Cuadro 8.2-2 Centros de cultivo “en tierra” con inscripción vigente en RNA (año 2016)
con uso de agua dulce³⁵**

Región	Hatchery ³⁶	Piscicultura	Total
XV	3	0	3
I	3	1	4
II	0	0	0
III	0	0	0
IV	4	3	7
V	0	9	9
RM	0	7	7
VI	0	2	2
VII	1	13	14
VIII	0	28	28
IX	1	91	92
XIV	0	41	41
X	3	126	129
XI	3	39	42
XII	2	8	10
Total	20	368	388

Fuente: Elaboración propia a partir de SERNAPESCA (2016b).

Esta tipología de centros acuícolas constituye la base para la estimación de la demanda hídrica actual, tal como se describe más adelante en el acápite 8.2.3. La gran mayoría de ellos está enfocado a la producción de salmónidos.

8.2.2 Fuentes documentales utilizadas

Las fuentes de información en la estimación de la demanda hídrica acuícola actual son las siguientes:

- Centros acuícolas en tierra inscritos en el RNA con captación de agua y producción por especie 1996-2016 (Base de datos Excel y *shapefile*); información facilitada por SERNAPESCA (2016b).
- Cosechas de centros de acuicultura, por especie y región, de los Anuarios años 2013-2015 (Base de datos Excel), e Informe de estadísticas oficiales (Enero – Noviembre 2016), disponibles en la web (SERNAPESCA, 2013 a 2016a).

³⁵ Cuerpos de agua: río, estero, arroyo, pozo, noria, vertiente, lago, laguna, canal.

³⁶ Centro en tierra para el desove, eclosión y cultivo de los estados de desarrollo temprano de los peces.

- Tablas de equivalencia de requerimientos de agua para diferentes producciones acuícolas:
 - Decreto 743 del MOP (2005). Fija Tabla de Equivalencias entre caudales de agua y usos, que refleja las prácticas habituales en el país en materia de aprovechamiento de aguas. Concretamente, establece tasas de consumo en salmónidos, bagre de agua dulce, camarón de río y langosta australiana.
 - Resolución 1567 de la DGA (2016). Aprueba uso no contemplado en la Tabla de Equivalencia entre caudales de agua y usos del Decreto Supremo MOP nº 743, de 2005. Especifica ratios de consumo en producción de Esturión Osetra.

8.2.3 Metodología

Para la estimación de la demanda de agua dulce de los centros acuícolas, se debe determinar en primer lugar la producción de cada explotación por grupo de cultivo, para el año actual de referencia, 2015. Las producciones, expresadas en toneladas anuales, se multiplican por una tasa de consumo de agua, característica de cada especie, expresado en millones de metros cúbicos al año (MMm³/año):

$$Demanda\ acuícola = \sum_{i,j=m}^n (Prod_{i,j} \cdot Tasa_j) / 10^6$$

donde:

- | | |
|--------------|---|
| $Prod_{i,j}$ | Producción acuícola asociada a un i -ésimo centro acuícola, de tipología de cultivo j -ésimo (tn/año) |
| $Tasa_j$ | Tasa de requerimiento de agua por tipología de cultivo j -ésimo (m ³ /tn). |

Se tomarán las referencias de requerimientos hídricos indicadas en el acápite 8.2.2, referidos a los grupos de cultivos acuícolas analizados, siendo éstas:

Cuadro 8.2-3 Requerimiento de agua para acuicultura por cultivo

Usos	Valor	Unidad	Referencia
Producción de Salmón ³⁷	500.000	m ³ /Ton	MOP (2005)
Producción de Trucha Arcoíris (y otras spp. ³⁸)	300.000	m ³ /Ton	MOP (2005)
Producción de Bagre	8.000	m ³ /Ton	MOP (2005)
Producción de Camarón de Río	30.000	m ³ /Ton	MOP (2005)
Producción de Langosta de Agua Dulce	70.000	m ³ /Ton	MOP (2005)
Producción de Esturión Osetra (y otras spp. ³⁹)	30.000 ⁴⁰	m ³ /Ton	DGA (2016c)

Fuente: Elaboración propia a partir de referencias indicadas.

Para el caso de la producción de algas (*Haematococcus spp.* y *Spirulina spp.*), se tomarán como referencia los valores propios de cada centro productor.

En lo referente a las producciones acuícolas objeto de análisis, si bien la base de datos proporcionada por SERNAPESCA recoge la serie histórica 1996-2016, se detectaron en dicho registro unas cifras en los años 2014-2015 que pudieran ser preliminares, puesto que no son acordes con la evolución de las cosechas acuícolas plasmadas en los Anuarios publicados por esta institución ni con posibles caídas de gran impacto en las cosechas por agentes externos (crisis sanitarias o de mercado), descendiendo a valores productivos anteriores al año 2003, tal como se muestra en la figura siguiente:

Figura 8.2-1 Evolución de la producción de salmón y trucha en centros acuícolas en tierra entre 1999 y 2015 (en toneladas/año).

Fuente: Elaboración propia a partir de SERNAPESCA (2016b).

³⁷ Se considera salmón del Atlántico (*Salmo salar*), salmón plateado o coho (*Oncorhynchus kisutch*), salmón rey (*Oncorhynchus tshawytscha*), salmón ártico (*Salvelinus alpinus*) y salmón cereza (*Oncorhynchus masou*).

³⁸ Se considera, además de trucha arcoíris (*Oncorhynchus mykiss*), trucha café (*Salmo trutta*) y trucha de arroyo (*Salvelinus fontinalis*).

³⁹ Se considera además de esturión Osetra, esturión blanco y esturión de Siberia.

⁴⁰ Cultivo en estanques con sistema de recirculación.

Se remitió consulta oficial al respecto, sin obtener respuesta a la fecha de elaboración del presente documento. Por ello, se optó por estimar la producción acuícola de 2014 y 2015 de la forma siguiente:

- i. Se recopilaron las cifras de cosecha de centros acuícolas de los años 2013, 2014, 2015 y 2016, por especie y región, seleccionando para cada caso:
 - a. Especies: salmónidos (salmón y trucha, varias spp.). Este grupo de cultivo es el más representativo en las regiones acuícolas de Chile.
 - b. Regiones desde la Araucanía (IX región) hasta Magallanes (XII región): éstas constituyen las de mayor peso productivo en el sector acuícola; en el resto de regiones, las producciones registradas son muy minoritarias o inexistentes.

Se determinaron las variaciones en las cosechas del “total salmón” y el “total trucha” a escala regional, tomando el año 2014 como base, y determinando los porcentajes de incremento o decremento a los años 2015 y 2016⁴¹. Se seleccionaron estos años puesto que se trata de cifras de cosechas; cabe mencionar que existe un *desfase* productivo entre el tiempo de producción de alevines o *smolts* y la propia cosecha después del periodo de engorde en mar. Por lo anterior, esto se tradujo en una analogía a las variaciones en fase de agua dulce de los años 2014 y 2015, considerando como año base de referencia el 2013.

- ii. Para el resto de regiones y otros cultivos, siendo éstos minoritarios, y por falta de otra fuente de información, se mantuvieron las cifras proporcionadas por SERNAPESCA (2016b).

Para cada centro se calcula la demanda hídrica anual según lo expuesto anteriormente. En todos los casos estos usos de agua se consideran de tipo no consuntivo, en ausencia de información de la tipología de los derechos de agua por centro acuícola⁴².

Posteriormente, se ubican los centros productores acuícolas de agua dulce analizados y se cruzan las demandas correspondientes con el *shapefile* subcuencas de la mapoteca de la DGA, con la finalidad de obtener los requerimientos de agua por subcuenca, cuenca y región, a lo largo de todo el país.

⁴¹ Se consideró para el cálculo media móvil de 2 años para suavizar las potenciales variaciones en las cosechas por externalidades durante la última fase productiva y disponer de una tendencia más generalista trasladable a la primera etapa en agua dulce.

⁴² Si bien puede existir un cierto número de centros que tenga derechos consuntivos (por ejemplo, aquellos cuya fuente sea pozo, noria, etc.), no se dispone de información completa para analizar tal categoría. Tal como se indica en la nota al pie 24, éstos serían claramente minoritarios respecto el volumen nacional.

8.3 ENFOQUE METODOLÓGICO DE LA PROYECCIÓN DE LA DEMANDA FUTURA

8.3.1 Generalidades

La proyección de la demanda hídrica en el sector acuícola, siempre referido a uso de agua dulce, puede verse influenciado por varios factores dentro del ciclo productivo completo, tales como la situación de las exportaciones, las emergencias sanitarias o el avance tecnológico en la eficiencia productiva.

Las proyecciones se basarán en la tendencia productiva histórica, ya que se dispone de una serie extensa de registros anuales por centro acuícola (desde 1999 a la actualidad⁴³). Lo anterior, sin embargo, tendrá en cuenta las siguientes consideraciones:

- i. Se asume que las producciones futuras según la clase de cultivo se comportan de forma homogénea a escala regional;
- ii. Se mejorarán las eficiencias de uso del recurso hídrico mediante aplicación de tecnologías de recirculación de agua en los centros de tierra.

xxi. Especies con producción en cuerpos de agua dulce

En primer lugar, se han agrupado los diferentes cultivos acuícolas producidos en Chile, referidos a la serie histórica de SERNAPESCA (2016b), en 6 grupos o categorías, tal como se muestra en la tabla siguiente:

⁴³ Indicar que el periodo 2014-2015 fue estimado en base al año 2013 y la variación anual de las cosechas acuícolas en dicho periodo.

Cuadro 8.3-1 Grupos de especies acuícolas cultivadas en Chile

Grupo	Especie
Salmón	Salmón ártico
	Salmón cereza
	Salmón del Atlántico
	Salmón planteado o coho
	Salmón rey
Trucha	Trucha arcoíris
	Trucha café
	Trucha de arroyo
Esturión	Esturión blanco
	Esturión de Siberia
	Esturión osetra
Bagre	Bagre de agua dulce
Crustáceos	Camarón de río del norte
	Langosta australiana
Algas	Haematococcus
	Spirulina

Fuente: Elaboración propia.

La anterior distribución se ha establecido en base a las propias características productivas por tipología de la especie o la relación taxonómica y su desarrollo y evolución productivo-económica en el tiempo.

xxii. Sistemas de Recirculación en Acuicultura (SRA)

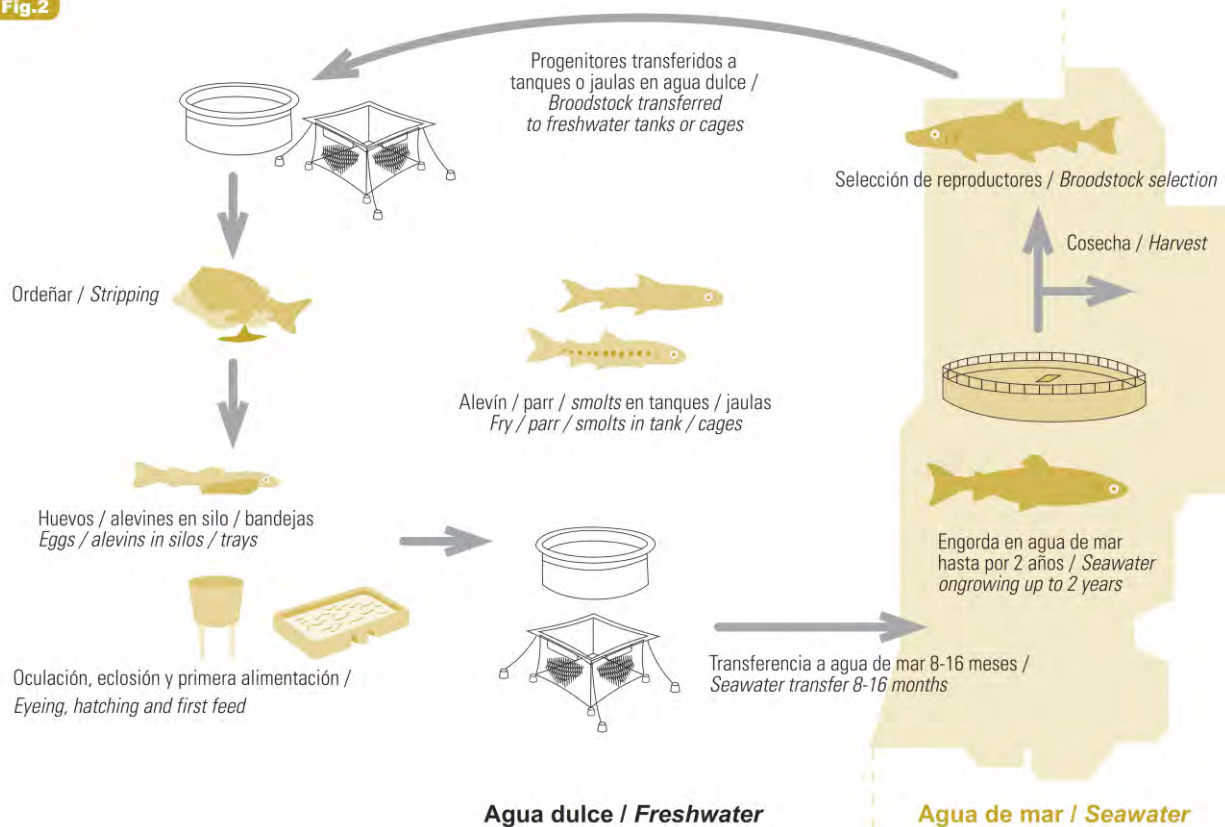
Un factor de gran importancia en la valoración de las demandas de agua tiene relación con el manejo que se hace del recurso durante el proceso productivo. Por ello, a continuación, en la Figura 8.3-1 se describe el ciclo de vida de los salmónidos⁴⁴ y su crianza en centros acuícolas.

Los salmónidos más cultivados en Chile son el salmón Atlántico (*Salmo salar*), salmón Coho (*Oncorhynchus kisutch*) y la trucha Arcoíris (*Oncorhynchus mykiss*). Estas son especies anádromas, es decir, desovan en cuerpos de agua dulce donde alcanzan su estado juvenil (*smolt*), para luego migrar hacia aguas marinas en las cuales crecen (WWF, 2010).

⁴⁴ Constituyen el cultivo acuícola principal en Chile.

Figura 8.3-1 Ciclo de los salmónidos cultivados en forma intensiva en Chile

Fig.2



Fuente: WWF (2010).

Los distintos tipos de sistemas de producción de smolts en Chile son (WWF, 2010):

- Sistemas abiertos sobre cuerpos de agua lacustres, estuarios y ríos, mediante balsas-jaulas flotantes.
- Piscicultura en tierra con flujo abierto. Estas instalaciones en tierra utilizan el agua de cursos o cuerpos de agua adyacentes; una vez que ésta ingresa a la piscicultura, pasa a través de los estanques plásticos donde los peces son contenidos, para posteriormente ser descargada nuevamente al río, estero o lago.
- Piscicultura en tierra con sistemas de recirculación. Un sistema de recirculación en acuicultura (SRA) es aquel que incorpora el tratamiento y la reutilización de agua para el cultivo de organismos, considerando alrededor del 10% de reemplazo de agua diariamente, pudiendo variar entre el 5 al 20% dependiendo del estanque de cultivo y filtración (Gooley y Gavine, 2003).

La intensidad de la recirculación es un parámetro característico de cada empresa, fluctuando generalmente entre un 30% de recambio en los casos menos exigentes hasta

los más intensivos, llegando al 2% (WWF, 2010). Lógicamente, mientras más intenso sea el SRA, menos agua requiere, y viceversa.

Los SRA, si bien deben alcanzar viabilidad económica mediante densidades de stock altas y elevadas tasas de crecimiento, ofrecen ventajas en el control de impactos sanitarios, impactos ambientales (calidad y cantidad de agua) y seguridad del recurso hídrico para mantener la producción (especialmente si el caudal disminuye significativamente durante la época de estiaje). Ejemplo de esta aplicación fue la implantación en diversas empresas con centros productivos en los lagos del sur de Chile⁴⁵ desde más de una década atrás.

Por lo anterior, se asume que la tendencia en los centros de tierra con flujo abierto existentes actualmente (o futuros) contemplará la incorporación gradual de estos sistemas de recirculación. Así mismo, también se puede pensar en la relocalización de los centros productivos con balsas-jaulas en cuerpos de agua dulce hacia este sistema más ecoeficiente. Esta hipótesis se aplicará en el proceso de generación de las proyecciones de demanda de agua futura, tal como se describe en el acápite 8.3.3.

8.3.2 Fuentes documentales utilizadas

Las fuentes de información utilizadas en la proyección de la demanda hídrica acuícola futura son las mismas que se consideraron para la estimación de la demanda actual (ver acápite 8.2.2.). Adicionalmente, se consultó la siguiente fuente:

- Determinación de tasas características de uso del agua según sector y rubro (DGA-UCH, 2005) para el análisis del ratio de consumo de agua en los centros acuícolas.

8.3.3 Metodología

En base a lo expuesto en la metodología de demanda hídrica acuícola actual, la demanda futura puede plantearse como una función de dos parámetros fundamentales, a saber:

- (i) El volumen de producción acuícola por centro (expresado en toneladas al año);
- (ii) La tasa unitaria de consumo hídrico (de agua dulce) para procesos de producción de los diferentes cultivos acuícolas.

A partir de lo anterior, se puede observar que:

⁴⁵ Inversiones con tecnología de recirculación, hasta etapa de alevinaje, fueron realizadas por las empresas Ecofish, Camanchaca, Granja Marina Tornagaleones, Marine Harvest y Multiexport (WWF, 2007). Según esta misma fuente, Fjord Seafood, parte de Marine Harvest, fue la primera empresa en cerrar el ciclo ova – smolt bajo tecnología de recirculación.

- a) La producción es función de una serie de parámetros exógenos, la cual puede tratarse como una variable de comportamiento estocástico.
- b) La tasa unitaria de consumo hídrico es un factor potencialmente variable en el tiempo, la cual debería tender hacia el supuesto de incrementar la eficiencia hídrica, tal como se ha presentado en el acápite 8.3.1 apartado ii.

La estimación de la demanda hídrica acuícola futura se fundamentó en las tendencias productivas de la serie histórica 1999-2015 basada en SERNAPESCA (2016b) y adaptada según las cosechas para el periodo 2014-2015, según lo aplicado en el cálculo de la demanda actual (acápite 8.2.3.), utilizando proyecciones a través del uso de Series de Tiempo (SdT). Esta herramienta permite considerar el comportamiento histórico de la variable basal en la estimación del comportamiento futuro, la cual en este caso es la producción acuícola de cada centro productivo.

Para ello, se unificaron los centros productivos por subcuenca y se sumaron las producciones de las diferentes especies acuícolas en grupos, según lo establecido en el Cuadro 8.3-1. Posteriormente, se proyectó la serie histórica de dichas producciones anuales, mediante la herramienta de Excel “PREVISIÓN”, hasta el año 2040, ajustando el parámetro “estacionalidad” de forma particular en cada caso. El nivel de confianza aplicado fue del 70%.

Referente a los requerimientos hídricos en el proceso productivo, en el caso específico de los salmónidos (“salmón” y “trucha”), la tasa de consumo considerada, a diferencia de la estimación de la demanda actual, no fue fija, sino que es un parámetro variable aplicando la hipótesis de mejora de la eficiencia de consumo de agua por la implantación de sistemas de recirculación en acuicultura (SRA) en los centros de cultivo mencionada en el acápite 8.3.1. Para lo anterior, las tasas de consumo aplicadas en salmónidos van disminuyendo gradualmente en el tiempo, según el supuesto por el cual se alcanza, al año 2040, el 10% de la tasa de referencia (aplicada en el año 2015). Lo anterior se refleja en el cuadro siguiente:

Cuadro 8.3-2 Estimación del requerimiento de agua dulce en los procesos productivos de los centros de tierra para salmón y trucha, periodo 2015-2040

Año	Tasa en producción de salmón (m³/tn)	Tasa en producción de trucha (m³/tn)
2015	500.000	300.000
2016	482.000	289.200
2017	464.000	278.400
2018	446.000	267.600
2019	428.000	256.800
2020	410.000	246.000
2021	392.000	235.200
2022	374.000	224.400
2023	356.000	213.600
2024	338.000	202.800
2025	320.000	192.000
2026	302.000	181.200
2027	284.000	170.400
2028	266.000	159.600
2029	248.000	148.800
2030	230.000	138.000
2031	212.000	127.200
2032	194.000	116.400
2033	176.000	105.600
2034	158.000	94.800
2035	140.000	84.000
2036	122.000	73.200
2037	104.000	62.400
2038	86.000	51.600
2039	68.000	40.800
2040	50.000	30.000

Fuente: Elaboración propia.

Sobre esta hipótesis, cabe mencionar las siguientes consideraciones:

- i. Las tasas de referencia son aquellas estipuladas en el D.S. 743 (MOP, 2005) en salmónidos, bagre de agua dulce, camarón de río y langosta australiana, y en la Resolución 1567 (DGA, 2016) en la producción de esturión osetra.
- ii. Así como la tasa de requerimiento de agua de esturión osetra considera cultivo en estanques con sistema de recirculación, los valores establecidos en el D.S. 743 en producciones acuícolas no especifican que se estuviera considerando el uso de estos sistemas de ahorro de agua, relativamente nuevos en la fecha de publicación del decreto.

- iii. En el caso del salmón, según lo indicado en DGA-UCH (2005), la tasa de 500.000 m³/tn corresponde a un valor promedio obtenido del consumo de agua en los centros acuícolas atendiendo a producción y a derechos de agua. Si bien esta dotación de consumo está cercana con los resultados obtenidos en centros abastecidos desde aguas subterráneas, podría no representar el uso real de recurso hídrico que aplicaban las empresas a escala nacional, ya que existían casos con cifras inferiores⁴⁶. En el caso de producción de trucha arcoíris, con una tasa de referencia de 300.000 m³/tn, también constituye un valor promedio de los centros analizados (DGA-UCH, 2005).
- iv. Si bien el consultor solicitó información a SERNAPESCA de los sistemas de recirculación de los centros de tierra, al momento de elaboración del presente documento no se había recibido dicho detalle. Por lo anterior, y de forma de considerar este factor en la proyección de demanda, se efectúa la hipótesis descrita anteriormente hasta el año 2040 sobre el grado de implantación de SRA en los centros acuícolas chilenos, lo cual se traduce en una tasa al final del periodo de análisis de 50.000 m³/tn para salmón y de 30.000 m³/tn para trucha.

Para el resto de cultivos, se mantienen las tasas recogidas en el Cuadro 8.3-2.

Finalmente, a partir de la secuencia de producciones obtenida para el periodo 2016-2040, se obtuvieron las demandas anuales aplicando la tasa de consumo unitaria para cada grupo de cultivo, expresadas en millones de metros cúbicos al año (MMm³/año):

$$Demanda\ acuícola = \sum_{i,j,k=m}^n (Prod_{i,j,k} \cdot Tasa_{j,k}) / 10^6$$

donde:

- $Prod_{i,j,k}$ Producción acuícola asociada a una i -ésima subcuenca, de tipología de cultivo j -ésimo, para el año k -ésimo (tn/año)
- $Tasa_{j,k}$ Tasa de requerimiento de agua por tipología de cultivo j -ésimo, para el año k -ésimo (m³/tn).

⁴⁶ En DGA-UCH (2005) se analizaron los datos de caudal solicitado (l/s) por unidad de producción (tn) en centros de salmónidos en Chile, detectando requerimientos de agua muy superiores respecto las referencias internacionales. Textualmente, “esta situación está relacionada directamente con una práctica habitual [...] en que se solicita un derecho de aprovechamiento no consuntivo que supera con creces las necesidades reales de los sistemas de producción”. No queda recogido en el documento si, al momento de realizar el análisis, se consideró la existencia de algún centro con sistema de recirculación ya implantado.

CAPÍTULO 9 METODOLOGÍA PARA EL ESTUDIO DE LA DEMANDA HÍDRICA DEL USO: MINERO

9.1 INTRODUCCIÓN

Siendo la minería una componente fundamental en la matriz productiva del país (7,8% del PIB nacional, al segundo trimestre de 2016), evaluar la demanda de uno de sus principales recursos clave —el agua—, resulta de relevancia estratégica, no solo para la planificación de la propia industria, sino para la planificación del país en su conjunto, en sus distintas unidades territoriales y niveles institucionales, públicos y privados.

En los últimos estudios sobre la demanda hídrica de la minería se revela una tendencia al alza en el uso de agua de mar en los procesos de minerales, versus la reducción en el uso de recursos hídricos continentales. El estudio “Proyecciones de agua y energía eléctrica en la minería del cobre a 2027” (COCHILCO, 2017) establece que, mientras en 2016 la demanda hídrica nacional minera sobre aguas continentales asciende a 13 m³/s, a 2027 dicha demanda⁴⁷, con base en la cartera actual de proyectos mineros cupríferos, se espera disminuirá a 10,8 m³/s, en beneficio del aumento en la participación del agua de mar (desalinizada o no). A 2027, esto implica un alza global en el uso de agua fresca, por parte de la minería del cobre, del 22,56% respecto de la situación actual (año base: 2016), con un aumento del requerimiento de agua de mar del 173% y una disminución de la demanda de aguas continentales del 16,92%.

Si bien desde el punto de vista del balance hídrico continental lo anterior se trata de una buena noticia, la presión hídrica por parte de esta actividad sobre acuíferos y ríos seguirá siendo relevante; ello es así, más aún, si se considera el escenario de escasez hídrica en que deben convivir la minería y las demás actividades productivas del país, que también requieren de agua para subsistir.

En una visión macro del país, tal como sucede con la mayoría de las actividades productivas, la distribución de la minería no es uniforme, como tampoco lo es su relación con otras actividades intensivas en el uso del agua, como, por ejemplo, la agricultura; lo mismo sucede con las fuentes

⁴⁷ La demanda hídrica actual estimada por COCHILCO para la minería nacional de cobre difiere en poco más de 1 m³/s respecto de la demanda hídrica que informa la SONAMI, equivalente a 14,3 m³/s.

hídricas que sirven a ellas. Esto determina la eventual condición crítica o no-crítica del balance hídrico para una determinada unidad territorial (cuenca, subcuenca, provincia, región, etcétera). Por tanto, las estimaciones globales de demanda no son suficiente, debiéndose contar con una desagregación espacial lo más fina y razonable posible de los requerimientos de agua en las distintas zonas del país. Esto permitirá, tal como se dijera anteriormente, poder orientar y/o planificar el desarrollo sustentable a nivel de *subterritorios*, conforme la presencia de los distintos recursos con los cuales se cuenta, además de protegerlos para asegurar su disponibilidad futura.

Sin embargo, lo anterior no resulta sencillo, tal como ha quedado plasmado en estudios precedentes que han abordado la problemática. Esto se debe, fundamentalmente, a la disponibilidad de información y a las características que de ella se requieren para poder efectuar estimaciones con buen nivel de aproximación. Aun cuando el acceso a la información ha mejorado considerablemente en los últimos años, existen diferencias notables entre los diferentes sectores de la industria minera. Mientras la minería del cobre pone a disposición pública una gran cantidad de datos y de información, aquella proveniente de la industria de otros minerales, metálicos y no metálicos, no presenta una suficiencia tal que permitan estimaciones directas para los efectos del presente trabajo.

Otro frente complejo que se debe abordar es la gran diversidad de características técnicas, tecnológicas y operacionales con que cuentan las distintas faenas mineras a lo largo del país, incluso dentro de la explotación de un mismo mineral. Por ejemplo, para el caso del cobre, el consumo de agua para el proceso del mineral, depende, entre varios otros factores, de:

- Fuente hídrica principal (agua de mar o continental, superficial o subterránea).
- Volúmenes de extracción y producción de mineral.
- Eficiencia de los procesos.
- Tipología del proceso de obtención de cobre fino (concentrado, hidrometalurgia).
- Ley de mineral.
- Tasa unitaria de consumo.
- Disposición de sistemas de recirculación de agua.

Por ello, se ha recopilado la mayor cantidad de información posible proveniente de la industria minera (datos de producción, tasas de consumo hídrico, etcétera), en la medida que ella se encuentre disponible y resulte adecuada y confiable según los objetivos del estudio: efectuar una estimación de la demanda minera actual y futura de aguas continentales, tal como se está realizando para otras componentes de la demanda hídrica nacional.

Cabe comentar que la desagregación se ha efectuado a nivel de subcuenca, cuenca y región, con base en todas las fuentes de información puestas a disposición por la industria y la

institucionalidad pública y privada que se relacione tanto con la actividad minera como con los recursos hídricos. A dichas fuentes de información se sumaron todas aquellas publicaciones debidamente acreditadas, nacionales y extranjeras, que proporcionan información útil.

Respecto de la metodología de trabajo utilizada, se desarrolla detalladamente en el acápite 9.2, seguido de su aplicación a una región del país (acápites 9.3), para luego aplicarla a las unidades territoriales identificadas de todo el país.

9.2 ENFOQUE METODOLÓGICO DE LA ESTIMACIÓN DE LA DEMANDA ACTUAL

9.2.1 Generalidades

En este capítulo se revisa y justifica el enfoque metodológico propuesto en la estimación de las demandas de agua derivadas de la actividad minera. Los aspectos fundamentales de este enfoque son los siguientes:

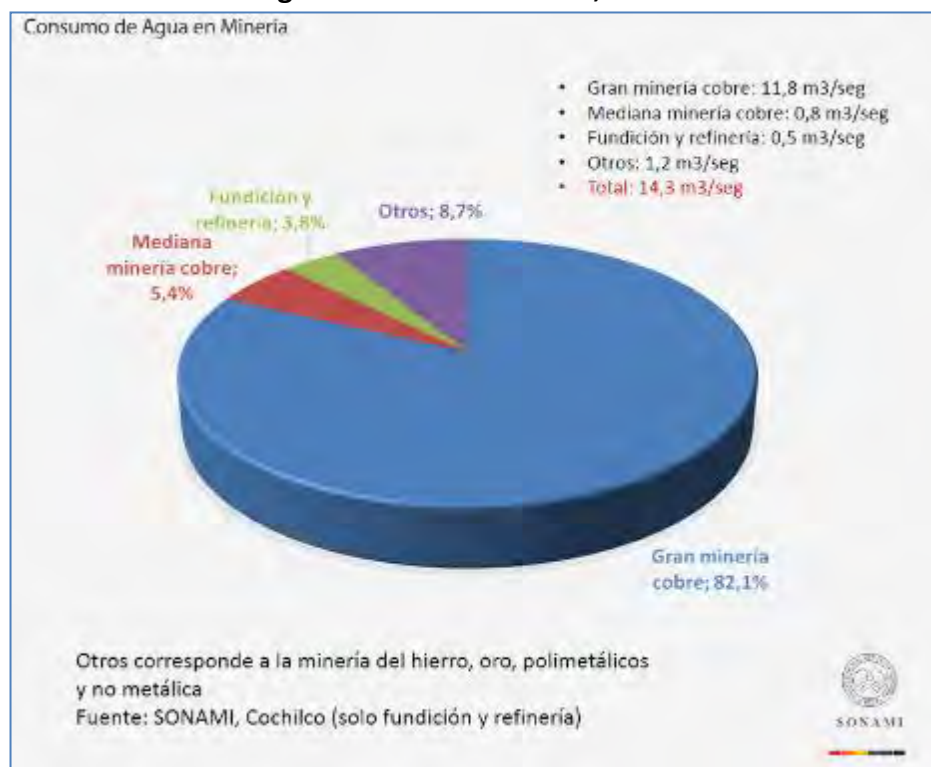
- i. Revisión de antecedentes de carácter hídrico respecto el uso minero, con una completa presentación de las formas de uso del agua en la minería de Chile.
- ii. Alcance del cálculo de la demanda hídrica minera, incluyendo la identificación de fuentes hídricas (cuerpos de agua superficial, subterránea y/o marina).
- iii. Identificación de las fuentes de información.
- iv. Definición de enfoque metodológico según características de las explotaciones mineras, incluyendo la declaración justificada de supuestos y criterios de cálculo.

xxiii. Antecedentes

En primer lugar, se expone la situación actual de la demanda del recurso hídrico en la minería chilena, en la que cabe diferenciar claramente la participación de cuatro grupos: la gran minería del cobre, la minería metálica no cuprífera, la minería no metálica y las operaciones de fractura hidráulica para la extracción de hidrocarburos.

A grandes rasgos, el mayor consumo a nivel nacional de agua fresca en minería (sin desagregar por fuentes continentales o marinas), se concentra en la gran minería del cobre, alcanzando el 82,1% del caudal utilizado (equivalente a 11,8 m³/s) (SONAMI, 2017a). El resto de la actividad minera, incluyendo la mediana minería del cobre, actividades de fundición y minería y otras extracciones mineras (oro, plata y minería no metálica), alcanzarían, a nivel país, un consumo de agua fresca de solo 2,5 m³/s (ver Figura 9.2-1).

Figura 9.2-1 Consumo de agua fresca en la minería; valores actualizados a nivel nacional



Fuente: SONAMI (2017a).

Producto de la relevancia que ostenta la gran minería del cobre en la intensidad del uso de recursos hídricos frente a los demás sectores mineros del país, en el presente acápite se entrega, como breve marco referencial, una descripción general de cómo se utiliza el agua en la gran minería del cobre, la minería metálica no cuprífera y en la minería no metálica, todo ello sin perjuicio de las estimaciones de demanda hídrica, que abarcan todos los sectores productivos de los cuales haya información disponible y suficiente para efectuar los cálculos.

xxiv. El uso de agua en la Gran Minería del Cobre

De acuerdo a COCHILCO (2014c), en la minería del cobre, el agua se utiliza en cuatro grandes áreas:

- **Área Mina.** El agua se utiliza principalmente en la humectación de caminos internos, con el fin de disminuir la emisión de polvo en suspensión, producto del tránsito de vehículos y camiones. Este consumo puede variar entre 0 y 15% del total de agua utilizado en una operación minera.

- Área Planta. Según el proceso del mineral, el uso dependerá del proceso con que la planta obtiene el cobre proveniente del mineral que ingresa a ella. Dichos procesos son los siguientes:
 - Concentración. Es el proceso más intensivo en el uso de agua fresca, respecto de los volúmenes totales. El proceso incluye las siguientes etapas:
 - a) chancado y molienda, b) flotación, c) clasificación y d) espesamiento.
 - De acuerdo a lo señalado por la referencia citada, la posibilidad de recircular los volúmenes de agua ingresados al proceso puede depender de varios factores (técnicos y económicos), entre ellos la distancia entre la concentradora y las instalaciones de filtrado y almacenaje. En caso de que ello no resulta posible, se indica que parte del agua se destina a uso industrial dirigiéndose el resto a su disposición final en el ambiente, bajo condiciones controladas.
 - Cabe destacar que parte importante del agua que se utiliza en flotación pasa a formar parte de los relaves, los que se envían a la etapa de espesamiento para recuperar parte del agua contenida.
- Pilas de lixiviación (hidrometalurgia). El principal uso de recursos hídricos en este proceso radica en la solución ácida de agua con ácido sulfúrico, capaz de disolver el cobre contenido en minerales oxidados de cobre.
- Relaves. Constituyen los volúmenes del efluente que provienen de la planta y que se descargan en tranques. En estas unidades, a través de la decantación, se separa la fase acuosa de la sólida. Cuando hay factibilidad económica, las aguas se retornan al proceso de flotación, disminuyendo así el consumo de agua fresca.
- Campamentos y servicios. Corresponde al volumen utilizado de agua menor en relación a los consumos comentados en los párrafos precedentes. Consiste en usos asociados al consumo humano (bebida, servicios sanitarios, cocina, aseo, etcétera).

El Consejo Minero, a través de su sitio web (<http://www.consejominero.cl/>), entrega estimaciones acerca de la distribución porcentual de los consumos de agua fresca en las áreas señaladas, la que se grafica en la Figura 9.2-2.

Figura 9.2-2 Distribución porcentual de los principales usos del agua en la minería



Fuente: Consejo Minero (2017).

Sin perjuicio de la distribución comentada, el presente estudio se ha focalizado en los consumos relacionados con los procesos de concentración e hidrometalurgia, los que agrupan el 87% de la demanda hídrica total. Los cálculos se han efectuado según la información disponible y los parámetros que permiten obtener valores con buen nivel de aproximación.

xxv. Uso del agua en la minería metálica asociada a otros productos

En Chile, el resto de la minería metálica (es decir, excluyendo al cobre), se concentra en la extracción y obtención de molibdeno, oro, plata, hierro, cinc y plomo. En el Cuadro 9.2-1 se establece de manera muy general la procedencia de la minería metálica no cuprífera más relevante para el país.

Cuadro 9.2-1 Principal minería metálica en Chile, además de la producción cuprífera

METAL	MODO DE EXTRACCIÓN / PRODUCCIÓN
Molibdeno	Se obtiene en su totalidad como subproducto de la minería del cobre, recuperado en las operaciones de concentración de minerales tipo sulfuro.
Oro	Se obtiene a partir tanto de faenas auríferas como de faenas cupríferas, como un subproducto de la minería del cobre.
Plata	Se obtiene como subproducto del oro y del cobre.
Hierro	Producción a granel y en pellets.

Fuente: SONAMI (2017a)

Respecto del uso de agua en sus procesos, tal como se ilustró en la Figura 9.2-2, en términos relativos, los requerimientos hídricos son menores que los de la gran minería del cobre; sin perjuicio de ello, dichas demandas han sido estimadas con base en la información disponible y parámetros que permitan obtener la mejor estimación para cada caso.

xxvi. Uso del agua en la minería no metálica

Similarmente a lo comentado en el numeral anterior, se ha visto que a la minería no metálica le corresponde una demanda de recursos hídricos comparativamente menor que la ejercida por la gran minería del cobre.

Respecto de los minerales no metálicos explotados en la actualidad a nivel nacional, ellos son los que se mencionan a continuación (ordenados de mayor a menor, en términos de cantidad producida a 2015, según SONAMI (2017a):

- Cloruro de sodio
- Compuestos de potasio (cloruro y sulfato)
- Nitratos de sodio y potasio
- Boro
- Litio
- Yodo

xxvii. Uso del agua en operaciones de fractura hidráulica para la extracción de hidrocarburos

Puntualmente, se refiere a la demanda hídrica ejercida por actividades de fractura hidráulica (también llamado *fracking*), metodología aplicada en el tratamiento de pozos a partir de los cuales se explotan hidrocarburos.

La operación referida, consistente en la inyección de agua a muy alta presión al interior de pozos de explotación para conseguir la fractura de estructuras rocosas y así aumentar

su permeabilidad para la extracción de hidrocarburos, se concentra exclusivamente en la XII Región de Magallanes, por lo que los volúmenes de demanda hídrica correspondientes se agregan en esta sola región.

xxviii. Alcance

Para los efectos de la estimación de las demandas de agua requeridas por el sector minero, se construyó la base de datos necesaria con la información pública puesta a disposición por las diferentes instituciones, públicas y privadas, relacionadas con la actividad minera en Chile y los recursos hídricos. Cabe notar que, a la fecha de la elaboración de este trabajo, solo se contó con información de producción minera actualizada a 2015 (con excepción de lo relativo a las operaciones de fractura hidráulica), por lo que, si bien por estimación actual de la demanda hídrica se entiende a 2016, los datos utilizados corresponden a 2015. Se consideró esta discrepancia de años como aceptable, bajo el entendido de que el concepto de “actual” es correcto, aun cuando los datos base sean –a falta de información más actualizada– del año 2015.

Todos los factores y parámetros que fueron requeridos para efectuar las estimaciones de demanda hídrica por parte de la minería, se adoptaron de manera justificada, ya sea con base en fuentes bibliográficas o en criterios y supuestos debidamente indicados.

Las estimaciones relatadas se centraron en la gran minería del cobre, en la minería metálica no-cuprífera, en la minería no-metálica y en las operaciones de fractura hidráulica para la extracción de hidrocarburos, para las cuales la información se encuentra disponible a buen nivel, acorde con los objetivos y alcances de este trabajo. Por ende, las estimaciones de demanda hídrica referida a faenas mineras menores pertenecientes al cobre y/o a otros minerales (metálicos y no metálicos), quedaron fuera de los análisis, o bien sujetas, en cuanto a su grado de aproximación, a la disponibilidad de información existente a la fecha de este estudio.

Conforme lo revisado en los párrafos precedentes, los usos que se consideraron para la estimación de las demandas de agua por la actividad minera, corresponden a los de mayor representatividad, es decir, aquellos volúmenes que se utilizan en la fase de proceso de los minerales y explotación de hidrocarburos en terreno continental. En vista de ello, las demandas que se cuantifican son los que se indican en el Cuadro 9.2-2.

Cuadro 9.2-2 Usos de agua considerados en el cálculo y estimación de la demanda hídrica minera

SECTOR MINERO	DEMANDA HÍDRICA
Grande y mediana minería del cobre	Consumo de agua fresca en procesos de obtención por concentración
	Consumo de agua fresca en procesos de obtención hidrometalúrgica
Otros metales	Consumo de agua fresca por producción de metales
Minería no metálica	Consumo de agua fresca por producción de elementos y/o compuestos no metálicos
Hidrocarburos	Consumo de agua fresca para operaciones de fractura hidráulica para hidrocarburos

Fuente: Elaboración propia.

Respecto de las *fuentes hídricas*, tal como se ha comentado, la minería se sirve fundamentalmente de agua fresca para procesar los minerales de los cuales se extraen los productos y subproductos. Si bien actualmente la mayor fracción del volumen utilizado proviene de las masas de aguas continentales, también se está utilizando agua de mar, previo proceso de desalación, cuando los procesos de producción así lo requieren⁴⁸.

Ahora bien, desde el punto de vista de la fuente hídrica, la estimación de la demanda de agua ejercida por la minería se considera efectuar de modo separado entre dos condiciones de explotación, a saber:

- i. Explotación actual de aguas continentales: aquella que, satisfaciendo sus requerimientos hídricos operacionales de forma total o parcial, es ejercida actualmente las faenas mineras, tanto sobre cursos de agua superficiales como de masas acuíferas.
- ii. Explotación actual de agua de mar desalinizada: aquella únicamente ejercida por las faenas mineras que cuentan actualmente con PTOI en operación, satisfaciendo sus requerimientos operacionales de producción de forma total o parcial.

Cabe señalar que la identificación de la fuente utilizada por cada faena catastrada (agua de mar o continental) se efectuó según la disponibilidad de información referida a cada una de ellas. En caso de que ello no fue posible —es decir, por ausencia de información—, se adoptó como criterio conservador que la demanda se ejerce desde una fuente de agua continental.

⁴⁸ Según el mineral y el proceso de extracción de los cuales se trate, en la gran minería del cobre, el uso de agua de mar sin desalinización previa se ha ido incorporando de manera creciente a lo largo del tiempo, a favor de la disminución del uso de agua fresca de origen continental.

9.2.2 Fuentes documentales utilizadas

Para los efectos de todos los análisis, las principales fuentes de consulta corresponden a la documentación y datos aportados por las siguientes referencias:

- Proyección del consumo de agua en la minería del cobre 2016-2027 (COCHILCO, 2017a).
- Proyecciones de agua y energía en la minería del cobre al 2027 (COCHILCO, 2017b). Con base en la cartera actual de proyectos, entrega estimaciones de la demanda futura de recursos hídricos en la minería del cobre, tanto de aguas marinas como continentales, entre otros aportes de utilidad práctica para el estudio.
- Producción Chilena de Cobre 1995-2015 (COCHILCO, 2016b). Proporciona información, en formato Excel, sobre la producción chilena de cobre por empresas y productos, entre otros minerales.
- Anuario de Estadísticas del Cobre y Otros Minerales 1996-2015. Datos Estadísticos Consumo de Agua Fresca (COCHILCO, 2016c). Planilla Excel; su principal aporte al presente estudio corresponde a tasas unitarias de consumo de agua fresca por región.
- Proyección del consumo de agua en la minería del cobre al 2026 (COCHILCO, 2015b). Proporciona información sobre:
 - ✓ Caudales de consumo de agua fresca proyectados por región (l/s) al 2026.
 - ✓ Factores de uso de agua en minería del cobre.
- Anuario de Estadísticas del Cobre y Otros Minerales 1995-2014 (COCHILCO, 2015c).
- Análisis de variables claves para la sustentabilidad de la minería en Chile (COCHILCO, 2014c). Respecto del interés del presente estudio, el documento proporciona información relativa a factores de uso en la minería del cobre, según tipo de proceso y por región.
- Anuario de la Minería de Chile 2015 (SERNAGEOMIN, 2016a). Proporciona información sobre los siguientes aspectos:
 - ✓ Principales faenas mineras desagregadas por región y coordenadas.
 - ✓ Producción al año de la publicación, por región y por tipo de mineral extraído.
- Reporte detalle del Atlas de Faenas Mineras (SERNAGEOMIN, 2016b). Planilla Excel de catastro con el detalle de las faenas mineras existentes en el territorio nacional.
- Evolución de las reservas y recursos de cobre, molibdeno, oro, plata, nitrato y yodo en Chile, 2011-2007 (SERNAGEOMIN, 2009). Información útil referida a la evolución de leyes de minerales.
- Sociedad Nacional de Minería (SONAMI, 2017a). Información general útil para los fines del estudio, presentada en la web institucional. URL de la institución: <http://www.sonami.cl/site/>

- Estadísticas de producción cobre, oro, plata, molibdeno y combustibles (SONAMI, 2017b). Producciones diarias y anuales según mineral y empresa. URL de la información: <http://www.sonami.cl/site/estadisticas-de-produccion/>
- Mapa minero (SONAMI, 2017c). Visualización en línea de las mineras pertenecientes a la asociación, información que se puede desagregar por tipo de mineral y región. URL de la información: <http://www.sonami.cl/site/mapaminero/>
- Consejo Minero (2017). Información general útil para los fines del estudio, presentada en la web institucional. URL de la institución: www.consejominero.cl
- Minería en Cifras (Consejo Minero, 2016). Reporte de diciembre del año 2016.
- Extracciones de agua de empresas asociadas al Consejo Minero (Consejo Minero, 2015). Visualización en línea de los consumos de agua en la minería (solo faenas cuyas compañías pertenecientes a la asociación). Información desagregada por año y fuente hídrica se encuentra en la siguiente URL: <http://dev.consejominero.cl/agua/2016/todas1.html> (página visitada el 13/04/18).
- Productividad de la Gran Minería del Cobre – Informe Preliminar de la Comisión Nacional de Productividad (CNP, 2016). Información útil referida a la evolución de las leyes de minerales de cobre (valores medios a nivel nacional).
- Decreto 743: Fija tabla de equivalencias entre caudales de agua y usos, que refleja las prácticas habituales en el país en materia de aprovechamiento de aguas (MOP, 2005). Incorpora datos asociados a tasas unitarias de consumo de agua para la obtención o proceso de diferentes minerales.
- Determinación de tasas características de uso del agua según sector y rubro (DGA-UCH, 2005). Presenta datos útiles referidos a tasas unitarias de consumo de agua para la minería del cobre y la plata, entre otros.
- Yacimientos de Hierro Chilenos (UCH-CEC, s/i). Datos útiles sobre la ley media de yacimientos de hierro más importantes a nivel nacional. URL del documento: <http://www.cec.uchile.cl/~vmaksaev/YACIMIENTOS%20DE%20HIERRO%20CHILENOS.pdf> . (documento verificado el 13.04.18).
- Servicio de Evaluación Ambiental (SEA) – Aplicado para la obtención de información referida a consumos de agua en operaciones de fractura hidráulica en pozos de hidrocarburos, que hayan ingresado al Sistema de Evaluación Ambiental. URL Portal: <http://www.sea.gob.cl/>

9.2.3 Metodología

Se describe a continuación el detalle conceptual y práctico de la metodología que se ha aplicado para la estimación de la demanda hídrica actual de la actividad minera en Chile. Se entiende como aquella que deriva de la actividad minera ejercida en el país actualmente con base en datos de producción minera actualizados a 2015 (y 2017, para el caso de fractura hidráulica, con datos provenientes del SEA), por las faenas mineras regulares que se

encuentran activas y de las cuales existe información catastral de sus características fundamentales y datos de producción suficientes y adecuados como para realizar los cálculos estimativos.

En cuanto a la desagregación espacial, tal como se ha esbozado anteriormente, las unidades territoriales dentro de las cuales se expresarán los resultados, serán a nivel regional, cuenca y subcuenca. Es importante destacar que, para efectos de ubicar espacialmente la demanda de agua de uso minero, se supondrá que las fuentes del recurso hídrico se localizan en la misma subcuenca donde se ha localizado la planta de la faena minera.

9.2.3.1 Identificación catastral georreferenciada de las faenas mineras

Con base en la información catastral actualizada, aportada por el SERNAGEOMIN, se ha efectuado la ubicación georreferenciada de las faenas mineras activas a 2016, como también la de los pozos de explotación de hidrocarburos, individualizados a través de la información aportada por las DIAs (Declaración de Impacto Ambiental) informados por el SEA, dentro del universo de proyectos “Aprobados”, “En calificación” y “No Calificada” con año 2017 de ingreso al sistema.

Similar situación sucede con la identificación de aquellas faenas que contemplan el uso de agua desalinizada a través de Plantas de Tratamiento de Osmosis Inversa (PTOI), sean estas en fase de operación o en carteras de proyecto. Se consideran todas aquellas PTOI que, contando con información suficiente para los efectos del presente estudio, satisfacen de manera total o parcial los requerimientos hídricos que involucran los procesos mineros, fundamentalmente asociados a la mediana y gran minería del cobre.

Así, se procedió a la ubicación e identificación en desagregación regional de las faenas mineras (planta de procesos) presentes en información catastral. Para ello se recurre a los datos proporcionados por SERNAGEOMIN (2016a y 2016b) y el SEA; eventualmente, para la corroboración de información o búsqueda de datos faltantes, se recurrió a la SONAMI (2017c).

Las faenas mineras (activas) se identificaron según sus siguientes atributos fundamentales:

- ✓ Nombre de la faena
- ✓ Dueño mayoritario
- ✓ Tipo de minería (metálica, no-metálica, hidrocarburos)
- ✓ Minerales extraídos (productos y subproductos)
- ✓ Ubicación georreferenciada
- ✓ Fuente hídrica principal (aguas marinas o continentales)

- ✓ Demanda hídrica estimada (términos cuantitativos)

Consecuentemente, las faenas mineras identificadas se caracterizaron según los siguientes parámetros:

- ✓ Identificador (ID), generado para los efectos del presente estudio
- ✓ Nombre de la empresa
- ✓ Nombre de la faena
- ✓ Cuenca y subcuenca (nombre y código)
- ✓ Coordinadas ubicación (planta de la faena minera)
- ✓ Recurso minero (p.ej. óxidos de cobre, sulfuros de cobre, cobre-oro, etc.)
- ✓ Recurso principal (cobre, hierro, bentonita, etc.)
- ✓ Tipo de recurso (minería metálica, no metálica, hidrocarburos)
- ✓ Fuente hídrica de la cual se abastece para el proceso de minerales

Para una desagregación territorial más fina –esto es, a nivel de cuenca y subcuenca–, bastó con filtrar la información vaciada en la base de datos del estudio. Además, con base en la información ya señalada, para efectos de todos los análisis, ella puede filtrarse y ordenarse según tipo de minería, recurso minero, etcétera.

9.2.3.2 Estimación de la demanda hídrica en la minería del cobre

Tal como se ve más adelante, si bien desde el punto de vista teórico el proceso de cálculo es sencillo, desde la perspectiva del manejo de la información el problema debe tratarse con especial atención. Esto se debe a que en la gran minería la demanda hídrica de agua fresca depende de los aspectos fundamentales que se detallan en los siguientes numerales.

xxix. Productos a considerar

Respecto al recurso minero, cada faena cuprífera debe quedar explícitamente caracterizada en términos del mineral de cobre que del yacimiento correspondiente se extrae. Ello es necesario, pues del tipo de mineral de cobre dependerá el tipo de proceso y, por ende, la tasa unitaria de consumo de agua que le corresponde, además de la ley del mineral.

Los minerales de cobre que se explotan en el país corresponden a:

- Sulfuros de cobre: Siendo la fuente primaria de cobre en el país, a 2015, el 69% del cobre se obtuvo a partir de este mineral (CNP, 2016); éste se procesa mediante concentración.

- Óxidos de cobre: Se procesan a través de la lixiviación, proceso de tipo hidrometalúrgico. A 2015, el 31% de la producción de cobre se obtuvo a partir de estos minerales (CNP, 2016).

xxx. Identificación de parámetros útiles

Para los efectos de la estimación de la demanda hídrica en la minería del cobre, los principales factores de los cuales ella depende son los siguientes:

- Fuente hídrica utilizada:

Corresponde al primer criterio de corte para establecer las faenas a las cuales se les estima la demanda de agua. Para dicho objetivo, se identificaron las faenas mineras que utilizan agua de mar, sea desalinizada o no. Ello se efectuó de acuerdo a lo señalado en COCHILCO (2017b)⁴⁹.

⁴⁹ Concretamente, en la Tabla 3 del documento referido, pág. 12: “Catastro plantas desaladoras y agua de mar”.

Cuadro 9.2-3 Catastro de faenas de la gran y mediana minería del cobre con uso de agua de mar

PROP.	MINA	SECTOR	REGIÓN	TIPO DE PROYECTO	ETAPA DE DESARROLLO	CONDICIÓN	AÑO PUESTA EN MARCHA	CAPACIDAD DE DESALACIÓN	CAPACIDAD USO AGUA DE MAR
ANTOFAGASTA MINERALS	Michilla	Med Min Cu	Antofagasta	N/A	Cerrada	Base	N/A	75	25
ENAMI	Planta J.A. Moreno (Taltal)	Med Min Est Cu	Antofagasta	N/A	Operación	Base	N/A	-	15
LAS CENIZAS	Las Cenizas Taltal	Med Min Cu	Antofagasta	N/A	Operación	Base	N/A	9	12
MANTOS DE LA LUNA	Mantos de Luna	Med Min Cu	Antofagasta	N/A	Operación	Base	N/A	-	78
PAMPA CAMARONES	Pampa Camarones	Med Min Cu	Arica y Parinacota	N/A	Operación	Base	N/A	12,5	-
ANTOFAGASTA MINERALS	Centinela (Esperanza + El Tesoro)	Gran Min Cu	Antofagasta	N/A	Operación	Base	N/A	50	780
BHP BILLITON	Escondida - Planta Coloso	Gran Min Cu	Antofagasta	N/A	Operación	Base	N/A	525	-
ANTOFAGASTA MINERALS	Antucoya	Gran Min Cu	Antofagasta	Nuevo	Operación	Base	N/A	20	280
LUNDING MINING	Candelaria	Gran Min Cu	Atacama	N/A	Operación	Base	N/A	300-500	-
MANTOS COPPER	Mantoverde	Gran Min Cu	Atacama	N/A	Operación	Base	N/A	120	-
KGHM INT.	Sierra Gorda	Gran Min Cu	Antofagasta	Nuevo	Operación	Base	N/A	68	1.315
BHP BILLITON	Escondida EWS	Gran Min Cu	Antofagasta	N/A	Operación	Base	2017	2.500	-
ANTOFAGASTA MINERALS	Encuentro	Gran Min Cu	Antofagasta	Reposición	En Ejecución	Base	2018	20	*
CODELCO-CHILE	Planta desaladora Distrito Norte	Estatal	Antofagasta	Reposición	En Ejecución	Base	2020	1.630	-
ANTOFAGASTA MINERALS	Los Pelambres Ampliación Marginal I y II	Gran Min Cu	Coquimbo	Expansión	Factibilidad	Probable	2018	400	-
LUNDING MINING	Candelaria 2030	Gran Min Cu	Atacama	Reposición	Factibilidad	Probable	2018	500	-
CAPSTONE Mining	Santo Domingo	Gran Min Cu	Atacama	Nuevo	Factibilidad	Probable	2019	2,5-290	389
COPEC	Diego de Almagro	Med Min Cu	Atacama	Nuevo	Factibilidad	Probable	2019	-	315
BHP BILLITON	Spence Growth Option	Gran Min Cu	Antofagasta	Nuevo	Factibilidad	Posible	2019	800-1.600	-
ANDES IRON SpA	Dominga	Hierro	Coquimbo	Nuevo	Factibilidad	Posible	2019	450	-
MANTOS COPPER	Desarrollo Mantoverde	Gran Min Cu	Atacama	Nuevo	Factibilidad	Potencial	2021	380	-
TECK	Quebrada Blanca Hipógeno	Gran Min Cu	Tarapacá	Nuevo	Factibilidad	Potencial	2021	1.300	-
ANTOFAGASTA MINERALS	Encuentro Sulfuros	Gran Min Cu	Antofagasta	Nuevo	Factibilidad	Potencial	2024	-	*

* Aumento de capacidad en tuberías de Esperanza para alcanzar los 1.500 l/s

Fuente: COCHILCO (2017b)

- Condición de operación PTOI: para los efectos de las estimaciones de demanda hídrica actual de agua desalada, se consideran aquellas faenas mineras que cuentan con instalaciones de osmosis inversa como condición base a la fecha actual.
- Capacidad de desalación PTOI: se considera como envolvente superior de demanda actual de agua desalada la capacidad instalada de desalación de las PTOI que abastecen a faenas mineras para sus operaciones productivas, bajo condición base.

▪ Tasa unitaria de consumo:

Se define según el tipo de proceso al que se somete el mineral del yacimiento correspondiente. Los procesos son los siguientes:

o Concentración: aplica a los minerales sulfurados de cobre.

o Hidrometalurgia: aplica a los minerales oxidados de cobre.

La definición de este aspecto es del todo fundamental para la estimación del uso de agua en el proceso del mineral. En tal sentido, COCHILCO (2014c) resulta ilustrativa, al comparar, para diferentes años (hasta 2012), la evolución de estos factores en términos de la cantidad de mineral procesado:

Cuadro 9.2-4 Evolución de la tasa unitaria de consumo de agua según proceso (m³/ton mineral procesado)

PROCESO	AÑO			
	2009	2010	2011	2012
Concentración	0,67	0,69	0,65	0,61
Hidrometalurgia	0,12	0,12	0,12	0,10

Fuente: COCHILCO (2014c)

Por otro lado, fuentes documentales más recientes (como COCHILCO (2017a)), muestran, a través de tasas medias actualizadas, la diferencia de requerimientos hídricos entre ambos procesos:

**Cuadro 9.2-5 Tasa unitaria de consumo de agua según centro de demanda
(promedio nacional a 2015)**

CENTRO DE DEMANDA HÍDRICA	UNIDAD	TASA UNITARIA	OBSERVACIONES
Concentración	m ³ /t _{MINERAL}	0,52	Referido a la tonelada de mineral que ingresa a la planta concentradora
Hidrometalurgia	m ³ /t _{FINO}	35,51	Referido a la tonelada de fino producido
Área Mina	m ³ /t _{FINO}	3,34	Referido a la tonelada de fino producido
Fundición y Refinería	m ³ /t _{FINO}	0,69	Referido a la tonelada de fino producido
Otros	m ³ /t _{FINO}	4,01	Referido a la tonelada de fino producido

Fuente: COCHILCO (2017a).

Cabe notar que los valores presentados corresponden a tasas unitarias promedio a nivel nacional. Sin embargo, estas tasas varían entre regiones, ya que ellas dependen de las características propias de cada faena/yacimiento (p.ej. la variación de la ley del mineral, si se cuenta con sistemas de recirculación de agua de procesos, la eficiencia de los procesos propiamente tales) y si se trata de grande, mediana o pequeña minería. Por tanto, la distribución efectiva de cada tipo de faena en una unidad territorial determinada afecta el valor real de dicha tasa, haciéndola variar entre una unidad territorial y otra. Todo esto lo señala COCHILCO (2014c), de la cual se ha extraído el siguiente cuadro, que proporciona tasas unitarias promedio de consumo de agua por región (Cuadro 9.2-6):

**Cuadro 9.2-6 Consumo de agua fresca por tonelada de mineral procesado
(m³/t_{mineral_procesado}) - valores a 2012**

PROCESO	REGIÓN						
	I	II	III	IV	V	VI	RM
Concentración	0,63	0,59	0,84	0,35	0,78	0,81	0,41
Hidrometalurgia	0,09	0,08	0,15	--	0,07	--	0,06

Fuente: COCHILCO (2014c).

Tal como se observa, despreciar la variabilidad regional de las tasas unitarias de consumo de agua fresca y solo utilizar los valores medios nacionales, puede llevar a una sub o sobrestimación de la demanda de agua que ejerce la minería en una determinada región. Por tanto, es necesario considerar este aspecto en las estimaciones.

Como consecuencia de lo descrito, las tasas a considerar corresponden a las informadas en la serie de “*Datos estadísticos consumo de agua fresca Anuario 2016*”, provista por COCHILCO (2016c). Para cada región, se tomaron las tasas más recientemente informadas, las que se expresan en términos de cantidad de mineral procesado. Con

esto, cada tasa se aplica como valor uniforme para la región en cuestión, en función de la cantidad de mineral procesado y no del fino producido.

Considerando lo anterior, los valores a considerados por región son los que se muestran en el Cuadro 9.2-7; cabe destacar que, a la fecha de la elaboración del presente estudio, la actualización más reciente de los valores es a 2015; por tanto, se aplican dichas tasas, bajo el supuesto que a 2016 la variación no debiese resultar importante.

Cuadro 9.2-7 Tasas unitarias de consumo de aguas continentales por región y proceso, actualizados a 2015 (m³/ton de mineral procesado)

REGIÓN	TASA UNITARIA CONCENTRACIÓN (m ³ /ton_min)	TASA UNITARIA HIDROMETALURGIA (m ³ /ton_min)
Arica y Parinacota	NA	0,26
Tarapacá	0,65	0,13
Antofagasta	0,43	0,11
Atacama	0,48	0,05
Coquimbo	0,38	0,22
Valparaíso	0,85	0,47
O'Higgins	0,85	ND
Metropolitana	0,41	0,01

Fuente: COCHILCO (2016c).

▪ Producción anual:

Corresponde a la cantidad de mineral que es procesada en planta para la obtención de cobre fino; se expresa en TM/año (toneladas métricas por año). Las principales fuentes de información corresponden a:

- Producción Chilena de Cobre por Empresas y Productos entre 1995 y 2015, (COCHILCO, 2016b): entrega, en TM/año, la producción de cobre por empresa.
- Estadísticas de producción cobre, oro, plata, molibdeno y combustibles (SONAMI, 2017b): entrega producciones diarias y anuales según mineral y empresa.

Los valores informados en las fuentes referenciales mencionadas se han tomado como dato para estimar la demanda hídrica que le corresponde a cada faena de la cual esté disponible dicha información (aguas continentales).

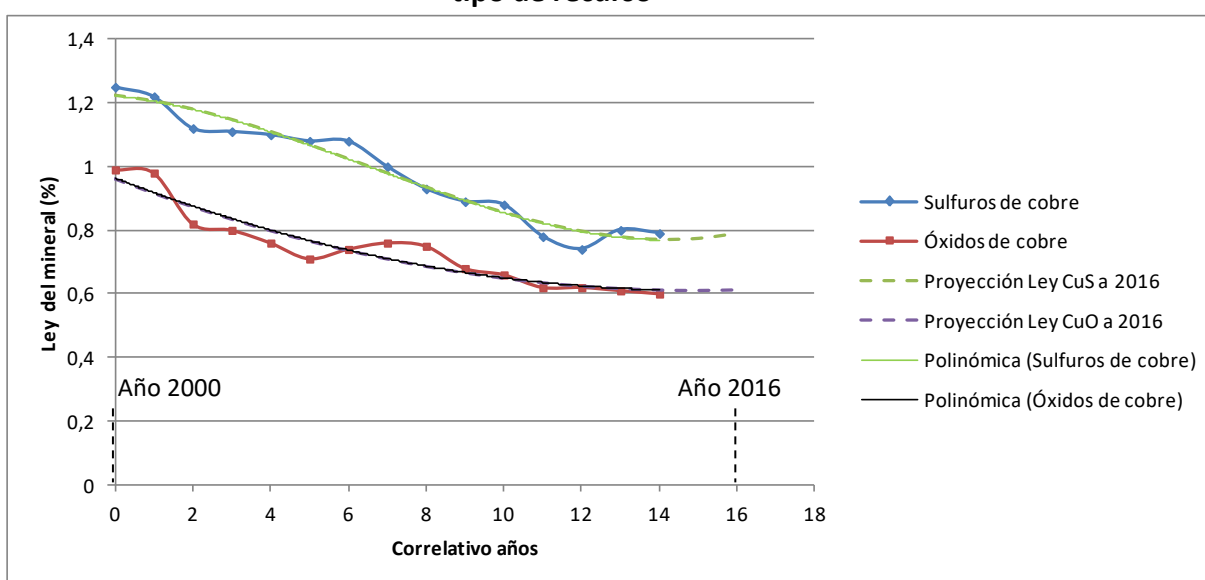
▪ Ley de mineral:

Dado que las tasas de consumo se definen a partir del mineral procesado, y solo se cuenta con volúmenes de producción (y no de proceso), es necesario convertir para una

determinada faena, las toneladas métricas anuales producidas de mineral en toneladas métricas de mineral procesado.

Luego de la revisión documental de la evolución de la ley de los minerales de cobre en Chile, solo se pudo encontrar información relativa a la ley mineral promedio de los óxidos y sulfuros de cobre, entre 2000 y 2014 (CNP, 2016). Al rescatar la información gráfica presentada en la referencia citada, graficarla y proyectarla al año 2016, se obtuvieron los resultados que se muestran en la Figura 9.2-3.

Figura 9.2-3 Ley promedio faenas de cobre en Chile 2000-2014 y proyección a 2016, según tipo de recurso



Fuente: Elaboración propia, a partir de CNP (2016).

Con ello, siguiendo la tendencia de las curvas presentadas por CNP (2016), se obtuvo que para 2016 la ley mineral para sulfuros de cobre rozaría el 0,8%, mientras que para los óxidos se obtendría una ley mineral estimada de 0,61%. Si bien estas proyecciones están basadas en un ajuste matemático simple de la tendencia vista en las leyes minerales de cobre en Chile, se aceptan los valores obtenidos como buenos estimadores promedio; por lo tanto, ellos+ se aplicaron de manera uniforme a la minería del cobre para todo el país.

xxxi. Formulación matemática

En términos matemáticos, la metodología de cálculo se plantea de la siguiente manera: dentro de una región determinada, téngase la *i*-ésima faena extractiva de cobre (sea ella de minerales oxidados o sulfurados), la cual es intensiva en el uso de aguas continentales. La demanda actual de agua fresca a 2016 (actual) vendrá dada por:

$$Q_i^{Cu} = \begin{cases} f_{CuO} \cdot MP_i^{2016} & \Leftrightarrow \text{si el recurso minero es de óxidos de cobre} \\ f_{CuS} \cdot MP_i^{2016} & \Leftrightarrow \text{si el recurso minero es de sulfuros de cobre} \end{cases}$$

donde:

Q_i^{Cu}	Caudal consuntivo demandado en 2015 por la i -ésima faena cuprífera, dentro de una región determinada ($m^3/año$).
f_{CuO}	Tasa de consumo para la obtención de cobre a partir de minerales oxidados; aplica a procesos hidrometalúrgicos (pilas de lixiviación). Se mide en metros cúbicos de agua requerida por tonelada de mineral procesado ($m^3/t_{\text{mineral_procesado}}$).
f_{CuS}	Tasa de consumo en procesos de minerales sulfurados de cobre; aplica a plantas de concentración. Se mide en metros cúbicos de agua consumida por tonelada de mineral procesado ($m^3/t_{\text{mineral_procesado}}$).
MP_i^{2016}	Mineral procesado anual en la faena i , en 2016. Se mide en tonelada métrica por año ($t/año$).

Por su parte, el material procesado MP se obtiene a partir de los datos de producción entregados por COCHILCO y la ley del mineral correspondiente. Sean l_{CuO} y l_{CuS} las leyes de los minerales oxidados y sulfurados de cobre (expresadas en porcentaje o tanto por uno), respectivamente, y P_i^{2016} la producción anual a 2016 de la i -ésima faena (expresada en toneladas). Entonces, el mineral procesado anual correspondiente se obtiene según:

$$MP_i^{2016} = \begin{cases} P_i^{2016} / l_{CuO} & \Leftrightarrow \text{si el recurso minero es de óxidos de cobre} \\ P_i^{2016} / l_{CuS} & \Leftrightarrow \text{si el recurso minero es de sulfuros de cobre} \end{cases}$$

9.2.3.3 Estimación de la demanda hídrica en la minería metálica no-cuprífera

Cabe señalar que la principal dificultad que conlleva efectuar la estimación de la demanda hídrica por parte de la minería metálica no cuprífera radica fundamentalmente en la disponibilidad de información, en la falta de actualización y en la dificultad de desagregarla en unidades territoriales menores a la regional. Sin perjuicio de ello, las simplificaciones y supuestos requeridos fueron tomados, con el fin de llegar a resultados que logran aproximarse a la realidad. De este modo, el primer filtro aplicado para la generación de los análisis y estimaciones de demanda hídrica responde a la disponibilidad de información proveniente de fuentes tanto acreditadas como suficientemente actualizadas.

Los criterios y supuestos basales con que se desarrollarán los análisis y estimaciones de demanda hídrica para la minería metálica no-cuprífera son los siguientes:

- i. Se identificaron, ubicaron y caracterizaron las faenas mineras no-cupríferas catastradas y en condición de operación (activas), según lo informado por el SERNAGEOMIN.
- ii. Solo se analizó la minería no cuprífera para cuyos productos se dispone, al menos, de la siguiente información:
 - a. Producción anual desagregada, como mínimo, a nivel regional.
 - b. Tasas unitarias de consumo hídrico.
 - c. Leyes de mineral, con grado adecuado de actualización.
- iii. Se supuso que todas las faenas identificadas para los efectos del análisis y estimación de demanda hídrica, consumen aguas continentales en sus procesos de obtención de productos, a menos que se encuentre información específica que indique lo contrario. Las faenas para las que se acreditó el uso de agua de mar en sus procesos, quedaron fuera de los análisis.
- iv. En los casos que los datos de producción se encuentran solo a nivel regional, la desagregación de la demanda hídrica se obtuvo, en primer lugar, a dicho nivel. La desagregación por cuenca y subcuenca se efectuó mediante criterios específicos, según la distribución espacial de las faenas al interior de la región.
- v. En referencia a las tasas unitarias, los valores que indica el MOP (2005), si bien son promedios nacionales, se aceptaron como válidos para los análisis a nivel de región, cuenca y subcuenca. Aun cuando se reconoce la gran variabilidad que puede presentar este parámetro en las diversas zonas del país, la falta de información más detallada justifica la aplicación uniforme de los valores informados por el Decreto 743 (MOP, 2005).
- vi. Respecto de las leyes de los minerales metálicos no-cupríferos, a falta de información más actualizada, se aceptaron los datos presentados por SERNAGEOMIN (2009), correspondientes a 2007.

xxxii. Productos a considerar

Se consideraron los siguientes productos provenientes de la minería metálica no cuprífera que opera en Chile:

- Oro
- Plata
- Hierro

Cabe establecer que no se incluyó, para los efectos del presente estudio, la demanda hídrica proveniente de la obtención del molibdeno, pese a su importancia como producto minero nacional. Esto se justifica con base en lo señalado por SERNAGEOMIN (2009), el cual indica que *“la producción del molibdeno en Chile se obtiene, en su totalidad, como subproducto de la producción de cobre de las empresas de la gran minería, que explotan yacimientos del tipo pórfidos de cobre-molibdeno”*. En consecuencia, se ha asumido que las demandas en proceso de obtención de molibdeno se encuentran incluidas en las demandas cupríferas, por lo que no se agregaron a las estimaciones.

xxxiii. Identificación de parámetros útiles

Se detallan a continuación los parámetros necesarios para la estimación de la demanda hídrica actual ejercida por la minería metálica no cuprífera.

- Producción anual regional según mineral:

Se establece a nivel regional, a partir de la información proporcionada por el SERNAGEOMIN (2016a). Para cada mineral, la producción se cuantifica en toneladas de producto por año, a menos que hubiera referencias actualizadas que proporcionaran datos de producción a nivel de faena (la información que existe de producción de mineral metálico no cuprífero sólo se encuentra disponible a nivel regional). Para la i -ésima región, se denomina la producción actual del j -ésimo tipo de recurso como P_{ij}^{Actual} , cuantificándose en tonelada producida por año.

- Tasa unitaria de consumo de agua:

Se obtuvo a partir de los valores representativos entregados por el MOP (2005); estando expresados en términos de metros cúbicos por tonelada de mineral procesado, se le denomina f_j , siendo j el correlativo del j -ésimo tipo de recurso minero.

Las tasas informadas por la fuente citada se expresan en el Cuadro 9.2-8.

Cuadro 9.2-8 Tasas unitarias para el proceso de minerales de oro, plata y fierro

Recurso minero	Tasa Unitaria	Unidad
Oro	0,50	m ³ /t_mineral procesado
Plata ⁵⁰	0,55	m ³ /t_mineral procesado
Fierro	0,20	m ³ /t_mineral procesado

Fuente: MOP (2005) y DGA-UCH (2005).

⁵⁰ Para el caso de la plata, la tasa unitaria de consumo se ha fijado en 0,55 m³ por tonelada de mineral procesado, en conformidad con lo señalado por el estudio “Determinación de tasas características de uso del agua según sector y rubro” (DGA-UCH, 2005), donde se establece que, para los minerales de plata y oro, la tasa unitaria característica se encuentra en el rango 0,4-0,7 m³/t_mineral procesado.

▪ Ley de minerales:

Se contemplaron los valores expresados por el SERNAGEOMIN (2009), que corresponden a la ley de minerales actualizados a 2007. Pese a no estar referidas a un año cercano, las leyes señaladas por la referencia citada se consideran válidas para efectuar las estimaciones de demanda hídrica. En consecuencia, para el j -ésimo mineral, la ley correspondiente se denomina l_j .

Los valores encontrados para el parámetro en cuestión, son los siguientes:

Cuadro 9.2-9 Leyes de mina según producto minero

Producto	Ley Mineral	Unidad
Oro	0,274	g/t
Plata	2,7	g/t
Fierro	0,482	tanto por uno

Fuente: SERNAGEOMIN (2009) y UCH-CEC (s/i).

xxxiv. Formulación matemática

En función de lo señalado precedentemente, la expresión que permite estimar la demanda hídrica para la i -ésima región, referida a la j -ésima producción minera, corresponde a:

$$Q_{ij}^{Actual} = f_j \cdot \frac{P_{ij}^{Actual}}{l_j}$$

Dependiendo de las unidades en que estén expresadas las distintas leyes de mineral, deben efectuarse los correspondientes cambios de unidad, de modo que la expresión anterior sea dimensionalmente coherente.

9.2.3.4 Estimación de la demanda hídrica en la minería no metálica

La metodología de cálculo para la estimación de las demandas hídricas ejercidas por la minería no-metálica es análoga a las presentadas en los numerales precedentes. De igual manera, rigen los siguientes criterios y supuestos adoptados en la minería metálica no-cuprífera⁵¹.

En cuanto a la existencia de información referida a la minería no-metálica, se destaca que los resultados han quedado supeditados al nivel y grado de precisión en que aquella se encuentra disponible. Con base en las limitantes que impone la menor existencia de información y nivel con que los datos se presentan en las diversas fuentes de consulta, se

⁵¹ Criterios indicados en el numeral 9.2.3.3, incisos del i. al v.

adoptaron diversos criterios y supuestos simplificadores, todos ellos dirigidos a obtener estimaciones razonables de la demanda hídrica perteneciente a este rubro.

xxxv. Productos a considerar

Los productos no-metálicos que son sometidos al análisis para la estimación de la demanda hídrica corresponden a aquellos para los cuales se dispone de la información mínima necesaria como para poder obtener volúmenes anuales de agua requerida en función de la producción anual. La minería no-metálica que encaja dentro de dichos requerimientos son los siguientes:

- Nitratos
- Carbonato de litio
- Cloruro de potasio
- Yodo
- Ácido bórico

Se dejan fuera de los análisis las demás explotaciones no-metálicas, como la bentonita, ulexita, diatomita, etcétera, ya que no se cuenta con toda la información necesaria para efectuar estimaciones certeras.

xxxvi. Identificación de parámetros útiles

Los parámetros fundamentales de los cuales se cuenta con información para efectuar las estimaciones de demanda hídrica, son los siguientes:

- Producción anual regional según mineral:

Se establece a nivel regional, a partir de la información entregada por el SERNAGEOMIN (2016a). Para cada recurso, la producción se cuantifica en toneladas de producto por año, a menos que haya referencias actualizadas que proporcionen datos de producción a nivel de faena.

Para la i -ésima región, se denomina la producción actual del j -ésimo tipo de recurso como P_{ij}^{Actual} , cuantificándose en tonelada producida por año.

- Tasa unitaria de consumo de agua:

Se obtiene a partir de los valores representativos entregados por el MOP (2005); estando expresados en términos de metros cúbicos por tonelada de mineral procesado, se le denomina fj , siendo j el correlativo del j -ésimo tipo de recurso minero. Las tasas informadas por la fuente citada se expresan en el Cuadro 9.2-10.

Cuadro 9.2-10 Tasas unitarias de consumo de agua para principales productos de la minería no-metálica

Producto	Tasa Unitaria	Unidad
Nitratos	10	m³/t_producida
Carbonato de litio	20	m³/t_producida
Cloruro de potasio	2,8	m³/t_producida
Yodo	1400	m³/t_producida
Ácido bórico	2,8	m³/t_producida

Fuente: MOP (2005).

xxxvii. Formulación matemática

En función de lo señalado precedentemente, la expresión que permite estimar la demanda hídrica para la *i*-ésima región, referida a la *j*-ésima producción minera (no-metálica), corresponde a:

$$Q_{ij}^{Actual} = f_j \cdot P_{ij}^{Actual}$$

9.2.3.5 Estimación de la demanda hídrica en la explotación de hidrocarburos mediante fractura hidráulica

Tal como se ha comentado previamente, la fractura hidráulica es la operación que busca aumentar la permeabilidad de estructuras rocosas que contienen en sus intersticios volúmenes de hidrocarburos, todo ello a través de la inyección de volúmenes de agua fresca subterránea a alta presión en pozos para fracturar la roca y conseguir el objetivo mencionado.

Dada la documentación disponible en el SEA –generada para fines de tramitación de la aprobación ambiental– cabe relevar que el carácter de este consumo hídrico puede clasificarse como subterráneo de tipo no consuntivo, toda vez que los proyectos analizados contemplan, dentro de sus procedimientos, la reinyección de los volúmenes utilizados en pozos específicamente designados para tales efectos.

Para los efectos de la estimación de la demanda actual en cuestión, se han tomado en consideración los siguientes criterios:

- i. Toda la demanda hídrica proveniente de esta actividad se concentra en la XII Región de Magallanes, por lo que la agregación de esta demanda hídrica aplica únicamente a la XII Región de Magallanes.
- ii. La fuente de agua fresca es de origen exclusivamente subterráneo.
- iii. Se supone que el 100% del agua extraída para su uso es reinyectada, por lo que el uso es de tipo no consuntivo.

- iv. El dato fundamental es el volumen de agua requerida por formación (es decir, pozo yacimiento), ya que así lo refieren las fuentes documentales. Por tanto, el volumen total a considerar por proyecto, corresponde al producto entre dicho volumen y la cantidad de pozos respectiva.
- v. Se supone que todo el volumen calculado según (iv) es consumido –para los efectos de fractura hidráulica– durante el curso del año en que se documenta la DIA y su estado. En otras palabras, se concentra el ejercicio del consumo dentro del curso de 2017, lo cual, si bien puede no reflejar de forma exacta la realidad, se considera conservador, para los objetivos del presente estudio.
- vi. Se consideran todos aquellos proyectos cuyo estado a 2017 sea “Aprobado”, “En Calificación” y/o “No Calificada”.
- vii. Toda la información relevante para los efectos de este trabajo se ha obtenido de los archivos disponibles en la plataforma web del SEA, pertenecientes a las DIAs respectivas de cada proyecto.

En lo referente a los yacimientos aprobados, en calificación o no calificados dentro del año 2017, los proyectos considerados para la estimación de demanda hídrica y sus principales características son las que se muestran en el Cuadro 9.2-11:

Cuadro 9.2-11 Proyectos de fractura hidráulica para la explotación de hidrocarburos en la XII Región (declarados en SEA a 2017) y volúmenes de demanda hídrica asociados

NOMBRE PROYECTO	EMPRESA	ESTATUS SEA	FECHA	Q FORMACIÓN (m ³)	TOTAL POZOS	V _{Total} USADO (m ³)
Fractura hidráulica y construcción de línea de flujo pozo Chercán Oeste x-1	Geopark TDF S.A.	Aprobado	18-01-2017	150	1	150
Fracturación hidráulica de 5 pozos y 3 multipozos en bloque arenal	ENAP	No calificado	17-03-2017	300	35	10.500
Fracturación hidráulica de 4 pozos y 3 multipozos en bloque arenal	ENAP	Aprobado	09-08-2017	3000	21	63.000
Actividades de fractura hidráulica desarrolladas en pozos de bloque Fell, y monitoreo de variables ambientales	GeoPark Fell SpA	En Calificación	20-10-2017	400	21	8.400
TOTALES					78	82.050

Fuente: SEA (2017).

En consecuencia, tomando una base de cálculo anual y los supuestos mencionados, la demanda hídrica actual total que deriva de la extracción de hidrocarburos, se estima en 82.050 m³/año, la cual es de procedencia subterránea y de tipo no consuntiva. Dicho valor será agregado a la demanda hídrica total estimada para XII Región, territorio exclusivo donde se registra esta actividad. Cabe señalar que la distribución espacial de esta demanda se ha determinado en términos de unidades territoriales, tanto a nivel de región, como de cuenca y subcuenca; la agregación correspondiente se efectúa en el Capítulo 22 del Volumen II.

9.2.3.6 Estimación de la demanda hídrica minera actual de agua de mar

Para la estimación de la demanda hídrica actual de agua de mar ejercida por la minería, el fundamento del cálculo se basa en lo siguiente: téngase la j-ésima faena minera que, haciendo uso actual de agua de mar desalinizada (es decir, cuenta con PTOI operativa bajo condición base), se ubica en la i-ésima región. Por tanto, manteniendo los criterios de cálculo señalados anteriormente, el caudal de demanda actual de agua desalada para dicha faena minera, se puede calcular como:

$$Q_{ij}^{Actual,desal} = \min\{Q_{ij}^{Actual}, QPTOI_{ij}^{Cap-Desal}\}$$

donde $Q_{ij}^{Actual,desal}$ es el caudal de demanda hídrica actual de agua desalada correspondiente a la j-ésima faena minera de la i-ésima región, mientras que $QPTOI_{ij}^{Cap-Desal}$ es la capacidad de desalinización de la PTOI asociada a la j-ésima faena de la región i. Cabe notar que la función “min” cobra sentido, ya que, tal como se ha comentado anteriormente, la capacidad de desalación es la envolvente superior de demanda hídrica de agua de mar.

Por ejemplo, si sucediera que $Q_{ij}^{Actual,desal} > QPTOI_{ij}^{Cap-Desal}$, entonces la PTOI solo abastece a una fracción de los requerimientos hídricos operacionales de la faena, limitándose la demanda actual de agua desalada a la capacidad instalada de desalación.

En caso contrario, si se tuviera que $Q_{ij}^{Actual,desal} < QPTOI_{ij}^{Cap-Desal}$, entonces significa que la PTOI tiene capacidad por sobre los requerimientos, pero la demanda hídrica efectiva actual de la faena minera se limita a los requerimientos impuestos por su productividad y demás parámetros.

Es importante señalar que, considerando que $QPTOI_{ij}^{Cap-Desal}$ se expresa usualmente en l/s, el caudal $Q_{ij}^{Actual,desal}$ debe llevarse a valor medio anual (también en l/s), con el fin de aplicar la función “min” (comparación de valores y extracción del mínimo).

Finalmente, la agregación territorial (a nivel de subcuenca, cuenca y/o región) de la demanda actual de agua de mar desalada por parte de la minería, se efectúa a través de la sumatoria sobre los subíndices que le corresponden a cada clase de unidad territorial, según la ubicación de las distintas faenas.

9.3 ENFOQUE METODOLÓGICO DE LA PROYECCIÓN DE LA DEMANDA FUTURA

El presente capítulo se centra en la formulación y aplicación de la metodología que permite proyectar la demanda hídrica proveniente de la actividad minera nacional asociada a la minería del cobre, la minería metálica no cuprífera y la minería no metálica, considerando un horizonte de previsión 2016-2040.

Según se observa en los numerales sucesivos, aun cuando la base metodológica y fuentes de información se mantienen respecto de lo señalado en el capítulo de estimaciones de la demanda hídrica actual, se introduce, como elemento principal, la proyección a través del uso de Series de Tiempo (SdT). Su uso se ha considerado ventajoso, ya que permite incluir el comportamiento histórico de la variable basal en la estimación del comportamiento futuro, el cual es eminentemente estocástico. Tal es el caso de los volúmenes de producción minera, los que se ven influenciados por una serie de variables exógenas difícil de controlar y predecir, lo que trae consigo una incertidumbre inherente a cualquier predicción.

De esta manera, a través de la proyección mediante SdT, se han generado series de demanda futura en términos de un rango de caudales para cada año del horizonte de previsión –a nivel regional, de cuenca y subcuenca–, con un Nivel de Confianza asociado que cuantifica la certidumbre de los caudales que quedan incluidos en la banda.

9.3.1 Generalidades

Para la formulación del método, se establece como base conceptual que la demanda hídrica minera se asocia fundamentalmente a los consumos que provienen del proceso de los minerales a partir de los cuales se extrae el material de interés (cobre, carbón, hierro, etcétera). Por tanto, dicha demanda puede plantearse como una función de tres parámetros fundamentales, a saber:

- (iii) La tasa unitaria de consumo hídrico para procesos de obtención de fino.
- (iv) El volumen de producción (expresado, usualmente, en toneladas o kilogramos, dependiendo del producto) por unidad de tiempo (en este caso, año).
- (v) La ley del mineral que se extrae.

Consecuentemente, para una determinada unidad territorial, la demanda hídrica minera ejercida en el i -ésimo año se puede definir, en términos generales, de la forma:

$$DDA_{Hídrica\ Minera}^i = f(Producción_i, Tasa\ Unitaria, Ley\ Mineral)$$

Por su parte, para los argumentos de la función f , se puede establecer que:

$$Producción_i = g \left(\begin{matrix} \$_{Metales}, conflictos laborales, eficiencia de procesos, \dots, \\ costos de producción, Mercados Internacionales, etc. \end{matrix} \right)$$

$$Tasa Unitaria = h(Tipo de mineral, tipo de proceso, eficiencia)$$

$$Ley Mineral = \Phi(yacimiento, antigüedad de la explotación)$$

A partir de lo anterior, se puede observar que:

- a) La tasa unitaria de consumo hídrico y la ley mineral, si bien son variables en el tiempo y en el espacio, se pueden tratar como valores fijos, teniendo la información suficiente y bajo criterios/supuestos apropiados.
- b) La producción es función de una serie de parámetros exógenos, cuyo comportamiento se asume de tipo aleatorio.

De acuerdo con el supuesto (b), la producción se puede tratar como una variable de comportamiento estocástico, el cual está condicionado no solo a la incidencia de los factores que varían de forma paralela en el eje temporal, sino que también a su comportamiento histórico.

Sobre el hecho de que se cuenta con series históricas de producción minera (de longitud variable, según el mineral y la disponibilidad de información), es posible proyectar su comportamiento futuro a partir del concepto de SdT. La inferencia de la demanda hídrica se ha efectuado mediante las relaciones matemáticas existentes entre la serie proyectada de producción, la tasa unitaria de consumo de agua y la ley del mineral correspondiente (de forma análoga a lo presentado en el capítulo de demanda hídrica actual).

9.3.1.1 Antecedentes

Un antecedente importante de carácter específico, el cual se ha utilizado como base de comparación de resultados para la proyección de la demanda hídrica de la minería del cobre, corresponde al documento “Proyección de consumo de agua en la minería del cobre 2016-2027” (COCHILCO, 2017).

Sus resultados se obtuvieron a partir del análisis de escenarios de materialización de inversiones, basados en la cartera actual de proyectos mineros. Cada escenario fue identificado como “mínimo”, “más probable” y “máximo”, atribuyendo distintas probabilidades a las condiciones de proyecto (Potencial Prefactibilidad, Potencial Factibilidad, Posible Factibilidad, Probable y Base). Los vectores de ponderación, según lo indica el documento citado, fueron calculados con base en información histórica de proyectos publicados por COCHILCO. A partir de dichos escenarios, se obtuvieron tres

valores de consumo, los que se sometieron a una simulación de Monte Carlo, para obtener valores esperados según una distribución probabilística dada. Como resultado, se obtuvo la serie proyectada de consumo de agua de la minería del cobre a nivel regional, cuyos caudales se encuentran expresados en términos de media anual, en l/s, para un horizonte previsional de 2016 a 2027.

9.3.1.2 Alcance

Para contextualizar los alcances de los resultados que se presentan en este capítulo, se debe mantener en consideración que solo se han proyectado los consumos hídricos de las principales faenas mineras, según así las identifica el SERNAGEOMIN en el documento “Anuario de la Minería de Chile 2015” y para todas aquellas sobre las cuales se cuenta con la información mínima necesaria, esto es:

- ✓ Serie de Tiempo de producción minera regional de longitud mínima aceptable (10 años).
- ✓ Información sobre tasas unitarias de consumo hídrico de procesos mineros.
- ✓ Información de ley de minerales, al menos a nivel de industria.

Asimismo, es importante destacar que para los cálculos no se consideraron los proyectos mineros en cartera, ya que se asume que sus consumos hídricos potenciales se encuentran incorporados en el rango de caudales calculado y en el nivel de confianza asignado (incertidumbre implícita).

9.3.2 Fuentes documentales utilizadas

Las fuentes documentales que informan sobre los diferentes parámetros involucrados en los cálculos que llevan a la proyección de la demanda hídrica minera se mantienen respecto a lo referido en el capítulo de estimación de demanda hídrica minera actual.

En cuanto a las SdT de cada mineral, ellas se obtuvieron a partir de lo informado en el documento “Producción Minera por Región 1995-2015”, emitida por COCHILCO en formato de planilla Excel.

Para validar las proyecciones, solo se han considerado aquellos trabajos cuyos resultados son comparables con los obtenidos en el presente estudio, sea por compatibilidad metodológica o por la estructura propia de sus resultados. Destaca, en este sentido, el documento “Proyección de consumo de agua en la minería del cobre 2016-2027”, emitido por COCHILCO en enero de 2017, cuyos resultados se han comparado con las demandas hídricas proyectadas en este trabajo para la minería del cobre.

9.3.3 Metodología aplicada a la proyección de demanda hídrica de aguas continentales

Según se ha puntualizado, se utilizó el análisis de SdT para la proyección de la demanda hídrica minera, con base en la serie histórica de producción minera regional entregada por COCHILCO, para diferentes minerales.

La implementación de la proyección mediante series de tiempo se ha efectuado en MS Excel 2016, que incluye la herramienta “Previsión”. En ella se pueden establecer los principales parámetros de la proyección, como el horizonte previsional, el nivel de confianza de la predicción y la estacionalidad de la SdT, entre otros. Cabe señalar que el algoritmo que utiliza el programa para realizar la proyección, corresponde al llamado Método de Suavización Exponencial, el cual se recomienda para patrones de comportamiento aleatorio en que resulta razonable atenuar el impacto de puntos irregulares. Este método tiene como ventaja que no requiere de una gran cantidad de períodos ni de ponderaciones para lograr buenos resultados. Si bien el SERNAGEOMIN identifica las principales faenas mineras de modo georreferenciado, los datos históricos de producción no llegan a ese nivel de desagregación. Por lo tanto, para generar una estimación que logre una resolución a nivel de subcuenca, se ha optado por seguir el siguiente procedimiento:

- 1) Para la región “r”, se proyecta la SdT de producción del mineral “m” con un 70% N.C., para los años $i = 2016$ a $n = 2040$. De esta manera, para el i -ésimo año de la proyección, se obtienen resultados de la forma:

$$\langle P_{r,m}^i [70\% N.C.] \rangle =] P_{r,m}^{i,inf} ; P_{r,m}^{i,cent} ; P_{r,m}^{i,sup} [$$

donde los superíndices “inf”, “cent” y “sup” hacen referencia a la posición del valor dentro del rango proyectado: inferior, central y superior, respectivamente. Tal como se desprende del párrafo anterior, el primer año de la predicción corresponde a 2016, por lo que el año base de la SdT pertenece a 2015⁵². Respecto del N.C., éste se fijó en un 70%, ya que éste combina lo que se considera una amplitud moderada de la banda de resultados y un nivel aceptable de confianza.

Cabe señalar que la estacionalidad de cada SdT se evalúa caso a caso, según el comportamiento histórico específico de los datos que se proyectan.

- 2) Dado que se conoce la ubicación georreferenciada de las principales faenas mineras – según lo informa SERNAGEOMIN–, cada $P_{r,m}^i$ se distribuye sobre las faenas mineras identificadas de manera proporcional a la distribución actual de producción regional

⁵² Se toma como año base al último para el cual se dispone de información de producción minera; a la fecha de elaboración del presente estudio, solo se dispuso de información actualizada a 2015, emitida tanto por COCHILCO como por SERNAGEOMIN.

(según datos del año base, es decir, 2015). Es dable recalcar que la información de producción a nivel de faena es escasa y disponible solo para aquellas de envergadura relevante, por lo que, en los demás casos, la distribución se hizo de manera uniforme. Si bien ello no se ajusta a la estricta realidad, se considera que es la mejor manera de acercarse a ella, a modo de estimación.

Asimismo, se debe notar que la proyección de demanda hídrica de aguas continentales solo descarta a aquellas faenas que cuentan como condición de base con una planta desalinizadora para el apoyo de sus requerimientos operacionales. Todas las demás faenas fueron incorporadas dentro de la proyección, obviando, bajo un esquema conservador de proyección de demanda, los casos en que se identifican proyectos de desalación en condición “probable” y “posible”.

- 3) Asúmase que se conoce, para la faena “f” del mineral “m” ubicado en la región “r”, la producción en el año base ($P_{r,m,f}^{2015}$); luego, para cada año de la proyección, las producciones futuras al año i se calcularon de la siguiente manera:

$$P_{r,m,f}^i = \frac{P_{r,m}^i \cdot P_{r,m,f}^{2015}}{\sum_f P_{r,m,f}^{2015}}$$

- 4) Para el caso de los minerales cuya tasa unitaria de consumo hídrico “ T_m ” se expresa en función del mineral procesado ($m^3/t_{\text{min_procesado}}$), se debe considerar la ley del mineral “ l_m ”. De tal forma, para un determinado año i de la proyección, el volumen anual de agua utilizado por la faena “f” que produce el mineral “m” en la región “r” viene dada por:

$$DDA_{r,m,f}^i = \frac{P_{r,m,f}^i \cdot t_m}{l_m}$$

Es importante destacar que, para incluir el efecto del aumento en la eficiencia del uso de recursos hídricos –especialmente en la minería del cobre–, se ha considerado incorporar la evolución promedio a la baja de t_m , basada en datos históricos presentados por COCHILCO, para los procesos de concentración y de lixiviación (hidrometalurgia). El análisis se muestra en el Cuadro 9.3-1.

Cuadro 9.3-1 Variación media anual estimada de tasas unitarias de consumo hídrico ($\text{m}^3/\text{t}_{\text{min_procesado}}$) para procesos del cobre, según datos históricos informados por COCHILCO

AÑO	Tasa Unit. Concent.	Tasa Unit. Hidromet.
2009	0,67	0,12
2010	0,69	0,12
2011	0,65	0,12
2012	0,61	0,10
2015	0,63	0,09
VARIACIÓN MEDIA ANUAL	-0,007	-0,005

Fuente: Elaboración propia.

La estimación indica que, por ejemplo, la tasa unitaria de consumo hídrico para procesos de concentración, en promedio, varía anualmente en $-0.007 \text{ m}^3/\text{t}_{\text{min_procesado}}$. Por tanto, se debe hablar de t_m^i ; luego, la ecuación anterior queda de la forma:

$$DDA_{r,m,f}^i = \frac{P_{r,m,f}^i \cdot t_m^i}{l_m}$$

Respecto de la ley de los minerales, en general se ha supuesto que ellos se mantienen en el tiempo, dada la escasez de información (depende de la realidad de cada yacimiento y su antigüedad, lo que dificulta en gran medida su estimación futura); aun cuando ello es contrario a la tendencia natural del parámetro, se considera que el supuesto es conservador para el cálculo de la demanda hídrica futura, permitiendo, incluso, incorporar los efectos del ingreso –más o menos probable– de proyectos en cartera.

Por su parte, en el caso en que las tasas unitarias de consumo de un determinado mineral están referidas a la producción propiamente tal (y no al volumen procesado), se obvia el dato de la ley mineral.

- 5) La primera agregación de la demanda hídrica se efectúa a nivel de subcuenca, por mineral. Sea “sc” una subcuenca en particular de la región “r”, dentro de la cual se encuentran f faenas del mineral “m”. Entonces, la demanda agregada a nivel de la subcuenca “sc” para el i-ésimo año de la proyección, viene dada por:

$$DDA_{r,m,sc}^i = \sum_f DDA_{r,m,f}^i \mid f \in sc$$

- 6) La siguiente agregación se realiza a nivel de cuenca; de forma análoga, para una determinada cuenca “c”, perteneciente a la región “r”, la demanda hídrica dada por la producción del mineral “m” en el i-ésimo año de la proyección, viene dada por:

$$DDA_{r,m,c}^i = \sum_{sc} DDA_{r,m,sc}^i \mid sc \in c$$

- 7) La demanda hídrica minera total por cuenca, proyectada para el i-ésimo año, viene dada por:

$$DDA_{r,c}^i = \sum_m DDA_{r,m,c}^i$$

- 8) De forma análoga, a nivel de subcuenca, dicha demanda se calcula según:

$$DDA_{r,sc}^i = \sum_m DDA_{r,m,sc}^i$$

- 9) Finalmente, la demanda hídrica minera regional proyectada para el año i se establece a través de:

$$DDA_r^i = \sum_c DDA_{r,c}^i \mid c \in r$$

Con todo lo señalado, se obtiene para cada año i, la proyección correspondiente de la demanda hídrica, sea a nivel regional, de cuenca o subcuenca; la forma genérica de la expresión que describe los resultados finales es la siguiente:

$$\langle DDA_{r,c,sc}^i [70\% N.C.] \rangle =]DDA_{r,c,sc}^{i,inf} ; DDA_{r,c,sc}^{i,cent} ; DDA_{r,c,sc}^{i,sup}[$$

9.3.3.1 Proyección de la demanda minera de agua desalada

En paralelo con las proyecciones de demanda hídrica minera de aguas continentales, se incluye en el presente estudio la proyección de la demanda minera de agua desalada, ejercida por aquellas faenas que, dentro del período de previsión adoptado, cuentan con unidades de desalación en fase de operación o bien las tienen dentro de su plan de inversiones.

Para la definición metodológica, se establecieron las siguientes consideraciones:

- Se consideran todas aquellas faenas mineras cuyos requerimientos hídricos operacionales son satisfechos total o parcialmente a través de la producción de agua desalinizada.

- Para la aplicación del punto anterior, se ha considerado como base catastral lo informado en el documento “Proyecciones de agua y energía en la minería del cobre al 2027” (COCHILCO, 2017b).
- Dado que no se dispone de información específica sobre la filosofía operacional de las distintas plantas de desalación, se asume que la capacidad instalada o proyectada de desalación asiste en su 100% a los requerimientos productivos de la faena minera correspondiente. Si bien esto no se ajustará a la realidad en la totalidad de los casos, se considera que el supuesto es adecuadamente conservador.
- Para la proyección de la demanda minera futura de agua de mar desalinizada, se considera como inputs de cálculo a los siguientes parámetros:
 - Proyección de la demanda hídrica minera: corresponde a la demanda de agua que requiere el 100% de la producción minera proyectada, la que se calcula según se detalla en el numeral 9.3.3.
 - El año de puesta en marcha de la planta desalinizadora informado en el **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**; se considera dicho año como cierto, independientemente de la condición del proyecto (probable o posible).
 - La capacidad de desalación proyectada; este valor equivaldrá a la envolvente de demanda hídrica de agua de mar para la faena minera asociada.
- Dada la falta de mayor información, no se contemplan aumentos escalonados de la capacidad de desalación proyectada para las plantas desalinizadoras en carpeta. Por lo tanto, a la fecha de ingreso a operación, se asume que las instalaciones disponen del 100% de su capacidad (según lo informado por (COCHILCO, 2017b).
- Se asume que la vida útil de todas las plantas desalinizadoras identificadas se extiende hasta el fin del período de previsión adoptado para las proyecciones de demanda hídrica.

Establecido lo anterior, resulta importante destacar que la proyección de la demanda minera de agua desalinizada se efectúa de manera desacoplada con respecto a la demanda hídrica minera de agua dulce del sector productivo.

La formulación matemática de la proyección es como sigue:

CASO 1: Faenas mineras con apoyo hídrico basado en desalinización como Condición Base

Ténganse las siguientes variables:

- DDA_i^f : demanda hídrica total proyectada (es decir, aquella asociada al 100% de su producción) de la faena minera “f” en el i-ésimo año del período de previsión.
- $Q_{CAP-DESAL}^f$: capacidad instalada de desalación de la planta desalinizadora asociada a la faena minera “f”.
- $DDA_{f-DESAL}^i$: demanda de agua desalinizada de la faena minera “f” durante el i-ésimo año del período de previsión.

Conocidos previamente DDA_i^f (proviene de la proyección de demanda hídrica de aguas continentales) y $Q_{CAP-DESAL}^f$, la demanda de agua desalinizada que ejerce la faena “f” durante el i-ésimo año del período de previsión para satisfacer total o parcialmente sus requerimientos productivos, se obtiene mediante la aplicación de la siguiente función:

$$DDA_{f-DESAL}^i = \min\{DDA_i^f ; Q_{CAP-DESAL}^f\}$$

Cabe notar que si $DDA_i^f > Q_{CAP-DESAL}^f$, entonces, para el año i del período de previsión, la faena f tiene un requerimiento hídrico de aguas continentales Q_{f-H2O}^i igual a:

$$Q_{f-H2O}^i = DDA_i^f - Q_{CAP-DESAL}^f$$

Por lo tanto, si $Q_{f-H2O}^i > 0$, entonces la planta desalinizadora satisface una fracción de la demanda hídrica minera de la faena “f”.

CASO 2: Faenas mineras con apoyo hídrico basado en desalinización como Condición Probable o Posible

Ténganse en consideración los siguientes parámetros y/o variables:

- a_f : año de ingreso a operación en que se proyecta (bajo condición probable o posible) la planta desalinizadora asociada a la faena minera “f”.
- PP : período de previsión considerado en la proyección.
- DDA_i^f : demanda hídrica total proyectada (es decir, aquella asociada al 100% de su producción) de la faena minera “f” en el i-ésimo año del período de previsión.
- $Q_{CAP-DESAL}^f$: capacidad instalada de desalación de la planta desalinizadora asociada a la faena minera “f”.

$DDA_{f-DESAL}^i$: demanda de agua desalinizada de la faena minera “f” durante el i-ésimo año del período de previsión.

Para cualquier i, se debe cumplir que:

$$\forall i \in PP, DDA_{f-DESAL}^i = 0 \Leftrightarrow i < a_f$$

Por lo tanto, para todos aquellos casos en que $i > a_f$, sucederá que $DDA_{f-DESAL}^i > 0$. Luego, la demanda de agua desalinizada que ejerce la faena “f” durante el i-ésimo año del período de previsión para satisfacer total o parcialmente sus requerimientos productivos, se obtiene mediante la aplicación de la función:

$$DDA_{f-DESAL}^{i \geq a_f} = \min \{ DDA_{i \geq a_f}^f ; Q_{CAP-DESAL}^f \}$$

donde el índice $i \geq a_f$ hace relación al i-ésimo año del período de previsión desde que la planta desalinizadora proyectada entra en operaciones (es decir, necesariamente se cumple que $DDA_{i \geq a_f}^f > 0$).

Análogamente al caso anterior, se cumple que si $DDA_{i \geq a_f}^f > Q_{CAP-DESAL}^f$, entonces, para el respectivo año i del período de previsión, la faena f tiene un requerimiento hídrico de aguas continentales $Q_{f-H2O}^{i \geq a_f}$ igual a:

$$Q_{f-H2O}^{i \geq a_f} = DDA_{i \geq a_f}^f - Q_{CAP-DESAL}^f$$

Por lo tanto, si $Q_{f-H2O}^{i \geq a_f} > 0$, entonces la planta desalinizadora satisface una fracción de la demanda hídrica minera de la faena “f”. Por el contrario, si $DDA_{i \geq a_f}^f < Q_{CAP-DESAL}^f$, se tendrá la situación en que la planta desalinizadora satisface con holgura los requerimientos hídricos operacionales de la faena minera, lo que se mantendrá hasta que $DDA_{i \geq a_f}^f = Q_{CAP-DESAL}^f$.

Finalmente, la agregación territorial (a nivel de subcuenca, cuenca y/o región) de la demanda proyectada de agua de mar desalada por parte de la minería (independiente de si se trata de Condición Base, Posible o Probable de desalación), se efectúa a través de la sumatoria sobre los subíndices que le corresponden a cada clase de unidad territorial, según la ubicación de las distintas faenas.

CAPÍTULO 10 METODOLOGÍA PARA EL ESTUDIO DE LA DEMANDA HÍDRICA DEL USO: INDUSTRIAL

10.1 INTRODUCCIÓN

El estudio de las demandas de agua de uso industrial presenta un nivel de dificultad en su abordaje, puesto que no existe una fuente oficial y actualizada que cuantifique la demanda industrial de forma directa.

Previamente, cabe acotar a qué se refiere en este capítulo la *demanda hídrica industrial*. De acuerdo con la Clasificación Industrial Internacional Uniforme (CIIU) de la Organización de Naciones Unidas (ONU), las actividades económicas se dividen en los siguientes grandes grupos:

Cuadro 10.1-1 Secciones de la clasificación CIIU (Rev IV)

Sección	Descripción
A	Agricultura, ganadería, silvicultura y pesca
B	Explotación de minas y canteras
C	Industrias manufactureras
D	Suministro de electricidad, gas, vapor y aire acondicionado
E	Suministro de agua; evacuación de aguas residuales, gestión de desechos y descontaminación
F	Construcción
G	Comercio al por mayor y al por menor; reparación de vehículos automotores y motocicletas
H	Transporte y almacenamiento
I	Actividades de alojamiento y de servicio de comidas
J	Información y comunicaciones
K	Actividades financieras y de seguros
L	Actividades inmobiliarias
M	Actividades profesionales, científicas y técnicas
N	Actividades de servicios administrativos y de apoyo
O	Administración pública y defensa; planes de seguridad social de afiliación obligatoria
P	Enseñanza

Sección	Descripción
Q	Actividades de atención de la salud humana y de asistencia social
R	Actividades artísticas, de entretenimiento y recreativas
S	Otras actividades de servicios
T	Actividades de los hogares como empleadores; actividades no diferenciadas de los hogares como productores de bienes y servicios para uso propio
U	Actividades de organizaciones y órganos extraterritoriales

Fuente: NNUU (2009).

En este apartado se presentan los antecedentes relativos a la estimación de la demanda de la “industria manufacturera”, correspondiente a la sección C de la CIU revisión IV. Lo anterior debido a que el resto de las actividades productivas se analizan en otros puntos del presente documento:

- Sección A: en uso agrícola, pecuario, acuícola y forestal.
- Sección B: en uso minero.
- Sección D: en uso para generación eléctrica.
- Secciones E a U: generalmente en uso de agua potable (urbana y rural); prueba de ello es que las empresas sanitarias desglosan clientes residenciales, industriales, comerciales, institucionales y otros.

10.2 ENFOQUE METODOLÓGICO DE LA ESTIMACIÓN DE LA DEMANDA ACTUAL

10.2.1 Generalidades

xxxviii. Antecedentes

Uno de los primeros estudios de demandas de agua que abarcaron todo el territorio nacional correspondió al denominado “Análisis de Uso Actual y Futuro de los Recursos Hídricos de Chile” (DGA-IPLA, 1996). Dicho estudio determinó las demandas sobre los recursos hídricos para cada cuenca, desagregada según la actividad industrial que abastecen. De esa forma, se obtuvo, para una situación base correspondiente al año 1993, los consumos netos y brutos de agua con fines industriales, a nivel de cuenca.

Los valores anteriores se calcularon a partir de información básica proveniente del “Catastro Nacional de Descargas de Residuos Industriales Líquidos de la SISS” (1993), junto con el uso de un factor de relación *efluente/demanda* estimado -según literatura- para distintos sectores industriales.

Así, en el citado estudio de DGA-IPLA (1996) se basaron en los datos de grado de recirculación y el porcentaje de uso consuntivo para distintos sectores industriales consignados en el Cuadro

10.2-1. A partir de esos datos, se determinó un factor que relaciona la demanda de agua fresca con el efluente final de la unidad de producción en cada uno de los casos considerados.

Cuadro 10.2-1 Grado de Recirculación y Porcentaje de Uso Consuntivo en los Principales Sectores Industriales

Sector Industrial	Grado de Recirculación (%)	Uso Consuntivo (%)	Factor de Relación Efluente/Demanda
Papel	62	4,3	0,39
Productos Químicos	63	12,7	0,39
Refinería Petróleo	8	3,4	0,75
Alimentación	38	10,6	0,66
Azúcar	48	8,3	0,54
Conservas	30	11,0	0,76
Carne	20	7,4	0,80
Productos lácteos	10	6,2	0,95
Textiles	9	15,1	0,90
Curtiembre	4	7,3	0,90
Materiales de Construcción	27	10,5	0,80
Maquinarias	15	8,1	0,91

Fuente: Characteristics of Industrial Water Uses. Gobierno de Hungría, Organismo Nacional de Aguas, Budapest (1968), citado en DGA-IPLA (1996).

La fuente del cuadro anterior data de 1968, y además corresponde a valores de un organismo extranjero (Hungría). Por lo anterior, el consultor considera que dicha tabla ha podido quedar obsoleta, por lo que se revisó la existencia de actualizaciones de la misma.

xxxix. Alcance

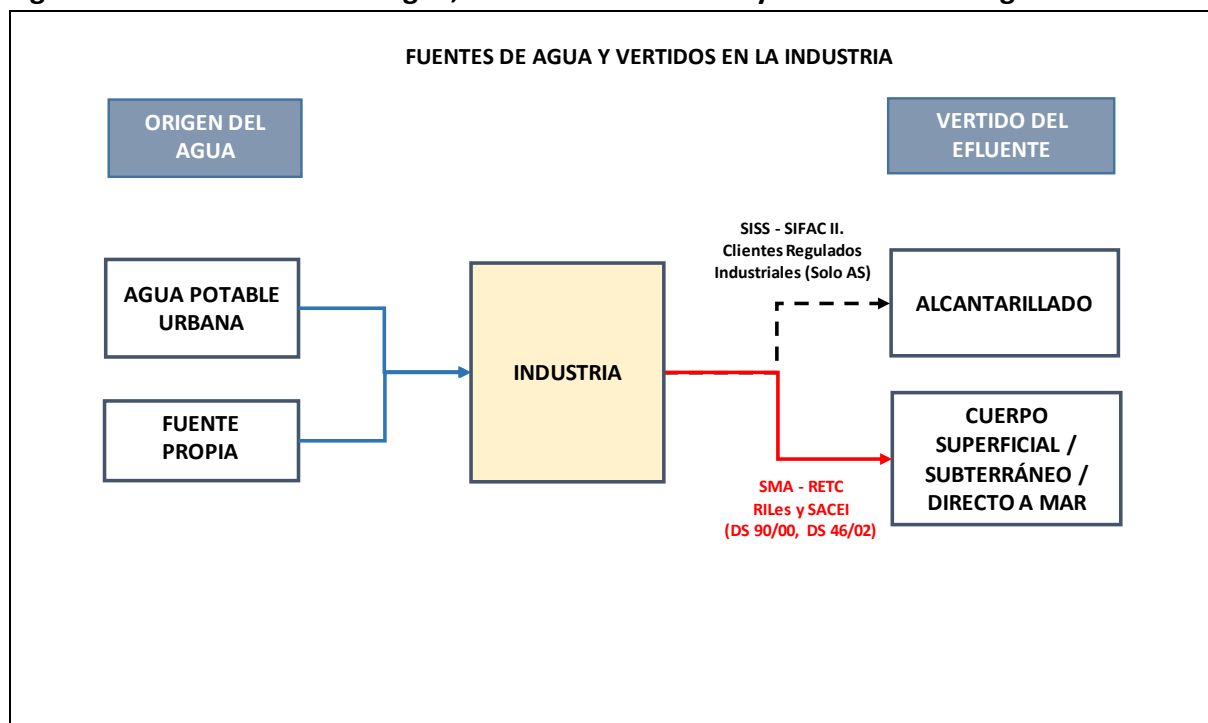
Tal como se ha mencionado anteriormente, la valoración de la demanda hídrica industrial recaerá sobre las industrias manufactureras. Cabe señalar que el cálculo del consumo de agua en la industria debe realizarse de forma directa e indirecta, atendiendo al contexto normativo y fiscalizador vigente en Chile.

En lo referido a *fuentes hídricas*, existen industrias que se abastecen con fuentes propias (pozos, agua superficial, etc.), y otras directamente de la red de agua potable:

- ✓ Existen un porcentaje de las industrias en el país que son abastecidas por las empresas sanitarias que le corresponden según la zona en que se encuentren, con lo cual ese consumo comúnmente queda abarcado en el consumo de agua potable (Capítulo 3).
- ✓ Por otro lado, no existe un registro público del consumo de agua de fuentes propias de cada empresa.

Por ello, se plantea la revisión de los datos de forma indirecta, esto es, a través de los registros de efluentes industriales. En la figura siguiente se sintetizan las relaciones fuente/efluente y el origen de la información recopilada:

Figura 10.2-1 Fuentes de agua, vertidos de efluentes y fiscalización de agua industrial



Fuente: Elaboración propia.

Este apartado se centra en el consumo de agua que vierte a un cuerpo de agua superficial, subterráneo o directo a mar y proviene de fuentes propias, los efluentes del cual se encuentran declarados en el Registro de Emisiones y Transferencias de Contaminantes (RETC) del Ministerio del Medio Ambiente. Adicionalmente, se considerarán aquellos volúmenes de agua registrados en el SIFAC II que corresponden a los Clientes Regulados Industriales con tipo de servicio “sólo AS”, es decir, sólo aguas servidas.

Se descarta el análisis de los registros de efluentes normados por el D.S. 609/98 (Norma de Emisión para la Regulación de Contaminantes Asociados a las Descargas de Residuos Industriales Líquidos a Sistemas de Alcantarillado), puesto que se refiere al consumo parcialmente contabilizado en el SIFAC II, y además se trataría de una estimación indirecta, menos confiable que el directamente medido.

10.2.2 Fuentes documentales utilizadas

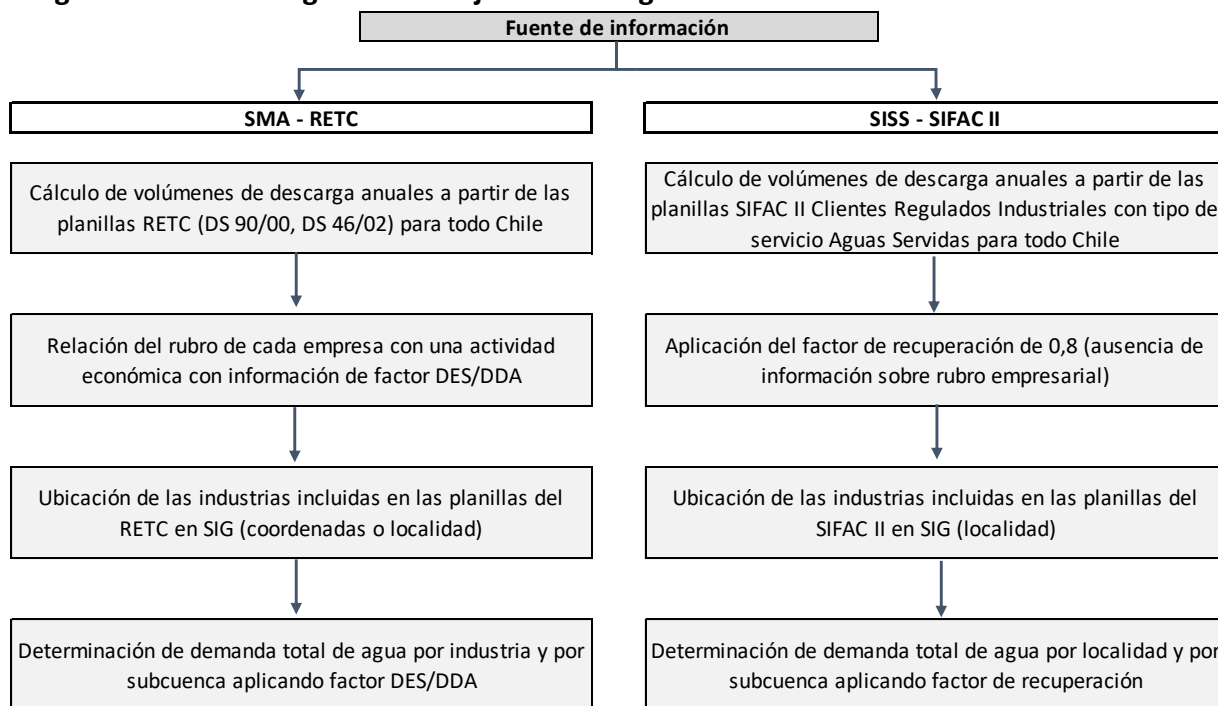
Para efectos de diseñar una metodología que permita determinar las demandas de agua de uso industrial, se cuenta con la siguiente información.

- Registros de la Superintendencia del Medio Ambiente (SMA), relativos a información de fuentes reguladas de residuos industriales líquidos recibidos por los sistemas SACEI (Sistema de Autocontrol de Establecimientos Industriales) y RETC (Registro de Emisiones y Transferencias de Contaminantes) del año 2015. Esta información incluye lo relativo a la norma DS 90/00 (Norma de Emisión para la Regulación de Contaminantes Asociado a las Descargas de Residuos Líquidos a Aguas Marinas y Continentales Superficiales) y a la norma DS 46/02 (Norma de Emisión de Residuos Líquidos a Aguas Subterráneas).
- Registros del Sistema de Facturación Clientes y Coberturas (SIFAC II) de la Superintendencia de Servicios Sanitarios (SISS). Recoge la información de facturación (m³/año) de agua potable y de aguas servidas de clientes regulados por empresa sanitaria y localidad; distingue entre facturación a clientes residenciales, comerciales, industriales, institucionales y no asociados a inmueble. Se trabaja con los datos por tipo de servicio “sólo Aguas Servidas” del año 2015.
- Industrial Water Use. Statistics Canada. Canadá, 2011. Recoge, para distintas actividades industriales de Canadá, parámetros de entrada, consumo, recirculación y descarga de agua, expresados en montos totales y porcentajes. <http://www.statcan.gc.ca/pub/16-401-x/16-401-x2014001-eng.pdf>

10.2.3 Metodología

Según lo expuesto anteriormente, se analizarán dos vías de datos para establecer la demanda de agua en el sector industrial, según el origen de la información. De forma resumida, la metodología que se utilizará se muestra en el siguiente diagrama de flujo.

Figura 10.2-2 Diagrama de Flujo Metodología Cálculo Demandas Industriales



Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se describe detalladamente cada uno de los procesos.

xl. Metodología para industrias incluidas en el RETC

En primer lugar, se calcularán los efluentes a escala anual de cada una de las empresas que declaran en el RETC atendiendo a las normas de aplicación del D.S. 90/00 y D.S. 46/02, a partir de los registros de RILes expresados en m³/día. En ausencia de información al respecto, se aplicarán los siguientes supuestos:

- i. Se tomará el valor promedio diario de los registros existentes.
- ii. Para el cálculo del caudal mensual, se considerarán 22 días de descarga al mes.

Con ello, se obtendrán los caudales de efluentes totales anuales por empresa.

Tal como se ha indicado anteriormente, la fuente de los factores efluente/demanda para diferentes industrias utilizada en el estudio de DGA-IPLA (1996) data de 1968. Considerando que ésta puede claramente quedar obsoleta, se ha investigado en la bibliografía, y se ha encontrado un documento que da cuenta del uso del agua industrial en Canadá, correspondiente al año 2011. En éste se muestran valores (expresados también como %) relativos al grado de recirculación, descarga y consumo sobre el flujo de entrada. En el Cuadro 10.2-2 se muestran estos parámetros.

Cuadro 10.2-2 Parámetros de uso del agua en las industrias manufactureras, por grupo industrial, 2011

Table 1
Water use parameters in manufacturing industries, by industry group, 2011

	Intake		Recirculation		Recirculation rate ¹	Gross water use ²		Discharge		Consumption ³		Consumption rate ⁴
	millions of cubic metres	%	millions of cubic metres	%		millions of cubic metres	%	millions of cubic metres	%	millions of cubic metres	%	
Total	3,677.5 ^A	100.0	1,870.0 ^A	100.0	50.8	5,547.5	100.0	3,226.8 ^A	100.0	450.7	100.0	12.3
Food	346.4 ^B	9.4	49.5 ^B	2.6	14.3	395.9	7.1	312.5 ^B	9.7	33.9	7.5	9.8
Beverage and tobacco	46.8 ^B	1.3	1.3 ^D	0.1	2.8	48.1	0.9	34.4 ^A	1.1	12.4	2.8	26.5
Textile mills	1.7 ^D	0.0	x	x	x	x	x	1.6 ^D	0.0	0.1	0.0	5.9
Textile products	1.4 ^E	0.0	F	F	F	F	F	1.2 ^E	0.0	0.2	0.0	14.3
Wood	28.6 ^E	0.8	x	x	x	x	x	19.0 ^E	0.6	9.6	2.1	33.6
Paper	1,322.5 ^A	36.0	586.9 ^B	32.0	45.3	1,921.4	34.6	1,281.7 ^A	39.7	40.8	9.1	3.1
Petroleum and coal	288.8 ^A	7.9	212.4 ^D	11.4	73.5	501.2	9.0	259.8 ^A	8.1	29.0	6.4	10.0
Chemicals	451.0 ^C	12.3	49.9 ^A	2.7	11.1	500.9	9.0	317.8 ^B	9.8	133.2	29.6	29.5
Plastics and rubber	26.7 ^D	0.7	3.0 ^E	0.2	11.2	29.7	0.5	22.3 ^D	0.7	4.4	1.0	16.5
Non-metallic minerals	44.3 ^C	1.2	5.8 ^D	0.3	13.1	50.1	0.9	29.0 ^C	0.9	15.3	3.4	34.5
Primary metals	1,076.1 ^A	29.3	930.7 ^A	49.8	86.5	2,006.8	36.2	906.6 ^A	28.1	169.5	37.6	15.8
Fabricated metals	6.0 ^D	0.2	x	x	x	x	x	5.8 ^D	0.2	0.2	0.0	3.3
Machinery	3.6 ^E	0.1	F	F	F	F	F	3.5 ^E	0.1	0.1	0.0	2.8
Computers and electronics ⁵	F	F	x	x	x	x	x	F	F	F	F	F
Electrical products ⁶	1.1 ^D	0.0	x	x	x	x	x	1.1 ^D	0.0	0.0	0.0	0.0
Transportation equipment	24.1 ^B	0.7	0.9 ^D	0.0	3.7	25.0	0.5	22.6 ^B	0.7	1.5	0.3	6.2
Miscellaneous	1.4 ^B	0.0	x	x	x	x	x	1.0 ^B	0.0	0.4	0.1	28.6
Other ⁶	1.6 ^D	0.0	x	x	x	x	x	1.2 ^E	0.0	0.4	0.1	25.0

1. Recirculation rate = Amount of recirculated water as a percent of intake. The same water can leave a sub-system and re-enter it or is used in another sub-system many times, resulting in a recirculation rate > 100%.
 2. Gross water use = Intake + Recirculation.
 3. Consumption = Intake - Discharge.
 4. Consumption rate = Consumption as a percentage of Intake.
 5. For 2005, computer and electronic product manufacturing and electrical equipment, appliances and component manufacturing are included in the other manufacturing industries category. As of 2007, they appear separately.
 6. Other manufacturing industries combines the following industry groups 3-digit North American Industry Classification System (NAICS): clothing manufacturing (315), leather and allied product manufacturing (316), printing and related support activities (323) and furniture and related product manufacturing (337). The industry groups included in other manufacturing industries may vary from year to year.
- Note(s): Figures may not add up to totals due to rounding.
Source(s): Statistics Canada, CANSIM table 153-0047.

Fuente: STATCAN (2001).

De acuerdo con los datos del cuadro anterior, se pueden calcular los factores *efluente/demanda* (DES/DDA) en los diferentes tipos de industrias como coeficiente entre la descarga (*discharge*) y el flujo de entrada (*intake*). En el cuadro siguiente se muestran dichos factores DES/DDA calculados.

Cuadro 10.2-3 Factores Efluente/Demanda de diferentes actividades industriales

Sector industrial	Factor Efluente/Demanda
Comida	0,902
Bebidas y tabaco	0,735
Fábricas textiles	0,941
Productos textiles	0,857
Madera	0,664
Papel	0,969
Petróleo y carbón	0,900

Sector industrial	Factor Efluente/Demanda
Productos químicos	0,705
Plásticos y gomas	0,835
Minerales no metálicos	0,655
Metales primarios	0,842
Metales fabricados	0,967
Maquinaria	0,972
Equipo de transporte	0,938
Misceláneo	0,714
Otros ⁵³	0,750

Fuente: Elaboración propia, en base a STATCAN (2011).

En el análisis de la información de las planillas RETC, se agruparán los diferentes rubros productivos de cada empresa que presenten similares características en cuanto a su proceso de producción y necesidades de agua industrial, de forma de asimilarlos a alguna de las categorías de la tabla anterior. Así, aplicando el factor DES/DDA, se obtendrán los volúmenes anuales de demanda de agua en las industrias.

A partir de la información consignada de cada empresa, se solaparán las coordenadas UTM de las mismas sobre los polígonos de subcuencas en SIG, obteniendo la relación de ubicación de cada demanda en el territorio. Si no se disponen de las coordenadas, se cruzará con el campo referente a la localidad. Posteriormente, se calculará la demanda hídrica por subcuenca, cuenca y región.

10.2.3.1 Metodología para industrias incluidas en el SIFAC II

Para el caso de las industrias con fuente propia de agua pero que vierten a alcantarillado gestionado por una empresa sanitaria, estos efluentes quedan registrados en las planillas del SIFAC II, en calidad de *aguas servidas* por tipo de servicio.

Para el cálculo de estas demandas, se considerará un factor de recuperación del efluente, ya que no se dispone de información del rubro empresarial. Este factor será de 0,8, por lo que los volúmenes registrados de caudal descargados anualmente deberán incrementarse un 25%. Como no se dispone de coordenadas de ubicación de dichos clientes, se tomará como referencia la localidad asociada en cada empresa sanitaria, para elevar los resultados a escala subcuenca, cuenca y región.

⁵³ Manufactura de ropa, cueros, impresiones y actividades de apoyo relacionadas, muebles y productos relacionados.

10.3 ENFOQUE METODOLÓGICO DE LA PROYECCIÓN DE LA DEMANDA FUTURA

En el presente capítulo se entrega el detalle de la metodología aplicada a la proyección futura de la demanda hídrica ejercida por la industria, pronóstico que se efectúa a nivel de subcuenca, cuenca y regional.

Tal como se hizo en otras demandas hídricas sectoriales, para la estimación de la demanda industrial futura de aguas continentales dentro del horizonte 2016-2040, se aplicó la predicción mediante Series de Tiempo (SdT), las que permiten incluir en la proyección el comportamiento histórico de la variable basal a partir de la cual se infieren los volúmenes de agua requeridos.

El sustento de dicha metodología se basa en el supuesto de que la fluctuación de la producción en el tiempo tiene un comportamiento de tipo aleatorio, ya que ella se explica a través de parámetros exógenos que son difíciles de pronosticar.

Dado que es posible describir la evolución de la productividad a través de un índice apropiado, se asume que dicho índice explica la actividad industrial y ella los volúmenes de descarga de RILes, los que a su vez se pueden relacionar de manera directa con los requerimientos hídricos del sector.

10.3.1 Generalidades

Para la formulación del método, se establece como base conceptual que la demanda hídrica industrial se asocia a los volúmenes de descarga de RILes, tal como se dejó establecido en el capítulo de estimación de la demanda hídrica actual del rubro. Dado que puede suponerse cierta proporcionalidad entre las descargas y los volúmenes tomados de las fuentes continentales para cada proceso industrial, entonces la relación entre ambos volúmenes es directa mediante un factor de conversión específico. Luego, en términos matemáticos, una forma de expresar las relaciones para una determinada industria, es la siguiente:

$$DDA_{Hídrica}^{Industria} = f(\text{Descarga RILes}, \text{factor de conversión})$$

Respecto a la descarga de RILes, es posible anotar que ella es función de la producción industrial, la que a su vez depende de una serie de factores exógenos de difícil pronóstico. La dependencia comentada se ilustra a través de las siguientes expresiones:

$$\text{Descarga RILes} = g(\text{producción industrial})$$

$$\text{Producción Industrial} = h(\text{IPC}, \text{US\$}, \$_{\text{Energía}}, \text{Microeconomía}, \text{Macroeconomía}, \text{etc.})$$

Según se observa, dadas las funciones señaladas y al ser la producción industrial una variable de comportamiento estocástico, por transitividad la demanda hídrica también lo es. Por ello, se establece la conveniencia de proyectar dicha demanda con base en SdT, de ese modo es posible integrar en los pronósticos el comportamiento aleatorio de la variable a través del tiempo, variable base de la SdT definida más adelante.

Cabe señalar que el pronóstico se efectúa a través del uso de la herramienta “Previsión” de MS Excel 2016, la cual se aplica a la SdT para una proyección con horizonte 2016-2040. La herramienta tiene implementado para su ejecución el algoritmo de Suavización Exponencial, el cual se recomienda para el análisis y proyección de SdT de comportamiento aleatorio no estacionarias, sin requerir una longitud de datos muy extensa.

Con todo lo expuesto, se propone obtener resultados de proyección bajo la siguiente estructura genérica (demanda hídrica industrial para un año i dentro del período de previsión):

$$\langle DDA_{Hídrica}^i [x\% N.C.] \rangle =]Q_{inf}^i ; Q_{cent}^i ; Q_{sup}^i [$$

donde:

- $DDA_{Hídrica}^i$: demanda hídrica industrial para el i -ésimo año del período de previsión.
- $X\% N.C.$: Nivel de Confianza expresado en porcentaje.
- Q_{inf}^i : Límite inferior del rango proyectado de caudales probables para el año i .
- $Q_{central}^i$: Valor central del rango proyectado de caudales probables para el año i .
- Q_{sup}^i : Límite superior del rango proyectado de caudales probables para el año i .

Para todos los efectos, la totalidad de los caudales proyectados como demanda hídrica ejercida por el rubro manufacturero, será de tipo consuntivo.

10.3.1.1 Antecedentes

En el proceso de recuperación de referencias bibliográficas que contuvieran aplicaciones asociadas a la proyección de la demanda hídrica por producción industrial, no se encontraron fuentes documentales cuyos resultados sean compatibles en naturaleza y estructura respecto de los que aquí se obtuvieron. Por ello, los presentes resultados solo se analizan en su mérito, sin mediar validaciones de tipo comparativo con otros trabajos.

10.3.1.2 Alcance

En términos generales, el análisis proyectivo y sus resultados es función de los criterios adoptados en el capítulo de estimación actual de la demanda, sobre los que se aplica la estimación de los caudales futuros de demanda a partir de SdT.

Sin perjuicio de lo anterior, la proyección de la demanda hídrica se ha efectuado de manera indirecta a través de su indexación a parámetros que se ha supuesto la explican y para los cuales hay una cantidad mínima de datos para la construcción de SdT. Ello se debe a la escasa cantidad de datos disponibles en el dominio del tiempo referidos a descargas industriales líquidas en el tiempo.

Asimismo, es dable destacar, que las demandas obtenidas deben tomarse como indicadores que reflejan el comportamiento histórico de los datos y su tendencia, sin incorporar la influencia de elementos exógenos como cambios regulatorios, reglamentarios o legales que puedan implementarse en el futuro.

Finalmente, se deja establecido que el procedimiento de proyección utilizado no contempla el ingreso eventual de proyectos industriales en cartera. Sin perjuicio de ello, se considera que, en teoría, el hecho de obtener rangos de demanda futura con nivel de confianza asociado, da la suficiente flexibilidad como para aventurar la probable inclusión de las demandas hídricas provenientes de dichos proyectos.

10.3.2 Fuentes documentales utilizadas

Los datos utilizados para la proyección y sus respectivas fuentes de información utilizadas son las tres siguientes:

- Datos de descargas industriales puntuales: se mantienen las bases de datos señaladas en el capítulo de estimación de demanda actual.
- Ubicación de las industrias: a partir de la información proporcionadas en las bases de datos señaladas en el punto anterior.
- Factores de conversión volumen de descarga a demanda hídrica: según lo señalado en capítulo de estimación de la demanda actual.
- PIB industria manufacturera a nivel regional: serie estadística INE provista por el Banco Central.

10.3.3 Metodología

En primer lugar, se destaca el hecho referido a la baja disponibilidad de datos de descargas industriales referidas en el dominio del tiempo: teniendo cuantificadas las descargas puntuales solo para los años 2013, 2014 y 2015, construir una SdT robusta para efectuar una proyección a partir de ella no se consideró adecuado. Por lo tanto, partiendo de dicha base, se optó por encontrar una variable que, cumpliendo con las siguientes dos condiciones, pudiera proyectarse para estimar de manera indirecta la demanda hídrica industrial futura:

- a) Explique el comportamiento de la producción industrial en el tiempo; es decir, que haya un acompañamiento paralelo en las fluctuaciones tanto del indicador como de la actividad (correlación positiva).
- b) Haya una cantidad de datos en el dominio del tiempo que sea la mínima necesaria para construir una SdT.

Consecuentemente, se optó por utilizar como dato base de proyección al PIB sectorial perteneciente a la industria manufacturera, valorizado a nivel regional. La SdT correspondiente se construyó con los datos disponibles entre 2008 a 2014, según los valores estadísticos del INE que provee el Banco Central. En tal sentido, cabe indicar que la información sectorial regional solo se encuentra actualizada a 2014, no pudiéndose contar con datos más actualizados.

Dicho lo anterior, sea PIB_r^i el Producto Interno Bruto de la industria manufacturera de la región “r”, proyectado al año i del período de previsión; la forma general de la proyección basada en la SdT es la siguiente:

$$\langle PIB_r^i [70\% N.C.] \rangle =] PIB_{r,inf}^i ; PIB_{r,cent}^i ; PIB_{r,sup}^i [$$

donde:

$PIB_r^i [70\% N.C.]$	: Producto Interno Bruto (PIB) proyectado al i-ésimo año para la industria manufacturera de la r-ésima región, con un 70% de Nivel de Confianza.
$PIB_{r,inf}^i$	: valor inferior del rango proyectado para el PIB de la industria manufacturera de la r-ésima región, proyectado para el año i del período de previsión.
$PIB_{r,cent}^i$	: valor central del rango proyectado para el PIB de la industria manufacturera de la r-ésima región, proyectado para el año i del período de previsión.
$PIB_{r,sup}^i$	: valor superior del rango proyectado para el PIB de la industria manufacturera de la r-ésima región, proyectado para el año i del período de previsión.

Respecto del N.C., éste se ha fijado al 70%, debido a que éste combina un nivel de confianza adecuado con una amplitud de rango moderada.

Proyectado el PIB sectorial a nivel de región, la ligazón del indicador con la demanda hídrica se realizó de la siguiente forma:

1. Cálculo de la demanda hídrica por rubro industrial a través del factor de conversión: sea $D_{k,n,sc,c,r}^{2015}$ la descarga informada a 2015 de la k-ésima industria perteneciente al rubro industrial “n”, ubicado en la subcuenca “sc” dentro de la cuenca “c” de la región “r”. Si f_n es el factor de conversión de la descarga correspondiente a un determinado rubro industrial “n”, entonces la demanda hídrica específica a dicha industria viene dada por:

$$DDA_{k,n,sc,c,r}^{2015} = f_n \cdot D_{k,n,sc,c,r}^{2015}$$

La referencia al año 2015 se debe a que este es el año más reciente para el cual se cuenta con datos de descarga de RILES.

2. Puesto que se conoce, para cada región, la ubicación de cada industria, la demanda hídrica agregada a nivel de subcuenca para el año base (2015) se calcula como:

$$DDA_{sc,c,r}^{2015} = \sum_n \sum_k DDA_{k,n,sc,c,r}^{2015} \quad / k \in sc$$

La agregación a nivel de cuenca, se efectúa de forma análoga, tal que, para una determinada región, se cumpla que $sc \in c$.

3. Vinculación de la demanda hídrica del año base con la proyección del PIB: dado que se propone estimar la demanda hídrica futura de manera indirecta a través de la proyección de SdT del PIB regional industrial, se debe establecer la relación matemática que permita hacerlo. Con base en ello, se ha considerado válido suponer que la evolución de la demanda hídrica sectorial varía interanualmente de forma proporcional al PIB, según lo proyectado. Por ende, es posible establecer que:

$$\langle DDA_{sc,c,r}^i [70\% N.C.] \rangle = \frac{\langle PIB_r^i [70\% N.C.] \rangle}{PIB_r^{2014}} \cdot DDA_{sc,c,r}^{2015}$$

donde:

$DDA_{sc,c,r}^i [70\% N.C.]$	: demanda hídrica industrial proyectada para el año i del período de previsión, al interior de la subcuenca “sc” perteneciente a la cuenca “c”, en la r-ésima región, con un N.C. del 70%.
$PIB_r^i [70\% N.C.]$	: PIB industrial proyectado al año i para la r-ésima región, con un N.C. del 70%.
PIB_r^{2014}	: PIB industrial regional registrado al año base 2014.

$DDA^{2015}_{sc,c,r}$

: demanda hídrica industrial calculada al año 2015 para la subcuenca “sc”, ubicada en la cuenca “c” de la región “r”.

Cabe notar que la base referencial del PIB regional sectorial tuvo que fijarse a 2014, puesto que a la fecha de realización del presente estudio solo se contó con información a dicho año.

Finalmente, la demanda proyectada a nivel de subcuenca, en términos generales, queda definida de la forma:

$$\langle DDA^i_{sc,c,r}[70\% N.C.] \rangle =]Q^i_{sc,c,r,inf} ; Q^i_{sc,c,r,cent} ; Q^i_{sc,c,r,sup}[$$

Donde Q puede estar referido en términos de volumen anual o caudal medio anual, expresado en l/s o m3/s.

CAPÍTULO 11 METODOLOGÍA PARA EL ESTUDIO DE LA DEMANDA HÍDRICA DEL USO: GENERACIÓN ELÉCTRICA

11.1 INTRODUCCIÓN

En Chile, la mayor parte de la generación de energía que llega a los usuarios finales –a través de las redes de transmisión y distribución–, se produce en las centrales generadoras pertenecientes a los cuatro sistemas eléctricos⁵⁴:

- Sistema Interconectado del Norte Grande (SING). Aporta el 23,2 % de la capacidad total instalada. En términos absolutos, con una potencia instalada de 4,67 TW a noviembre de 2016, desarrolla sus líneas de transmisión entre la XV Región de Arica y Parinacota y la II Región de Antofagasta, a la altura de Taltal. Su matriz es eminentemente térmica, con más de un 95% de la generación actual perteneciente a centrales basadas en combustibles fósiles.
- Sistema Interconectado Central (SIC). Corresponde al 75,8% de la capacidad total instalada y alimenta al 93% de la población. El trazado del sistema de transmisión al cual se conectan sus centrales generadoras se desarrolla entre Taltal (II Región de Antofagasta) y la Isla de Chiloé (X Región de Los Lagos). Teniendo una potencia total instalada de 16,61 TW, su matriz es fundamentalmente termohidráulica⁵⁵.
- Sistema Eléctrico de Aysén (SEA). Contribuye con el 0,3% de la capacidad total instalada. Operando en la región que lleva su nombre (XI Región de Aysén), a nivel de sistema es el más diversificado en cuanto a su matriz de potencia instalada (6,12% eólica, 36,67% hidráulica y 57,20% fósil); su potencia neta total instalada asciende a 61,7 MW. Cabe

⁵⁴ A pesar de las modificaciones que introdujo la Ley N° 20.936 y su reglamento al sistema de transmisión eléctrica, que implican la formación de un único Coordinador Eléctrico Nacional, para los efectos del presente estudio, dichos cambios no se consideran importantes, pues no influyen en sus resultados.

⁵⁵ Término que indica que la matriz de generación eléctrica actual en Chile está compuesta, fundamentalmente, por centrales térmicas e hidráulicas.

destacar que la totalidad de la energía del sistema es generada por una única empresa, EDELAYSEN S.A.

- Sistema Eléctrico de Magallanes (SEM). Supone el 0,6% de la capacidad total instalada. Con una potencia neta total instalada de 101,7 MW, su matriz es 100% fósil. Sus centrales generadoras (gas natural y petróleo diésel) pertenecen a la empresa EDELMAG S.A., abasteciendo a la XII Región de Magallanes a través de cuatro sistemas eléctricos independientes: Punta Arenas, Puerto Natales, Porvenir y Puerto Williams.

Cabe señalar que, adicionales a los sistemas ya comentados, se identifican dos sistemas eléctricos menores, a saber:

- Sistema Eléctrico de Los Lagos. Opera en las comunas de Cuchilteo, Cochamó y Hornopirén. La generación se concentra en centrales a petróleo diésel y de hidráulica de pasada, con una potencia neta instalada de 6,9 MW.
- Sistema Eléctrico Isla de Pascua. La energía se genera exclusivamente a partir de centrales diésel, con una potencia neta total instalada de 4,3 MW.

Desde el punto de vista del uso/consumo de agua para los efectos de la generación de energía, éste depende exclusivamente del tipo de central; ello no solo influirá en el/los uso(s) propiamente tal(es), sino que también en los siguientes aspectos:

- ✓ Fuente del recurso hídrico: cuerpos de agua superficial, subterránea y/o marina, entre otros.
- ✓ Tipo de uso: consuntivo o no consuntivo.
- ✓ Forma de uso del recurso para la generación de la energía: directo (p.ej. centrales hidroeléctricas) o indirecto (p.ej. centrales térmicas).

Todos los aspectos mencionados son objeto de análisis en el presente capítulo, con el objetivo de llevar a cabo la estimación de los caudales de demanda relacionados con la generación de energía. La metodología ha considerado validar tanto los datos utilizados a partir de sus fuentes, como los criterios y supuestos a adoptar para la correcta obtención de resultados.

Dado que cada sistema eléctrico presenta características propias, la metodología de trabajo se ha puesto en práctica al nivel correspondiente; no obstante, los resultados y análisis se han desagregado por unidad territorial (subcuenca, cuenca y región).

11.2 ENFOQUE METODOLÓGICO DE LA ESTIMACIÓN DE LA DEMANDA ACTUAL

En el presente acápite se detalla el enfoque metodológico que se utiliza en la estimación de las demandas actuales de agua, derivadas de la actividad de generación de energía. Los aspectos fundamentales de este enfoque son los siguientes:

- i. Revisión de antecedentes de carácter hídrico respecto la generación eléctrica, incluyendo la identificación de fuentes hídricas (cuerpos de agua superficial, subterránea y/o marina).
- ii. Identificación de los tipos de uso del recurso hídrico (consuntivos y no consuntivos) y la definición de formas de uso (directo e indirecto).
- iii. Alcance del cálculo de la demanda, exponiendo el marco referencial del estudio y el análisis del sistema de generación eléctrica en Chile; éste último, referido a la caracterización general de cada sistema interconectado.
- iv. Identificación de las fuentes de información.
- v. Definición de enfoque metodológico según características del sistema eléctrico, incluyendo la declaración justificada de supuestos y criterios de cálculo.

11.2.1 Generalidades

xli. Antecedentes

En primera instancia, cabe identificar las diferentes fuentes hídricas en la generación eléctrica, además del tipo de uso que hacen del recurso cada central y la forma en que lo utilizan. A continuación, se explican estos aspectos y cómo se abordan en la determinación de la demanda de agua en la producción eléctrica.

Como *fuentes hídricas* se considera, fundamentalmente, a todas aquellas que se encuentran dentro del dominio continental, esto es, aguas subterráneas y aguas superficiales. En este contexto, cabe señalar que, en muchos casos de generación térmica, la principal fuente de agua corresponde a masas de agua marina, cuyos volúmenes -si bien se podrían estimar- estarían fuera del dominio de balance de aguas continentales.

Situación aparte corresponde a las centrales hidroeléctricas de pasada que hacen uso de aguas provenientes de la infraestructura sanitaria (redes en presión de AP; por ejemplo, en centrales Toro 2 y Alto Hospicio de EnerNuevas- Aguas del Altiplano). En tal caso, se considera que los volúmenes correspondientes ya han sido imputados al uso sanitario (demanda de agua potable), por lo que tampoco se agregan a la demanda hídrica para generación.

Respecto a los *tipos de usos*, éste puede ser consuntivo o no consuntivo, según le corresponda al tipo de central. De esta manera, se ha considerado lo siguiente:

- ✓ Para el caso de centrales hidroeléctricas, tanto de embalse como de pasada, el uso del recurso es no-consuntivo.
- ✓ Para el caso de centrales térmicas que hacen uso de aguas continentales para refrigeración, se trata de un uso consuntivo y no consuntivo; hay casos en que parte del agua obtenida de cierta fuente es devuelta, y el resto se consume en forma de vapor.

En cuanto a las formas de uso del recurso hídrico, éste se contempla solo para los efectos de generación, sea de manera directa o indirecta, dejando fuera otros servicios intraplanta que requieran de agua (sanitarios, limpieza, etcétera).

- ✓ Por uso directo del agua para generar, se entenderá como todo aquél en que ella es la materia a partir de cuya energía potencial y cinética se efectúa la conversión de ésta en energía eléctrica. Tal es el caso fundamental de las centrales hidroeléctricas, tanto de embalse como de pasada, donde los volúmenes utilizados de forma no consuntiva son de gran magnitud, en relación con la energía generada. Adicionalmente, dentro del uso directo, pueden contemplarse las centrales térmicas que generan a partir de turbinas a vapor, sistema térmico en que el agua es el fluido de trabajo.
- ✓ Por su parte, el uso indirecto del agua corresponderá a los casos en que ella sea parte del proceso de generación, tal como el caso de la refrigeración. Esto aplica fundamentalmente a las centrales térmicas, sean ellas fósiles, geotérmicas, de biomasa o de concentración solar de potencia (CSP). Los volúmenes de agua requeridos desde las fuentes dependerán de si el sistema es abierto (*once through cooling*) o cerrado (con recirculación).

El caso de uso directo del agua para generación es, tal como se ha comentado anteriormente, el que se presenta en las centrales hidroeléctricas, sean ellas de embalse o de pasada. En ambas la energía potencial del agua se transforma en energía cinética, la que es captada por una turbina que hace girar el rotor del generador.

Por otra parte, por ejemplo, para una central que basa su generación en ciclos térmicos, el principal uso de agua corresponde al proceso de refrigeración; para el caso de centrales con turbinas a vapor, una vez que éste pasa a través de la turbina, el gas debe ser enfriado nuevamente para llevarlo a fase líquida antes de ser nuevamente calentado, de modo que pueda ser reutilizado para volver a generar. Mientras más fría es el agua de refrigeración, el proceso es más rápido y eficaz, traduciéndose en una generación más eficiente. Se trata este de un uso indirecto del agua para generar energía.

Tomando en consideración la conformación actual de la matriz energética chilena, dentro de las centrales térmicas más intensivas en el uso de agua para enfriamiento, se encuentran las carboneras y las de gas natural de ciclo combinado. Si bien las centrales basadas en energías renovables, como las de concentración solar (SCP), las geotérmicas y las de biomasa, también tienen sistemas de enfriamiento que, según su diseño, pueden utilizar agua en mayor o menor medida, estas centrales no se encuentran extendidas dentro del país, por lo que su participación en el uso de recursos hídricos para generación es, a la fecha, muy menor.

No obstante, en términos volumétricos, las centrales hidráulicas de generación son las que más usan el recurso hídrico, aunque este es de carácter no consuntivo.

xlii. Alcance

Conforme lo revisado en los párrafos precedentes, los usos considerados para la estimación de las demandas de agua por generación eléctrica son los que se indican en el Cuadro 11.2-1.

Cuadro 11.2-1 Tipos de consumos de agua para generar energía que se imputarán dentro del análisis de demanda hídrica

Forma de Uso	Aplicación	Tipo de Uso	Centrales a las que aplica
Directa	Generación hidroeléctrica	No Consuntivo	Centrales hidroeléctricas de embalse
			Centrales hidroeléctricas de pasada
Indirecta	Sistema de refrigeración en centrales térmicas ⁽¹⁾	Consuntivo	Centrales a carbón, gas natural o petróleo
			Centrales de biomasa
			Centrales CSP y Geotermia

⁽¹⁾ Aplicable excepto en aquellos casos en que la refrigeración se efectúa con agua de mar desalinizada (centrales costeras).

Fuente: Elaboración propia.

Cabe resaltar que el Cuadro 11.2-1 deriva de los siguientes criterios y supuestos:

- Respecto a centrales hidroeléctricas (de embalse y pasada):
 - Demandas diferentes a las de los caudales de generación, tales como aquellos que sirven a servicios sanitarios intraplanta, aseo y limpieza, mantenciones, etc., son despreciables, y, por ende, no se consideran en el análisis.
 - No se consideran los volúmenes perdidos por evaporación en el espejo de agua formado en los embalses (se trataría de una demanda de tipo consuntivo).

- o Producto de los puntos anteriores, la única demanda considerada para generación hidroeléctrica, corresponde al uso directo de las aguas turbinadas, lo que constituye un uso directo de tipo no consuntivo.
 - o Para el caso de embalses, no se contemplan efectos intermedios de operación como el vertido de aguas (caudales no generados). En términos prácticos, para todo mes en que haya habido generación, el 100% del desnivel informado se considera generado.
- Respecto a centrales térmicas:
 - o Solo se consideran los usos indirectos de agua (refrigeración del ciclo térmico), despreciando otras formas de uso, tales como los volúmenes de agua al interior del circuito Rankine agua/vapor. Este supuesto se basa en que, bajo el contexto del uso de agua para generación térmica de energía, las referencias bibliográficas consultadas hacen principal mención a los sistemas de refrigeración (ver UCS (2011)).
 - o No se agregan los volúmenes de refrigeración cuyas aguas provengan de masas marinas, situación común en centrales térmicas/termoeléctricas ubicadas en la franja costera.
 - o El uso de aguas continentales para la refrigeración de sistemas térmicos, se ha supuesto a través del sistema tipo *“once through cooling”*, lo cual es un supuesto conservador (con respecto a sistemas de enfriamiento con recirculación). Ello implica que los caudales de este tipo que se agreguen en el análisis de demanda, se asumen de tipo consuntivo.

Para los efectos de la estimación de las demandas de agua requeridas por el sector energético de generación, se incluye solo la matriz generadora interconectada y/o coordinada de la cual exista información suficiente y confiable (sobre todo en lo referido a series de tiempo de generación de energía). Este criterio se ha considerado adecuado, ya que la potencia instalada a nivel nacional siempre es referida a los sistemas mencionados, según la institucionalidad competente.

Por otra parte, no se ha discriminado por tamaño de la potencia instalada o energía generada; con esto se establece la inclusión desde los pequeños medios de generación (PMG) hasta las grandes centrales, siempre y cuando ellas se encontraran dentro de un sistema eléctrico y/o se contara con información útil, fidedigna y suficiente.

Sin perjuicio de que los resultados de demanda hídrica se han expresado a nivel de subcuenca, cuenca y región, el enfoque metodológico se basa en las particularidades de la infraestructura generadora perteneciente al sistema interconectado que sirve a la unidad territorial correspondiente. Los sistemas eléctricos a considerar son los siguientes:

- Sistema Interconectado del Norte Grande (SING)
- Sistema Interconectado Central (SIC)
- Sistema Eléctrico de Aysén
- Sistema Eléctrico de Magallanes
- Sistemas menores:
 - Sistema Eléctrico de Los Lagos
 - Sistema Eléctrico de Isla de Pascua

Para el logro de los objetivos del presente estudio, el análisis de cada sistema se ha centrado en los siguientes aspectos:

- ✓ Caracterización general del sistema eléctrico en cuestión.
- ✓ Ubicación georreferenciada de las centrales generadoras.
- ✓ Caracterización de las centrales existentes, en términos de sus parámetros fundamentales (relacionados con el objeto del estudio).
- ✓ Filtro de las centrales cuyo consumo de agua para generación corresponda al dominio del estudio (aguas continentales).

11.2.2 Fuentes documentales utilizadas

Para los efectos de cualquiera de los sistemas interconectados existentes en el país, las principales fuentes de consulta es la documentación y datos aportados por las siguientes entidades:

- Comisión Nacional de Energía (CNE) (<https://www.cne.cl/>). De esta fuente se ha recopilado información como:
 - Sistemas interconectados en operación.
 - Capacidad instalada de generación y centrales existentes en operación.
 - Ubicación georreferenciada de las centrales pertenecientes a los distintos sistemas interconectados.
 - Datos técnicos específicos de cada sistema: tipos de centrales, fuentes primarias de energía, potencia bruta y neta, etcétera.
- Centros de Despacho Económico de Carga (CDEC). Instituciones que, según el sistema eléctrico, coordinan la operación de las centrales pertenecientes a aquél. En Chile, se cuenta con dos CDEC:
 - ✓ CDEC-SIC (<http://www.cdecsic.cl/>)
 - ✓ CDEC-SING (<http://cdec2.cdec-sing.cl/>)

La principal información que se extrae de estas fuentes corresponde a:

- o Centrales generadoras del sistema.
 - o Ubicación georreferenciada de las centrales (archivos *.kmz).
 - o Series de tiempo de generación (p.ej. energía mensual generada).
 - o Datos técnicos de centrales (potencia instalada, tipo de central, fuentes primarias de energía, unidades de generación y componentes, etcétera).
- Geoportal de Chile, del IDE (Infraestructura de Datos Espaciales), plataforma web de visualización georreferenciada (<http://www.geoportal.cl/Visor/>).
 - *Freshwater Use by U.S. Power Plants. Electricity's thirst for a precious resource.* Energy and Water in a Warming World Initiative. Union of Concerned Scientists. Averyt, K., J. Fisher, A. Huber-Lee, A. Lewis, J. Macknick, N. Madden, J. Rogers, and S. Tellinghuisen. 2011.
 - *How it Works: Water for Coal* / Union of Concerned Scientist. [En línea] <http://www.ucsusa.org/clean-energy/energy-and-water-use/water-energy-electricity-coal>
 - Análisis y evaluación de las relaciones entre el agua y la energía en España / Laurent Hardy y Alberto Garrido. Fundación Botín. Papeles de Agua Virtual, Nº 6. 2010.
 - Proyectos Hidroeléctricos / Ingendesa.
 - Turbomáquinas y Máquinas Térmicas. Fundamentos teóricos, ejemplos prácticos / JHG Ingeniería. [En línea] <http://www.jhg.cl/Documentos/Diplomado/Clase%208%20turbomaquinaria.pdf>

11.2.3 Metodología

Con base en los criterios señalados en los numerales precedentes, los caudales de demanda se han estimado de acuerdo a las características fundamentales de cada sistema eléctrico, considerando las centrales en que en él operan. De esta manera:

- i. El año base para el cálculo estimado de la demanda hídrica actual corresponde a 2016.
- ii. Se han listado las centrales que le correspondan al sistema eléctrico en particular, indicando sus principales características.
- iii. Se filtraron aquellas que hacen demanda intensiva de agua para generación, sea en usos directos o indirectos.
- iv. Para el caso de sistemas abundantes en centrales térmicas/termoeléctricas, se procedió de la siguiente manera:

- a. En primera instancia, las centrales costeras se han supuesto intensivas en el uso de agua de mar; para corroborar el supuesto, se revisaron los antecedentes de un subconjunto acotado de ellas.
- b. Para las centrales termoeléctricas ubicadas en los valles, se asumió demanda consuntiva de aguas continentales, de tipo “*once through cooling*” (supuesto conservador).
- v. A partir de las centrales que pasaron el filtro mencionado, se procedió a la estimación de las demandas correspondientes, desagregando por unidad territorial (subcuenca, cuenca y región).

El modo de cálculo depende del tipo de central para la cual se estima la demanda de agua. Tal como se ha mencionado, las centrales consideradas son:

- Central hidroeléctrica de embalse
- Central hidroeléctrica de pasada
- Central térmica/termoeléctrica (no uso de agua de mar)

Cabe destacar que el dato base es la energía generada, por lo que todas las estimaciones están referidas a las Series de Tiempo (SdT) de generación de las cuales se dispuso. En los siguientes numerales se indican los métodos de cálculo correspondientes.

xl.iii. Metodología para centrales hidroeléctricas de embalse

Todos los parámetros mencionados a continuación deben ser valores informados, ya que no se pueden inferir o estimar. Así, los datos base para un mes i son:

E_i	Energía generada (MWh) en el mes i del año base (2016)
Z_{0i}	Elevación (msnm) de agua en embalse al inicio del mes i del año base
Z_{fi}	Elevación (msnm) de agua embalsada al final del mes i del año base
Z_{min_op}	Elevación (msnm) mínima de operación del embalse
P	Potencia instalada de la central (MW); indistintamente, se ha considerado la potencia bruta o la neta, dependiendo de la disponibilidad de la información ⁵⁶ .

Con lo anterior, la estimación de la demanda de agua se efectuó de la siguiente forma:

⁵⁶ Potencia bruta: máxima potencia con que una central es capaz de generar, para un momento dado. Potencia neta: equivale a la potencia bruta descontados los consumos propios del conjunto generador-turbina.

1°) Cálculo de la elevación media mensual de generación (Z_{gi}). Para cualquier mes i , corresponde al promedio entre Z_{0i} y Z_{fi} . En términos algebraicos:

$$Z_{gi} = \frac{Z_{fi} + Z_{0i}}{2}$$

2°) Cálculo de la altura media mensual de generación (H_{gi}). Para el mes i , este valor viene dado por la diferencia entre Z_{gi} y $Z_{\min_op}$, es decir:

$$H_{gi} = Z_{gi} - Z_{\min_op}$$

3°) Estimación del caudal mensual medio generado (Q_{i_mmg}). Para un mes i , se puede estimar a partir de la expresión usual de potencia hidroeléctrica:

$$P_i = \gamma \cdot Q_{mmg_i} \cdot H_{gi} \cdot \eta ; P_i = \frac{E_i}{t_i}$$

$$\therefore Q_{mmg_i} = \frac{E_i}{t_i} \cdot \frac{1}{\gamma \cdot H_{gi} \cdot \eta}$$

donde:

- E_i Energía informada generada en el mes i ; por tanto, se tratará de GWh/mes $_i$, MWh/mes $_i$, etc.
- t_i Tiempo de generación. Corresponde a mes, ya que las SdT de generación se informan y trabajan a esta escala de tiempo.
- γ Peso específico del agua.
- η Eficiencia de la turbina. Suponiendo que los sistemas operan en la máxima de sus eficiencias, dependiendo del tipo de turbina de la central, los valores correspondientes a adoptar son los que se indican en el Cuadro 11.2-2:

Cuadro 11.2-2 Eficiencias de turbinas según tipo

Tipo de turbina	Eficiencia η	
	η_{Tipo}	η_{Adoptado}
Francis	90 - 94%	92%
Kaplan	95%	95%
Pelton	89 - 92%	91%

Fuente: JHG (s/i).

En caso de que no se dispuso de información del tipo de turbina, se utilizó una eficiencia correspondiente al promedio del adoptado, es decir, $\eta = 92,67\%$.

xliv. Metodología para centrales hidroeléctricas de pasada

El proceso de cálculo resulta análogo al caso de las centrales de embalse, con la única diferencia que, en lugar de tener que estimar alturas de generación, el dato directo corresponde a la altura de caída con que fue diseñada la central en análisis. De esta manera, siendo ΔH_g la altura de caída de la central, para el mes i en que ella generó E_i , el caudal turbinado viene dado por la siguiente expresión:

$$Q_{mmg_i} = \frac{E_i}{t_i} \cdot \frac{1}{\gamma \cdot \Delta H_g \cdot \eta}$$

Las consideraciones relativas a los parámetros involucrados son las mismas que las ya referidas en el numeral anterior.

xlv. Metodología para centrales termoeléctricas

Para las centrales termoeléctricas se ha considerado el consumo de agua destinada a los efectos de refrigeración, el cual se ha identificado como el uso hídrico más intensivo en este tipo de generadoras, según lo referido por las fuentes bibliográficas consultadas. En este sentido, destaca el uso de agua por MWh generado para la refrigeración del circuito térmico agua/vapor, en el cual se produce la expansión del gas en la turbina; el vapor de agua saliente a baja presión, es enfriado en el condensador, pasándolo a fase líquida, previo a una etapa de ebullición. Este uso de agua tiene dos componentes a saber:

- i. Volumen de retiro (V_R). En inglés llamado *withdrawal*, corresponde a la cantidad total de agua que una central toma de una fuente, sea ella un río, un lago o un acuífero, parte de la cual puede ser o no retornada a dicha fuente. Se expresa en m^3/MWh .
- ii. Volumen de consumo (V_C). Corresponde a la cantidad de agua que se “pierde” debido a la evaporación durante el proceso de enfriamiento. Se expresa en m^3/MWh .

Es decir, si V_D es el volumen que, luego de ser utilizado, es devuelto a la fuente (a la original o a otra), entonces:

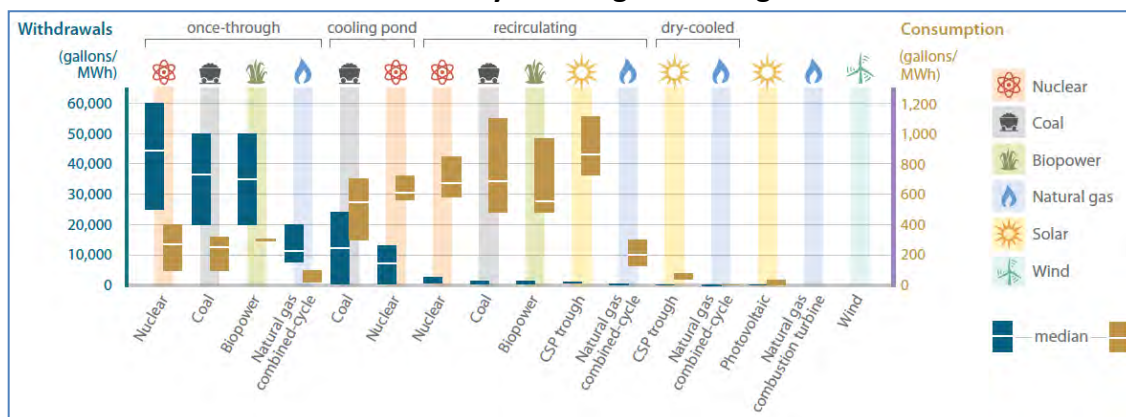
$$V_R = V_C + V_D$$

Cabe convenir que tanto V_R como V_C son valores controversiales, de los cuales las fuentes de consulta⁵⁷ declaran grandes diferencias entre lo informado por las propias centrales y

⁵⁷ Freshwater Use by U.S. Power Plants (Union of Concerned Scientists, 2011)

los cálculos estimados. Esto implica que los parámetros en estudio contienen una amplia varianza y, por ende, una gran incertidumbre respecto de los valores centrales más realistas. Esto puede apreciarse en la Figura 11.2-1, tomada de UCS (2011), en donde se muestra, para los distintos tipos de centrales existentes en EE.UU. a 2008, los volúmenes V_R y V_C .

Figura 11.2-1 Uso del agua en centrales generadoras de EE.UU. a 2008, por tipo de combustible y tecnología de refrigeración



Fuente: UCS (2011).

La misma referencia presenta, en términos numéricos, valores de V_C y V_R tal como se muestra en el Cuadro 11.2-3, tomada y adaptada de dicha fuente de información.

Cuadro 11.2-3 Uso calculado de agua (Mgal/día) en centrales generadoras, según tipo de combustible (EE.UU., 2009)

Combustible	Uso de agua dulce (Mgal ⁵⁸ /día)		Generación eléctrica (MWh/día)
	V_R calculado	V_C calculado	
Carbón	40.000 - 120.000	1.700 - 4.000	5.425.000
Nuclear	17.000 - 46.000	780 - 1.300	2.201.000
Gas Natural	2.200 - 6.700	260 - 530	2.270.000
Petróleo	640 - 3.200	22 - 42	162.000
Biomasa	360 - 920	29 - 54	92.300
Geotermia	31	31	41.400
Solar	0,16 - 0,26	0,16 - 0,26	450
Eólico	0 - 0,15	0 - 0,15	152.000
TOTAL	60.200 - 176.851	2.791 - 5.957	10.344.150

Fuente: Elaboración propia basada en datos de UCS (2011).

Al tomar los valores del Cuadro 11.2-3 y convertir los consumos a m^3/MWh , éste queda expresado de la siguiente forma (Cuadro 11.2-4):

⁵⁸ Mgal: millones de galones.

Cuadro 11.2-4 Uso calculado de agua (m³/MWh) en centrales térmicas, según tipo de combustible (EE.UU., 2009)

Combustible	Uso de agua dulce (m ³ /MWh)		Generación eléctrica (MWh/día)
	V _R calculado	V _C calculado	
Carbón	27,9 - 83,7	1,2 - 2,8	5.425.000
Nuclear	29,2 - 79,1	1,3 - 2,2	2.201.000
Gas Natural	3,7 - 11,2	0,4 - 0,9	2.270.000
Petróleo	15,0 - 74,8	0,5 - 1,0	162.000
Biomasa	14,8 - 37,7	1,2 - 2,2	92.300
Geotermia	2,8	2,8	
Solar	1,3 - 2,2	1,3 - 2,2	450
Eólico	0,0 - 0,0	0,0 - 0,0	152.000
TOTAL	92 - 292	6 - 14	10.344.150

Fuente: Elaboración propia basada en datos de UCS (2011).

Con el fin de poder seleccionar factores de uso apropiados, esto es, que permitan obtener una estimación confiable de la magnitud de la demanda hídrica proveniente de centrales térmicas, el Cuadro 11.2-4 se contrasta con los valores indicados por Hardy-Garrido (2010); en ella se exponen los mismos parámetros, cuyas cantidades se ajustan a la realidad española a 2010. Los valores comentados se muestran en el Cuadro 11.2-5.

Cuadro 11.2-5 Uso calculado de agua (m³/MWh) en centrales térmicas, según tipo de combustible (España, 2010)

Combustible	Uso de agua (m ³ /MWh)	
	V _R	V _C
Carbón	31,0	1,6
Nuclear	75,4	1,6
Gas Natural	13,7	0,7
Petróleo	24,3	1,2
Biomasa	31,0	1,6
Geotermia	7,4	5,2
Solar (CSP)	3,1	3,1
Eólico	0,0	0,0
TOTAL	186	15

Fuente: Elaboración propia basada en datos de Hardy-Garrido (2010).

Al comparar las centrales que son de interés para el presente estudio (es decir, las centrales térmicas a carbón, gas natural, petróleo, CSP, geotermia y de biomasa), se puede apreciar que los valores de V_R provenientes de Hardy-Garrido (2010), se aproximan (son parecidos) a la envolvente inferior del rango estimado por UCS (2011). Visto ello, para los efectos del presente estudio, los volúmenes de retiro V_R considerados son los que se indican en la

publicación española. Respecto de V_C , también se han adoptado los consumos estimados en el estudio de Hardy-Garrido (2010).

En definitiva, los valores a utilizar para las estimaciones de demanda de agua de generación eléctrica en centrales térmicas, se resumen en el Cuadro 11.2-6.

Cuadro 11.2-6 Valores de V_R y V_C adoptados, en m^3/MWh

Combustible	V_R	V_C
Carbón	31,0	1,6
Gas Natural	13,7	0,7
Petróleo	24,3	1,2
Biomasa	31,0	1,6
Geotermia	7,4	5,2
Solar (CSP)	3,1	3,1

Fuente: Elaboración propia basada en datos de Hardy-Garrido (2010).

Por tanto, la demanda consuntiva total de agua para la refrigeración en una central térmica, viene dado por V_R y E_i , donde éste último corresponde a para la generación E_i en el mes i de una determinada central térmica. En suma, el caudal asociado a dicha demanda viene dado por:

$$Q_{Ci} = V_R \cdot E_i$$

Por otra parte, la demanda de agua que se elimina en estado gaseoso (Q_{Evi}), viene dada por la expresión:

$$Q_{Evi} = V_C \cdot E_i$$

La fracción de la demanda se retorna al medio luego de su utilización (Q_{Ri}) viene dada por:

$$Q_{Ri} = V_R \cdot E_i - V_C \cdot E_i$$

$$\therefore Q_{Ri} = V_R \cdot E_i - Q_{Evi}$$

11.3 ENFOQUE METODOLÓGICO DE LA PROYECCIÓN DE LA DEMANDA FUTURA

En el presente capítulo se sienta la base metodológica y su aplicación para la proyección de la demanda hídrica ejercida por la industria de la generación eléctrica sobre las fuentes continentales de agua.

De forma similar a lo establecido para la proyección de la demanda hídrica realizada para otros sectores productivos –como la minería–, la inferencia de los caudales futuros requeridos por las

centrales generadoras de energía se ha abordado a través del tratamiento de Series de Tiempo (SdT) consistentes en datos históricos de generación.

11.3.1 Generalidades

La generación de energía obedece a una serie de criterios técnico-económicos que coordinan el despacho de las distintas centrales, los que a su vez son función de una serie de parámetros de diversa naturaleza, cuyo comportamiento es difícil de proyectar.

Siendo la demanda hídrica una función de la generación, cabe establecer una metodología que permita inferir los caudales demandados a partir de la información disponible, que justamente corresponde a series históricas de generación mensual, aportada por las entidades coordinadoras respectivas (hoy agrupadas en el Coordinador Eléctrico Nacional) y la Comisión Nacional de Energía (CNE). El comportamiento aleatorio de la generación se observa en las distintas series SdT provenientes de las centrales generadoras que registran el respectivo historial de energía despachada a nivel mensual. Siendo la matriz chilena de energía de tipo termohidráulico, el ingreso de las distintas unidades de generación que participan en el mercado spot depende no solo de la demanda del sistema, sino que también de la disponibilidad hídrica de las centrales de embalse, del precio de los combustibles, los mínimos técnicos de generación, los costos operacionales de cada generador y las proyecciones hidrológicas, entre otros. La aleatoriedad comentada se ilustra en las SdT de generación de las centrales Chapiquiña y Cavanha, centrales ambas hidráulicas de pasada (XV y I Región, respectivamente), presentadas en la Figura 11.3-1 y Figura 11.3-2.

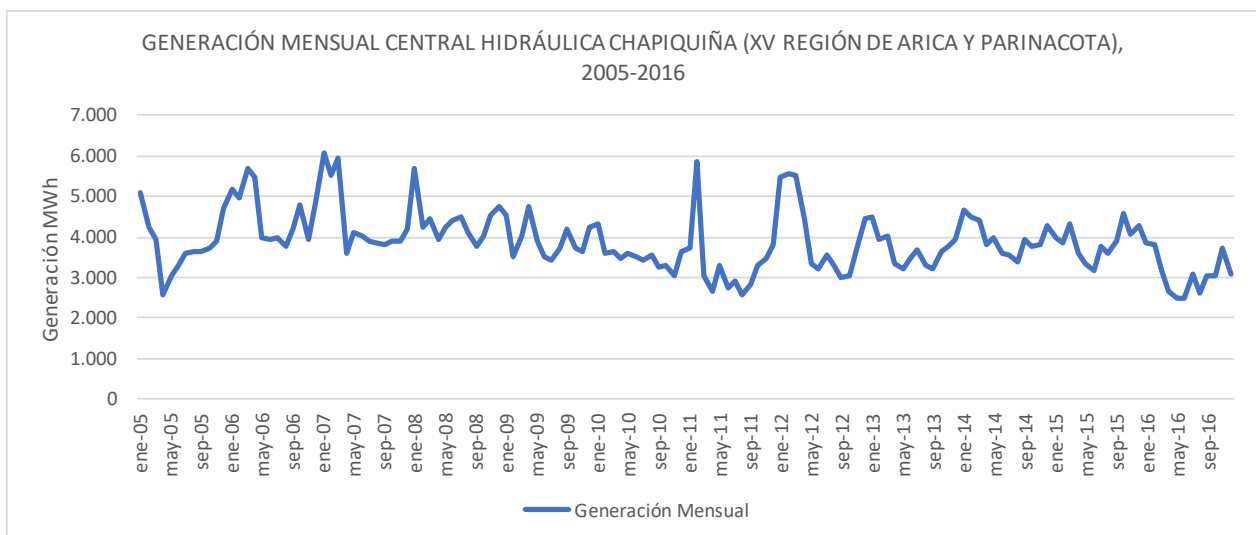


Figura 11.3-1 Serie de Tiempo generación histórica central Chapiquiña, XV Región

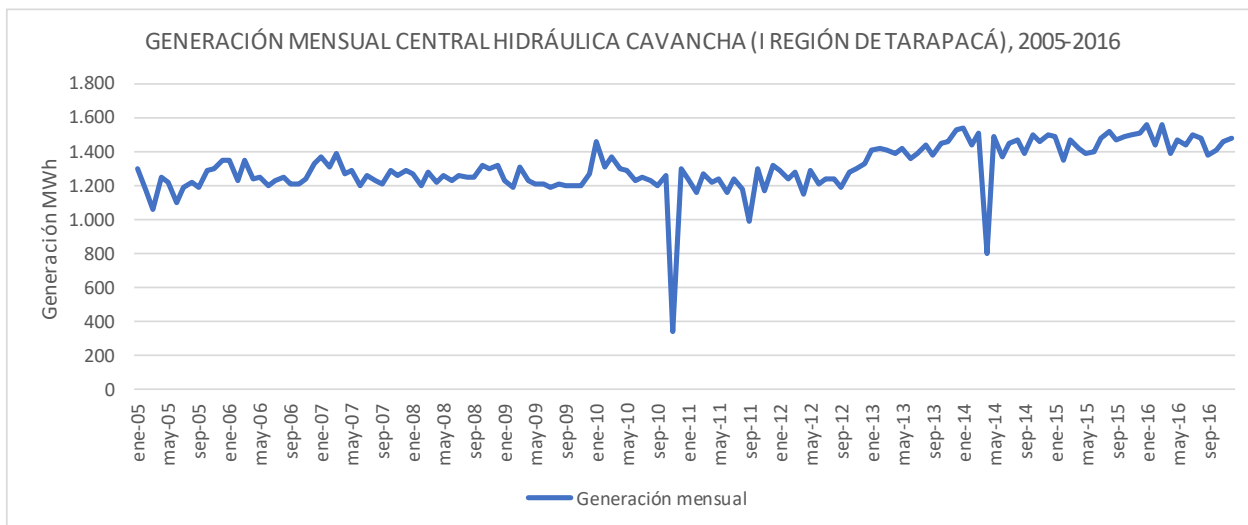


Figura 11.3-2 Serie de Tiempo generación histórica central Cavanha, I Región

Es decir, en términos resumidos, se puede plantear que la demanda hídrica por concepto de generación eléctrica, es una función compuesta de alta componente estocástica, tal como se observa en la siguiente expresión:

$$DDA_{Hídrica}^{Energía} = f(E(Hidrología, CMg, Z_{Embalses}, \$_{Comb}, DDA_{Eléctrica}, etc.))$$

En consecuencia, para efectuar las proyecciones, se ha considerado que:

- La demanda energética no es un indicador del modo en que se despachan las diversas centrales generadoras; por lo tanto, para los efectos del presente estudio, no se considera como una variable de interés.
- En consecuencia, se debe considerar la serie histórica de generación como dato base para inferir las demandas de agua futuras.
- Lo anterior exige utilizar el concepto de SdT y, a partir de cada serie, proyectar la generación futura, con base en el comportamiento histórico (ciclos y tendencias) de centrales hidráulicas y termoeléctricas.
- Dado el comportamiento aleatorio de las series de generación, se requiere cuantificar la incertidumbre de los resultados. Ello conlleva generar resultados de la forma:

$$\langle DDA_{Hídrica}^i[x\% N.C.] \rangle =]Q_{inf}^i ; Q_{cent}^i ; Q_{sup}^i[$$

donde “x” es el Nivel de Confianza (N.C.) de la proyección expresado en porcentaje, “Q” el caudal proyectado mediante un rango que entrega el límite inferior (“inf”), el valor central (“cent”) y el límite superior (“sup”), e “i” representa el i-ésimo año del horizonte previsional de la proyección.

En referencia al método de proyección propiamente tal, ella se efectuó a partir de las SdT mencionadas mediante el uso de la herramienta “Previsión, proporcionada por MS Excel 2016. A través de su uso se puede fijar el horizonte de la proyección, el nivel de confianza y la estacionalidad de la SdT, entre otros parámetros. Esta herramienta, la cual usa el algoritmo de Suavización Exponencial, se ha considerado apropiada, dado que ella se recomienda para patrones de comportamiento aleatorio en que resulta razonable atenuar el impacto de puntos irregulares (tal como sucede en las SdT analizadas). Este método tiene como ventaja que no requiere de una gran cantidad de períodos ni de ponderaciones para lograr buenos resultados.

11.3.1.1 Antecedentes

En el proceso de recuperación de referencias bibliográficas que contuvieran aplicaciones asociadas a la proyección de la demanda hídrica por generación eléctrica, no se encontraron fuentes documentales cuyos resultados sean compatibles en naturaleza y estructura respecto de los que aquí se obtuvieron. Por ello, los presentes resultados solo se analizan en su mérito, sin mediar validaciones de tipo comparativo con otros trabajos.

11.3.1.2 Alcance

El análisis proyectivo y sus resultados es función de los criterios adoptados en el capítulo de estimación actual de la demanda, sobre los que se aplica la estimación de los caudales futuros a partir de SdT.

En su particular, las demandas obtenidas deben tomarse como indicadores que reflejan el comportamiento histórico de los datos y su tendencia, sin incorporar la influencia de elementos exógenos como cambios regulatorios, reglamentarios o legales que puedan implementarse en el futuro.

Asimismo, cabe señalar que el procedimiento de proyección no contempla el ingreso eventual de proyectos en cartera, pues pese a conocerse su capacidad nominal de generación, su despacho y modo de generar depende de los factores aleatorios ya comentados. Sin perjuicio de ello, se considera que, en teoría, el hecho de presentar rangos de demanda futura con nivel de confianza asociado, da la suficiente flexibilidad como para aventurar la probable inclusión de las demandas provenientes de dichos proyectos.

11.3.2 Fuentes documentales utilizadas

En términos generales, el marco de referencia que proporciona la información requerida para efectuar las proyecciones se mantiene respecto de las señaladas en el capítulo de estimación de la demanda hídrica actual, cobrando especial relevancia las SdT de generación que a disponen los entes coordinadores.

11.3.3 Metodología

Según ya se ha precisado, el análisis proyectivo se funda en el uso de SdT, cuyo parámetro base corresponde a la generación eléctrica mensual. Dado que es posible relacionar la generación eléctrica con el uso de agua, tal como se señalará en el capítulo de estimación de demanda actual, entonces la inferencia de los caudales asociados es cuasi directa.

En referencia a las series de datos de generación, sus características generales son las siguientes:

- Series históricas de generación actualizada a diciembre de 2016, individualizadas a nivel de central.
- Longitud variable de series históricas de generación, dependiendo de la fecha de ingreso de cada central estudiada.
- Series no estacionarias → difícil identificación de ciclos de generación.
- Series de alta variabilidad (aleatoriedad), con presencia de puntos irregulares de generación (máximos y mínimos que se escapan respecto a la “amplitud media observable” de la serie).
- En algunos casos, series de tendencia difusa.

Desde la perspectiva de la puntualización de cada demanda proyectada, ello es posible puesto que se conoce la ubicación exacta de cada central; ello permite, en suma, conocer los caudales de generación a nivel de subcuenca, para luego agregar a escala mayor (cuenca y región).

En cuanto al procedimiento estándar de proyección, los pasos son los siguientes:

- i. Se toma como base catastral de centrales a todas aquellas que se encuentran coordinadas y para las cuales se cuenta con SdT de generación eléctrica. A partir de dicho catastro, se efectúa el tamizado que identifica y selecciona a las centrales que hacen uso intensivo de recursos hídricos continentales, según los criterios señalados en el capítulo de demanda hídrica actual. Estas centrales son objeto de análisis y proyección de sus SdT de generación, quedando fuera las demás.
- ii. Proyección de la Sdt de generación: para cada central identificada y seleccionada, se proyecta la serie histórica de generación eléctrica correspondiente para el horizonte

2017 – 2040, a nivel mensual. De esta manera, se obtiene la serie proyectada en términos de energía generada (MWh o GWh).

Cada proyección se realiza mediante la herramienta “Previsión” de MS Excel 2016, en la cual se ajustan los siguientes parámetros:

- Horizonte máximo de la predicción (año 2040).
- Nivel de Confianza (N.C.) de la proyección → se ha fijado en 70%, en atención en que este valor permite obtener resultados con una amplitud de banda acotada y con un nivel de confiabilidad suficiente.
- Estacionalidad de la serie: como en general se ha visto, las SdT proyectadas no son estacionarias, por lo que no es posible definir a priori duración de estacionalidad. Por tanto, este parámetro se ha fijado caso a caso, de acuerdo a las características propias de cada proyección.

- iii. La forma genérica de la proyección para el mes “m” del año “i” del período de previsión, referida a la central “k” ubicada en la subcuenca “sc” perteneciente a la cuenca “c” ubicada en la región “r”, es la siguiente:

$$\langle E_{k,sc,c,r}^{m,i}[70\% N.C.] \rangle =]E_{k,sc,c,r}^{m,i,inf} ; E_{k,sc,c,r}^{m,i,cent} ; E_{k,sc,c,r}^{m,i,sup}[$$

donde los superíndices “inf”, “cent” y “sup”, hacen referencia a la posición de los valores estimados dentro de la banda proyectada (valor inferior, central y superior, respectivamente).

- iv. Dependiendo del tipo de central (hidroeléctrica o térmica), cada valor proyectado de generación es relacionado con la demanda hídrica correspondiente, a través de las ecuaciones y parámetros que se definieron en el capítulo de estimación de demanda hídrica actual.

11.3.3.1 Cálculo de la demanda futura para centrales hidroeléctricas

- a) Centrales hidroeléctricas de pasada: Supóngase que para una central generadora k determinada (del tipo señalado) ya se dispone de los valores $E_{k,sc,c,r}^{m,i,inf}$, $E_{k,sc,c,r}^{m,i,cent}$ y $E_{k,sc,c,r}^{m,i,sup}$. El caudal requerido para generar las energías correspondientes (de carácter no consuntivo), viene dado por la expresión (en m³/s):

$$\langle Q_{k,sc,c,r}^{m,i}[70\% N.C.] \rangle = \frac{1}{t_m \cdot \gamma \cdot \Delta H_g \cdot \eta_{k,sc,c,r}} \cdot]E_{k,sc,c,r}^{m,i,inf} ; E_{k,sc,c,r}^{m,i,cent} ; E_{k,sc,c,r}^{m,i,sup}[$$

donde:

m	: mes de la proyección dentro del año i
t _m	: duración del mes “m”
γ	: peso específico del agua
ΔH _g	: altura de caída de la central
η _{k,sc,c,r}	: eficiencia de la turbina de la central k

La agregación correspondiente a la central k para el año, de modo de obtener el caudal anual proyectado (en m³/año) se obtiene aplicando la expresión:

$$\langle Q_{k,sc,c,r}^i [70\% N.C.] \rangle = 86400 \cdot \left[\sum_{m=1}^{12} Q_{k,sc,c,r}^{m,i,inf} \cdot d_m ; \sum_{m=1}^{12} Q_{k,sc,c,r}^{m,i,cent} \cdot d_m ; \sum_{m=1}^{12} Q_{k,sc,c,r}^{m,i,sup} \cdot d_m \right]$$

en que d_m es la cantidad de días que contiene el m-ésimo mes del año i.

La agregación territorial de la demanda hídrica, sean ella a nivel de subcuenca, cuenca o región, se efectúa de manera directa, identificando la pertenencia de cada territorio a la unidad inmediatamente superior.

- b) Centrales hidroeléctricas de embalse: la lógica de cálculo se mantiene respecto a las centrales de pasada, diferenciándose solo por el hecho de que la altura de caída, en lugar de ser constante, ella es variable (depende del nivel embalsado con que se genera). Con el propósito de salvar la dificultad que significa proyectar el comportamiento aleatorio de los niveles de un embalse en particular, se optó por tomar el nivel medio histórico, a partir de los datos proporcionados por la CNE.

11.3.3.2 Cálculo de la demanda futura para centrales termoeléctricas

Para la proyección de la demanda hídrica de este tipo de centrales, se mantiene la lógica conceptual de cálculo presentada en el capítulo de estimación de demanda actual.

Por tanto, supóngase que se ha efectuado la proyección para la generación futura de la central térmica “k”, en el m-ésimo mes del año “i” del período de previsión comprendido entre los años 2017 y 2040, donde dicha central se encuentra en la subcuenca “sc” de la cuenca “c” perteneciente a la región “r”. De este modo, se cuenta con los valores E^{m,i,inf}_{k,sc,c,r}, E^{m,i,cent}_{k,sc,c,r} y E^{m,i,sup}_{k,sc,c,r}.

Sea ahora $V_{R,k}$ el volumen de retiro específico⁵⁹ de agua que la misma central k efectúa para llevar a cabo el ciclo de refrigeración. Luego, el caudal total (demanda consuntiva) que requiere la central k referida viene dado por:

$$\langle Q_{k,SC,C,r}^{R,m,i} [70\% N.C.] \rangle = V_{R,k} \cdot [E_{k,SC,C,r}^{m,i,inf} ; E_{k,SC,C,r}^{m,i,cent} ; E_{k,SC,C,r}^{m,i,sup}]$$

Por otro lado, sea $V_{c,k}$ el volumen de consumo hídrico específico⁶⁰ que ostenta la central k. Siendo este un valor adoptado como constante en el tiempo, la fracción del caudal consuntivo que la central k no retorna (NR) al sistema en estado líquido, viene dado por:

$$\langle Q_{k,SC,C,r}^{NR,m,i} [70\% N.C.] \rangle = V_{c,k} \cdot [E_{k,SC,C,r}^{m,i,inf} ; E_{k,SC,C,r}^{m,i,cent} ; E_{k,SC,C,r}^{m,i,sup}]$$

Dado que el volumen que retorna al ambiente en estado líquido corresponde a la diferencia entre el volumen de retiro y el evaporado (no retornado, NR), entonces el caudal asociado ($Q_{k,SC,C,r}^{Ret,m,i}$) a la descarga equivalentes a:

$$\langle Q_{k,SC,C,r}^{Ret,m,i} [70\% N.C.] \rangle = \langle Q_{k,SC,C,r}^{R,m,i} [70\% N.C.] \rangle - \langle Q_{k,SC,C,r}^{NR,m,i} [70\% N.C.] \rangle$$

En lo referido a la obtención de caudales anuales y agregación territorial de la demanda, el procedimiento de cálculo es análogo a lo señalado en el numeral precedente.

⁵⁹ Siendo V_R un parámetro que se ha supuesto constante en el tiempo, éste asocia con el volumen total requerido por la central térmica para su circuito de refrigeración. Parte del volumen total es devuelto al sistema como RIL, mientras que el resto es retornado a la atmósfera como vapor de agua, previo paso por las torres de enfriamiento.

⁶⁰ Cabe recordar que V_c se relaciona con la fracción del volumen total que retira la central térmica de la fuente y que por evaporación, dentro del circuito de refrigeración, no es descargada como RIL al entorno.

CAPÍTULO 12 METODOLOGÍA PARA EL ESTUDIO DEL CAUDAL PARA USOS TURÍSTICO Y DE PROTECCIÓN AMBIENTAL

12.1 CAUDAL PARA USO TURÍSTICO

12.1.1 Introducción

El establecimiento de caudales turísticos está asociado a asegurar el normal desarrollo de las variadas actividades recreativas que pueden ser realizadas en un río, así como mantener valores paisajísticos notables que constituyen el atractivo del lugar. Este amplio objetivo contempla una compleja relación del caudal del río con su entorno, el que incluye relaciones con aspectos escénicos, geológicos, de fauna y flora silvestre, recreativos, históricos, culturales, económicos, entre otros elementos.

La determinación de caudales de interés turístico se realiza a través de variados métodos científicos y técnicas aplicadas, siendo apropiado realizarlo, cuando es posible, utilizando enfoques interdisciplinarios y métodos evaluativos experienciales, directamente con los usuarios del espacio a estudiar. La metodología propone que la aproximación al tema no sea parcial, sino que logre integrar resultados matemáticos con los niveles de percepción de los usuarios, debiendo adaptarse a cada caso los métodos propuestos, según la información existente o generada.

Resulta interesante mencionar la apreciación general de un destacado autor de estas materias que indica lo siguiente: “En relación a los enfoques analíticos, creo que el *juicio experto* provee un enfoque muy útil y pienso que se debe considerar alguna forma de evaluación subjetiva, empleada junto con uno o más enfoques que incluyan evaluaciones hidrológicas. Recomendando una mezcla de análisis hidrológicos y físicos con alguna forma de evaluaciones o encuestas de los usuarios” (Rood, 2001).

Los caudales en los ríos son determinantes para el desarrollo de un sinnúmero de actividades recreativas, culturales, deportivas y económicas. La cantidad de agua en un río o estero tiene una profunda influencia en el tipo y calidad de la recreación en el curso de agua, e incluso

puede inhibirla. Los flujos determinan si un río es apto para navegar, pescar, nadar, etc. y afectan sus atributos, tales como descensos en aguas blancas y la estética del paisaje que proporciona el río. Por esta razón, la sociedad valora en forma creciente la preservación de los espacios con bajos niveles de intervención antrópica.

Así, se define “*caudal turístico*” como el caudal de agua en un río necesario para satisfacer los usos recreacionales predominantes en el río y mantener las condiciones paisajísticas que caracterizan un determinado territorio.

12.1.2 Enfoque Metodológico de la estimación de la Demanda Actual

12.1.2.1 Generalidades

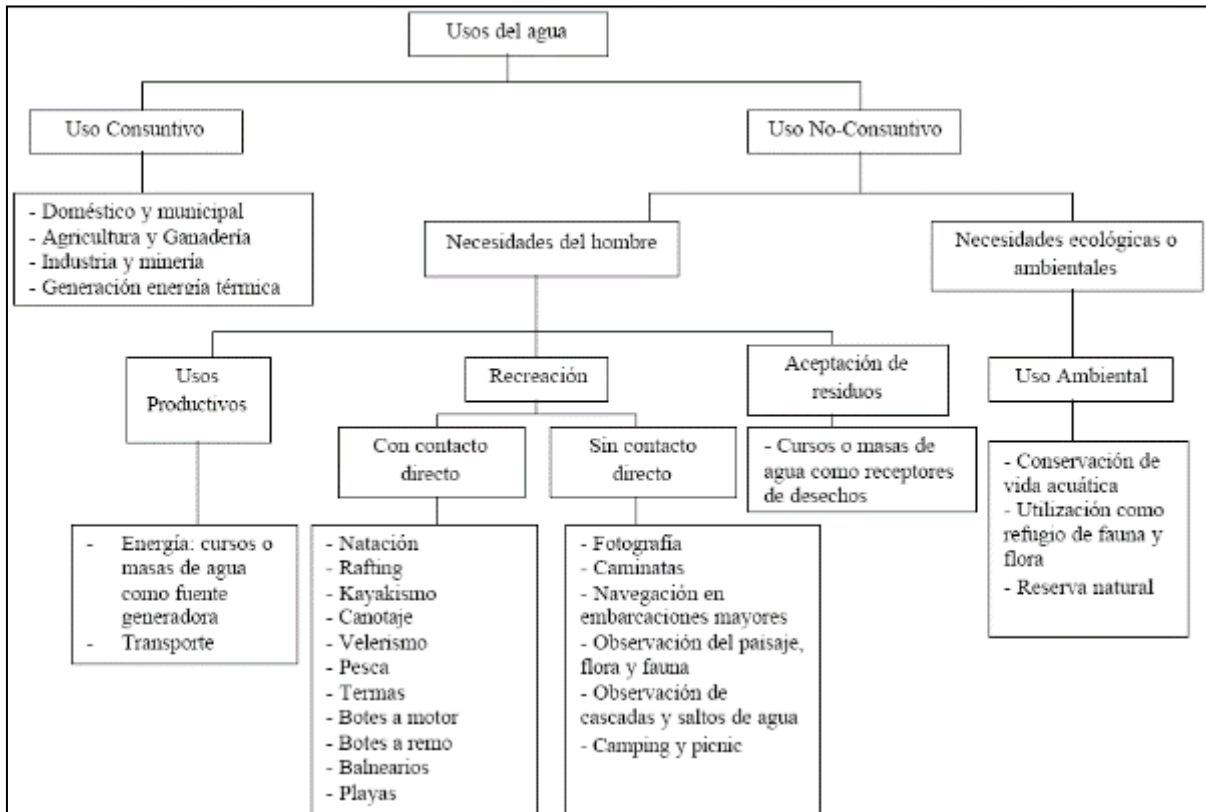
i. Antecedentes

El tema relacionado con las demandas de agua de uso turístico, en Chile, sólo se ha estudiado a través del trabajo “Análisis de Metodología y Determinación de Caudales de Reserva Turísticos” (DGA-AQT, 2010). El objetivo de dicho estudio fue formular una metodología que lograra determinar (cuantificar) los caudales asociados al uso turístico, a fin de reservar caudales de interés nacional relacionado con dicho uso.

Así, en el estudio anterior, se definió una metodología para determinar los caudales asociados al uso turístico, en base a ciencias académicas como la hidrología, biología, medioambiente y economía entre otras, y en base a información recopilada, entrevistas y talleres, aplicando una técnica de “planificación participativa”.

En la Figura 12.2-1 se presenta la clasificación general de los usos de agua:

Figura 12.1-1 Clasificación de Tipos de Usos de Agua



Fuente: DGA-UACH (2004).

En base a la figura anterior, los usos del agua para fines recreativos pueden ser agrupados en actividades con y sin contacto directo con el agua, usos que incluyen al menos las siguientes actividades:

■ Actividades con contacto directo:

- Natación
- Rafting
- Kayakismo
- Canotaje
- Velerismo
- Pesca
- Termas
- Botes a Motor
- Botes a remo
- Balnearios
- Playas

- Actividades sin contacto directo:
 - Fotografías
 - Caminatas
 - Navegación en embarcaciones mayores
 - Observación del Paisaje, Flora y Fauna
 - Observación de cascadas y saltos de agua
 - Camping y Picnic

Uno de los aspectos que se torna complejo para proponer caudales turísticos es la determinación de los requerimientos críticos para el normal desarrollo de las actividades turísticas descritas, y ubicadas espacialmente en la sectorización de los usos turísticos. Los requerimientos críticos son aquellas condiciones externas a las actividades turísticas necesarias para el buen desarrollo de éstas:

- En las actividades *con contacto directo* (CCD), la velocidad, altura de agua, presencia de obstáculos, altura de olas y transparencia son algunos elementos críticos para la calidad de la experiencia.
- En el caso de las actividades *sin contacto directo* (SCD), la relación río/paisaje, memoria histórica del lugar, presencia de flora y fauna, senderos, miradores, intervención del espacio, hitos culturales, entre otros, son algunos elementos que contribuyen a la calidad de la actividad turística.

En términos generales, los métodos de estimación se pueden agrupar en tres grandes categorías:

- ✓ Modelos Numéricos y Científicos
- ✓ Encuestas a los Usuarios
- ✓ Juicios de Expertos

La elección de uno u otro método dependerá de varios factores, tales como: el tipo de río, los componentes del medio humano considerados, los tipos de usuarios y su disponibilidad, así como los recursos y el tiempo disponible para aplicarlo. Según Whittaker *et al.* (1993) no existe un método suficientemente completo que considere todos los componentes del medio humano en la determinación de caudales turísticos; por tal motivo, se recomienda una integración de los resultados de ellos.

En DGA-AQT (2010) se aplicó una metodología a través del desarrollo del eje hidráulico en el tramo de río donde se desarrollan la mayor cantidad de actividades turísticas con y sin contacto directo. Ésta fue desarrollada en unas cuencas seleccionadas, a saber:

- 1 cuenca en la IV Región de Coquimbo: Cochiguaz,
- 2 cuencas en la X Región de Los Lagos: Puelo y Futaleufú,
- 2 cuencas en la XI Región de Aysén: Baker y Simpson, y
- 1 cuenca en la XII Región de Magallanes: Serrano.

Para ello, se realizaron una serie de actividades, las cuales se detallan brevemente a continuación:

- ✓ Información topográfica.
- ✓ Confección del modelo hidráulico.
- ✓ Calibración del modelo hidráulico.
- ✓ Caudales modelados y resultados.

Realizado los ejes hidráulicos en cada río seleccionado, para diferentes caudales, y hecho el análisis aplicando los distintos criterios que señala la literatura respecto a las condiciones mínimas en el río para realizar actividades con y sin contacto directo, los resultados fueron los siguientes:

- Río Cochiguaz (IV Región). Caudales medios mensuales satisfacen aproximadamente los requerimientos de las actividades con y sin contacto directo. Por otro lado, la serie de caudales medios diarios que más se repiten en cada mes, corresponde al criterio de que con esos caudales las condiciones de agua en el río permiten llevar a cabo las actividades CCD y SCD. En el caso del río Cochiguaz (caudales medidos en Cochiguaz en El Peñón), esos caudales corresponden, aproximadamente, a los caudales mensuales con probabilidad de excedencia de un 20%.
- Río Puelo (X Región). En este caso, para las actividades CCD, los caudales propuestos a reservar fluctúan entre los caudales mensuales con probabilidad de excedencia de 50%, mientras que para las actividades SCD, los caudales con probabilidad de excedencia que mejor se ajustan son los con probabilidad de excedencia de un 20 % (obtenido luego del análisis de repetición de caudales medios diarios).
- Río Futaleufú (X Región). Para las actividades con contacto directo (rafting, canotaje, pesca) y sin contacto directo, caudales algo menores a los de probabilidad de excedencia 50% permiten realizar dichas actividades sin problema.

- Río Baker (XI Región). En este caso, caudales medios mensuales con probabilidad de excedencia entre 20% y 50% satisfacen las actividades SCD y CCD.
- Río Simpson (XI Región). Al igual que en los casos anteriores, luego de hacer las simulaciones del eje hidráulico para diferentes caudales, caudales medios mensuales con probabilidad de excedencia entre 20% y 50% satisfacen las actividades SCD y CCD.
- Río Serrano (XII Región). Al igual que en los casos anteriores, luego de hacer las simulaciones del eje hidráulico para diferentes caudales, caudales medios mensuales con probabilidad de excedencia entre 20% y 50% satisfacen las actividades SCD y CCD.

La principal conclusión fue que, en general, caudales mensuales con probabilidad de excedencia entre un 20% y un 50% son los adecuados para mantener el río en condiciones de poder efectuar actividades con y sin contacto directo. Por debajo de esos valores, comienza a desdibujarse el patrón de comportamiento natural del río y por tanto la lectura de los usuarios del paisaje natural.

ii. Alcance

Las principales figuras de representación de la actividad turística en Chile son:

- Zonas de Interés Turístico (ZOIT). De acuerdo a la nueva Ley del Turismo (Ley Nº 20.423, del 04/02/2010, del Sistema Institucional para el Desarrollo del Turismo), corresponden a “los territorios comunales, intercomunales o determinadas áreas dentro de éstos, que tengan condiciones especiales para la atracción turística y que requieran medidas de conservación y una planificación integrada para promover las inversiones del sector privado” (Art. 13). Adicionalmente, la Ley señala que “tendrán carácter prioritario para la ejecución de programas y proyectos públicos de fomento al desarrollo de esta actividad, como asimismo para la asignación de recursos destinados a obras de infraestructura y equipamiento necesarios” (Art. 17). Los objetivos de crear una ZOIT son:
 - a. Posicionar y destacar al territorio como uno de los destinos prioritarios para la actividad turística a nivel nacional.
 - b. Coordinar a todos los actores públicos y privados con el fin de realizar acciones conjuntas y acordadas en pro del fomento sustentable de la actividad turística en un territorio acotado.
 - c. Priorizar la ejecución de programas y proyectos públicos de fomento al desarrollo de la actividad turística, como la asignación de recursos destinados a obras de infraestructura y equipamiento necesarios.

- Áreas de Protección Turística. Figura recogida en el Decreto N° 50/2011. El establecimiento de estas áreas tiene por objetivo prohibir la corta de árboles situados hasta cien metros de las carreteras públicas y de las orillas de los ríos y lagos que sean bienes nacionales de uso público, como también en quebradas u otras áreas no susceptibles de aprovechamiento agrícola o ganadero, cuando así lo requiera la conservación de la riqueza turística. Por la naturaleza propia de estas áreas, no existe una entidad administradora de las mismas. Su administración corresponde al titular de ellas. La afectación y desafectación de estas áreas debe hacerse por decreto supremo, expedido a través del Ministerio de Agricultura, previo informe favorable del Servicio Nacional de Turismo.
- Zonas de Destino Turístico. Estas zonas, si bien no cuentan con una declaratoria o respaldo jurídico para ello, sí constituyen espacios reconocidos a nivel regional y nacional para efectos de la gestión en turismo.

Para efectos de la determinación de caudales de uso turístico (caudales turísticos), se trabajará con las ZOIT que involucren ríos dentro de sus dominios territoriales, ya que son las únicas que cuentan con respaldo jurídico y, además, en la mayoría de ellas, se llevan a cabo actividades turísticas en o en el entorno de un curso de agua.

12.1.2.2 Fuentes documentales utilizadas

Se han recopilado los antecedentes siguientes para la estimación de la demanda turística:

- La base de información utilizada para identificar las áreas catalogadas como ZOIT, en todas las regiones del país, fue facilitada por SERNATUR.
- Las estadísticas de caudales medios mensuales fueron obtenidas de las estaciones fluviométricas de la web de la DGA (<http://snia.dga.cl/BNAConsultas/reportes>).

12.1.2.3 Metodología

En el estudio “Análisis de Metodología y Determinación de Caudales de Reserva Turísticos”, (DGA-AQT, 2010), se señala textualmente:

“Lo que se propone es encontrar valores de caudal -que, existiendo en el río en un intervalo de tiempo, a determinar por la factibilidad de contar con datos históricos, o el rango que parezca como posible de estudiar- sean los de mayor ocurrencia (moda estadística, o un valor similar). Lo anterior para cada mes del año, debido a que esos datos servirán para poder replicar, en un modelo teórico, el ciclo anual natural del río, que es lo que le otorga su valor turístico, es decir, preservar no un

caudal fijo, sino un caudal que replique el ciclo anual del río, para evitar el riesgo de artificializar el río en tal magnitud, que este pierda los valores turísticos previamente detectados como relevantes de ser conservados”.

En dicho estudio se calcularon los siguientes caudales:

- ✓ Número de veces que un determinado rango o rangos de caudales medios diarios que más se repite, para cada mes.
- ✓ Número de veces que un determinado rango o rangos de caudales medios mensuales que más se repite, para cada mes.

Los resultados a través de caudales medios diarios y medios mensuales son similares, y además se ubican entre los caudales 20% y 50% probabilidad de excedencia. Lo anterior se refiere a las actividades turísticas SCD (Sin Contacto Directo). Respecto a las actividades CCD (Con Contacto Directo), analizadas con varios métodos indirectos, se llegó a la conclusión de que el criterio de repetición de caudales medios mensuales corresponde al criterio de que con esos caudales las condiciones de agua en el río permiten llevar a cabo las actividades con y sin contacto directo. Los caudales así calculados en dicho estudio, también fueron coherentes con otros cálculos efectuados para diferentes actividades sin y con contacto directo.

En definitiva, se determinarán caudales medios mensuales para probabilidades de excedencia de un 20% y 50%, además el caudal medio mensual que cumpla con la premisa de repeticiones de cierto rango de caudales. Lo anterior se aplicará sobre las estaciones fluviométricas vigentes de la red de la DGA ubicadas dentro de ZOITs.

12.1.3 Enfoque Metodológico de la proyección de la Demanda Futura

12.1.3.1 Generalidades

La demanda turística futura tiene que ver directamente con posibles declaraciones de Zonas de Interés Turística por parte de Sernatur.

De acuerdo con lo anterior, para efectos de determinar proyecciones de demandas futuras turísticas, fue necesario consultar directa y formalmente a Sernatur si es que a futuro se ha planificado la declaración de nuevas ZOIT en el territorio nacional, consulta que fue respondida a través del envío de áreas ZOIT con admisibilidad. Así, en aquellas ZOIT con admisibilidad y que tuviesen asociado un curso de agua, se realizó el cálculo del caudal de reserva respectivo, de la misma forma que el caudal para uso turístico actual.

12.2 CAUDAL PARA PROTECCIÓN AMBIENTAL

12.2.1 Introducción

El concepto de protección ambiental está referido a todas aquellas acciones personales o comunitarias que tiendan a defender, mejorar o potenciar la calidad de los recursos naturales de determinado ecosistema. Esto se relaciona con las acciones modificadoras causadas por las actividades humanas, las cuales se ven reflejadas en el deterioro significativo que presentan una gran cantidad de ecosistemas a nivel nacional.

En este aspecto, en Chile, se definen tres medios de protección ambiental:

- Sistema Nacional de Áreas Silvestres Protegidas del Estado (SNASPE). Conformado por Parques Nacionales, Reservas Nacionales y Monumentos Naturales. Se encuentran administradas por la Corporación Nacional Forestal (CONAF).
- Sitios Prioritarios para la Conservación de la Diversidad Biológica. Corresponden a zonas o áreas en las cuales se ha detectado la presencia de especies de flora y/o fauna con problemas de conservación o bien con características particulares que los convierten en susceptibles de proteger. Dada su enorme fragilidad ecológica, estas áreas presentan urgencia en cuanto a su protección. Estos sitios son definidos a escala regional, de acuerdo con las Estrategias Regionales de Conservación de la Diversidad Biológica; en éstas se entregan los lineamientos para hacer factible la conservación y el uso sustentable de la biodiversidad.
- Sitios Ramsar. Corresponden a aquellos humedales que han sido declarados de importancia a través de un tratado intergubernamental denominado Convención sobre los Humedales, aprobado el 2 de febrero de 1971 en la ciudad iraní de Ramsar. Los humedales son zonas donde el agua es el principal factor controlador del medio y la vida vegetal y animal asociada a él. Los humedales se forman donde la capa freática se halla en la superficie terrestre o cerca de ella o donde la tierra está cubierta por aguas poco profundas. En Chile, se localizan en la XV, II, III, IV, V y XIV región.

En este capítulo, pues, se analiza la reserva de agua (caudal ecológico) en las zonas que tengan áreas de interés nacional asociadas a protección ambiental.

12.2.2 Enfoque Metodológico de la estimación de la Demanda Actual

12.2.2.1 Generalidades

En la legislación chilena actual, de acuerdo con el Decreto N° 71 del 30/09/14, que modifica el Decreto N° 14 del 22/5/2012, en el cual “Aprueba reglamento para la determinación del caudal ecológico mínimo”, señala lo siguiente:

a) Para aquellos cauces donde se constituyeron derechos con un caudal ecológico mínimo, considerando como fórmula de cálculo el criterio del diez por ciento del caudal medio anual, se considerará el cincuenta por ciento del caudal de probabilidad de excedencia de noventa y cinco por ciento, para cada mes, con las restricciones siguientes:

i. Para aquellos meses, en los cuales el cincuenta por ciento del caudal con noventa y cinco por ciento de probabilidad de excedencia es menor al diez por ciento del caudal medio anual, el caudal ecológico mínimo para ese mes será el diez por ciento del caudal medio anual.

ii. Para aquellos meses, en los cuales el cincuenta por ciento del caudal con noventa y cinco por ciento de probabilidad de excedencia es mayor a diez por ciento del caudal medio anual y menor al veinte por ciento del caudal medio anual, el caudal ecológico mínimo será el cincuenta por ciento del caudal con noventa y cinco por ciento de probabilidad de excedencia.

iii. Para aquellos meses, en los cuales el cincuenta por ciento del caudal con noventa y cinco por ciento de probabilidad de excedencia es mayor al veinte por ciento del caudal medio anual, el caudal ecológico mínimo será el veinte por ciento del caudal medio anual.

b) Para aquellos cauces donde se constituyeron derechos con un caudal ecológico mínimo del menor cincuenta por ciento del caudal con noventa y cinco por ciento de probabilidad de excedencia, se considerará como caudal ecológico mínimo el cincuenta por ciento del caudal con noventa y cinco por ciento de probabilidad de excedencia, para cada mes, con las restricciones siguientes:

i. Para aquellos meses, en los cuales el cincuenta por ciento del caudal con noventa y cinco por ciento de probabilidad de excedencia es menor al veinte por ciento del caudal medio anual, el caudal ecológico mínimo será el cincuenta por ciento del caudal con probabilidad de excedencia del noventa y cinco por ciento.

ii. Para aquellos meses, en los cuales el cincuenta por ciento del caudal con noventa y cinco por ciento de probabilidad de excedencia es mayor al veinte por ciento del caudal medio anual, el caudal ecológico mínimo, en esos meses, será el veinte por ciento del caudal medio anual.

Por otra parte, no existe en Chile regulación de otros aspectos tan relevantes como el caudal para conseguir el propósito de conservación: normas para gestión del uso del

cauce, conservación de riberas, mantención de vegetación ribereña, entre otros. Esto hace que, aunque se cumpla con el caudal ecológico mínimo normado, la conservación de ecosistemas pueda no alcanzarse.

En la Ley Nº 20.017 de 11/5/2005, que modificó el Código de Aguas, se consignó una norma en la que se le da atribución al Presidente de la República para que bajo ciertas condiciones reserve recursos hídricos. El inciso 3° del Artículo 147 bis del Código de Aguas señala:

“Asimismo, cuando sea necesario reservar el recurso para el abastecimiento de la población por no existir otros medios para obtener el agua, o bien, tratándose de solicitudes de derechos no consuntivos y por circunstancias excepcionales y de interés nacional, el Presidente de la República, podrá mediante decreto fundado, con informe de la Dirección General de Aguas, disponer la denegación parcial de una petición de derecho de aprovechamiento. Este decreto se publicará por una sola vez en el Diario Oficial, el día primero o quince de cada mes, o el primer día hábil inmediatamente siguiente si aquellos fueran feriados”.

En este contexto, en el presente estudio, de modo de ser conservadores en los cálculos, en los puntos de interés, se determinarán los caudales ecológicos mínimos según lo expresado en el Decreto Nº 71 del 2014, y se escogerá el mínimo de entre los calculados según a) y b).

12.2.2.2 Fuentes documentales utilizadas

Se han recopilado los antecedentes siguientes para la estimación de la demanda ambiental:

- La base de información utilizada para identificar las áreas de protección SNASPE, Sitios Prioritarios para la Conservación de la Diversidad Biológica y Sitios Ramsar, en todas las regiones del país, corresponde a:
 - Mapoteca de la DGA, Unidad SIG, actualizada al año 2016.
 - Ministerio del Medio Ambiente, División de Recursos Naturales y de Biodiversidad.
- Las estadísticas de caudales medios mensuales fueron obtenidas de las estaciones fluviométricas de la web de la DGA (<http://snia.dga.cl/BNAConsultas/reportes>).

12.2.2.3 Metodología

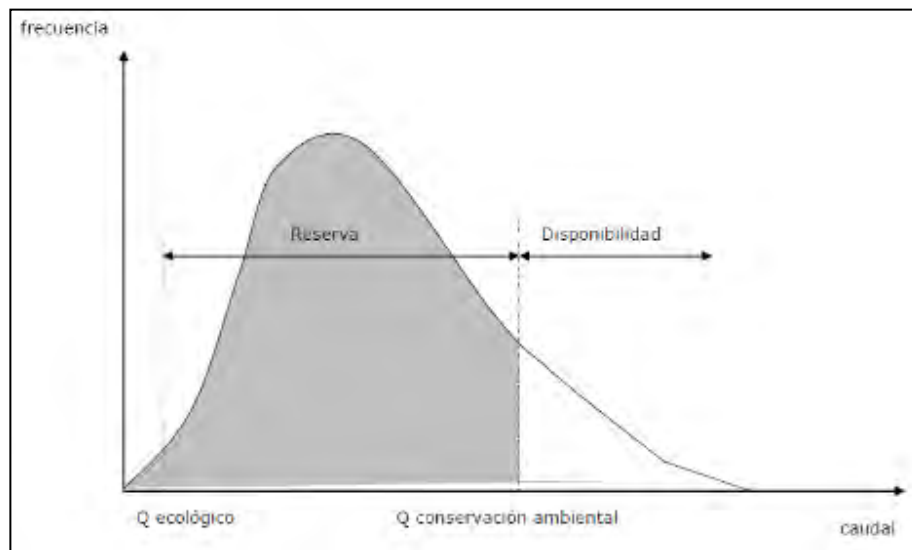
La División de Estudios y Planificación, en conjunto con las Direcciones Regionales, y el Departamento de Administración de Recursos Hídricos realizaron, en los años 2009 y 2010, una serie de informes técnicos con el objetivo de proponer y analizar técnicamente los procedimientos y mecanismos para la aplicación de la Norma de Reserva por Interés Nacional (Artículo 147 Bis Inciso 3º del Código de Aguas) relacionado con la conservación ambiental y el desarrollo local de determinadas cuencas.

Entre los informes señalados se cuentan: Informe Técnico Nº 2: Reserva del río Cochamó para la conservación ambiental y el desarrollo local de la cuenca; Informe Técnico Nº 4: Reserva del río Petrohué para la conservación ambiental y el desarrollo local de la cuenca; Informe Técnico Nº 5: Reserva del río Murta para la conservación ambiental y el desarrollo local de la cuenca, entre otros.

En dichos documentos de la DGA, como procedimiento para fijar el monto de caudal a reservar para protección ambiental se utilizaron los siguientes principios:

- Se busca encontrar un caudal de conservación (protección) ambiental, definido por la suma del caudal ecológico más el de reserva por interés nacional, que es el tramo comprendido entre el caudal ecológico y el 20% de probabilidad de excedencia. Esto permitirá mantener la mayor parte del tiempo, en su condición natural, la distribución de caudales en la cuenca (área gris en la Figura 13.2-1), y de esta manera mantener prácticamente inalterada la magnitud, frecuencia, y duración del régimen hídrico.

Figura 12.2-1 Caudal de reserva para conservación ambiental



Fuente: Elaboración propia

La relación que se ocupará en los cálculos es la siguiente:

- Caudal para protección ambiental:

$$Q_{\text{protección ambiental}} = Q_{\text{prob.de excedencia 20\%}} - Q_{\text{ecológico}}$$

Este cálculo se aplicará a las zonas de protección (SNASPE, Sitios Prioritarios para la Conservación de la Diversidad Biológica y Sitios Ramsar) existentes en cada región, identificando una estación fluviométrica de referencia de la red hidrométrica de la DGA en cada caso.

12.2.3 Enfoque Metodológico de la proyección de la Demanda Futura

12.2.3.1 Generalidades

La demanda o caudal para protección ambiental, tiene que ver directamente con planificaciones a futuro relacionados con creación o declaraciones de nuevos SNASPE, Ramsar y/o Sitios Prioritarios de Conservación para la Biodiversidad. Para ello, se hizo la consulta formal a la División de Recursos Naturales y Biodiversidad del Ministerio del Medio Ambiente, señalando lo siguiente:

- No está planificado la declaración de Sitios Prioritarios de Conservación para la Biodiversidad en el corto o mediano plazo. Respecto a nuevas o futuras creaciones de áreas protegidas, el subcomité técnico de Áreas Silvestres Protegidas del Estado (Ministerio del Medio Ambiente, Ministerio de Bienes Nacionales y Corporación Nacional Forestal), acordó un portafolio de optimización del SNASPE, en Enero del 2017, que constituye una planificación de trabajo técnico hasta el año 2019.
- Está previsto, por ese mismo subcomité, una planificación más minuciosa y a largo plazo, a realizarse a fines de este año (2017) e inicios del próximo, que resultará en un Mapa Nacional de referencia de vacíos de representatividad para ecosistemas terrestres y costeros – marinos.

A continuación, se incluye el portafolio de las áreas planificadas que serán incorporadas al SNASPE en los próximos 3 años.

Figura 12.2-2 Portafolio Optimización del Sistema Nacional de Áreas Silvestres Protegidas del Estado (SNASPE): Subcomité del CONAF

Región	INICIATIVAS			Compromiso Asociado	SITUACIÓN ACTUAL	FECHA ESTIMADA PRESENTACIÓN CMS
	Categoría y Nombre	Tipo	Superficie aprox (ha)			
Arica-Parinacota	MN Altos de Poconchile	Creación	1.197	SIGI 2016 - Convenio CONAF MBN	ITJ en revisión por parte de CONAF NC	mar-17
	MN Quebrada de Cardones	Ampliación	Por definir	SIGI 2018	Conaf regional se encuentra elaborando propuesta de polígono de ampliación, el debe ser enviado a BBNN	dic-17
	MN Picafior de Arica	Creación	Por definir	SIGI 2017 - Convenio CONAF MBN	ITJ en elaboración por parte de CONAF regional	2018
	MN Cuevas de Anzota	Creación	Por definir	SIGI 2018 - Convenio CONAF MBN	Depende de acuerdo entre: CONAF/EJERCITO/MBN/MUNICIPALIDAD/VALIDAD	2018
Tarapacá-Antofagasta	MN Desembocadura del Río Loa	Creación	13.000	SIGI 2016 - Convenio CONAF MBN	ITJ preliminar y en revisión por parte de CONAF NC	mar-17
	PN Uuillaillaco	Ampliación	Por definir	SIGI 2019	Existen pertenencias mineras en aprox el 60% del áreas propuesta para la ampliación	2020
Atacama	PN Doña Inés	Creación	350.000	SIGI 2016 - Convenio CONAF MBN	Existe Informe Técnico año 2009. Necesidad de chequeo en terreno para establecer polígono	2018
	MN Finca Chañaral (Inca de Oro)		Por definir	Convenio CONAF MBN	Necesidad de chequeo en terreno para establecer polígono	2018
	PN Pan de Azúcar	Ampliación	Por definir	Convenio CONAF MBN	Conaf regional se encuentra elaborando propuesta de polígono de ampliación, el debe ser enviado a BBNN	2018
	PN Llanos de Challe		Por definir	SIGI 2018	Conaf regional se encuentra elaborando propuesta de polígono de ampliación, el que debe ser chequeado por BBNN	2019
Coquimbo	MN Tres Cruces	Creación	726	SIGI 2016 - Convenio CONAF MBN	ITJ en revisión por parte de CONAF NC	mar-17
	RN Río Saso		20.000	Convenio CONAF MBN	Es una donación. Se planificará en 2017 un terreno a fin de evaluar valor ambiental del predio que se pretende donar.	2019
	RN Pingüino de Humboldt	Ampliación		SIGI 2017 - Convenio CONAF MBN	ITJ en proceso de elaboración por parte de CONAF regional	2018
Metropolitana	PN Río Olivares	Creación	37.475	SIGI 2016 - Convenio CONAF MBN Protocolo de Acuerdo firmado en octubre de 2015, entre los Ministerios de Agricultura, Bienes Nacionales, Medio Ambiente, Gobierno Regional Metropolitano de Santiago y CONAF; el que también fue suscrito por la Presidenta de La República.	ITJ en CONAF NC	2018
	RN Río Clarillo	Recategorización a PN	10.185	Protocolo de Acuerdo firmado en octubre de 2015, entre los Ministerios de Agricultura, Bienes Nacionales, Medio Ambiente, Gobierno Regional Metropolitano de Santiago y CONAF; el que también fue suscrito por la Presidenta de La República.	Ingresó expediente a MMA. Hay que subsanar observaciones menores (enviadas a CONAF/via email)	2017

O'Higgins	RN Río de Los Cipreses	Recategorización a PN	32.000		Ingresó expediente a MMA. Pendiente envío por parte de CONAF de antecedentes complementarios, que permitan someter la propuesta al CMS	2018
	RN Los Trichahues	Redelimitación	5.900		Ingresó expediente a MMA. Pendiente envío por parte de CONAF de antecedentes complementarios, que permitan someter la propuesta al CMS	2018
	RN La Cruz	Creación	2.747	SIGI 2016 - Convenio CONAF MBN	ITJ en revisión por parte de CONAF NC	2018
	RN Altos de Urcay	Recategorización a PN	11.597	SIGI 2017 - Convenio CONAF MBN		2018
	RN Los Bellotos del Melado	Ampliación	300	Cumplimiento medida de compensación en marco RCA, embalse Ancoa: Ampliar la reserva en 300 hectáreas más.	D5 firmado por MBN y MMA	Aprobado por CMS
Bío Bío	RN Nonguen	Recategorización a PN	3.036	SIGI 2017 - Convenio CONAF MBN	ITJ en edición final. Existe apoyo político desde la región.	2018
	RN Ruble	Ampliación	Por definir	SIGI 2019		2020
	RN Isla Mocha	Recategorización a PN	2.181	SIGI 2018	ITJ en edición final. Existe apoyo político desde la región.	2019
Araucanía	PN Sollipulli	Creación	30.000	SIGI 2017 - Convenio CONAF MBN	ITJ en elaboración por parte de Conaf regional	2018
Los Lagos	PN Hornopirén	Ampliación	22.000	Convenio CONAF-MBN y Mesa Donaciones	ITJ en etapa final de elaboración	2017
	PN Corcovado	Ampliación	108.500	Mesa Donaciones	ITJ en etapa final de elaboración	2017
	PN Pumalín	Creación	429.020	Mesa Donaciones	ITJ en etapa final de elaboración	2017
	RN Futaleufú	Recategorización a PN	12.965	SIGI 2017 - Convenio CONAF MBN		2018
	RF Llanquihue	Recategorización a PN	33.972	SIGI 2018	Existe solicitud por parte de CONAF regional para recategorizar el área	2019
	RF Lago Palena	Recategorización a PN	49.391	SIGI 2018	Existe solicitud por parte de CONAF regional para recategorizar el área	2019
Aysén	RN Jeinimeni	Recategorización a PN Patagonia	161.100	Convenio CONAF-MBN y Mesa Donaciones	ITJ en etapa final de elaboración	2017
	RF Lago Cochrane	Recategorización a PN Patagonia	8.361	Convenio CONAF-MBN y Mesa Donaciones	ITJ en etapa final de elaboración	2017
	PN Isla Magdalena	Ampliación	53.641	Mesa Donaciones	ITJ en etapa final de elaboración	2017
	PN Melimoyu	Creación	80.552	Mesa Donaciones	ITJ en etapa final de elaboración	2017
	RF Cerro Castillo	Recategorización a PN	179.550	Mesa Donaciones	ITJ en etapa final de elaboración	2017
	PN Patagonia	Creación	302.335	Mesa Donaciones	ITJ en etapa final de elaboración	2017
Magallanes	MN Canquén Colorado	Creación	26	SIGI 2016 - Convenio CONAF MBN	ITJ en elaboración en CONAF regional, con colaboración de SEREMIS de BBNN y MMA	abr-17
	RF Alcañufes	Ampliación para PN	527.000	Mesa Donaciones	ITJ en etapa final de elaboración	2017
	RF Alcañufes	Recategorización a PN	2.313.875	Mesa Donaciones	ITJ en etapa final de elaboración	2017

Fuente: Portafolio SNASPE, Ministerio del Medio Ambiente, Ministerio de Bienes Nacionales y Corporación Nacional Forestal.

Hechas las consultas a la División de Recursos Naturales y Biodiversidad del Ministerio del Medio Ambiente, respecto a la ubicación (coordenadas del polígono) de al menos aquellos sitios SNASPE que tenían una superficie aproximada definida, no se tuvo respuesta, de modo que sólo se podrán calcular los caudales para protección ambiental actuales, y no futuros.

PARTE III. ENFOQUE METODOLÓGICO DE LA CALIDAD DE LAS AGUAS Y PRESIONES AMBIENTALES

CAPÍTULO 13 METODOLOGÍA PARA EL ESTUDIO DE LA CALIDAD DE LAS AGUAS

13.1 INTRODUCCIÓN

En el presente capítulo se pretende caracterizar la calidad del agua en Chile a lo largo de toda su extensión mediante la sistematización y depuración de la información existente en diferentes fuentes y la confección y presentación de diversas herramientas de análisis.

De esta forma se tendrá un panorama completo de la calidad del agua del país por sectores constituyendo una herramienta importante a la hora de evaluar la explotación, distribución y uso de los recursos hídricos.

Por ello, en este capítulo se muestra la metodología aplicada a la base de datos DGA (Banco Nacional de Aguas), tanto en estaciones superficiales como subterráneas para todo el periodo de medición de los distintos parámetros considerados en el análisis hidroquímico.

Además, se presenta la forma en que se caracteriza hidroquímicamente la información histórica validada y la comparación de la estadística en el periodo 2000 – 2016, con la normativa chilena vigente de Riego (NCh 1333) y agua potable (NCh 409).

Por último, se añade la metodología para la determinación del Índice de Calidad (IC) en acuíferos en distintas cuencas de nuestro país.

13.2 ENFOQUE METODOLÓGICO

En esta parte del estudio se aborda la sistematización y depuración de la información recopilada sobre calidad de aguas y caracterización de ésta en los cuerpos de aguas superficiales y subterráneos.

13.2.1 Fuentes documentales utilizadas

Se analizaron distintas fuentes de información de calidad de aguas presentes en Chile, principalmente la presentada en el Banco Nacional de Aguas (BNA) y la del protocolo PR18 de la Superintendencia de Servicios Sanitarios (SISS). De esta última fuente se descartan los datos

-para la construcción de diagramas-, ya que no posee información de todos los iones principales (no hay mediciones de HCO_3 , Ca, Na y K), lo cual imposibilita realizar el balance. Lo anterior es debido al objetivo del propio protocolo de la SISS, que se centra en otro tipo de parámetros.

Así, a continuación, se presenta la aplicación de la metodología para la base de datos de la DGA, la cual cuenta con mediciones de diversos parámetros de calidad del agua en estaciones establecidas y ubicadas mediante coordenadas. Esta serie de datos se extiende, de forma variable según cada estación, entre los años 1959 y 2016.

13.2.1.1 Sistematización y depuración de la información

La sistematización de la información de calidad de aguas tiene como objetivo corregir, actualizar, validar, homologar y homogenizar la información recopilada. La interpretación se efectúa sobre una determinada escala espacial o áreas de estudio, que principalmente corresponden a cuencas y/o subcuencas, dependiendo de la cantidad y densidad de información.

A continuación, se presenta la metodología considerada en este estudio. Como primera actividad, la información se ordenó y clasificó según su origen, por ejemplo:

- Programa de muestreo sistemático:
 - registro con al menos 10 valores del parámetro analizado.
 - registro donde se tiene menos de 10 y más de 5 valores del parámetro analizado.
- Datos provenientes de campañas puntuales.
- Estimaciones teóricas.
- Otras a definir, luego de recopilada la información.

El procedimiento de verificación de datos, para validar su confiabilidad, considerará al menos, las siguientes labores:

- Detección de valores dispersos (*outliers*) para su eliminación.
- Cumplimiento de límites físicos identificando rangos. De acuerdo con la información bibliográfica especializada se tienen rangos de valores para la concentración de los parámetros que se han detectado en todo el mundo.
- Límites de detección, valores mínimos y máximos. Los datos de cada parámetro se contrastarán con los límites de detección estándar informados por los laboratorios.
- Identificación de relaciones físicas entre los parámetros.

- Cumplimiento del error aceptable para el balance iónico. Un aspecto importante para verificar la consistencia de los muestreos realizados, es la determinación del error asociado al balance iónico de cada uno de ellos, de manera de comprobar si las muestras se encuentran equilibradas químicamente. Este procedimiento es una práctica estándar para evaluar la confiabilidad de los análisis de agua. La condición de electroneutralidad del agua indica que la suma de los cationes de la solución debe ser igual a la suma de los aniones. Los parámetros a utilizar en el balance iónico serán los siguientes:

- o Aniones: CO_3^- , HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^-
- o Cationes: Ca^{++} , Mg^{++} , Na^+ , K^+

Según la siguiente relación analítica:

$$\%error = \left(\frac{(\sum \text{cationes (meq)} - \sum \text{aniones (meq)})}{(\sum \text{cationes (meq)} + \sum \text{aniones (meq)})/2} \right) \times 100$$

se considerarán como válidos sólo a aquellos análisis cuyo error en el balance iónico sea inferior al 10%.

La información válida es consolidada y sistematizada en bases de datos y coberturas SIG, cuyas tablas están debidamente relacionadas, y sus campos identificados en forma clara.

13.2.1.2 Análisis preliminar de datos

Las estaciones se ordenan y clasifican por región, cuenca, subcuenca, tipo de agua (superficial o subterránea), situación de la estación (vigente o suspendida) y acuífero al que pertenece (en caso de ser una estación de aguas subterráneas). Cada estación cuenta con la medición de diferentes parámetros indicando la fecha de medición y el valor medido.

Para verificar los valores de la base de datos:

- Los límites de detección dependen del método de medición empleado; para cada parámetro están identificados los valores límites inferiores en la base de datos de la DGA, por lo que cuando el valor del parámetro medido es menor al límite de detección se supone que el valor de dicho parámetro es el límite de detección.
- Se filtraron mediciones mediante el cumplimiento del error aceptable en el balance iónico, para el cual se consideraron los siguientes iones (si es que existía información):
 - o Aniones: HCO_3^- , CO_3^{2-} , Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^-
 - o Cationes: Ca^{++} , Mg^{++} , Na^+ , K^+
- Se filtran aquellas estaciones que poseen menos de 10 valores analizados, para que cumpla con la característica de ser un programa de muestreo sistemático. Estas

estaciones no se descartan, si no que se identifica de forma de establecer su importancia en el análisis de resultados.

Las mediciones de la DGA no poseen datos de sólidos disueltos totales, por lo cual se utiliza la conductividad eléctrica medida para calcular SDT a partir de la siguiente ecuación:

$$SDT(ppm) = 0,64 \cdot CE(\mu S/cm)$$

13.2.2 Caracterización hidroquímica

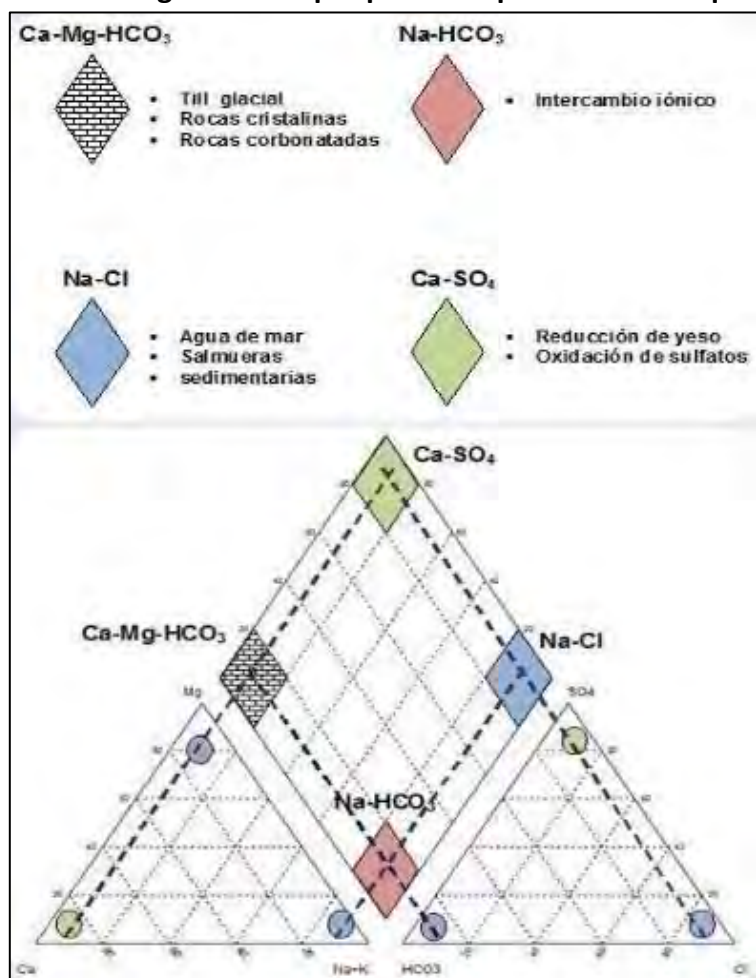
Para la caracterización de la calidad de los cuerpos de agua, superficiales y subterráneos, se utiliza la información previamente validada y verificada. Esta información corresponde a lo siguiente:

- Elementos mayores, tales como:
 - o Aniones: HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^-
 - o Cationes: Ca^{++} , Mg^{++} , Na^+ , K^+
- Elementos menores, y que pueden ser indicadores de contaminación de las aguas (efectos adversos para la población o el medio ambiente):
 - o Metales (actividad minera e industria): As, Pb, Cr, Hg (tóxicos) y Zn, Cu, Mo (positivos en bajas concentraciones).
 - o Otros orgánicos e inorgánicos (actividad agropecuaria, rellenos sanitarios, industrias): NH_4 , Cl, PO_4 , DQO, DBO, CO_3 , Alcalinidad total ($CaCO_3$).
 - o Elementos físico químicos generales: pH, conductividad eléctrica (CE), total de sólidos disueltos (TSD).

De los parámetros anteriormente mencionados, se cuenta con información de la totalidad de ellos en el BNA, salvo el caso de la Alcalinidad Total ($CaCO_3$), que no ha sido medida frecuentemente y por lo que se ha desestimado su utilización.

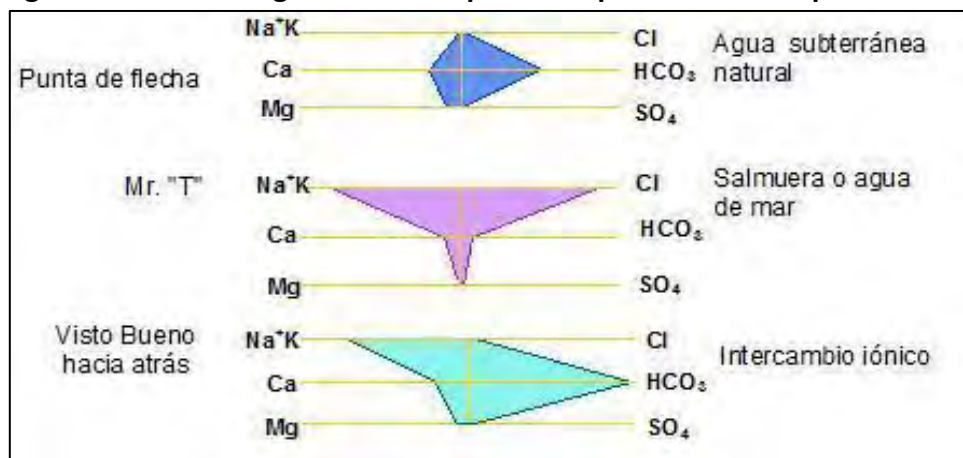
La información de los elementos mayores se representa en forma gráfica a través de los diagramas de Piper, Stiff, Schoeller y Box-Whisker. En cualquier caso, la aplicación de los tipos anteriores se hará dependiendo de la cantidad y calidad de la información procesada. A modo de ejemplo, en la Figura 13.2-1, Figura 13.2-2, Figura 13.2-3 y Figura 13.2-4, se muestran ejemplos y significados de los diagramas citados anteriormente.

Figura 13.2-1 Diagrama de Piper para interpretación hidroquímica



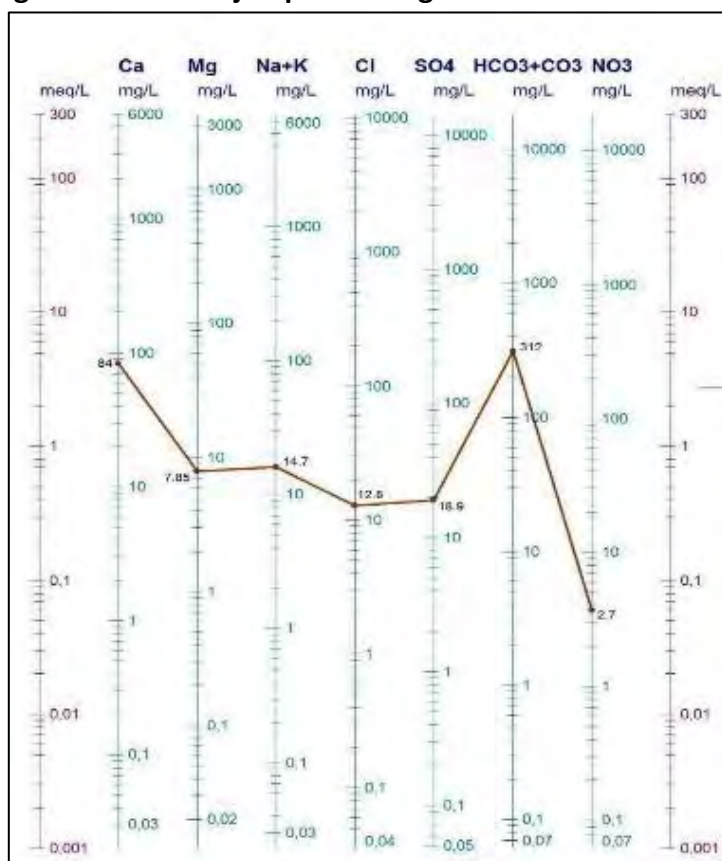
Fuente: Elaboración propia.

Figura 13.2-2 Diagrama de Stiff para interpretación hidroquímica



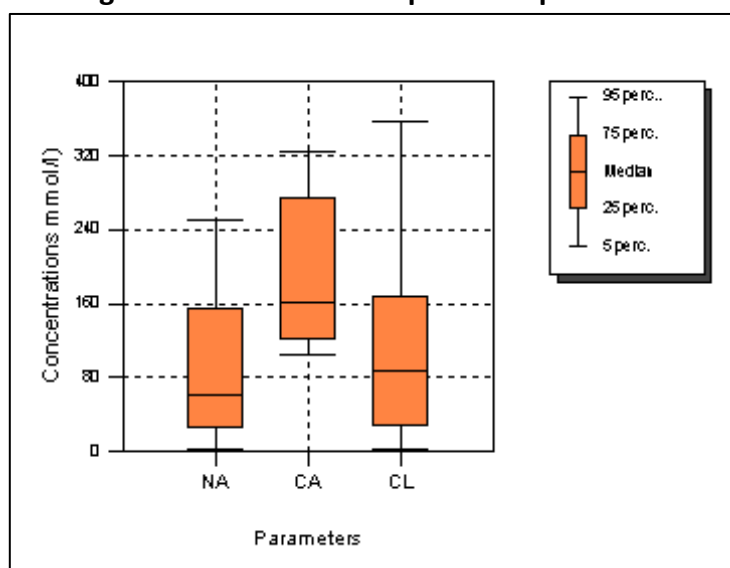
Fuente: Elaboración propia.

Figura 13.2-3 Ejemplo de Diagrama de Schoeller



Fuente: Elaboración propia.

Figura 13.2-4 Diagrama de Box-Whisker para interpretación hidroquímica



Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, y considerando el análisis previo efectuado a la información de calidad de aguas, se ha seleccionado un conjunto de cuencas (una por región), en donde se efectuará una

interpretación espacial hidroquímica a partir de los gráficos de Piper y Stiff, y una comparación de la estadística del periodo 2000 – 2016 de los elementos menores mencionados anteriormente, respecto a la normativa chilena vigente de riego y agua potable.

13.2.3 Análisis de isótopos ambientales

Al respecto, se revisó la información disponible y proporcionada por la DGA sobre mediciones de isótopos ambientales (oxígeno 18 y deuterio) proveniente de los estudios:

- "Sistematización, espacialización y análisis de datos isotópicos en muestras de agua del norte de Chile" Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, Departamento de Estudios y Planificación, 2005.";
- "Análisis y sistematización de información regional para plan estratégico para gestión de recursos hídricos región de Antofagasta", Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación; Realizado por Aquaterra Ingenieros Limitada, 2014;
- "Caracterización Hidrogeoquímica de la cuenca del Loa Alto, región de Antofagasta, Chile : informe final" Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación, Realizado por Matraz Consultores Asociados Limitada.2014
- "ESTUDIO HIDROGEOLOGICO, REGIÓN DE LA ARAUCANÍA" DGA, 2016.

Dicha información queda circunscrita a la cuenca del Loa Alto y a las regiones de Tarapacá, Antofagasta, Atacama y Araucanía, y se entrega en el ANEXO H.

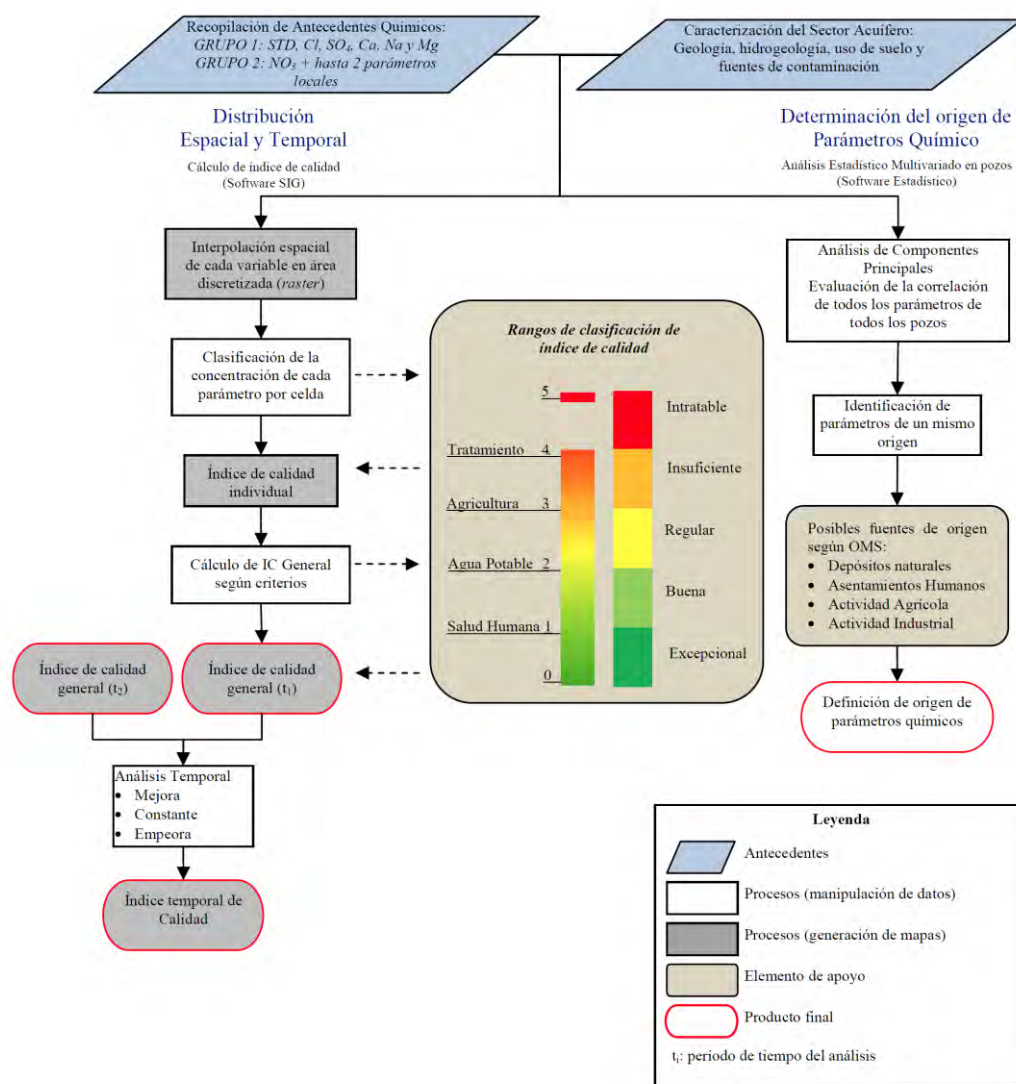
Como se puede apreciar dicha información es local y no comprende mediciones históricas de larga data. Es por ello que esa información es insuficiente para hacer un análisis de los cambios en los patrones isotópicos tanto espacial como temporalmente, y que pudiesen sustentar o complementar los comportamientos de la evolución de la calidad físico química de los acuíferos. Además, los isótopos ambientales se utilizan principalmente para determinar mezclas de aguas, fuentes de recarga o en algunos casos determinar contaminación local (con otros isótopos de los que no se tiene información). En definitiva, no es posible complementar o corroborar la interpretación hidroquímica abordada en el presente estudio con la información recopilada.

De acuerdo con lo anterior se recomienda que se implemente una red de monitoreo de isótopos ambientales, en forma regular y permanente, luego un estudio para definir el tipo de isótopos y las características de periodicidad y extensión espacial de la red.

13.2.4 Caracterización de acuíferos según el Índice de Calidad (IC)

En función de la información recopilada, analizada y depurada de etapas anteriores, se caracterizan los acuíferos mediante la determinación del Índice de Calidad (IC). Este índice de calidad fue diseñado y aplicado en estudio previo “Diagnóstico y Clasificación de Sectores Acuíferos” realizado por la DGA-GEOH (2009). La metodología para estimar este índice se indica en forma sintetizada en el esquema de la Figura 13.2-5.

Figura 13.2-5 Esquema General y Diagrama de Flujo de la Metodología para IC



Fuente: DGA-GEOH (2009).

iii. Parámetros a utilizar

De acuerdo con la revisión del estudio anterior (DGA-GEOH, 2009), la metodología a aplicar considera dos grupos de parámetros:

- El primer grupo está conformado por los parámetros químicos: Sólidos Disueltos Totales (SDT), Cloruros (Cl), Sulfatos (SO_4), Calcio (Ca), Sodio (Na) y Magnesio (Mg), que corresponden a parámetros comúnmente realizados en cualquier muestra de agua y que además son utilizados en la mayoría de las metodologías internacionales.
- El segundo grupo está conformado por parámetros químicos que dan cuenta de la singularidad de cada acuífero y está conformado por un máximo de tres parámetros: la concentración de Nitratos (NO_3), más la concentración de dos elementos minoritarios que pueden escogerse en forma libre para cada acuífero, siempre y cuando reflejen las particularidades del mismo, ya sea por causas naturales o artificiales. La identificación de estos dos parámetros se detalla en el Volumen II de resultados del presente informe.

Se ha definido como periodo de evaluación de datos el periodo 2000 – 2016, con el fin de caracterizar actualmente la calidad del agua de los acuíferos en estudio.

iv. Índice de Calidad Individual por parámetro

La metodología detallada en DGA-GEOH (2009), a partir de la información depurada y analizada, permite definir índices de calidad individual para cada uno de los parámetros considerados.

Estos índices se calculan a través de la interpolación lineal entre las concentraciones límites de cinco clases de calidad (0 a 5) definidas a partir de cuatro valores de corte (VC1 a VC4), asociados a límites máximos presentados en distintas normas nacionales e internacionales o recomendaciones vigentes de calidad de agua para distintos usos. Estas clases de calidad, se asocian a distintas condiciones cualitativas químicas de los acuíferos en estudio.

En el Cuadro 13.2-1 se presentan los valores de corte definidos en mg/L, para cada clase de calidad y parámetro en análisis a partir de lo expuesto en DGA-GEOH (2009).

Cuadro 13.2-1 Clases de Calidad y sus Valores de Corte según Parámetros Considerados.

N°	Clase	SDT	Cloruros	Calcio	Sulfatos	Sodio	Magnesio	Nitratos	Plomo	Fierro	Arsénico
1	Excepcional	1.200	250	100	250	200	100	10	0,01	0,3	0,01
2	Buena	1.500	400	200	500	200	125	50	0,05	0,3	0,01
3	Regular	2.000	1.064	401	961	920	250	133	5	5	2
4	Insuficiente	6.000	1.600	4.000	10.000	6.000	2.500	200	5	200	4
5	Intratable	6.000	1.600	4.000	10.000	6.000	2.500	200	5	200	4

Fuente: DGA-GEOH (2009).

v. Cálculo e Interpretación del Resultado del IC General

A partir de los resultados del IC individual para cada parámetro considerado, se calcula el IC general del acuífero en base a la categorización detallada en el Cuadro 13.2-2.

Cuadro 13.2-2 Consideraciones para el Cálculo del IC General.

IC Individual	Resultado IC General	Condición
Si existe un parámetro con IC Intratable.	IC general es Intratable.	Si $IC_{individual} > 4$ $IC_{general} = 5$
Si alguno de los parámetros que afectan la salud humana, según NCh 409, presentan IC Bueno, Regular o Insuficiente.	IC general es el peor IC individual de todos los parámetros.	Si $1 < IC_{individual} \leq 4$ $IC_{general} = \max_{i=\text{parámetro}} (IC_i)$
Si todos los parámetros que afectan la salud humana, según NCh 409, presentan IC Excepcional.	IC general es el promedio aritmético del IC individual de todos los parámetros.	Si $IC_{individual} \leq 1$ $IC_{general} = \frac{\sum_{i=\text{parámetro}} IC_i}{n^{\circ} \text{ parámetros}}$

Fuente: DGA-GEOH (2009).

De esta forma se obtiene un valor específico para el IC general referido a las cinco clases nombradas anteriormente, cuyas interpretaciones y significados se presentan a continuación:

- Calidad Excepcional ($0 \leq IC \leq 1$): Implica que todos los parámetros definidos por la norma NCh409 como de importancia para la salud (elementos esenciales y no esenciales, sustancias orgánicas, plaguicidas y productos secundarios de la desinfección), presentan IC Excepcional y que el IC final está dado por el promedio aritmético de todos los parámetros seleccionados. Por lo tanto, la calidad excepcional permite asegurar que entre los parámetros seleccionados ninguno afecta a la salud humana, aunque el resto de parámetros presentes puede tener calidad Regular o Insuficiente. Sin embargo, la situación esperada es que el resto de parámetros

seleccionados presenten calidad Buena o Excepcional, en cuyo caso estas aguas con IC Excepcional no afectan la salud humana y cumplirían con criterios de aceptabilidad del agua potable.

- Calidad Buena ($1 < IC \leq 2$): Esta situación puede darse tanto porque existe algún parámetro que afecta a la salud humana (según normativa NCh409) que presenta IC individual Bueno y el resto presenta IC Bueno o Excepcional, o bien los parámetros de importancia para la salud humana, según normativa NCh409, presentan IC Excepcional y el resto de parámetros presenta IC Buena, Regular y/o Insuficiente. De este modo las aguas clasificadas con IC Bueno no afectan a la salud humana, sin embargo, podrían presentar concentración elevada en algunos parámetros que reflejen afectación antrópica o limiten su uso.
- Calidad Regular ($2 < IC \leq 3$): Esta calidad puede ser reflejo que al menos uno de los parámetros que afectan la salud humana (según normativa NCh409) tiene IC Regular mientras el resto presenta IC Regular, Bueno y/o Excepcional. Sin embargo, también puede ocurrir cuando las concentraciones de parámetros relevantes a la salud humana no son altos (IC Bueno o Excepcional) y existe uno o más del resto de parámetros con IC Regular. Por lo tanto, el IC Regular corresponderá principalmente a aguas que afectan a la salud humana, aunque no se descarta que las aguas no sean nocivas para la salud humana y sea el resto de los parámetros seleccionados los que definen la calidad general.
- Calidad Insuficiente ($3 < IC \leq 4$): Esta situación puede reflejar que existe al menos un parámetro nocivo para la salud humana (según normativa NCh409) que presenta IC Insuficiente, es decir que limita su uso en agricultura. Sin embargo, también puede producirse cuando los parámetros que afectan la salud humana tienen IC Bueno o Excepcional, pero existe al menos uno del resto de parámetros con IC Insuficiente. Por lo tanto, el IC Insuficiente corresponde a aguas que no pueden ser usadas en la agricultura ni menos para el consumo humano, debido a que al menos uno de los parámetros seleccionados, tanto nocivos o no nocivos para la salud humana supera las recomendaciones.
- Calidad Intratable ($4 < IC \leq 5$): Esta situación define cuando existe al menos un parámetro de los seleccionados que presenta una calidad intratable, ya sea que afecte o no a la salud humana. Estos niveles son tales que dificultan enormemente su tratamiento, pues exigen procesos de tratamiento de alta eficiencia, y probablemente asociado a mayor complejidad y costos. En definitiva, estas aguas presentarían limitaciones para la mayoría de los usos.

vi. Aplicación del Índice de Calidad

Para el presente estudio, se aplicará la metodología mostrada en la Figura 13.2-5 a los acuíferos que tengan la información de los parámetros que ésta requiere, en cantidad y densidad espacial suficiente en base a la red BNA o a otros estudios con información disponible para caracterizar la calidad de las aguas subterráneas con la menor incertidumbre posible en la interpolación espacial de los datos.

La metodología de cálculo del IC es aplicable a toda la superficie definida como zona acuífera, por lo que los valores puntuales calculados para cada pozo deben ser interpolados de modo tal de asignar un valor de IC arealmente. De este modo, la principal restricción para la aplicación de esta metodología es la cantidad de puntos con información dentro de un acuífero, por lo que no es posible calcular el IC entre las regiones IX a XII, ya que en ellas no se dispone de información de calidad de aguas subterráneas. En el resto de las regiones, sólo algunas cuencas poseen acuíferos con una densidad de datos suficiente como para que el cálculo tenga sentido práctico, de éstos, en algunos casos ya se ha realizado el cálculo del IC en estudios previos. En el estudio citado (DGA-GEOH, 2009), el IC se calculó para las cuencas de los ríos Loa, Los Choros y Aconcagua, mientras que en los informes de DGA (2016b), DGA-SGA (2016) y DGA (2016a) se evaluó el índice de calidad en las cuencas de Petorca, Maipo y Rapel respectivamente, por lo que no se calculará nuevamente el IC en esas zonas.

De acuerdo a lo mencionado anteriormente, los acuíferos que cumplen con las condiciones necesarias para realizar el cálculo del IC son los siguientes:

- Pampa del Tamarugal (I Región de Tarapacá)
- Río Copiapó (III Región de Atacama)
- Río Imperial (IX Región de la Araucanía)

CAPÍTULO 14 METODOLOGÍA PARA EL ESTUDIO DE LAS PRESIONES AMBIENTALES

14.1 GENERALIDADES

La presión sobre los recursos hídricos se ha visto aumentada y la tendencia es que siga así. La influencia del cambio climático y la creciente demanda por uso de recursos hídricos, tanto por parte de la población como para el sector productivo, marcan esta tendencia creciente sobre el recurso. Dicho escenario estará además presionado por los objetivos nacionales de convertir al país en una potencia agroalimentaria, satisfacer la demanda de energía y dar seguridad de abastecimiento de agua a la población y actividades económicas.

Conceptualmente, las presiones ambientales sobre el recurso hídrico se comprenden como aquellas actividades o factores que generan un cambio en la condición natural del recurso. En este marco, la introducción de especies no autóctonas, el cambio de hábitat acuático, la contaminación, el cambio climático y la sobreexplotación de los recursos por crecimiento demográfico, productivo y turístico, entre otros, son las presiones ambientales que afectan la biodiversidad, las especies y hábitats en ambientes acuáticos, y la misma disponibilidad del recurso hídrico para distintos usos.

De acuerdo al Informe de Estado del Medio Ambiente del MMA, las principales presiones sobre los cuerpos de aguas se pueden clasificar en aquellas que alteran la disponibilidad del recurso y/o su calidad. En este contexto, y para tener una aproximación conceptual acotada en el marco de la presente consultoría, se destacarán las siguientes presiones:

- Extracción de agua;
- Condiciones de los cuerpos receptores de contaminantes (caudal de dilución);
- Cambio climático;
- Descarga de efluentes (puntuales y difusas); y,
- Alteraciones morfológicas.

Por otro lado, bajo el análisis de presiones ambientales, se consideraron también los pasivos ambientales tanto mineros como de otras fuentes que se comentan más adelante. Los pasivos

ambientales corresponden a residuos producto de la depositación o manipulación, que a consecuencia de una actividad humana de carácter industrial o extractiva concluida o aún en curso, afectan de forma perjudicial al medio ambiente y a la integridad de los organismos que lo componen (Araya y Villagrán, 2005). En Chile los pasivos ambientales están principalmente asociados a la industria minera.

A continuación, se presenta la recopilación de antecedentes que permiten definir finalmente la metodología para abordar el análisis de las presiones ambientales.

14.2 RECOPIACIÓN DE ANTECEDENTES

Extracción de agua:

Como se menciona anteriormente, el desarrollo económico y el crecimiento demográfico son los principales *drivers* de la demanda sobre el recurso hídrico, y en consecuencia una de las principales presiones ambientales. Para la extracción de agua se considera como principal fuente de información el propio levantamiento y estimaciones que se ejecutarán en el marco de la presente consultoría.

Cambio climático:

Chile presenta siete de las nueve categorías de vulnerabilidad establecidas por la CMNUCC (número 8 del artículo 8 de la Convención). Incluye: zonas costeras bajas; ecosistemas de montaña; territorios áridos y semiáridos expuestos a la sequía y a la desertificación; porciones proclives al deterioro forestal; áreas propensas a desastres naturales; áreas urbanas altamente contaminadas y; ecosistemas frágiles.

En el año 2007, el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) ya entregaba antecedentes indicando que los principales efectos en Chile serían aumento de temperatura y cambios en los patrones de precipitaciones, con un consecuente impacto en productividad de cultivos; ocurrencia de eventos extremos y anomalías asociadas a los recursos hídricos y, por ende, en la disponibilidad del agua, de energía y en sus recursos agrícolas y forestales. Un estudio llevado a cabo por CEPAL (2012) estimó que estos impactos se traducirían en pérdidas económicas, sociales y ambientales que podrían ser significativas, alcanzando un 1,1% anual del PIB hasta el 2100.

Más tarde, en el año 2010, Chile presentó ante la CMNUCC su Segunda Comunicación Nacional, describiendo los impactos del cambio climático en el país y su relación con las proyecciones climáticas futuras. El documento destaca que los cambios climáticos serán principalmente negativos en gran parte del territorio nacional, pero también se verá un efecto favorable en algunas regiones del país debido a aumentos en la productividad de sectores económicos específicos.

Un estudio reciente de Rojas (2012), incorpora los nuevos escenarios propuestos por el IPCC, y proyecta impactos del CC en el territorio nacional utilizando distintos modelos globales, evidenciando resultados consistentes con los anteriores. En efecto, a pesar de las incertidumbres inherentes de las modelaciones climáticas, las simulaciones de los distintos modelos regionales proyectan un calentamiento sobre todo el territorio chileno para el periodo 2011-2030, con un gradiente de mayor a menor de norte a sur y de cordillera a océano. La temperatura fluctuaría entre 0,5°C (en el océano y extremo sur) y 1,5°C (en la zona norte y el Altiplano). Proyectándose el mayor calentamiento en la zona norte grande y en altura, sobre la Cordillera de los Andes.

Para el mismo periodo (2011-2030), las simulaciones de precipitaciones muestran disminución entre 5-15% entre las latitudes 27-45°S aproximadamente, esto es, entre la cuenca del río Copiapó y la cuenca del río Aysén. En la zona se proyecta un secamiento de entre el 10-20%. Mientras que para el periodo 2031-2050 las proyecciones de temperatura y precipitación muestran tendencias similares al período más cercano, pero con valores mayores.

El 70% de los modelos utilizados en el estudio proyectaron que, para fines del siglo XXI, ocurrirán 10 veces más eventos climáticos extremos en 30 años. El número de eventos de precipitación extrema tiende a decrecer, no obstante, aumenta la ocurrencia de estos en presencia de temperaturas elevadas, con el consecuente riesgo de elevación de la isoterma 0°C, inundaciones, crecidas y aluviones.

Todos estos antecedentes evidencian la vulnerabilidad del país, tanto desde el punto de vista ambiental como económico y social, generando consecuentemente una presión sobre el recurso hídrico, entre varios otros recursos y sectores.

Descargas puntuales y difusas:

La principal fuente de información es el registro de emisiones y transferencias de contaminantes RETC, aprobado por D.S. Nro1/2013 del MMA, y que posteriormente se consolida con la publicación de sus normas básicas contenidas en la resolución exenta Nro 1.139 de diciembre de 2013.

Las normas de interés para la presente consultoría son aquellas referidas al sistema de RILES, el SINADER y el SIDREP. El primero como fuentes emisoras puntuales y los dos últimos como potenciales fuentes emisoras difusas.

El 2014 el RETC pasa a ser el sistema de ventanilla única para el reporte de los titulares de proyectos y establecimientos que tienen la obligatoriedad de monitorear e informar a las autoridades, los datos relativos a los RILES de fuentes emisoras que descargan al alcantarillado, a las aguas continentales y/o marítimas, así como a los acuíferos a través de infiltraciones. Por otro lado, el RETC también es un repositorio de la información de los destinatarios de residuos, que a

través del D.S. 1/2013 del MMA establece la obligatoriedad de declarar las toneladas dispuestas por año.

Condiciones de los cuerpos receptores de contaminantes (caudal de dilución):

Las descargas a aguas marinas y continentales superficiales se encuentran reguladas por el DS 90/2000 de MINGESPRES. Esta ley establece requerimientos, entre ellos se debe estimar la “tasa de dilución del efluente vertido”, entendido como la razón entre el caudal disponible del cuerpo receptor del contaminante y el caudal medio mensual del efluente vertido durante el mes de máxima producción de riles. El caudal disponible en es determinado por la DGA. El caudal medio mensual del efluente corresponde a la suma de los volúmenes de riles, en un mes, dividido por el número de días del mes en que hubo descargas.

Alteraciones morfológicas

Cualquier cambio sobre el sistema fluvial, especialmente en lo referente al caudal, altera su estabilidad y comienza un proceso de restablecimiento natural. Las alteraciones morfológicas consideran desde represas menores, infraestructura vial, hasta grandes obras. Para efectos de la presente consultoría se consideró hacer un levantamiento de las obras y las principales obras menores, en la medida que exista información. Para ello, las principales fuentes de antecedentes corresponden a los catastros del Ministerio de Obras Públicas y del Ministerio de Energía, considerando principalmente los embalses de riego, las centrales de pasada, y las centrales hidroeléctricas.

Pasivos ambientales

Para los pasivos ambientales, la principal fuente de información corresponde a las faenas mineras. La fuente de información más relevante en esta materia es el catastro que hizo SERNAGEOMIN el año 2007.

Finalmente, los pasivos ambientales relacionados con vertederos abandonados y/o RS cerrados, se obtienen del RETC o del catastro de vertederos que ejecutó CONAMA el año 2005.

14.3 METODOLOGÍA

Se realizó una identificación de las presiones ambientales relevantes en cada cuenca y/o subcuenca. Se consideraron al menos identificar:

- presiones sobre la disponibilidad, considerando demandas, e impactos documentados del cambio climático;
- presiones sobre la calidad (descargas directas e indirectas);
- presiones relacionadas con los receptores de contaminantes (caudales de dilución);
- presiones morfológicas; y,
- pasivos ambientales.

Es importante destacar que no se contempló generación de información, sino levantamiento y sistematización de la existente.

Las presiones sobre la *disponibilidad del recurso* consideraron un análisis sobre las demandas según uso por cuenca y/o subcuenca, para lo cual se contó con la información recopilada y sistematizada a partir de las actividades previas de la presente consultoría.

En el marco de la *disponibilidad*, también se examinó lo que indica la literatura respecto al impacto del cambio climático sobre la disponibilidad del recurso hídrico en Chile, a partir de estudios disponibles y modelos de circulación global escalados a nivel regional y/o local. Se debe destacar que hasta la fecha en Chile no se han desarrollado estudios de los impactos del cambio climático a escalas adecuadas para el territorio completo. Como actividad de la presente consultoría, se realizó un barrido en los estudios generales, así como en aquellos específicos a una escala regional y/o local, con el fin de ver la posibilidad de sistematizar las conclusiones.

En cuanto a las *descargas directas*, se comprenden como las descargas puntuales de residuos industriales líquidos de “establecimientos” o “fuentes emisoras conforme a la definición del DS1/2013 del MMA.

Las *emisiones indirectas* o difusas son principalmente aquellas que se producen por derrames o filtraciones provenientes de actividades agrícolas y silvícolas. Adicionalmente, en la presente consultoría se consideran como posibles fuentes indirectas o difusas las filtraciones provenientes de vertederos ilegales y en menor medida los rellenos sanitarios (RS). A pesar que las exigencias técnicas actuales a los RS no debieran permitir filtraciones, se considera relevante el levantamiento del catastro de RS como antecedente de análisis por posibles episodios futuros de contaminación.

Además, se considera la presencia de *pasivos ambientales* como son vertederos y rellenos sanitarios cerrados, y faenas mineras abandonadas, cerradas o en operación dentro de las cuencas.