



Gobierno
de Chile

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

PLAN ESTRATÉGICO DE GESTIÓN HÍDRICA EN LA CUENCA DE HUASCO

**INFORME FINAL
ANEXO F – ASPECTOS METODOLÓGICOS DEL PLAN DE
CUENCAS**

REALIZADO POR:

**UTP HIDRICA CONSULTORES SPA Y RUBIO CARTES Y MEZA
INGENIEROS CONSULTORES LTDA (UTP HIDRICA - ERIDANUS)**

S.I.T. N° 462

Santiago, noviembre 2020

CONTENIDO

CONTENIDO	i
TABLAS	iii
FIGURAS	iv
CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN, OBJETIVOS Y ALCANCE DEL ESTUDIO	1
1.1 INTRODUCCIÓN	1
1.2 ALCANCES GENERALES DEL ESTUDIO	1
1.2.1 Descripción de la cuenca. Localización geográfica	1
1.2.2 Diagnóstico de la cuenca	1
1.2.3 Modelación hidrológica	2
1.2.4 Participación Ciudadana	2
1.2.5 Formulación del Plan de Acción	2
1.3 ASPECTOS METODOLÓGICOS GENERALES	2
CAPÍTULO 2 REVISIÓN Y ANÁLISIS DE ANTECEDENTES	3
2.1 RECOPIACIÓN DE ANTECEDENTES BIBLIOGRÁFICOS	3
2.2 RESUMEN DE LA INFORMACIÓN RELEVANTE	3
2.2.1 Antecedentes relativos a modelación	3
2.2.2 Antecedentes relativos a PAC	5
2.2.3 Antecedentes relativos a carteras de acciones	6
2.2.4 Otros antecedentes relevantes	7
CAPÍTULO 3 ENFOQUE METODOLÓGICO DEL ESTUDIO	9
3.1 INTRODUCCIÓN	9
3.2 METODOLOGÍA APLICADA EN LA CARACTERIZACIÓN DE LA CUENCA	11
3.3 METODOLOGÍA APLICADA EN EL DIAGNÓSTICO DE LA CUENCA	12
3.3.1 Oferta	13
3.3.2 Demanda	18
3.3.3 Infraestructura	31
3.3.4 Gobernanza	31
3.3.5 Cartera de acciones	35
3.4 METODOLOGÍA APLICADA EN LA MODELACIÓN HIDROLÓGICA	37
3.4.1 Descripción de la Plataforma WEAP	37
3.4.2 Descripción de MODFLOW	48
3.4.3 Acople WEAP-MODFLOW	51
3.4.4 Forzantes Meteorológicas Utilizadas	60
3.4.5 Eventos extremos y variabilidad climática	63
3.4.6 Balance Anual y Oferta Sustentable	65
3.4.7 Análisis de Criterios de Sustentabilidad de Acuíferos	68

3.4.8	Selección de Modelos de Circulación General (MCG) para Escenarios de Cambio Climático	71
3.5	METODOLOGÍA APLICADA EN LA PAC	76
3.5.1	Introducción y objetivos de la PAC	76
3.5.2	Herramientas metodológicas	77
3.5.3	Plan de trabajo PAC	78
3.5.4	Recopilación de antecedentes	78
3.5.5	Definición de escalas de análisis. Mapa de actores	79
3.5.6	Reuniones de presentación en la cuenca	82
3.5.7	Seminarios en la cuenca	83
3.6	METODOLOGÍA APLICADA EN LA FORMULACIÓN DEL PLAN DE ACCIÓN	84
3.6.1	Introducción	84
3.6.2	Medidas de intervención	85
3.6.3	Categorización de las acciones del Plan	87
3.6.4	Evaluación de las acciones del Plan	89
3.6.5	Priorización de las acciones y Definición del Plan de Acción	91
3.6.6	Modelo de gobernanza y sostenibilidad	94
3.6.7	Programa de seguimiento y control del Plan	94
3.7	GENERACIÓN DEL SIG	96

TABLAS

Tabla 2.2-1	Resumen de modelos existentes actualizados.....	3
Tabla 2.2-2	Listado de antecedentes relevantes de PAC.....	5
Tabla 2.2-3	Listado de antecedentes relevantes con carteras de acciones en materia hídrica.....	6
Tabla 3.3-1	Parámetros considerados en el diagnóstico de calidad	15
Tabla 3.3-2	Notación de otros parámetros mencionados	16
Tabla 3.3-3	Rangos límites de parámetros CE y SDT	18
Tabla 3.4-1	Variables y parámetros utilizados por el modelo WEAP	44
Tabla 3.4-2	Parámetros de acuífero en WEAP.....	46
Tabla 3.4-3	Atributos Archivo de Enlace WEAP - MODFLOW.	58
Tabla 3.4-4	Estaciones seleccionadas como “indicadoras” para la cuenca Huasco	61
Tabla 3.4-5	Eventos y su definición.	64
Tabla 3.4-6	Antecedentes distribución de agua en la cuenca por tramo.....	67
Tabla 3.4-7	MCG seleccionados para representar las proyecciones de cambio climático en DGA (2018).	72
Tabla 3.4-8	Resumen de las variaciones porcentuales de precipitación y escorrentía para distintas cuencas estudiadas en DGA (2018).....	75
Tabla 3.4-9	Definición de escenarios de cambio climático para la modelación	75
Tabla 3.5-1	Herramientas Metodológicas Plan de Participación.....	77
Tabla 3.6-1	Ejes de formulación del PEGH	85
Tabla 3.6-2	Escala de evaluación económica: indicador de CAE normalizado.....	90
Tabla 3.6-3	Escala de evaluación social: indicador de problemáticas PAC	91
Tabla 3.6-4	Escala de puntuación para evaluación ambiental.....	91

FIGURAS

Figura 2.2-1	Dominio modelos base superficial y subterráneo cuenca río Huasco.....	4
Figura 3.1-1	Mapa conceptual de la metodología aplicada	10
Figura 3.3-1	Áreas protegidas chilenas y su grado de homologación de UICN	14
Figura 3.3-2	Esquema de un Diagrama Box-Whiskers.....	17
Figura 3.3-3	Esquema general de la metodología para estimación de demanda actual y futura de Agua Potable Urbana	23
Figura 3.3-4	Extracto de la metodología para la estimación de la demanda actual y futura de Agua Potable Rural	24
Figura 3.3-5	Esquema general de la metodología para estimación de demanda actual y futura de Uso Agrícola	25
Figura 3.3-6	Esquema general de la metodología para estimación de demanda actual y futura de Uso Pecuario.....	26
Figura 3.3-7	Esquema general de la metodología para estimación de demanda actual y futura de Uso Minero	27
Figura 3.3-8	Esquema general de la metodología para estimación de demanda actual y futura de Uso Industrial	28
Figura 3.3-9	Esquema general de la metodología para estimación de demanda actual y futura de Uso Eléctrico.....	29
Figura 3.3-10	Esquema general de la metodología para estimación de demanda actual y futura de Uso Turístico y Protección Ambiental	30
Figura 3.3-11	Visión general de los Principios de la Gobernanza del Agua	34
Figura 3.4-1	Elementos y métodos disponibles en WEAP para la modelación de la hidrología, demandas de agua y agua subterránea.....	41
Figura 3.4-2	Esquema gráfico modelo WEAP.	43
Figura 3.4-3	Modelo Conceptual del acuífero en WEAP. Fuente: Manual WEAP	46
Figura 3.4-4	Esquema de Vinculación WEAP-MODFLOW Mediante Archivo de Enlace .	52
Figura 3.4-5	Esquema General Metodología de Elaboración de Modelos Acoplados ...	53
Figura 3.4-6	Esquema para Generación de Archivos en Formato Nativo MODFLOW ...	56
Figura 3.4-7	Modificación de Archivos Nativos GWV	57
Figura 3.4-8	Estaciones "indicadoras" cuenca de Huasco.....	62
Figura 3.4-9	Esquema oferta hídrica sustentable de la cuenca del Río Huasco	67
Figura 3.4-10	Cambios en la precipitación anual media, proyectado hacia 2030-2060 respecto de LB 1985-2015 para cada MCG.....	73
Figura 3.4-11	Cambio relativo en precipitación media anual proyectada para el período proyectado para el período futuro (2030-2060) respecto al período de línea base (1985-2105), promediado sobre un conjunto de cuencas con información fluviométrica (CAMELS-CL).....	74
Figura 3.5-1	Diagrama influencia/interés.....	81
Figura 3.6-1	Esquema simplificado de la formulación del PEGH.....	84
Figura 3.6-2	Ejemplo relación Objetivo-Problema-Solución-Iniciativa	85
Figura 3.6-3	Ejemplo de ficha resumen identificativa de las acciones del plan	88
Figura 3.6-4	Esquema de priorización	93

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN, OBJETIVOS Y ALCANCE DEL ESTUDIO

1.1 INTRODUCCIÓN

La DGA es el organismo del Estado en Chile encargado de promover la gestión y administración del recurso hídrico, en un marco de sustentabilidad, interés público y asignación eficiente del agua para el consumo humano, producción de bienes y servicios y la conservación del medio ambiente. Actualmente, en un contexto en que la seguridad hídrica y la eficiencia en la gestión del recurso hídrico se imponen como menester, la planificación en esta materia debe tener un enfoque estratégico.

El PEGH de la cuenca del río Huasco, promovido por la DGA, compila un portafolio de acciones a diferentes horizontes (corto, mediano y largo plazo), dirigido a los diferentes servicios públicos y actores privados que participan de la gestión del agua, con énfasis en aquellas sobre las que recae la responsabilidad en la propia DGA. El PEGH es una hoja de ruta a través de la cual se aspira a hacer frente a la problemática hídrica de la cuenca del río Huasco, con una visión integrada de las relaciones entre los actores en torno al uso, consumo y gestión del recurso hídrico, con prioridad del consumo humano, teniendo presente los efectos del cambio climático sobre la disponibilidad de agua.

1.2 ALCANCES GENERALES DEL ESTUDIO

A continuación, se especifican los alcances generales del estudio.

1.2.1 Descripción de la cuenca. Localización geográfica

Según lo establecido en las Bases Técnicas del estudio, la descripción de la cuenca consiste en una recopilación de antecedentes alrededor de la cuenca de estudio, con sus principales características geográficas, administrativas, económicas, sociales, y otros aspectos en torno al recurso hídrico y su gestión actual.

El presente estudio tiene alcance a nivel de cuenca; específicamente, se estudia la cuenca del río Huasco, en la región de Atacama.

1.2.2 Diagnóstico de la cuenca

Atendiendo a los objetivos específicos del estudio, se presenta la metodología para elaborar el diagnóstico de las cuencas de estudio, atendiendo a los siguientes aspectos:

- Oferta y demanda de agua, actual (2019) y futura (años 2030 y 2050);
- Infraestructura en materia hídrica;
- Gobernanza, principalmente enfocada en las OUAs; y
- Cartera de acciones, en su mayoría inversiones públicas.

Se expone la metodología aplicada para analizar cuantitativa y/o cualitativamente cada uno de los ítems expuestos anteriormente, de forma de tener una "radiografía" de la cuenca de estudio en los puntos indicados.

1.2.3 Modelación hidrológica

La modelación hidrológica, en el presente estudio, pretende alcanzar una herramienta que permita visualizar la dinámica de los flujos superficiales y subterráneos de las cuencas de estudio, a partir de los modelos numéricos existentes y facilitados por la DGA.

Mayor detalle del procedimiento de construcción y/o actualización de los modelos se entrega en el apartado Metodología aplicada a la modelación hidrológica.

1.2.4 Participación Ciudadana

En el presente documento se describe la metodología aplicada antes, durante y después de la realización de las actividades PAC, las cuales han consistido hasta la fecha en reuniones con actores relevantes de cada cuenca, y que pretenden retroalimentar el diagnóstico, y brindar información sobre problemáticas reales y potenciales soluciones en las zonas de estudio.

1.2.5 Formulación del Plan de Acción

El Plan de Acción tiene como alcance la elaboración de un portafolio con acciones o iniciativas enfocadas en la resolución de las principales brechas y/o problemáticas detectadas en el diagnóstico y reuniones PAC, apoyándose, en caso posible, en el modelo numérico para establecer posibles escenarios de gestión. El PEGH está dirigido tanto a la DGA como a otras instituciones que tengan relación con la materia hídrica de la cuenca.

1.3 ASPECTOS METODOLÓGICOS GENERALES

En el presente Anexo F se presentan las directrices metodológicas seguidas durante el estudio, abordando los siguientes aspectos:

- Revisión y análisis de antecedentes compilados a lo largo del estudio.
- Enfoque metodológico del estudio, considerando aspectos relativos a la caracterización y diagnóstico de la cuenca, procesos aplicados en el modelo hidrológico superficial-subterráneo, metodología ejecutada en el desarrollo de las actividades PAC, descripción metodológica de evaluación de las iniciativas del Plan, y finalmente, bases seguidas en la generación del SIG.

Estos puntos se detallan en los capítulos sucesivos.

CAPÍTULO 2 REVISIÓN Y ANÁLISIS DE ANTECEDENTES

La recopilación de antecedentes se enfocó en la búsqueda y el análisis de antecedentes de estudios bibliográficos y otros soportes digitales relativos al objetivo del estudio. Específicamente, lo anterior se aplicó a los antecedentes establecidos en las Bases Técnicas del estudio, complementándose con otros de interés, con foco en estudios propios de la cuenca del río Huasco.

2.1 RECOPIACIÓN DE ANTECEDENTES BIBLIOGRÁFICOS

Los antecedentes revisados y que han sido consultados en el desarrollo del presente estudio son aquellos compilados en el Anexo E; a cada uno de ellos se le ha realizado una ficha resumen con los principales resultados de interés referentes al objetivo del estudio, las que pueden ser consultadas en el mencionado anexo.

2.2 RESUMEN DE LA INFORMACIÓN RELEVANTE

A partir del análisis realizado durante la generación de las fichas resumen de los antecedentes, y de acuerdo a los objetivos del estudio, se establecieron los principales ejes de interés para la selección de la información relevante: modelación, participación ciudadana y cartera de acciones.

A continuación, se presenta un resumen de los principales antecedentes según la clasificación anterior.

2.2.1 Antecedentes relativos a modelación

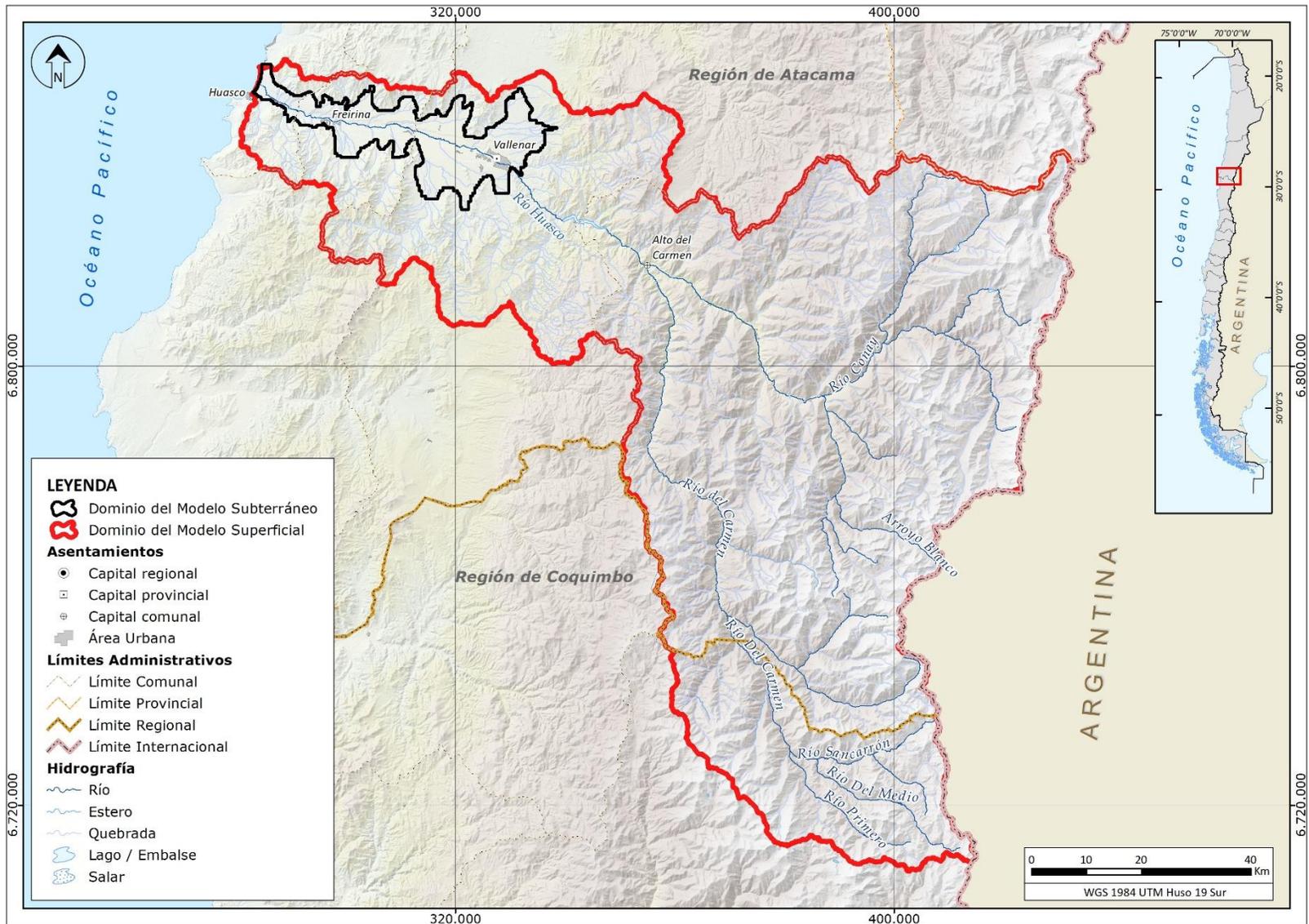
Inicialmente se debe indicar un breve resumen de los antecedentes clave para la actividad asociada a la modelación hidrológica. Lo anterior consiste, básicamente, en recopilar los modelos base y sus correspondientes estudios e informes que fueron considerados como base para el modelo del estudio.

En la Tabla 2.2-1 se presenta un resumen del levantamiento de modelos actualizados para la cuenca objeto de estudio y en la Figura 2.2-1 se presenta el dominio.

Tabla 2.2-1 Resumen de modelos existentes actualizados

Cuenca	Tipo modelo	Software	Autor/Elaborado por	Fecha
Huasco	Superficial	MAGIC	DGA/Knight Piésold S.A.	2013
	Subterráneo	VMF	DGA/Knight Piésold S.A.	2013

Fuente: Elaboración propia.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 2.2-1 Dominio modelos base superficial y subterráneo cuenca río Huasco

Respecto de la cuenca del río Huasco, el estudio “Análisis integrado de gestión en cuenca del río Huasco, Región de Atacama” (DGA, 2013a), presenta el desarrollo de un modelo numérico superficial, implementado en MAGIC, y la actualización del modelo de simulación hidrogeológico desarrollado en Visual Modflow. Dichos modelos se retroalimentaron, incorporando las recargas obtenidas en el modelo superficial, en el subterráneo.

Cada uno de estos estudios cuenta con una ficha resumen (Anexo E) y fueron considerados en la etapa de análisis crítico de modelos.

2.2.2 Antecedentes relativos a PAC

Como conclusión al proceso de revisión, cabe señalar que, de los informes de la cuenca del río Huasco, se destacan los listados de los actores sociales que han participado en las diversas iniciativas revisadas. Así mismo, también es de utilidad las metodologías utilizadas para el levantamiento de la información, tanto en talleres como entrevistas a directores y actores relevantes.

Respecto los antecedentes relevantes en aspectos de PAC, en la Tabla 2.2-2 se muestran los principales estudios con dicha componente.

Tabla 2.2-2 Listado de antecedentes relevantes de PAC

Ref	Documento	Año	Elaborado por	Autor
12	Modelo para la gestión hídrica de la cuenca del Huasco: Evaluación de caudal ambiental y valoración de servicios hidrológicos	2012	CAZALAC	GORE Atacama
16	Plan Regional de Infraestructura y Gestión del Recurso Hídrico al 2021. Región de Atacama	2012	DIRPLAN	MOP
20	Modelo de gestión de aguas sistema Huasco - embalse Santa Juana	2015	Víctor González Aravena	JdV Huasco
24	Diagnóstico para desarrollar Plan de Riego en cuenca de Huasco	2016	Universidad de Chile	CNR
31	Diagnóstico nacional de organizaciones de usuarios	2018	Universidad de Chile	DGA

Fuente: Elaboración propia.

El “Diagnóstico Nacional de Organizaciones de Usuarios” (DGA, 2018b) recopila información actualizada acerca de diferentes catastros referentes a las juntas de vigilancia y comunidades de agua a nivel nacional. Entre los productos de interés se encuentra la recopilación de antecedentes (acciones, usuarios y caudales) provenientes del RPOU, la comparación de estos a Catastros de Usuarios realizados en otros estudios, además de la identificación de algunas instancias embrionarias y la georreferenciación de OUA en formato *shapefile*. Esta información fue valiosa para la elaboración del mapa de actores y para caracterizar el estado actual de la cuenca.

Por otra parte, el estudio relativo a “Diagnóstico para desarrollar Plan de riego” en la cuenca de Huasco, del año 2016 y promovido por la CNR, desarrolla un proceso de participación ciudadana importante con los diferentes actores involucrados en la

temática hídrica, posee información valiosa en relación a mapas de actores involucrados y sus relaciones, identificación, descripción y análisis de éstos. En lo relativo a la metodología utilizada durante el desarrollo del plan (mesas de trabajo, validaciones, división de los subterritorios para la elaboración del diagnóstico, identificación de brechas y oportunidades de mejoramiento, etc.), aportaron información de gran utilidad para desarrollar el PEGH Huasco.

De los estudios revisados que están ligados a componente humano para la cuenca de Huasco, aun cuando algunos son más antiguos (año 2012), se destaca el hecho que en todos ellos hay alguna información que resultó pertinente, en especial los que dicen relación con la descripción y las características de los actores relevantes, como las juntas de vigilancia u organizaciones de usuarios de agua, y las formulaciones de necesidades expuestas en los procesos PAC correspondientes.

Cabe señalar también el aporte de los otros estudios indicados en la Tabla 2.2-2 relativo a entrevistas y reuniones con actores y las conclusiones relativas a las demandas y/o brechas ya identificadas por los usuarios en dichos procesos PAC.

En el Anexo I.1 se adjunta el análisis crítico de antecedentes respecto PAC en la cuenca de Huasco.

2.2.3 Antecedentes relativos a carteras de acciones

Dentro de la revisión de antecedentes, se ha prestado especial atención a aquellos estudios existentes que plantearon iniciativas o acciones en materia hídrica en las cuencas de estudio. En la Tabla 2.2-3 se presenta un resumen de los más relevantes.

Tabla 2.2-3 Listado de antecedentes relevantes con carteras de acciones en materia hídrica

Ref	Documento	Año	Elaborado por	Autor
16	Plan Regional de Infraestructura y Gestión del Recurso Hídrico al 2021. Región de Atacama	2012	DIRPLAN	MOP
24	Diagnóstico para desarrollar Plan de Riego en cuenca de Huasco	2016	Universidad de Chile	CNR
25	Análisis de requerimientos de largo plazo en infraestructura hídrica	2016	INH	MOP
29	Plan de embalses y otras obras de riego	2018	División de Riego	DOH
32	Análisis de requerimientos de largo plazo en infraestructura hídrica. Etapa II	2018	INECON	MOP
36	Transición Hídrica. El Futuro del Agua en Chile	2019	Fundación Chile	Fundación Chile
37	Transición Hídrica: El Futuro del Agua en Chile. Portafolio de Medidas, Acciones y Soluciones MAS Seguridad Hídrica	2019	Fundación Chile	Fundación Chile

Fuente: Elaboración propia.

Al respecto de los anteriores antecedentes, el "Plan regional de Infraestructura y gestión del recurso hídrico al 2021 Atacama" (MOP, 2012) pretendió mejorar la gestión, administración y protección integral del recurso hídrico; este documento se consideró

como referencia en la identificación de brechas y propuesta de soluciones, verificando cuales de ellas ya están actualmente en desarrollo o en fase de término. De forma análoga, el "Plan de Embalses y otras obras de riego" (DOH, 2018) aportó datos clave en la planificación de grandes obras.

Por otra parte, se consideraron las medidas propuestas en los "Diagnóstico para desarrollar plan de riego" en la cuenca de Huasco (CNR, 2016) como antecedente para las estrategias de gestión del presente estudio.

Los estudios de "Análisis de requerimientos de largo plazo en infraestructura hídrica" (años 2016 y 2018) analizan la realización de obras propuestas en las planificaciones del MOP y otros (DOH, Concesiones, CNR) desde el año 2000 y los problemas de su implementación. Además, revisan los proyectos realizados entre 2009 y 2015 con una planificación prospectiva a 2035, proponiendo una nueva prospectiva de los programas y/o proyectos estratégicos que sirva como marco para la elaboración del Plan Chile 30/30: Obras Públicas y Agua para el Desarrollo. Dichos estudios sirvieron para alimentar las estrategias de gestión a corto y mediano plazo del presente plan.

Los antecedentes de Fundación Chile "Transición Hídrica. El Futuro del Agua en Chile" y el "Portafolio de Medidas, Acciones y Soluciones MAS Seguridad Hídrica" (FCH, 2019a y 2019b) muestran la existencia de un abanico de medidas, acciones y soluciones para reducir la brecha hídrica y mitigar el riesgo hídrico. Estas iniciativas fueron consideradas dentro de los Planes de Gestión realizados, dada la información entregada de acuerdo a sus beneficios, limitaciones, impactos sociales y medioambientales, costos de inversión referenciales y ejemplos de su aplicación.

2.2.4 Otros antecedentes relevantes

Respecto de otros antecedentes relevantes en la cuenca del río Huasco, se pueden señalar los siguientes:

- "Reevaluación de los recursos hídricos subterráneos del acuífero del río Huasco aguas abajo del Embalse Santa Juana" (DGA, 2009b). Este informe es un trabajo complementario al estudio "Explotación Máxima Sustentable del Acuífero de Huasco" (DGA, 2007) SIT N° 131 y tuvo como objetivo evaluar el efecto que ejerce la regulación del embalse Santa Juana sobre el caudal de referencia del río Huasco (caudal con 85% de probabilidad de excedencia). Entre los resultados más relevantes de este estudio se encuentra el cálculo de volumen sustentable por cada sector.
- "Eficiencia Hídrica en la Región de Atacama: Evaluación de Brechas Identificadas a la Luz de la Experiencia Internacional" (CSIRO, 2016). Este estudio contempló identificar las mejores prácticas internacionales en materia de eficiencia hídrica que permita la posterior generación de nuevas ventajas competitivas en la Región de Atacama. Esto se realizó con un análisis transversal de diferentes herramientas de gestión, como la red hidrométrica y sistema para tomas de decisiones, al mismo tiempo que se estudiaron las brechas para los sectores de uso de agua predominantes en la zona: minería, agricultura y sanitarias. También permitió comparar cuantitativamente la actual gestión de recursos hídricos en la mediana

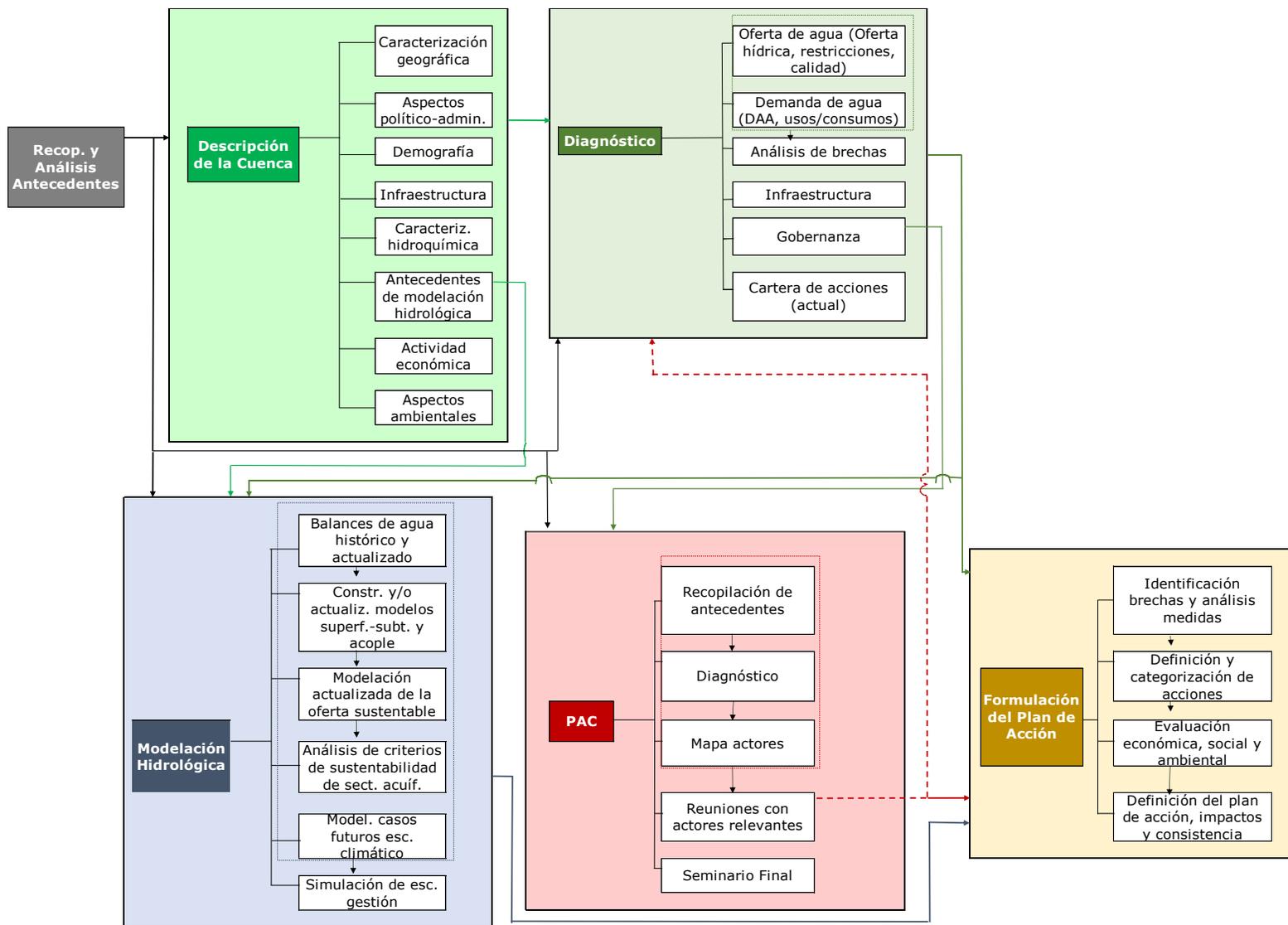
minería de la Región de Atacama respecto de las prácticas internacionales identificadas y homologables.

CAPÍTULO 3 ENFOQUE METODOLÓGICO DEL ESTUDIO

3.1 INTRODUCCIÓN

La base metodológica del presente estudio ha considerado el análisis de múltiples trabajos anteriores e información disponibles. No obstante, lo anterior, también cabe la necesidad de aplicar en el PEGH un enfoque estratégico e innovador, que trate de subsanar las falencias de planes anteriores, por lo que el Consultor ha puesto su énfasis en lo anterior, en especial en lo referente a la formulación del Plan de Acción.

En la Figura 3.1-1 se presenta un mapa conceptual de los temas abordados, con la finalidad de formular el Plan de Acción de la cuenca, presentando las relaciones metodológicas de las temáticas de análisis aplicadas en el estudio. Seguidamente, se presentan los aspectos metodológicos aplicados en las diferentes temáticas contempladas en el estudio según lo indicado en las Bases Técnicas.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.1-1 Mapa conceptual de la metodología aplicada

3.2 METODOLOGÍA APLICADA EN LA CARACTERIZACIÓN DE LA CUENCA

La metodología aplicada para elaborar la caracterización de la cuenca del río Huasco se ha basado íntegramente en el análisis de los antecedentes de estudios disponibles. Mayor detalle sobre éstos se compila en el Anexo E, en el que se adjunta una serie de fichas resumen, las cuales han sido de utilidad al momento de compilar y sintetizar la información relativa a la caracterización de la cuenca.

Específicamente, en la caracterización de la cuenca se abordaron los siguientes aspectos:

- Caracterización geográfica: geomorfología, geología, suelos, clima, hidrología superficial, subterránea y glaciar.
- Aspectos político-administrativos: división político-administrativa, caracterización de la cuenca, subcuencas y SHAC, OUA y otros actores relevantes de la cuenca.
- Demografía: caracterización de la población y abastecimiento de agua potable de la población.
- Actividad económica: valor de la producción regional, empleo regional por sector económico y principales actividades económicas en la cuenca.
- Infraestructura: embalses y centrales hidroeléctricas, infraestructura de riego, obras de abastecimiento de agua potable y tratamiento de aguas servidas, obras de defensa fluvial, red hidrométrica de la DGA, obras de recarga artificial de acuíferos y plantas de desalinización.
- Calidad del agua: caracterización hidroquímica de aguas superficiales y subterráneas.
- Aspectos ambientales: ecosistemas terrestres y de aguas continentales, áreas bajo protección oficial y otras figuras de conservación.
- Modelación hidrológica: antecedentes de modelación existentes.

La mayor parte de las características anteriores se estructuraron en los acápite enumerados a continuación, incluidos en el Capítulo 2 del Informe Final:

- Dimensión física y económica;
- Clima;
- Dimensión ambiental;
- Infraestructura;
- Nuevas fuentes de agua; y
- Gobernanza del agua.

Las características relativas a hidrología (superficial, subterránea, glaciar, y calidad de las aguas) así como división administrativa de carácter hidrológica se presentaron en el Capítulo 4 del Informe Final.

Las referencias bibliográficas que sustentan la información se presentan en el Anexo B.

3.3 METODOLOGÍA APLICADA EN EL DIAGNÓSTICO DE LA CUENCA

Seguidamente se presentan los aspectos metodológicos detallados aplicados en el diagnóstico de la cuenca, esto es, en relación a oferta y demanda de agua, infraestructura en materia hídrica, gobernanza de agua y la cartera de acciones de inversión pública en dicha materia, de acuerdo al mapa conceptual presentado en la Figura 3.1-1.

El diagnóstico relativo a la oferta de agua, el cual se presenta en el Capítulo 4 del Informe Final, comprende los siguientes aspectos:

- análisis de la disponibilidad de agua;
- estado histórico y actual en cuanto a restricciones al uso de las aguas; y
- análisis del estado de la calidad de las aguas superficiales y subterráneas.

Por su parte, los resultados de la estimación de la demanda de agua actual y proyección de demanda futura, para los diferentes usos y/o consumos productivos y otros, se presenta en el Capítulo 3 del Informe Final. Cabe señalar que en el Capítulo 3 del Informe Final se incluyen los resultados del análisis de DAA por uso, mientras que el Capítulo 4 del Informe Final se complementa con un análisis del mercado de aguas en la cuenca.

Respecto al análisis de infraestructura, se presentan los resultados de la recopilación de información secundaria, complementados con los aportes de las reuniones PAC generadas con actores relevantes de la cuenca durante el estudio.

Las principales problemáticas en torno a la gobernanza del agua en la cuenca se identifican en el Capítulo 2 del Informe Final, considerando brechas de coordinación y brechas de información.

Finalmente, el análisis de las carteras de acciones actuales, tanto públicas como privadas, en relación a los diferentes temas hídricos abordados en el PEGH se incluyen en el Capítulo 6 del Informe Final.

A continuación, se presenta la metodología seguida en cada uno de estos aspectos.

3.3.1 Oferta

Respecto de la oferta, se abordan en este apartado la oferta hídrica natural de la cuenca en diferentes puntos de la misma, así como restricciones vigentes en torno al uso del agua y un diagnóstico del estado de la calidad de las aguas superficiales y subterráneas.

3.3.1.1 Oferta de agua

La oferta hídrica se ha determinado a partir de los resultados de los modelos numéricos, considerando nula demanda. La información de caudal generado como oferta natural del sistema se presenta para las estaciones fluviométricas de cada cuenca.

Para la generación de la oferta al momento actual (año 2019) y proyección futura (años 2030 y 2050), se ha considerado tomar los siguientes criterios:

- Oferta año 2019: promedio entre 2009 y 2019;
- Oferta año 2030: promedio entre 2020 y 2030;
- Oferta año 2050: promedio entre 2040 y 2050.

Para mayor detalle de la obtención de la oferta hídrica en la cuenca, ver apartado relativo a Modelación Hidrológica.

3.3.1.2 Restricciones al uso

En cada cuenca se ha indagado sobre las restricciones al uso de agua existentes en sus diferentes figuras, dictadas por la administración pública. A continuación, se detallan cada uno de estos casos considerados.

- Declaración de agotamiento de aguas superficiales.

La declaración de agotamiento es un instrumento que dispone la DGA, facultad establecida en el Artículo 282 del Código de Aguas, para señalar que, en la fuente natural de agua superficial respectiva, sea un río, lago, laguna u otro, se agotó la disponibilidad del recurso hídrico para la constitución de nuevos derechos de aprovechamiento de aguas superficiales de tipo consuntivo y ejercicio permanentes. Esta declaración no impide la constitución de nuevos derechos de tipo no consuntivo o consuntivo de ejercicio eventual.

- Áreas de restricción de aguas subterráneas.

La declaración de área de restricción de aguas subterráneas (Código de Aguas 1981, Artº 65) es un instrumento utilizado por la Dirección General de Aguas para proteger Sectores Hidrogeológicos de Aprovechamiento Común (SHAC) donde exista grave riesgo de descenso en los niveles de agua con el consiguiente perjuicio a los derechos de terceros establecidos en él, o bien, cuando los informes técnicos emitidos por el Servicio demuestren que está en peligro la sustentabilidad del acuífero. Una vez emitida esta declaración, la DGA sólo podrá otorgar derechos de aprovechamiento con carácter provisional.

- Zonas de prohibición de aguas subterráneas.

La declaración de zona de prohibición (Código de Aguas 1981, Artº 63) es un mecanismo mediante el cual la Dirección General de Aguas protege la sustentabilidad de un acuífero. Esta declaración, a diferencia del área de restricción, se produce cuando la disponibilidad del recurso hídrico se encuentra totalmente comprometida tanto en carácter de definitivo como provisional, por lo que no es posible constituir nuevos derechos de aprovechamiento.

- Zonas de conservación.

Las zonas de conservación bajo protección oficial son las consideradas "áreas protegidas". Las áreas protegidas a nivel nacional son "porciones de territorio, delimitadas geográficamente y establecidas mediante un acto administrativo de autoridad competente, colocadas bajo protección oficial con la finalidad de asegurar la diversidad biológica, tutelar la preservación de la naturaleza o conservar el patrimonio ambiental". En la Figura 3.3-1 se muestra las áreas protegidas y su grado de homologación de la UICN (Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza). Además de las indicadas en dicha figura, a nivel internacional, existen otras figuras de conservación presentes en Chile: los Sitios Ramsar y las Reservas de la Biosfera.

Área Protegida / Categoría UICN	Ia	Ib	II	III	IV	V	VI
Parque Marino	■						
Reserva de Regiones Virgenes		■					
Parque Nacional			■				
Monumento Natural				■			
Santuario de la Naturaleza				■	■		
Reserva Forestal					■		■
Reserva Nacional					■		■
Reserva Marina					■		■
Áreas Marinas Costera de Múltiples Usos							■

Fuente: MMA (2020).

Figura 3.3-1 Áreas protegidas chilenas y su grado de homologación de UICN

- Decretos de reserva.

El Decreto de Reserva es una facultad del presidente de la República que permite, a través de un decreto fundado, 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; esta facultad está establecida en el Artículo 147 bis inciso 3º del Código de Aguas. Para lo anterior, es posible disponer la denegación parcial de solicitudes de derechos de aprovechamiento en tramitación.

- Decretos de escasez hídrica.

Los decretos de escasez, facultad establecida en el Artículo 314 del Código de Aguas, se dictan con el objeto de proveer determinadas herramientas a usuarios del agua y a la población en general para reducir al mínimo los daños derivados de la sequía.

Básicamente permiten a la DGA redistribuir las aguas disponibles en las fuentes naturales, en caso que no exista acuerdo entre los usuarios, y autorizar extracciones de aguas superficiales o subterráneas sin necesidad de constituir derechos de aprovechamiento de aguas, entre otras.

El Decreto de Escasez Hídrica del MOP no provee recursos económicos, y es independiente de atribuciones de otros Servicios, como la Declaración de Emergencia Agrícola del Ministerio de Agricultura, que sí considera aportes económicos; o la Declaración de Zona de Catástrofe por Escasez Hídrica del Ministerio del Interior, siendo efectivamente esta última declaración la que permite la contratación de camiones aljibes.

3.3.1.3 Estado de la calidad

Para efectuar el diagnóstico de la calidad de aguas, se utilizó la información que aporta la red hidrométrica DGA. Basándose en el estudio "Estimación de la demanda actual, proyecciones futuras y caracterización de la calidad de los recursos hídricos en Chile" (DGA, 2017a), se escogió toda aquella data proveniente de estaciones superficiales y subterráneas cuyas mediciones del parámetro específico se hubieran realizado entre los años 2000 y 2016; con el fin de evitar representaciones con sesgo por antigüedad de los datos (distorsiones por: precisión de mediciones muy antiguas, evolución temporal de factores antrópicos, cambios en la calidad/cantidad de descargas industriales, etcétera). A su vez, la totalidad de elementos presentes en las normas fueron filtrados, dejando fuera del análisis a los elementos que son comunes en la corteza terrestre u otros ambientes (rocas, aire o agua), aquellos que no representan un peligro o riesgo por aumento en su concentración, o que poseen una baja emisión antrópica.

Desde el punto de vista microbiológico, se utilizará la información de los parámetros "Coliformes Totales" y "*Escherichia coli*" de las fuentes de agua de la cuenca disponible y sistematizada en los formularios PR018002 "Calidad de Agua Cruda" de la SISS. para el periodo 2011-2019.

Adicionalmente, se complementa el análisis con otros antecedentes existentes sobre calidad de las aguas en la cuenca.

Conforme a lo anterior, los parámetros considerados son los indicados en la Tabla 3.3-1 a continuación:

Tabla 3.3-1 Parámetros considerados en el diagnóstico de calidad

Parámetros	Símbolo	Nombre
Metales	As	Arsénico
	Pb	Plomo
	Cu	Cobre
	Mo	Molibdeno
	Cr	Cromo
	Hg	Mercurio
	Zn	Zinc

Parámetros	Símbolo	Nombre
Inorgánicos	Cl ⁻	Cloro
	SO ₄ ²⁻	Sulfato
	NO ₃ ⁻	Nitrato
Físico-químicos	pH	pH
	CE	Conductividad Eléctrica
	SDT	Sólidos disueltos totales
Microbiológicos	CT	Coliformes totales
	E. COLI	<i>Escherichia coli</i>

Fuente: Elaboración propia

La razón de considerar estos parámetros en el análisis, por sobre el total de elementos presentes en la norma, es por su relación con actividades antrópicas. En el caso de los metales están los elementos tóxicos (As, Pb, Cr y Hg), como los elementos positivos en bajas concentraciones (Cu, Mo y Zn); en el caso de los parámetros inorgánicos, se consideraron aquellos con presencia en aguas residuales (Cl⁻ y SO₄²⁻) y aquellos con presencia en abonos o residuos industriales (NO₃⁻); parámetros físico-químicos que permitan su clasificación según la normativa chilena actual (pH, CE y SDT); y finalmente, parámetros microbiológicos (CT, *E. coli*), procedentes de contaminación antrópica. Además de estos, son mencionados algunos de los parámetros, con su notación presentada en la Tabla 3.3-2.

Tabla 3.3-2 Notación de otros parámetros mencionados

Símbolo	Nombre
Ca ²⁺	Calcio
Cd	Cadmio
Co	Cobalto
CO ₃ ²⁻	Carbonato
Fe	Hierro
HCO ₃ ⁻	Bicarbonato
K ⁺	Potasio
Mg ²⁺	Magnesio
Mn	Manganeso
Na ⁺	Sodio
NH ₄ ⁺	Amonio
Ni	Níquel
PO ₄ ³⁻	Fosfato
Se	Selenio
T°	Temperatura

Fuente: Elaboración propia

La información que se entrega en el presente estudio es proporcionada de forma separada, tanto a nivel de cuenca como de procedencia del recurso hídrico (superficial o subterráneo):

- Aguas superficiales, con base en la configuración de la red hidrográfica de cada cuenca y las estaciones hidrométricas correspondientes que proveen datos adecuados en calidad, cantidad y consistencia.

- Aguas subterráneas, con base en la delimitación física de las masas de agua existentes dentro de cada cuenca y los pozos de la red hidrométrica que proveen datos adecuados en calidad, cantidad y consistencia.

La evaluación de la calidad de las aguas se efectuó a través de contraste gráfico entre el comportamiento de cada parámetro (a nivel de estación) y los límites establecidos en las normas chilenas de agua potable (NCh 409/05) y riego (NCh 1333/78 lo anterior se utilizó gráficas tipo Box-Whiskers (Boxplot o gráfico de cajas). Estos diagramas se dividen según cuartiles, de manera que estos contengan el 25% (Q_1), 50% (Q_2) y 75% (Q_3) de los datos. El espacio entre Q_1 y Q_3 , se denomina "caja", y contiene la mitad central de los datos. La medida de la caja o diferencia entre $Q_3 - Q_1$ se denomina "rango intercuartílico (RIC)", mientras que el valor de Q_2 corresponde a la mediana. La media se denota como una "X", la cual se puede ubicar tanto dentro como fuera de la caja. Las barras de error o bigotes se extienden hasta los valores máximos y mínimos de la serie de datos, o hasta 1,5 veces el RIC. Cuando hay datos que se extienden más allá de 1,5 veces el RIC, estos corresponden a valores atípicos u outliers. Entonces, se definen como límite inferior (L_i) y límite superior (L_s) a los valores $Q_1 - 1,5 \times (RIC)$ y $Q_3 + 1,5 \times (RIC)$ respectivamente. Los diagramas fueron generados para cada uno de los parámetros analizados por estación, permitiendo determinar el cumplimiento de la normativa.

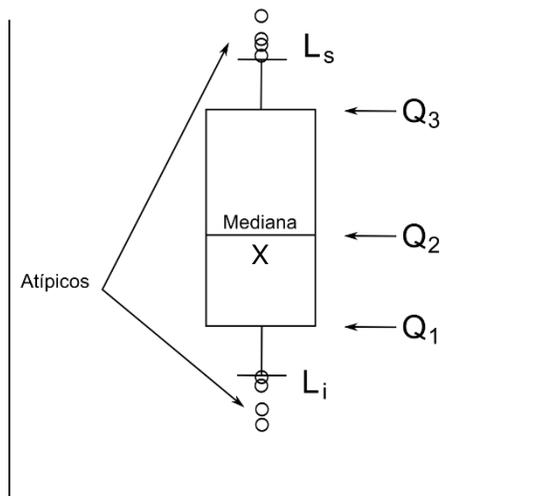


Figura 3.3-2 Esquema de un Diagrama Box-Whiskers

Fuente: Elaboración propia

Los diagramas fueron generados para cada uno de los parámetros analizados por estación. Fueron representados los estadísticos básicos permitiendo determinar el cumplimiento de normativa, datos atípicos, límite superior e inferior, entre otros.

La determinación de rangos de análisis para parámetros físico-químicos se presentan en la Tabla 3.3-3; también es usado el rango presente en la Norma de Calidad del Agua Potable (NCh 409/05) con límites de mínimo 6,5 y máximo 8,5 unidades para el pH.

Tabla 3.3-3 Rangos límites de parámetros CE y SDT

Clasificación	Rango	Conductividad Específica (c): mohos/cm a 25°C	Sólidos Disueltos Totales (s) mg/l a 105°C
Agua con la cual generalmente no se observarán efectos perjudiciales	C1	$c < 750$	$s < 500$
Agua que puede tener efectos perjudiciales en cultivos sensibles	C2	$750 < c < 1500$	$500 < s < 1000$
Agua que puede tener efectos adversos en muchos cultivos y necesita de métodos de manejo cuidadoso	C3	$1500 < c < 3000$	$1000 < s < 2000$
Agua que puede ser usada para plantas tolerantes en suelos permeables con métodos de manejo cuidadosos	C4	$3000 < c < 7500$	$2000 < s < 5000$

Fuente: Tabla N°2 de la Norma Chilena Oficial N°1.333 (NCh 1333/78) modificada.

3.3.2 Demanda

Respecto de la demanda, en primer lugar, se aborda el análisis de los Derechos de Aprovechamiento de Aguas (DAA) otorgados en la cuenca y su mercado de aguas; seguidamente, se estima las demandas de agua para los diferentes sectores productivos, así como otros usos del agua.

3.3.2.1 Análisis de Derechos de Aprovechamiento de Agua (DAA)

A continuación, se describe el proceso metodológico para el análisis diagnóstico de los Derechos de Aprovechamiento de Aguas (DAA) otorgados por la Dirección General de Aguas (DGA), y para el análisis del Mercado de los DAA en la cuenca del río Huasco.

El diagnóstico se estructura en 2 partes, con el siguiente detalle:

- Parte I: recopilación, análisis y sistematización de la información asociada a los DAA.
- Parte II: análisis del Mercado de los DAA.

Los resultados y análisis, a nivel de cuenca, se recopilan en el Informe Final de la cuenca del río Huasco.

Parte I: recopilación, análisis y sistematización de la información asociada a los DAA.

Con el fin de disponer de información validada y vigente para el estudio, se solicitó a la DGA un listado completo con los DAA subterráneas y superficiales concedidos a la fecha.

Este listado corresponde a la Planilla de DAA a nivel nacional facilitada por la DGA en fecha enero 2020. Información obtenida mediante solicitud formal a dicho organismo. Esta información fue contrastada y complementada con el Catastro Público de Aguas (CPA) (mantenedor de Expedientes y Derechos Concedidos, DGA), disponible en línea

en la página web del servicio, www.dga.cl. Del cruce de datos entre ambas fuentes, se verificó la información existente y actualizó aquellos registros que carecían de información.

Los pasos realizados para el análisis y sistematización de la información, se detallan a continuación:

1. Se revisó la información de DAA contenida en la base de datos proporcionada por la DGA, la cual debió ser contrastada y complementada con la información disponible en el CPA. En base a esto, se cuantificó el total de "DAA otorgados" y "Caudal" (L/s).

No fueron contabilizados aquellos DAA que si bien los registros indican se localizan dentro de las cuencas en estudio, al ser georreferenciados (según se detalla en el punto 3 de este apartado) se ubican fuera del límite de la cuenca.

En relación al "Caudal", las unidades indicadas en la base de datos proporcionada por la DGA y las indicadas por el CPA son l/s y/o Acciones, sin indicar una equivalencia oficial entre ambas. Dado lo anterior, se recabó información a partir de distintas fuentes, a fin de contar con una equivalencia y expresar los valores de caudal en una única unidad de l/s.

2. Se cuantificó el total de DAA y Caudal en función de las siguientes variables:
 - Naturaleza del DAA, esto es, superficial o subterráneo.
 - Tipo de solicitud, esto es:
 - Derechos de Aprovechamiento (ND) (artículos 130 y siguientes del Código de Aguas).
 - Regularización de Derechos (NR) (artículo 2º transitorio del Código de Aguas)
 - Derechos de Usuarios Antiguos (UA).
 - Ejercicio del derecho solicitado, esto es, consuntivo o no consuntivo.
3. Por último, en base al cruce de información descrito, se generó una cobertura SIG en formato shapefile para cada cuenca en estudio con información relativa a cada DAA. Cada proyecto corresponde a un archivo ArcGIS de extensión mxd.

Debido a los diversos sistemas de coordenadas (WGS84, PSAD56 y SAD69) encontrados en los registros de DAA, se debió estandarizar el sistema de referencia utilizado, para esto, se seleccionó el sistema UTM, Datum WGS84 Huso 19 sur. Aquellos datos con otro sistema de proyección, se re-proyectaron al sistema antes mencionado. De esta forma, fueron georreferenciados cada uno de los puntos de captación en su Datum de origen, y posteriormente estandarizados al sistema UTM, Datum WGS84 Huso 19 sur.

Este punto consideró solo DAA posibles de localizar. Para aquellos casos sin información de coordenadas y/o Datum, se procedió a revisar el CPA y su respectivo expediente en caso de contar con este.

Los atributos que componen los shapefile de DAA son todos aquellos registros disponibles en las bases de datos antes mencionadas. Esto con el objetivo de no eliminar información que pudiese ser requerida en futuros análisis.

A partir de las coberturas descritas anteriormente, se generó una figura con la distribución en cada cuenca de los DAA superficiales y subterráneos.

Parte II: análisis del Mercado de los DAA.

Para el diagnóstico del Mercado de los DAA en la cuenca del río Huasco se consideró la información contenida en la base de datos entregada por la DGA y que registra las transacciones informadas por los Conservadores de Bienes Raíces (CBR). Disponible en línea en la página web del servicio <https://snia.mop.gob.cl/ciudadaniacbr/>.

La metodología empleada se basó en el análisis de la información de transacciones efectivas de DAA en el mercado y cuyo resultado corresponde al estimado de transacciones y su evolución en el tiempo, de modo general y por uso asignado. De esta manera, se trabajó con las transacciones informadas por los CBR con jurisdicción en las comunas que integran la cuenca del río Huasco. El periodo relevante considerado en este estudio comprendió toda la data de transferencias informadas por los respectivos CBR. Los CBR considerados para el análisis fueron:

Cuenca del río Huasco:

- CBR Vallenar: comunas de Alto del Carmen y Vallenar.
- CBR Freirina: comunas de Freirina y Huasco.

Los pasos realizados para el análisis y sistematización de la información del Mercado de los DAA se detallan a continuación:

1. Depuración de las Base de Datos

La información sobre las transacciones de DAA fue sometida a un proceso de depuración, de acuerdo al procedimiento indicado en el estudio "Análisis de Mercados de Derechos de Aprovechamiento de Aguas en Chile", SIT N.º 438, diciembre 2018, a fin de identificar y aislar datos inconsistentes. Las transacciones excluidas fueron aquellas con las siguientes características:

- Imposibilidad de identificar el tipo de naturaleza del DAA
- Imposibilidad de identificar el tipo de ejercicio del DAA
- Imposibilidad de identificar el mercado a la cual pertenece la transacción DAA
- Inexistencia de información de caudal
- Imprecisión en el monto de la transacción
- Transacciones diferentes a compraventa
- Transacciones en conjunto con otros bienes
- Transacciones entre parientes

- Agrupación de observaciones que no presenten diferencias en la fecha de inscripción, comprador, vendedor y mercado relevante

2. Sistematización y presentación de la información

Sobre la base depurada se realizó el análisis del Mercado de los DAA, análisis que se presenta de la siguiente manera:

- a. Situación histórica y evolución de transacciones de DAA en la cuenca.
A partir de la información histórica de transferencia de DAA, entregada por los CBR, se cuantifico el número total de transferencias efectuadas junto a los caudales comprometidos a lo largo de todo el periodo informado. Se presenta también, su distribución anual.
- b. Análisis de fluctuación de los DAA según la finalidad de uso por sector económico.
Los usos asignados a cada inscripción de DAA, fueron aproximados a partir del nombre del comprador y vendedor. De esta manera, fueron identificados los principales usuarios dentro de cada área estudiada. Para el resto de los usuarios se establecieron dos categorías a partir de los nombres de los titulares de los derechos: Particulares y Empresas.

El resultado del análisis presenta el total de transacciones de DAA efectuadas durante todo el periodo informado por los CBR respectivos en función del uso asignado a cada inscripción, así como también, el cambio en los usos de agua relacionados a los DAA a lo largo del último periodo estudiado. Se presenta también los principales usuarios compradores de DAA haciendo un análisis de las transferencias más frecuentes (intrasectoriales e intersectoriales) de DAA.

- a. Estimación del valor único de litros por segundo (l/s) por sector económico.
Para la estimación del valor único de litros por segundo (l/s) por sector económico, se utilizó como referencia la metodología que la Superintendencia de Servicios Sanitarios (SISS) utiliza para la estimación del valor de los derechos de aprovechamiento de aguas en los procesos tarifarios que se llevan a cabo cada 5 años y que se encuentra plasmada en el estudio "Análisis de Mercados de Derechos de Aprovechamiento de Aguas en Chile", SIT N.º 438, diciembre 2018.

Conforme a lo anterior, el análisis fue desarrollado para los siguientes derechos de aprovechamiento de aguas:

- a. Derechos de agua consuntivos, continuos y permanentes;
- b. Derechos no consuntivos permanentes y eventuales;
- c. Derechos consuntivos eventuales.

El análisis fue circunscrito a los sectores económicos identificados y de acuerdo a la base de datos entregada por la DGA y que registra las transacciones informadas por los Conservadores de Bienes Raíces (CBR). La metodología usada por SISS establece que la estimación del valor único de litros por segundo (l/s) de una fuente de abastecimiento o mercado se realiza sobre la base de información efectiva de transacciones de derechos de aprovechamiento de aguas (DAA).

La información sobre las transacciones de DAA fue sometida a un proceso de depuración, el que corresponde al indicado previamente, para aislar los datos inconsistentes. Asimismo, se revisó que las inscripciones consideradas para la estimación de precios de mercado de DAA dispusieran de los antecedentes correspondientes para asegurar una estimación fidedigna. Los criterios utilizados para la estimación se muestran a continuación:

- a. Tipo de transacción: compraventa;
- b. Naturaleza del derecho: subterráneo y superficial, dependiendo del caso;
- c. Tipo de derecho; consuntivo y no consuntivo;
- d. Tipo de ejercicio; permanente y continuo;
- e. Caudal: volumen por unidad de tiempo;
- f. Valor total de la transacción: monto en pesos y UF.

Asimismo, sobre la base de la información disponible se identificaron y excluyeron las inscripciones que no dispusieron de las especificaciones indicadas. Una segunda etapa del proceso de sistematización de la información implicó la identificación y exclusión de los valores atípicos. Tal como lo requiere la propia metodología de SISS, una vez depurada la base de datos, se deberá realizar un análisis de identificación de valores atípicos en relación a la distribución del precio unitario de l/s. En este proceso de eliminación de valores atípicos se dejaron fuera de la muestra final las estimaciones de aquellos valores con errores y con información duplicada.

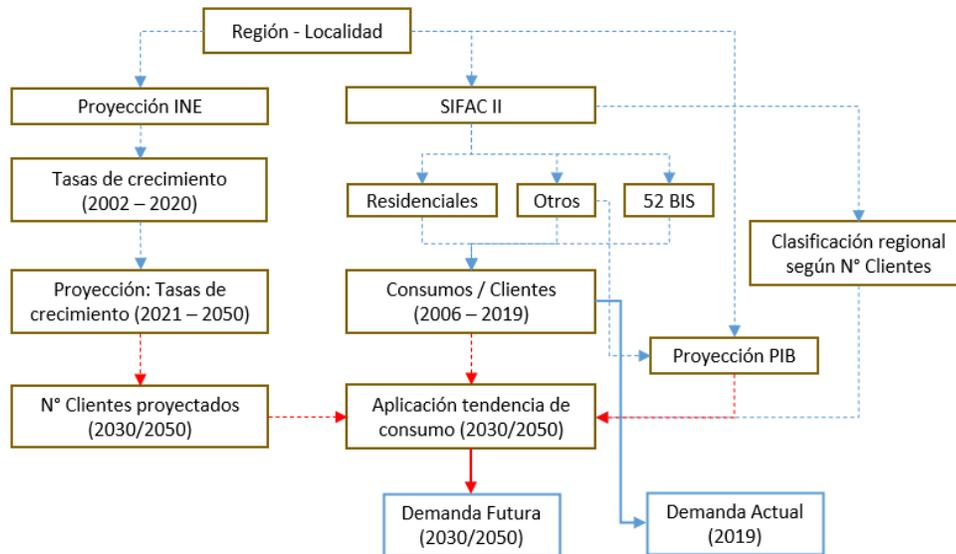
Una vez depurada la base de datos, la estimación de los precios de mercado fue realizada usando los tres estadígrafos de más amplio uso en el análisis estadístico: la media, la media ponderada por caudal y la mediana.

3.3.2.2 Estimación de demanda hídrica actual y proyección futura

Este punto se desarrollará teniendo como referencia principal (pero no excluyente) el documento "Estimación de la demanda actual, proyecciones futuras y caracterización de la calidad de los recursos hídricos en Chile" (DGA, 2017a), el cual realiza un diagnóstico desagregado de las demandas de agua actual (año 2015) y proyecciones futuras (años 2030 y 2040), a nivel de subcuencas. En aquel estudio se encuentra el detalle tanto de los antecedentes como la metodología para el cálculo de la demanda actual y futura para los distintos rubros y/o actividades económicas. La metodología desarrollada en este documento es adaptable a cualquier unidad territorial, en este caso se adoptó a nivel cuenca, calculando la demanda de agua actual (año 2019) y proyecciones futuras (años 2030 y 2050).

i. Agua potable urbana

El análisis de la demanda de agua potable urbana se refiere a la necesidad de agua para consumo humano en los núcleos urbanos de Chile abastecidos a través de las empresas sanitarias, reguladas por la Superintendencia de Servicios Sanitarios (SISS). Para crear una imagen general de la metodología y las fuentes de información para llevarla a cabo, la Figura 3.3-3 esquematiza los procesos que serán descrito más adelante.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.3-3 Esquema general de la metodología para estimación de demanda actual y futura de Agua Potable Urbana

A partir de listado de empresas sanitarias que se obtiene de la SISS se estructura la búsqueda de antecedentes históricos, utilizando para esto las bases de datos presentadas en el Sistema de Facturación y Coberturas (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 ($m^3/año$) y número de clientes, por cada localidad donde las empresas sanitarias entregan sus servicios.

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.

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 cuenca, primero se analiza a nivel subcuenca, se utilizan los shapefile de territorios operacionales de cada empresa y de subcuencas, realizando una intersección entre ambas capas. 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 y cuenca, separando en consumo "Residencial" y consumo "Otros".

De acuerdo a los tres tipos de clientes detectados, la metodología para estimar la demanda total de agua potable en el futuro, se constituye principalmente por la proyección de la población utilizando la información INE del último censo como base para proyectar los clientes residenciales, mientras que adicionalmente se utiliza los registros históricos del PIB regional correspondiente a cada cuenca para proyectar los clientes categorizados como "otros".

ii. Agua potable rural

Para el caso de la demanda de agua potable rural (APR), se utilizó la metodología y los datos reportados en el último estudio "Sustentabilidad de asentamientos humanos rurales en Chile. Análisis desde los comités de agua potable rural – Cuenca Huasco y Quebrada Totoral (y costeras hasta Quebrada Carrizal)" del año 2019. La Figura 3.3-4 extrae la porción de la metodología del estudio mencionado con la cual se estima la demanda actual y futura, cabe mencionar que si bien los resultados se indican hasta el año 2040, es posible a través de la misma metodología extender la estimación hasta el año 2050.



Fuente: Modificado a partir de DGA-DOH, 2019.

Figura 3.3-4 Extracto de la metodología para la estimación de la demanda actual y futura de Agua Potable Rural

iii. Agrícola

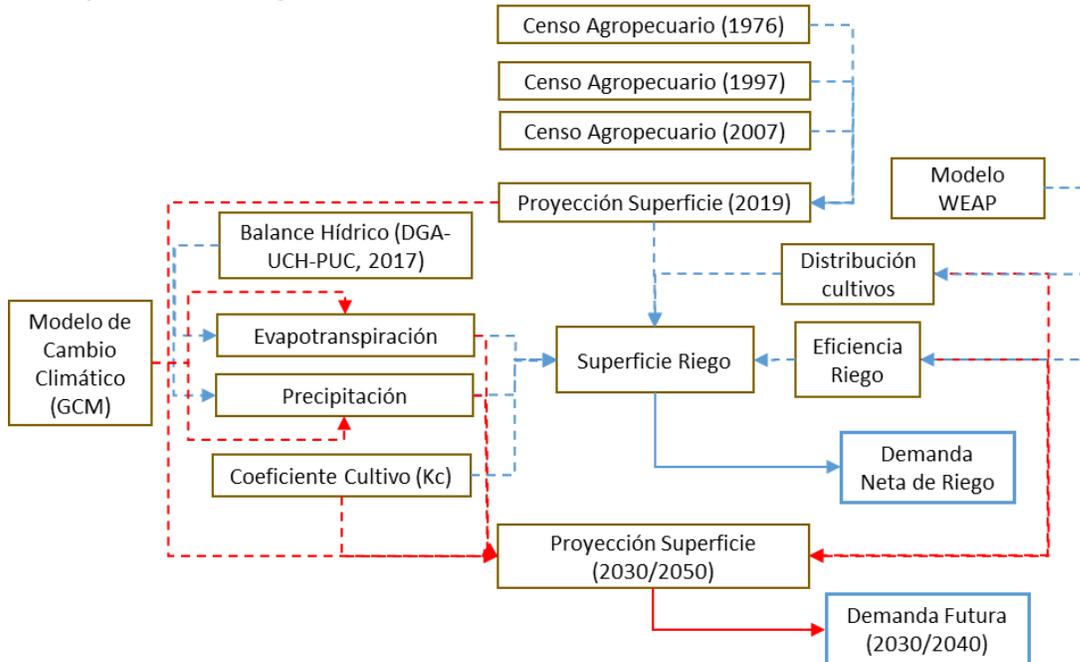
La demanda del sector agrícola constituye un aspecto de análisis importante en la elaboración de un modelo de gestión hídrica. Tanto los modelos hidrogeológicos como también los hidrológicos, incorporan de alguna forma la interacción de las zonas agrícolas con los sistemas hídricos.

Para este diagnóstico, se tomará la base metodológica del estudio de demandas (DGA, 2017a) y se adaptará a la nueva información existente que es parte de los inputs para cuantificar la estimación, como también se ajustará a las necesidades y estructura del modelo WEAP base que se utilizara en cada cuenca. De esta forma, se incluirá la siguiente información para lograr una óptima y ajustada estimación:

- Balance Hídrico (DGA, 2017b), tendencia histórica de evapotranspiración y series históricas de precipitación en la superficie abarcadas por las cuencas analizadas.

- Evapotranspiración de referencia (AGRIMED, 2015).
- Estructura de datos extraídos del modelo WEAP base empleado para el estudio de cada cuenca.
- Series de evapotranspiración y precipitación proyectadas a partir de modelos de cambio climático.

A partir de la información analizada en los Censos Agropecuarios existentes y otras fuentes oficiales de información (estadísticas de ODEPA, catastros frutícolas del CIREN, catastro vitícola del SAG) se proyectaron las áreas de los principales cultivos en cada distrito, adaptando esta información según la estructura y organización de cada modelo WEAP. Posteriormente, utilizando la evapotranspiración de referencia (AGRIMED, 2015) como dato principal en el periodo comprendido por este, se ajustó según la tendencia de las series del Balance Hídrico y las series obtenidas de los modelos de cambio climático. El coeficiente de cultivo (Kc) se actualizó según criterios del consultor, mientras que los porcentajes de eficiencia en el riego fueron ajustados según lo implementado en los modelos WEAP. De manera gráfica se presenta el siguiente esquema en la Figura 3.3-5.



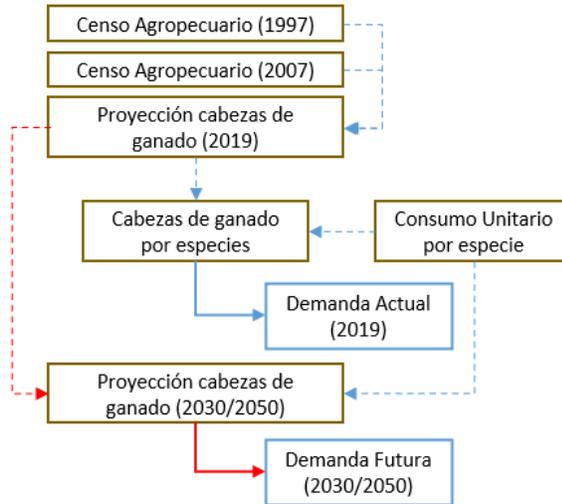
Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.3-5 Esquema general de la metodología para estimación de demanda actual y futura de Uso Agrícola

iv. Pecuaria

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 y especies minoritarias).

Para crear una imagen general de la metodología y las fuentes de información para llevarla a cabo, la Figura 3.3-6 esquematiza los procesos que serán descrito más adelante.



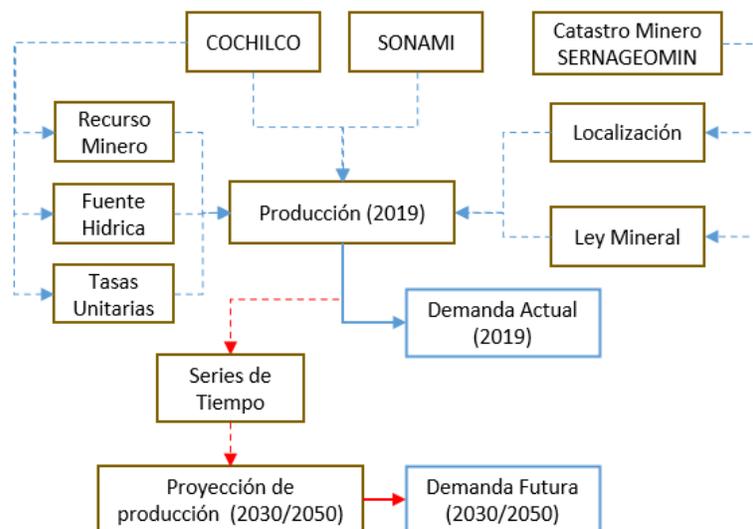
Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.3-6 Esquema general de la metodología para estimación de demanda actual y futura de Uso Pecuario

Para actualizar las cifras de ganado a la fecha de referencia actual (año 2019), se determina la tendencia complementándose con una fuente de información adicional, las encuestas de ODEPA obtenida de las estadísticas productivas de su sitio web.

v. Minera

Para crear una imagen general de la metodología y las fuentes de información para llevarla a cabo, la Figura 3.3-7 esquematiza los procesos que serán descrito más adelante.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.3-7 Esquema general de la metodología para estimación de demanda actual y futura de Uso Minero

Para determinar la demanda del uso minero, fue necesario identificar las faenas mineras de las cuales se cuenta con información de producción (según Catastro Minero 2016) y, que además correspondan al recurso minero considerado en la metodología. Una vez identificadas las faenas, se utilizan las tasas unitarias de consumo que corresponda y los datos de la ley mineral, para efectuar la estimación de la demanda. Además, se identificaron, aparte, las faenas mineras que hacen uso de agua de mar desalada para incorporar a sus procesos. Es importante destacar que el valor de la demanda minera se asocia a la cuenca donde se ubica la faena minera.

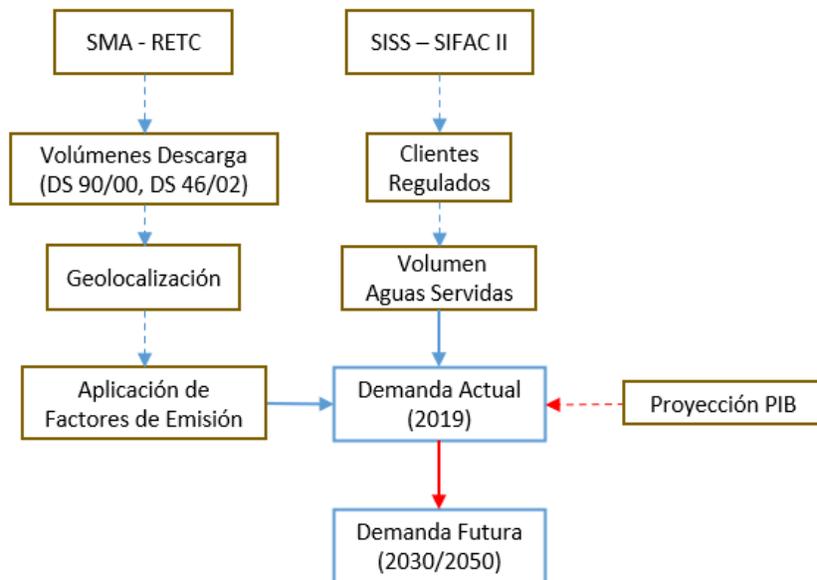
Para actualizar los datos de producción a la actualidad, se utilizó el último "Anuario de la minería de Chile" correspondiente al año 2018.

Finalmente, para estimar la demanda futura, se proyectaron las series de tiempo (históricas) de producción en las faenas previamente identificadas y seleccionadas. 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).

vi. Industrial

La estimación de la demanda para el uso industrial está constituida por dos fuentes de información. La primera proviene de los registros de la Superintendencia de Medio Ambiente a través del sistema de ventanilla única RETC, donde se obtiene la localización de los puntos de descarga y los registros de caudales de RILes asociados a dichos puntos. De esa forma, clasificando las empresas según su rubro, se aplican los factores de emisión y se estiman el consumo de agua. Además, se cuenta con los registros de la SISS en el SIFAC II de volúmenes de descarga al alcantarillado por parte de las industrias. Cabe mencionar que los factores efluente/demanda empleados son obtenidos de "Industrial Water Use - Statistics Canada" (Canadá, 2011).

Para la proyección de la demanda se consideró la información disponible tanto del RETC como del SIFAC II y se determinó una correlación con la proyección del PIB de la industria manufacturera de cada región según corresponda. En la Figura 3.3-8 se puede ver un diagrama general de la metodología de cálculo de demanda de agua para uso industrial.



Fuente: Elaboración propia

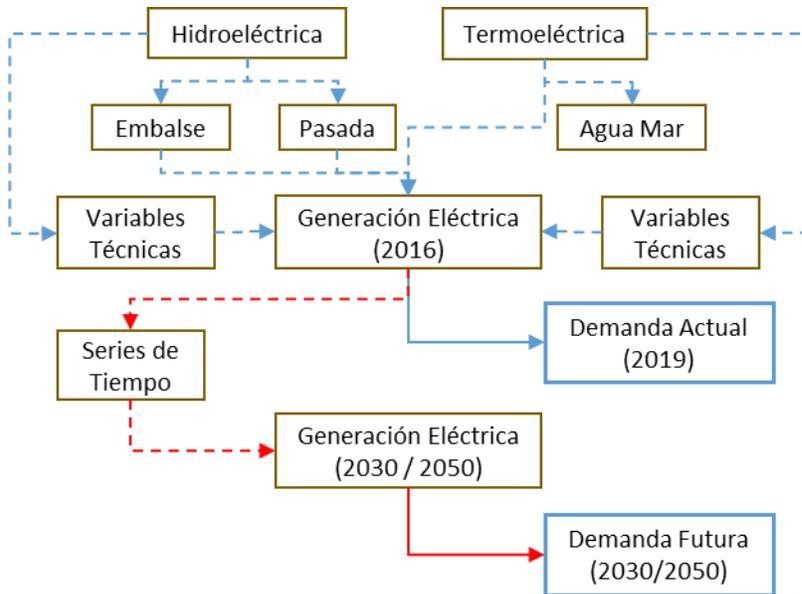
Figura 3.3-8 Esquema general de la metodología para estimación de demanda actual y futura de Uso Industrial

vii. Generación Eléctrica

La estimación de la demanda asociada a la generación de energía eléctrica consistió en la identificación de las centrales hidroeléctricas de embalse o pasada y termoeléctricas, que tienen una demanda intensiva de agua para la generación, ya sea un uso directo o indirecto. También se identificaron las centrales termoeléctricas que utilizan agua de mar para sus procesos. A partir de este filtro previo, se estima la demanda para cada tipo de central por separado, considerando como variables las características técnicas relevantes de cada una, tales como: tipo de turbina, altura de

operación, altura de caída, potencia instalada y tipo de combustible. Cabe mencionar que la demanda puede ser consuntiva o no consuntiva, según el tipo de central.

Para la proyección de la demanda, se utilizaron las series de tiempo de datos históricos para estimar las demandas futuras de generación eléctrica. A partir de estos nuevos registros de generación más el resto de variables utilizadas en la estimación de demanda actual, se obtiene la demanda futura. En la Figura 3.3-9 se puede ver un diagrama general de la metodología de cálculo de demanda de agua para uso de generación eléctrica.



Fuente: Elaboración propia.

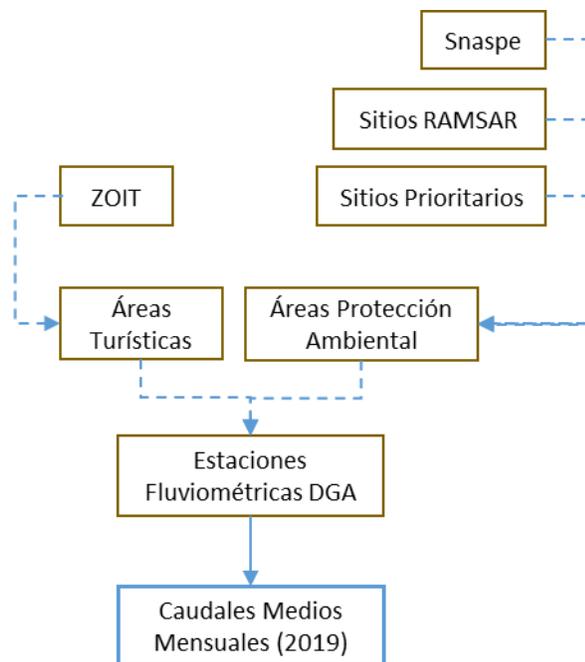
Figura 3.3-9 Esquema general de la metodología para estimación de demanda actual y futura de Uso Eléctrico

viii. Uso Turístico y Caudal de Protección Ambiental

El establecimiento de caudales de reserva 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.

Por otro lado, 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.

Para crear una imagen general de la metodología y las fuentes de información para llevarla a cabo, la Figura 3.3-10 esquematiza los procesos que serán descrito más adelante.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.3-10 Esquema general de la metodología para estimación de demanda actual y futura de Uso Turístico y Protección Ambiental

Se determinarán caudales medios mensuales para probabilidades de excedencia de un 20% y 50%, tal como se identifica en el estudio “Análisis de Metodología y Determinación de Caudales de Reserva Turísticos”, (DGA, 2010), los cuales cumplen 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 las zonas de interés turístico (ZOITs).

La demanda o caudal de reserva turística futura tiene que ver directamente con posibles declaraciones de Zonas de Interés Turística por parte de Sernatur. 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 de reserva para uso turístico actual.

Por otra parte, en informes desarrollados en conjunto con la DGA, se procedió a fijar el monto de caudal a reservar para protección ambiental, en donde 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 y de esta manera mantener prácticamente inalterada la magnitud, frecuencia, y duración del régimen hídrico.

Obteniéndose de esta manera la relación que se ocupara en los cálculos:

- Caudal de reserva para la protección ambiental:

$$Q_{\text{reserva ambiental}} = Q_{\text{prob.de excedencia 20\%}} - Q_{\text{ecológico}}$$

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 cuenca identificando una estación fluviométrica de referencia de la red hidrométrica de la DGA en cada caso.

La demanda o caudal de reserva 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. Así para aquellas zonas de protección futuras y que tuviesen asociado un curso de agua, realizó el cálculo del caudal de reserva respectivo, de la misma forma que el caudal de reserva para uso protección ambiental actual.

3.3.3 Infraestructura

La metodología seguida en el diagnóstico de la infraestructura hídrica dependerá en gran medida del nivel de detalle de la información disponible en cada ámbito, en relación con las obras que potencialmente podrían mejorarse y/o construirse en aras de optimizar la gestión del recurso hídrico.

No obstante, se analizarán las características y posibles falencias en lo referente a:

- Obras de acumulación
- Infraestructura de riego
- Obras de defensa aluvional y crecidas
- Obras de abastecimiento de agua y tratamiento de aguas servidas
- Obras de recarga artificial de acuíferos
- Plantas de desalinización
- Red hidrométrica de la DGA

3.3.4 Gobernanza

El diagnóstico de gobernanza se realizó sobre la base de antecedentes públicos y privados disponibles para cada cuenca, así como la información aportada a raíz de las reuniones de Participación Ciudadana.

Seguidamente se detalla la metodología específica aplicada para el análisis de las OUAs y para el análisis de experiencias internacionales de gobernanza de agua.

3.3.4.1 Análisis de las OUAs

A continuación, se presenta una breve descripción de las referencias consideradas para el correspondiente análisis:

- Registro Público de Organizaciones de Usuarios (RPOU, 2020)
- Correspondiente a la información publicada <en línea¹> por DGA, correspondiente al estado legal de las OUA en la cuenca, acciones y n° de usuarios.

Diagnóstico para desarrollar Plan de Riego en cuenca de Huasco (CNR, 2016): Con el objetivo de elaborar un plan de gestión de las aguas de riego y drenaje de la cuenca de Huasco; este estudio presenta un análisis de las organizaciones de usuarios de agua presentes en la cuenca, enfocada en el área organizacional-administrativa. También incluye los listados de los usuarios de agua participantes en la Junta de Vigilancia del río Huasco, correspondientemente; esta información permite tener un punto de referencia respecto del número de canales existentes en las cuencas, y que se encuentran asociados a una comunidad de agua conformada. Otro tipo de información que es parte de los estudios, son los documentos administrativos de algunas OUA: estatutos, inscripción de dominio de aguas, sentencias, entre otros; estos antecedentes son útiles en el análisis del estado legal y presupuestario de las diferentes organizaciones.

Diagnóstico Nacional de Organizaciones de Usuarios (DGA, 2018b): La información de este estudio se obtiene en dos (2) etapas: análisis de coberturas *shapefiles* y análisis de documentos. El análisis de coberturas se realiza en base a los atributos descritos en el acápite 3.2.2, referente a los aspectos políticos-administrativos de la cuenca. Para el análisis de documentos se utilizan las bases de datos correspondientes a:

- listados de expedientes DGA para cada tipo de OU: Juntas de Vigilancias (JV); Asociaciones de Canalistas (AC); Comunidades de Agua Superficiales (CA) y Subterráneas (CAS);
- datos de regularización de OUA;
- y caracterización de instancias embrionarias.

Páginas web oficiales: A partir de la información pública disponibles en las páginas web oficiales de cada OU, fue posible obtener información relacionada a la estructura organizacional de las OU; actualización de proyectos y estudios; datos administrativos; jurisdicción, entre otros. A continuación, se muestran los enlaces disponibles pertenecientes a las diferentes OUA:

- Junta de Vigilancia Río Huasco: <https://www.riohuasco.cl/> (última visita: 26 de octubre de 2020)

Una de las principales actividades realizadas en esta etapa fue identificar las OUA efectivamente existentes en la cuenca, para esto se utilizó como base los listados de expedientes DGA y la información entregada por la cobertura *shapefile* de canales, de ahora en adelante denominado SIIR, provenientes del estudio de diagnóstico (DGA, 2018b). Los canales SIIR se clasificaron en tres (3) subgrupos:

¹ Ver RPOU <en línea> <https://dga.mop.gob.cl/administracionrecursoshidricos/OU/Paginas/default.aspx>

- Canales con OU conformadas y con jurisdicción identificada: correspondientes canales con OU inscritas en DGA (con expediente) y con jurisdicciones claramente identificadas.
- Canales con OU conformadas y sin jurisdicción identificada: correspondientes a canales con OU inscritas en DGA (con expediente), y que, debido a falta de información, no fue posible definirles una clara jurisdicción legal; sin embargo, sí pudieron ser asociadas a un canal existente, considerando el nombre de la OU, el nombre del canal y la fuente hídrica de captación.
- Canales sin conformar: canales sin resolución aprobada de DGA y cuyas jurisdicciones no fueron identificadas.

También se identificaron aquellos canales que se encontraban en los listados de resoluciones aprobadas por DGA, pero que no lograron asociar a canales presentes en la cobertura SIIR.

3.3.4.2 Instancias actuales de relación entre actores

La caracterización del estado actual de coordinación entre actores, se centra en tres aspectos:

1. Sociograma de redes de actores relevantes, con el cual demuestra lo conectados que se encuentran los actores convocados, destacando las redes de los actores públicos con los actores privados (para mayor detalle ver Acápite 3.5.5.4 ii).
2. Relación entre actores relevantes, cuyo análisis se realizó a partir de la información obtenida desde las reuniones de Participación Ciudadana realizadas en este estudio, con lo cual fue posible identificar dos ámbitos relevantes para los que se analiza en detalle las relaciones de interés entre actores: agua potable (tanto urbana como rural) y riego (para mayor detalle ver Acápite 3.5.5.4 i).
3. Instancias de relación entre actores, en donde se describen las distintas instancias o mesas de trabajo, donde los actores se reúnen para planificar, coordinar o resolver conflictos relacionados a temas hídricos. Esta definición se realizó a partir de información proveniente de las reuniones PAC realizadas para el presente estudio y otras fuentes secundarias señaladas en el Plan Estratégico.

3.3.4.3 Análisis de experiencias internacionales de gobernanza de agua

En el análisis de experiencias internacionales realizado, se presenta un breve análisis de las principales características de la gobernanza internacional en materia hídrica. Específicamente, se presenta una descripción de la gobernanza hídrica enfocada en los casos de España, California y Australia, ya que estos países presentan cierto grado de similitud con Chile en características climáticas, de usuarios y/o de gestión del recurso, según el caso.

En este análisis se realizó una comparativa cualitativa del funcionamiento en materia hídrica en estos países en relación a lo establecido en el documento "Principios de

Gobernanza del Agua” (OCDE, 2015a). En la Figura 3.3-11 se presenta la visión general de los mencionados Principios principales, donde:

1. Efectividad de la gobernanza del agua: se refiere a la contribución de la gobernanza en definir metas y objetivos sostenibles y claros de las políticas del agua en los diferentes órdenes de gobierno, en la implementación de dichos objetivos de política y en la consecución de las metas y objetivos esperados.

2. Eficiencia de la gobernanza del agua: se refiere a la contribución de la gobernanza en maximizar los beneficios de la gestión sostenible del agua y el bienestar, al menor costo para la sociedad.

3. Confianza y participación en la gobernanza del agua: se refieren a la contribución de la gobernanza en la creación de confianza entre la población, y en garantizar la inclusión de los actores a través de legitimidad democrática y equidad para la sociedad en general.



Fuente: OCDE (2015).

Figura 3.3-11 Visión general de los Principios de la Gobernanza del Agua

Finalmente, se presenta un breve análisis centrado en las tres dimensiones presentadas por OCDE (2015a) y algunas de las lecciones identificadas para alcanzar una gobernanza eficiente, eficaz e incluyente en Chile y en la cuenca en cada dimensión.

3.3.4.4 Estado actual de información para la gobernanza

La caracterización del estado actual de información para la gobernanza, se centró en dos (2) aspectos:

1. Estado de información sobre Organizaciones de Usuarios y Derechos de Aprovechamiento de Aguas, en las cuales se describe brevemente el tipo de información disponible en catastros públicos y la calidad del su registro, como,

por ejemplo, el correcto registro de las características esenciales de los DAA o la apropiada validación de los DAA como base para la conformación de OUAs. Esta definición se realizó a partir de información proveniente de las reuniones PAC realizadas para el presente estudio y el Catastro Público de Aguas.

2. Herramientas de información hídrica, en la cual se listan las plataformas y redes hidrométricas disponibles en la cuenca y una breve descripción de su estado.

3.3.4.5 Síntesis de brechas de coordinación

La síntesis se realizó en base a los resultados del análisis realizado respecto a las Organizaciones de Usuarios de Agua, la caracterización del estado actual de coordinación entre actores y las lecciones aprendidas desde el análisis internacional. Se debe considerar que dentro de estos análisis se incluyen los problemas y necesidades expresadas por los actores convocados a las reuniones PAC; y presentadas en la síntesis de las reuniones PAC del Plan.

3.3.4.6 Síntesis de brechas de información

La síntesis se realizó en base a los resultados del análisis realizado respecto a las Organizaciones de Usuarios de Agua, la caracterización del estado actual de coordinación entre actores y las lecciones aprendidas desde el análisis internacional. Se debe considerar que dentro de estos análisis se incluyen los problemas y necesidades expresadas por los actores convocados a las reuniones PAC; y presentadas en la síntesis de las reuniones PAC del Plan.

3.3.5 Cartera de acciones

El análisis diagnóstico de las acciones e iniciativas de inversión pública en materia hídrica en la cuenca del río Huasco se realizó a través de la información disponible en el Banco Integrado de Proyectos (BIP) del Ministerio de Desarrollo Social y Familia (MIDESO), el cual contiene información de diversas instituciones públicas, tales como la Comisión Nacional de Riego (CNR), la Dirección de Obras Hidráulicas (DOH), el Ministerio del Medio Ambiente (MMA), el Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN), entre otras.

Los resultados de dicho análisis comprenden:

- Identificación de acciones e iniciativas de inversión en materia hídrica, en ejecución actualmente o en catastro como proyecto o programa planificado.
- Identificación de acciones e iniciativas de defensa ante eventos críticos (inundación, sequía, etc.).

Los resultados y análisis, a nivel de cuenca, se recopilan en el Informe Final de la cuenca del río Huasco.

3.3.5.1 Identificación de acciones e iniciativas de inversión en materia hídrica

Para el diagnóstico de las acciones e iniciativas de inversión en la cuenca del río Huasco se consideró la información contenidas en el Banco Integrado de Proyectos (BIP) del Ministerio de Desarrollo Social y Familia (MIDESO), disponible en línea en la página web del servicio www.desarrollosocialyfamilia.gob.cl.

La información contenida en la base de datos considera la información de diversas instituciones formuladoras tales como: Comisión Nacional de Riego (CNR), Dirección de Obras Hidráulicas (DOH), Ministerio del Medio Ambiente (MMA), Servicio Nacional de Geología y Minería, entre otras.

La metodología empleada se basó en la identificación de iniciativas de Estudios, Proyectos y Programas vinculados a los recursos hídricos a nivel de cuenca y a nivel regional e interregional con incidencia en las cuencas en estudio, a fin de considerar iniciativas que, si bien no son exclusivas de la cuenca en estudio, tiene alguna incidencia sobre esta. Para esto se hizo una selección de iniciativas conforme a los siguientes criterios:

- Identificación de iniciativas a nivel de cuenca
- Iniciativas en periodo 2020-2030.
- Iniciativas vinculadas al recurso hídrico.
- Iniciativas vinculadas exclusivamente a las cuencas en estudio.

i. Identificación de iniciativas a nivel regional e interregional

- Iniciativas en periodo 2020-2030.
- Iniciativas vinculadas al recurso hídrico.
- Iniciativas con incidencia en las cuencas en estudio.

Cabe mencionar que en ambos casos se debió revisar las fichas IDI, que resumen los antecedentes de la iniciativa de inversión postulada, a fin de identificar y corroborar la localización geográfica de estas.

Sobre la base de las iniciativas obtenidas, a partir de los criterios mencionados, se realizó el análisis de manera separada a nivel de cuenca y a nivel regional e interregional. Los resultados son presentados en función de las siguientes variables:

- Número de iniciativas según institución formuladora y costos de inversión.
- Número de iniciativas según subsector.
- Número de iniciativas según tipología, esto es: Proyecto, Programa o Estudio Básico.
- Número de iniciativas según etapa actual, esto es: Perfil, Factibilidad, Diseño, Ejecución.

El detalle de la información se presenta en el Anexo J, correspondiente a la cuenca de Huasco, el cual contiene las bases de datos obtenida y su sistematización en

función de los puntos antes mencionados. Se entrega en los mismos Anexos cada una de las fichas IDI de las iniciativas consideradas en el diagnóstico.

3.3.5.2 Identificación de acciones e iniciativas de defensa ante eventos críticos

La metodología empleada se basó en la identificación de iniciativas de Estudios, Proyectos y Programas identificadas anteriormente, y procedentes del BIP, en torno a la defensa ante eventos críticos, tales como aluviones, crecidas e inundaciones.

Se realizó una búsqueda adicional de Planes de Manejo de Cauces, los cuales no están elaborados como tal para la cuenca de Huasco.

3.4 METODOLOGÍA APLICADA EN LA MODELACIÓN HIDROLÓGICA

La simulación hidrológica se ha realizado mediante el acople del código MODFLOW, que permite la representación del sistema subterráneo, en la plataforma WEAP, utilizada en la modelación del sistema superficial. La metodología y plataformas utilizadas para alcanzar un acople efectivo se presenta en los acápite siguientes.

3.4.1 Descripción de la Plataforma WEAP

WEAP (<http://www.weap21.org/>) es una herramienta computacional para la planificación integrada de recursos hídricos desarrollada por el Stockholm Environment Institute (<http://www.sei-us.org/>) sede en Boston y el Tellus Institute (<http://www.tellus.org/>). Proporciona un marco flexible y de fácil uso para la planificación del recurso hídrico y análisis de escenarios.

WEAP permite apoyar la planificación de recursos hídricos mediante el balance de la oferta hídrica (generada a través de módulos físicos de tipo hidrológico, a escala de subcuenca) con la demanda de agua (caracterizada por un sistema de distribución de variabilidad espacial y temporal, con diferencias en las prioridades de demanda y oferta). Para llevar a cabo este balance hídrico, se utiliza una gama de diferentes objetos disponibles en WEAP y procedimientos accesibles a través de una interfaz gráfica. Esto permite su uso para analizar un amplio rango de temas e incertidumbres a las que se ven enfrentados los planificadores (stakeholders) de recursos hídricos, incluyendo aquellos relacionados con el clima, condiciones físicas de la cuenca, proyecciones de demanda, condiciones regulatorias, objetivos de operación e infraestructura disponible.

WEAP es habitualmente forzado por variables climáticas, a diferencia de modelos de operación y gestión de recursos hídricos que se basan en modelación hidrológica externa, es decir, que separan el modelo hidrológico del operacional. Por otra parte, WEAP incluye rutinas diseñadas para distribuir el agua a diferentes tipos de usuarios, desde una perspectiva humana y ecosistémica. Estas características convierten a WEAP en un modelo apropiado para realizar estudios de cambio climático, donde es importante estimar cambios en la oferta de agua (e.j. cambios en la precipitación proyectados) y demanda de agua (e.j. cambios en la demanda a partir de variación del área de los cultivos), y como estos cambios convergen en un balance de agua diferente al correspondiente al escenario base o actual.

Si bien WEAP fue creado como una herramienta para la modelación operacional de sistemas de recursos hídricos, incluyendo elementos tales como centrales hidroeléctricas, demandas de riego, canales, embalses, etc., actualmente se ha ampliado su capacidad incluyendo módulos de hidrología (distintos métodos de cálculo de precipitación-escorrentía), calidad de agua y aguas subterráneas mediante el uso de enlaces con otro software de uso común (e.g. MODFLOW).

3.4.1.1 Balance Hidrológico en WEAP

WEAP resuelve numéricamente dos balances de masas planteados en cada estanque. Estos balances pueden ser resumidos mediante la Ec. 1 y la Ec. 2.

$$Z_{1max} \frac{dZ_1}{dt} = \left[P_e(t) - ET_0 k_c \frac{5Z_1 - 2Z_1^2}{3} \right] - P_e(t) Z_1^{FR} - f K_1 Z_1^2 - K_2 (1 - f) Z_1^2 \quad \text{Ec. 1}$$

$$Z_{2max} \frac{dZ_2}{dt} = K_2 (1 - f) Z_1^2 - K_2 Z_2^2 \quad \text{Ec. 2}$$

Donde:

Pe: Precipitación, además de derretimiento.

f: Dirección preferencial del flujo.

Kc: Coeficiente de cultivo.

Z_{1max}: Capacidad de caja superior

Z_{2max}: Capacidad de caja inferior

Z₁: Porcentaje de utilización inicial de la caja superior.

Z₂: Porcentaje de utilización inicial de la caja inferior.

K₁: Conductividad zona radicular

K₂: Conductividad zona profunda.

El cálculo de la evapotranspiración (ET₀) se realiza mediante el método de Penman-Monteith, resumido según la Ec. 3.

$$ET_0 = \frac{0,408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34u_2)} \quad \text{Ec. 3}$$

Donde:

ET₀: Evapotranspiración de referencia.

R_n: Radiación neta.

G: Densidad de flujo de calor del suelo.

T: Temperatura media diaria.

u₂: Velocidad del viento a dos metros sobre el suelo.

e_s: Presión de saturación de vapor de agua.

e_a: Presión de vapor.

Δ: Pendiente de la curva de presión de vapor.

γ: Constante psicométrica.

Este método se encuentra implementado en el software de acuerdo a los siguientes supuestos:

- Ecuación se estandariza para pasto de 0,12 m de altura y de resistencia superficial de 69 s/m.
- El albedo varía dentro de un rango de 0,15 a 0,25, como función de la cobertura de nieve.
- El término G se asume nulo.

Además, cabe destacar que la evapotranspiración potencial o de referencia, E_{To} , en WEAP se denomina *Reference PET*.

La evapotranspiración en el modelo WEAP se genera desde el estanque superior. Por esto, el volumen de agua almacenado allí influye directamente en la satisfacción de la demanda evapotranspirativa y debe ser observado con cuidado en el proceso de calibración ya que distintas soluciones, correctas en la simulación de caudal, pueden entregar valores irreales de evaporación.

En el caso de zonas de riego, la evapotranspiración se calcula a partir de un K_c que se obtiene de lo considerado en el modelo base y literatura, según tipo de cultivos, mientras que en cuencas laterales aportantes en estado natural, se utiliza un valor de K_c que no tiene significado desde el punto de vista agronómico. Por esto último, al utilizar esta simplificación en los catchments modelados según el método de humedad de suelo, podrían estar incluidas dentro del total otros procesos como evaporación directa desde suelo, sublimación, entre otros. De esta forma, el K_c en estos casos podría presentar valores no necesariamente concordantes con los rangos clásicos de literatura agronómica.

Otro proceso de importancia en la simulación del proceso físico corresponde a la acumulación y derretimiento de nieve. Esto se hace mediante la utilización de dos parámetros a calibrar denominados temperatura de congelamiento (T_c) y derretimiento (T_d). Teóricamente ambos corresponden a 0°C ; sin embargo, debido a fenómenos que están siendo dejados de lado en la modelación a nivel mensual, T_c y T_d son generalmente calibrados en un rango que va de -5 a 5°C , respectivamente (US-SEI, 2010).

Los coeficientes de derretimiento y congelamiento determinan la proporción de agua líquida y sólida en la precipitación y la fracción de cobertura nival que se derrite en cada paso de tiempo. La **Ec. 4** resume este último fenómeno.

$$P_e(t) = (A_c(t) + P_p(t)m_c) \quad \text{Ec. 4}$$

Donde:

$$m_c = \begin{cases} 0 & T_i < T_c \\ 1 & T_i > T_d \\ \frac{T_i - T_c}{T_d - T_c} & T_c < T_i < T_d \end{cases} \quad \text{Ec. 5}$$

P_e : Aportes a la escorrentía de precipitación líquida y derretimiento de nieve.

A_c : Cobertura nival en unidades de longitud.

P_p : Precipitación total.

T_i : Temperatura media mensual del mes i .

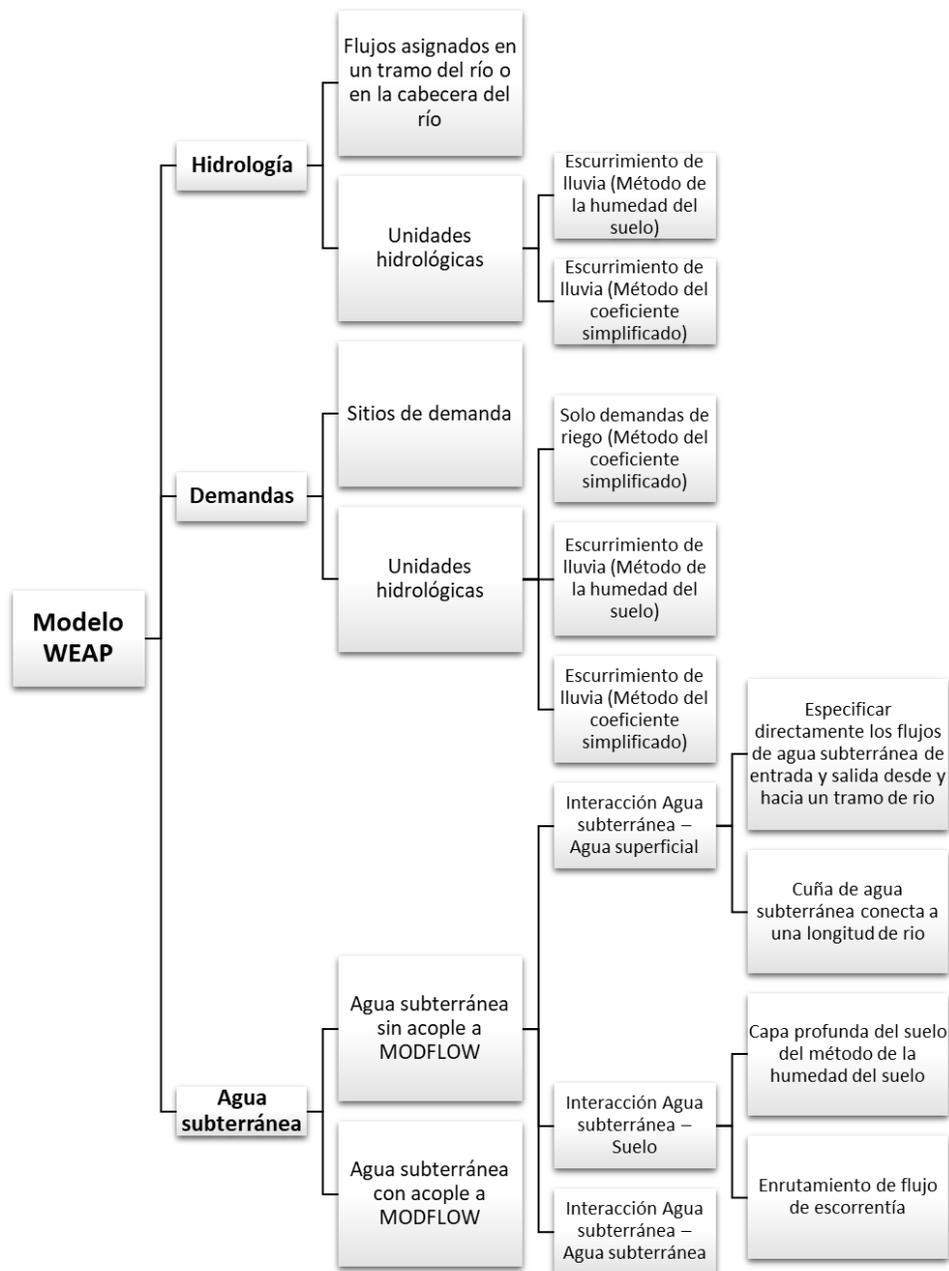
3.4.1.2 Elementos Disponibles en WEAP

Existen numerosos elementos de gestión en WEAP, los cuáles pueden resumirse en:

- Ríos (River)
- Derivación (Diversion)
- Embalses (Reservoir)
- Agua subterránea (Groundwater)
- Otras fuentes (Other Supply)
- Sitio de Demanda (Demand Site)
- Unidad hidrológica (Catchment)
- Planta de tratamiento de Aguas (WasteWater Treatment Plant)
- Escorrentía/Infiltración (Runoff-Infiltration)
- Conducción (Transmission Link)
- Flujo de Retorno (Return Flows)
- Centrales Hidroeléctrica de Pasada (Hydropower)
- Requerimiento de Caudal (Flow Requirement)
- Medidor de Caudal (Streamflow Gauge)

Dado que este capítulo no busca entregar un manual de aplicación de WEAP, para lo cual están los propios manuales y tutoriales disponibles en su sitio oficial, aquí se ahonda en aquellos elementos básicos que resultan fundamentales para el modelo en particular implementado en este plan estratégico. Para una descripción más completa de todos los elementos, se recomienda la revisión del documento elaborado por DGA (2019) o bien la guía del usuario de WEAP en <https://www.weap21.org/> (SEI, n.d.).

Basándose en la misma referencia, es prudente entender que en WEAP existen tanto elementos como métodos. La escorrentía en un río puede ser modelada, por ejemplo, a través de una relación o modelo de precipitación -escorrentía dentro de WEAP considerando al menos 5 métodos, o bien, puede ser ingresada a través de un archivo de texto, como una serie operacional estimada "fuera" del modelo. La Figura 3.4-1 elaborada por DGA (2019) resume de buena manera los métodos de generación de escorrentía y también.



Fuente: DGA (2019), "Desarrollo de Herramienta para el Análisis de Gestión en el Marco del Plan Nacional de Recursos Hídricos, SIT N° 445 (Realizado por: DICTUC S.A. & SEI).

Figura 3.4-1 Elementos y métodos disponibles en WEAP para la modelación de la hidrología, demandas de agua y agua subterránea.

i. Hidrología

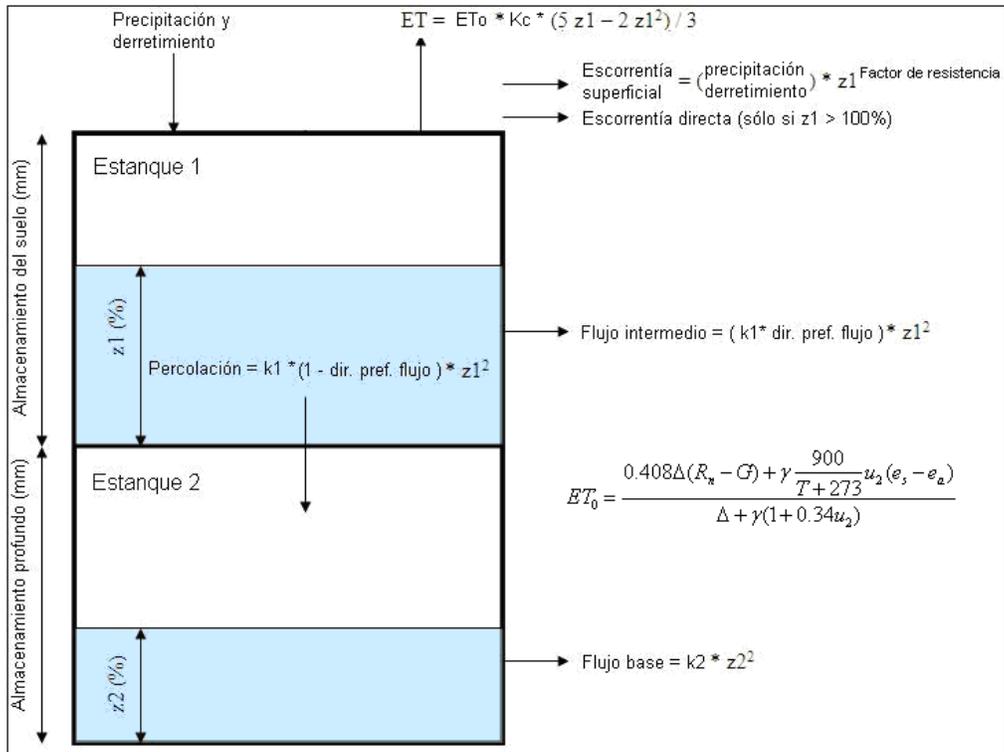
En WEAP existen métodos y elementos relacionados a la producción hidrológica, siendo los más relevantes los ríos y unidades hidrológicas.

En el caso de los ríos, estos son elementos que actúan como “tuberías”, transportando el flujo de un lugar a otro. En la medida que se les va incorporando interacciones con otros elementos éstos comienzan a subdividirse en tramos, en donde se les pueden definir pérdidas por infiltración hacia elementos acuíferos, así como pérdidas totales del sistema. Estos elementos pueden “unirse” para formar confluencias y constituyen un elemento básico desde donde se definen otros elementos como derivaciones, requerimientos de flujo y estaciones fluviométricas de control.

Un elemento esencial es la unidad hidrológica o “catchment”. Este elemento integra diferentes modelos hidrológicos incorporados en WEAP, algunos muy simples y otros más complejos, y por ende sintetiza tanto la información de clima como de uso de suelo dependiendo del método escogido. En este trabajo se ha utilizado principalmente el método de la humedad del suelo (Soil Moisture Method) como el método del coeficiente simplificado para las áreas de riego.

El módulo hidrológico integrado de la humedad del suelo que se utiliza en este estudio se basa en un esquema de dos estanques, capaces de reproducir distintas componentes de los flujos subterráneos y superficiales (Figura 3.4-2).

WEAP simula el proceso de precipitación-escorrentía a partir de una función de transferencia (que depende del módulo hidrológico seleccionado) en la que se determina una variable de salida (el caudal) a partir de una o varias variables de entrada, generalmente de carácter meteorológico (precipitación, temperatura, etc.). Internamente el modelo utiliza numerosos parámetros para representar el fenómeno físico. En la se muestra una clasificación general de las variables involucradas.



Fuente: Ayala (2011), modificado a partir de Guía de Uso WEAP

Figura 3.4-2 Esquema gráfico modelo WEAP.

Donde:

Pp: Precipitación líquida.

ET: Evapotranspiración real.

ET₀: Evapotranspiración potencial.

z₁: Porcentaje de la capacidad del estanque superior utilizada.

z₂: Porcentaje de la capacidad del estanque inferior utilizada.

K₁: Conductividad del estanque superior.

K₂: Conductividad del estanque inferior.

Dir pref flujo: Dirección preferencial de flujo. Determina la fracción de flujo vertical y horizontal.

Tabla 3.4-1 Variables y parámetros utilizados por el modelo WEAP

Tipo de Parámetro	Descripción	Nombre Parámetro
Uso de suelo	Variables de entrada	- Área de la cuenca (catchment) - Coeficiente de cultivo (kc)
	Parámetros internos del modelo (a calibrar)	- Almacenamiento del suelo, estanque superior (z1 max) - Almacenamiento profundo, estanque inferior (z2 max) - Conductividad de la zona radicular o estanque 1 (K1) - Conductividad de la zona profunda o estanque 2 (K2) - Factor de resistencia al escurrimiento (FR) - Dirección preferencial del flujo - Almacenamiento inicial en el estanque 1 (z1 inicial) - Almacenamiento inicial en el estanque 2 (z1 inicial)
Clima	Variables de entrada	- Series de precipitación - Series de temperatura - Latitud - Humedad relativa - Viento - Fracción nublada o nubosidad - Radiación - Albedo de la nieve
	Parámetros internos del modelo (a calibrar)	- Nivel de nieve inicial - Temperatura de fusión de la nieve - Temperatura de derretimiento de la nieve - Albedo de nieve vieja - Albedo de nieve nueva
Cauces naturales	Variables de entrada	- Series históricas de caudal (Ríos)
Reservorios	Variables de entrada	- Curva de Volumen vs Elevación del reservorio - Serie de evaporación observada - Serie de volúmenes observados en la laguna

Fuente: Elaboración Propia.

Respecto del método del coeficiente simplificado, este utiliza coeficientes del cultivo para calcular la evapotranspiración potencial. De cumplirse las condiciones de escorrentía, el excedente de la precipitación (escorrentía) puede fluir a un río y/o hacia un nodo de agua subterránea.

Las variables de entrada son menos que las del método anterior, En el caso del clima, recibe aparte de la precipitación la evapotranspiración de referencia y adicionalmente es necesario definir la precipitación efectiva (Porcentaje de la precipitación disponible para la escorrentía).

Los parámetros de suelo son el coeficiente de cultivo "kc" y la superficie.

ii. Demandas

En el caso de las demandas, éstas pueden ser representadas tanto por "Nodos de demanda" o "Demand Site" o por medio del elemento "unidad hidrológica" en la medida que se desee.

Usualmente, las demandas asociadas a: Industria, consumo humano o agua potable, minería, agricultura, ecológicas y de recreación pueden ser representadas a través del "nodo de demanda". La demanda de riego puede representarse con el método anterior o a través de una unidad hidrológica.

Respecto del nodo de demanda, se tienen dos métodos, los cuales permiten tanto especificar la demanda mensual a través de una serie de tiempo, o a través de la definición de un "tipo" de demanda, en donde se requiere representar el nivel de actividad anual (como puede ser la población, número de hectáreas, etc), una tasa anual, más conocido como "dotación", y la variación mensual, que reparte a lo largo del año, la demanda total, una suerte de la renombrada curva "S" de la demanda que sirve para representar los consumos mínimos y máximos y en que parte del año se producen.

En el caso del método del coeficiente simplificado, sumado a los parámetros ya destacados en el acápite anterior, se agregan el riego, fracción de riego y tasa de reúso. Este método utiliza los coeficientes de cultivo para calcular la evapotranspiración potencial y así determinar la demanda de riego que se requiera. Cabe destacar que estos mismos parámetros se agregan en el caso que el método de generación de escorrentía sea el de la humedad del suelo.

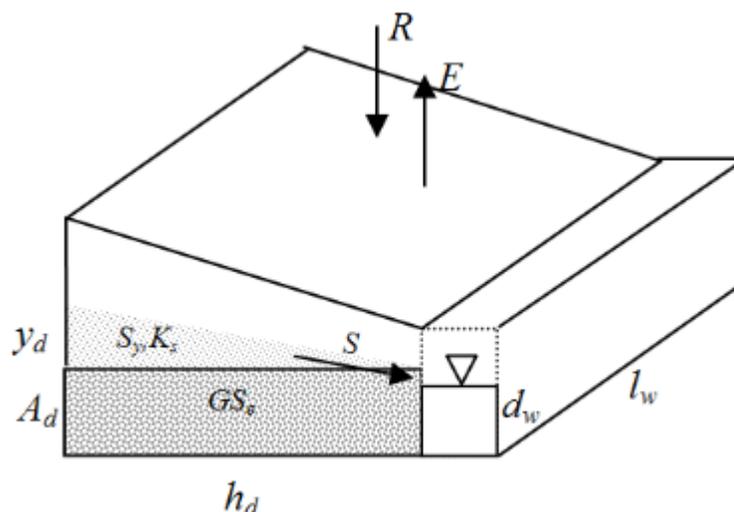
Cuando se agrega más de un vínculo de escorrentía/infiltración desde la unidad hidrológica, sean ríos o nodos de agua subterránea, es necesario indicar el porcentaje en que se debe distribuir la escorrentía (fracción de escorrentía) (DGA, 2019).

iii. Agua Subterránea

La interacción entre el río y el acuífero puede ser modelada de diferentes formas en WEAP. Producto de la complejidad del sistema y la necesidad de conectar los acuíferos de los sistemas existentes, es posible modelar el acuífero con un módulo especial, el cual permite incorporar la mayoría de la información recopilada en antecedentes relativos a espesores, anchos, volúmenes y conductividad hidráulica de los acuíferos.

En el caso de los elementos de agua subterránea, es conveniente relevar 3 métodos para la condición sin acople y el acople con Modflow propiamente tal.

En el caso que se desee modelar la interacción río-acuífero a través de WEAP, el método más conocido es el método de la "cuña". Este módulo representa al acuífero como un prisma, de geometría regular, que reemplaza al estanque inferior del modelo conceptual de la Figura 3.4-2. Este esquema tiene como función principal resolver el balance hídrico del acuífero, y su interacción con el río, pero no simula niveles. La Figura 3.4-3 presenta el modelo conceptual del acuífero en WEAP, el que además es simétrico respecto del eje del río.



Fuente: Manual del Usuario de WEAP.

Figura 3.4-3 Modelo Conceptual del acuífero en WEAP. Fuente: Manual WEAP

La Tabla 3.4-2 presenta el detalle de los parámetros del modelo conceptual del acuífero en WEAP.

Tabla 3.4-2 Parámetros de acuífero en WEAP.

Nombre de Parámetro	Abreviación	Descripción
Almacenamiento del Acuífero	GS_e	Volumen almacenado en el acuífero, ya sea inicial o en un paso de tiempo fijo. [Mm^3]
Ancho medio del acuífero	h_d	Distancia representativa entre el eje del río hacia la extensión más alejada del acuífero, es decir, su ancho máximo. [m]
Perímetro mojado	l_w	Perímetro de contacto entre el acuífero y el río [m]
Profundidad de Equilibrio	A_d	Profundidad que alcanza el acuífero en su condición de equilibrio.
Altura de escurrimiento	d_w	Altura de escurrimiento del río [m]. Valor usado como referencia de comparación para las simulaciones de elevación del acuífero.
Conductividad Hidráulica	K_s	Conductividad Hidráulica del acuífero. [L/T]
Porosidad Específica	S_y	Porosidad Específica (Specific Yield).

Fuente: Manual del Usuario de WEAP.

El volumen del acuífero es estimado inicialmente a partir del supuesto que el nivel de agua en el acuífero se encuentra en equilibrio con el río; entonces el almacenamiento de equilibrio hacia un lado del río, denominado GS_e , se calcula como:

$$GS_e = h_d l_w A_d S_y \quad \text{Ec. 6}$$

La variable “ y_d ” es una estimación de la altura sobre la cual el acuífero se encuentra por sobre o bajo el equilibrio, por lo que el almacenamiento inicial $GS(0)$ en el acuífero, es decir el almacenamiento en $t=0$, está dado por la expresión:

$$GS(0) = GS_e + y_d h_d l_w S_Y \quad \text{Ec. 7}$$

De esta forma, la altura del acuífero que está por sobre o bajo el equilibrio se puede determinar cómo:

$$y_d = \frac{GS - GS_e}{h_d l_w S_Y} \quad \text{Ec. 8}$$

Mientras más aumente el nivel de agua relativo al lecho del río, mayor será entonces el aporte o filtración desde el acuífero hacia este. Por el contrario, al disminuir el nivel de agua respecto de la ubicación de la altura de equilibrio del río, mayor será la infiltración desde el río hacia el acuífero. La infiltración total (S) desde ambos lados del río puede ser descrita como:

$$S = 2 \left(K_S \frac{y_d}{h_d} \right) l_w d_w \quad \text{Ec. 9}$$

Donde K_s representa la conductividad hidráulica saturada del acuífero y d_w es una estimación de altura de escurrimiento del río, invariante en el tiempo. Tanto la altura de escurrimiento (d_w) como el perímetro de contacto (l_w) representan el área por donde ocurre la filtración. La conductividad hidráulica es la encargada de controlar la tasa a la cual el agua se mueve hacia o desde el área de filtración. Una vez que esta filtración es estimada, el almacenamiento del acuífero al final del paso de tiempo adoptado se estima como:

$$GS_i = GS_{i-1} + 0.5 (R - E - S) \quad \text{Ec. 10}$$

Donde E representa cualquier extracción antropogénica desde el acuífero destinada a la satisfacción de un nodo de demanda y R representa la recarga provista por la precipitación.

Otra manera de simular el acuífero corresponde al método de “especificar los flujos GW”. En este método, se deben imponer los volúmenes del acuífero, así como su recarga natural y flujo desde un acuífero a otro y al caudal máximo de extracción. Usualmente este método es utilizado en el caso en que se tiene información de un modelo subterráneo, pero no se ha optado por el acople y existe información relativa a extracciones del acuífero. Cabe destacar que dicho método permite incluso la modelación de una “caja” de capacidad infinita.

Una manera simplificada de la representación del acuífero corresponde a la interacción entre los estanques superior (zona radicular) e inferior (caja acuífera) del modelo de la humedad del suelo. En este caso el acuífero se parametriza con una caja con una capacidad finita, una conductividad hidráulica y un nivel inicial. Este método tiene la limitación inherente que no permite la separación de ambos

elementos por sí sólo, teniéndose que calcularse aparte flujos relevantes como la infiltración o percolación.

Cabe destacar que es factible acoplar una caja acuífera al método de la humedad del suelo. En dicho caso, los parámetros del estanque inferior son reemplazados por los de la caja acuífera. Este método requiere por cierto de mucha información y es extremadamente difícil de calibrar.

El último método corresponde justamente al acople WEAP-MODFLOW, que se discutirá más adelante.

3.4.2 Descripción de MODFLOW

Es un software de modelamiento tridimensional de agua subterránea, el cual resuelve las ecuaciones de flujo mediante diferencias finitas, elementos finitos (MODFLOW 2000,2005, NWT) y volúmenes finitos (MODFLOW USG). En el acople con WEAP solamente están permitidos el primer set de motores MODFLOW: MODFLOW 2000,2005, NWT. El código es continuamente desarrollado por el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS), existiendo diferentes versiones que han ido incorporando cálculos específicos y nuevas formulaciones de resolución. Al ser desarrollado por una institución pública, modflow es de código libre, es decir se distribuye gratuitamente.

Es considerado internacionalmente como un código estándar en cuanto a la representación del flujo regional o local del agua subterránea y su interacción con los cuerpos de agua superficial. Presenta una estructura modular, es decir contiene componentes llamados "paquetes" que son acoplados a Modflow con los cuales son resueltos aspectos específicos de los componentes del flujo subterráneo, tales como los paquetes de resolución de pozos o río.

A su vez, se considera esencial el uso de la librería Python FloPy utilizada en el procesamiento de resultados de MODFLOW. La librería permite procesar los balances hídricos generados de la zonificación por SHAC en los modelos MODFLOW, así como la extracción de niveles freáticos simulados en pozos de observación.

3.4.2.1 Plataformas que corren MODFLOW

Modflow corresponde a un código libre, sin embargo, su utilización no es sencilla. Para ello se han desarrollado múltiples plataformas que, utilizando el código modflow original, permiten tanto la construcción del modelo, considerando la representación gráfica de las condiciones geométricas y propiedades hidráulicas del área de estudio, como la presentación de sus resultados. Dentro de ellas, se destacan:

- Model Muse: programa de interfaz gráfica libre y de código abierto desarrollado por el USGS para la modelación de flujo y transporte en aguas subterráneas.
- Visual Modflow: programa desarrollado por Waterloo Hydrogeologic, el cual en su lanzamiento el año 1994 se convirtió en la primera interfaz gráfica comercial del código MODFLOW. Utilizado para la modelación tanto de flujo como transporte, soporta las diferentes versiones de MODFLOW y sus respectivos paquetes.

- Groundwater Vistas: corresponde a un software comercial de modelación de flujos subterráneos y transporte de contaminante desarrollado por ESI (Environmental Simulation Incorporated) que sustenta varios códigos, destacándose MODFLOW, MT3MS y SEAWAT, entre otros. El programa es compatible con ArcView y Surfer, formatos con los cuales se facilita el manejo de la geometría y propiedades del modelo.

3.4.2.2 Motores y Paquetes Disponibles en MODFLOW

Modflow, desde su lanzamiento, ha sido continuamente desarrollado, existiendo seis grandes actualizaciones al código base: Modflow-84, Modflow-88, Modflow-96, Modflow-2000, Modflow-2005 y Modflow 6. Asociados a estas versiones bases se han desarrollado variantes con mejoras específicas en la resolución de las ecuaciones de flujo, destacándose:

- Modflow NWT: utiliza la formulación de Newton Raphson para mejorar la simulación de flujo en acuíferos libres.
- Modflow USGS: utiliza una grilla no estructurada para el cálculo de las ecuaciones de flujo.

Modflow presenta una estructura modular, por lo que cada una de las versiones desarrolladas se apoya en distintos paquetes para la resolución de ecuaciones y presentación de resultados, entre ellos:

- Flujo
- BCF6: Block-Centered Flow
- BAS6: Basic
- LPF: Layer Property Flow
- HUF2: Hydrogeologic Unit Flow
- UPW: Upstream Weighting
- NPF: Node Property Flow
- STO: Storage Package Pane
- HFB: Horizontal Flow Barrier
- UZF: Unsaturated-Zone Flow
- SWI2: Seawater Intrusion
- Condiciones de Borde
- CHD: Constant Head
- BFH: Boundary Flow and Head
- RCH: Recharge
- WEL: Well
- FHB: Flow and Head Boundary
- DRN: Drain
- DRT: Drain Return
- ETS: Evapotranspiration Segments
- EVT: Evapotranspiration
- GHB: General Head Boundary
- LAK: Lake
- MAW: Multi-Aquifer Well

- MNW1: Multi-Node Well
- MNW2: Multinode Well 2
- RES: Reservoir
- RIP: Riparian Evapotranspiration Package
- RIV: River
- SFR: Stream-Flow Routing
- STR: Stream
- Solvers
- PCG: Preconditioned Conjugate Gradient
- PCGN: Preconditioned Conjugate Gradient Solver with Improved Nonlinear Control
- GMG: Geometric Multigrid Solver
- SIP: Strongly Implicit Procedure
- DE4: Direct Solver
- NWT: Newton Solver
- LMG: Link AMG
- SOR: Slice Successive Overrelaxation
- Salida
- HYD: HYDMOD
- GAGE: Gage
- LMT6: Link MT3DMS
- MNWI: Multi Node Well Information
- Post Procesadores
- MODPATH
- ZONEBUDGET
- Subsistencia
- IBS: Interbed Storage
- SUB: Subsidence and Aquifer System Compaction
- SWT: Subsidence and Aquifer System Compaction for Water Table Aquifers
- Transporte
- BTN: Basic Transport
- ADV: Advection
- DSP: Dispersion
- SSM: Sink & Source Mixing
- RCT: Chemical Reactions
- GCG: Generalized Conjugate Gradient
- TOB: Transport Observation
- CTS: Contaminant Treatment Systems
- LKT: Lake Transport
- SFT: Stream Flow Transport
- UZT: Unsaturated-Zone Transport

3.4.2.3 Motores y Paquetes Disponibles en MODFLOW para acople WEAP

El proceso de acople se hace a través de la lectura en WEAP de los diferentes paquetes de Modflow, sin embargo, no todos son permitidos. Actualmente WEAP soporta las versiones Modflow 2000, Modflow 2005 y Modflow NWT. En cuanto a los paquetes, se diferencian aquellos que son utilizados por WEAP para el cálculo de la interacción de

flujos subterráneos y superficiales y aquellos que son permitidos por WEAP, pero que son utilizados por Modflow en su cálculo interno.

- Paquetes utilizados por WEAP

- BCF6
- BAS6
- HUF2
- LPF
- UPW
- CHD
- DRN
- RCH
- RIV
- WEL

- Paquetes permitidos por WEAP

- ADV
- DE4
- GHB
- GAGE
- HFB
- HYD
- IBS
- LMG
- NWT
- PCG
- SIP
- SOR
- SUB

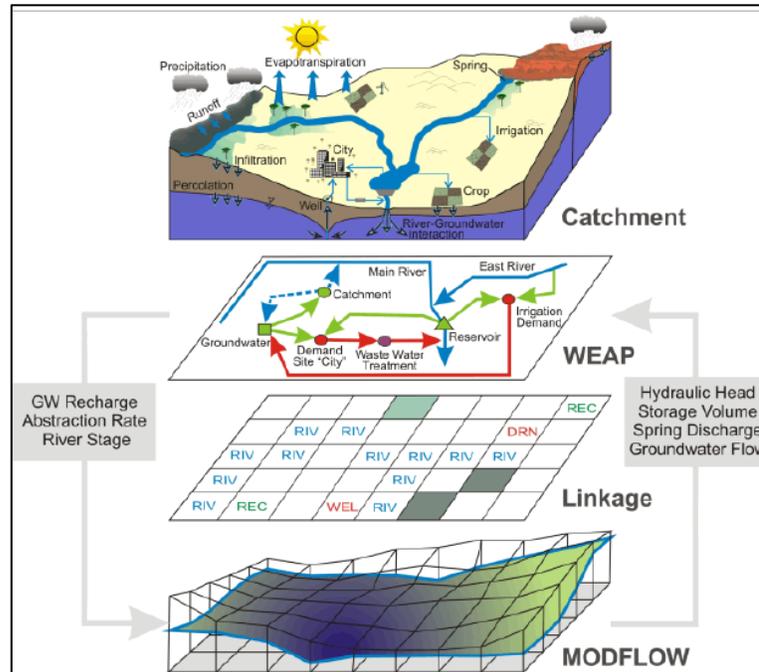
3.4.3 Acople WEAP-MODFLOW

Como ya se describió en el acápite 3.4.1, es usual que los modelos hidrológicos realizados en WEAP representen la zona de almacenamiento inferior (sistema subterráneo), con un enfoque de estanque o de cuña; mediante representaciones simplificadas de geometría y propiedades de acuífero, que simulan intercambio de flujos a nivel agregado.

En este sentido, es importante recalcar que WEAP es un modelo conceptualizado con segmentación espacial concentrada o semidistribuida; mientras que el modelo de flujo MODFLOW representa la dinámica de flujo subterráneo de manera espacialmente distribuida. De esta manera, mediante la implementación de un archivo de enlace en WEAP, que permite representar el acuífero vinculado a MODFLOW, es posible integrar directamente los flujos superficiales y subterráneos, para todos los periodos de simulación, ejecutando simultáneamente un modelo distribuido y otro semidistribuido.

Para llevar a cabo lo anterior, se debe generar los archivos de modelación subterránea en el formato nativo de MODFLOW; para luego desarrollar el archivo de enlace que

vincula los elementos de WEAP con la malla del modelo subterráneo. En la Figura 3.4-4 se presenta un esquema de vinculación entre WEAP y MODFLOW, extraída de los estudios de The Federal Institute for Geosciences and Nature Resources (BGR Hannover).



Fuente: BGR Hannover

Figura 3.4-4 Esquema de Vinculación WEAP-MODFLOW Mediante Archivo de Enlace

En el siguiente acápite se profundiza en el desarrollo de la herramienta de modelación integrada del recurso superficial-subterráneo, describiendo en el proceso de acople entre el software WEAP, que simula procesos de aguas superficiales; y el código de modelamiento MODFLOW, que simula los procesos de flujos de agua subterránea.

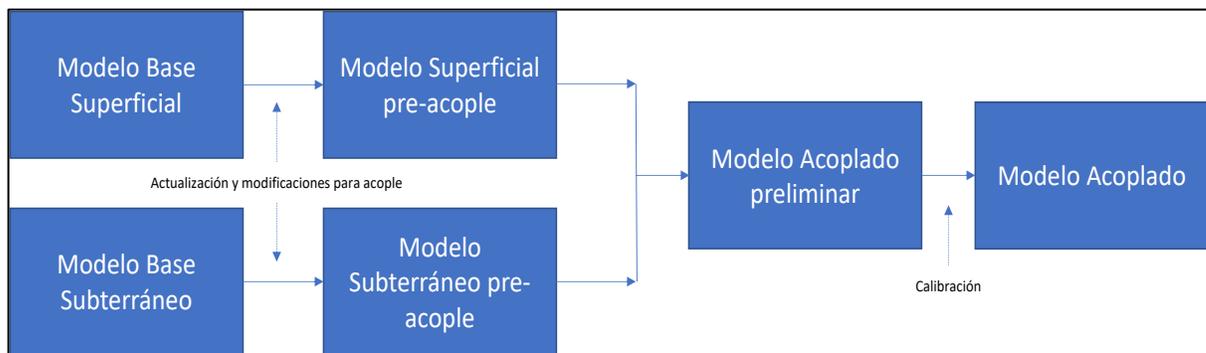
3.4.3.1 Esquema General Implementado en Modelos Acoplados

De acuerdo a lo indicado en la bibliografía especializada, (Sanzana *et al.*, 2018), para acoplar un modelo subterráneo y superficial, se recomienda contar con un modelo subterráneo previamente calibrado, siendo posible que en el proceso de integración sea necesario recalibrar parámetros. En este sentido, y dada la experiencia del consultor en modelo integrados iterativos como DGA-HID (2018c), el enfoque utilizado para llevar a cabo el proceso de acople se resume en los siguientes puntos y Figura 3.4-5.

- Una vez que se cuenta con los modelos bases superficial y subterráneo, se realizarán las modificaciones topológicas necesarias para el acople, de manera tal de representar y utilizar las condiciones de borde, motores de cálculo, y elementos que se encuentran disponibles para la operación conjunta de ambos modelos; como se ha descrito en el acápite 3.4.2.3. En este aspecto, es sumamente

importante considerar que la calidad de los modelos base, en lo referente a su conceptualización e implementación numérica, condiciona directamente la calidad del modelo acoplado final.

- Ambos modelos modificados y actualizados a abril 2019 son operados en conjunto en régimen transiente, teniendo especialmente en cuenta que los flujos de interrelación entre ambos modelos sean consistentemente similares en magnitud a nivel espacial y temporal; utilizando las recargas del modelo superficial en el modelo subterráneo.
- Es importante destacar que, a pesar de que en el proceso de acople se debe generar archivos en formato nativo para MODFLOW en tan sólo el primer paso de tiempo, es de suma relevancia realizar esta operación conjunta en el periodo de simulación completo, puesto que ayuda sustancialmente en el proceso de calibración.
- Posteriormente se realiza la vinculación mediante el archivo de enlace entre WEAP y el código de simulación MODFLOW; en aquellos sectores acuíferos en los cuales el modelo subterráneo cuenta con un dominio activo en la malla de modelación.
- Finalmente, con el modelo acoplado, se realiza la calibración de éste, variando parámetros e incorporando aquellas modificaciones topológicas que son consideradas relevantes.



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.4-5 Esquema General Metodología de Elaboración de Modelos Acoplados

3.4.3.2 Generación de Archivos MODFLOW Nativo

Para llevar a cabo el enlace entre WEAP y MODFLOW, es necesario generar archivos de modelación subterránea en el formato nativo de MODFLOW, desde los softwares en los que los modelos fueron desarrollados.

Como se detalló en los puntos anteriores, la operación conjunta de WEAP y MODFLOW integra directamente los flujos superficiales y subterráneos, en todos los periodos de simulación, ejecutando simultáneamente un modelo distribuido y otro

semidistribuido. De esta manera, en primer lugar, es necesario realizar modificaciones preliminares a los modelos, de manera que cumplan con:

- Modelo subterráneo MODFLOW implementado en régimen transiente.
- El periodo de stress del modelo subterráneo MODFLOW debe ser el mismo utilizado en WEAP.
- Unidades de ambos modelos deben ser: longitud, metros; tiempo, días.

Para cada paso de tiempo, WEAP genera los siguientes archivos y paquetes en formato nativo MODFLOW (detallados en el acápite 3.4.2), que tienen relación con extracciones subterráneas, interacción entre ríos, drenes y recargas superficiales al sistema acuífero.

- Archivo NAM: WEAP entrega este archivo en cada paso de tiempo especificando los nombres de archivos de entrada y de salida, así como los paquetes que deberá utilizar el código MODFLOW.
- Archivo DIS: contiene la información geométrica de la discretización del acuífero, así como la discretización temporal de los pasos de tiempo.
- Archivo OC: especifica en qué momento de la simulación y cuáles resultados deben ser guardados en los archivos de salida. Los resultados pueden corresponder a cotas en las celdas, flujo celda a celda y reducción de niveles. Estos pueden ser guardados en los archivos de salida con frecuencia mensual o con frecuencia mayor (se especifican los pasos de tiempo).
- Paquete RCH: entrega los flujos superficiales distribuidos en el dominio; calculados por el modelo WEAP en cada paso de tiempo y que son ingresados al modelo subterráneo. Se entrega un valor por celda acoplada en unidades de largo/tiempo, las cuales el código MODFLOW pondera por el área de cada celda para obtener las tasas volumétricas que se ingresan en la capa superior del modelo.
- Paquete RIV: dependiendo de los flujos superficiales calculados por WEAP, así como las curvas de descarga definidas para las secciones de río, WEAP entrega las cotas del río en cada paso de tiempo. Para los valores de cota y conductancia del lecho del río se mantienen los valores iniciales ingresados.
- Paquete WEL: de acuerdo con los nodos de demanda vinculados a celdas de la componente subterránea y a las tasas volumétricas asignadas a estos nodos, se genera este paquete para cada paso de tiempo; indicando las celdas, los flujos de extracción y las capas desde las que se bombea.
- Por otro lado, WEAP requiere la generación de al menos los siguientes archivos y paquetes nativos, para poder operar el código MODFLOW. El resto de los paquetes MODFLOW mencionados en el acápite 3.4.2.3 son opcionales para la operación del acople WEAP-MODFLOW. Sin embargo, para el enlace entre elementos de río, nodos de demanda correspondiente a pozos de extracción y recargas superficiales a la componente subterránea, se debe contar inicialmente con los paquetes WEL, RIV y RCH, respectivamente.
- Archivo NAM: indica todos los paquetes que serán utilizados por el motor de cálculo MODFLOW.

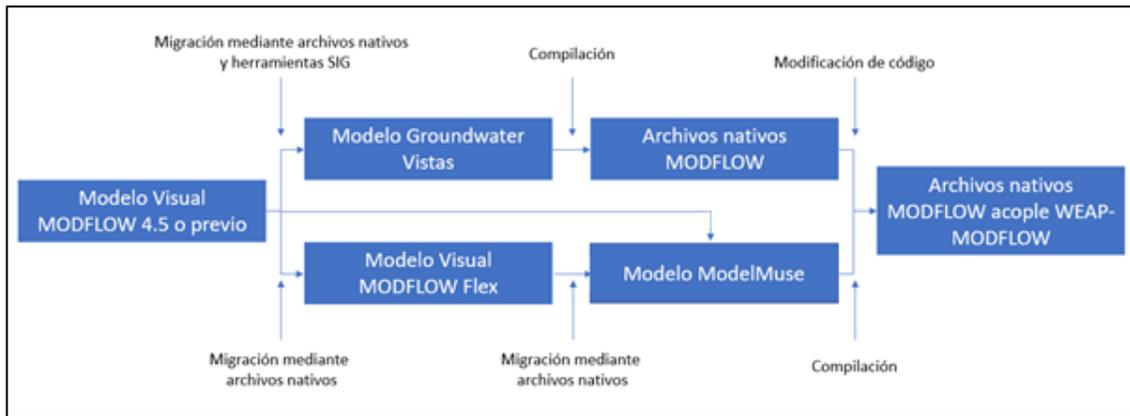
- Archivo DIS: se debe contar con la discretización espacial y temporal inicial para el cálculo en MODFLOW, la cual será replicada en cada paso de tiempo por WEAP.
- Paquete BAS6: el paquete Basic especifica las ubicaciones de celdas activas, inactivas y de carga constante, así como las cotas iniciales ingresadas al modelo. Por tanto, el acople WEAP-MODFLOW hace uso de este paquete para el ingreso de condiciones iniciales, así como de configuración de celdas para todos los pasos de tiempo.
- Paquete BCF6/HUF2/LPF/UPW: se debe contar con uno de los paquetes anteriores, de manera que se especifiquen propiedades que controlen el flujo celda a celda, como la permeabilidad hidráulica y el coeficiente de almacenamiento asignado a cada celda.

De acuerdo a las recomendaciones realizadas por DICTUC (DGA, 2019), como criterio general, se importa el primer paso de tiempo del modelo subterráneo para la generación de archivos nativos, en vías de ser acoplados con WEAP, puesto que contiene la información necesaria para que el modelo opere conjuntamente. Sin embargo, también se exportan los pasos de tiempo totales para verificar la convergencia del modelo subterráneo operando sin plataformas comerciales.

Finalmente, se implementaron las siguientes modificaciones básicas, que ayudaron en la interfaz visual del modelo acoplado:

- Representación de celdas inactivas del modelo con el id “-999”, mediante la modificación directa en el paquete BAS6.
- Representación de celdas secas del modelo con el id “-888”, mediante la modificación directa en el paquete BCF6/HUF2/LPF/UPW.

Es importante mencionar que de acuerdo a lo descrito por DICTUC (DGA, 2019), cada equipo modelador puede determinar una estrategia propia de generación de archivos nativos, según sea el dominio de los softwares con que se cuenten, para realizar este proceso en el menor tiempo posible. Conforme a lo anterior, y a las consideraciones detalladas en los puntos anteriores, la metodología para generación de archivos en formato nativo, desde los softwares en que éstos fueron desarrollados, se presenta en el esquema de la Figura 3.4-6.



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.4-6 Esquema para Generación de Archivos en Formato Nativo MODFLOW

De esta manera, dependiendo de la plataforma en la cual se desarrolló el modelo subterráneo base, se tienen las siguientes rutas de trabajo.

Modelo Desarrollado en Groundwater Vistas (GWV):

Una vez que el modelo se calibró en régimen transiente, se copian los siguientes archivos/paquetes a una nueva carpeta de proceso, según su uso en la conceptualización del modelo base y a las modificaciones propias llevadas a cabo en cada modelo.

- Archivo NAM
- Paquete BAS6
- Paquete DRN
- Paquete BCF6/HUF2/LPF/UPW
- Archivo DIS
- Archivo OC
- Paquete RCH
- Paquete RIV
- Paquete WEL
- Paquete CHD
- Paquete PCG/SIP/NWT

Posteriormente, los paquetes nativos BAS6, BCF6/HUF2/LPF/UPW, DIS y RCH son modificados con un editor de texto, agregando el carácter de espacio " " antes de los segmentos de códigos que presentaron paréntesis, separando estos códigos del número anterior. Lo anterior permite el reconocimiento correcto en WEAP, y su resultado se presenta en el esquema de la Figura 3.4-7.



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.4-7 Modificación de Archivos Nativos GWV

Modelo Desarrollado en Visual MODFLOW (VM):

Se importa el archivo DIS y los paquetes BAS6 y CHD a la plataforma Groundwater Vistas; mediante la opción de importar sets de archivos MODFLOW. Para ello se genera en un editor de texto el archivo NAM, en cuyo contenido se incluyen los nombres de los archivos y paquetes DIS, BAS6 y CHD directamente compilados desde Visual MODFLOW. Los archivos/paquetes: DRN, BCF6/HUF2/LPF/UPW, RCH, RIV y WEL se exportan a capas SIG, desde las cuales son ingresadas a la plataforma Groundwater Vistas. De esta forma, una vez que el modelo se encontró completamente migrado a esta última plataforma, es decir, que fueron verificadas las calibraciones y flujos en zonas de balances conceptualizados originalmente en el modelo Visual MODFLOW, se lleva a cabo el procedimiento descrito para modelos desarrollados en plataforma Groundwater Vistas.

Así también, un procedimiento alternativo consiste en importar los sets de archivos nativos compilados desde Visual MODFLOW a Visual MODFLOW Flex. La plataforma Visual MODFLOW Flex tiene la ventaja de que su estructura de archivos en formato nativo es compatible con la estructura de archivos de la plataforma ModelMuse, por lo que pueden ser importados a esta última directamente. De esta forma, una vez que el modelo se encontró migrado a ModelMuse, y se han verificado las calibraciones y flujos en zonas de balances, conceptualizados originalmente en el modelo Visual MODFLOW, se compilan los archivos en formato nativo MODFLOW, los que quedan directamente disponibles para ingresar a WEAP.

Finalmente, una vez que se generaron los archivos en lenguaje nativo MODFLOW para su acople en la plataforma WEAP-MODFLOW, se verifica que el código MODFLOW entregue resultados estables y coherentes con las calibraciones en las plataformas originales y sus flujos en zona de balance. Esto se lleva a cabo ejecutando directamente el código MODFLOW e ingresando el archivo NAM, de manera que se generen los resultados independientes de las plataformas Groundwater Vistas y ModelMuse. Los resultados son contrastados con lo obtenido en la actualización de los modelos subterráneos.

3.4.3.3 Generación de Archivo de Enlace y Vinculación de Elementos entre WEAP y MODFLOW

El acople WEAP – MODFLOW se realiza a través de la lectura desde WEAP de los archivos nativos MODFLOW junto a la construcción de un archivo de enlace que

permite relacionar los elementos que interactúan entre los sistemas superficial y subterráneo.

Los archivos nativos de código MODFLOW deben ser copiados en una sub-carpeta llamada "MODFLOW" dentro de la carpeta del proyecto de manera que puedan ser utilizados por WEAP al momento de realizar la modelación acoplada.

El archivo de enlace corresponde a un archivo en formato *.shp que relaciona cada una de las celdas del modelo subterráneo (celdas activas como inactivas) a los elementos del modelo WEAP. La Tabla 3.4-3 presenta la estructura del archivo de enlace, en términos generales, de los atributos con los que cuenta. Debido a que los modelos se trabajan en idioma inglés, es necesario que el nombre del atributo se presente de igual forma.

Tabla 3.4-3 Atributos Archivo de Enlace WEAP - MODFLOW.

Atributo	Representación topológica
Row	Número de fila asociada a cada celda de la grilla del modelo subterráneo
Column	Número de columna asociada a cada celda de la grilla del modelo subterráneo
Row_Column	Atributo que integra el valor de fila y columna para cada celda
Is_Active	Indica la zona de la grilla que contiene las celdas activas del modelo subterráneo
Catchment	Atributo que permite enlazar las Unidades Hidrológicas del modelo
RiverReach	Enlace de tramos de río
GW	Enlace de elementos-acuífero de WEAP
DEMAND1	Enlace de nodos de demanda
DEMAND2	Enlace de nodos de demanda, en caso de existir más de uno de estos elementos a una misma celda

Fuente: Elaboración propia

3.4.3.4 Vinculación de MODFLOW a modelo WEAP

Una vez que los archivos nativos MODFLOW se encuentran dentro de la carpeta del proyecto, al igual que el archivo de enlace generado, es posible realizar el procedimiento de lectura desde WEAP de los archivos MODFLOW. Para ello, se debe continuar de la siguiente manera:

- Dirigirse al menú "Avanzado" y seleccionar "Nexo con MODFLOW (flujo Agua Subterránea)"
- Seleccionar la casilla de la opción "Enlace a MODFLOW"

- Seleccionar el motor de MODFLOW utilizado y vincular el archivo *.nam, correspondiente a uno de los archivos nativos de MODFLOW y que contiene la ubicación del resto de los paquetes generados.
- WEAP presenta una ventana de información referente al estado exitoso o no de la vinculación de los archivos
- Realizar la lectura del archivo enlace mediante "Elegir el shapefile que contiene información de enlaces MODFLOW"
- Especificar el atributo que contiene cada columna del archivo *shp de enlace

3.4.3.5 Calibración del Modelo Acoplado WEAP-Modflow

El proceso de calibración del modelo acoplado superficial subterráneo consiste en ajustar los parámetros de asociados a los flujos superficiales, subterráneos, y aquellos que se interrelacionan; reproduciendo como resultado de la modelación matemática los flujos medidos en estaciones fluviométricas, niveles medidos en pozos y flujos subterráneos estimados, desde una perspectiva global en el sistema hidrogeológico.

Se debe tener en consideración de que en caso de una modificación en la topología o elementos del modelo subterráneo como por ejemplo la ubicación de una condición de borde, inclusión de zonas de recarga o nuevas extracciones, se debe modificar el archivo de enlace WEAP – MODFLOW.

El proceso de ajuste del modelo subterráneo se realiza en base al cumplimiento de un valor máximo de 5% para los estadígrafos MAE normalizado y RMS normalizado, junto a un valor máximo de 1% de error en el balance para cada periodo de stress, todo ello de acuerdo a la Guía de Modelación del SEA. La generación de los estadígrafos, gráfico de comparación entre niveles piezométricos observados versus simulados y registros en pozos de observación frente al valor simulado, necesarios para el análisis del proceso de calibración tanto en términos estadísticos como de tendencia, se realizan mediante una rutina en código Python construida para el presente estudio.

Respecto al modelo superficial, la verificación del ajuste de la calibración se realizó de manera gráfica, permitiendo estimar la correspondencia de los resultados a la tendencia y estacionalidad de las estaciones fluviométricas, junto a un análisis estadístico entre el registro mediante los siguientes parámetros:

1. **KGE**: Permite un análisis conjunto de la correlación, sesgo y variabilidad de la serie simulada con respecto a la observada. Se tiene que $KGE \in (-\infty, 1]$, siendo $KGE = 1$ un ajuste perfecto (Gupta, 2009).

$$KGE = 1 - \sqrt{(r - 1)^2 + (\alpha - 1)^2 + (\beta - 1)^2}$$

Donde:

r [-]: Coeficiente de correlación.

α [-]: Relación de variabilidad.

β [-]: Relación de sesgo.

2. **NSE**: Dicho indicador puede ser interpretado como una medida comparativa del modelo con respecto a la media de las observaciones, cuyo rango es $(-\infty, 1]$. Obtener

valores de *NSE* negativos indica entonces que la serie promedio de observaciones es mejor modelo predictor que el modelo utilizado para la simulación (Gupta, 2009).

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}$$

Donde:

O_i [-]: Valores observados.

P_i [-]: Valores simulados.

\bar{O} [-]: Promedio de los valores observados.

3. **PBIAS**: Medida porcentual de la tendencia promedio de los datos simulados a subestimar o sobrestimar los datos observados. El valor óptimo se alcanza cuando $PBIAS = 0$. Valores positivos (negativos) indican un sesgo de subestimación (sobrestimación) del modelo (Moriasi, 2007).

$$PBIAS = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{sim} - Y_i^{obs}) * 100}{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs})} \right]$$

4. **r²**: Relación entre la dispersión de la serie simulada y la observada. El rango de r^2 descansa entre 0 y 1. Un valor 1 indica que la dispersión de la serie simulada es idéntica a la dispersión de la serie observada (Krause, 2005).

$$r^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}} \right)^2$$

Donde:

O_i [-]: Valores observados.

P_i [-]: Valores simulados.

\bar{O} [-]: Promedio de los valores observados.

\bar{P} [-]: Promedio de los valores simulados.

3.4.3.6 Modelos a Construir y/o Actualizar

En el Anexo H del presente estudio se resumen de manera acabada los modelos superficiales y subterráneo que fueron tomados como base para la elaboración del presente estudio. En los siguientes puntos se resume su estado al momento de ser recepcionados.

i. Huasco

Modelo superficial corresponde a versión MAGIC (DGA, 2013a), con periodo de modelación 1963-2013.

El modelo subterráneo corresponde a versión Visual MODFLOW (DGA, 2013a), con periodo de modelación 1994-2013.

3.4.4 Forzantes Meteorológicas Utilizadas

Las forzantes meteorológicas utilizadas para la modelación superficial en WEAP, corresponden a los datos generados por el Balance Hídrico Nacional (DGA, 2017b). Previamente se realizan comparaciones entre los datos observados en estaciones

meteorológicas y las variables extraídas del balance, con el fin de validar las forzantes a utilizar en la cuenca del Río Huasco.

En esta comparación se evalúan, para la precipitación, el grado de representación estacional del año promedio, magnitudes anuales y curvas de duración. En el caso de la temperatura sólo se evalúan la representación estacional y la media anual.

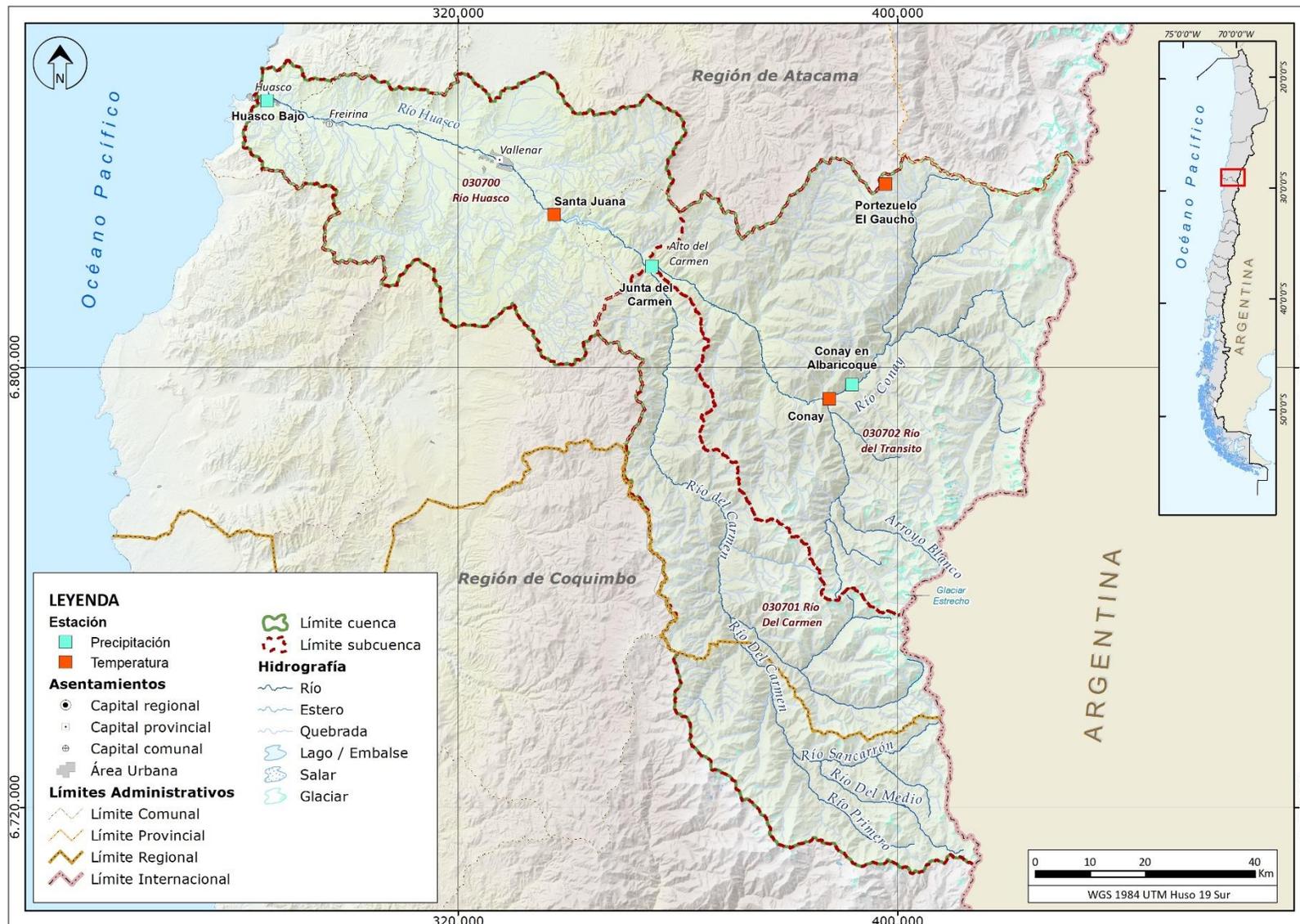
Para el análisis de las estaciones, es necesario realizar una categorización según ubicación espacial y nivel de información disponible. Es por ello que se definen tres clasificaciones longitudinales: Huasco Alto, Huasco Medio y Huasco Bajo.

Posteriormente, para cada variable hidrometeorológica se seleccionan tres estaciones representativas (una para cada sector) de acuerdo al criterio señalado en el informe "Análisis efecto en el régimen hídrico por cambio en patrones meteorológicos" (DGA, 2016b). Dicho criterio se resume en dar prioridad a las estaciones que poseen mayor cantidad de años de registro, para así obtener una mejor representación de las zonas aledañas a dichas estaciones. El análisis involucra una comparación a nivel gráfico y estadístico para las estaciones seleccionadas. Las estaciones con mejor nivel de información temporal fueron clasificadas como estaciones "indicadoras". Para las estaciones no seleccionadas como indicadoras se realizó exclusivamente un análisis estadístico, con los indicadores, definidos anteriormente, KGE, NSE, PBIAS y r^2 .

Las estaciones indicadoras se exponen en la Tabla 3.4-4, especificando nombre, variable medida, sector, inicio y término de observaciones y ubicación. En la Figura 3.4-8 se presenta la distribución espacial de ellas.

Tabla 3.4-4 Estaciones seleccionadas como "indicadoras" para la cuenca Huasco

Nombre	Variable	Sector	Inicio Obs.	Término Obs.	Latitud [°]	Longitud [°]
Huasco Bajo	Precipitación	Bajo	01-01-1993	31-05-2017	-28,4725	-71,1931
Junta del Carmen	Precipitación	Medio	01-05-1948	31-05-2017	-28,7539	-70,4817
Conay en Albaricoque	Precipitación	Alto	01-01-1999	31-05-2017	-28,9519	-70,1106
Santa Juana	Temperatura	Bajo	21-01-1965	04-02-2018	-28,6672	-70,6625
Conay	Temperatura	Medio	21-01-1965	29-11-1992	-28,975	-70,1533
Portezuelo El Gaucho	Temperatura	Alto	01-01-2000	04-02-2018	-28,6231	-70,045



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.4-8 Estaciones "indicadoras" cuenca de Huasco

Cabe destacar que los cuatro índices expuestos anteriormente también son usados para los propósitos de la calibración de los sistemas superficiales y acoplados. Cada indicador comunica una información relevante.

El KGE trata de agrupar en un solo índice el comportamiento de la media, varianza y grado de correlación de la serie. Usualmente un buen KGE se podría obtener entonces con combinaciones de buenos "sub-índices". En general, suele asociarse con un buen indicador de la variabilidad.

Teniendo en cuenta lo anterior, el NSE, permite conocer el ajuste medio de la serie (sea caudal, precipitación, etc), por tanto, complementa la información del indicador anterior, permitiendo comentar respecto de la representatividad del volumen medio de cualquier flujo.

Por lo mismo, el coeficiente de determinación R², incorpora otra variable adicional que es la temporalidad. Un buen ajuste de R², permite indicar que se está respetando la estacionalidad del flujo, lo que es complementado con el gráfico de la estacionalidad media.

Finalmente, PBIAS muestra con un número absoluto, si se está sobre o sub estimando la serie original y en qué porcentaje. Es un valor total, por lo que puede haber períodos bajo lo observado y períodos sobre. De ahí la relevancia de mirar estos indicadores con la plataforma gráfica de resultados.

3.4.5 Eventos extremos y variabilidad climática

3.4.5.1 Evento extremos

Para el análisis de este punto es necesario establecer qué eventos se consideran dentro del análisis, seguido de la resolución espacial de los insumos a utilizar y el rango de tiempo a considerar, tal como se especifica más adelante.

i. Eventos extremos considerados

La base de datos de referencia empleada en este estudio (LA RED, 2014) posee una lista de 36 tipos de eventos predefinidos, cuya selección se basó en la consulta no exhaustiva de diversos diccionarios y glosarios técnicos. En el presente análisis se involucraron solo 4 tipos de eventos, cuya definición queda expuesta en la Tabla 3.4-5, de acuerdo a lo señalado por LA RED (2009).

Los 4 tipos de eventos fueron seleccionados con el fin de servir como indicadores de lo que ha sido registrado históricamente en la cuenca en materia de exceso hídrico. Para que dichos eventos hayan sido parte de la base de datos, fue necesario que: (i) el desencadenante del evento haya superado un determinado umbral, (ii) exista(n) persona(s) afectada(s), y (iii) exista trabajo periodístico que informe dicha afectación.

Tabla 3.4-5 Eventos y su definición.

Evento	Definición
Aluvión	Avenidas torrenciales con arrastre de grandes cantidades de material sólido (guijarros, gravas y bloques de rocas), aplicable a aquellas regiones secas o cauces secos en los que las lluvias ocasionales los producen.
Avenida Torrencial	Flujo violento de agua en una cuenca, a veces reportado como creciente (súbito, rápido), o como torrente. Se aplica cuando en los reportes aparece como -avalancha-, cuando la avenida transporta troncos de árboles y/o abundantes sedimentos desde finos hasta bloques de roca. Pueden ser generados por lluvias, por ruptura de represamientos o por abundantes deslizamientos sobre una cuenca. Excluye los aludes, porque éstos implican desprendimiento de hielo o nieve.
Inundación	Anegamiento o cubrimiento con agua de un terreno donde se localicen poblaciones, cultivos, bienes o infraestructura
Lluvias	Precipitación pluvial. Incluye lluvias puntuales, persistentes o torrenciales en una región específica, así como períodos largos de precipitaciones

Fuente: LA RED, 2009.

ii. Resolución espacial y período de análisis

La base de datos contiene 5 niveles a escala espacial para ubicar un evento determinado, los cuales se indican a continuación:

- Región: mayor división política utilizada para caracterizar a un evento.
- Provincia: división política intermedia para caracterizar un evento.
- Comuna: división política menor utilizada.
- Sitio: permite precisar una o varias zonas pobladas y/o infraestructuras que hayan sido afectadas.
- Coordenadas: Cuando el evento se produce en una localidad, pueblo o ciudad específica, es posible incluir coordenadas de referencia.

La información disponible en la base de datos de LA RED (2014) comprende el periodo 1973-2014. Para los fines del presente análisis, se revisó información de prensa en la Biblioteca Nacional de Chile, Sernageomin (2017), Urrutia y Lanza (1993) y noticias en los portales web de distintos medios de comunicación (escrita, radial, etc.), además de información nacional relacionada con desastres (SUBDERE, 2011). Además, para completar la recopilación de eventos ocurrido durante el año 2014 y extenderla hasta el año 2018, se buscó información de carácter periodístico, utilizando como fuente principal al periódico El Mercurio, el cual posee publicaciones diarias en línea. Esto permitió extender el registro de desastres hasta el periodo 1965-2018.

3.4.5.2 Variabilidad climática

En este punto se busca representar de manera cuantitativa y gráfica la variabilidad asociada a la precipitación, temperatura y caudales bajo escenarios de cambio climático, en comparación con el período histórico.

i. Metodología empleada

El análisis se realiza sobre las variables de precipitación, temperatura y caudales. Para cada una se analiza el periodo histórico (1979-2015) y futuro (2030-2060), utilizando como registros las series ponderadas a escala de cuenca generadas a partir de los resultados del Balance Hídrico Nacional. La escala espacial de la información es 5 x 5 km/píxel, mientras que la escala temporal es mensual. La agregación espacial se realizó sumando la información de cada píxel y dividiendo por el total de píxeles de la cuenca. La agregación temporal anual se realizó sumando los valores mensuales para la precipitación, mientras que para la temperatura y los caudales se consideró el promedio de los valores mensuales. Los resultados incluyen:

- Gráficos de las series anual histórica y futuras (para cada modelo de circulación general, o MGC).
- Distribución de los montos anuales para el periodo futuro.
- Distribución espacial de la variable analizada para el periodo histórico y para las diferencias porcentuales proyectadas para el periodo futuro.

Luego de presentar dichos resultados, se presentan los valores promedio, desviaciones estándar y coeficientes de variación para cada variable. Se incluye adicionalmente los resultados de la prueba de correlación de Mann-Kendall (*tau* y *p-valor*) para cuantificar la tendencia de la serie anual, así como también la significancia de esta. Cada sección finaliza con un resumen de los resultados presentados, enfocado principalmente en las proyecciones realizadas por los MGCs.

3.4.6 Balance Anual y Oferta Sustentable

3.4.6.1 Balances de agua anuales

Se establecen los balances de agua superficiales para dos periodos de análisis, con el fin de determinar la disponibilidad hídrica de la cuenca. Para ello se define como balance histórico el correspondiente a al menos 30 años hidrológicos, mientras que el balance actualizado corresponde al periodo que considera el término del balance histórico y abril del 2019.

Los balances se realizan a escala anual y comprende los siguientes periodos de evaluación:

- Balance Histórico: 1994-2012
- Balance Actualizado: 2012-2019

Estos rangos se definen a partir del periodo de años considerado en el modelo hidrológico de base y predecesor de este estudio, correspondiente a MAGIC Huasco, realizado por Knight Piésold (DGA, 2013a). Si bien el periodo de modelación de este último corresponde a 1963 a 2012, el modelo subterráneo (MS) del mismo estudio comprende el periodo 1994 – 2012. Por lo anterior y dado que en este estudio se acoplarán ambos modelos, el periodo histórico definitivo corresponde a 1994 – 2012.

En primer lugar, se establece la división administrativa con la que se distribuirán los datos a utilizar. En este punto se asume como oficial la división de cuencas hidrográficas de la Dirección General de Aguas, ya que coincide con la distribución espacial de los derechos de aprovechamiento de aguas superficiales. La cuenca del Río Huasco se subdivide en tres subcuencas: Río Huasco, Río Tránsito y Río del Carmen. Bajo esta misma zonificación se distribuyen los derechos de agua.

Luego es necesario definir la oferta y la demanda a considerar como base del balance de aguas, para ello se ha considerado como oferta, los caudales simulados por el modelo WEAP Elqui en las estaciones cercanas al cierre de las cuencas hidrológicas a escala anual. En el caso de la demanda, queda representada por la agrupación de los derechos de agua dentro de las subcuencas antes definidas.

En términos de la demanda solo se consideran los derechos de agua de carácter consuntivo, que generan pérdidas reales del recurso dentro de la cuenca, diferenciando si son de carácter permanente o eventual.

Por lo tanto, los derechos de carácter eventual se relacionan con los caudales con una probabilidad de excedencia de un 5%, mientras que los de carácter permanente se asocian con los caudales con una probabilidad de excedencia del 85%.

3.4.6.2 Actualización de la Oferta Sustentable

Para la actualización de la oferta sustentable se siguen los lineamientos establecidos en el Manual de Normas y Procedimientos para la Administración de Recursos Hídricos del DARH.

Para esto, se deben incluir los siguientes puntos:

- Curvas de variación estacional para los puntos de control a considerar.
- Actualizar los derechos otorgados, en trámite, de todo tipo y distribución.
- Actualizar los caudales ecológicos.
- Calcular la oferta hídrica asociando derechos permanentes a un 85% de probabilidad de excedencia y los derechos eventuales a un 5%.

Finalmente, se aborda el diagnóstico para las subcuencas administrativas del Río Huasco en base a la división de cuencas hidrográficas de la Dirección General de Aguas, debido a su coincidencia con la distribución espacial de los derechos de aprovechamiento de aguas superficiales.

Respecto a la información fluviométrica utilizada, se emplean los caudales medios mensuales generados por el modelo WEAP PEGRH 2019 para generar las curvas de variación estacional en los puntos de control indicados.

Luego, es necesario actualizar y ordenar por tipo, los derechos de aprovechamiento de aguas superficiales, a partir de la base de datos entregada por el director de la Dirección General de Aguas. Los derechos se distribuyeron por cuenca, expediente, tipo y año, junto con los caudales correspondientes. Los derechos de

aprovechamiento que hayan sido inscritos como acciones se consideran según la equivalencia mostrada en la Tabla 3.4-6.

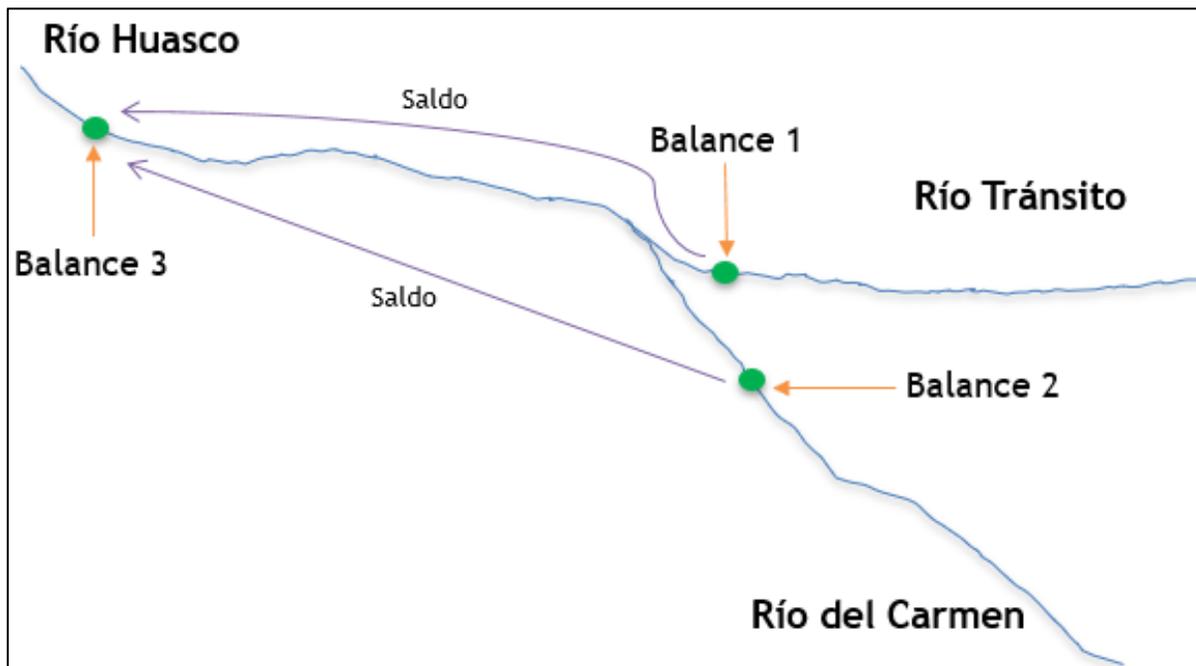
Tabla 3.4-6 Antecedentes distribución de agua en la cuenca por tramo

Tramo	Valor (l/s/acción)	Acción
Tramo 1: Río Carmen	1,20	
Tramo 2: Río Tránsito	1,20	
Tramo 3: Río Huasco entre Confluencia Carmen-Tránsito y Vallenar (Ruta 5)	1,00	
Tramo 4: Río Huasco entre Vallenar y Desembocadura	2,86	

Fuente: Junta de Vigilancia del Río Huasco y sus Afluentes.

Para la actualización de los caudales ecológicos disponibles, existen distintos métodos de determinación según los criterios del DARH, de donde se utiliza el 50% del caudal mínimo del estiaje del año 95%.

Finalmente, se realizan balances localizados en cada cuenca, desde las cuencas de alta montaña hasta la desembocadura del Río Huasco, para ir desplazando la oferta disponible en cada cuenca hasta llegar al punto más bajo. Esto se explica de manera gráfica en el siguiente esquema:



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.4-9 Esquema oferta hídrica sustentable de la cuenca del Río Huasco

Los puntos de análisis establecidos, se calculan los saldos asociados a derechos eventuales y permanentes de acuerdo a lo siguiente:

$$Q_{5\%} - \text{Derechos Eventuales} - Q_{\text{Ecológico}} = \text{Saldo Eventual}$$

$$Q_{85\%} - \text{Derechos Permanentes} - Q_{\text{Ecológico}} = \text{Saldo Permanente}$$

En el caso de Río Tránsito y Río del Carmen, aplican los criterios de cálculo antes mencionados. Luego, para el análisis en el punto de cierre de la cuenca del río Huasco, es necesario incluir los saldos eventuales y permanentes resultantes de los dos tramos anteriores, quedando de la siguiente manera:

$$Q_{5\%} - \text{Derechos Eventuales} - Q_{\text{Ecológico}} + \text{Saldo Eventual} = \text{Oferta Total Eventual}$$
$$Q_{85\%} - \text{Derechos Permanentes} - Q_{\text{Ecológico}} + \text{Saldo Permanente} = \text{Oferta Total Permanente}$$

3.4.7 Análisis de Criterios de Sustentabilidad de Acuíferos

El documento del DARH "Manual de Normas y Procedimientos para la Administración de Recursos Hídricos" considera como criterio general el caudal de explotación sustentable como el recurso disponible a nivel de la fuente para la entrega de derechos de aprovechamiento de aguas subterráneas. Para ello se han generado criterios de verificación de una explotación sustentable, a nivel de SHAC, tanto para sectores abiertos o cerrados.

3.4.7.1 Criterios de Sustentabilidad de Acuíferos

Los criterios que permiten verificar la sustentabilidad de la explotación acuífera en cada SHAC se presentan a continuación.

i. Criterio 1: Descensos sustentables en el tiempo a nivel de sector acuífero.

Se considera que el volumen de afección sobre el acuífero en el largo plazo (50 años) no debe afectar más allá de un 5% del volumen total del acuífero. En caso contrario, el sistema acuífero será considerado con afección y se deberá cerrar el acuífero.

Se considera que un descenso sustentable es aquel no mayor a 1 metro en los últimos 20 años del tiempo de operación total (50 años de simulación), en caso contrario se considera que los descensos son sostenidos.

$$(V_0 - V_{50})/V_0 \leq 0,05$$

Donde:

V_{50} = Volumen del acuífero a los 50 años de operación indicado por el modelo

V_0 = corresponde al volumen inicial en el acuífero antes de la operación del modelo.

En caso que los descensos sean sostenidos y no se cumpla la condición de cierre para volúmenes, se deberá aumentar la extracción hasta alcanzar la condición del 5%.

ii. Criterio 2: Interferencia río acuífero.

Este criterio busca no afectar los recursos superficiales ya comprometidos. El grado de interacción debe ser menor que 10% de los flujos superficiales pasantes en cada

una de las zonas, evaluados como el caudal promedio anual de 85% de probabilidad de excedencia.

La afección sobre el cauce superficial se define como ΔQ , término compuesto por dos variables:

- a) Aumento de infiltración en el sector acuífero debido al aumento de la explotación.
- b) Disminución de los afloramientos del río.

$$\Delta Q \leq 10\% Q_{anual,85\%}$$

iii. Criterio 3: Satisfacción de la demanda.

Para cada sector hidrogeológico, el modelo debe permitir una extracción mínima de un 95% del caudal ingresado como demanda y la oferta estará dada por el caudal de los pozos que el modelo indica que son factibles de obtener.

$$Q_{oferta} > 95\% Q_{demanda}$$

iv. Criterio 4: Pozos secos.

En cada sector hidrogeológico no debe haber más de un 5% de pozos desconectados o colgados. En caso contrario el sector quedará cerrado. Esta condición apunta a respetar derechos de terceros sin importar la cantidad que extraiga cada pozo.

$$\frac{N_{pozos\ secos}}{N_{total\ pozos}} < 5\%$$

v. Criterio 5: Afección a sectores abiertos.

Verificar que el aumento de extracciones desde un sector no afecte la disponibilidad sustentable desde otro sector aguas abajo. El cumplimiento de este criterio estará dado porque ninguno de los sectores abiertos en que se aumente la demanda provoque el no cumplimiento de los criterios para los otros sectores abiertos.

3.4.7.2 Metodología de Aplicación de Criterios de Sustentabilidad de Acuíferos

De manera general, la aplicación de estos criterios se realizó considerando:

- El análisis se realizó a todos los SHACs que se encuentren acoplados en su totalidad.
- Se analizaron solo los criterios que apliquen a cada SHAC en particular
- Los escenarios de sustentabilidad construidos corresponden a una extensión del modelo base de calibración. Sin embargo, el análisis de cada criterio se realiza considerando una extensión de 50 años, correspondientes al periodo 2000 – 2050.
- Las demandas para el periodo de extensión 2020 – 2050 corresponden a las del año 2019.
- El periodo 2020 – 2050 considera las forzantes climatológicas asociadas al Modelo de Circulación General de cada cuenca.

- Un SHAC se ha considerado que posee una explotación sustentable solo en caso de cumplir con todos los criterios de sustentabilidad que apliquen.
- En caso de que un SHAC no cumpla con un criterio, se determina que no posee una explotación sustentable y el análisis de los criterios restantes no aplica.
- En caso de cumplimiento total de los criterios por parte de un SHAC, su oferta sustentable queda sujeta al análisis de un escenario que considere un aumento en el caudal de explotación, debiendo verificarse el cumplimiento de todos los criterios.
- El caudal de oferta sustentable corresponde al menor valor de explotación que resulte del análisis y cumplimiento de todos los criterios de sustentabilidad que apliquen en cada SHAC.
- De manera particular, el análisis de los criterios de sustentabilidad presenta las siguientes consideraciones.

i. Criterio 1: Descensos sustentables en el tiempo a nivel de sector acuífero

El cálculo de la variación del volumen en un periodo de 50 años utiliza el resultado del escenario de simulación en el periodo 2000 a 2050. El volumen es calculado para cada celda activa al año 0 y 50 de simulación de la forma:

$$V_n^i = A_n^i \times H_n^i \times S_n^i$$

Donde:

V_n^i : Volumen en el tiempo n para el estrato i

A_n^i : Área de la celda en el tiempo n para el estrato i

H_n^i : Altura de columna de agua en el tiempo n para el estrato i

S_n^i : Valor de almacenamiento en el tiempo n para el estrato i

La altura de la columna de agua corresponde a la diferencia entre el valor del nivel freático en cada celda para el tiempo n sobre el valor mínimo de la celda en el estrato i.

ii. Criterio 2: Interferencia rio acuífero

El criterio limita la interferencia rio acuífero al 10% del valor del caudal medio anual con probabilidad de excedencia de 85% (Q85), por ello es necesario realizar de manera inicial su cálculo en un punto de control al final de cada SHAC para el periodo de calibración.

La otra componente del criterio corresponde a la variación de la afectación sobre el cauce superficial (ΔQ) el cual es obtenido mediante la diferencia del afloramiento neto en cada SHAC entre dos escenarios de simulación, con y sin demandas. En este caso, su valor corresponde al promedio del afloramiento neto obtenido de la simulación durante los 50 años de análisis.

iii. Criterio 3: Satisfacción de la demanda

El criterio corresponde al porcentaje de caudal ingresado al modelo como extracción asociado a los derechos de aguas (Q_{dda}) constituidos frente al caudal de explotación

resultante de la simulación (Qof). En la obtención de este valor se debe tener en cuenta:

- Debido al acople entre los modelos subterráneo y superficial, la componente del uso agrícola del Qdda corresponde a un resultado del modelo por lo cual su cálculo no corresponde directamente a la sumatoria de los derechos constituidos y asociado a un factor de uso.
-
- El no cumplimiento de la demanda por parte de una explotación subterránea se asocia a la incapacidad del pozo de seguir bombeando con igual rendimiento debido al descenso de niveles que deja pozos "colgados" o sin la altura de agua suficiente para la utilización de la bomba. El proceso de acople de los modelos subterráneo y superficial, presenta la imposibilidad de incorporar a cada extracción la información de su habilitación y se deben representar con cribas en todo lo alto del estrato, por lo cual el supuesto base para la evaluación de las sustentabilidades, es que el pozo solo deja de bombear si es que la celda en la cual se encuentra se seca.

iv. Criterio 4: Pozos secos.

Como se mencionó en el punto anterior, el proceso de acople no permite integrar la información de habilitación de cada extracción, por lo cual un pozo deja de bombear solo si la celda en la cual se encuentra se seca. Por lo tanto, se ha definido un pozo seco considerando:

- La altura de cribaje corresponde al total de la altura del estrato, desde la superficie hasta el basamento.
- El pozo se define seco si es que luego del periodo de 50 años de modelación, su columna de agua baja del 30% del total, es decir si su nivel freático se presenta por debajo del 70% de la altura de cribaje.
- A pesar de ello se debe considerar que, al igual forma que para el criterio 3, se presenta una incertidumbre importante mientras no sea posible ajustar los parámetros de explotación para cada pozo ingresado al dominio de modelación.

v. Criterio 5: Afección a sectores abiertos.

- El criterio corresponde a la verificación de la no afectación a sectores abiertos debido a un aumento de la explotación de otro sector abierto. Sin embargo, si de acuerdo al análisis de los criterios se determina que un sector abierto no presenta una explotación sustentable, no se ha considerado abierto para efectos del análisis de este criterio.

3.4.8 Selección de Modelos de Circulación General (MCG) para Escenarios de Cambio Climático

Para la evaluación de los dos escenarios de cambio climático del PEGH, se seleccionarán los dos MCG que generan las menores variaciones de precipitación y escorrentía para las cuencas, de manera de verificar el correcto funcionamiento de los modelos acoplados en la situación futura (2019-2050) (identificar potenciales secados de celdas, variaciones

bruscas de nivel, problemas de convergencia, propios de la eventual variación de la oferta hídrica en las cuencas). Así, se podrá realizar la comparativa entre ambos MCG, y se seleccionará aquel modelo que sea más estable en el periodo 2019-2050 (estabilidad numérica del modelo), como representativo del cambio climático para tomarlo como base en la implementación de los escenarios de gestión.

La selección de los modelos de circulación general (MCG) para este estudio se enmarca dentro de la metodología empleada en la Actualización del Balance Hídrico Nacional (DGA, 2018a).

De acuerdo a DGA (2017b) y DGA (2018a), los modelos que se seleccionaron para el estudio poseen 3 razones fundamentales:

1. Respuesta regional a ambos modos globales de variabilidad climática: Esto considera que también interpretan los modelos señales como El Niño/Oscilación del Sur (ENSO) y el Modo Anular del hemisferio Sur (SAM), ambos asociados a la precipitación.
2. Sensibilidad Climática: El grado de respuesta de los modelos antes las variaciones de temperatura y de concentraciones de CO₂. Hay modelos con distintas sensibilidades.
3. Cambios regionales: Se evaluaron los cambios en las forzantes de precipitación y temperatura para el escenario RCP 8,5 en la ventana 2030-2060 respecto de la línea base. Se buscaron entonces modelos que cubrieran una gama de variaciones.

Siguiendo estos 3 criterios, 4 modelos fueron seleccionados para el estudio, los cuales se presentan en la Tabla 3.4-9. Como se puede ver, los modelos agrupan 4 condiciones de sensibilidad, desde una baja extrema hacia una alta extrema y son ejecutados por centros científicos de diversos lugares en el mundo (USA, Francia, Japón y Australia).

Tabla 3.4-7 MCG seleccionados para representar las proyecciones de cambio climático en DGA (2018a).

Modelo	Institución	Sensibilidad climática
CSIRO-MK3-6-0	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization in collaboration with Queensland Climate Change Centre of Excellence, Australia.	Baja Extrema
CCSM4	National Center for Atmospheric Research, USA.	Baja moderada
MIROC-ESM	Agency for Marine-Earth Science and Technology, Atmosphere and Ocean Research Institute (University of Tokyo), and National Institute for Environmental Studies, Japan.	Alta moderada
IPSL-CM5A-LR	Institut Pierre-Simon Laplace, France.	Alta extrema

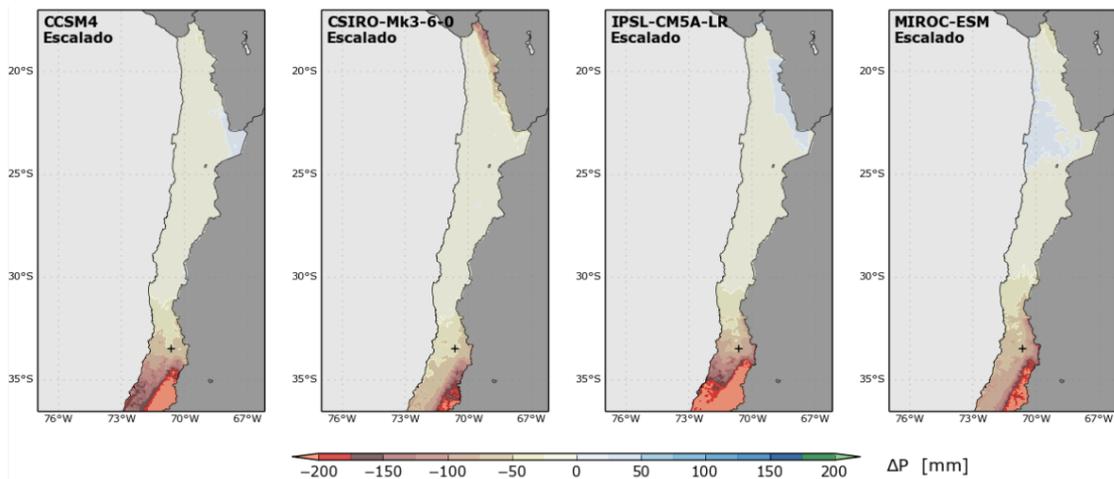
Fuente: DGA (2018a)

Nota: Corresponde a la Tabla 2.8 de dicho informe.

Dentro de los documentos generados en DGA (2018a) se encuentra el Anexo F, que resume los cambios en precipitación, temperatura y escorrentía, entre otros, para todas las cuencas "DARH" solicitadas por DGA. Este análisis lo realiza para los 4 MCG, de

manera que los tomadores de decisión sean los que evalúen que modelo utilizarán para la evaluación de políticas de gestión.

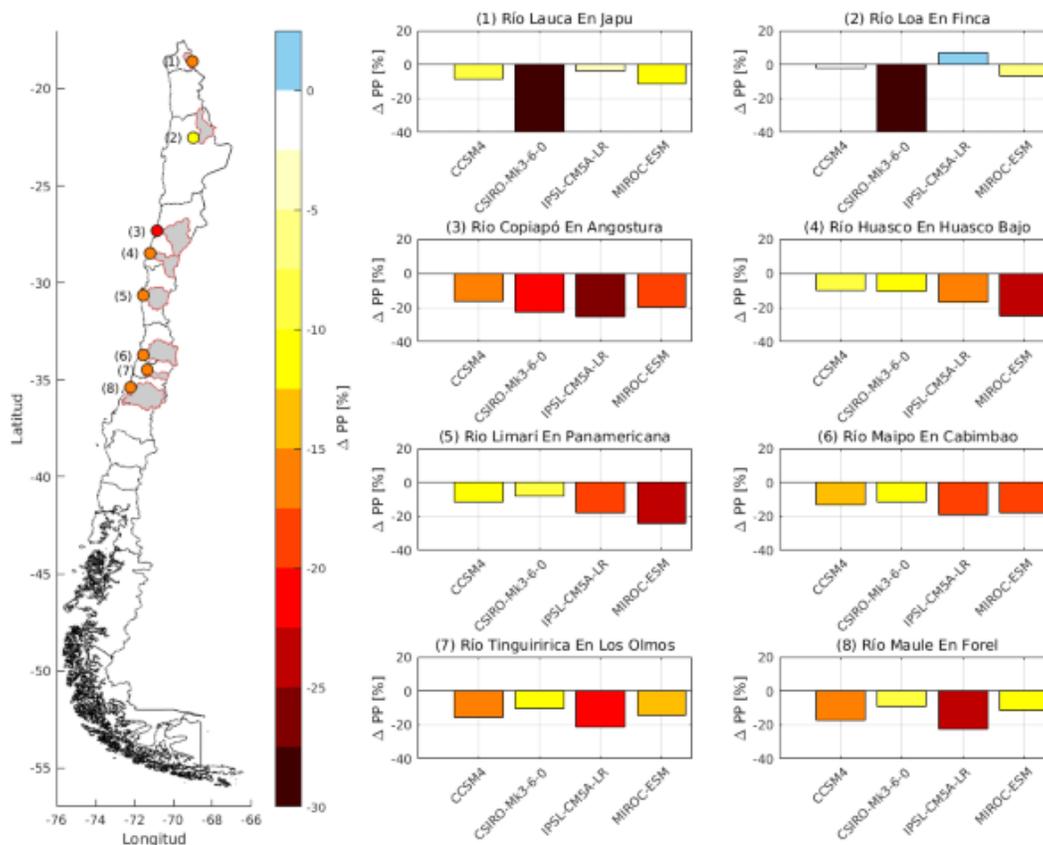
Dentro de esos resultados, se puede comentar que los cambios de precipitación más severos suelen ocurrir con los modelos IPSL y MIROC. Sin embargo, DGA (2017b) y DGA (2018a), también reconoce que los cambios son heterogéneos, habiendo más disparidad en el Norte Grande y Norte Chico. Sólo de la RM hacia el sur dominan las tendencias negativas. En la parte Central de Chile se prevé una disminución de precipitaciones que va desde 5-10% (CSIRO) hasta un 20-25% (IPSL).



Fuente: Figura 2.35, DGA (2018a).

Figura 3.4-10 Cambios en la precipitación anual media, proyectado hacia 2030-2060 respecto de LB 1985-2015 para cada MCG.

Los cambios a nivel de cuenca son entonces variados conforme se aumenta la latitud no existiendo un único modelo que siempre muestre una tendencia marcada al ascenso o aumento, por ejemplo, de las precipitaciones. En la Figura 3.4-10, se puede ver como en el río Loa en la Finca el descenso más marcado ocurre para el modelo CSIRO, mientras que para el río Copiapó en Angostura, ocurre en el modelo IPSL.



Fuente: DGA (2018a), Figura 2.37.

Figura 3.4-11 Cambio relativo en precipitación media anual proyectada para el período proyectado para el período futuro (2030-2060) respecto al período de línea base (1985-2105), promediado sobre un conjunto de cuencas con información fluviométrica (CAMELS-CL).

Por tanto, se debe entender que cada cuenca representa un sistema único donde el comportamiento de los modelos MCG escogidos por DGA (2018a) pueden tener proyecciones muy distintas dependiendo de la ubicación geográfica en que éstos se encuentren.

Adicionalmente a esto, se debe superponer el hecho de que la elección del MCG debe ser compatible con el modelo acoplado, particularmente, debe permitir operar el modelo hasta el año 2050, asegurando su convergencia numérica.

Por este motivo, se analizaron los resultados de la modelación hidrológica de DGA (2018a), recopilando las variaciones de precipitación y escorrentía para todas las cuencas en cuestión.

La Tabla 3.4-8 presenta un resumen de las variaciones estimadas de precipitación y escorrentía para las cuencas DARH que se presentan en el Anexo F de DGA (2018a).

Tabla 3.4-8 Resumen de las variaciones porcentuales de precipitación y escorrentía para distintas cuencas estudiadas en DGA (2018a).

Modelo MCG	CSIRO-MK3.6		CCSM4		MIROC-ESM		IPSL-CM5A-LR	
	D Pp	D Esc						
Cuenca/Ventana	30-60; 85-15							
Copiapó	-15%	5%	-12%	-12%	-26%	-33%	-18%	-16%
Huasco	-5%	14%	-7%	-20%	-28%	-37%	-14%	-14%
Elqui	-4%	2%	-4%	-11%	-27%	-34%	-14%	-16%
Limarí	-5%	-4%	-9%	-17%	-25%	-30%	-16%	-20%
Choapa	-7%	-10%	-11%	-23%	-24%	-26%	-17%	-20%
Aconcagua	-9%	-13%	-12%	-19%	-21%	-25%	-16%	-20%
Maipo	-9%	-12%	-12%	-17%	-18%	-22%	-18%	-21%

Fuente: Elaboración Propia en base a Anexo F (DGA, 2018a).

Tal como se aprecia en la tabla anterior, por ejemplo, para la cuenca de Huasco, la variación para el modelo MIROC-ESM es de un -28% y -37%; mientras que para el modelo CSIRO las variaciones son de un -5% y 14%; respectivamente para la precipitación y escorrentía.

En el caso de Huasco, los modelos seleccionados como prioridad 1 y 2 son CSIRO y CCSM4 respectivamente. De esta manera, los escenarios de cambio climático a evaluar contemplan las forzantes meteorológicas de dichos MCG, y una situación de demanda equivalente a la de 2019, replicada hasta 2050, de manera de evaluar las variaciones de la oferta hídrica en los modelos.

Tabla 3.4-9 Definición de escenarios de cambio climático para la modelación

ESCENARIOS CC	Periodo	OBS
E1 CC	Abr 2019 - Mar 2050	
Forzantes	Abr 2019 - Mar 2050	BH MCG CSIRO
Demandas	Abr 2019 - Mar 2050	Replicadas desde 2019 para analizar variación de oferta hídrica y cómo responde el sistema para garantizar funcionamiento
E2 CC	Abr 2019 - Mar 2050	
Forzantes	Abr 2019 - Mar 2050	BH MCG CCSM4
Demandas	Abr 2019 - Mar 2050	Replicadas desde 2019 para analizar variación de oferta hídrica y cómo responde el sistema para garantizar funcionamiento

Fuente: Elaboración Propia.

Nota: La elección de los dos modelos dependerá de aquellos que presenten las menores disminución de escorrentía y precipitación.

De esta manera, el MCG seleccionado se asociará al escenario de cambio climático (E CC) sobre el cual se realizará el análisis de situación futura.

3.5 METODOLOGÍA APLICADA EN LA PAC

En el marco del estudio "Plan Estratégico de Gestión Hídrica en la Cuencas del río Huasco", se desarrolló un componente de participación ciudadana de acuerdo a lo solicitado en las bases técnicas. Los resultados de estas actividades quedan reflejados en el Capítulo 2 del Informe Final, específicamente en el acápite 2.6 Gobernanza del agua.

3.5.1 Introducción y objetivos de la PAC

A continuación, se presenta la metodología utilizada para el desarrollo del PAC cuyo propósito ha sido estipular "una propuesta de estrategia que permita una fluida comunicación con los actores interesados y asegurar su participación efectiva en la discusión en torno a las propuestas de sistema de gobernanza para una futura implementación del Plan por cuenca y en las distintas actividades planteadas para el desarrollo de este estudio". Además, la estrategia señalada deberá ser planteada tomando como base las experiencias anteriores y actuales de la cuenca, teniendo como propósito proporcionar viabilidad política y legitimidad social a los resultados del estudio.

Cabe mencionar que esta metodología ha sido ajustada y adaptada a las condiciones particulares existentes en el territorio, considerando que la mayor parte del proceso de participación de los actores ciudadanos de las cuencas, se realizó de manera contemporánea con la situación de pandemia que afecta al país.

En función de lo anterior, el trabajo desarrollado asumió los siguientes tres principios:

- Enfoque territorial: consistente en el levantamiento y análisis de información territorialmente diferenciada en las áreas geográficas en que se inserta el estudio, con el fin de distinguir realidades y objetivos particulares. Al relevar esta dimensión se buscó aportar a la integralidad en la gestión del desarrollo local. Es decir, incorporar las variables socioeconómicas, ambientales y culturales del entorno.
- Participación ciudadana: poniendo en valor la consulta a los ciudadanos y otros actores sociales, económicos y/o políticos involucrados en el territorio, en relación a la posibilidad de generar y apropiarse de espacios de encuentro público en los que se define su futuro.
- Reconocimiento de la diversidad cultural: visibilidad de saberes, historias y comunidades que están asociados al territorio.

Dicho lo anterior, los objetivos específicos del proceso de participación ciudadana fueron los siguientes:

- Sistematizar y analizar la información generada en los distintos procesos de participación ciudadana realizados por los distintos planes de gestión ya desarrollados con anterioridad, en relación a conclusiones generales, compromisos adquiridos, etc.
- Realizar un proceso de consulta a la institucionalidad del agua de las cuencas, garantizando la participación de todos los interesados, promoviendo la coordinación de las diversas intervenciones locales, para orientar las decisiones públicas y

privadas de los proyectos, programas y planes relacionados, directa o indirectamente con el agua.

- Obtener la información necesaria para retroalimentar elementos del diagnóstico que complementen el desarrollo del plan de las cuencas, entender la realidad de las cuencas y formular escenarios de gestión hídrica exitosos.
- Presentar a las OUA de las cuencas y empresas usuarias de agua, los resultados de la simulación de los escenarios diseñados en el plan de cuencas, para involucrarlos y responder a sus observaciones y comentarios.
- Validar en conjunto con las OUA de las cuencas y empresas usuarias de agua el planteamiento de las estrategias de gestión de acuerdo a las brechas identificadas.
- Consolidar los resultados del proceso participativo para informarlos a la ciudadanía en general.

Se debe considerar que, durante el mes de marzo de 2020 se desencadenó en el país una situación de pandemia del virus Sars-CoV-2, que impuso nuevamente la necesidad de adaptar las herramientas metodológicas diseñadas originalmente a las condiciones generadas por la necesidad de confinamiento y distancia social preventiva, exigidas por las autoridades sanitarias para enfrentar la emergencia. En el siguiente acápite se describen con detalle las herramientas y procedimientos utilizados para desarrollar el proceso participativo en tales condiciones.

3.5.2 Herramientas metodológicas

De acuerdo a lo expuesto anteriormente, en cada etapa del estudio se contó con diversos tipos de herramientas metodológicas participativas que permitieron:

- Difundir el propósito del estudio;
- Apoyar la recolección de información;
- Garantizar condiciones para alcanzar una real participación de los actores involucrados.

Considerar que previo a las actividades PAC existe un proceso de análisis y sistematización de información, lo cual corresponde a una herramienta metodológica de participación, a través de la cual se realiza una recopilación de antecedentes de actividades de participación ciudadana de planes de gestión generados con anterioridad, sistematizando conclusiones, compromisos adquiridos y otros datos relevantes. En Tabla 3.5-1 se describen estas herramientas utilizadas en este proceso de participación:

Tabla 3.5-1 Herramientas Metodológicas Plan de Participación

Herramientas	Nivel de participación
<i>Reuniones con actores relevantes:</i> diálogo grupal y guiado, a partir de presentación inicial y una pauta de preguntas, para obtener información u opiniones en profundidad. Las reuniones son una técnica cualitativa de recolección de información y opinión. Busca conocer percepciones, preocupaciones y posturas de las personas frente a temas o proyectos en forma fundamentada. Fueron aplicadas a grupos actores clave en las temáticas a consultar.	Información Consulta

Herramientas	Nivel de participación
<i>Encuestas con actores relevantes:</i> proceso de consulta personalizado y guiado, a partir de un documento introductorio inicial y una pauta de preguntas, para obtener información u opiniones en profundidad. Las entrevistas son una técnica cualitativa de recolección de información y opinión. Busca conocer percepciones, preocupaciones y posturas de las personas frente a temas o proyectos en forma fundamentada. Serán aplicadas a actores clave en las temáticas a consultar.	Información Consulta

Fuente: Elaboración Propia

Como se señala previamente, existieron herramientas metodológicas (talleres y reuniones territoriales), que se concibieron originalmente para ser aplicadas en reuniones presenciales. Sin embargo, por efectos de las condiciones particulares en que debieron realizarse las actividades de participación y nuevos lineamientos establecidos por el mandante, estas reuniones presenciales debieron ser reemplazadas por encuentros online (tele reuniones) y entrevistas por correo electrónico, para permitir el cumplimiento de los objetivos y actividades previstos, respetando las exigencias de distanciamiento social y confinamiento, derivadas del contexto ya señalado.

Finalmente, se debe considerar que los consensos realizados durante las reuniones con actores relevantes, son respecto a temas tratados en tales instancias, y no significa que dichos acuerdos vayan a ser incorporados en el Plan, dado que este proceso de participación es de carácter informativo y consultivo, no obstante, esto no significa que no se evalúe su incorporación.

3.5.3 Plan de trabajo PAC

De acuerdo a los objetivos y metodología indicada previamente para el componente PAC del estudio y tras el proceso de recopilación de antecedentes participativos en fuentes secundarias (principalmente estudios sobre recursos hídricos) en la cuenca del río Huasco, se diseñó y puso en acción un plan de trabajo que contempló, en lo básico, tres partes o momentos:

- Recopilación de antecedentes y definición de actores relevantes a convocar para el estudio (de lo que se da cuenta en los puntos 3.5.4 y 3.5.5)
- Diseño y programación de reuniones y talleres participativos con actores relevantes
- Ejecución de reuniones y talleres participativos (punto 3.5.6)

El Plan de Participación resultante se presenta en el Anexo I, acápite 3, del presente estudio.

3.5.4 Recopilación de antecedentes

En la etapa orientada a recabar antecedentes de procesos participativos en investigaciones relacionadas a recursos hídricos, en la cuenca del río Huasco, también se generó un listado preliminar de actores relevantes en ambas cuencas. El listado mencionado, se complementó a través de un proceso específico de búsqueda en fuentes secundarias de organizaciones públicas y privadas que, debido a sus funciones, tuvieran

vinculación directa o indirecta con el tema hídrico, de lo cual resultó un listado amplio de posibles actores a considerar en el proceso participativo del estudio.

Para la recopilación de actores relevantes, se revisó bibliografía especializada y estudios vinculados a los recursos y la gestión hídrica. Posteriormente los actores se categorizaron mediante atributos y representación sectorial, lo cual se describe en el acápite 3.5.5.2 del presente informe.

El trabajo resultante de la recopilación de antecedentes se presenta en el Anexo I, acápite 2, del presente estudio.

3.5.5 Definición de escalas de análisis. Mapa de actores

Tras el proceso de trabajo con fuentes secundarias de recopilación de antecedentes sobre actores relevantes, a fin de identificar y seleccionar a aquellos actores que debían ser considerados en las diferentes actividades de participación previstas en ambas cuencas hídricas, se consideraron los siguientes criterios metodológicos:

3.5.5.1 Definición de actor relevante

Se consideran como actores sociales relevantes aquellas organizaciones o personas que representan intereses relacionados con los recursos hídricos de las cuencas; que sufren algún grado de afectación sobre derechos o acceso a estos recursos; o que poseen conocimiento técnico e información pertinente sobre materias hídricas de las cuencas.

3.5.5.2 Metodología de selección de actores

De acuerdo con el enfoque mencionado anteriormente, para la identificación de los actores relevantes en la gestión estratégica de las cuencas y considerados en los procesos de participación asociados al desarrollo de los modelos hidrológicos integrados, se contemplaron los siguientes elementos:

i. Atributos de los actores

- Que representen intereses de la comunidad (o de un sector de ella) en un territorio relacionado con recursos hídricos de la cuenca (estratégicos).
- Actores con legitimidad comunitaria y/o capacidad de convocatoria en torno a recursos hídricos de la cuenca.
- Actores con conocimiento técnico especializado, experiencia y/o recursos técnicos en temática hídrica, y que hayan trabajado (investigado) en la cuenca.
- Actores imprescindibles para la implementación y/o utilización del plan estratégico de gestión hídrica.

ii. Representación sectorial

Se realizó una segmentación según la pertenencia sectorial de los actores, considerando estado, comunidad o sociedad civil y actores de mercado, además de instancias de coordinación y gestión de recursos hídricos:

- Actores institucionales públicos relacionados.
- Organizaciones Usuarios de Agua.
- Mesas técnicas.
- Asociaciones de Agua Potable Rural.
- Comunidades agrícolas.
- Comunidades y asociaciones indígenas.
- Fundaciones o movimientos ambientales.
- Organismos técnicos vinculados a temas hídricos.
- Grandes empresas usuarias de recursos hídricos (por ejemplo: sanitarias).

iii. Procedimiento de inclusión

El siguiente paso fue evaluar los atributos de liderazgo y representatividad de cada actor empírico respecto de la cuenca en el ámbito de los recursos hídricos, utilizando un criterio de “filtro grueso”, para el cual fueron considerados como relevantes aquellas organizaciones o personas que representan intereses relacionados con los recursos hídricos de la cuenca, por ejemplo, representantes de Organizaciones de Usuarios de Agua; que sufren algún grado de afectación sobre los DAA (usuarios de DAA) o acceso a estos recursos; que tuvieran injerencia en el desarrollo de políticas y programas hídricos; o que desarrollaran investigación académica relativa al agua en la región y en la provincia. Lo anterior se consideró para su posterior selección específica según el tipo y número de actividades de participación en la cuenca.

Esta selección se realizó en base a la revisión de documentos, estudios y bibliografía existente para las cuencas del río Huasco (Anexo I.1), además de la sistematización de la información obtenida del diagnóstico y de las reuniones de trabajo y presentaciones con actores institucionales de ambas cuencas (y de la región de Atacama).

3.5.5.3 Actores en el territorio

Una vez finalizada la etapa de diagnóstico, y antes de hacer el ajuste metodológico que acotó la nómina de actores a convocar, se determinó un listado de actores en la cuenca, todos ellos vinculados al recurso hídrico, en que se establecieron cinco categorías según sus respectivos ámbitos de acción, a saber:

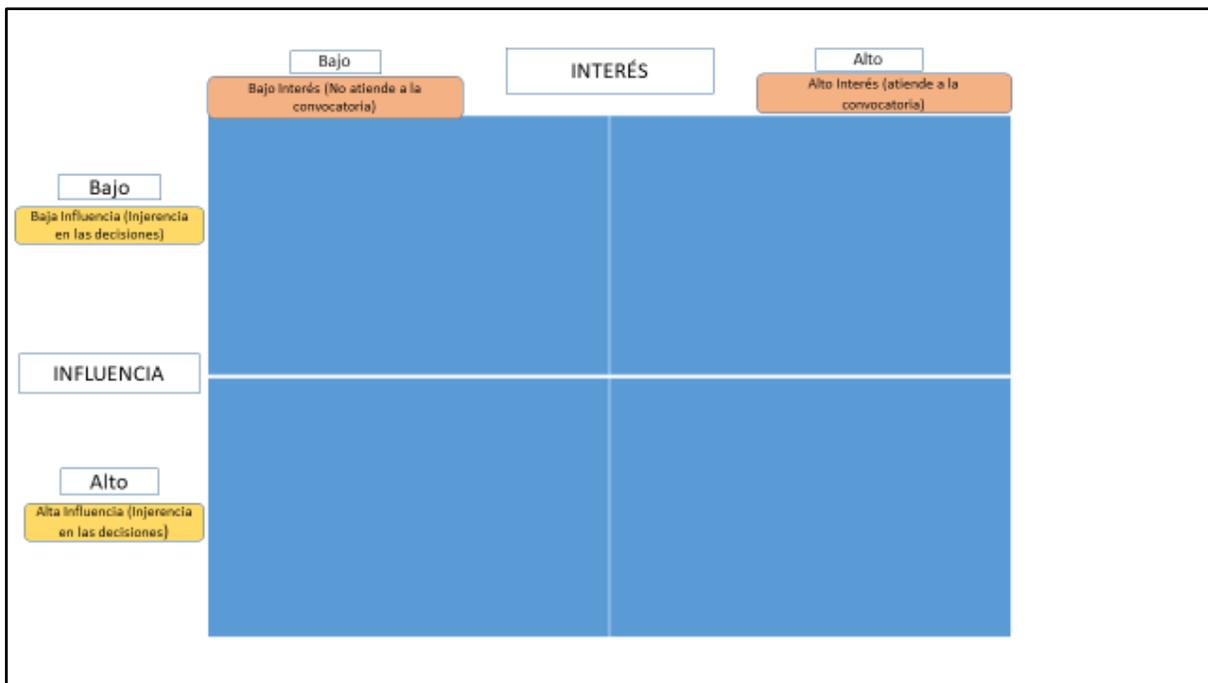
- Actores sector público nivel regional: comprende a aquellos actores que representan a instituciones o servicios públicos responsables del gobierno político o sectorial, cuyo ámbito de acción tiene alcance a nivel regional.
- Actores sector público nivel local: son aquellas instituciones públicas cuyo radio de acción alcanzan a nivel provincial.
- Actores sector privado: corresponden a entidades privadas cuyo accionar o ámbito de acción los vinculan con los recursos hídricos.
- Actores sector público-privado: son instituciones o entidades que nacen del acuerdo entre el sector público y el sector privado, bajo distintos formatos jurídicos.
- Actores sector comunidad: representan a aquellas entidades u organizaciones que agrupan a ciudadanos con un interés común.

3.5.5.4 Mapa de actores convocados

En función de la información y los criterios definidos anteriormente, en el mapa se pormenoriza la situación de cada actor (o grupo de actores) relevante efectivamente convocado a las actividades participativas programadas y realizadas, además se presenta el grado de influencia/interés de esos actores.

i. Relaciones Interés/Influencia

Dentro de las herramientas que permiten establecer la posición de diversos actores frente a un tema específico, encontramos aquella que lo hace a partir de parámetros de influencia/interés de esos actores. Una forma de correlacionar tales parámetros, donde se pueden utilizar las categorías de "Alto" y "Bajo" para establecer los grados de influencia e interés de cada actor, es la que se presenta en la Figura 3.5-1.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.5-1 Diagrama influencia/interés

En el caso del presente estudio, basados en los datos dispuestos en las columnas de Grado de Interés y Grado de Influencia de presentados junto al mapa de actores, además de la información obtenida a partir de las reuniones PAC realizadas, se estableció la gráfica que se muestra más abajo y que permite visualizar la ubicación de cada actor relevante en cuanto a su grado de influencia (nivel de injerencia en temas hídricos) y grado de interés (nivel de disposición a participar en el estudio²). De esta forma, aquellos actores que se localizan en el cuadrante inferior derecho poseen alto grado de influencia y de interés. Al contrario, los actores que se localizan

² Se define de acuerdo a su asistencia a la convocatoria.

en el cuadrante superior izquierdo tienen bajo grado de influencia e interés. Los actores que se ubican en el cuadrante superior derecho, por su parte, tienen alto grado de interés, pero bajo grado de influencia, mientras que los actores que se sitúan en el cuadrante inferior izquierdo tienen alto grado de influencia, pero bajo grado de interés.

ii. Sociograma de redes de actores relevantes

En base a la información recopilada del proceso participativo en el estudio de la cuenca del río Huasco, en especial en las reuniones con los actores relevantes convocados, se procedió a realizar un análisis de las redes a través de las cuales dichos actores relevantes se articulan y movilizan en pos de sus objetivos e intereses.

Para realizar este análisis, se elaboró un diagrama de los flujos de comunicación, basado en la interacción expuesta en las reuniones participativas señaladas, a las que fueron convocados y a las que asistieron representantes de entidades locales, regionales, públicas y privadas, en fases sucesivas.

El sociograma presente consideró a un total de 14 actores (nodos, graficados con distintos colores y agrupados en cinco segmentos), desde los cuales se entrega y recibe información, y desde donde es posible observar dinámicas de comunicación binarias, es decir, se pregunta de manera simple por la existencia o no de relación. Cabe recordar que los actores convocados lo fueron en tanto mantienen una relación directa con el tema hídrico.

En el caso particular del Plan, el sociograma permitió establecer el grado de relación entre ellos, el cual demuestra lo conectados que se encuentran los actores convocados, destacando las redes de los actores públicos con los actores privados. No obstante, dado el nivel de información disponible para construir dicha herramienta, se procede a analizar las brechas existentes para lograr generar el sociograma de redes de manera correcta.

3.5.6 Reuniones de presentación en la cuenca

Terminada la recopilación de antecedentes en fuentes secundarias, la definición del plan de trabajo PAC y los actores relevantes a convocar a actividades participativas, se volvió a realizar un ajuste al plan y a las actividades participativas, acotándose el número de las mismas. Por otro lado, como está indicado en los puntos antes presentados, la contingencia sanitaria llevó a modificar el formato presencial de las actividades participativas por un formato de encuentros "en línea".

Como se mencionó anteriormente, debido a la contingencia sanitaria en desarrollo, las reuniones PAC se realizaron por video conferencia, utilizando la plataforma ZOOM®. La convocatoria se realizó a través de correo electrónico, enviando las invitaciones correspondientes a los actores relevantes identificados, quienes fueron contactados para confirmar su asistencia posteriormente, a través de ese mismo medio y, en caso que fuera posible, a través de llamadas telefónicas. Las invitaciones enviadas se encuentran en el Anexo I.3.1.

La agenda de las reuniones se segmentó principalmente en 4 etapas:

- Presentación breve del estudio y sus objetivos; dependiendo del actor, esta etapa también incluyó una breve presentación del estado actual de los modelos generados en el Plan.
- Consultas y verificación de información relevante para el desarrollo de los modelos hidrológicos; esta etapa se ejecutó sólo en el caso de que correspondiera al actor convocado (por ejemplo: Juntas de Vigilancias, Empresa Sanitaria).
- Identificación de problemas y soluciones (o iniciativas) a analizar; durante esta etapa se realizó un conversatorio guiado por un set de preguntas previamente establecidas y abiertas a la audiencia. Además, en el caso que correspondiese al grupo de actores (excluyendo a empresa consultora, Inspección Fiscal y contraparte técnica del estudio), se desarrolló una encuesta previamente establecida, la cual se realizó "en línea" y de manera anónima durante la reunión, con el apoyo de la herramienta "Encuesta" proporcionada por la plataforma Zoom®.
- Cierre de actividad, en el cual se presentaron las siguientes etapas del estudio y los contactos de los profesionales a cargo de resolver consultas sobre la actividad realizadas y mantener el seguimiento de las solicitudes realizadas durante la reunión.

Las presentaciones realizadas durante la actividad PAC se presentan en el Anexo I.3.2.

Los resultados de las encuestas y las minutas de las reuniones se presentan en el Anexo I del Plan Estratégico correspondiente a la cuenca.

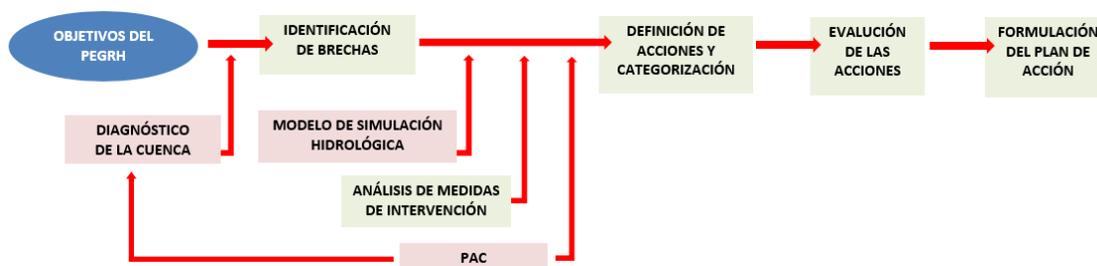
3.5.7 Seminarios en la cuenca

Para dar a conocer los resultados del PEGH para la cuenca del río Huasco, se realizó un seminario en el cual se expuso el plan de acción de la cuenca y la actualización del modelo hidrológico.

Debido a la contingencia sanitaria en desarrollo, el Seminario PAC se realizó por video conferencia, utilizando la plataforma ZOOM®. La convocatoria se realizó a través de correo electrónico, enviando las invitaciones correspondientes a los actores relevantes identificados, quienes fueron contactados para confirmar su asistencia posteriormente, a través de ese mismo medio y, en caso que fuera posible, a través de llamadas telefónicas. Las temáticas tratadas y otros resultados, se presentan en Anexo I acápite 6.

3.6 METODOLOGÍA APLICADA EN LA FORMULACIÓN DEL PLAN DE ACCIÓN

La formulación del Plan de Acción (o PEGH) es el producto resultante derivado del análisis crítico del diagnóstico de la cuenca objeto de estudio, la identificación de las brechas de los objetivos del plan, la propuesta de medidas de intervención, y la aportación del proceso de participación ciudadana, concretado todo ello en acciones específicas para la cuenca, las cuales son categorizadas y evaluadas técnica y socio-económicamente, tal como se esquematiza en la Figura 3.6-1 y se expone detalladamente en los puntos siguientes.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.6-1 Esquema simplificado de la formulación del PEGH

A continuación, se describe cada una de las subactividades que comprendió la formulación del Plan de Acción de una cuenca y la metodología que se aplicó en su generación. Los resultados del Plan de Acción se presentan en los Capítulos 6 (Acciones), 7 (Cartera de Iniciativas Propuestas), 8 (Implementación del Plan) y 9 (Monitoreo y Evaluación del Plan) del Informe Final.

3.6.1 Introducción

Para abordar el análisis de las medidas de intervención que forman el PEGH de Huasco, cabe señalar que se ha estructurado el mencionado Plan en diferentes ejes que agrupan problemas y soluciones atingentes alrededor de una temática específica. Para ello, se ha tenido especial atención en los objetivos específicos del presente estudio (ver Informe Final, acápite 1.1), los que dan una visión de la propuesta de acciones alcanzada a través del trabajo.

De esta forma, en la Tabla 3.6-1 se presentan los cuatro (4) ejes, con sus correspondientes objetivos, sobre los cuales se estructuraron las iniciativas de acción.

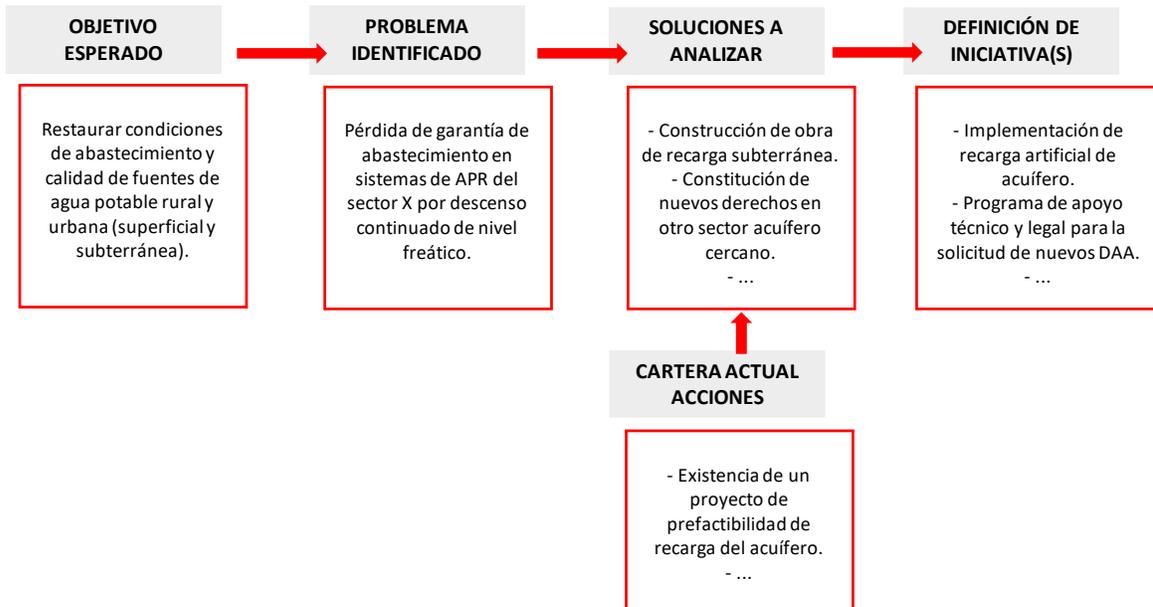
Tabla 3.6-1 Ejes de formulación del PEGH

N° EJE	EJE	N° OBJ PLAN	Objetivos para definición de Acciones del Plan
EJE 1	USO ESTRATÉGICO DEL RECURSO HÍDRICO: BRECHAS ENTRE OFERTA Y DEMANDA	1.1	Reducir las brechas entre oferta y demanda de agua considerando cambio climático, sequía e inundaciones.
		1.2	Restaurar condiciones de abastecimiento y calidad de las fuentes de agua potable urbana, tanto para fuentes superficiales como subterráneas.
		1.3	Restaurar condiciones de abastecimiento y calidad de las fuentes de agua potable rural, tanto para fuentes superficiales como subterráneas.
		1.4	Conservar y/o mejorar el estado de la infraestructura hidráulica actual.
EJE 2	MONITOREO DEL RECURSO HÍDRICO	2.1	Mejorar el monitoreo de las aguas de la cuenca (superficial, subterráneo, de montaña y glaciares).
EJE 3	GESTIÓN Y GOBERNANZA DEL AGUA	3.1	Promover y revitalizar la alianza público - privada en materia hídrica.
EJE 4	CONSERVACIÓN Y PROTECCIÓN DEL RECURSO Y DEL ECOSISTEMA HÍDRICO	4.1	Conservar y/o mejorar el estado de la calidad de aguas de las fuentes superficiales y subterráneas.
		4.2	Proteger funciones ecosistémicas críticas relacionadas con los cuerpos de agua en el tiempo.

Fuente: Elaboración propia.

3.6.2 Medidas de intervención

A raíz del diagnóstico del estado de la cuenca realizado en una fase anterior, se identificaron las brechas encontradas para el cumplimiento de los objetivos del PEGH. La lógica aplicada en la definición de las medidas de intervención estuvo basada en determinar las relaciones entre los objetivos establecidos en la Tabla 3.6-1, los problemas identificados, las soluciones propuestas y una recopilación de la situación actual de las iniciativas relacionadas con dicho problema, tal como se muestra en la Figura 3.6-2.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.6-2 Ejemplo relación Objetivo-Problema-Solución-Iniciativa

Así, para el planteamiento de las soluciones que den respuestas a las brechas, se analizaron una serie de aspectos (medidas, soluciones o acciones), las cuales estuvieron enfocadas en planificar problemas relativos a cada uno de los ámbitos (ejes) establecidos en los objetivos, en consonancia a las problemáticas diagnosticadas. A continuación, se presentan medidas estudiadas por eje y objetivo.

Eje 1. Uso estratégico del recurso hídrico: brechas entre oferta y demanda

- Objetivo 1.1. *"Reducir brechas entre oferta y demanda en escenarios de cambio climático, sequías e inundaciones"*:
 - Construcción de embalses superficiales.
 - Construcción de obras de recarga subterránea.
 - Desalinización de agua de mar.
 - Medidas de reutilización.
 - Mejoramiento de la eficiencia de riego.
 - Establecimiento de reservas de agua.

- Objetivo 1.2./1.3. *"Restaurar condiciones de abastecimiento y calidad de las fuentes de agua potable urbana/rural, tanto para fuentes superficiales como subterráneas"*:
 - Constitución de nuevos derechos para abastecer APR o APU.
 - Compra y venta de derechos existentes para abastecer APR o APU.
 - Desalinización de agua de mar.
 - Control de extracciones.
 - Construcción de obras de recarga subterránea.
 - Mejoramiento de calidad de aguas contaminadas.
 - Establecimiento de reservas de agua.

- Objetivo 1.4 *"Conservar y/o mejorar el estado de la infraestructura hidráulica actual"*:
 - Mejoramiento de la infraestructura hidráulica.

Eje 2. Monitoreo del recurso hídrico

- Objetivo 2.1. *"Mejorar monitoreo de aguas de la cuenca (superficial, subterráneo, de montaña, glaciares)"*:
 - Mejoramiento y/o ampliación de la red de monitoreo de aguas superficiales, subterráneas, calidad, glaciológica.
 - Actualización del protocolo de monitoreo de aguas superficiales, subterráneas y/o calidad de las aguas.

Eje 3. Gestión y gobernanza del agua

- Objetivo 3.1. *"Promover y revitalizar alianzas público-privadas para incremento de inversión en infraestructura"*:
 - Identificación de soluciones de mejora en las relaciones público-privadas relativas a inversiones y/o gobernanza.

Eje 4. Conservación y protección del recurso y del ecosistema hídrico

- Objetivo 4.1 *"Conservar y/o mejorar el estado de la calidad de las aguas de las fuentes superficiales y subterráneas"*
 - Control de extracciones.

- Construcción de obras de recarga subterránea.
- Mejoramiento de calidad de aguas contaminadas.
- Objetivo 4.2 "*Proteger funciones ecosistémicas relativas a los cuerpos de agua en el tiempo*":
 - Medidas de conservación.
 - Control de extracciones.
 - Construcción de obras de recarga subterránea.
 - Mejoramiento de calidad de aguas contaminadas.

Cabe señalar que las medidas pueden responder a más de un objetivo e incluso a más de un eje. Además, hay que considerar que el Eje 3, si bien sólo identifica un único objetivo según la metodología adoptada en función de las Bases Técnicas (3.1. "*Promover y revitalizar alianzas público-privadas para incremento de inversión en infraestructura*"), engloba potencialmente otros objetivos de gestión y gobernanza de suma importancia para el éxito de la implantación de las acciones del PEGH. Por ello, en futuras actualizaciones y/o reformulaciones del PEGH, se sugiere especificar otros objetivos entorno a dicho eje, de forma de articular medidas que comprendan (y dejen directamente explicitado) este aspecto.

El análisis preliminar de medidas se contrastó y/o complementó con las iniciativas ya catastradas e identificadas en la fase de diagnóstico de la cuenca, respecto de la revisión de la Cartera de Acciones.

3.6.3 Categorización de las acciones del Plan

A raíz de los puntos descritos anteriormente se establecieron las estrategias para la gestión de las brechas encontradas, mediante la generación de un portafolio de acciones. Las acciones de gestión tienen establecidos los plazos de implementación, considerando iniciativas:

- a corto plazo (> 5 años);
- a mediano plazo (5-10 años); y
- a largo plazo (< 10 años).

Las soluciones son segregadas según quien se identifique inicialmente como responsable de las mismas, siendo éstas:

- medidas de intervención DGA;
- medidas de intervención de otros organismos del Estado;
- medidas de intervención de privados; o bien,
- medidas de intervención mixtas, esto es, alianzas público-privadas (*APP o PPP, public-private partnership*).

Finalmente, para cada acción se generó una ficha resumen con el contenido y la estructura mostrada en la Figura 3.6-3.

ACCIÓN N°:	
Nombre de la Acción:	
Brecha o problemática identificada:	
Eje(s) del Plan:	
Objetivo(s) del Plan:	
Objetivo(s) de la Acción:	
Características generales:	
Ambito:	
Ubicación:	
Beneficiarios directos:	
Tipo de acción:	
Situación de la acción:	
Horizonte:	
Tipo de financiación:	
Entidad(es) financiadora(s):	
Entidad(es) responsable(s):	
Observaciones:	

Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.6-3 Ejemplo de ficha resumen identificativa de las acciones del plan

3.6.4 Evaluación de las acciones del Plan

A continuación, se entrega la metodología de evaluación de las iniciativas identificadas para el PEGH. Esta consta de la evaluación integral, en sus componentes económica, social y ambiental; en el acápite 3.6.5 se expone la metodología de priorización de iniciativas del plan.

3.6.4.1 Evaluación Económica

La evaluación económica de las iniciativas pretende determinar los costos asociados a través de un enfoque de costo-eficiencia. Es importante mencionar que se utiliza información referencial respecto a los costos, tomando en consideración la información pública respecto del gasto público y/o privado en estas materias.

El enfoque costo eficiencia tiene como supuesto implícito que el valor actual de los beneficios sociales de la medida es mayor que el valor actual de los costos de implementarla, por lo cual dicha medida es de por sí socialmente rentable y no se evalúa su conveniencia. Bajo este enfoque de evaluación se utilizará como indicador el **valor actual de costos o VAC**.

El VAC es ampliamente utilizado cuando se comparan alternativas de proyecto que tienen los mismos beneficios y vida útil, o cuando los beneficios son difíciles de cuantificar. Toma especial relevancia en el presente ejercicio, para poder comparar medidas e iniciativas que tienen una gran componente de gestión y procesos, que, si bien no es posible atribuirles beneficios directos o externalidades valorables, sí contribuyen a que la el PERH obtenga información de base o genere capacidades necesarias para la implementación del plan y que se logren los objetivos de este. Se debe resaltar que la mayoría de las iniciativas habilitantes o de procesos, tienen este perfil, siendo solo algunas iniciativas que requieren una inversión en infraestructura.

Luego, para poder comparar las iniciativas, se utiliza el indicador VAC que se expresa como la suma algebraica de cada flujo de costos descontados, y representa el costo total del proyecto evaluado en valor presente. Su expresión matemática es la siguiente.

$$VAC = I_o + \sum_{t=1}^T \frac{C_t}{(1+r)^t}$$

donde,

VAC: Valor actual de los costos;

C_t: Costos sociales del proyecto, basados en información referencial;

I_o: Inversión inicial, basada en información referencial;

r: Tasa social de descuento (expresada en términos reales);

T: Horizonte de evaluación del proyecto.

Si se compararan alternativas que compiten entre sí, en el cumplimiento de un mismo beneficio, el criterio de decisión es seleccionar aquella alternativa que tenga el menor VAC.

Adicionalmente, se estima el indicador de **costo anual equivalente o CAE**. La expresión matemática del CAE corresponde a la siguiente:

$$CAE = VAC \frac{r(1+r)^T}{(1+r)^T - 1}$$

donde,

CAE: Costo anual equivalente;

VAC: Valor actual de los costos;

r: Tasa social de descuento (expresada en términos reales);

T: Horizonte de evaluación del proyecto.

Finalmente, si existen antecedentes suficientes, se puede aplicar la razón de costo efectividad estimada como la división entre el CAE y un indicador de beneficio, como puede ser el número de beneficiarios (B), el aumento de seguridad de ejercer el derecho de agua, o el aumento en la disponibilidad del recurso hídrico en l/s. Si la intención es comparar proyectos, el indicador de beneficio debe ser el mismo para todas las iniciativas. El criterio de decisión es seleccionar o priorizar aquellas alternativas que tengan el menor CAE por unidad de beneficio. Para el presente PEGH no se aplicó este análisis puesto que un Plan de estas características no tiene el mismo indicador de beneficios para todas las medidas.

Para la priorización de las iniciativas del PEGH Huasco, desde el punto de vista de la evaluación económica, se ha considerado la clasificación y la puntuación recogida en la Tabla 3.6-2.

Tabla 3.6-2 Escala de evaluación económica: indicador de CAE normalizado

Categoría de CAE	Descripción	Puntaje
Bajo	CAE superior a \$200.000.000	1
Medio	CAE mayor a la mediana de los CAE de todas las iniciativas y menor o igual a \$200.000.000	2
Alto	CAE igual o menor a la mediana de los CAE de todas las iniciativas	4

Fuente: Elaboración propia.

3.6.4.2 Evaluación Social

La evaluación social considera la opinión de los asistentes a las reuniones de la actividad de Participación Ciudadana, donde los actores han identificado y priorizado las brechas que consideran más relevantes, frente a aquellas soluciones que no consideran oportunas o que causan rechazo.

Para la priorización de las iniciativas desde el punto de vista de la evaluación social, se ha considerado la clasificación y la puntuación recogida en la Tabla 3.6-3.

Tabla 3.6-3 Escala de evaluación social: indicador de problemáticas PAC

Categoría de problemáticas PAC	Descripción	Puntaje
Bajo	Soluciona problemática no identificada por actores consultados.	1
Medio	Soluciona problemática identificada por sólo 1 actor consultado.	2
Alto	Soluciona problemática identificada por 2 o más actores consultados.	4

Fuente: Elaboración propia.

3.6.4.3 Evaluación Ambiental

La evaluación ambiental recoge los aspectos principales en materia medioambiental del proyecto propuesto. Estos se han definido en dos indicadores de evaluación: la pertinencia de ingreso al SEA; y el impacto en la protección y conservación de los recursos, aportando al objetivo 4 del PEGH. La puntuación en el primer indicador sobre ingreso al SEA, se valoriza en 0 o 1, donde 0 se refiere a que requiere ingresar al SEA con mayores requerimientos de gestión, tiempo y recursos.

Para el indicador de impacto, se considera la Tabla 3.6-4 de puntuación para la evaluación ambiental.

Tabla 3.6-4 Escala de puntuación para evaluación ambiental

Categoría de impacto	Descripción	Puntaje
Impacto 1 (Bajo)	Proyectos destinados a la comunidad con impacto indirecto en los recursos naturales	1
Impacto 2 (Medio)	Programas, obras de mejora y monitoreo	2
Impacto 4 (Alto)	Proyectos con incidencia directa en recursos naturales (calidad de aguas, glaciares, etc.)	4

Fuente: Elaboración propia.

3.6.5 Priorización de las acciones y Definición del Plan de Acción

Para la priorización de medidas se utiliza una aproximación de la metodología de Análisis Multicriterio para la Toma de Decisiones (MCDM, por sus siglas en inglés). Este método ha sido estudiado por la DOH del MOP para la priorización de infraestructura hidráulica, específicamente cuando se toman decisiones de inversión de un conjunto de iniciativas que contemplan el mismo producto estratégico de la DOH (tipo de obra). Para el presente ejercicio se aproxima la metodología para poder comparar iniciativas de gestión, que incluyen medidas habilitantes, de procesos y de inversión en obras menores y mayores.

Para ello, a continuación, se detallan los pasos generales a considerar en el análisis multicriterio.

1. Identificar opciones a ser evaluadas: Consiste en determinar los actores relevantes del problema, evaluar los objetivos del proyecto y, en base a lo anterior, determinar cuáles son las opciones con las que se cuenta actualmente. Esta identificación se basa en el trabajo realizado en las actividades de la PAC, las modelaciones, y la opinión técnica del equipo de expertos del estudio.
2. Identificar criterios y objetivos: En esta etapa se pretende identificar aquellos criterios que se van a considerar, de forma que las opciones del problema estén reflejadas en estos. Además, en esta etapa se deben jerarquizar los criterios en grupos de acuerdo al nivel de importancia y características de estos. Es importante revisar que los criterios identificados concuerden con los objetivos del proyecto, para lo cual se debe tener en cuenta: viabilidad técnica, eficiencia económica, desarrollo y planes estratégicos del proyecto.
3. Determinar variables a considerar de acuerdo con criterios previamente establecidos: Consiste en identificar las opciones con las que se cuenta, definir una forma de llevar estas opciones a variables medibles (indicadores) y determinar las puntuaciones de cada una de estas opciones de acuerdo a los criterios previamente establecidos. Para este paso, se consideran los indicadores económicos de costo-eficiencia de las iniciativas y los indicadores ambientales y sociales descritos en las secciones previas.
4. Asignar promedios ponderados a cada variable de acuerdo a importancia relativa.
5. Combinar ponderaciones y calificaciones de cada opción de forma de obtener un valor global: En esta etapa se debe establecer que método de combinación se va a utilizar para agrupar los indicadores. Hasta el momento se considera el método de ponderación aditiva simple (SAW), conocido como método de combinación o puntuación lineal ponderada. Es una técnica de decisión multicriterio y se basa en el promedio ponderado. Corresponde a uno de los métodos más simples y se utiliza muy a menudo en métodos de decisión a través de técnicas multicriterio. El modelo matemático corresponde a:

$$u_i = \sum_{j=1}^m r_{ij}w_j$$

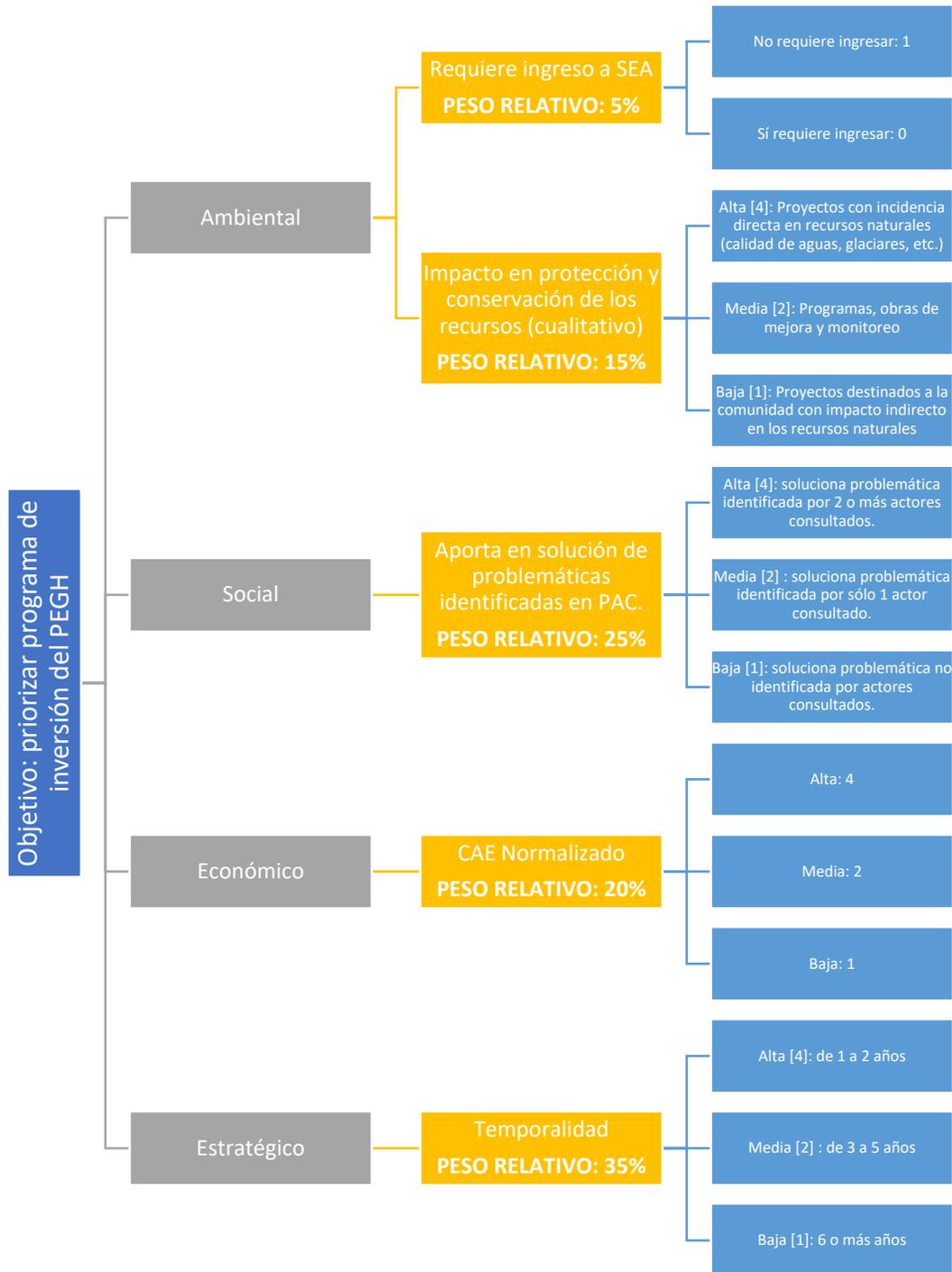
Donde la utilidad u_i es el resultado de la suma ponderada de los criterios w_j y sus ponderaciones relativas r_{ij} . Luego se aplica un criterio de maximización de utilidades, donde los mayores valores de la utilidad (u_i) son las mejores alternativas.

6. Finalmente, examinar los resultados obtenidos.

El resultado de la priorización permitió entregar un ranking para la implementación de las medidas seleccionadas para el PEGH. El presente ejercicio consideró los resultados de las evaluaciones social, económica y ambiental descritos previamente, otorgando una escala de puntuación y las ponderaciones abordadas desde la opinión experta del equipo consultor, siendo necesario en futuras aplicaciones que sea definido en el proceso de PAC o en una mesa de trabajo definida con el mandante.

En la Figura 3.6-4 se presenta el esquema de priorización y los pesos relativos. Como se aprecia, se agrega un indicador denominado estratégico, que se refiere a la temporalidad y relevancia de la iniciativa bajo la opinión experta. Este indicador se

presenta con el mayor porcentaje relativo de 35%, seguido del indicador social con un 25%. Ambas ponderaciones se consideran adecuadas debido a que son los indicadores que permiten incorporar la comprensión de la problemática y la relación con los requerimientos sociales. El indicador económico y ambiental (total) se han considerado igualmente importantes con una ponderación relativa de un 20% cada uno.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.6-4 Esquema de priorización

3.6.6 Modelo de gobernanza y sostenibilidad

Cada una de las iniciativas contiene la identificación de la entidad financiadora y la entidad responsable, de forma de establecer la gobernanza asociada al PEGH. En lo relativo a su sostenibilidad, se establece el presupuesto correspondiente a cada administración implicada, ya sea un actor público o privado.

Además de los roles de implementación y financiamiento del PEGH, se identifica la figura de monitoreo y seguimiento del Plan de Acción, incluyendo también la responsabilidad sobre la evaluación de resultados e impactos de cada una de las iniciativas.

3.6.7 Programa de seguimiento y control del Plan

Las pautas del programa de seguimiento y control del PEGH se han establecido en un Plan de Monitoreo, con el objetivo de verificar la eficacia de las acciones efectivamente implementadas, a través de la definición de indicadores de cumplimiento.

En el establecimiento de indicadores del PM, se han considerado experiencias anteriores en planificación hídrica; específicamente, se ha tomado como referencia principal el último instrumento de características similares promovido por la DGA, correspondiente al "Plan Maestro de Recursos Hídricos, región de Tarapacá" (DGA, 2013b).

Así, los indicadores considerados son:

- Indicadores Generales: PIC, PICa, PIF y PIFa.
- Indicadores Específicos.

A su vez, para realizar el seguimiento del PEGH propiamente tal, se han definido una serie de conceptos adicionales:

- Parámetro de referencia.
- Umbrales.
- Frecuencia de revisión.

Consecuentemente, seguidamente se detallan los siguientes indicadores, de tipo general y específicos, así como otros conceptos a tener en cuenta:

- **Indicadores Generales.** Cuantifican el grado de avance del PEGH a nivel global, considerando la relación existente entre iniciativas comenzadas y/o finalizadas versus la programación planificada según la carta Gantt. Considera 4 indicadores:
 - Porcentaje de iniciativas comenzadas (PIC). Se calcula como el cociente entre el número de iniciativas comenzadas en el año i y el número de iniciativas planificadas en el año i .
 - Porcentaje de iniciativas comenzadas acumulada (PICa). Se calcula como el cociente entre el número de iniciativas comenzadas hasta año i y el número de iniciativas planificadas hasta el año i .
 - Porcentaje de iniciativas finalizadas (PIF). Se calcula como el cociente entre el número de iniciativas finalizadas en el año i y el número de iniciativas planificadas en el año i .

- Porcentaje de iniciativas finalizadas acumulada (PIFa). Se calcula como el cociente entre el número de iniciativas finalizadas hasta año *i* y el número de iniciativas planificadas hasta el año *i*.
- **Indicadores Específicos.** Dan cuenta del porcentaje de avance de la implementación de las iniciativas clave del Plan de Acción.
 - Porcentaje de avance iniciativa N°1. Se calcula como el cociente entre el avance real y lo planificado. Este cálculo se obtiene a partir de la carta Gantt específica de la iniciativa 1, cronograma que debe confeccionarse al momento de comenzar el proyecto en particular. Adicionalmente este indicador tiene definido un tiempo máximo para su implementación.
 - Porcentaje de avance iniciativa N°2. Se calcula como el cociente entre el avance real y lo planificado. Este cálculo se obtiene a partir de la carta Gantt específica de la iniciativa 2, cronograma que debe confeccionarse al momento de comenzar el proyecto en particular. Adicionalmente este indicador tiene definido un tiempo máximo para su implementación.
- **Parámetro de referencia.** Para los indicadores generales representa el número de iniciativas totales por año que deben ser comenzadas o finalizadas para dar cumplimiento en un 100% a la planificación del PEGH. Para los indicadores específicos representa el tiempo al cual la iniciativa debe estar 100% implementada. Este parámetro es sólo referencial y ayudan a la determinación de los umbrales del PM.
- **Umbrales.** Los umbrales corresponden a los valores de avance mínimos aceptados para cada tipo de indicador.
- **Frecuencia de revisión y Plan de Acción.** El PM debe tener en cuenta las posibles revisiones del PEGH, de acuerdo a una frecuencia establecida y siguiendo un Plan de Acción fijado, según se detalla a continuación:
 - El PM considera el seguimiento de la implementación de las iniciativas durante los primeros cinco años, a través de los indicadores descritos anteriormente. Sin embargo, se considera la aplicación de un Plan de Acción, en caso de ser necesario, hasta el cuarto año. Lo anterior debido a la realización de una evaluación y rediseño del plan en su conjunto durante el quinto año, donde una de las variables a evaluar y rediseñar es el PM.
 - Si la evaluación realizada a través del PM indica que no se han cumplido con los umbrales definidos, es decir, existen desviaciones importantes respecto de lo planificado, se ejecutará un plan de acción, que tiene por objetivo replanificar el PEGH de modo de cumplir con los objetivos propuestos en los tiempos propuestos.

Además, se establecen mecanismos para la potencial reformulación del PEGH.

Adicionalmente, para realizar la evaluación de las iniciativas propiamente tal, se han definido en cada caso, siempre que sea posible:

- Indicadores de producto: dan cuenta del grado de cumplimiento de las iniciativas planificadas.
- Indicadores de impacto: permiten evaluar los resultados de las ejecuciones de las iniciativas respecto de las problemáticas o brechas existentes.

3.7 GENERACIÓN DEL SIG

El proyecto SIG, tiene como principales objetivos el generar cartografía de apoyo y hacer análisis espaciales los cuales se ven reflejados en el informe principal y en las coberturas presentadas en la Geodatabase. Todo el detalle del SIG generado para la cuenca del río Huasco se encuentra en el Anexo G del presente estudio.