



ANÁLISIS DE INFORMACIÓN SOBRE RECURSOS HÍDRICOS Y MODELOS OPERACIONALES DE CUENCAS Y FORMULACIÓN DE UNA HERRAMIENTA DE MODELACIÓN HÍDRICA OPERACIONAL SIMPLIFICADA PARA LA DEFINICIÓN DE INVERSIÓN EN INFRAESTRUCTURA Y GESTIÓN HÍDRICA EN EL HORIZONTE 2050

RESUMEN EJECUTIVO

**PEÑAFLOL, REGIÓN METROPOLITANA
ENERO 2022**

Contenido

1. Introducción	3
2. Selección cuencas de interés	4
3. Iniciativas en cuencas seleccionadas	6
3.1. Cuenca del río Aconcagua	6
3.2. Cuenca del río Choapa	7
3.3. Cuenca del río Huasco	8
4. Cuenca río Aconcagua	9
4.1. Descripción general e iniciativas seleccionadas	9
4.2. Disponibilidad y demanda hídrica en la cuenca	11
4.4. Calibración Modelo pyMOS-Aconcagua	15
4.5. Escenarios Futuros Modelo pyMOS-Aconcagua	15
4.6. Resultados Modelo pyMOS-Aconcagua	16
5. Cuenca río Choapa	18
5.1. Descripción general e iniciativas	18
5.2. Disponibilidad y demanda hídrica en cuenca Choapa	19
5.3. Implementación Modelo pyMOS-Choapa	20
5.4. Calibración Modelo pyMOS-Choapa	22
5.5. Escenarios Futuros Modelo pyMOS-Choapa	23
5.6. Resultados del Modelo pyMOS-Choapa	24
6. Cuenca río Huasco	25
6.1. Descripción general e iniciativas	26
6.2. Disponibilidad y demanda hídrica en cuenca	27
6.3. Implementación Modelo pyMOS-Huasco	28
6.4. Calibración Modelo pyMOS-Huasco	30
6.5. Escenarios Futuros Modelo pyMOS-Huasco	32
6.6. Resultados Modelo pyMOS-Huasco	33
7. Conclusiones	35

1. Introducción

Actualmente, Chile enfrenta problemas serios de escasez hídrica, fundamentalmente, en la zona norte y centro, lo cual es especialmente grave debido a que en dicha zona del país se concentra la mayor cantidad de población y el mayor número de actividades económicas del país. Esta situación impone una restricción estructural al desarrollo de esta zona en particular y del país en general.

La condición de déficit ha obligado a la adopción de una serie de acciones concretas de corto y largo plazo. En este sentido, diversas instituciones han intentado aportar soluciones desde una perspectiva sectorial y, por esta razón, existe una cantidad importante de proyectos de inversión y propuestas de gestión para enfrentar este problema, tanto en iniciativas públicas como privadas. La magnitud del problema plantea un desafío complejo, a lo que se debe agregar la incertidumbre de los escenarios hidrológicos futuros que provocan el cambio climático, los avances tecnológicos y los nuevos requerimientos ambientales.

En dicho contexto, la Dirección de Obras Hidráulicas (DOH) del Ministerio de Obras Públicas (MOP) ha solicitado al Instituto Nacional de Hidráulica (INH) la realización del estudio “ANÁLISIS DE INFORMACIÓN SOBRE RECURSOS HÍDRICOS Y MODELOS OPERACIONALES DE CUENCAS Y FORMULACIÓN DE UNA HERRAMIENTA DE MODELACIÓN HÍDRICA OPERACIONAL SIMPLIFICADA PARA LA DEFINICIÓN DE INVERSIÓN EN INFRAESTRUCTURA Y GESTIÓN HÍDRICA EN EL HORIZONTE 2050”. Este trabajo tiene por objetivo general realizar el levantamiento y la sistematización de la información existente acerca de los recursos hídricos, las iniciativas para su aprovechamiento, así como la construcción de una herramienta de modelación hídrica que ayude a la toma de decisión respecto de inversiones en infraestructura y en gestión hídrica.

En este sentido, este estudio tiene como objetivo levantar los antecedentes e información específica sobre los recursos hídricos (oferta, demanda e iniciativas) en todas las cuencas con iniciativas identificadas en el documento de base para el Plan Hídrico (versión 2020). Posteriormente, el estudio se enfoca en tres cuencas de interés, en las cuales se busca formular una herramienta de modelación hídrica operacional simplificada que apoye la posterior evaluación hidro-económica de las iniciativas, la cual fue denominada pyMOS.

2. Selección cuencas de interés

La selección de cuencas hidrológicas se realiza tomando como base la información recopilada en el contexto del “Plan de Inversión en Infraestructura y Gestión Hídrica 2020-2050”, desarrollado por el MOP durante el año 2020. Posteriormente, esta información es analizada según varios criterios, los cuales permiten identificar aquellas cuencas que requieren de un estudio prioritario que permita mejorar las condiciones de disponibilidad hídrica.

Los antecedentes son recopilados desde diferentes fuentes, principalmente de los planes Directores y Planes Maestros de cada Cuenca y Región. Se incluyeron también iniciativas presentadas en estudios de cuencas específicas, realizados principalmente por la Dirección General de Aguas (DGA) y la Comisión Nacional de Riego (CNR). A partir de esta información se realiza un proceso de categorización, el cual distingue inicialmente entre “iniciativas generadoras” e “iniciativas habilitantes”. La primera se relaciona con la construcción de obras o estudios previos asociados, e incluyen obras como: embalses, tranques, canales, entubamiento de canales, rehúso de aguas servidas y plantas desalinizadoras. Por otro lado, la segunda se relaciona con conservación y mejoramiento de infraestructura ya existente. Cabe destacar que esta última incluye las iniciativas no estructurales, es decir, estudios o fortalecimiento de organizaciones de usuarios de aguas. A lo anterior, se agrega una clasificación adicional por tamaño de la infraestructura, es decir, si se trata de una gran obra de riego o drenaje (ej: embalses), si es mediana (ej: canales), o si es pequeña.

La información y categorización de iniciativas descrita anteriormente se complementa con antecedentes de costos, plazos de ejecución, población beneficiada, hectáreas beneficiadas para riego e indicadores económicos (TIR, VAN público y privado). La cantidad de información incluida depende de qué tan detallada se presente la iniciativa en cada plan. En casos en que solo se conoce el nombre de la iniciativa, se busca información adicional en la base de datos del Banco Integrado de Proyectos, perteneciente al Ministerio de Desarrollo Social. Adicionalmente, cada iniciativa es evaluada según la vigencia de cada una de ellas, revisando cuál de estas ya se encuentra ejecutada, descartada o sigue siendo prioritaria para cada una de estas cuencas. Esta tarea se lleva a cabo con las diferentes direcciones del MOP de cada región y nivel central, principalmente con la DOH, DGA, Dirección de Planeamiento (DIRPLAN) y la CNR. Cada una de estas instituciones tuvo la oportunidad de agregar aquellas iniciativas que no hubieran sido incluidas en los planes anteriormente. Finalmente, todo este proceso permite obtener un listado consolidado de iniciativas de interés para cada cuenca.

A partir de la información levantada para las 52 cuencas estudiadas en la Etapa 1 de la presente consultoría, se realiza la selección de 3 cuencas para la modelación hidro-económica en conjunto con la consultora Rodhos. Esta selección considera los siguientes criterios:

- Cuencas donde tuviera sentido hídrico avanzar con iniciativas del tipo embalses. Este es el caso cuando, por un lado, la oferta media supera la demanda y, por otro lado, la demanda supera la capacidad de almacenamiento, sumando la de los acuíferos y de los embalses existentes.
- Cuencas donde no fuera evidente y directa la solución a los problemas hídricos. Por ejemplo, cuencas que no cuentan con un Plan Director o Maestro para la Gestión de los Recursos Hídricos.
- Cuencas en que las decisiones más importantes (construcción de embalses) no estuvieran tomadas. Por ejemplo, la cuenca del río Aconcagua cuenta con diversas iniciativas relacionadas con la construcción de embalses en distintos sectores, pero a la fecha aún no se puede determinar la factibilidad de estos.
- Cuencas donde las opciones de iniciativas fueran diversas.
- Cuencas donde la selección de la opción óptima no fuera evidente.
- Cuencas que hubieran sido modeladas en los estudios de “Plan Estratégico de Gestión Hídrica”, en adelante denominados “PEGH 2020”, de la DGA para contar con información de entrada reciente. En esta situación se encuentran 10 cuencas: Copiapó, Huasco, Elqui, Limarí, Choapa, Quilimarí, Ligua, Petorca, Aconcagua y Maule.
- Cuencas que tuvieran obras propuestas en el Plan Hídrico versión 2020.
- Cuencas que en lo posible fueran críticas, es decir, cuencas en las cuales la demanda fuera cercana o superior a la oferta 50% o a la oferta media.

Finalmente, implementando los criterios anteriormente descritos, se escogió la cuenca del río Aconcagua como la cuenca piloto para el presente estudio. Esto se debe a que, la del río Aconcagua, corresponde a una de las cuencas con mayor información disponible en el país, incluyendo los estudios “Modificación Modelos DGA Visual MODFLOW-MOS y MOS-PS para la determinación disponibilidad real de aguas subterráneas en el valle del Aconcagua, Segunda etapa” (DICTUC y DGA, 2009), donde se desarrolló el modelo MOS-ACN (Modelo de Operación de Sistema de la cuenca del río Aconcagua), herramienta mediante la cual se caracterizó la situación de la cuenca, evaluando el efecto generado al incorporar obras de manejo del recurso hídrico, y en el cual se basó el desarrollo del Modelo pyMOS (transformando su uso al lenguaje de programación Python, con la finalidad de facilitar y actualizar su uso), “Proyecto actualización de la modelación hidrológica integrada del Aconcagua” (WSP y DGA, 2019), y “Plan Estratégico de Gestión Hídrica en la cuenca de Aconcagua” (UTP Hídrica-Eridanus y DGA, 2020a) donde desarrolló un modelo hidrológico con información actualizada meteorológica, fluviométrica, de derechos de aguas y de obras presentes en la cuenca en el software WEAP. Adicionalmente, acorde a los criterios listados anteriormente, las cuencas del río Choapa y río Huasco son seleccionadas como las

siguientes en ser estudiadas y modeladas, utilizando y aplicando lo desarrollado en la cuenca piloto (Aconcagua). Los criterios finales para la selección de estas tres cuencas se presentan en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1: Criterios para la selección de cuencas a modelar hidro y económicamente.

Criterio	Río Aconcagua	Río Choapa	Río Huasco
Demanda Hídrica	Cuenca presenta más de 10 años de sequía. Además, la oferta media supera la demanda y la demanda supera la capacidad de almacenamiento.	La oferta media supera la demanda y la capacidad de almacenamiento es similar a la demanda.	La oferta media aún supera la demanda y la demanda es muy similar a la capacidad de almacenamiento de la cuenca. Sin embargo, se proyecta un crecimiento potencial en la demanda agrícola a largo plazo.
Modelado en PEGH 2020	Si	Si	Si
Diversidad de iniciativas	Existen propuestas del MOP y CNR.	Existen propuestas del MOP y CNR.	Existen propuestas del MOP y CNR.
Solución óptima no es evidente	Existen varias opciones de embalsamiento y distintos sectores de la cuenca.	Existen varias opciones de embalsamiento, pero hay incertidumbre en la posibilidad de llenado de estos embalses.	No se puede determinar si los embalses podrían asegurar el riego de la cuenca.
Obras propuestas en Plan Hídrico versión 2020	Se definen propuestas generadoras y habilitantes.	Se definen propuestas generadoras (2 embalses).	Se proponen 2 embalses, uno en la cabecera y otro en la zona baja de la cuenca.

3. Iniciativas en cuencas seleccionadas

3.1. Cuenca del río Aconcagua

Se realiza una revisión de los principales planes existentes en la cuenca del río Aconcagua para la recopilación de las iniciativas existentes:

- Plan Director para la Gestión de los Recursos Hídricos en la cuenca del Río Aconcagua (Ayala, Cabrera y Asociados y DGA, 2001)
- Diagnóstico para desarrollar Plan de Riego en cuenca de Aconcagua (CNR, 2016)

- Plan Regional de Infraestructura y Gestión del Recurso Hídrico al 2021 Región de Valparaíso (DIRPLAN, 2012c)
- Plan Estratégico de Gestión Hídrica en la cuenca de Aconcagua (UTP Hídrica-Eridanus y DGA, 2020a)

En la primera revisión se identificó un total de 135 iniciativas, de las cuales el 26% corresponde a iniciativas generadoras, y el porcentaje restante son iniciativas habilitantes.

Luego de una primera depuración de estas iniciativas, con las indicaciones de las distintas Direcciones del MOP y de la CNR, de las 135 iniciativas iniciales, se redujeron a 47, de las cuales un 36% corresponde a iniciativas generadoras y el porcentaje restante a iniciativas habilitantes. Se determina incluir en esta nueva lista depurada, las iniciativas propuestas en el PEGH-Aconcagua (2020), ya que este estudio se publicó posterior a la selección realizada por parte de la mesa regional de expertos.

Respecto al tipo de obra, de las iniciativas generadoras (Estudios previos y obras) se destacan 22 iniciativas asociadas a grandes obras de acumulación, y las restantes a obras medianas de acumulación (tranques nocturnos y construcción de pozos).

De las iniciativas relacionadas con grandes obras de regulación se encuentra la ampliación de Embalse Los Aromos, construcción Embalse Puntilla del Viento, Juncal, Catemu y Pocuro Alto. Existen otras iniciativas asociadas a embalses presentadas por la CNR, de las cuales solo se tiene información respecto a su ubicación y capacidad máxima del embalse.

En relación a sistemas de riego, se observa en la cuenca un alto porcentaje de áreas de riego con bajo nivel de tecnificación (1°, 2° y 3° secciones y Putaendo), especialmente en los pequeños y medianos agricultores (CNR, 2016). Por esta razón, la Comisión Nacional de Riego propone iniciativas de tecnificación del riego en las provincias de Quillota, San Felipe y Los Andes.

El revestimiento de canales también es un problema que se repite en todas las comunas que forman parte de la primera, segunda y tercera sección del Río Aconcagua. Por lo anterior, la CNR proyecta el revestimiento de canales sólo en la primera sección de la cuenca (Provincia de Los Andes y San Felipe), acorde a los criterios de dicha institución. Si bien este proyecto beneficia a gran parte de la cuenca del Aconcagua, este no considera a la Provincia de Quillota, la cual también declara la necesidad de revestimiento de sus canales (CNR, 2016).

3.2. Cuenca del río Choapa

Para la recopilación de las iniciativas de la cuenca del río Choapa se realiza una revisión de los principales planes existentes en la cuenca, incluyendo:

- Análisis para el desarrollo de un Plan de Gestión Integrada de Recursos Hídricos en la Cuenca del Choapa (Rodhos y DGA, 2017).
- Diagnóstico para desarrollar plan de riego en cuenca del Choapa y Quilimarí (Everis Chile y Infraestructura y Ecología y CNR, 2016).
- Diagnóstico Plan Maestro para la Gestión del Recurso Hídrico, Región de Coquimbo (CONIF-BF y GORE, 2013).
- Plan Regional de Infraestructura y Gestión del Recurso Hídrico al 2021 Región de Coquimbo (DIRPLAN, 2012b)
- Plan Estratégico de Gestión Hídrica en la cuenca de Choapa (UTP Hídrica-Eridanus y DGA, 2020b).

En la primera revisión se identifican 62 iniciativas, de las cuales el 31% corresponde a iniciativas generadoras y el porcentaje restante son iniciativas habilitantes.

Ejecutada ya una selección de estas iniciativas iniciales con las indicaciones de las distintas Direcciones del MOP y CNR en la Región de Coquimbo, el número se redujo a 27, de las cuales 9 son generadoras y 18 son habilitantes.

De las iniciativas relacionadas con grandes obras de regulación, se encuentran la construcción de tres embalses, uno en el valle de Illapel (embalse Canelillo), uno en la cuenca media del río Choapa (embalse Chalinga) y otro en el sector alto del río Choapa (embalse Batuco). Esta última iniciativa es denominada como “Estudio de prefactibilidad de un embalse precordillerano”, por lo que aún no presenta una ubicación exacta. Además, se incluye una iniciativa asociada al trasvase de agua entre subcuencas (Choapa - Canela).

Gran parte de las iniciativas de mantención y conservación de obras de riego y drenaje corresponden a mejoramiento de canales, entre ellas el mejoramiento de los canales Nueva Cocinera y Buzeta. Existen otros proyectos de entubamiento o impermeabilización de canales de riego, pero no se especifica su ubicación o subcuenca beneficiada. El escaso revestimiento de canales se observa en los valles de Choapa Alto, Chalinga e Illapel, donde en esta última cuenca, el revestimiento de sus canales no supera el 7% (Rodhos y DGA, 2017).

3.3. Cuenca del río Huasco

Para la recopilación de las iniciativas de la cuenca del río Huasco se realiza una revisión de los principales planes existentes en la cuenca, incluyendo:

- Diagnóstico para Desarrollar Plan de Gestión de Riego en Cuenca de Huasco (U. de Chile y CNR, 2016).

- Plan Regional de Infraestructura y Gestión del Recurso Hídrico al 2021 Región de Atacama (DIRPLAN, 2012a)
- Plan Estratégico de Gestión Hídrica en la cuenca de Huasco (UTP Hídrica-Eridanus y DGA, 2020c).

En la primera revisión de las iniciativas, estas suman 51 proyectos, de las cuales 4 corresponden a iniciativas generadoras: embalses, tranques, canales, entubamiento de canales, rehúso de aguas servidas y plantas desalinizadoras. Las restantes corresponden a iniciativas habilitantes.

Luego de una depuración de estas iniciativas iniciales con las indicaciones de las distintas direcciones del MOP y CNR en la Región de Atacama, el número se redujo a 39, se mantuvo el número de iniciativas generadoras (4), siendo descartadas principalmente programas de aguas lluvias y construcción de defensas fluviales. Además, se incorporan las iniciativas que surgen del “Plan Estratégico de Gestión Hídrica en la cuenca de Huasco” (UTP Hídrica-Eridanus y DGA, 2020c).

De las iniciativas relacionadas con grandes obras de regulación, se encuentran la reparación de Laguna Grande y Laguna Chica, y la construcción Embalse El Carmen. Existen otras iniciativas asociadas a embalses cuya ubicación no se conoce exactamente, eso ocurre con la iniciativa “Estudio prefactibilidad del embalse de acumulación en Huasco Bajo”, para el cual no se ha desarrollado un estudio detallado, y con las obras de acumulación para la Provincia del Huasco, ambas obras presentadas por la CNR.

Respecto a las iniciativas asociadas a la mantención y conservación de obras de riego y drenaje, gran parte de estas considera el mejoramiento de canales, pero sin especificar cuáles serían los canales beneficiados. Solo existen proyectos los cuales indican construcciones de canales pertenecientes al tercer y cuarto tramo de la cuenca del Huasco, es decir, aguas abajo de la confluencia del río el Carmen y el Tránsito. Los demás contemplan en totalidad el valle del Huasco. Esta necesidad de revestimiento o entubamiento de canales se presenta en todos los sectores de la cuenca (valle del Huasco, Tránsito y Del Carmen), al igual que la ausencia de bocatomas y canales construidos con materiales poco adecuados (U. de Chile y CNR, 2016).

4. Cuenca río Aconcagua

4.1. Descripción general e iniciativas seleccionadas

La cuenca del río Aconcagua se ubica en la parte central de la Región de Valparaíso, donde su cauce principal se origina por la confluencia entre el río Colorado y el río Juncal. Su extensión territorial es de 7.323 km². Esta cuenca limita al norte con la cuenca del río Ligua y al sur con la cuenca del río Maipo y Costeras entre Aconcagua y Maipo.

El régimen de la cuenca del río Aconcagua es nivo-pluvial, debido a que en las zonas altas de la cuenca (ríos Colorado, Juncal, Blanco, Putaendo) presenta un régimen nival, evidenciado por el aumento de caudal producto de los deshielos. Por otra parte, la zona baja de la cuenca presenta un régimen pluvial, debido a que las crecidas son producto de las precipitaciones de agua lluvia.

La cuenca del río Aconcagua cuenta con 2 embalses mayores, de los cuales uno de ellos está destinado al riego (Embalse Chacrillas) y el otro es destinado a agua potable y saneamiento (Embalse Los Aromos).

Acorde a las características más relevantes de la cuenca se realizó la aplicación del Modelo pyMOS-Aconcagua, herramienta de modelación hídrica operacional desarrollada en el presente estudio en el lenguaje de programación Python en base al modelo MOS de la DGA.

Respecto a la priorización de las iniciativas para la modelación en pyMOS-Aconcagua, la DOH realiza un análisis y clasificación de acuerdo a un nivel de priorización, donde se clasifica como alta: ampliación embalse Los Aromos, embalse Pocuro Alto y habilitación de 55 pozos en Las Vegas; con prioridad media: embalse Catemu, la unificación de bocatomas en la 1° y 2° sección y la tecnificación de riego en Putaendo y en la 4° sección del río Aconcagua. De las iniciativas priorizadas y seleccionadas para la modelación, en la Tabla 4.1 se presenta un resumen de la información recopilada de los estudios realizados a nivel de prefactibilidad, factibilidad o diseño.

Tabla 4.1: Resumen de características de iniciativas modeladas en pyMOS-Aconcagua

Variable	Ampliación embalse Los Aromos (Prioridad Alta)	Embalse Pocuro Alto (Prioridad Alta)	Embalse Catemu (Prioridad Media)
Volumen máximo (hm ³)	60,3	100	180 (*)
Volumen útil (hm ³)	55,2	95,5	175
Volumen muerto (hm ³)	5,1	4,5	5
Capacidad canal alimentador (m ³ /s)	No Aplica	10	20
Capacidad canal entrega (m ³ /s)	4,65	10,64	30
Entrega max. riego (m ³ /s)	2,70	10,64	30
Entrega max. agua potable (m ³ /s)	1,95	No Aplica	No Aplica
Área beneficiada (ha)	1.500	13.000	73.386

(*) Catemu se plantearía con un volumen menor al máximo indicado

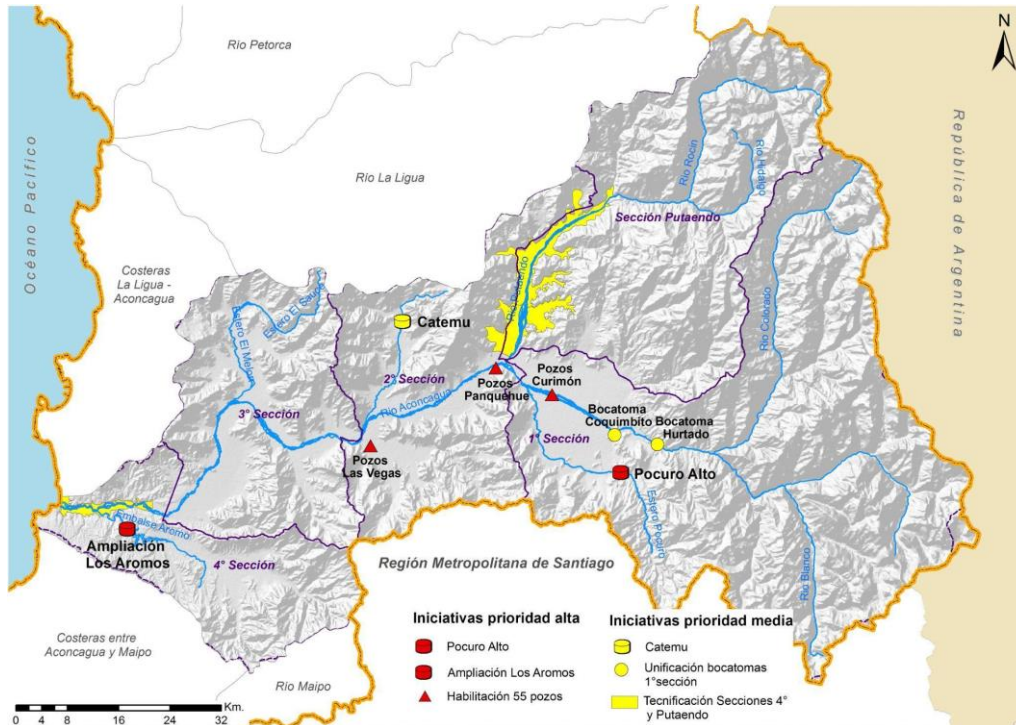


Figura 4.1: Ubicación de principales iniciativas generadoras y habilitantes, periodo 2020-2050.

4.2 Disponibilidad y demanda hídrica en la cuenca

De acuerdo a la información recopilada por el INH en la Etapa 1 del presente estudio, la cuenca del río Aconcagua cuenta con un análisis donde se estima directamente los caudales de oferta a distintas probabilidades de excedencia, el cual corresponde al determinado en el “Plan Director para la Gestión de Recursos Hídricos en la cuenca del río Aconcagua” (Ayala, Cabrera y Asociados y DGA, 2001). La demanda hídrica total de la cuenca del río Aconcagua se calculó en la Etapa 1 de acuerdo a la superficie de riego. La oferta hídrica y la demanda, actual y futura estimada se presentan en la Figura 4.2.

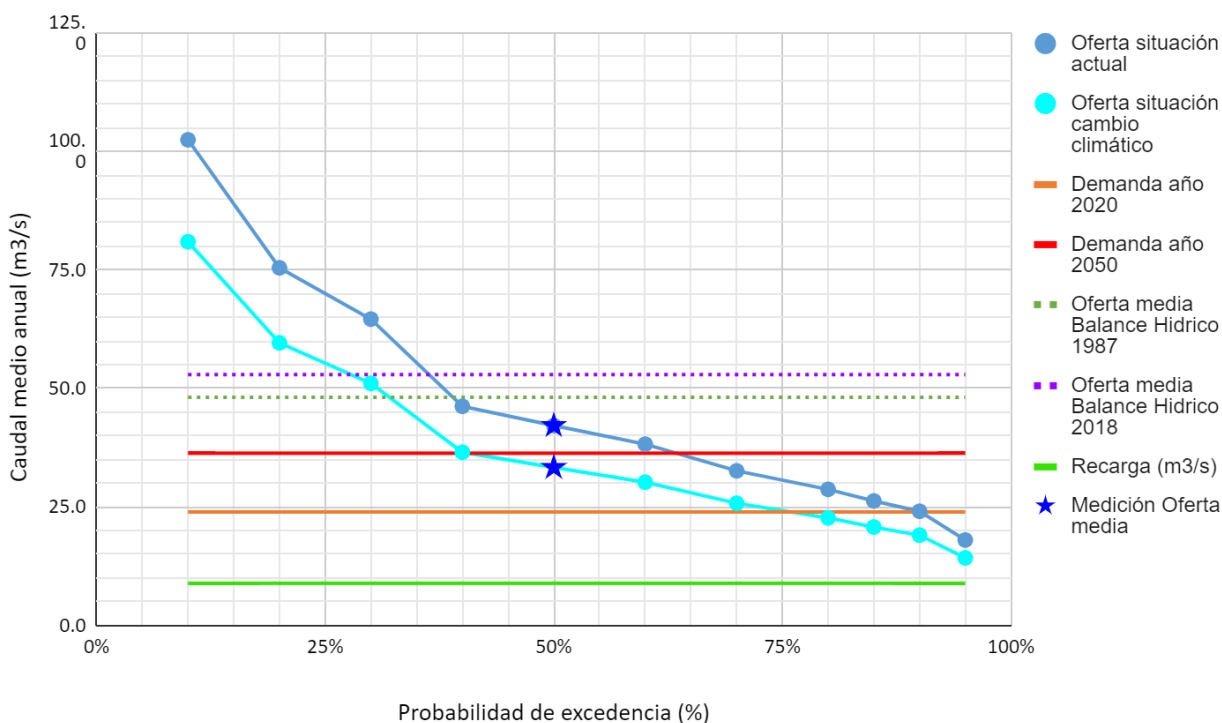


Figura 4.2: Oferta y demanda actual y futura de la cuenca del río Aconcgua

La demanda actual (2020) corresponde a la del período de sequía, en donde la demanda agrícola participa con el riego de unas 60.000 ha en esta cuenca. Potencialmente (2050), se proyecta que esta demanda agrícola llegue a unas 112.000 ha en la cuenca, según lo expuesto en el “Plan Director para la Gestión de Recursos Hídricos en la cuenca del río Aconcgua” (Ayala, Cabrera y Asociados y DGA, 2001).

La oferta a una probabilidad de excedencia del 50% se sitúa alrededor de los 40 m³/s, mientras que la demanda media 2020 sería de unos 23,9 m³/s en la cuenca, es decir, existe una brecha o excedente de 18,2 m³/s. En esta cuenca juegan un rol muy importante los acuíferos, que admiten una recarga media de unos 8,5 m³/s, aportando a la optimización de la gestión con su capacidad de almacenamiento. Esto ha podido contribuir al riego del valle durante este periodo de sequía, regando aún 60.000 ha¹, sin otro embalse superficial que el de Chacrillas, de 50 mill de m³.

Sobre la base de los coeficientes propuestos en el documento “Aplicación de la metodología de actualización del Balance Hídrico Nacional en las cuencas de las macrozonas norte y centro” (FTT-PUC y DGA, 2018) que abarca la macrozona norte donde se ubica la cuenca del Aconcgua, se proyecta una variación de la escorrentía media anual del -21% entre el período 2030 - 2060, respecto del periodo base (1985-2015), curva la cual se observa en color celeste en la Figura 4.2. Para un periodo de retorno del 50%

¹ Información obtenida a partir del Censo Agropecuario y Forestal 2007. Total superficie regada, para la cuenca del río Aconcgua.

la oferta se estima en 33,28 m³/s y la demanda media alcanzaría los 36,3 m³/s por lo que la diferencia es de -3,0 m³/s. Para una probabilidad de excedencia del 85% la diferencia es de -15,6 m³/s.

4.3 Implementación Modelo pyMOS-Aconcagua

El Modelo pyMOS-Aconcagua se desarrolla a partir de la lógica del modelo implementado en la cuenca del río Aconcagua MOS-ACN (DICTUC y DGA, 2009). El modelo base, pyMOS, está escrito por módulos, relativamente independientes, con una base genérica, los cuales, por lo tanto, permiten ser aplicados a otras cuencas, realizando los ajustes que se requieran para adaptarlo a la realidad de la cuenca.

Con el objetivo de construir el modelo simplificado, se consideran como principales antecedentes base los modelos MOS y WEAP más recientes, la Tabla 4.2 presenta una caracterización de los modelos utilizados:

Tabla 4.2: Modelos propuestos como antecedentes principales

Año	Autoría	Modelos	Notas
1998	Ingendesa y AC Ingenieros y DGA	MOS Aconcagua	Utiliza la escorrentía superficial a partir registros fluviométricos, de modelos precipitación-escorrentía para las cuencas sin control.
2008	DGF Consultores y DGA	MOS ACN 2008 y Visual Modflow ACN 2008	Basado en MOS Aconcagua, pero con mejoras en la parte subterránea de la primera sección.
2009	DICTUC y DGA	Visual Modflow – MOS y MOS-PS	Utiliza como base el modelo MOS ACN 2007
2019	WSP Consulting y DGA	MOS-Modflow	Utiliza como base el modelo MOS ACN 2009 (DGA y DICTUC, 2009)
2020	UTP Hídrica-Eridanus y DGA	WEAP-Modflow	Utiliza como base el modelo WEAP (WSP y DGA, 2019)

Los elementos que forman parte del Modelo pyMOS-Aconcagua, que a su vez son los que se interconectan en el esquema topológico son los siguientes:

- a) Ríos principales: Se identifican 16 ríos y esteros a lo largo de la cuenca del río Aconcagua.
- b) Nodos en tramos de río: Se identifican 46 nodos distribuidos a lo largo de los 16 cauces principales presentes en la cuenca del río Aconcagua, los cuales se mantienen en número y ubicación de acuerdo a los presentados en MOS-ACN de WSP y DGA (2019). No obstante, se incorporan nuevos nodos aguas abajo de los embalses propuestos, los cuales se agregan debido a las iniciativas nuevas incorporadas.

- c) Los embalses mayores existentes o proyectados en la cuenca: Para la modelación de pyMOS-Aconcagua se incorporan 11 embalses, de los cuales 2 se encuentran construidos y activos (Los Aromos y Chacrillas) y los 9 restantes corresponden a iniciativas. Es importante indicar que el Modelo pyMOS-Aconcagua incorpora dentro de sus configuraciones a modelar la ampliación de la capacidad del embalse Los Aromos.
- d) Las subcuencas aportantes: se identifican 21 cuencas de cabecera y 20 cuencas laterales de generación de escorrentía. En relación a los datos de caudales, se utilizan los generados en MOS-ACN (WSP y DGA, 2019), los cuales se calculan a partir de un modelo MPL (modelo simple de generación de escorrentía) y transposición de caudales para cuencas pluviales y nivales, respectivamente.
- e) Los sectores de riego presentes en la cuenca: Se identifican 33 sectores de riego distribuidos en las 5 secciones de la cuenca. Estos sectores se identifican según los canales que los riegan. Para la modelación del escenario de calibración se mantienen la superficie de riego histórica determinada en MOS-ACN de 2019 y WEAP-Modflow (UTP Hídrica-Eridanus y DGA, 2020a) y para el escenario futuro (2050) se calcula una nueva superficie potencial (incluyendo hectáreas actuales y en descanso).
- f) Origen/destino de los canales matrices y derivados (como sistemas por sector de riego) que proveen de agua a los diferentes sectores de riego: Se identifican 24 canales que permiten el transporte de agua desde distintos elementos aportantes al sistema hacia sitios de demanda (embalses, zonas de riego, nodos). Es importante considerar que existen canales que recorren más de una sección del río Aconcagua, es decir, captan aguas en una sección y entregan en otra.
- g) Los distintos acuíferos identificados en la cuenca: El Modelo pyMOS-Aconcagua considera 10 acuíferos, incluyendo además el acuífero de Quintero, el cual se encuentra fuera de la cuenca, pero se incluye debido a que presenta interacción con áreas de riego presentes en la cuenca del río Aconcagua.

Dentro de los supuestos o consideraciones del Modelo pyMOS Aconcagua, se destaca lo siguiente:

- Se incluye la implementación de plantas desaladoras representada como una inyección de caudal constante directamente al río Aconcagua en el sector donde se ubica la confluencia entre el río Aconcagua y el estero El Melón (Nodo 27). De esta forma, esta agua podría contribuir al riego en parte de la 3° y 4° Sección.
- El Modelo pyMOS-Aconcagua se modifica de forma de que los caudales de bombeo en los Sectores de Riego sean calculados en función del déficit de riego.
- Las extracciones de caudal de los Sectores de Riego en las bocatomas de sus canales se realizan a demanda, es decir, cada sector de riego sólo va a extraer lo que requiere.

4.4 Calibración Modelo pyMOS-Aconcagua

Para la calibración del Modelo pyMOS-Aconcagua se realiza una comparación de los valores medidos en estaciones de medición de caudal, volumen acumulado en los embalses y nivel de los pozos existentes. Este análisis permite verificar si los resultados obtenidos son representativos de la realidad de la cuenca y del correcto funcionamiento de los distintos elementos del modelo. Para esta calibración se deben realizar las siguientes modificaciones:

- El embalse Chacrillas se activa a partir de junio de 2015 y el embalse Los Aromos se mantiene con las características actuales (sin ampliación), pero su activación es en octubre de 1987 para coincidir con el inicio del llenado.
- No se incluye la activación de plantas desaladoras.

Respecto a la calibración de volumen en embalses, para Chacrillas la modelación muestra diferencias importantes en comparación con las ediciones disponibles (2016 a 2020), no siendo posible representar correctamente las magnitudes y temporalidad observadas. La información faltante que podría ayudar a mejorar los resultados del modelo son los caudales de entrada, salida e infiltraciones entre el periodo 2016-2019.

En el caso del embalse Los Aromos, el Modelo pyMOS-Aconcagua presenta en general una buena representación del volumen registrado en el embalse. Además, durante la última década de sequía se observa una mejora en la representatividad respecto a la calibración presentada en MOS-ACN (WSP y DGA, 2019). Dicha mejora se debe a la modificación en la pérdida de caudal en el canal Wadlington y Ovalle, que abastece el sector de riego S19, donde se observa un aumento desde un 45,6% de pérdidas inicial, a un 54,7 %.

4.5 Escenarios Futuros Modelo pyMOS-Aconcagua

Para conformar las series de tiempo de las variables climáticas (caudal, precipitación, etc.) del período futuro 2019 -2050 se consideran los siguientes escenarios:

- Escenario EFBH: Corresponde a un escenario futuro generado repitiendo la hidrología pasada del período 1987-2018 hasta el año 2050. De esta manera, se aseguran condiciones similares a las históricas registradas en la cuenca.
- Escenario EFHS: corresponde a un escenario futuro generado repitiendo la hidrología pasada del período 1987-2018 hasta el año 2050, pero repitiendo los datos como si fuese un “espejo”. Con

esto se busca generar un escenario en el cual la actual sequía se extiende a los 10 primeros años futuros para luego recuperar una condición de mayor agua disponible.

- Escenario EFCC: Corresponde a un escenario con Cambio Climático. Este caso se construyó a partir del escenario EFBH, y se aplicó un enfoque de “Delta Change”, en el que a partir de la información generada por la DGA en el PEGH-Aconcagua, se estimó el aumento y la disminución de los caudales y las precipitaciones para el GCM (Global Climate Model) más indicado. Finalmente, para el Modelo pyMOS-Aconcagua se selecciona el modelo GCM CCSM4, con los factores presentados en la Tabla 4.3.

Tabla 4.3: Factores de cambio para hidrología Futura seleccionando GCM CCSM4

CCSM4	
Delta de disminución en Precipitación	Delta de disminución en Caudales
-12%	-19%

Respecto a las configuraciones, en la Tabla 4.4 se presentan las condiciones que definen cada configuración, asignando un número a cada iniciativa y una letra a los tres escenarios climáticos futuros en el periodo 2020-2050. En todas las configuraciones se toma como base el inicio de la operación de la tubería reversible de ESVAL, la cual se encuentra actualmente construida.

Tabla 4.4. Resumen configuraciones Modelo pyMOS-Aconcagua en un periodo futuro 2020-2050

Descripción	EFBH	EFHS	EFCC
Base sin iniciativas	-	-	-
Embalse Catemu 30 hm ³	1A	1B	1C
Embalse Catemu 180 hm ³	2A	2B	2C
Embalse Pocuro 100 hm ³	3A	3B	3C
Embalse Aromos 60,3 hm ³	4A	4B	4C
Tecnificación Putaendo y 4 ^o sección	5A	5B	5C

4.6 Resultados Modelo pyMOS-Aconcagua

La Tabla 4.5 corresponde a un resumen de los resultados de las distintas configuraciones evaluadas en la cuenca del río Aconcagua. En dicha tabla se caracteriza el valor de las hectáreas beneficiadas en todas las configuraciones descritas. Esto se realizó con la finalidad de evaluar de forma simple el efecto positivo o negativo de la incorporación de nuevas iniciativas, además de cuantificar la magnitud estimada de dicho efecto.

Tabla 4.5: Resumen de área beneficiada y total regado en las configuraciones del Modelo pyMOS-Aconcagua

Iniciativas		Nuevas áreas beneficiadas por Escenario climático (ha)		
N° Conf.	Descripción	EFBH	EFHS	EFCC
0	Base sin iniciativas	Total 69.810 ha	Total 68.507 ha	Total 65.920 ha
1	Embalse Catemu 30 hm ³	1.034 ha nuevas (Total 70.844 ha)	1.229 ha nuevas (Total 69.736 ha)	1.059 ha nuevas (Total 66.979 ha)
2	Embalse Catemu 180 hm ³	9.604 ha nuevas (Total 79.414 ha)	10.206 ha nuevas (Total 78.713 ha)	8.509 ha nuevas (Total 74.429 ha)
3	Embalse Pocuro 100 hm ³	1.366 ha nuevas (Total 71.176 ha)	1.067 ha nuevas (Total 69.574 ha)	628 ha nuevas (Total 66.548 ha)
4	Embalse Aromos 60,3 hm ³	752 ha nuevas (Total 70.562 ha)	750 ha nuevas (Total 69.257 ha)	881 ha nuevas (Total 66.720 ha)
5	Tecnificación Putaendo y 4° Sección	1.871 ha nuevas (Total 71.681 ha)	2.377 ha nuevas (Total 70.884 ha)	2.767 ha nuevas (Total 68.687 ha)

Según lo planteado, en los resultados se presentó la información de seis configuraciones, utilizando como parámetro base la modelación del periodo 2020-2050 con las mismas condiciones y proyectos existentes actualmente, para posteriormente incluir en la modelación la incorporación de las distintas iniciativas de forma individual, permitiendo evaluar primeramente las proyecciones para las condiciones climáticas futuras y, posteriormente, el cambio que se generaría en la capacidad de riego si se ejecutan las distintas iniciativas. De esta forma, a futuro se estima que las hectáreas beneficiadas totales para riego en la cuenca del río Aconcagua varían entre, al menos, 65.920 ha, y un máximo de 69.810 ha. Esto implica un rango de variación esperable de 3.890 ha (6%), que dependen directamente de las condiciones climáticas a futuro, por lo que pueden ser controladas. Por otra parte, con la incorporación de las distintas iniciativas se proyecta que, sobre dicha situación base de capacidad de riego, se generen aumentos en las hectáreas beneficiadas de entre 1,1% y hasta 14,9%, según el tipo de iniciativa que se ejecute a futuro.

La configuración con mayor aporte de hectáreas beneficiada corresponde a la N°2, con la incorporación del embalse Catemu de 180 Hm³, proyectando valores totales de entre 74.429 ha y hasta 79.414 ha (para condiciones EFCC y EFBH, respectivamente), lo cual implica aumentos de entre 12,9% a 13,8% respecto a las situaciones base. La configuración que genera el segundo mayor beneficio corresponde al N°5, asociado a aplicar mejoras en la tecnificación de las secciones Putaendo y 4° Sección, en esta configuración se proyecta un total de áreas beneficiadas de entre 68.687 ha y hasta 71.681 ha, lo cual implica aumentos de entre 2,7% y hasta 4,2%, la incorporación de tecnificación en la cuenca representa una alternativa sencilla, sin requerir el desarrollo de una gran obra como implica el embalse Catemu.

Respecto a las configuraciones N°1 (incorporación embalse Catemu de 30 hm³), N°3 (incorporación del embalse Pocuro de 100 hm³) y N°4 (ampliación del embalse Los Aromos), se considera que el efecto generado respecto a la situación base proyectada es de orden de magnitud y variabilidad semejante, alcanzando en la mejor de las estimaciones un total de áreas beneficiadas de 70.844 ha, 71.176 ha y de 70.562 ha, lo cual a su vez corresponde a aumentos de 1,5%, 1,96% y 1,08%, respectivamente, variando el sector que recibe el beneficio, por lo que se debe considerar al analizar los resultados.

5. Cuenca río Choapa

5.1. Descripción general e iniciativas

La cuenca del río Choapa se ubica en el sector norte de la Región de Coquimbo, donde su cauce principal se origina en plena Cordillera de Los Andes por la confluencia de los tributarios Totoral, Leiva y del Valle. Aguas abajo recibe los aportes de los ríos Cuncumén, Chalinga e Illapel. Esta cuenca drena una extensión de 8.124 km².

El régimen de la cuenca del río Choapa es principalmente nivo-pluvial, debido a que en las zonas altas de la cuenca (ríos Chalinga, Cuncumén, Illapel y Choapa), es de régimen nival por el aumento de caudal producto de los deshielos. La parte baja de la cuenca (estero Camisas y Canela) presenta un régimen pluvial, debido a que las crecidas son producto de las precipitaciones de agua lluvia.

La cuenca del río Choapa cuenta con 2 embalses mayores, ambos destinados al riego: Embalse El Bato (río Illapel) y Embalse Corrales (ubicado en estero Camisas y alimentado desde el río Choapa).

Respecto a la priorización de las iniciativas para la modelación en pyMOS-Choapa, se considera la implementación de 3 embalses, los cuales se proyectan en la parte alta de los ríos Choapa, Chalinga e Illapel, tal como se observa en la Figura 5.1. En la Tabla 5.1 se presenta un resumen de la información recopilada de los estudios realizados a nivel de prefactibilidad, factibilidad o diseño.

Tabla 5.1: Resumen de características de iniciativas modeladas en pyMOS-Choapa

Variable	Embalse Cabecera Choapa (Batuco)	Embalse Chalinga	Embalse Canelillo
Volumen máximo (hm ³)	70	6,075	200
Volumen útil (hm ³)		5	176
Volumen muerto (hm ³)	0,06	1,075	10
Capacidad canal	No Aplica	No Aplica	No Aplica

alimentador (m ³ /s)			
Capacidad canal entrega (m ³ /s)	6	1,74	8,6
Área beneficiada (ha)	11.364	1.000	15.000

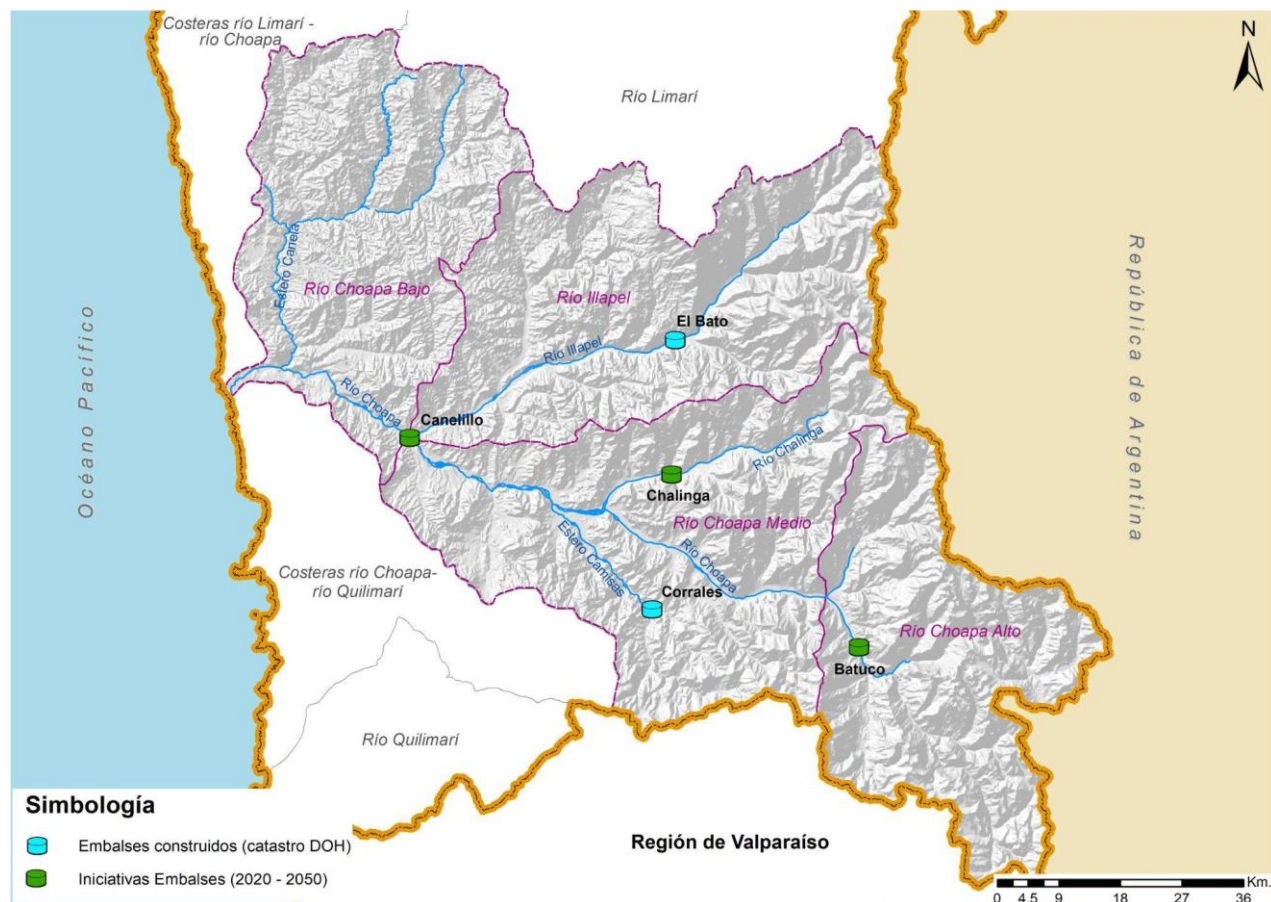


Figura 5.1: Ubicación de embalses existentes e iniciativas, periodo 2020-2050. Cuenca Río Choapa.

5.2 Disponibilidad y demanda hídrica en cuenca Choapa

De acuerdo con la información recopilada en la Etapa 1, la cuenca del río Choapa cuenta con una curva de oferta completa, es decir, con una curva de duración de caudal medio anual (de acuerdo a distintas probabilidades de excedencia), a partir de modelamiento hidrológico de caudales de entrada por subcuenca, el cual corresponde al “Análisis para el Desarrollo de un Plan de Gestión Integrada de Recursos Hídricos en la cuenca del Choapa” (Rodhos y DGA, 2017). La demanda hídrica total de la cuenca del río Choapa se calcula en la Etapa 1, de acuerdo a la superficie de riego. La oferta y la demanda hídrica, actual y futura se presentan en la Figura 5.2.

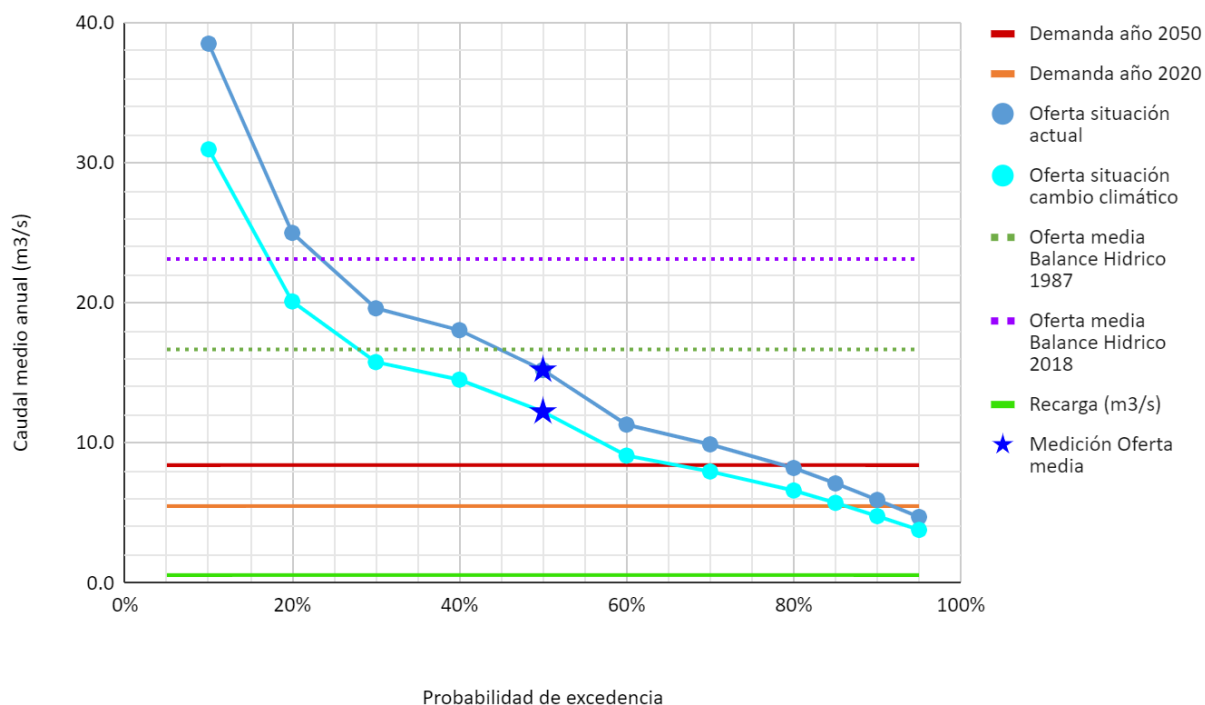


Figura 5.2: Oferta y demanda actual y futura de la cuenca del río Choapa

En la Figura 5.2 se observa que la disponibilidad hídrica con una probabilidad de excedencia del 50%, supera en 9,72 m³/s a la demanda actual (año 2020). Para una probabilidad de excedencia del 85%, la demanda sigue siendo menor a la oferta actual, pero solo con una brecha de 1,62 m³/s.

Dentro de los coeficientes propuestos en el documento de “Aplicación de la metodología de actualización del Balance Hídrico Nacional en las macrozonas norte y centro” (FTT-PUC y DGA, 2018), se determina una variación de escurrimiento para condición de cambio climático, con base a la estadística del período base 1985-2015. Para la cuenca del río Choapa se proyecta una variación de la escurrimiento media anual del -19.6% para el período 2030-2060, respecto del período base (1985-2015). De acuerdo a la Figura 5.2, la disponibilidad hídrica proyectada para el año 2050 es de 12,22 m³/s y 5,71 m³/s, para probabilidades de excedencia del 50% y 85%, respectivamente. Se proyecta que la demanda aumente en un 53,47%, por lo que la brecha entre la oferta y demanda sería de 3,81 m³/s.

5.3 Implementación Modelo pyMOS-Choapa

El Modelo pyMOS-Choapa se desarrolla a partir de la lógica del modelo implementado en la cuenca del río Aconcagua MOS-ACN (DICTUC y DGA, 2009). El modelo base, pyMOS, está escrito por módulos, relativamente independientes, con una base genérica, los cuales, por lo tanto, permiten ser aplicados a otras cuencas.

Con el objetivo de construir el modelo simplificado, se consideran los antecedentes del modelo MAGIC (2006) y los modelos WEAP-Modflow más recientes, en donde la Tabla 5.2 presenta una caracterización de los modelos utilizados:

Tabla 5.2: Modelos propuestos como antecedentes principales

Año	Autoría	Modelos	Notas
2006	CAZALAC, Rodhos y GORE Coquimbo	MAGIC Choapa	-
2017	Rodhos y DGA	WEAP	-
2019	DICTUC-SEI y DGA	WEAP-Modflow	Integración de modelos superficiales y subterráneos
2020	UTP Hídrica-Eridanus y DGA	WEAP-Modflow	Utiliza como base el modelo WEAP-Modflow (DICTUC-SEI y DGA, 2019)

Los elementos que forman parte del Modelo pyMOS-Choapa y, a su vez, se interconectan en un esquema topológico son los siguientes:

- a) Ríos principales: Se identifican 9 ríos y esteros a lo largo de la cuenca del río Choapa. Cabe indicar que el estero Canela solo se aplica como una cuenca aportante, dada la actividad mínima que existe en ella.
- b) Nodos en tramos de río: Se identifican 37 nodos los cuales representan distintos puntos de interés, incluyendo: confluencias de ríos, descargas de tributarios, extracciones, bocatomas, entre otros. Estos nodos permiten representar la cuenca basada en el modelo WEAP (2017) y WEAP-Modflow (2020).
- c) Embalses mayores existentes o proyectados en la cuenca: Para la modelación de pyMOS-Choapa se incorporan 5 embalses, de los cuales 2 se encuentran construidos y activos (Corrales y El Bato) y los tres restantes corresponden a iniciativas (Cabecera Choapa, Chalinga y Canelillo).
- d) Subcuenas aportantes: se identifican 10 cuencas de cabecera (aportes naturales) y 27 cuencas laterales de generación de escorrentía. En relación a los datos de entrada de caudales de estas subcuenas, estos se generan a partir de estaciones con registro fluviométrico en régimen natural, o con baja influencia antrópica, o con transposición de cuencas (para aquellas subcuenas con influencia debido al riego).
- e) Sectores de riego presentes en la cuenca: Se identifican 28 sectores de riego en la cuenca según los distintos estudios de base, y que no han sido modificados hasta la actualidad. Para la modelación a futuro se agrega un sector de riego llamado Sec-29, que se asocia solamente al escenario en que se activa el embalse Canelillo, pues corresponde a la zona litoral que se riega con este embalse.
- f) Origen/destino de los canales matrices y derivados (como sistemas por sector de riego) que proveen de agua a los diferentes sectores de riego: Se identifican 49 canales matrices entre los que se encuentran el canal alimentador del embalse Corrales y su canal de distribución. Los demás

embalses, el existente (El Bato) y los proyectados, no requieren canal alimentador ni de devolución.

- g) Acuíferos identificados en la cuenca: El Modelo pyMOS-Choapa considera 26 acuíferos distribuidos en la cuenca, con una nomenclatura que acompaña la de los sectores de riego a los cuales subyacen. Cabe indicar que, como excepción, se determinó que los Sectores de Riego 18 y 20 no tienen acuífero asociado.
- h) Sitios de demanda específicos: los cuales corresponden al uso de agua por parte de la vegetación ribereña. En el modelo se define un uso de agua subterránea por parte de la vegetación ripariana, asociado directamente a los puntos de afloramiento de los acuíferos y los otros asociados a captaciones de acciones desde el río Cuncumén de la Minera Los Pelambres.

Dentro de los supuestos o consideraciones del Modelo pyMOS-Choapa, se debe indicar lo siguiente:

- Los caudales subterráneos entrantes en las cuencas de cabecera y laterales presentan valores despreciables, por lo tanto, se considera como aporte nulo para la formulación del Modelo pyMOS-Choapa.
- Se incluye el concepto de desmarques, que corresponde al porcentaje de los derechos de agua que se establece para ser captado cuando no hay agua suficiente como para cubrir el 100% de ellos. La información histórica de desmarques se obtuvo de la Junta de Vigilancia del río Choapa y sus afluentes.
- Se consideran pozos que extraen agua desde los acuíferos, los cuales se usan para riego, otros usos (agua potable, minería e industria) y para la restitución de la Minera Los Pelambres, los cuales fueron considerados en las iniciativas debido a la magnitud de las extracciones.

5.4 Calibración Modelo pyMOS-Choapa

Para la calibración del Modelo pyMOS-Choapa se realiza una comparación de los valores medidos en estaciones de medición de caudal, volumen acumulado en los embalses y nivel de pozos en acuíferos. Este análisis permite verificar si los resultados obtenidos son representativos de la realidad de la cuenca y del correcto funcionamiento de los distintos elementos del modelo.

La calibración de volumen de los embalses Corrales y El Bato muestra que ambos presentan una alta correlación (Nash-Sutcliffe Efficiency, o NSE, mayor a 0,9), lo cual logra representar las dinámicas de llenado, almacenamiento y entrega de agua. Sin embargo, el Bato tiende a subestimar los valores obtenidos en la modelación respecto a los observados.

En el caso de la comparación con las estaciones fluviométricas, en 3 de las 4 estaciones existentes en el río Choapa se observa un muy buen ajuste entre las mediciones y modelo, con valores de NSE mayores a 0,80. La excepción está dada por la estación Choapa en Salamanca, donde se aprecia una subestimación de los

máximos de caudal, lo que es un comportamiento típico de los modelos numéricos al intentar simular los valores extremos (tanto de crecida como estiaje). A pesar de lo anterior el ajuste es aceptable ya que logra captar la variabilidad estacional durante la época de estiaje (junio a noviembre). En 3 de las 4 estaciones, incluyendo esta última, se observa una subestimación de los caudales durante la década 2000-2010 y en periodos de estiaje. En el caso de las estaciones de medición existentes en la subcuenca del río Illapel, se tiene que las 3 estaciones existentes presentan un buen ajuste, con valores de NSE mayores a 0,80. Finalmente, el análisis de los caudales en el río Chalinga se realiza a partir de las mediciones existentes en la estación Chalinga en La Palmilla. En esta estación se aprecia un ajuste satisfactorio (NSE cercano a 1), donde las diferencias entre promedios mensuales de caudal son mínimas.

5.5 Escenarios Futuros Modelo pyMOS-Choapa

Para conformar las series de tiempo de las variables climáticas (caudal y precipitación) del período futuro 2019 -2050 se consideran los siguientes escenarios:

- Escenario EFBH: corresponde a un escenario futuro generado donde se repite la hidrología pasada del período 1990-2019 hasta el año 2050. De esta manera, se aseguran condiciones similares a las históricas registradas en la cuenca.
- Escenario EFHS: este escenario busca repetir la hidrología de los últimos años con una sequía prolongada, de tal forma de extender un período en el que de manera crítica se extiende la falta de ingreso de agua al sistema debido a un bajo ingreso por caudales de cuencas de cabecera y laterales.
- Escenario EFCC: corresponde a un escenario con Cambio Climático. Este caso se construyó a partir del escenario EFBH y se aplicó un enfoque de “Delta Change”, en el que a partir de la información generada por la DGA en el PEGH-Choapa, se estimó el aumento y la disminución de los caudales y las precipitaciones para el GCM más indicado. Finalmente, para el Modelo pyMOS-Choapa se selecciona el modelo GCM CSIRO, con los factores presentados en la Tabla 5.3.

Tabla 5.3: Factores de cambio para hidrología futura seleccionando GCM CSIRO

Delta de disminución en Precipitación	Delta de disminución en Caudales
-7%	-10%

Respecto a las configuraciones, en la Tabla 5.4 se presentan las condiciones que definen cada configuración, asignando un número a cada iniciativa y una letra a los tres escenarios climáticos futuros en el periodo 2020-2050, mientras que en la Tabla 5.5 se indica el resumen de las hectáreas beneficiadas.

Tabla 5.4. Configuraciones para implementar en Modelo pyMOS-Choapa en un periodo futuro 2020-2050

Configuración	EFBH	EFHS	EFCC
Base sin iniciativas	-	-	-
Embalse Choapa (Batuco) 70 hm ³	1A	1B	1C
Embalse Chalinga 5 hm ³	2A	2B	2C
Embalse Canelillo 170 hm ³	3A	3B	3C

5.6 Resultados del Modelo pyMOS-Choapa

A continuación, se presentan los resultados obtenidos para la cuenca del río Choapa. El resumen de las nuevas áreas de riego y de riego total obtenido para las distintas configuraciones analizadas se presenta en la Tabla 5.5. En los resultados se presenta la información de tres configuraciones, utilizando como parámetro base para realizar el contraste en la determinación de las nuevas hectáreas regadas, la modelación del periodo 2020-2050 sin la inclusión de iniciativas.

Tabla 5.5: Resumen de nuevas áreas de riego y riego total en configuraciones del Modelo pyMOS-Choapa

Iniciativas		Nuevas hectáreas beneficiadas por escenario climático (ha)		
N° Conf.	Configuración	EFBH	EFHS	EFCC
0	Base sin iniciativas	Total 11.110 ha	Total 11.112 ha	Total 10.646 ha
1	Embalse Choapa (Batuco) 70 hm ³	506 ha nuevas (Total 11.616 ha)	699 ha nuevas (Total 11.811 ha)	570 ha nuevas (Total 11.216 ha)
2	Embalse Chalinga 5 hm ³	42 ha nuevas (Total 11.152 ha)	32 ha nuevas (Total 11.144 ha)	36 ha nuevas (Total 10.682 ha)
3	Embalse Canelillo 170 hm ³	11.087 ha nuevas (Total 22.197 ha)	11.527 ha nuevas (Total 22.639 ha)	10.924 ha nuevas (Total 21.570 ha)

De esta forma, para el periodo 2020-2050 se estima que el área total beneficiada para riego sea de al menos 10.646 ha para la situación base EFCC, lo cual varía hasta 11.112 ha para el escenario EFHS, lo cual implica una variación de 466 ha, al menos un 4.3% que dependen exclusivamente de las condiciones climáticas futuras. Al considerar la incorporación de las iniciativas, el mayor aporte en términos de hectáreas beneficiadas lo genera la configuración 3, que corresponde a la construcción del embalse Canelillo, generando entre 10.924 ha y 11.527 ha, lo cual corresponde a un incremento de entre 103% y 100%, en relación a las hectáreas proyectada para las situaciones base en las distintas condiciones climáticas EFCC y EFHS, y elevando el total de hectáreas regadas a entre 21.570 ha y 22.639 ha. El segundo mayor aporte en hectáreas beneficiadas está asociado a la configuración 1, la construcción del embalse Choapa, y

que genera entre 506 ha y 699 ha para los escenarios EFBH y EFHS, respectivamente, lo cual representa un incremento de 4.5% a 6.3%. El escenario 2 es el que menores efectos tiene sobre el total de hectáreas beneficiadas, con incrementos de entre 32 ha a 42 ha respecto a la situación base futura, lo cual corresponde a alrededor de 0.3%, siendo un efecto de muy baja magnitud, y menor a la variación estimada con los distintos escenarios climáticos.

6. Cuenca río Huasco

6.1. Descripción general e iniciativas

La cuenca del río Huasco se ubica hacia el sur de la Tercera Región y se origina producto de la unión de dos ríos: el Tránsito y el Carmen, presentando una extensión de 9.857 km². Esta cuenca limita al norte con las cuencas costeras de Quebrada Carrizal y Quebrada Totoral, y al sur con Costeras e Islas Río Huasco y Río Los Choros. El régimen del río Huasco es nival, ya que sus principales formativos nacen en la alta cordillera de Los Andes.

La cuenca cuenta con solo un embalse mayor denominado Santa Juana de 166 hm³, ubicado en la cabecera de la subcuenca Vallenar Alto, aguas abajo de la confluencia de los ríos El Tránsito y El Carmen, siendo este utilizado para el riego y generación eléctrica.

Respecto a las iniciativas modeladas en el Modelo pyMOS-Huasco, solo fue posible seleccionar dos de ellas: Embalse Cabecera El Carmen y Embalse Huasco Bajo, ya que para las demás iniciativas generadoras no se dispone de información suficiente para su simulación. En la Tabla 6.1 se presenta un resumen de la información recopilada de los estudios realizados a nivel de prefactibilidad, factibilidad o diseño y en la Figura 6.1 se presenta la ubicación de estos embalses propuestos y los ya existentes.

Tabla 6.1: Resumen de características de iniciativas modeladas en pyMOS-Huasco

Variable	Embalse Cabecera Río El Carmen	Embalse Huasco Bajo
Volumen máximo (hm ³)	14,85	5
Volumen útil (hm ³)	13,7	4
Volumen muerto (hm ³)	1,15	1
Capacidad canal alimentador (m ³ /s)	No Aplica	No Aplica
Capacidad canal entrega (m ³ /s)	1	
Área beneficiada (ha)	1.220	2.000

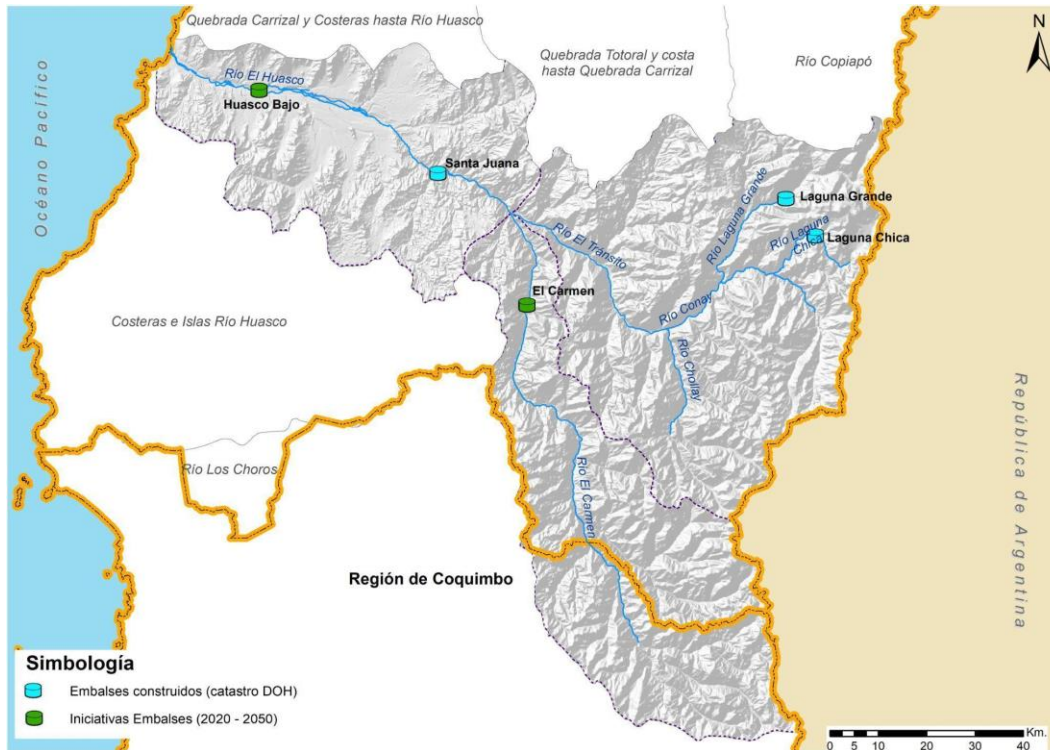


Figura 6.1: Ubicación de embalses existentes y principales iniciativas generadoras, periodo 2020-2050. Cuenca Río Huasco.

6.2 Disponibilidad y demanda hídrica en cuenca

De acuerdo a la información recopilada en la Etapa 1, la cuenca del río Huasco no cuenta con estudios específicos, tal como un plan Plan Director para la Gestión de Recursos Hídricos, o Plan Maestro a nivel regional, es por ello que la oferta se estima directamente de los caudales de oferta, el cual corresponde al estudio “Análisis de Requerimientos de Largo Plazo en Infraestructura Hídrica” (INH y DIRPLAN, 2016). La demanda es estimada en la Etapa 1, de acuerdo a la superficie de riego.

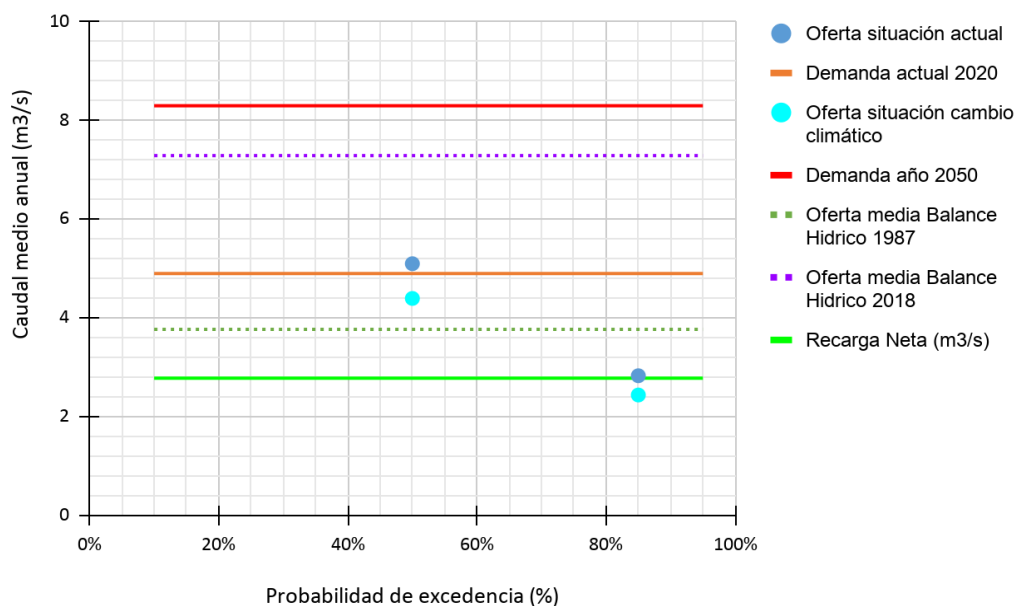


Figura 6.2: Curva de oferta y demanda, para la situación actual y escenario de cambio climático en la cuenca del río Huasco

En la Figura 6.2 se observa que la disponibilidad hídrica con una probabilidad de excedencia del 50%, supera solo en 0,2 m³/s a la demanda actual (año 2020). Para una probabilidad de excedencia del 85%, la demanda es mayor supera a la oferta en 2,07 m³/s.

Dentro de los coeficientes propuestos en el documento de “Aplicación de la metodología de actualización del Balance Hídrico Nacional en las cuencas de las macrozonas norte y centro” (FTT-PUC y DGA, 2018), se determina una variación de escorrentía para condición de cambio climático, en base a la estadística del período base 1985-2015. Para la cuenca del río Huasco se proyecta una variación de la escorrentía media anual del -13,8% del período 2030-2060, respecto del periodo base (1985-2015). De acuerdo a la Figura 6.2, la disponibilidad hídrica proyectada para el año 2050 es de 4,4 m³/s y 2,44 m³/s, para probabilidades de excedencia del 50% y 85%, respectivamente. Se proyecta que la demanda aumente en un 69,39%, por lo que la brecha entre la oferta y demanda sería de 3,2 m³/s.

6.3 Implementación Modelo pyMOS-Huasco

El Modelo pyMOS-Huasco se desarrolla a partir de la lógica del modelo piloto implementado en la cuenca del río Aconcagua (Modelo pyMOS-Aconcagua).

En términos generales, los antecedentes utilizados para la implementación del Modelo pyMOS-Huasco se obtienen de una revisión detallada de la información contenida en el modelo MAGIC (Knight Piésold y DGA, 2013) y el modelo WEAP-Modflow (UTP Hídrica-Eridanus y DGA, 2020c), también denominado PEGH-Huasco.

Con el objetivo de construir el modelo simplificado se consideran como principales antecedentes base los modelos más recientes, la Tabla 6.2 presenta una caracterización de los modelos utilizados:

Tabla 6.2: Modelos propuestos como antecedentes principales

Año	Autoría	Modelos	Notas
2012	CALAZAC y DGA	WEAP Huasco	-
2013	Knight Piésold y DGA	MAGIC Huasco	-
2020	UTP Hídrica-Eridanus y DGA	WEAP-Modflow	Utiliza como base modelo MAGIC Huasco (2013)

Los elementos que forman parte del Modelo pyMOS-Huasco y a su vez se interconectan en un esquema topológico son los siguientes:

- a) Ríos principales: Se identifican 23 ríos y esteros a lo largo de la cuenca del río Huasco.
- b) Nodos en tramos de río: Se identifican 72 nodos distribuidos a lo largo de los 23 cauces principales presentes en la cuenca del río Huasco. Cada nodo incorpora a las cuencas de generación de escorrentía, demandas suplidas, sectores de riego, estaciones fluviométricas y acuíferos.
- c) Los embalses mayores existentes o proyectados en la cuenca: Para la modelación de pyMOS-Huasco se incorporan 4 embalses, de los cuales 2 se encuentran construidos y activos (Santa Juana y Laguna Grande) y los 2 restantes corresponden a iniciativas (Cabecera río El Carmen y Huasco Bajo).
- d) Las subcuencas aportantes: Se identifican 29 subcuencas de generación de escorrentía (cabecera y laterales). En relación a los datos de entrada de caudales de estas subcuencas, estos se generan a partir de estaciones con registro fluviométrico en régimen natural o con baja influencia antrópica o con transposición de cuencas (para aquellas subcuencas con influencia debido al riego). En las subcuencas de la parte baja de la cuenca (Huasco), se utilizan los registros modelados en WEAP-Modflow del PEGH-Huasco (2020).
- e) Los sectores de riego presentes en la cuenca: Se identifican 11 sectores de riego, de acuerdo a la misma zonificación presentada por PEGH-Huasco, pero sin la diferenciación según tipo de riego (tecnificado y no tecnificado).
- f) Origen/destino de los canales matrices y derivados (como sistemas por sector de riego) que proveen de agua a los diferentes sectores de riego: Debido a la gran diversidad y cantidad de canales existentes en la cuenca, en el estudio PEGH-Huasco desarrollado por la DGA, se decide simplificar este elemento a 11 canales equivalentes, los cuales riegan los 11 sectores de riego.

- g) Los distintos acuíferos identificados en la cuenca: El Modelo pyMOS-Huasco considera 9 acuíferos, manteniendo la misma definición que el modelo WEAP-Modflow (PEGH-Huasco). Las características y variables de cada acuífero se extraen de los datos de entrada modelados en MAGIC (2013), debido a que WEAP-Modflow solo modela a partir de los acuíferos aguas abajo del embalse Santa Juana.
- h) Sitios de demanda: El Modelo pyMOS-Huasco incluye solicitudes de agua dentro de la cuenca del Huasco los cuales están asociados a derechos de aprovechamiento de agua otorgados, y que son extraídos con distintos objetivos de uso desde fuentes de agua superficiales o subterráneas. Los sitios de demanda se clasificaron en: pozos de bombeo (donde la fuente de agua corresponde al acuífero) y derechos de agua superficiales (donde la fuente de agua es superficial). En el caso de los pozos de bombeo se incluyen los siguientes usos: (agua potable, minería, industria y riego).

Dentro de los supuestos o consideraciones del Modelo pyMOS-Huasco, se debe indicar lo siguiente:

- No existen trasvases de agua entre los distintos tramos de los canales simplificados en el Modelo pyMOS-Huasco.
- Las extracciones de caudal de los Sectores de Riego en las bocatomas de sus canales se realizan a demanda, es decir, cada sector de riego sólo va a extraer lo que demanda, de forma similar a como está implementado el Modelo pyMOS-Aconcagua. Sin embargo, se incluye una restricción adicional que es la capacidad de los canales, de forma que siempre se extraiga el mínimo entre la demanda y la capacidad de conducción.
- Tipo de bombeo: al igual que en el Modelo pyMOS-Aconcagua, en el Modelo pyMOS-Huasco se considera que los caudales de bombeo en los Sectores de Riego son calculados en función del déficit de riego. Esta condición se considera relevante, ya que el bombeo a déficit representa mejor la realidad de la operación de los pozos de riego, en general, en las zonas de riego de todo el país.
- Se considera que existe una salida de agua desde los acuíferos hacia la atmósfera debido a la alta evaporación potencial en la cuenca. Esto se aplica principalmente a la parte baja de la cuenca y es modelada considerando una tasa de evaporación máxima en superficie que varía entre 0 mm/día-1,0 mm/día y una disminución lineal hasta una profundidad máxima especificada.
- Se considera una pérdida por infiltración en el embalse, la cual es función del volumen acumulado.

6.4 Calibración Modelo pyMOS-Huasco

Para la calibración del Modelo pyMOS-Huasco se realiza una comparación de los valores registrados en estaciones de medición de caudal, volumen acumulado en los embalses y nivel de pozos en acuíferos. Este

análisis permite verificar si los resultados obtenidos son representativos de la realidad de la cuenca y del correcto funcionamiento de los distintos elementos del modelo. Esta calibración considera que el embalse Santa Juana se activa desde su fecha de operación (septiembre 1997). La regla de operación cambia en el año 2007, debido a que se modifica el factor de reducción de demanda, volumen umbral y caudal máximo de la obra de entrega; lo cual tiene como objetivo mejorar la calibración y representar de mejor forma el caudal medido aguas abajo de la entrega del embalse.

La calibración del volumen acumulado en el embalse Santa Juana considera dos periodos con reglas de operación distintas: el primer periodo entre septiembre de 1997 y abril de 2007, y el siguiente hasta 2020. Esto se logra definiendo valores de volumen umbral, factor de reducción de demanda y caudal máximo de entrega para los dos periodos anteriores. De esta forma, se busca poder representar mejor las dinámicas de llenado, acumulación y entrega de caudal desde el embalse. En general se observa un buen ajuste entre los datos medidos y modelados, sin embargo, el volumen acumulado entre 1999 y 2002 no es bien representado. Se estima que durante este periodo puede haberse utilizado una regla de operación distinta, lo cual no es representado en la actualidad en el Modelo pyMOS.

Respecto a la calibración de volumen del embalse Santa Juana, para ambos periodos (con cambios de regla de operación) se observa un buen ajuste entre los datos medidos y modelados. Sin embargo, entre los periodos 1999 -2002 se tiene una desviación respecto de los datos medidos, lo que podría explicarse por una regla de operación adicional, la cual no es posible de representar en el Modelo pyMOS-Huasco.

En relación a las estaciones fluviométricas, en los ríos Carmen y Tránsito, se observa en general una buena correlación entre los caudales modelados y medidos. Sólo en la última estación del río Tránsito (Tránsito antes junta El Carmen) se observa una disminución del ajuste del modelo, principalmente influenciado por una subestimación de los caudales altos, aunque también en menor medida en los caudales de estiaje. Aguas abajo de la confluencia de los ríos Tránsito y El Carmen existen 4 estaciones fluviométricas útiles para la calibración en el río Huasco. Las dos primeras estaciones se ubican aguas arriba del embalse Santa Juana, correspondientes a: Huasco en Algodones y Huasco en Chépica. En ambas estaciones se observan una buena representación de los datos medidos, con coeficientes NSE altos, iguales a 0,80 aprox. A pesar de lo anterior, en la primera estación se observa una sobreestimación de los caudales altos y, en menor medida, de los caudales asociados a periodos de menor disponibilidad. La siguiente estación en el río Huasco corresponde a río Huasco bajo embalse, la cual se ubica aguas abajo de la entrega del embalse. Los resultados modelados muestran una buena correlación con los caudales medidos, sin embargo, se observa una sobreestimación de los caudales durante algunos años del reciente periodo de sequía. Por último, en la estación Río Huasco en Puente Nicolasa los resultados muestran un ajuste aceptable, aunque menor que en las estaciones ubicadas aguas arriba de ésta, donde en general los caudales modelados presentan una sobreestimación.

Finalmente, la calibración del funcionamiento de los acuíferos del modelo se realiza comparando los resultados del modelo con las mediciones históricas de nivel de pozos en los distintos acuíferos. La única excepción ocurre para el caso del acuífero del embalse Santa Juana (Acuif03) y Vallenar Bajo (Acuif06), los cuales no cuentan con estaciones de medición de nivel. A partir de las comparaciones de los resultados modelados y mediciones de nivel de pozo en los distintos acuíferos se observa que el Modelo pyMOS-Huasco representa de forma adecuada la señal de variación temporal de niveles. Lo anterior se logra a pesar de las simplificaciones de los procesos subterráneos realizadas en el presente modelo.

6.5 Escenarios Futuros Modelo pyMOS-Huasco

Para conformar las series de tiempo de las variables climáticas (caudal, precipitación) del período futuro 2020 -2050 se consideran los siguientes escenarios:

- Escenario EFBH: corresponde a un escenario futuro generado repitiendo la hidrología pasada del período 1990-2019 hasta el año 2050. De esta manera, se aseguran condiciones similares a las históricas registradas en la cuenca.
- Escenario EFHS: corresponde a un escenario futuro generado repitiendo la hidrología pasada del período 1990-2019 hasta el año 2050, pero repitiendo los datos como si fuese un “espejo”. Con esto se busca generar un escenario en el cual la actual sequía se extiende a los 10 primeros años futuros para luego recuperar una condición de mayor agua disponible.
- Escenario EFCC: corresponde a un escenario con Cambio Climático. Este caso se construyó a partir del escenario EFBH, y se aplicó un enfoque de “Delta Change”, en el que a partir de la información generada por la DGA en el PEGH-Huasco, se estimó el aumento y la disminución de los caudales y las precipitaciones para el GCM más indicado. Finalmente, para el Modelo pyMOS-Huasco se selecciona el modelo GCM CCSM4, con los factores presentados en la Tabla 6.3.

Tabla 6.3: Factores de cambio para hidrología Futura seleccionando GCM CCSM4

Delta de disminución en Precipitación	Delta de disminución en Caudales	Delta de aumento en Temperatura
-5,6%	-10,3%	4,4%

La definición de las configuraciones, es decir, condiciones impuestas por la existencia de iniciativas y políticas específicas, considera por un lado los tres escenarios climáticos descritos previamente (EFBH, EFHS y EFCC) y, por otro, 2 iniciativas de embalses: embalse de cabecera El Carmen y embalse Huasco Bajo, totalizando 6 configuraciones. De esta forma, las características de las iniciativas de embalse

analizadas se presentan resumidas en la Tabla 6.4, mientras que las configuraciones modeladas son las siguientes:

- Configuración N°1A: considera el escenario EFBH y operación del embalse El Carmen.
- Configuración N°2A: considera el escenario EFBH y operación del embalse Huasco Bajo.
- Configuración N°1B: considera el escenario EFHS y operación del embalse El Carmen.
- Configuración N°2B: considera el escenario EFHS y operación del embalse Huasco Bajo.
- Configuración N°1C: considera el escenario EFCC y operación del embalse El Carmen.
- Configuración N°2C: considera el escenario EFCC y operación del embalse Huasco Bajo.

Tabla 6.4: Resumen de características de los embalses modelados en pyMOS-Huasco

Variable	Embalse Cabecera Río El Carmen	Embalse Huasco Bajo
Volumen máximo (hm ³)	14,85	5
Volumen útil (hm ³)	13,7	4
Volumen muerto (hm ³)	1,15	1
Capacidad canal alimentador (m ³ /s)	No Aplica	No Aplica
Capacidad canal entrega (m ³ /s)	5	1,5
Área beneficiada (ha)	1.220	2.000

6.6 Resultados Modelo pyMOS-Huasco

En primer lugar, el análisis del total de áreas regadas en la cuenca del río Huasco alcanzaría en el periodo 2020 - 2050 es de 6.400 ha en los escenarios EFBH y EFHS, mientras que, en el mismo periodo, el escenario con cambio climático (EFCC) alcanza 5.981 ha, lo que constituye una disminución de 400 ha.

Tabla 6.5: Resumen de nuevas áreas de riego y riego total en configuraciones del Modelo pyMOS-Huasco

Iniciativas		Nuevas áreas beneficiadas por escenario climático (ha)		
N° Config.	Configuración	EFBH	EFHS	EFCC
0	Base sin iniciativas	Total 6.400 ha	Total 6.392 ha	Total 5.981 ha
1	Embalse el Carmen	111 ha nuevas (Total 6.511 ha)	125 ha nuevas (Total 6.517 ha)	194 ha nuevas (Total 6.175 ha)
2	Embalse Huasco Bajo	57 ha nuevas (Total 6.457 ha)	97 ha nuevas (Total 6.488 ha)	48 ha nuevas (Total 6.029 ha)

La iniciativa del embalse de cabecera El Carmen indica consistentemente que el embalse funciona en forma anual e interanual, según los recursos hídricos disponibles. En todos los escenarios climáticos los beneficios de la construcción de esta obra se ven en el aumento de los PDS de estiaje en los sectores de riego S01-2, y en los ubicados desde S04-2 hacia aguas abajo. El área nueva beneficiada varía entre 111 ha y 194 ha, dependiendo de la condición climática, mientras que el total de hectáreas cultivadas pasa de 6.510 ha a 6.175 ha.

En el caso de la iniciativa embalse Huasco Bajo, en todos los escenarios climáticos esta obra funciona en forma anual, manteniendo su volumen acumulado al máximo en periodos de alta disponibilidad hídrica. Debido a su ubicación, este embalse beneficia sólo al sector de riego S08, con nueva área beneficiada de riego entre 48 ha y 97 ha, y el total de hectáreas regadas en la cuenca entre 6.092 ha a 6.488 ha.

7. Conclusiones

El desarrollo de la herramienta de modelación pyMOS permite destacar los siguientes elementos:

1. La actualización del lenguaje de programación desde TurboPascal a Python permite una mejor continuidad en el tiempo del modelo, ya que este último lenguaje de programación es en la actualidad de amplia aplicación.
2. El desarrollo del modelo con una filosofía de código abierto permite que este pueda ser modificado y adaptado a distintas cuencas del país, lo que entrega mayor flexibilidad ante la necesidad de representar alguna condición específica de una cuenca. Lo anterior es posible de observar en la modificación que fue necesaria para el Modelo pyMOS-Choapa, el cual requería de la incorporación de extracciones de caudal bajo desmarques históricos y proyectados, algo que no estaba implementado originalmente en el Modelo pyMOS-Aconcagua.
3. El Modelo pyMOS permite realizar un análisis integral de una cuenca, así como evaluar las potenciales interacciones entre obras. Por otro lado, los datos de entrada son fácilmente editables, lo que permite incorporar o retirar iniciativas, así como cambiar características en sectores de riego, acuíferos, embalses, etc. Con todo, el análisis de distintas configuraciones es rápido y manejable.

El análisis de la calibración de las cuencas modeladas permite concluir lo siguiente:

1. En general las cuencas modeladas presentan un buen ajuste entre los datos de caudal medio mensual medidos y modelados. La calibración entrega valores de NSE consistentemente mayores a 0,70 en todas las cuencas. Se observan excepciones en una estación específica de la cuenca del río Choapa y 2 de la cuenca del río Huasco, donde este estadígrafo se mantiene sobre 0,60.
2. En relación a la calibración de los embalses, los modelos muestran una buena representación de la variación del volumen acumulado en todos los embalses salvo en el embalse Chacrillas, sin embargo, la falta de un registro extenso de datos impide generar una calibración mejor. Este es un elemento que puede ser mejorado en la medida que estén disponibles más datos en el embalse.
3. Se observa que en algunas estaciones de las cuencas analizadas los caudales modelados durante el periodo de sequía de los últimos años estarían siendo sobreestimados. Lo anterior requiere de mayores estudios específicos que permitan tener una mayor información de los procesos de la cuenca que permitan mejorar la calibración del Modelo pyMOS.

A partir de los resultados obtenidos de la modelación de distintas configuraciones en la cuenca del río Aconcagua se destaca lo siguiente:

1. Los escenarios climáticos base muestran que durante el periodo 2020-2050 las hectáreas totales regadas en la cuenca del río Aconcagua varían entre 65.920 ha para el escenario de cambio

climático EFCC y un máximo de 69.810 ha para los escenarios sin esta condición (EFBH y EFHS), lo que representa una diferencia de 3.890 ha.

2. La incorporación de las distintas iniciativas muestra que todas las configuraciones representan aumentos en las hectáreas beneficiadas respecto a la condición base (modelación de las hectáreas regadas en el periodo 2020-2050 sin iniciativas nuevas), con aumentos entre 1,1% y hasta 14,9%.
3. La incorporación del embalse Catemu de 180 Hm³ genera la mayor cantidad de hectáreas beneficiadas, proyectando valores totales de entre 74.429 ha y hasta 79.414 ha (para condiciones EFCC y EFBH, respectivamente), correspondiente a un aumento entre 12,9% y 13,8% respecto a las situaciones base. Tanto en hectáreas beneficiadas como en términos porcentuales respecto a la situación base corresponde a la configuración que genera mayores áreas nuevas regadas, concentradas en la 3° y 4° Sección.
4. El proyecto de tecnificación de los sectores de riego del río Putaendo y 4° Sección es la segunda iniciativa con mayor área beneficiada. En esta configuración se proyecta un total de áreas regada entre 68.687 ha y 71.681 ha (para condiciones EFCC y EFBH, respectivamente), lo cual implica aumentos de entre 2,7% y hasta 4,2% (para las condiciones EFBH y EFCC, respectivamente).
5. Respecto a las iniciativas embalse Catemu de 30 Hm³, embalse Pocuro de 100 Hm³ y ampliación del embalse Los Aromos, se considera que el efecto generado respecto a la situación base proyectada es de orden de magnitud y variabilidad semejante, alcanzando en la mejor de las estimaciones un total de áreas beneficiadas de 70.844 ha, 71.176 ha y de 70.562 ha, lo cual a su vez corresponde a aumentos de 1,5%, 1,96% y 1,08%, respectivamente.
6. Los resultados muestran que el beneficio de estas tres últimas configuraciones es semejante, pero cabe indicar que los sectores de riego beneficiados no son los mismos, ya que en el caso del embalse Catemu de 30 Hm³ el beneficio se concentra entre los sectores ubicados en la 3° y 4° Sección, el embalse Pocuro beneficia a la 1°, 2°, 3° y 4° Sección y la ampliación del embalse Los Aromos beneficia a los sectores S17 (Colmo) y S18 (Concón) ubicados en la parte baja de la 4° Sección.
7. Con todo, la información anterior muestra que, si bien se tiene que en términos netos el beneficio en hectáreas beneficiadas y aumentos porcentuales son bastante mayores en el caso del embalse Catemu de 180 hm³, la incorporación de tecnificación en la cuenca representa una alternativa efectiva y con costos menores, sin requerir el desarrollo de una gran obra como implica el embalse Catemu.

A partir de los resultados obtenidos de la modelación de distintas configuraciones en la cuenca del río Choapa se destaca lo siguiente:

1. En la cuenca del río Choapa, para el periodo 2020-2050 se estima que el área total beneficiada para riego es de al menos 10.646 ha para la situación base, lo cual aumentaría a 10.682 ha para la configuración N°2C (embalse Chalinga), 11.216 ha para la configuración N°1C (embalse de

- cabecera Choapa), y 21.570 ha para la configuración N°3C (embalse Canelillo), lo cual implica aumentos promedio de 0,3%, 5,4% y 103%, respectivamente, al contrastar con la situación base.
2. Acorde con lo anterior, en la cuenca del río Choapa la variación que generarán las distintas configuraciones poseen órdenes de magnitud diferentes, y provocan cambios en distintos sectores de la cuenca. En el caso del embalse de cabecera Choapa se generan aumentos en el área regada en 9 sectores de riego ubicados en la zona intermedia de la cuenca, mientras que con el embalse Canelillo se afectan solo los sectores S27, S28 y S29.
 3. El embalse Chalinga genera aumentos del área regada en dos sectores de riego específicos (S13, Río Chalinga entre Quebrada Cunlagua y Río Choapa; y S14, El Tambo, Río Choapa abajo de Salamanca), sin embargo, también genera una disminución en otros dos sectores de riego ubicados en el río Chalinga) (S11, Zapallar, Río Chalinga arriba San Agustín; y S12, Río Chalinga entre San Agustín y Quebrada Cunlagua).
 4. Finalmente, respecto al embalse Canelillo, la configuración N°3B generaría beneficios importantes debido al potencial desarrollo de un nuevo sector de riego (S29, Litoral), también se disminuye el área regada en dos sectores de la parte baja del río Choapa (S27, Choapa entre Río Illapel y Estero Canela; y S28, Huentelauquén, Río Choapa abajo de Estero Canela).

A partir de los resultados obtenidos de la modelación de distintas configuraciones en la cuenca del río Huasco, se destaca lo siguiente:

1. En primer lugar, el análisis del total de áreas regadas en la cuenca del río Huasco alcanzaría en el periodo 2020 - 2050 el valor de 6.400 ha aprox. en los escenarios EFBH y EFHS, mientras que en el mismo periodo el escenario con cambio climático (EFCC) alcanza 5.981 ha, lo que constituye una disminución de 400 ha.
2. Los resultados para las configuraciones asociadas a la iniciativa del embalse de cabecera El Carmen muestran consistentemente aumentos del área regada para los tres escenarios climáticos, concentrándose en los sectores de riego S01-2 (El Rosario) y en los ubicados desde S04-2 hacia aguas abajo. El área nueva beneficiada varía entre 111 ha y 194 ha, dependiendo de la condición climática. El total de hectáreas cultivadas varía entre 6.510 ha aprox. para los escenarios sin cambio climático, y 6.175 ha en un escenario afectado por el calentamiento global
3. En el caso de la iniciativa embalse Huasco Bajo se observa que, debido a su ubicación, este embalse beneficia sólo al sector de riego S08 (Huasco Bajo), donde se observa que la nueva área regada varía entre 48 ha y 97 ha. El total de hectáreas regadas en la cuenca varía entre 6.092 ha a 6.488 ha, dependiendo del escenario climático considerado, siendo los valores menores observados para el escenario con cambio climático.

Es importante destacar que este trabajo es complementario al estudio “Modelo Hidro-Económico para Revisión y Actualización del Plan de Inversión en Iniciativas Hídricas” liderado por la consultora Rodhos

Asesorías y Proyectos. Ambos proyectos son parte de un trabajo mayor, el cual consta de un análisis hídrico, realizado por el INH, y correspondiente al presente estudio, y otro hidro-económico, realizado por Rodhos. En este sentido, los resultados hídricos del análisis de cuencas seleccionadas asociados a cada una de las iniciativas estudiadas debe ser complementado con el análisis económico de los beneficios de cada una de ellas, lo que permite tener una visión más completa para la toma de decisión respecto de la conveniencia de cada obra.

Finalmente, el desarrollo de este trabajo permite identificar elementos generales que son importantes de destacar. Las principales recomendaciones generales son las siguientes:

1. El estudio permite destacar que el modelo ofrece grandes oportunidades a futuro debido a la flexibilidad que tiene y su posibilidad de ser modificado de acuerdo a requerimientos específicos. Por otro lado, el Modelo pyMOS puede ser aplicado a diversas cuencas del país, y operado de forma rápida, lo cual sugiere que su aplicación puede ser de gran utilidad ante la necesidad de evaluar en forma preliminar diferentes proyectos de interés.
2. Con todo, el Instituto Nacional de Hidráulica recomienda continuar con el desarrollo de este modelo, de forma de mejorar su actual implementación y proyectarla hacia el futuro de forma que sea un aporte en la toma de decisiones de las autoridades.