



Fundación para la  
Innovación Agraria  
MINISTERIO DE AGRICULTURA

RESULTADOS Y LECCIONES EN

# Gestión hídrica del río Elqui para mejorar la eficiencia en el uso del agua



G E S T I Ó N

Proyecto de innovación en  
**Región de Coquimbo**







---

1 4 7

---





RESULTADOS Y LECCIONES EN

# Gestión hídrica del río Elqui para mejorar eficiencia en uso del agua



Proyecto de innovación en  
**Región de Coquimbo**

Valorización a diciembre de 2020



## Agradecimientos

En la realización de este trabajo agradecemos sinceramente la información y colaboración del equipo profesional de la Universidad de La Serena y de la Junta de Vigilancia del Río Elqui, vinculados al proyecto.

Resultados y lecciones en

### **Gestión hídrica del río Elqui para mejorar eficiencia del agua**

Proyecto de innovación en Región de Coquimbo

Serie **Experiencias de innovación para el emprendimiento agrario**

**FUNDACIÓN PARA LA INNOVACIÓN AGRARIA**

Santiago de Chile, diciembre 2020

Registro de Propiedad Intelectual N° 2021-A-3724

ISBN 978-956-328-264-1

ELABORACIÓN DEL DOCUMENTO

Sergio Lara Pulgar, médico veterinario y consultor.

REVISIÓN Y EDICIÓN TÉCNICA DEL DOCUMENTO

Gabriela Casanova, ingeniera agrónoma, Fundación para la Innovación Agraria

FOTOGRAFÍAS

• Sitio web de Junta de Vigilancia del Río Elqui y sus Afluentes

DISEÑO GRÁFICO Y EDICIÓN DE TEXTOS

Guillermo Feuerhake

Se autoriza la reproducción parcial de la información aquí contenida, siempre y cuando se cite esta publicación como fuente.

# Presentación

---

La Fundación para la Innovación Agraria (FIA) es la agencia del Ministerio de Agricultura orientada a promover la cultura de la innovación en el sector silvoagropecuario nacional. Para ello, la Fundación apoya con incentivos financieros, información, capacitación y redes para innovar.

Fundamental para que los productores puedan innovar es contar con información relevante para tomar decisiones que les permitan acercarse de manera plausible al éxito de las iniciativas que realicen. Por su parte, los proyectos e iniciativas que se desarrollan bajo el alero de FIA generan resultados que representan un gran caudal de valioso conocimiento para el sector silvoagropecuario nacional e internacional. Como toda innovación conlleva un riesgo, y tanto los resultados promisorios como aquellos de proyectos que no lograron alcanzar los objetivos esperados son puestos en valor por FIA, ya que ambos constituyen aprendizajes relevantes.

FIA desarrolló una metodología de valorización de resultados orientada a analizar la validez y potencial de aplicación de las experiencias, lecciones aprendidas y resultados de los proyectos al momento de su cierre. Es una metodología cercana a la de un estudio de viabilidad, compuesta de distintos análisis en los ámbitos comerciales, técnicos, de gestión, legal y/o financieros, dependiendo de la naturaleza del proyecto.

En este marco, el presente documento tiene el propósito de compartir con los actores del sector los resultados, experiencias y lecciones aprendidas del proyecto **“Diseño de un sistema de gestión hídrica para la Junta de Vigilancia del Río Elqui y sus Afluentes, para mejorar la eficiencia en el uso del recurso hídrico bajo escenarios de cambio climático”**. El objetivo de este proyecto fue desarrollar una herramienta de modelado hidrológico de la cuenca, bajo escenarios de cambio climático, que sirva como una base para las decisiones de gestión del recurso hídrico para la Junta de Vigilancia del Río Elqui y sus Afluentes.

Espero que la información contenida en este documento sirva como aprendizaje y se transforme en un insumo provechoso, especialmente para productores que buscan incorporar nuevas tecnologías en sus predios para incrementar la eficiencia y competitividad de sus sistemas productivos.

**Álvaro Eyzaguirre**  
Director Ejecutivo FIA



# Contenidos

---

Presentación .....	5
Introducción .....	9

---

<b>Sección 1. Resultados y lecciones aprendidas .....</b>	<b>11</b>
1. Antecedentes .....	12
1.1. El proyecto precursor .....	12
1.2. Cuenca hidrográfica del río Elqui .....	12
1.3. Gestión de los recursos hídricos .....	17
2. Base conceptual de la tecnología .....	21
2.1. Modelo hidrológico .....	21
2.2. Regla operacional .....	25
2.3. Plataforma de visualización y acceso al modelo.....	28
3. La innovación tecnológica .....	30
4. El valor de la herramienta desarrollada .....	30
5. Conveniencia económica para el productor.....	32
6. Factores clave de éxito y perspectivas futuras .....	37

---

<b>Sección 2. El proyecto precursor .....</b>	<b>39</b>
1. Características generales .....	39
2. Validación de la tecnología .....	41
3. La asesoría .....	56
4. Estado de ejecución actual.....	57

---

<b>Sección 3. El valor del proyecto precursor y aprendido .....</b>	<b>59</b>
---	-----------

---

<b>Sección 4. Anexos</b>	
1. Criterios regla de decisión antes y después del proyecto .....	62
2. Bibliografía consultada .....	66
3. Entrevistas realizadas .....	68



# Introducción

---

La presente publicación pone en valor los resultados del proyecto “Diseño de un sistema de gestión hídrica para la Junta de Vigilancia del Río Elqui y sus Afluentes, para mejorar la eficiencia en el uso del recurso hídrico bajo escenarios de cambio climático”, iniciativa que fue cofinanciada por FIA y ejecutado por el Laboratorio de Prospección, Monitoreo y Modelación de Recursos Agrícolas y Ambientales (PROMMRA), de la Universidad de La Serena, entre los años 2017 y 2020.

El presente documento está estructurado en tres secciones principales. La primera de ellas, “Resultados y lecciones aprendidas”, tiene como finalidad proveer una visión sistematizada del nuevo servicio o herramienta tecnológica que derivó de los resultados y aprendizajes generados en el proyecto ejecutado. En su desarrollo, esta visión contiene los elementos que permiten a los usuarios interesados apreciar si la opción responde a sus necesidades y permite mejorar o hacer más eficientes sus procesos productivos y de gestión.

La segunda sección consiste en la descripción del “Proyecto precursor”,<sup>1</sup> donde se ilustran las experiencias que condujeron a la validación y sistematización de la herramienta tecnológica evaluada, como forma de exponer el entorno, metodologías y aplicaciones prácticas que le dieron origen.

Finalmente, considerando el análisis realizado en la primera y segunda sección del documento, en una tercera, denominada “Valor del proyecto”, se resumen los aspectos más relevantes y determinantes del aprendizaje, para la viabilidad futura de la innovación realizada.

Se espera que esta información, sistematizada en la forma de una “innovación aprendida”,<sup>2</sup> aporte a los interesados elementos clave respecto de los beneficios del uso o incorporación de los nuevos servicios y herramientas tecnológicas desarrolladas.

---

<sup>1</sup> “**Proyecto precursor**”: proyecto de innovación a escala piloto financiado e impulsado por FIA, cuyos resultados fueron evaluados a través de la metodología de valorización de resultados desarrollada por la Fundación, análisis que permite configurar la innovación aprendida que se da a conocer en el presente documento. Los antecedentes del proyecto precursor se detallan en la Sección 2 de este documento.

<sup>2</sup> “**Innovación aprendida**”: análisis de los resultados de proyectos orientados a generar un nuevo servicio o herramienta tecnológica. Este análisis incorpora la información validada del proyecto precursor, las lecciones aprendidas durante su desarrollo, los aspectos que quedan por resolver y una evaluación de los beneficios económicos de su utilización en el sector.



# Resultados y lecciones aprendidas

El presente libro tiene el propósito de compartir con los actores del sector los resultados, experiencias y lecciones aprendidas sobre el desarrollo de un sistema de gestión hídrica para la Junta de Vigilancia del Río Elqui, a partir de un proyecto financiado por la Fundación para la Innovación Agraria, FIA, en la Región de Coquimbo. Se espera que la información sistematizada en este documento aporte a los interesados elementos técnicos y económicos relevantes para apoyar la toma de decisiones respecto del uso de este tipo de herramientas tecnológicas.



## ► 1. Antecedentes

### 1.1. El proyecto precursor

Los análisis y resultados que se presentan en este documento han sido desarrollados a partir de las experiencias y lecciones aprendidas de la ejecución de un proyecto financiado por FIA, denominado “Diseño de un sistema de gestión hídrica para la Junta de Vigilancia del Río Elqui y sus Afluentes, para mejorar la eficiencia en el uso del recurso hídrico bajo escenarios de cambio climático”. La finalidad de esta iniciativa fue desarrollar una herramienta de modelado hidrológico de la cuenca, bajo escenarios de cambio climático, que sirva como soporte para las decisiones de gestión del recurso hídrico que debe asumir la Junta de Vigilancia del Río Elqui y sus Afluentes.

El proyecto fue ejecutado por el Laboratorio de Prospección, Monitoreo y Modelación de Recursos Agrícolas y Ambientales (PROMMRA), dependiente del Departamento de Agronomía de la Facultad de Ciencias de la Universidad de La Serena, entre los años 2017 y 2020, en asociación con la Junta de Vigilancia del Río Elqui (en adelante, JVRE).

### 1.2. Cuenca hidrográfica del río Elqui

La hoya hidrográfica del río Elqui, que incluye las comunas de La Serena, Vicuña y Paihuano, corresponde a una de las tres cuencas principales que conforman la Región de Coquimbo, junto a las cuencas de los ríos Limarí y Choapa. En esta región, pese a su baja pluviometría, existen condiciones agrometeorológicas aptas para el desarrollo de la agricultura, que cumple un rol fundamental en el sistema social y productivo regional. Todas las actividades de la cuenca (agua potable, agricultura, industria) deben llevarse a cabo, en cuanto a sus requerimientos hídricos, con el aporte de agua que proveen las precipitaciones, pluviales o nivales, de por sí escasas y variables entre años. Esto implica acentuadas variabilidades en el régimen de escorrentía superficial de los cauces naturales que se encuentran en la cuenca, existiendo años secos proclives a generar sequías, como años lluviosos que recargan los sistemas hídricos, pero que también son proclives a experimentar crecidas y aluviones (Zavala y Trigos, 2008).

**Cuadro 1. Superficie de la cuenca y subcuencas del río Elqui**

Código	Nombre	Superficie (km <sup>2</sup> )
0430	Subcuenca río Turbio	4.156
0431	Subcuenca río Claro	1.523
0432	Subcuenca río Elqui Medio	1.738
0433	Subcuenca río Elqui Bajo	2.409
043	<b>Total cuenca río Elqui</b>	<b>9.826</b>

Fuente: Inventario Público de Cuentas, DGA.



La administración de los canales y derechos de agua de la totalidad de la cuenca del río Elqui está conformada por dos Juntas de Vigilancia. La que reúne mayor número de usuarios es la Junta de Vigilancia del Río Elqui (JVRE), que administra todos los canales de la cuenca, con excepción de aquellos ubicados en las subcuencas del río Derecho y de la Quebrada Paihuano, las que poseen potestad sobre el manejo de sus recursos hídricos y no tienen obligaciones de entregar flujos aguas abajo (Zavala y Trigos, 2008).

La infraestructura del sistema hídrico está formada por una extensa red de canales y dos embalses conectados entre sí: La Laguna y Puclaro.

### **Embalse La Laguna**

Fue el primer embalse construido para el riego en la provincia de Elqui, en el año 1929. Se ubica a 3.130 msnm, en la localidad de La Estancia. Se alimenta del río La Laguna, afluente del río Turbio. Una vez contenida, el agua es liberada para alimentar al río Elqui, del cual la toman los canales derivados. En la actualidad, posee la capacidad de embalsar aproximadamente 40 millones de m<sup>3</sup> de agua, que con la operación conjunta del embalse Puclaro son capaces de regar una superficie del orden de 18 mil hectáreas (sitio web JVRE).

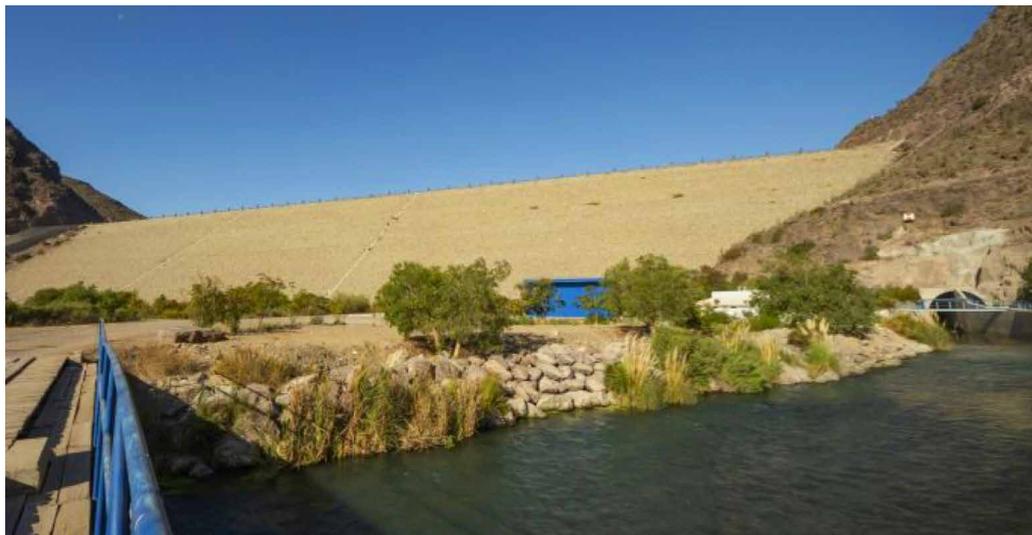


Embalse La Laguna. Fuente: [www.rioelqui.cl](http://www.rioelqui.cl)

### **Embalse Puclaro**

Ubicado a unos 50 km al oriente de la ciudad de La Serena, a 500 msnm. Fue construido en el año 2000, con el propósito de retener los recursos hídricos sobrantes escurridos hasta el mar y regular las cuencas ante la importante irregularidad de precipitaciones. Su localización aprovecha la angostura de la zona de Puclaro y sus características geológicas y estratégicas. La zona de inundación tiene 760 hectáreas, con longitud máxima de 7 km, y abarcó las localidades de Manchigue y Gualiguica, incluidas las bocatomas de los canales del mismo nombre y los canales Puclaro y Polvada, además de parte del sector de Punta Azul. Tiene una capacidad útil de 200 millones de m<sup>3</sup>, con una capacidad máxima de vertido es de 2.300 m<sup>3</sup>/s, capaz de absorber una crecida afluente de 2.500 m<sup>3</sup>/s. Esta obra es íntegramente revestida.

Su puesta en marcha significó más que duplicar el área regada. Por otra parte, desde el año 2008 opera la Hidroeléctrica Puclaro, que ha producido anualmente en promedio 30 millones de kilowatt/hora de electricidad, de los cuales 23 KV son inyectados a la red de distribución de CONAFE, abasteciendo cerca de 12 mil viviendas (sitio web JVRE).



Embalse Puclaro. Fuente: [www.riodelqui.cl](http://www.riodelqui.cl)

### **Actividad agrícola y ganadera**

La actividad silvoagropecuaria en la Región de Coquimbo está representada principalmente por la pequeña ganadería (caprinos y en menor medida ovinos), fruticultura, vides y hortalizas. De acuerdo al Catastro Frutícola de 2018, en la región hay 27.177,8 hectáreas dedicadas a fruticultura, con 1.770 explotaciones, y un 93,3 % de la superficie frutícola bajo riego por goteo.

En la Provincia de Elqui se registran 279 explotaciones con actividad frutícola, en un total de 6.530 hectáreas. El 46% de las explotaciones en la provincia tiene entre 5 y 50 hectáreas, agrupando el 16% de la superficie, mientras que el 22% de las explotaciones supera las 50 hectáreas y concentra el 82% de la superficie.

A nivel regional la vid de mesa ocupa la mayor superficie, seguida del palto, olivo y mandarina. Se destacan otras especies como el chirimoyo, granado, papayo y pecana, que sin tener grandes superficies, representan una proporción importante del total nacional. En las comunas que abarca la cuenca del Elqui (La Serena, Vicuña y Paihuano) predomina también la vid de mesa, con 2.628 hectáreas, seguida por el mandarina y palto.

**Cuadro 2. Cultivos frutícolas destacados en la Región de Coquimbo (2018)**

Especie	Superficie (ha)	% Superficie frutícola regional	% Superficie frutícola nacional	Producción (ton)	Destino principal
Vid de mesa	8.158,97	30,0%	17,1%	139.492	70% exportación
Palto	3.983,19	14,7%	13,6%	45.133	50% exportación
Olivo	3.904,57	14,4%	17,6%	26.720	97% agroindustria
Mandarino	3.783,80	13,9%	49,2%	70.001	77% exportación
Chirimoyo	284,96	1,0%	62,9%	3.734	80% mercado interno
Granado	284,37	1,0%	41,2%	1.985	60% exportación
Papayo	110,63	0,4%	79,6%	200	69% mercado interno
Pecana	11,37	0,0%	66,5%	20	100% mercado interno

Fuente: CIREN-ODEPA 2018.

**Cuadro 3. Cultivos frutícolas en las comunas de la cuenca del río Elqui (2018)**

Especie	Superficie (ha)
Vid de mesa	2.628,8
Mandarino	716,3
Palto	360,8
Limonero	202,3
Naranja	166,1
Granado	144,0
Chirimoyo	115,0
Nogal	84,3
Papayo	67,9
Arándano americano	58,6
Tuna	12,6
Membrillo	2,2
Ciruelo japonés	2,1
Pecana	0,6
<b>Total</b>	<b>4.561,6</b>

Fuente: CIREN-ODEPA 2018.

Otro cultivo de gran importancia en la región es la uva pisquera, que con más de 8.600 hectáreas y 1.923 propietarios representa el 94 % de la superficie nacional y 93 % de las propiedades en ese rubro. En la cuenca del Elqui se ubica el 13 % de la superficie de vid pisquera y vinífera, siendo el promedio de superficie predial inferior al promedio regional.

**Cuadro 4. Catastro plantaciones vides Región de Coquimbo (2018)**

Territorio	Superficie (ha)					N° propiedades		
	Vid vinífera blanca	Vid vinífera tinta	Vid vinífera	Vid pisquera	Total vides	Vid vinífera	Vid pisquera	Total
Región de Coquimbo	1.783,6	1.395,7	3.179,2	8.619,6	11.798,9	214	1.923	2.137
Comunas Cuenca Elqui	202,8	222,9	425,8	1.127,9	1.553,6	48	308	356

Fuente: SAG 2018.

La superficie hortícola regional alcanzó el año 2019 a 10.281,4 hectáreas, según Encuesta Hortícola de INE. Se destacan la lechuga con 1.963,5 ha, alcachofa con 879,2 ha y poroto verde con 778,3 ha, que representan el 30%, 61% y 30% del total nacional de cada especie, respectivamente.

Los cultivos anuales tienen una menor importancia relativa, alcanzando un total de 1.738 hectáreas, de las cuales 1.633 ha corresponden al cultivo de papa (estimación de ODEPA para temporada 2019/2020).

### 1.3. Gestión de los recursos hídricos

La cuenca hidrográfica, sea en forma independiente o interconectada con otras, es reconocida como la unidad territorial más adecuada para la gestión integrada de los recursos hídricos, aunque frecuentemente su delimitación funcional no coincide con los límites político-administrativos, lo que genera conflictos en su gestión. Además, normalmente la gestión del agua se fragmenta por sectores responsables de su control y aprovechamiento, por tipos de usos, por la fuente donde se capta y otros criterios similares (Dourojeanni *et al*, 2002).

Si bien existen diversas definiciones conceptuales, y dentro de un campo más amplio de manejo de cuencas, la gestión del uso del agua es un proceso que requiere controlar el ciclo de un recurso natural que se manifiesta en forma errática o aleatoria en un determinado espacio y a lo largo del tiempo. El proceso de gestión del agua es, esencialmente, un problema de solución de conflictos entre los diferentes usuarios, y entre los usuarios y el entorno. Al ser un recurso compartido, los múltiples usuarios, aunque cuenten con concesiones o derechos de uso, no dejan de afectarse mutuamente y de ser interdependientes. La oferta proviene, usualmente, de un sistema común, y a él retornan los excedentes de uso y los efluentes. Las aguas superficiales, subterráneas y atmosféricas, así como las zonas de evacuación, forman de este modo una sola unidad. De ahí la importancia de disponer de mecanismos permanentes y coordinados de gestión del recurso hídrico (Dourojeanni, 1994).

La diversidad de usos y usuarios es uno de los aspectos claves de la gestión hídrica, puesto que, como es propio de un recurso finito, las demandas suelen ser superiores a la oferta, especialmente en zonas de escasez hídrica permanente. En el cuadro siguiente se presenta la demanda estimada en la cuenca del río Elqui para los distintos usos.

**Cuadro 5. Estimación de demanda hídrica en cuenca y subcuencas del río Elqui (2015)**

Subcuenca	Demanda consuntiva (Mm <sup>3</sup> /año)							Demanda no consuntiva (Mm <sup>3</sup> /año)		
	Agua potable urbana	Agua potable rural	Agrícola	Pecuaría	Minería	Industrial	Total	Acuícola	Eléctrica	Total
Río Turbio	0	108	5.378	3	0	0	5.489	0	0	0
Río Claro	123	183	8.841	26	0	0	9.172	0	0	0
Elqui Medio	1.005	477	27.932	16	538	37	30.005	154	121.430	121.584
Elqui Bajo	8.879	512	26.967	112	11.372	0	47.842	0	0	0
<b>Total cuenca</b>	<b>10.007</b>	<b>1.280</b>	<b>69.118</b>	<b>157</b>	<b>11.910</b>	<b>37</b>	<b>92.508</b>	<b>154</b>	<b>121.430</b>	<b>121.584</b>

Fuente: DGA 2017.

Las estimaciones de especialistas indican que en el Elqui la oferta hídrica es capaz de satisfacer aproximadamente el 77% de la demanda, esperándose que este valor se reduzca en el futuro, especialmente ante un escenario de cambio climático. La brecha entre oferta y demanda puede ser amortiguada mediante obras de acumulación y diversas medidas de eficiencia en la conducción y riego, para reducir pérdidas (Álvarez y Norambuena, 2017).

En relación a la gestión de las aguas, el régimen jurídico chileno determina que las tareas de medición, investigación y administración de la asignación originaria de recursos hídricos (otorgamiento de derechos de aprovechamiento de aguas) recaen en la Dirección General de Aguas (DGA), dependiente del Ministerio de Obras Públicas (MOP). No obstante, una vez que los derechos de aprovechamiento han sido asignados, son los particulares quienes adquieren un rol fundamental en la gestión del recurso, destacándose la tarea que realizan las Juntas de Vigilancia, encargadas por ley de la administración y distribución de las aguas que escurren por los cauces naturales, y las Asociaciones de Canalistas y Comunidades de Agua.

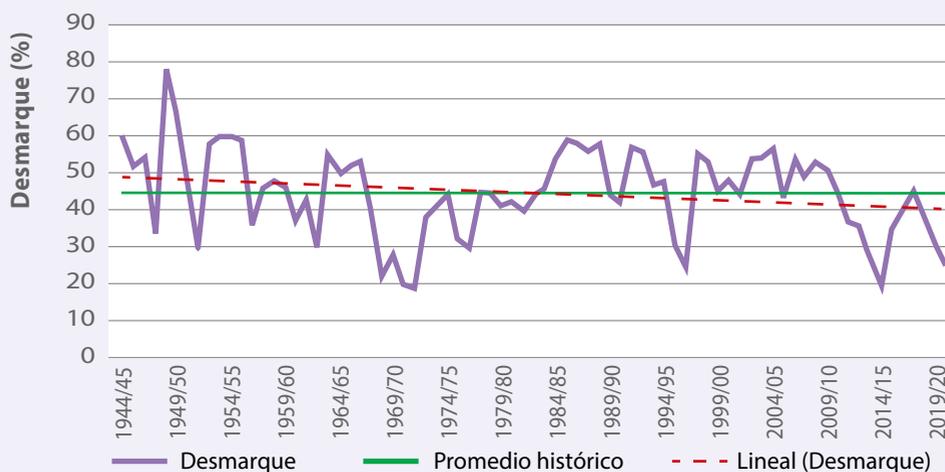
En la cuenca del río Elqui, el organismo de administración más relevante es la Junta de Vigilancia del Río Elqui (JVRE). Su constitución como Junta de Vigilancia data de 1993, en reemplazo de la Asociación de Canalistas del río Coquimbo. Mantiene su objetivo de administrar y distribuir las aguas a que tienen derecho sus miembros y/o accionistas, así como explotar y conservar las obras de aprovechamiento común. Actualmente posee bajo su jurisdicción más de 120 canales, los que suman aproximadamente 800 km de largo, y más de 23 captaciones en el río por medio de elevación mecánica. Sus accionistas corresponden a 5.288 usuarios aproximadamente. La organización se encuentra en proceso de reemplazo de las compuertas tradicionales por compuertas automatizadas y con telemetría, para lograr mayor eficiencia y equidad en la distribución del agua hacia los canales de riego.

La JVRE está encargada de administrar y distribuir el agua generada por la cuenca, en un periodo de 12 meses, comenzando desde septiembre hasta agosto del siguiente año, realizando la asignación de agua en función a un desmarque (%) que se fija en un inicio. La tasa de desmarque corresponde a la asignación hídrica real a partir del derecho nominal. A modo de ejemplo, una acción corresponde a un litro por segundo en la bocatoma del canal correspondiente, esto equivale a un 100 % de desmarque. Si el desmarque corresponde al 50 %, entonces implica que se distribuye 0,5 litros/segundo/acción en la bocatoma de cada canal. Este concepto se utiliza en el Elqui desde hace un siglo, y refleja el propósito de asegurar que todos los usuarios reciban lo que les corresponde de acuerdo con el agua disponible, especialmente en periodos de escasez.

La definición de desmarque se basa en determinar o estimar la oferta hídrica disponible para los siguientes 12 meses, tanto de sus obras de acumulación superficial (embalses Puclaro y La Laguna), como de la escorrentía generada por la cuenca a través de ríos y quebradas. Sumado a esto, existe una planificación de distribución basada en criterios técnicos y una visión de las próximas dos temporadas. El equipo técnico de la JVRE, especialmente el Ingeniero Repartidor de Aguas, estudia e integra los distintos factores para proponer al Directorio una o más alternativas de desmarque. Posteriormente, y habiendo un acuerdo de directorio, se presenta a la Asamblea el valor de desmarque para la temporada. El desmarque se mantiene invariable a lo largo de la temporada, y aunque pueden hacerse variaciones mensuales de acuerdo a la oferta y demanda, el resultado final siempre debe ajustarse al valor establecido.

Los valores de desmarque reflejan la condición hidrometeorológica de la cuenca, observándose una tendencia general a la reducción. En el gráfico siguiente puede observarse la sostenida caída en el periodo 2010-2014, asociada a la intensa sequía, donde en el 2014/2015 se alcanzó un mínimo histórico de 20% de desmarque.

Figura 2. Tasa de desmarque histórica aplicada por JVRE



Fuente: elaboración propia en base a proyecto precursor.



La decisión del desmarque está basada en una serie de criterios cuantitativos, que en conjunto constituyen la “regla de operación” del sistema. Existen dos componentes esenciales para la generación de la regla operacional: por una parte, estimar la generación hídrica de la cuenca durante la temporada, dato que cuenta con una incertidumbre hidrológica provocada por los deshielos en los meses estivales y una incertidumbre meteorológica del invierno del próximo año; y como segundo componente se encuentra la distribución propiamente tal, que se realiza a partir del valor de desmarque y cómo se gestiona en conjunto con las obras de almacenamiento y herramientas de monitoreo.

Hasta el año 2012 se mantenía como criterio que el embalse Puclaro, al término de la temporada, debía almacenar el 50% del volumen con que se inició. Sin embargo, a partir de ese año el criterio fue modificado, definiendo que el volumen almacenado al 31 de agosto debe fluctuar entre 70 a 100 Mm<sup>3</sup>, situación que fue gatillada por la sequía vivida en los años 2010-2015. De esta manera, manteniendo esos volúmenes al término de una temporada, se espera generar una menor incertidumbre en la asignación del siguiente periodo.

Otro criterio utilizado en la toma de decisión es que el desmarque debería fluctuar entre 25% y 50% para satisfacer la demanda de la cuenca considerando la capacidad de porteo de sus canales. Un desmarque bajo el 25% es considerado deficiente, ya que el sistema por sí mismo genera ese volumen con 85% de excedencia,<sup>3</sup> por lo tanto, un desmarque inferior sería equivalente a no hacer ninguna gestión de los embalses. Cabe destacar que estos criterios no necesariamente son compartidos por todos los regantes, ya que de acuerdo a encuestas realizadas en el proyecto precursor los usuarios de la parte baja de la cuenca consideran satisfactorio un desmarque del 45%, mientras que en la parte alta de la cuenca un 30% resulta satisfactorio para la demanda hídrica.

<sup>3</sup> Probabilidad de excedencia hidrológica. Es una medida probabilística basada en datos de una serie histórica, que permite distinguir las características hidrológicas de una cuenca. Es decir, es el valor que indica en el porcentaje en el que los datos históricos registrados son iguales o mayores al que corresponde a dicho valor.

## ► 2. Base conceptual de la tecnología

---

### 2.1. Modelo hidrológico

---

La herramienta desarrollada en el proyecto precursor se basa en el modelamiento hidrológico de aguas, incorporando una serie de variables hidroclimáticas, decisiones de gestión y proyección de escenarios de cambio climático.

Los modelos hidrológicos son herramientas útiles para la comprensión del funcionamiento de una cuenca; en términos simples analizan los procesos de conversión de la precipitación en escorrentía y la capacidad del agua para transportar sustancias. Su aplicación es común en la previsión de la alarma temprana de riesgos de crecidas e inundaciones, gestión de cuencas, riego agrícola, diseño de infraestructuras como canales y presas, y estudios de impacto del cambio climático, entre otros.

Se puede definir *modelo* como una representación simplificada del mundo real o de un sistema complejo, bajo ciertos límites espaciales y temporales. En este caso, el sistema hidrológico es un sistema complejo, limitado por una zona geográfica determinada y circunscrita a las aguas superficiales o subterráneas, según el caso. La precipitación es la entrada al sistema, el caudal es la salida, y es el resultante de la interacción de los distintos planos dentro de los límites de la cuenca. La evaporación y el flujo subterráneo también son salidas, pero si no intervienen como componentes que contribuyen al caudal modelado, se consideran pérdidas que escapan de los límites de la cuenca (Pascual y Díaz, 2016).

Los modelos hidrológicos han ido evolucionando; los de última generación se definen por ser “integradores”, entendiendo esto como un enfoque del modelado con el que se pretende incorporar información diversa y con el mayor detalle de representación del medio que se modela.

Para el modelamiento hay diversas herramientas computacionales, siendo una de ellas el sistema WEAP (*Water Evaluation and Planning*) utilizado en el proyecto. Este software para la planificación integrada de recursos hídricos fue desarrollado por el Stockholm Environment Institute y el Tellus Institute. Proporciona un marco flexible y de fácil uso para la planificación del recurso hídrico y análisis de escenarios. 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 (DGA 2018).



Su uso permite analizar un amplio rango de temas e incertidumbres a las que se ven enfrentados los planificadores de recursos hídricos, incluyendo aquellos relacionados con el clima, condiciones físicas de la cuenca, proyecciones de demanda, regulaciones, objetivos de operación e infraestructura disponible. Habitualmente se introducen variables climáticas e incluyen 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 (cambios en la precipitación proyectados) y demanda de agua (como variación del área de los cultivos), y cómo estos cambios convergen en un balance de agua diferente al correspondiente al escenario base o actual. 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.

Las características de este software, por lo tanto, responden perfectamente a lo requerido por el proyecto: modelo de generación de agua, reglas operacionales de administración, escenarios de cambio climático y demandas de uso.

WEAP posee una interfaz gráfica basada en SIG (Sistema de Información Geográfico), a partir de la cual el usuario puede diseñar el modelo esquemático sobreponiendo los componentes del sistema (ríos, nodos de demanda, nodos de entrada, embalses, etc.). Se configura a través de la topología, que corresponde a los nodos, tanto de oferta como de demanda, y la interacción entre ellos. El sistema WEAP ya había sido aplicado en el modelamiento del río Elqui, por lo cual el equipo ejecutor revisó y ajustó la configuración, estructura y calibración del modelo, incorporando nuevos elementos.

De acuerdo a la nomenclatura utilizada por Pascual y Díaz, el desarrollo del modelamiento se puede dividir en etapas:

1. **Modelo perceptual:** se basa en la comprensión por parte del equipo sobre la unidad hidrológica a representar. Esto incluye la realización de reuniones y entrevistas con la directiva de la JVRE y usuarios, así como el análisis de información y trabajos anteriores.

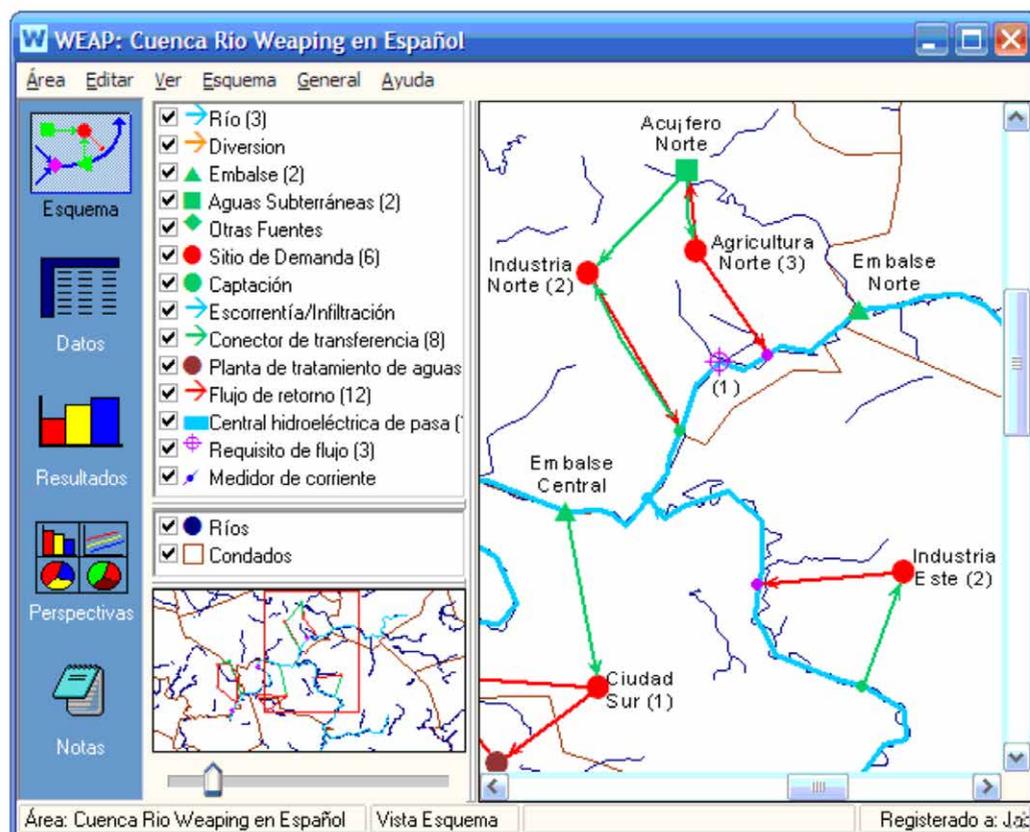
En esto tiene gran valor la experiencia del equipo ejecutor en el río Elqui y el profundo conocimiento del equipo de la JVRE.

2. **Modelo conceptual:** una vez analizado y comprendido el funcionamiento de los distintos componentes del sistema por medio del modelo perceptual, se formulan las ecuaciones matemáticas para definir los límites del sistema, sus entradas, las variables de estado, las salidas, las conexiones y flujos de los componentes del sistema. En esta etapa es muy relevante la traducción de la regla operacional vigente a ecuaciones matemáticas que pudieran ser modeladas.
3. **Resolución del modelo:** programación de software, introducción de datos y obtención de resultados.
4. **Calibración del modelo:** consiste en la mejora selectiva de los parámetros iniciales del modelo de manera que este se aproxime con mayor verosimilitud a la realidad. Eso se realizó mediante la comparación entre las variables hidroclimáticas medidas y las obtenidas con el modelo, mediante índices de bondad del ajuste. Este es un proceso iterativo donde se van seleccionando las mejores formulaciones.
5. **Validación del modelo:** consiste en la comprobación, una vez calibrado, de que el modelo funciona correctamente de acuerdo a los fines para los que ha sido desarrollado. Es decir, se comprueba que los resultados son razonables, que puede ser utilizado sin problemas por el equipo ejecutor y por el equipo de la JVRE, tanto en la comprensión de su funcionamiento como por los requerimientos de información para su funcionalidad.

El modelo se configura inicialmente a través de la topología, que corresponde a los nodos, tanto de oferta como de los distintos tipos de demanda, y la interacción entre ellos.

- **Nodos de oferta:** puntos dentro de la cuenca y del modelo definidos como aportantes o generadores de caudales. Se definieron como puntos de análisis los ríos y sus derivaciones (aportes naturales, ríos y canales) y acuíferos. A partir de estos nodos de oferta se definen las formas de flujo, que indican la manera en que se mueve el agua dentro de la cuenca, entre las fuentes de abastecimiento y las fuentes de demanda, asignando también una prioridad a la demanda de las zonas.
- **Nodos de demanda:** en estos puntos se estiman las demandas individuales de cada zona de riego, de los canales, de captaciones superficiales, la demanda por evapotranspiración, la demanda en subcuencas aportantes, la demanda evapotranspirativa de embalses y los caudales requeridos por los embalses, asignando con esto una prioridad a cada uno de estos sitios de demanda.

Figura 3. Vista de esquema para configuración de topología en WEAP



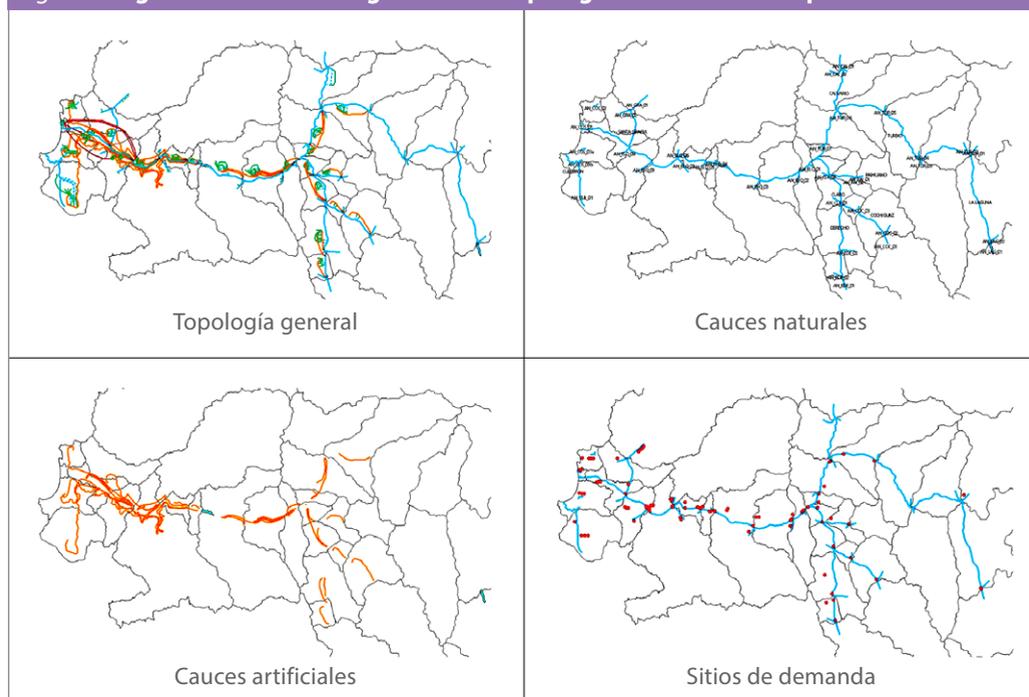
Fuente: [www.weap21.org](http://www.weap21.org)

Otros elementos que deben ser ingresados al sistema son:

- **Inputs:** corresponden a datos base que permiten que el modelo genere resultados a partir de la información disponible para cada uno de los nodos, y que corresponden a los tramos de río, zonas de riego, canales, embalses, acuíferos, sitios de demanda, puntos de infiltración, zonas de derrames, enlaces de transmisión de caudal, flujo de retorno y puntos de control histórico de caudales. Con estos datos se representan todos aquellos puntos que generan demanda de agua.
- **Key Assumptions o Supuestos claves**, que corresponden a la entrada directa de la información en el modelo, en donde se configuran los datos de entrada, los criterios de priorización de los nodos y puntos de demanda, y de las fórmulas generales que configuran la entrada de estos al modelo WEAP. Se encuentran en este grupo:
  - reglas de canales
  - coeficientes de cultivo
  - evapotranspiración potencial
  - precipitación agronómica efectiva

- eficiencia de riego
- acuíferos
- canales
- parámetros de calibración
- factores de uso
- embalses

**Figura 4. Algunas vistas de configuración de topología cuenca del río Elqui Modelo WEAP**



Fuente: proyecto precursor

El modelo incorpora un escenario de cambio climático, con un conjunto de valores proyectados de temperatura, precipitación, y cómo estos factores influyen en la generación de agua, en las demandas y en los demás componentes del sistema.

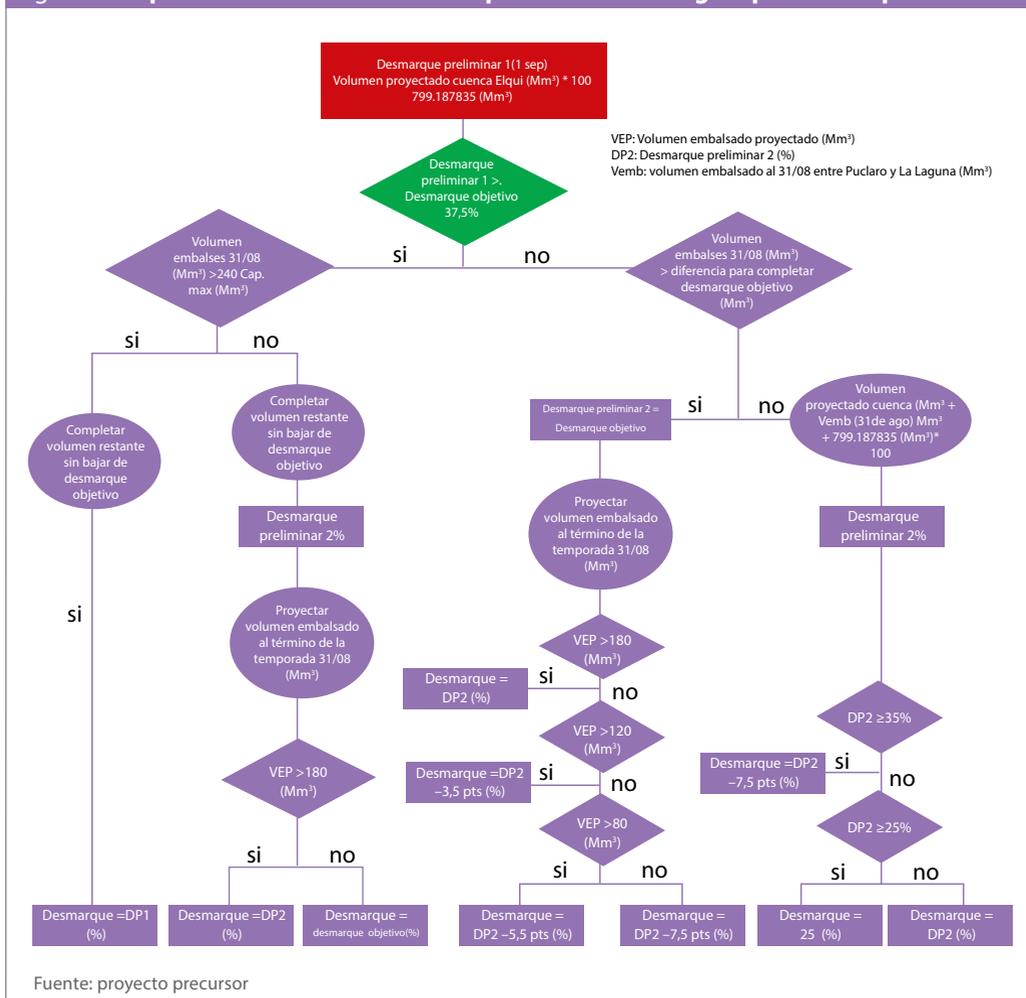
## 2.2. Regla operacional

Una regla operacional es un conjunto de criterios, cuyo análisis permite gestionar la asignación y distribución de las aguas, con el fin de maximizar la entrega del recurso hídrico a todas las comunidades de aguas pertenecientes a una organización. Todos estos criterios que ya eran utilizados por la JVRE fueron analizados, sistematizados y convertidos en ecuaciones y algoritmos que fueron incorporados al modelo como “supuestos clave”.

Una vez obtenida la proyección de la oferta hídrica para la temporada de asignación mediante distintos métodos, el sistema aplica la regla operacional para cada uno de los valores. La regla de operación se aplica por medio de un árbol de decisión binario.



Figura 5. Esquema del árbol de decisión que establece la regla operacional para la JVRE



Los criterios utilizados son:

- Desmarque con 85 % de probabilidad de excedencia.
- Desmarque mínimo de la serie modelada.
- Promedio del 15 % de los desmarques más bajos.
- Número de temporadas con desmarque inferior al 20 % o “falla del sistema”.
- Número de temporadas con desmarques superiores o iguales al 50 %.
- Número de temporadas con desmarques superiores o iguales al 35 % e inferiores al 50 %.
- Número de temporadas con desmarques superiores al 20 % e inferiores al 35 %.
- Número de temporadas con desmarques superiores al 20 %.
- Número de meses con rebose (rebase) del embalse Puclaro.

Al introducir estos criterios y los *inputs* de información base, el software realiza una serie de cálculos internos que dan como resultado propuestas de tasa de desmarque ajustadas a los criterios definidos.

### 2.3. Plataforma de visualización y acceso al modelo

El modelo WEAP se encuentra alojado en la plataforma informática GESHI, diseñada para el proyecto e instalada en los servidores de la JVRE, con una réplica instalada en los equipos de la Universidad de La Serena como respaldo en caso de falla.

La plataforma es de acceso privado y restringido, teniendo acceso sólo los miembros del directorio, el ingeniero Subdelegado, y el Gerente Repartidor de Aguas, administrador responsable de la plataforma.

A través de este sistema se ingresan los datos, se hacen correr las rutinas del modelo y se obtienen las tasas de desmarque propuestas para la temporada.

**Figura 6. Menú de módulos de la plataforma de gestión hídrica**

Junta de Vigilancia  
**RÍO ELQUI**  
y sus Afluentes

PLATAFORMA DE APOYO PARA LA GESTIÓN HÍDRICA DEL  
RÍO ELQUI Y SUS AFLUENTES

**Estimador de Desmarque**  
Implementación Online de la Regla Operacional de desmarque para la JVRE.  
INGRESAR

**Gráficos Históricos**  
Visualización de precipitaciones, caudales y situaciones de los embalses a lo largo del tiempo.  
INGRESAR

**Monitor de Compuertas**  
Monitoreo en tiempo real y lecturas históricas de caudal de Compuertas RUBICON.  
INGRESAR

Fuente: proyecto precursor.

Figura 7. Menú de ingreso información meteorológica de plataforma de gestión hídrica

<< VOLVER A MÓDULOS
Bienvenido(a) Alex Salir

ARBOL METEOROLOGICO
ARBOL HIDROLOGICO
ARBOL HIDROMET
REGLA OPERACIONAL

Variables Meteorológicas
Paso 1

Variables Hidrológicas
Paso 2

**Datos Embalse La Laguna**

Precipitación equivalente acumulada [mm]

Estación JVRE ?

Altura de nieve [cm]

Estación JVRE ?

**Datos Precipitación Acumulada de la temporada 2019/20 [mm]**

Estación Cochiguaz (DGA) ?

Estación La Ortiga (DGA) ?

Estación Pisco Elqui (CEAZA) ? !

Precipitación Equivalente acumulada [mmH2O] en estación La Laguna embalse

Años

● Precipitación Equivalente

Fuente: proyecto precursor.



### ► 3. La innovación tecnológica

---

El software de modelamiento hidrológico WEAP es usado ampliamente en el mundo. En nuestro país se ha aplicado en estudios de modelamiento de cuencas y sistemas hidrológicos con diversos fines. Entre otros, se puede citar que actualmente se encuentran en proceso de diseño los planes de gestión estratégica de cuencas, iniciativa conducida por la DGA y que se aplica en las cuencas de los ríos Maule, Copiapó, Choapa, Limarí, Elqui, Huasco, Maipo, Aconcagua, Loa, Quilimarí y Petorca.

El carácter innovador del proyecto dice relación con dos aspectos centrales que en Chile no se han aplicado de forma sistemática para un sistema hídrico: el modelamiento en escenario de cambio climático, y la incorporación de la regla operacional como parte del modelamiento.

El primero de ellos responde a la necesidad de reconocer el cambio climático como una condición absolutamente presente en la actualidad y que será aún más gravitante en el futuro. El hecho de adoptar un escenario concreto de cambio climático, con todas las variables asociadas, e incorporarlo dentro del modelamiento hidrológico, permite que la gestión de la cuenca lleve internalizada esta condición *ex ante*, es decir, que todas las decisiones de gestión basadas en el modelo asumen que el escenario de cambio climático es una realidad.

El segundo elemento es inédito en Chile, pues no se tiene antecedentes de que las reglas operacionales en uso en los sistemas hídricos regulados hayan sido modeladas e integradas como un componente del sistema. Esta labor implicó un detallado y avanzado conocimiento del funcionamiento de la cuenca y de la forma en que la administración toma sus decisiones, para luego realizar una transformación de estos criterios a una programación matemática e informática.

### ► 4. El valor de la herramienta desarrollada

---

La herramienta tecnológica realiza un aporte muy significativo a la forma en que la JVRE toma sus decisiones sobre la gestión del recurso hídrico. La decisión sobre la tasa de desmarque se realiza cada temporada con un alto grado de incertidumbre, ya que se debe distribuir entre los usuarios un volumen total de agua que al momento de la decisión se desconoce en gran parte. Este cálculo del agua a generar por la cuenca se estimaba mediante correlaciones entre los datos disponibles, tales como altura de nieve y precipitaciones ocurridas hasta la fecha, entre otros, sumado a la apreciación de imágenes satelitales de la cobertura de nieve y su posible comportamiento en los meses siguientes. Con estos antecedentes, y la revisión de

antecedentes hidrológicos históricos, bajo un panorama hidroclimático similar, se realizaba una estimación del total de agua de la cuenca en la temporada, su comportamiento mensual, y, por ende, el desmarque.

Los datos existentes eran ponderados mediante una serie de criterios técnicos, con una alta dependencia del conocimiento, la experiencia y la ponderación que hicieran de ellos los especialistas de la JVRE. Con la implementación del modelo, estos mismos criterios (en conjunto con otras variables) fueron sistematizados y convertidos en un algoritmo matemático, donde se integra un gran volumen de información que es procesada en forma automática.

Por lo tanto, si bien la decisión sigue recayendo en los especialistas de la JVRE, se cuenta ahora con un respaldo metodológico que robustece mucho más las decisiones, basándose no solo en valores históricos, sino que en la proyección hacia escenarios futuros. Por una parte, esto es una gran contribución para adoptar mejores decisiones técnicas, y por otra parte aporta mayor transparencia a la gestión, ya que hace explícitos y públicos los mecanismos de análisis. La confianza de los usuarios es clave para una buena gobernanza de la organización, más aún si está respaldada por una universidad regional pública de gran prestigio.

Como consecuencia de lo anterior, la adopción de decisiones difíciles, como una tasa de desmarque por debajo de las expectativas de los usuarios, es aceptada y respetada en forma mayoritaria.

En general, una buena gestión de los recursos hídricos, especialmente en lo que se refiere a la distribución justa del recurso entre los usuarios, permite atender las distintas demandas de uso con un criterio de sustentabilidad de largo plazo. Una distribución por sobre la capacidad real de generación de agua en la cuenca puede generar beneficios en la presente temporada (mayor volumen de agua para riego), pero comprometer la disponibilidad de agua de las temporadas siguientes. Esto no resulta conveniente desde el punto de vista de las inversiones y la estabilidad de la actividad agrícola, ya que las disminuciones marcadas de agua disponible entre temporadas tienen consecuencias muy negativas. Por el contrario, distribuir menos agua de la que la cuenca es capaz de producir restringe de forma innecesaria el agua de riego, afectando la productividad y competitividad del sector.

En términos sociales, garantizar un uso sustentable del recurso hídrico permite el acceso oportuno al recurso de los demás demandantes, incluyendo los sistemas de agua potable rural, las plantas de potabilización de las empresas sanitarias que atienden a las ciudades de la región, la generación eléctrica, y otros usos industriales y comerciales que se vinculan con innumerables actividades generadoras de empleo y recursos para la región.

## ► 5. Conveniencia económica para el productor

---

La plataforma diseñada y puesta en marcha en la Junta de Vigilancia del Río Elqui no supone costos de mantención ni recursos humanos adicionales para su operación, puesto que puede ser actualizada y manejada por el propio equipo de la organización. Además se cuenta con acompañamiento de los especialistas de la Universidad de La Serena, como parte de una relación estratégica permanente, por lo cual no hay costos incrementales por asesoría. En consecuencia, no existe para los usuarios algún costo adicional por contar con la plataforma funcional.

Los beneficios asociados al uso de la plataforma son de carácter indirecto y se relacionan con una adecuada gestión del recurso hídrico. Considerando el volumen de la cuenca del río Elqui, cada punto porcentual de desmarque equivale aproximadamente a 8 millones de m<sup>3</sup>, que valorados a \$800/m<sup>3</sup> equivalen a \$6.400 millones. Esto da una imagen de la magnitud económica de la decisión y del valor patrimonial del agua.

Es evidente que contar con este sistema no reduce las probabilidades de experimentar una sequía por condiciones meteorológicas, pero sí permite tomar medidas apropiadas para amortiguar los efectos de esta condición sobre los usuarios, manejando el recurso escaso de forma racional. Considerando que se trata de una cuenca con un alto volumen relativo de agua embalsada, el agua disponible en los puntos de demanda depende directamente de la gestión que haga la Junta de Vigilancia, básicamente a través del manejo de los embalses y el desmarque. Por lo tanto, sí es posible afirmar que una adecuada gestión, apoyada por la plataforma de modelamiento hidrológico, permite aminorar los impactos productivos y económicos de la sequía en el largo plazo.

La Región de Coquimbo experimenta desde la temporada 2010/2011 una sequía prácticamente ininterrumpida, especialmente hasta la temporada 2014/2015. Esta situación llevó a que en el año 2014 el Gobierno Regional de Coquimbo decretara el plan “Emergencia por Escasez Hídrica Región de Coquimbo 2014”, con un presupuesto total de \$21.240 millones, con foco en la población rural más vulnerable. Este plan se estructuró en 3 ejes:

- Mejorar el abastecimiento de agua para consumo humano: \$7.528 millones.
- Entregar apoyo social: \$5.151 millones.
- Entregar apoyo a las actividades productivas: \$8.561 millones.

En aquella oportunidad, la asociación gremial Sociedad Agrícola del Norte elaboró un estudio sobre los impactos de la sequía en el sector agrícola de la Región de Coquimbo. Las conclusiones de ese estudio fueron lapidarias, y pueden resumirse en los siguientes puntos:

- La Provincia de Elqui contaba con 26.518 hectáreas bajo riego, de las cuales un 41% dejaron de ser regadas por falta de agua.
- La Provincia de Limarí contaba con 71.462 hectáreas bajo riego (la mitad de la superficie regional bajo riego), un 73 % de las cuales dejaron de ser regadas.
- La Provincia de Choapa contaba con 22.806 hectáreas bajo riego, un 45 % de las cuales dejaron de ser regadas
- Sectores como Cogotí, Huatulame, Punitaqui y Pama dejaron de regar sus cultivos hasta su secado total, ya que la dotación hídrica era nula.
- En la temporada 2015, la productividad en el Valle de Elqui alcanzó en promedio un 55% de un año normal, en Limarí sólo llegó al 20% y en Choapa al 45 %.
- Las cooperativas pisqueras, tan relevantes para la región, disminuyeron su producción de uva en un 50 %, afectando con ello a más de 2.400 pequeños productores de no más de 5 hectáreas. El rubro más perjudicado por la sequía fue la fruticultura, donde se tomaron medidas de emergencia como podas severas (“a tocón”) en paltos, riegos de supervivencia y, en casos más extremos, se dejaron secar cuarteles completos.

Transcurridos 5 años desde el primer plan de emergencia, en diciembre de 2019 se anunció el “Plan Emergencia Hídrica 2019-2021 Región de Coquimbo”. El objetivo de este plan es similar al anterior, enfocándose en “afrontar los efectos de la escasez hídrica, mitigando impactos en los territorios rurales procurando una respuesta de corto plazo para las demandas más urgentes y vitales de la población, y sus actividades productivas de mayor impacto”. El plan contó con un presupuesto inicial de \$65.463 millones (sujeto a restricciones posteriores por la contingencia sanitaria), desglosado en las siguientes líneas:

- Agua: resguardar el uso eficiente del agua para consumo humano de la población rural y para la agricultura. Presupuesto: \$53.822 millones.
- Productividad agropecuaria: adoptar medidas que ayuden a la continuidad de la producción pecuaria y agrícola de la región. Presupuesto: \$ 5.143 millones.
- Apoyo social: asistir a la población rural a través de empleo y capacitación, además de apoyar en disminuir el impacto de la sequía. Presupuesto: \$ 6.497 millones.

Estas cifras demuestran el enorme costo económico que ha representado para el Estado abordar las consecuencias sociales de la sequía, derivadas de la escasez de agua para bebida y de las pérdidas en ingresos para la población que depende de la actividad agropecuaria. Ambas condiciones afectan principalmente a los habitantes de zonas rurales.

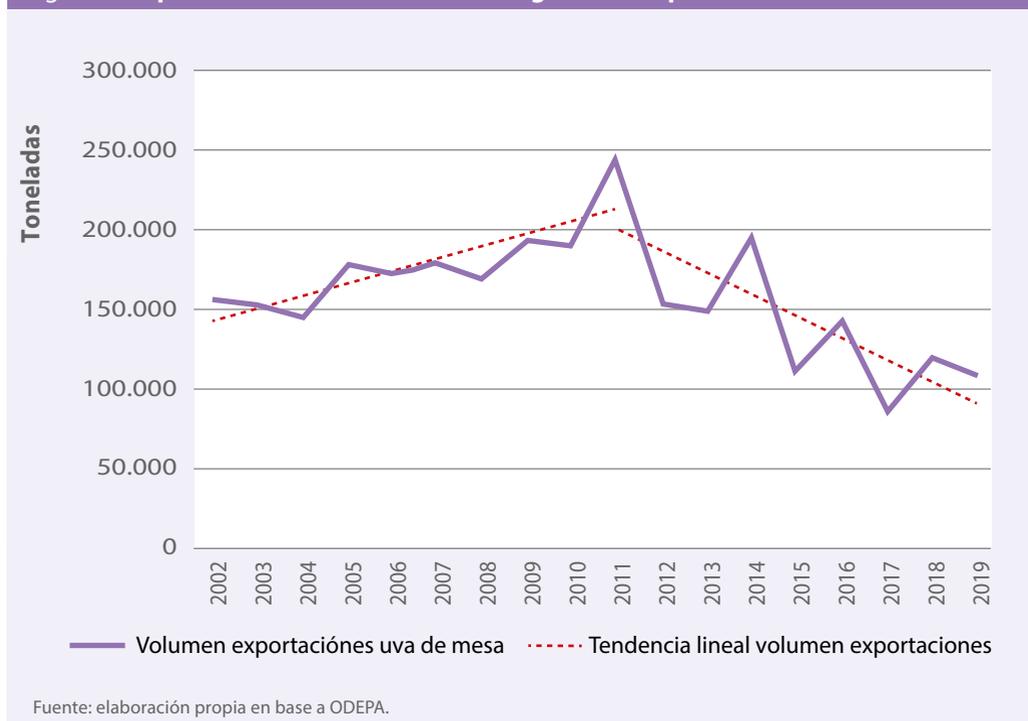
El impacto específico de la sequía en la agricultura se deriva de la importancia del agua en los mecanismos fisiológicos de las plantas. El estrés hídrico (oferta de agua inferior a los requerimientos) tiene efectos variables sobre los cultivos, dependiendo del suelo, especie, variedad y estado fenológico. En términos generales, la disponibilidad de agua influye directamente en el crecimiento vegetal, por lo que el estrés hídrico puede afectar procesos como la expansión celular, actividad enzimática, respiración, metabolismo, fotosíntesis, síntesis de proteínas y el balance de reguladores de crecimiento, entre otros.

En el caso de la uva de mesa, principal cultivo de la Región de Coquimbo, el periodo más sensible por la falta de agua para la vid es entre floración y pinta, donde se producen las mayores pérdidas por reducción del número y tamaño de las bayas, fase que ocurre entre octubre y diciembre, dependiendo de la variedad y la zona.

Las vides de la región han sufrido fuertemente el impacto de la escasez de agua, tanto las uvas pisqueras como la uva de mesa. En esta última la sequía se ha expresado de manera muy evidente en las exportaciones regionales, como puede observarse en el siguiente gráfico.



Figura 8. Exportaciones de uva de mesa Región de Coquimbo



Desde el año 2002 al 2011, las exportaciones de uva de mesa de la Región de Coquimbo alcanzaron un promedio anual de 179 mil toneladas, creciendo en forma sostenida hasta alcanzar en el 2011 un máximo de 250 mil toneladas. A partir de ese año, la sequía permanente lleva a una serie ininterrumpida de fuertes caídas y leves recuperaciones, alcanzando hasta el año 2019 un promedio anual de 135 mil toneladas. Si se pondera ese diferencial de volumen por el valor unitario promedio del periodo 2012-2019, se obtiene una pérdida equivalente a US\$85 millones anuales y US\$687 millones para todo el periodo. Esta pérdida afecta a toda la industria, desde exportadores a pequeños proveedores.

Llevando el análisis a casos más puntuales, es posible hacer una estimación de la pérdida de productividad y calidad sobre la rentabilidad de la explotación. Tomando como ejemplo la cepa pisquera Pedro Jiménez, la de mayor superficie entre todas las vides regionales (incluyendo uva de mesa y vinífera), una reducción leve de la productividad y/o calidad de la baya tiene grandes impactos sobre el resultado económico.

Estableciendo como base la ficha de costos elaborada por INDAP para la región, una reducción de 10 % en rendimiento genera un descenso de la utilidad de \$600.000 por hectárea, lo que proyectado a la superficie regional de la cepa produce una pérdida total de \$2.257 millones. Si a lo anterior se agrega un 10 % en reducción del precio por baja calidad de la baya, la utilidad por hectárea cae \$1.100.000, equivalente a una pérdida a nivel regional de \$4.289 millones para la cepa.

**Cuadro 6. Estimación de pérdida de productividad y rentabilidad en cepa pisquera Pedro Jiménez**

Escenario	Superficie	Producción total (ton)	Precio (\$/kg)	Costo total (millones \$)	Ingreso total (millones \$)	Beneficio neto (millones \$)	Diferencia beneficio neto (millones \$)
Normal	Por hectárea	40	150	2,9	6,0	3,1	-
	Región (3.763 ha)	150.512		11.039,8	22.576,9	11.537,0	-
Reducción productividad 10%	Por hectárea	36	150	2,9	5,4	2,5	-0,6
	Región (3.763 ha)	135.461		11.039,8	20.319,2	9.279,4	-2.257,7
Reducción productividad y precio 10%	Por hectárea	36	135	2,9	4,9	1,9	-1,1
	Región (3.763 ha)	135.461		11.039,8	18.287,3	7.247,4	-4.289,6

Fuente: elaboración propia en base a ficha técnica INDAP.

Desde otra óptica, un agricultor enfrentado a la escasez de agua debe decidir entre sacrificar parte de la superficie productiva, reducir rendimiento o calidad, o bien recurrir a otras fuentes de agua para mantener su producción. Dado que muchos agricultores con derechos de agua superficial son también propietarios de derechos de agua subterránea, pueden optar por extraer agua del subsuelo (cuando existe la factibilidad), lo que encarece el costo del agua desde un valor estimado de \$800 a \$950 por metro cúbico, lo que implica elevar los costos de manera significativa.



## ► 6. Factores clave de éxito y perspectivas futuras

---

El grado de desarrollo alcanzado por el proyecto puede calificarse como de implementación total, ya que todo el diseño y puesta en marcha fue logrado íntegramente de forma exitosa, siendo transferido a los usuarios para su operación autónoma. Prueba de ello es que la tasa de desmarque para la temporada 2020/2021 fue asignada utilizando la plataforma de modelamiento, con posterioridad al cierre del proyecto.

Como factores clave en el éxito de la iniciativa se reconocen el alto nivel de competencia técnica en el equipo ejecutor y en el equipo de la Junta de Vigilancia del Río Elqui, así como el alto grado de confianza y compromiso con un propósito de largo plazo, más allá de los límites del propio proyecto. También fue fundamental la existencia de mucha información en bases de datos completas y de largos periodos de tiempo, tanto de fuentes externas como de la propia JVRE, que permitieron calibrar correctamente el modelo hidrológico.

Para la continuidad del sistema en el tiempo es fundamental mantener y mejorar las fuentes de información que lo alimentan, mediante el monitoreo de variables hidroclimáticas, mantención y agregación de estaciones de monitoreo, y actualización de datos en el sistema informático. El propio modelo requiere ser periódicamente revisado y ajustado en sus parámetros para verificar su consistencia ante la nueva información generada.

Una tarea futura, para mejorar el sistema y potenciar sus capacidades, es ampliarlo incorporando módulos de aguas subterráneas y calidad de agua, con lo cual se abordaría la gestión de forma mucho más integral. Este trabajo ya está en curso, por lo cual se espera que en el mediano plazo se encuentre en operación.

Es muy importante también mantener canales de información expeditos con todos los usuarios de la cuenca, comunicando oportunamente los criterios de decisión y su respaldo técnico, lo que favorece una gestión transparente y reduce la posibilidad de conflictos.

Finalmente, la participación de la JVRE y el equipo asesor en diversas instancias de coordinación, discusión e intercambio de experiencias con otras entidades, dentro y fuera de la región, es una forma muy positiva de difundir y compartir mejores prácticas de gestión hídrica, así como de incidir en políticas públicas orientadas a ese mismo propósito.



# El proyecto precursor

## ► 1. Características generales

---

El proyecto “Diseño de un sistema de gestión hídrica para la Junta de Vigilancia del Río Elqui y sus Afluentes, para mejorar la eficiencia en el uso del recurso hídrico bajo escenarios de cambio climático” tuvo una duración de 28 meses, finalizando en enero de 2020. Su objetivo fue implementar un sistema de gestión hídrica en el área de la JVRE, mediante un modelo hidrológico y de gestión; propuesta de una regla de gestión; y desarrollo de una interfaz de soporte de decisiones.

Se estructuró en torno a los siguientes objetivos específicos:

1. Identificar, caracterizar y parametrizar aquellos componentes que describan la regla operacional vigente de asignación de los recursos hídricos de la Junta de Vigilancia del Río Elqui y sus Afluentes.
2. Proponer ajustes a la regla operacional vigente a partir del modelamiento hidrológico de distintos escenarios hidroclimáticos en la zona de estudio.
3. Diseñar un modelo hidrológico base en función de los componentes utilizados en la regla operacional de asignación de recursos hídricos de la Junta de Vigilancia del Río Elqui y sus Afluentes.
4. Diseñar e implementar una plataforma de interfaz entre el usuario y el modelo de gestión hídrica.
5. Desarrollar un programa de transferencia y difusión con los resultados en el desarrollo del programa para los distintos beneficiarios de este.



El ejecutor del proyecto fue la Universidad de La Serena, a través del Laboratorio de Prospección, Monitoreo y Modelación de Recursos Agrícolas y Ambientales (PROMMRA), dependiente del Departamento de Agronomía de la Facultad de Ciencias de dicha casa de estudios, con sede en la ciudad de Ovalle. El PROMMRA tiene como propósito contribuir a reducir las brechas tecnológicas en el sector agroalimentario, mediante la detección de necesidades y generación de conocimiento de la base de recursos agrícolas y naturales, enfocándose en los territorios semiáridos del país.

Como asociados al proyecto participaron la Corporación Regional de Desarrollo Productivo de Coquimbo y la Junta de Vigilancia del Río Elqui.

## **2. Validación de la tecnología**

---

La metodología de trabajo utilizada, así como los resultados obtenidos, se detallan a continuación para cada uno de los objetivos específicos planteados en el proyecto.

### **2.1. Análisis regla operacional de asignación de los recursos hídricos de la JVRE**

---

Para la creación de la línea base se recopiló información primaria y secundaria, sumado a un levantamiento en terreno con actores claves, lo anterior orientado a recabar antecedentes de la cuenca del río Elqui y el sistema de repartición y distribución de sus aguas.

De la información obtenida cabe destacar la incertidumbre existente en cuanto al comportamiento hidrológico de la cuenca en la temporada, siendo un dato estimado para la JVRE en base a estaciones fluviométricas, utilizándolas como indicadores de la distribución de los cauces naturales en la cuenca. Estos indicadores permiten gestionar el recurso hídrico, a partir de la regulación de los embalses Puclaro y La Laguna. Operando habitualmente el embalse La Laguna entre los meses de diciembre a abril, o cuando el caudal pasante en la estación fluviométrica Elqui de la DGA en Algarrobal sea inferior a  $5 \text{ m}^3/\text{s}$ .

El conocimiento histórico del volumen total generado por la cuenca se ha basado en diversas herramientas que han ayudado a establecer el desmarque para la temporada con mayor certeza. Los datos y criterios operacionales se almacenaban en una planilla electrónica, estimándose correlaciones entre la nieve caída durante el invierno en el embalse La Laguna y la escorrentía producida, el volumen almacenado en los embalses, y las precipitaciones sólidas y líquidas. A partir de estas variables, y asimilando el comportamiento frente a temporadas históricas similares, se propone un desmarque para la temporada.

Como resultado del levantamiento de información del proyecto se pudo describir la situación hidroclimática de la cuenca, generando un contexto del panorama hídrico, que per-

mitió identificar y priorizar 12 criterios técnicos, jerarquizados en 3 grupos, en base a sus características comunes y funcionalidad sobre el modelo operacional vigente. Estos son:

**Grupo 1. Criterios de asignación**, los cuales permiten establecer el desmarque para la temporada.

- 1. Asignación hídrica en base a un desmarque propuesto:** la JVRE gestiona sus aguas a partir de un desmarque asignado a inicio de temporada, el cual es propuesto por el repartidor de aguas, analizado y comunicado por la asamblea a los usuarios. Este desmarque corresponde a la proporción de sus derechos en base al agua disponible.
- 2. Temporada hídrica desde el 1 de septiembre hasta el 31 de agosto:** el cálculo del desmarque se realiza en septiembre, con el último dato del mes de agosto.
- 3. Asignación a partir del volumen de agua generada por la cuenca del río Elqui durante la temporada:** estimar cuánta agua generará la cuenca durante los meses de septiembre a agosto del año siguiente es clave para definir un desmarque acertado.
- 4. Conocer volúmenes embalsados en Puclaro y La Laguna a inicio de temporada:** los volúmenes almacenados permiten disponer de un agua acumulada en la temporada, el cual es considerada al momento de la asignación, sobre todo en periodos de menor disponibilidad hídrica de los cauces naturales.
- 5. Considerar el volumen embalsado al término de la temporada por parte de Puclaro y La Laguna:** desde el 2012 la JVRE gestiona sus aguas con una planificación de 3 a 4 temporadas, estableciendo valores objetivo de volumen de agua embalsada que deben ser alcanzados al final de cada temporada.
- 6. Operación de la regla entre el 25 % y 50 % de desmarque:** valores definidos como mínimo y máximo para satisfacer la demanda de la cuenca considerando la capacidad de porteo de sus canales. Un desmarque bajo el 25 % es considerado deficiente, ya que el sistema por sí mismo genera ese volumen de agua en la temporada con 85 % de excedencia.

**Grupo 2. Criterios de distribución**, los cuales contribuyen en la repartición de las aguas en los distintos puntos de la cuenca, en función al desmarque establecido.

- 7. Considerar la demanda existente para la distribución de desmarques mensuales durante la temporada:** la JVRE gestiona la oferta de agua de tal forma que permita suplir las necesidades según época del año y sección de la cuenca.
- 8. Gestión diferenciada en 7 sectores de la cuenca del río Elqui:** gestión diferenciada del desmarque mensual según estructuras de cultivos y demandas por sector. Los sectores

son: Cochiguaz, Montegrande, Paihuano, río Turbio, Vicuña, y Segunda y Tercera Sección de la cuenca.

**9. Operación del embalse La Laguna entre los meses de diciembre y abril, o cuando la situación lo amerite:** el embalse La Laguna entra en funcionamiento entre el mes de diciembre y abril, meses de mayor demanda para la primera sección de la cuenca. No obstante, es utilizado también en meses donde los caudales sean más bajos de lo estimado y sea necesario operarlo para cumplir con el desmarque propuesto.

**Grupo 3. Criterios de operación,** los cuales permiten mantener puntos de alerta para la normal distribución del recurso.

**10. Considerar la altura de nieve medida en La Laguna:** indicador relevante para estimar la oferta hídrica, ya que existe una correlación entre la altura de nieve y el afluente al embalse La Laguna. Dicho valor permite tener una estimación y control de los caudales que puedan escurrir por las partes bajas de la cuenca.

**11. Considerar el caudal pasante en la estación fluviométrica de la DGA, río Cochiguaz en el Peñón:** estación fluviométrica clave para monitoreo en época de mayor demanda, ya que es una zona no regulada; por lo tanto, dependen netamente del agua que escurre por el río para solventar el desmarque propuesto.

**12. Considerar el caudal pasante en la estación fluviométrica de la DGA, río Elqui en Algarrobal:** indicador relacionado con el caudal afluente al embalse Puclaro, de esta manera permite a la JVRE gestionar en base al caudal entrante al embalse. Si este caudal no cumple con la expectativa, el embalse La Laguna es operado para conseguir el caudal necesario para satisfacer el desmarque propuesto.

Cabe señalar que, si bien la regla de operación indica que el desmarque debe fluctuar entre 25 % y 50 %, las entrevistas realizadas a los usuarios indican que aquellos ubicados en la parte baja de la cuenca consideran un desmarque del 45 % como satisfactorio, mientras que los de la parte alta de la cuenca sólo un 30 %. Esto refleja las diferencias en las demandas a lo largo del sistema y las diferentes percepciones de satisfacción con las decisiones tomadas por la JVRE. Se constató también que los entrevistados desconocían en gran parte los criterios de decisión y distribución que la JVRE utilizaba para la gestión del recurso hídrico.

Los criterios mencionados no estaban explícitamente definidos en una regla operacional propiamente tal, sino que fueron sistematizados a partir del análisis de los argumentos técnicos y la experiencia de los tomadores de decisión, insumos con los cuales se definía el desmarque de cada temporada. Estos criterios fueron validados por el equipo ejecutor y especialistas de la JVRE, por lo cual quedaron incorporados de forma explícita en la nueva regla operacional, con algunas precisiones (ver detalle en Anexos).

Una vez definida la regla operacional y sus criterios, se procedió a incorporarla en el modelo hidrológico existente para el río Elqui. Este modelo, basado en el software WEAP (*Water Evaluation and Planning System*) provee un enfoque integral a la planificación de los recursos hídricos, y fue desarrollado en el año para la JVRE. El equipo ejecutor del proyecto realizó una revisión de la configuración, estructura y calibración del modelo WEAP, describiendo su topología de visualización y los componentes de entrada para su modelación.

Se modificó la configuración topológica, algoritmos de decisión y lógica del modelo para incorporar variables que permitan tomar decisiones, a partir de los criterios de la regla operacional definida. Cada criterio fue contrastado con las capacidades técnicas del modelo WEAP, para luego ser incorporados con una calibración acorde a la gestión realizada por la JVRE históricamente.

Como nueva información, se realizó una batimetría de los embalses Puclaro y La Laguna. Este procedimiento, que corresponde a una topografía subacuática, permitió corregir los datos utilizados en el modelo, tales como cota volumen, capacidad real de los embalses, y volumen muerto operativo, de modo que la regla operacional considere las condiciones hidráulicas reales del sistema.

Para calibrar el modelo ajustado, se realiza una comparación entre los valores estimados por el modelo en aguas superficiales y volúmenes para un periodo anterior, que cuenta por lo tanto con valores conocidos, y se evalúa el desempeño mediante una serie de índices de bondad de ajuste, cuya interpretación se indica en el siguiente cuadro.



**Cuadro 7. Índices de bondad de ajuste aplicados para interpretación del modelo**

Sesgo porcentual (PBIAS)	Eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE)	Razón entre raíz del error cuadrático medio (RSR)	Interpretación modelo	Coefficiente de correlación de Pearson (r)	Coefficiente de determinación (R <sup>2</sup> )
PBIAS < ±10	0,75 < NSE < 1,00	0,00 < RSR < 0,50	Muy bueno	0 = no existe relación lineal -1 = relación lineal negativa perfecta 1 = relación lineal positiva perfecta	Varía de 0 a 1, con valores más altos indicando una menor varianza del error, y por lo general los valores superiores a 0,5 se consideran aceptables
±10 ≤ PBIAS < ±15	0,65 < NSE < 0,75	0,50 < RSR < 0,60	Bueno		
±15 ≤ PBIAS < ±25	0,50 < NSE < 0,65	0,60 < RSR < 0,70	Satisfactorio		
±25 ≤ PBIAS	NSE < 0,50	0,70 < RSR	No satisfactorio		

Fuente: Moriasi *et al.* (2007).

Estos estadígrafos fueron calculados en diversos puntos de la cuenca, donde existen estaciones fluviométricas de control que permiten la comparativa y calibración del modelo. Se observa un muy buen ajuste de los caudales, como lo indican los indicadores de bondad de ajuste del cuadro siguiente.

**Cuadro 8. Indicadores de desempeño modelo hidrológico calibrado aplicados a los cauces naturales de la cuenca del río Elqui**

Dato observado	Río Claro en Rivadavia	Río Cochiguaz en El Peñón	Río Elqui en Algarrobal	Río Elqui en Almendral	Río Elqui en La Serena	Río La Laguna entrada Embalse La Laguna	Río Elqui entrada Embalse Puclaro	Estero Culebrón	Estero Derecho en Alcohuz
Unidad	m <sup>3</sup> /s	m <sup>3</sup> /s	m <sup>3</sup> /s	m <sup>3</sup> /s	m <sup>3</sup> /s	m <sup>3</sup> /s	m <sup>3</sup> /s	m <sup>3</sup> /s	m <sup>3</sup> /s
PBIAS %	-12,1 (B)	7,7 (MB)	-5,3 (MB)	-0,2 (MB)	-5,1 (MB)	0 (MB)	-2,7 (B)	7,1 (MB)	-12,8 (B)
RSR	0,238 (MB)	0,069 (MB)	0,27 (MB)	0,317 (MB)	0,590 (B)	0 (MB)	0,268 (MB)	0,214 (MB)	0,325 (MB)
NSE	0,943 (MB)	0,995 (MB)	0,927 (MB)	0,899 (MB)	0,650 (B)	1 (MB)	0,928 (MB)	0,954 (MB)	0,894 (MB)
r	0,980 (RL+)	1 (RL+)	0,983 (RL+)	0,948 (RL+)	0,815 (RL+)	1 (RL+)	0,964 (RL+)	0,979 (RL+)	0,986 (RL+)
R <sup>2</sup>	0,960 (A)	1 (A)	0,966 (A)	0,899 (A)	0,664 (A)	1 (A)	0,930 (A)	0,959 (A)	0,972 (A)

**Interpretación valores estadígrafos**

<b>PBIAS %</b>	MB = Muy bueno B = Bueno	r	RL+ = Relación lineal positiva alta	R <sup>2</sup>	A = Ajuste alto
<b>RSR</b>					
<b>NSE</b>					

Fuente: proyecto precursor.

El embalse Puclaro presenta un buen desempeño modelado, mientras que La Laguna muestra un desempeño subóptimo, pero adecuado a lo requerido. Los índices calculados se muestran en el siguiente cuadro.

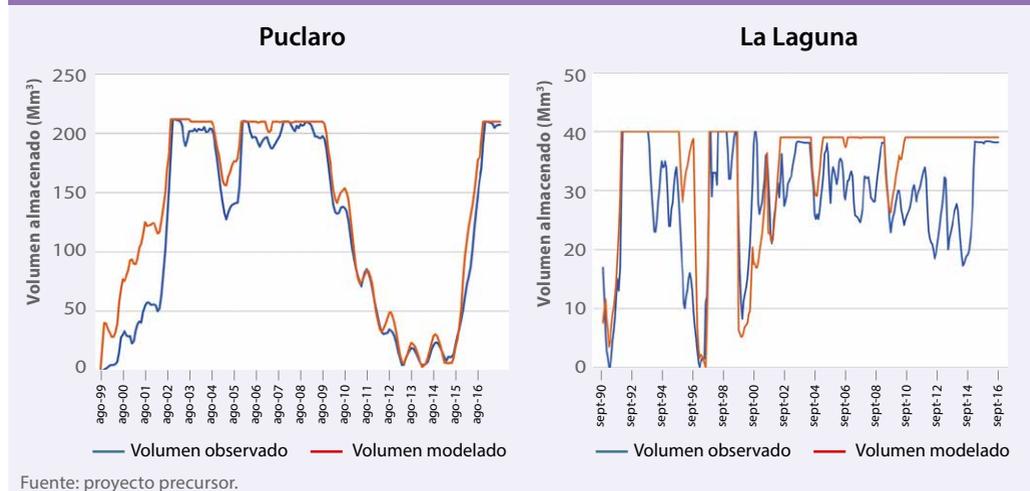
**Cuadro 9. Indicadores de desempeño modelo hidrológico calibrado aplicados a los volúmenes de los embalses de la cuenca del río Elqui**

Estadístico	Embalse Puclaro		Embalse La Laguna	
	Valor (Mm <sup>3</sup> )	Interpretación	Valor (Mm <sup>3</sup> )	Interpretación
PBIAS%	14,3	Bueno	16,4	Satisfactorio
NSE	0,895	Muy bueno	0,195	No satisfactorio
RSR	0,323	Muy bueno	0,896	No satisfactorio
R <sup>2</sup>	0,939	Ajuste alto	0,525	Ajuste medio

Fuente: proyecto precursor.

En la siguiente figura se refleja lo anterior de forma gráfica, donde el embalse Puclaro tiene mejor desempeño que La Laguna, aunque ambos cumplen con el nivel de ajuste aceptado.

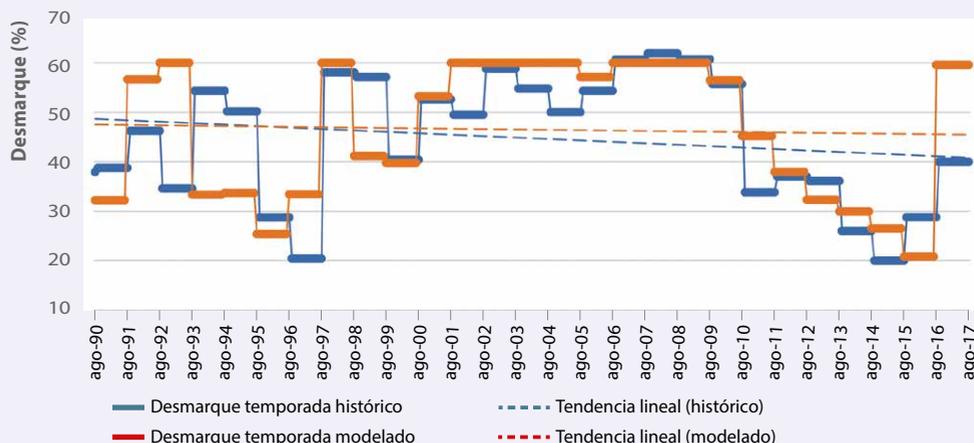
**Figura 9. Ajuste entre volumen almacenado histórico y modelado en embalses**



Fuente: proyecto precursor.

Una vez que el modelo ha sido calibrado, es decir, que se comprueba que su diseño es capaz de reflejar de forma ajustada los distintos eventos hidrológicos de la cuenca, se le aplicó la regla operacional con sus 12 criterios para analizar cómo habría cambiado la decisión de desmarque si se hubiera contado con el modelo. En la siguiente figura se observan las tasas de desmarque efectivamente adoptadas y las que podrían haberse adoptado utilizando la regla operacional y el modelo, donde se observan periodos de ajuste y otros con mayor divergencia. Existen 10 temporadas donde la diferencia entre ambos valores es de al menos 10 puntos porcentuales, lo que deja de manifiesto que la incertidumbre en la toma de decisiones puede producir importantes sesgos en la toma de decisión, ya sea distribuyendo más o menos agua de la recomendada por los criterios técnicos.

Figura 10. Desmarque por temporada histórico y modelado (zona Elqui bajo Puclaro)



Fuente: proyecto precursor

A partir de la calibración del modelo, se generó un nuevo escenario del “Embalse Puclaro Extendido”, el cual permite extender el tiempo de operación del embalse Puclaro desde el real (17 años) a un periodo modelado (27 años). Esta extensión permitió constatar la participación gravitante que tiene el embalse en los periodos de sequía vividos y como obra de regulación hídrica referido al desmarque por temporada.

## 2.2. Diseño de escenarios de cambio climático

Se generaron dos escenarios hidroclimáticos denominados RCP-2,6 (escenario de mitigación estricto) y RCP-8,5 (escenario con un nivel muy alto de emisiones de gases de efecto invernadero), los cuales se basan en el Quinto Informe emitido por el Grupo Intergubernamental de Expertos para el Cambio Climático (IPCC) en el año 2014. Para ello, se utilizaron datos de temperatura y precipitaciones a partir de la Plataforma de Simulaciones Climáticas desarrollada por el Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR2). Los escenarios diseñados se caracterizan por:

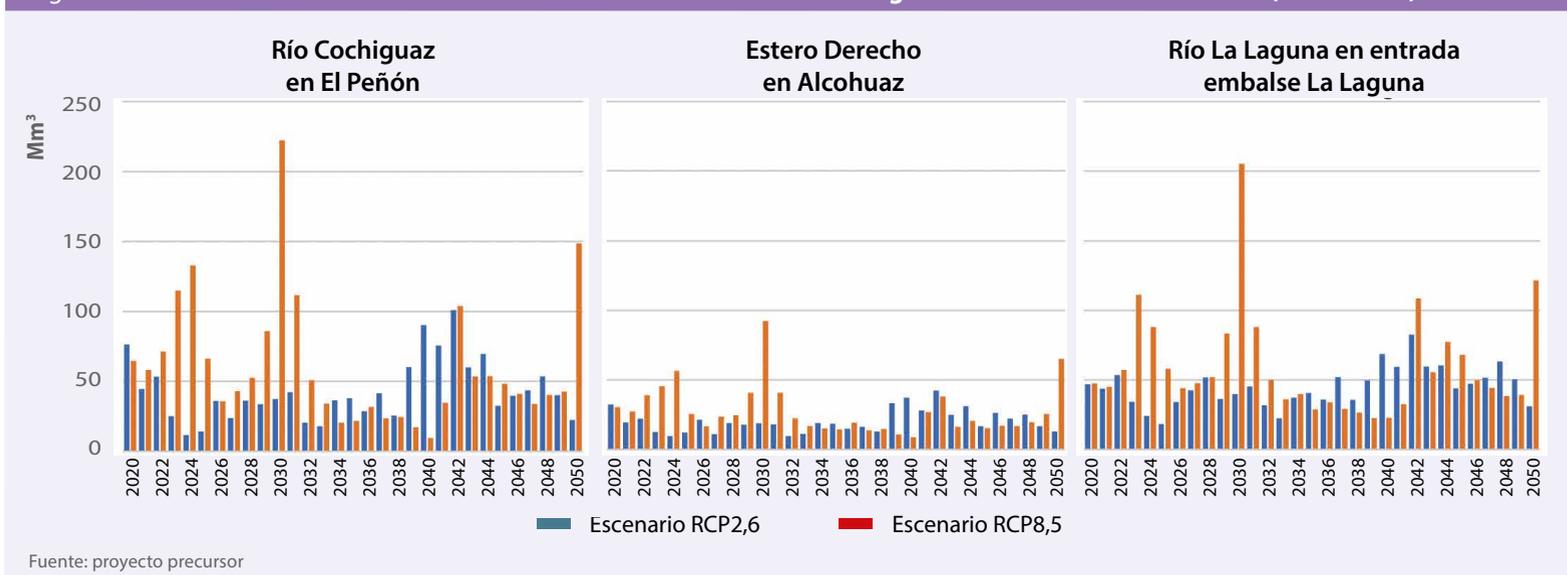
- **Escenario 1: RCP-2.6 (2020 – 2050).** Se observa el incremento de la temperatura media en toda la cuenca, siendo esta más severa en la zona precordillerana, específicamente en la subcuenca del río Claro, donde existe un aumento de hasta 1,8 °C. En el caso de las precipitaciones, estas tienden a disminuir en el periodo 2020-2035 en un 30 %, con un leve aumento de un 11% en el siguiente periodo (2035-2050).
- **Escenario 2: RCP 8,5 (2020 – 2050).** Se observa claramente un aumento de la temperatura, siendo en la serie 2035 – 2050 donde se presenta con mayor magnitud, llegando a sobrepasar los 2 °C en algunas zonas cordilleranas en la cuenca del río Claro. En cuanto a las precipitaciones, existe un aumento en función de la serie histórica 1985 – 2005, sobrepasando el 40% en algunas zonas cordilleranas de la cuenca del río Elqui.

Estos datos se implementaron en modelos calibrados de generación hídrica en 3 subcuencas de cabecera de la cuenca del río Elqui: río Cochiguaz en el Peñón, Estero Derecho en Alcohuaz, y río La Laguna en entrada embalse La Laguna. Estas subcuencas permiten estimar con un alto grado de ajuste el caudal total de la cuenca del río Elqui.

En las simulaciones se observa el comportamiento de los caudales, donde el escenario RCP-8,5 presenta los mayores volúmenes por temporada, dado por el mayor volumen de precipitaciones estimado. Luego de diseñadas las simulaciones climáticas y de generación de caudales, se incorporan en el modelo como un *input*, de modo que la regla de decisión para el desmarque de cada temporada y el volumen de los embalses lleva incorporada la condición de cambio climático. La regla de decisión demostró su viabilidad operativa ante esta condición, manteniendo la seguridad hídrica bajo los parámetros especificados como base.

En la figura siguiente se presentan los volúmenes de caudal por temporada para las tres subcuencas analizadas, donde se observa que el escenario RCP-8.5 genera los mayores volúmenes anuales de caudal alrededor del 2030, seguido de una década de sequía.

Figura 11. Volumen caudales estimados en subcuencas seleccionadas según escenarios hidroclimáticos (2020-2050)

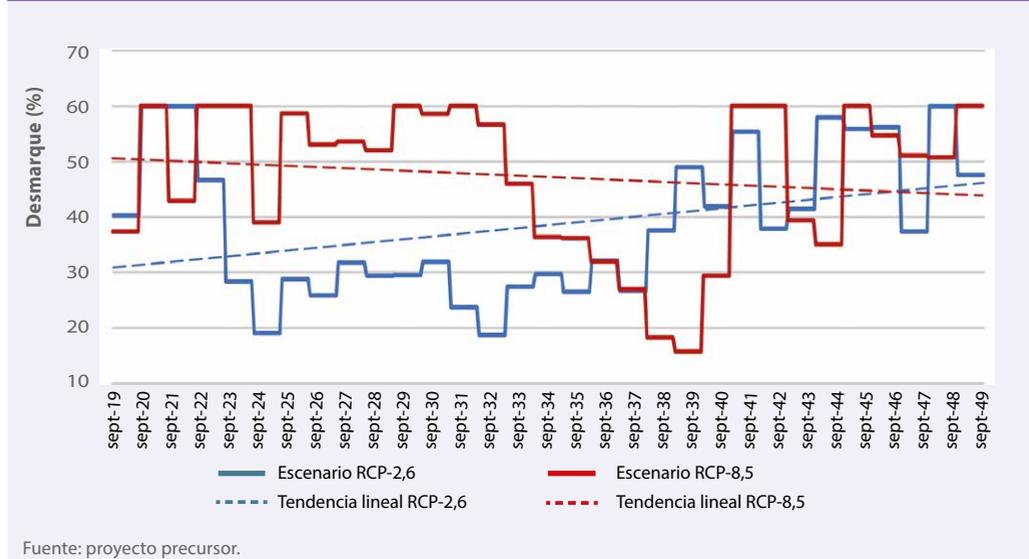


De acuerdo a los volúmenes estimados y calibrados de generación de agua en la cuenca, y aplicando los criterios de la regla operacional, se genera una proyección de las tasas de desmarque para el periodo 2020-2050.

El escenario RCP-2.6 muestra extensos periodos de caudales bajo el promedio, en especial en las décadas del 20' y 30', donde los desmarques propuestos por el modelo llegan al mínimo de 20% en dos temporadas. Sin embargo, en las siguientes temporadas, estos bordean

el 30 % anual, evidenciando el largo periodo de sequía sufrido. En el escenario RCP-8.5 la asignación hídrica presenta un desempeño satisfactorio debido a una mayor escorrentía durante las temporadas evaluadas, a excepción de las temporadas 2039 y 2040, en donde se llega a repartir menos del 20% de desmarque, producto de una disminución en las precipitaciones promedio.

**Figura 12. Desmarque modelado para la cuenca del río Elqui según escenarios hidroclimáticos (2020-2050)**



La tendencia se expresa también en el nivel de llenado proyectado de los embalses Puclaro y La Laguna, donde entre los años 2036-2040 y 2039-2041, respectivamente, no tienen capacidad de almacenar agua para la distribución, repartiendo solo el agua ofertada por la cuenca. Aun habiendo pasado por un largo periodo a capacidad máxima, en el periodo seco los embalses se vacían, perdiendo la capacidad de regulación. Cabe destacar que en esos años la cuenca produjo menos de 150 Mm<sup>3</sup>, lo cual no permite la acumulación y regulación del embalse.

El escenario RCP-8.5, a pesar de tener un mayor nivel de emisiones de gases de efecto invernadero, permite mantener los caudales promedios generados históricamente, sin afectar en la producción de escorrentía superficial en las subcuencas cordilleranas. Se considera como línea base para el desarrollo de la regla operacional debido a la variabilidad hidrológica consistente con la tendencia hidro-climática que se observa para la cuenca en su serie histórica, destacando un periodo de sequía de mayor magnitud al ocurrido en el periodo 2010 – 2015, lo que permite evaluar escenarios en condiciones tanto de periodos húmedos, como periodos de baja escorrentía.

### 2.3. Diseño de modelo hidrológico integrando regla operacional y escenario de cambio climático

---

La regla operacional para la Junta de Vigilancia del Río Elqui se elaboró mediante el modelo WEAP, que vincula la demanda hídrica y la sostenibilidad del recurso hídrico evaluada en una serie temporal de 59 temporadas (1991 – 2050), bajo el escenario de cambio climático RCP-8.5. La regla operacional debe ser estar basada en criterios hidroclimáticos, estar alineada con la visión de la Junta de Vigilancia y permitir su sostenibilidad en el tiempo.

Este proceso se realizó en varias etapas:

- Generación de 5 distintas reglas operacionales, cada una basada en lograr un desmarque objetivo específico y bajo el escenario seleccionado de cambio climático.
- Evaluación y selección de reglas operacionales de acuerdo al cumplimiento de criterios de desempeño.
- Estimación del volumen total de generación hídrica en la cuenca mediante 4 métodos diferentes, de lo cual se obtienen 4 tasas de desmarque propuestas.

A continuación se describen el método y resultados de cada etapa.

#### Generación de 5 distintas reglas operacionales

Se generaron 5 escenarios de reglas operacionales distintas, cada una basada en el objetivo de satisfacer un desmarque determinado (35 %-36 %-37 %-37,5 %-40 %), el que está asociado a la demanda hídrica de la cuenca, y a una mayor seguridad hídrica en el tiempo. Cada escenario de reglas se basa en la premisa de lograr en cada temporada el desmarque objetivo propuesto; si este es satisfecho, se evalúa el estado de los embalses y su agua almacenada, abasteciéndolos si no se encuentran en su máxima capacidad. Si el desmarque propuesto no es satisfecho, se utiliza el agua embalsada para complementarlo. Luego de obtener en cada temporada el desmarque asignado según la condición hidrológica, se proyecta el volumen de almacenamiento de los embalses al término de esta, modificándose según el nivel de volumen embalsado al 31 de agosto.

Este proceso se realiza mediante un árbol de decisión que funciona en la plataforma WEAP, al cual deben proporcionársele las distintas bases de datos con la información requerida en cada decisión.

## Evaluación y selección de reglas operacionales

Las reglas generadas son evaluadas en base a 9 criterios, cuyos valores se presentan en cuadro siguiente.

**Cuadro 10. Resultados criterios de evaluación regla operacional bajo escenario hidroclimáticos**

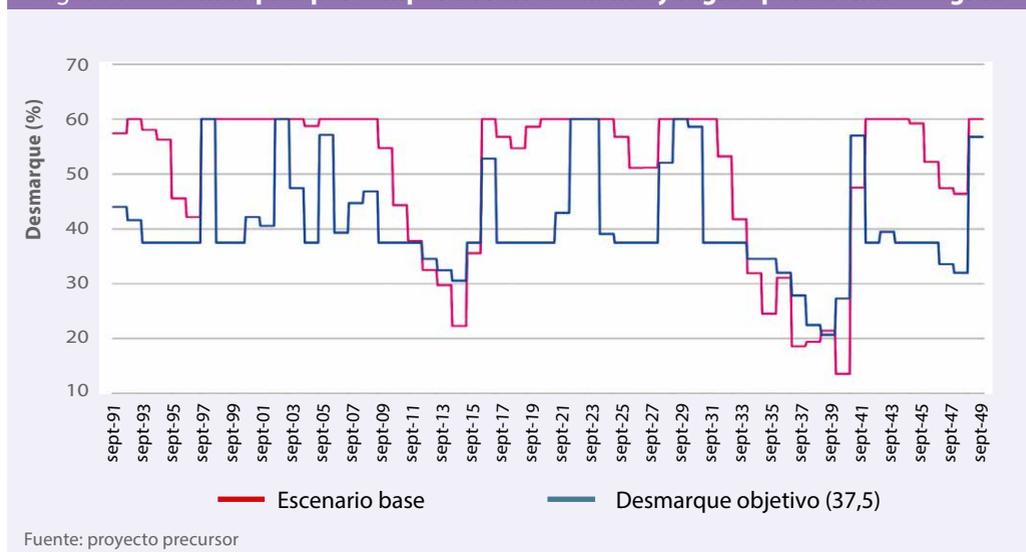
Criterio de evaluación	Escenario base (RCP 8.5)	Desmarque objetivo (35%)	Desmarque objetivo (36%)	Desmarque objetivo (37%)	Desmarque objetivo (37,5%)	Desmarque objetivo (40%)
Desmarque con 85 % probabilidad de excedencia	31,9	32	32	34	34,5	32,9
Desmarque mínimo en la serie modelada	13,6	20,6	20,6	20,6	20,6	18,6
Promedio 15 % desmarque más bajo	23,6	28,7	28,7	29,2	29,2	28,2
Años de falla (desmarque menor al 20%)	3	0	0	0	0	1
Meses con rebose de los embalses	219	311	309	303	301	291
N° temporada con desmarque $\geq$ a 50 %	40	11	11	11	11	11
N° temporada con desmarque $<$ a 50 % y $\geq$ a 35 %	9	36	34	36	36	39
N° temporada con desmarque $<$ a 35 % y $\geq$ a 20 %	6	11	13	11	11	8
N° temporada con desmarque $\geq$ a 20 % (Q río 85 % P. exc.)	55	58	58	58	58	58

Fuente: proyecto precursor.

La regla que presenta el mejor desempeño es aquella con desmarque 37,5 %, ya que logra asignar un desmarque del 34,5 % con 85 % de probabilidad de excedencia, superando en 2,6 puntos al escenario base. Al graficar el desmarque anual proyectado bajo esta regla, se observa que el desmarque objetivo de 37,5 % es el límite inferior durante varias temporadas, mientras que en otras puede superarse o reducirse, como se observa en periodo de sequía del 2040 donde el desmarque distribuido es de 20,6 %, cumpliendo con el mínimo establecido.

El desmarque objetivo es un valor considerado acorde a la demanda hídrica de la cuenca, producto de múltiples variables, entre ellas la estructura de los cultivos, la capacidad de porteo de los canales y su propia capacidad de gestión.

Figura 13. Desmarques por temporada en escenario y regla operacional escogida



## Estimación del volumen total de generación hídrica en la cuenca y tasas de desmarque

Para operar la regla generada en el modelo WEAP, es indispensable estimar el volumen total de escorrentía que generará la cuenca durante la temporada de asignación. Este cálculo se desarrolló a partir de cuatro metodologías distintas de proyección, generando cada una de ellas una tasa de desmarque. Las metodologías son:

- **Modelo hidrológico de generación de escorrentía:** producto de la disponibilidad de datos, se utilizó solo el modelo de la subcuenca del río La Laguna en entrada embalse La Laguna, cuyo volumen es un indicador fiable del volumen de la cuenca, ya que presenta una alta asociación (coeficiente de determinación  $R^2=0.93$ ).
- **Árbol de decisión meteorológico:** utiliza datos de variables meteorológicas para realizar la proyección del volumen total para la temporada con información desde el 01 de enero al 31 de agosto del año en curso. Esta metodología presenta un buen desempeño en su estimación, con un índice de determinación de  $R^2=0,98$  (calibrada con datos históricos).

Las variables utilizadas son:

- Precipitación total (mm) de la estación La Ortiga (DGA)
- Precipitación total (mm) de la estación Cochiguaz (DGA)

- Precipitación total equivalente ajustada (mm) de la estación La Laguna embalse (DGA)
- Altura de nieve ajustada (cm) de la estación La Laguna embalse (JVRE)
- **Árbol de decisión hidrológico.** Utiliza variables hidrológicas para realizar la proyección del volumen total de agua que genera la cuenca del río Elqui. Este árbol presenta un buen desempeño en su estimación, con un índice de determinación de  $R^2$  0,95.

Las variables que utiliza son:

- Caudal medio mensual ( $m^3/s$ ) de la estación río Elqui en Algarrobal (DGA), del mes de agosto y del mes de mayo.
- Diferencia entre ambos caudales mencionados ( $m^3/s$ ).
- Diferencia entre el caudal medio mensual ( $m^3/s$ ) de la estación río Cochiguaz en El Peñón (DGA), del mes de agosto y mes de mayo.
- Diferencia entre el caudal medio mensual ( $m^3/s$ ) de la estación río La Laguna en entrada embalse La Laguna, del mes de agosto y mes de mayo.
- Sumatoria de la diferencia entre el caudal medio mensual ( $m^3/s$ ) de la estación río Elqui en Algarrobal (DGA), del mes de agosto y mes de mayo de la temporada actual y la temporada anterior.
- **Árbol de decisión hidrometeorológico:** el tercer árbol de decisión utiliza variables meteorológicas e hidrológicas para realizar la proyección. Este árbol presenta un buen desempeño en su estimación, con un índice de determinación de  $R^2$  0,98.

Las variables que la componen son las siguientes:

- Caudal medio mensual ( $m^3/s$ ) de la estación río Elqui en Algarrobal (DGA), del mes de agosto y mes de mayo.
- Precipitación total (mm) de la estación La Ortiga (DGA), caída desde el 1 de enero hasta el 31 de agosto.
- Precipitación total (mm) de la estación Cochiguaz (DGA), caída desde el 1 de enero hasta el 31 de agosto.

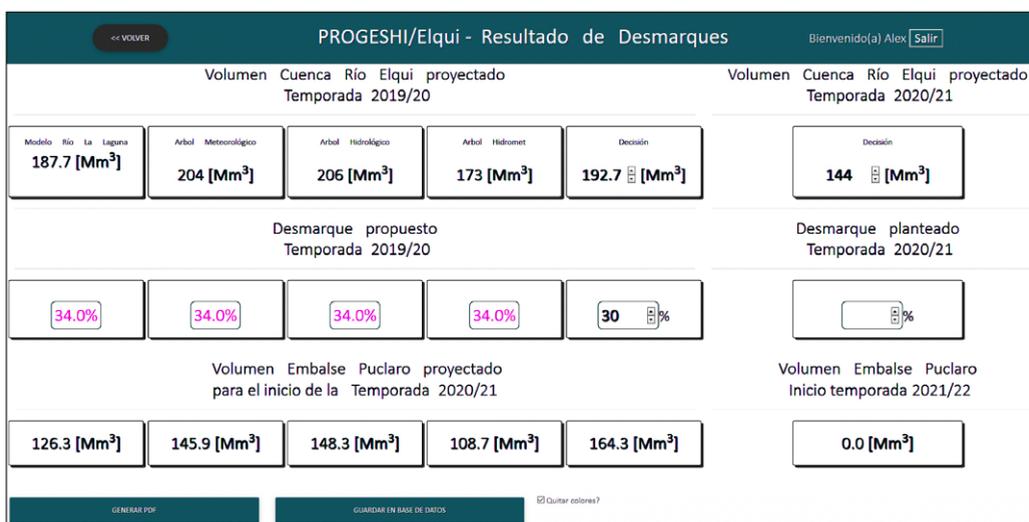
Una vez obtenida la proyección de la oferta hídrica para la temporada de asignación mediante estos 4 métodos, se procede a aplicar la regla operacional para cada uno de los valores. Por lo tanto, al aplicar 4 veces la regla operacional, se obtienen 4 tasa de desmarque. La regla de operación se aplica por medio de un árbol de decisión binario.

## 2.4. Implementación de una plataforma de interfaz entre el usuario y el modelo de gestión hídrica

Como resultado del proyecto se diseñó una herramienta de gestión digital, la plataforma “GESHI”, enfocada a soportar y mantener la implementación de la regla operacional para el cálculo del desmarque, utilizada por la Junta de Vigilancia del Río Elqui y sus Afluentes. El producto se encuentra visado e implementado en los servidores de la JVRE, habiendo entregado un uso exitoso en el cálculo del desmarque para la temporada 2019/20 y 2020/2021.

Debido a su arquitectura, puede ser ampliado sin mayores dificultades con módulos destinados para otros fines, tales como el ingreso de datos monitoreados en compuertas sin telemetría disponible, creando los perfiles de usuario correspondientes y utilizando las plantillas de diseño para generar las vistas de los módulos con un estilo concordante con el resto de la plataforma.

Figura 14. Resultado del módulo "Estimador de desmarques"



Fuente: proyecto precursor.

Actualmente la plataforma cuenta con 4 módulos: módulo estimador de desmarque, módulo monitor de compuertas, módulo datos históricos y módulo de administración, de uso exclusivo para el responsable del área.

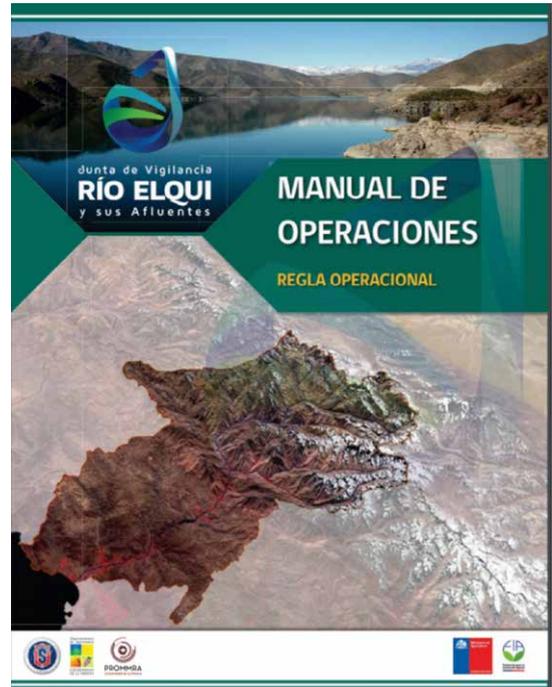
## 2.5. Transferencia y difusión de resultados a Junta de Vigilancia del Río Elqui y usuarios de aguas de la cuenca

Todo el procedimiento de desarrollo, estimaciones, criterios y cálculos del modelamiento fueron sintetizados en un “Manual de Operaciones”, documento que se entregó al presidente de la JVRE y a su Repartidor General de Aguas, siendo ellos los principales responsables

de la toma de decisión en la repartición del recurso hídrico. Cuenta también con una sección de manejo de la plataforma de gestión hídrica, con los procedimientos necesarios y ejemplificados. En su versión digital se encuentra disponible para descarga de cualquier interesado en la Biblioteca Digital de FIA (<http://bibliotecadigital.fia.cl>)

El programa de transferencia contempló el trabajo directo con el equipo técnico de la JVRE y dentro del mismo grupo los responsables de la operación del sistema de gestión hídrica desarrollado. El equipo fue capacitado en la metodología utilizada en la obtención de la regla operacional y su aplicación en la toma de decisión, con el propósito de que ellos puedan comprender, operar y comunicar la regla.

Figura 15. Portada del Manual de Operaciones



Las actividades referidas a difusión del proyecto se realizaron de forma satisfactoria a través de dos seminarios (abril 2018 y diciembre 2019) y dos talleres (septiembre 2018 y diciembre 2019).



### ► 3. La asesoría

Dada la complejidad técnica y las competencias específicas requeridas para construir el modelamiento hidrológico, el rol de los académicos de la Universidad de La Serena fue fundamental para el éxito del proyecto. A esto se agrega el conocimiento del sistema hídrico del equipo de la JVRE y los propios usuarios, que proveyeron al ejecutor de antecedentes muy valiosos, fruto de la experiencia en terreno en la cuenca del Elqui.

La plataforma informática en sus diversos componentes quedó diseñada de tal forma que pueda ser operada de forma autónoma por la JVRE, quedando físicamente instalada en sus propios servidores, con respaldo de los servidores del ejecutor. Los especialistas técnicos del JVRE fueron capacitados para manejar el sistema sin apoyo externo; sin embargo, por interés y decisión mutua, el ejecutor ha continuado haciendo seguimiento, soporte y asesoría a la directiva, con el fin de apoyar su implementación efectiva.

A lo largo de la temporada el modelo requiere de actualización de información y de ciertos ajustes, lo que se va intensificando conforme se acerca el mes de septiembre, cuando se decide el desmarque para la temporada siguiente. La Universidad de La Serena ha continuado presente en esta labor, y de acuerdo a lo manifestado por todos los actores esta relación se mantendrá en el tiempo, independiente del término del proyecto.

Por otra parte, la directiva de la JVRE se encuentra permanentemente analizando nuevos proyectos e iniciativas en la misma área, por lo cual la vinculación permanente con la academia es vista como un hecho necesario y mutuamente beneficioso.



## 4. Estado de ejecución actual

---

La plataforma de acceso al sistema de modelamiento WEAP quedó totalmente instalada e implementada durante el curso del proyecto, utilizándose el modelo para determinar el desmarque en las temporadas 2019/2020 (durante el proyecto) y 2020/2021 (posterior al cierre del proyecto).

El equipo ejecutor y los profesionales de la JVRE han seguido trabajando en la actualización y revisión del modelo, para extraer la información relevante para la gestión de la cuenca. Los accionistas conocen y comprenden los criterios por los cuales se decide la tasa de desmarque, y aunque los valores asignados en esta temporada y la anterior (25 % y 30 % respectivamente) son considerados bajos para la demanda de los cultivos, hay convencimiento general de que las decisiones tomadas son las más apropiadas para asegurar la sustentabilidad del recurso.

La condición de sequía que afecta a la región de Coquimbo y a buena parte del país se ha ido internalizando en los procesos productivos, avanzando en medidas de revestimiento de canales y otras que reducen las pérdidas de agua y optimizan su uso, de modo de amortiguar los impactos negativos sobre la productividad.

La directiva de la JVRE se encuentra en permanente evaluación y búsqueda de nuevas iniciativas para mejorar sus herramientas de gestión. Actualmente se está trabajando en un proyecto para integrar una visión de manejo conjunto de las aguas superficiales y las aguas subterráneas, y en la caracterización de la calidad de agua para la Norma Secundaria de Calidad del río Elqui. La Junta de Vigilancia también forma parte del consejo técnico del Consorcio Centro Tecnológico Quitai Anko, orientado a los desafíos hídricos en las regiones de Atacama, Coquimbo y Valparaíso, y que es gestionado por la Universidad de La Serena asociado con el Centro de Estudios Avanzados en Zonas Áridas (CEAZA), el Centro Regional del Agua para Zonas Áridas y Semiáridas de América Latina y el Caribe (CAZALAC), y la Fundación Minera Los Pelambres. Mantienen trabajos relacionados con el fortalecimiento de la red de monitoreo meteorológico y mantienen un convenio con la Clínica Jurídica de la Facultad de Derecho de la Universidad Católica del Norte, para abordar problemáticas legales de sus comunidades asociadas.



# El valor del proyecto precursor y aprendido

El proyecto realizó un aporte significativo en dotar a la Junta de Vigilancia del Río Elqui de un conjunto de herramientas tecnológicas avanzadas para la gestión del recurso hídrico, integrando en una plataforma de utilización sencilla una serie de fuentes de información, modelos y estimaciones para respaldar técnicamente las decisiones de la directiva.

El modelo diseñado contiene algunos elementos que lo distinguen respecto a otras iniciativas similares, como es internalizar el cambio climático, de modo que las decisiones de gestión tomen en consideración las condiciones futuras menos favorables, e incorporar dentro del modelo la estructura lógica de la regla de decisión sobre la gestión del agua.

Este último punto es de vital importancia para la región y para todas las regiones áridas o semiáridas que cuentan con una importante capacidad de almacenamiento de agua en embalses, ya que el agua disponible aguas abajo de los embalses depende casi exclusivamente de las decisiones que los usuarios tomen sobre el recurso. Por lo tanto, sistematizar las decisiones mediante un algoritmo lógico basado en parámetros objetivos permite a los usuarios implementar acciones con una base técnica sólida, contribuyendo a un uso sustentable y a la satisfacción de las distintas necesidades (agua potable, riego e industria, entre otros).



Embalse Puclaro. Fuente: [www.rioelqui.cl](http://www.rioelqui.cl)



# Anexos

---

Anexo 1. Criterios regla de decisión antes y después del proyecto

---

Anexo 2. Literatura consultada

---

Anexo 3. Entrevistas realizadas

---

## ANEXO 1. Criterios regla de decisión antes y después del proyecto

Tipo de criterio	Criterios priorizados	Descripción criterio	Regla operacional previo al proyecto	Regla operacional posterior al proyecto
<b>CRITERIOS DE ASIGNACIÓN</b>	Asignación hídrica en base a un desmarque propuesto.	La Junta de Vigilancia del Río Elqui y sus Afluentes gestiona sus aguas a partir de un desmarque asignado a inicio de temporada, el cual es propuesto por el repartidor de aguas, y luego analizada y comunicada por la asamblea a sus usuarios. Este desmarque corresponde a la proporción de sus derechos en base al agua disponible.	En el modelo previo, estos desmarques estaban configurados bajo un archivo .csv que contenía los desmarques históricos que la Junta ha utilizado.	Se configuró el modelo mediante supuestos claves <i>Key Assumption</i> , para calcular el desmarque en función de lo que establece la Junta.  El cálculo del desmarque se genera a inicio de temporada y está influenciado, además, por las decisiones que la organización toma, según los criterios levantados.
	Establecer temporada hídrica desde el 1 de septiembre hasta el 31 de agosto.	El cálculo del desmarque se realiza en septiembre, con el último dato del mes de agosto. A partir de ello, se comunica a los usuarios y se establece que el desmarque es vigente hasta agosto del siguiente año.	El modelo establecía que la temporada comenzara en el mes de abril y terminara en el mes de marzo del siguiente año.	La JVRE trabaja sus temporadas hídricas desde el mes de septiembre hasta agosto del siguiente año. A raíz de ello, se cambió la configuración de la temporada en el modelo. Esto llevó a ajustar en los meses que corresponde, los datos de entrada para las variables que componen los nodos de demanda, tanto agrícola como de otros usos. En la sección <i>Key Assumption</i> dentro del modelo, se ajustaron a los meses que corresponde los parámetros de entrada: Coeficiente de cultivo (Kc), Evapotranspiración potencial (ETP) y la precipitación efectiva PpEfec).
	Asignación a partir del volumen de agua generada por la cuenca del río Elqui durante la temporada.	El obtener el dato de cuánta agua generará la cuenca durante los meses de septiembre a agosto, es de importancia respecto a la asignación propuesta, ya que permite tener un desmarque más acertado respecto a la gestión que se quiera realizar.	El modelo de Elqui contempla una serie histórica desde 1990 - 2016; de esta manera, es posible conocer este volumen producto de que los datos pertenecen a una serie histórica.	La actualización contempló tomar este valor a inicio de cada temporada mediante un archivo .csv y así realizar el cálculo del desmarque a aplicar. En futuros escenarios hidroclimáticos, este valor no será conocido; por lo tanto, es necesario contar con modelos hidrológicos que permitan realizar un pronóstico de los caudales que escurrirán durante la temporada.

Tipo de criterio	Criterios priorizados	Descripción criterio	Regla operacional previo al proyecto	Regla operacional posterior al proyecto
<b>CRITERIOS DE ASIGNACIÓN</b>	Conocer volúmenes embalsados en Puclaro y La Laguna a inicio de temporada.	Los volúmenes almacenados en el embalse Puclaro y La Laguna permiten disponer de agua acumulada en la temporada, el cual es considerada al momento de la asignación, sobre todo en periodos de menor disponibilidad hídrica de los cauces naturales. Es por ello que la JVRE dispone de este dato para la toma de decisión.	Los volúmenes almacenados en los embalses La Laguna y Puclaro son conocidos mediante datos mensuales alojados en un archivo .csv de datos históricos. Es decir, cada mes se recurría a un dato para asignar cuánta agua se iba distribuir en el mes correspondiente. Esta metodología no permitía regular al propio embalse su asignación en función de la demanda bajo su área de influencia, sino más bien, estaba sujeto a un dato ya previsto.	Se eliminó el nodo que contenía los datos de salida de los embalses. En cada temporada de la serie modelada, se conoce el volumen de agua producida por la cuenca, y los volúmenes almacenados en el mes de septiembre. De esta manera, cada mes de septiembre, el modelo asigna un desmarque en función de la cantidad de agua ofertada por la cuenca y el total de acciones (25.342,08). Sin embargo, esta relación es subsidiada por el volumen almacenado en los embalses, permitiendo ajustar los desmarques, si estos no se cumplieran en meses de menor oferta hídrica. Con el propósito de obtener una serie que cuente con una mayor variabilidad climática dentro de la operación del embalse Puclaro, se extendió el periodo con un denominado escenario extendido donde el embalse entra en funcionamiento a partir de septiembre de 1990, manteniendo la configuración actual de la regla operacional, no obstante, sus dos embalses están operando desde el inicio de la serie de modelación, permitiendo evaluar los futuros escenarios hidroclimáticos en condiciones de variabilidad para una serie temporal más extensa (1990 - 2016).
	Considerar el volumen embalsado al término de la temporada por parte de Puclaro y La Laguna.	Un criterio relevante en la asignación es saber con cuánto volumen almacenado quiero terminar la temporada. Respecto a ello, la JVRE gestiona sus aguas de una manera distinta a partir del año 2012, donde mantienen una planificación para 3 a 4 temporadas. Por lo tanto, dichos volúmenes son manejados actualmente bajo los criterios de la organización, sin mantener un valor definido.	Al igual que el volumen de inicio de temporada, este dato es conocido dentro de la serie histórica.	Se incorpora dentro del algoritmo de decisión en el modelo. Este valor es una variable dentro del modelo, permitiendo generar diversos escenarios. La variable del volumen embalsado al término de la temporada se incorpora en la sección de los <i>Key Assumption</i> .

Tipo de criterio	Criterios priorizados	Descripción criterio	Regla operacional previo al proyecto	Regla operacional posterior al proyecto
CRITERIOS DE ASIGNACIÓN	Operación de la regla entre el 25% y 50% de desmarque.	La operación de la regla debería fluctuar entre estos dos desmarques para satisfacer la demanda de la cuenca considerando la capacidad de porteo de sus canales. Un desmarque bajo el 25% es considerado deficiente, ya que el sistema por sí misma genera, con 85% de excedencia, esa cantidad de agua en la temporada. Cabe destacar que los usuarios de la parte bajan de la cuenca consideran un desmarque del 45% como satisfactorio, mientras que los de la parte alta de la cuenca sólo un 30%.	Se establece que se debe cumplir con un desmarque como base para la temporada en función a la disponibilidad existente no inferior del 20%.	En primera instancia, la regla debe estar diseñada para satisfacer un Desmarque Objetivo, el cual pueda satisfacer la demanda existente en la cuenca, y asociado a la infraestructura de conducción que presenta el territorio. Dicho desmarque se fijó en un 37,5 %. Para ello, existe un campo en los <i>Key Assumption</i> donde es posible ajustar dicho valor.
	CRITERIOS DE DISTRIBUCION	Considerar la demanda existente para la distribución de desmarques mensuales durante la temporada.	La demanda permite a la JVRE gestionar el agua de tal forma que permite suplirla en los momentos de mayor requerimiento, por ejemplo en los meses de primavera - verano para los cultivos de hoja caduca. Sin embargo, la JVRE debe abastecer la demanda existente en la tercera sección de la cuenca, el cual requiere de agua de manera constante, producto de la estructura de cultivo que manejan.	Por la naturaleza del modelo, la demanda se encuentra incorporada a través de los nodos, en función de los usos.
Gestión diferenciada en 7 sectores de la cuenca del río Elqui.		Cabe destacar que no corresponde a una asignación distinta por cada sector, sino más bien a una gestión diferenciada, la cual representa estructuras de cultivos y, por ende, demandas distintas. Los sectores son: Cochiguaz; Montegrande; Paihuano; río Turbio; Vicuña; Segunda y Tercera Sección de la cuenca.		Los resultados que arroja el modelo, en cuanto a la asignación y su distribución, será atribuida a partir de los 7 sectores que maneja la JVRE, para la visualización del comportamiento hídrico dentro de la cuenca y su posterior gestión.

Tipo de criterio	Criterios priorizados	Descripción criterio	Regla operacional previo al proyecto	Regla operacional posterior al proyecto
<b>CRITERIOS DE DISTRIBUCION</b>	Operación del embalse La Laguna entre los meses de diciembre y abril, o cuando la situación lo amerite.	El embalse La Laguna entra en funcionamiento entre el mes de diciembre y abril, meses de mayor demanda para la primera sección de la cuenca. No obstante, es utilizado también en meses donde los caudales sean más bajos de lo estimado y sea necesario operarlo para cumplir con el desmarque propuesto.	Dentro del modelo, el embalse La Laguna operaba cuando existiera una demanda que estuviera bajo cortina.	Para que pueda operar en los meses correspondientes, se aplicó una restricción de salida en el embalse ( <i>Maximum Hydraulic Outflow</i> ) a 0 m <sup>3</sup> /s durante los meses que no opera.
	Considerar la altura de nieve medida en La Laguna	Si se desea acercarse al dato más preciso sobre la oferta hídrica, la altura de nieve medida en el embalse La Laguna es un dato relevante para estimar dicho valor, ya que existe una correlación entre la altura de nieve y el afluente al embalse La Laguna. Dicho valor permite además tener una estimación y control de los caudales que puedan escurrir por las partes bajas de la cuenca.	En el modelo de Elqui, este dato no está considerado dentro de la decisión de distribución.	Se estableció en los <i>Key Assumption</i> la variable mediante un archivo .csv, el cual contiene el dato del total de nieve caída en La Laguna durante el invierno anterior a cada temporada. Este dato es considerado para la toma de decisión en la asignación.
	Considerar el caudal pasante en la estación fluviométrica de la DGA, río Cochiguaz en el Peñón.	Esta estación fluviométrica permite a la JVRE estar en alerta dependiendo del caudal medido en época de mayor demanda, ya que es una zona no regulada; por lo tanto, dependen netamente del agua que escurre por el río para solventar el desmarque propuesto. Para la JVRE, significa realizar manejos si los caudales pasantes en este punto no son los que estimaron en un principio.	Este criterio es parte de la decisión de operación dentro de los manejos que realiza la JVRE. El dato de caudal pasante en dicha estación permite ajustar el sistema y decidir cómo operar los embalses para gestionar el agua en función del desmarque propuesto.	En el modelo, este dato es conocido, y se incorpora a partir de los desmarques mensuales que se vayan generando y conlleva la decisión de utilizar el agua almacenada en los embalses cuando los caudales en este punto no cumplan con lo estipulado. Este dato está incorporado en la estación de control que permite calibrar el modelo.
	Considerar el caudal pasante en la estación fluviométrica de la DGA, río Elqui en Algarrobal	El caudal pasante por esta estación tiene una relación con el caudal afluente al embalse Puclaro, de esta manera permite a la JVRE gestionar en base al caudal entrante al embalse. Si este caudal no cumple con la expectativa, el embalse La Laguna es operado para conseguir el caudal necesario para satisfacer el desmarque propuesto	Al igual que el criterio anterior, el dato medido en este punto del río Elqui es conocido dentro del modelo.	Este criterio es incorporado dentro del algoritmo de decisión de acuerdo a los valores mensuales, condicionando la operación del embalse La Laguna de acuerdo a los caudales pasantes.

## ANEXO 2. Bibliografía consultada

---

- Coquimbo, Chile. Presentación realizada en XVI Encuentro INIA Iberoamérica. La Serena, Chile  
[http://wwwsp.inia.es/Rellnt/Cooperacion/Inialberoamerica/Documents/XVI%20Encuentro/Encuentro%20INIA%20Iberoam%C3%A9rica\\_PAL\\_%20Pablo%20Alvarez.pdf](http://wwwsp.inia.es/Rellnt/Cooperacion/Inialberoamerica/Documents/XVI%20Encuentro/Encuentro%20INIA%20Iberoam%C3%A9rica_PAL_%20Pablo%20Alvarez.pdf)
- CIREN-ODEPA. 2018. Catastro frutícola: principales resultados Región de Coquimbo. Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN) y Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (ODEPA). Ministerio de Agricultura, Chile  
<http://bibliotecadigital.ciren.cl/bitstream/handle/123456789/26852/Catastro%20Frut%C3%ADcola%20Regi%C3%B3n%20de%20Coquimbo.pdf>
- DGA. 2015. Atlas del Agua Chile 2016. Serie de Estudios Básicos DGA, S.E.B. N° 6. Dirección General de Aguas, Ministerio de Obras Públicas. Chile.  
<http://biblioteca.digital.gob.cl/handle/123456789/1382>
- DGA. 2017. Estimación de la demanda actual, proyecciones futuras y caracterización de la calidad de los recursos hídricos en Chile. Elaborado para DGA por Hídrica Consultores Spa y Aquaterra Ingenieros Ltda. Dirección General de Aguas, Ministerio de Obras Públicas. Chile.  
<https://snia.mop.gob.cl/sad/USO5795v2.pdf>
- DGA. 2018. Herramientas de gestión y actualización de los modelos numéricos del acuífero de Copiapó. Elaborado para DGA por Hídrica Consultores Spa. Dirección General de Aguas, Ministerio de Obras Públicas. Chile. <https://snia.mop.gob.cl/sad/SUB5851v1.pdf>
- Dourojeanni, A. 1994. La gestión del agua y las cuencas en América Latina. En: Revista de la Cepal. N° 53, agosto 1994. Pp. 111-127. Santiago, Chile.  
<https://archivo.cepal.org/pdfs/Waterguide/lcg1832s.pdf>
- Dourojeanni, A., Jouravlev, A. y G. Chávez. 2002. Gestión del agua a nivel de cuencas: teoría y práctica. Serie Recursos naturales e Infraestructura N° 47, División de Recursos Naturales e Infraestructura, Comisión Económica para América Latina y el Caribe – CEPAL.  
[http://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/6407/1/S028593\\_es.pdf](http://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/6407/1/S028593_es.pdf)
- GORE Coquimbo. 2014. Plan Emergencia por Escasez Hídrica Región de Coquimbo 2014. Gobierno Regional de Coquimbo. Chile.  
<http://www.intendenciacoquimbo.gov.cl/filesapp/PlanEmergenciaEscasez.pdf>
- GORE Coquimbo. 2019. Plan Emergencia Hídrica 2019-2021 Región de Coquimbo. Gobierno Regional de Coquimbo. Chile.  
[https://www.gorecoquimbo.cl/doc\\_footer/plan\\_emergencia\\_hidrica\\_2019\\_2021.pdf](https://www.gorecoquimbo.cl/doc_footer/plan_emergencia_hidrica_2019_2021.pdf)

- INIA. 2015. Ocho aspectos importantes relacionados con periodos de déficit hídrico en uva de mesa. Artículo electrónico. Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Ministerio de Agricultura, Chile.  
<https://www.inia.cl/blog/2015/11/28/ocho-aspectos-importantes-relacionados-con-periodos-de-deficit-hidrico-en-uva-de-mesa>
- Moriasi, D., Arnold, J., Van Liew, M., Bingner, R., Harmel, D. & T. Veith. 2007. Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. In: Transactions of the ASABE Vol. 50(3): 885–900.  
<https://elibrary.asabe.org/abstract.asp??JID=3&AID=23153&CID=t2007&v=50&i=3&T=1>
- Pascual, J. y M. Díaz. 2016. Guía práctica sobre la modelización hidrológica y el modelo HEC-HMS. Serie Cuadernos de Geomática N°4. Centro para el Conocimiento del Paisaje – CIVILSCAPE - Instituto IMDEA Agua. España.  
[http://eprints.imdea-agua.org:13000/711/1/Cuadernos%20de%20Geom%C3%A1tica%204\\_b.pdf](http://eprints.imdea-agua.org:13000/711/1/Cuadernos%20de%20Geom%C3%A1tica%204_b.pdf)
- SAG. 2018. Catastro Vitícola Nacional 2018. Servicio Agrícola y Ganadero. Ministerio de Agricultura, Chile. <https://www.sag.gob.cl/content/catastro-viticola-nacional-2018>
- Sociedad Agrícola del Norte. 2015. Situación actual del sector agrícola. Medidas necesarias para enfrentar la escasez hídrica. Región de Coquimbo 2015.  
[https://www.simfruit.cl/wp-content/uploads/2015/03/images\\_noticias\\_2015\\_01\\_150123-Situacion-Actual-del-Sector-Agricola-SANAG.pdf](https://www.simfruit.cl/wp-content/uploads/2015/03/images_noticias_2015_01_150123-Situacion-Actual-del-Sector-Agricola-SANAG.pdf)
- Zavala, H. y H. Trigos. 2008. Hidrología de la cuenca del Valle de Elqui. En: Los Sistemas Naturales de la Cuenca del río Elqui (Región de Coquimbo, Chile): Vulnerabilidad y Cambio del clima. Cepeda P. (ed): 66-164 (2008). Ediciones Universidad de La Serena, La Serena, Chile.  
<https://www.parc.ca/mcri/pdfs/books/cepeda/3.pdf>

### ANEXO 3. Entrevistas realizadas

---

Nombre	Cargo
Pablo Álvarez Latorre	Director Laboratorio PROMMRA Universidad de La Serena y coordinador del proyecto.
Alejandra Marín Alvarado	Ingeniera repartidora de aguas y Gerente de la Junta de Vigilancia del Río Elqui y sus Afluentes.
Pelayo Alonso Zamora	Presidente del Directorio, Junta de Vigilancia del Río Elqui y sus Afluentes.



147

