



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

IMPACTO APLICACIÓN CAUDAL ECOLÓGICO MÍNIMO RETROACTIVO EN CUENCAS DE LA IV, V Y VI REGIÓN.

RESUMEN EJECUTIVO

REALIZADO POR:

GEOHIDROLOGÍA CONSULTORES LTDA.

SIT N° 392

Santiago, Septiembre 2016

MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS

Ministro de Obras Públicas
Sr. Alberto Undurraga Vicuña

Director General de Aguas
Sr. Carlos Estévez Valencia

Inspector Fiscal
Sr. Héctor González

GeoHidrología Consultores Ltda.

Jefe de Proyecto
Sra. Francisca Chadwick

Especialistas
Sr. Eduardo Varas
Sr. Pablo Rengifo
Sr. David González

Coordinador de Proyecto
Sr. Ignacio Despouy

Profesionales
Srta. Gabriela Sepúlveda
Sr. Javier Uribe
Sr. Andrés Pucheu
Sr. Cristóbal Vargas

Para citar bibliográficamente este estudio, se recomienda hacerlo de esta forma:

DGA (2016), Impacto Aplicación Caudal Ecológico Mínimo Retroactivo en Cuencas de la IV, V y VI Región, SIT N° 392, Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación, Santiago, Chile, Realizado por: GeoHidrología Consultores Ltda.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1 RECOPIACIÓN Y ANÁLISIS DE ANTECEDENTES	1
2 ESTIMACIÓN DE DEMANDA HÍDRICA	3
3 CAUDAL ECOLÓGICO EN EL MARCO REGULATORIO CHILENO	4
4 IMPACTO EN LOS DERECHOS DE APROVECHAMIENTO Y LA DEMANDA REAL ..	6
5 EVALUACIÓN DE IMPACTO ECONÓMICO A ACTIVIDADES PRODUCTIVAS.....	11
6 COMENTARIOS Y CONCLUSIONES	14

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Situación Información CPA Derechos superficiales	2
Tabla 2. Comparación de información fluviométrica entre cuencas	2
Tabla 3. Resumen Levantamiento Información en terreno.....	3
Tabla 4. Demanda Hídrica y Derechos otorgados	4
Tabla 5. Oferta hídrica cuenca del río Limarí simulada (m ³ /s)	7
Tabla 6. Oferta hídrica cuenca del río Aconcagua simulada ¹ (m ³ /s)	8
Tabla 7. Oferta hídrica cuenca del río Rapel simulada ¹ (m ³ /s).....	8
Tabla 8. Déficit hídrico con inclusión de caudal ecológico en cuenca del río Limarí (m ³ /s)	10
Tabla 9. Déficit hídrico con inclusión de caudal ecológico en cuenca del río Aconcagua (m ³ /s)	10
.....	10
Tabla 10. Déficit hídrico con inclusión de caudal ecológico en cuenca del río Rapel (m ³ /s)	10
.....	10
Tabla 11. Pérdidas monetarias por concepto de exportación.....	12
Tabla 12 Pérdidas en producción para CODELCO División Andina y El Teniente	13

RESUMEN EJECUTIVO

La Dirección General de Aguas (DGA), a través de su Director Nacional Sr. Carlos Estévez, solicitó a GeoHidrología Consultores la elaboración de un estudio tendiente a evaluar el impacto que tendría establecer caudales ecológicos para todos los derechos de aprovechamiento existentes en forma retroactiva, ya que la DGA estima que este es un tema sensible que puede afectar a una serie de actividades productivas del país, así como también políticas públicas. Más aún, considerando el actual escenario que enfrentamos de sequía hidrológica y cambio climático.

Con este objetivo se realizó un balance de oferta y demanda hídrica en las cuencas de los ríos Limarí, Aconcagua y Rapel, considerando los siguientes escenarios:

- La situación actual,
- El escenario en que se aplique caudales ecológicos retroactivos a todos los derechos de agua existentes.

Este informe técnico se organizó con el mismo orden de los trabajos realizados, los cuales se sintetizan a continuación con sus principales resultados.

1 RECOPIACIÓN Y ANÁLISIS DE ANTECEDENTES

Se recopilaron y revisaron los siguientes antecedentes relevantes para el estudio:

- a) Estudios técnicos generales de caudales ecológicos y específicos de estimación de ofertas y demandas hídricas para cada cuenca de interés.
- b) Información de derechos de aprovechamiento superficiales y solicitudes en trámite contenidas en el Catastro Público de Aguas (CPA).

De las cuencas estudiadas, se identificó que menos del 50% de los derechos de agua superficiales, consuntivos y no consuntivos, tienen coordenadas que permiten georreferenciar la información. Como se observa en la Tabla 1, en la cuenca del río Limarí sólo el 15% de los derechos de agua cuenta con coordenadas. Esta situación puede estar explicada por la antigüedad en la fecha de otorgamiento de los derechos de agua, a diferencia del río Rapel que tiene derechos de agua más recientes y cerca de un 50% de estos derechos cuentan con coordenadas.

Los derechos que no tenían información de coordenadas fueron localizados a nivel de subcuenca utilizando la información referencial de ubicación de la bocatoma, fuente de abastecimiento y comuna. Con ello se logró localizar a nivel de subcuenca al 99% de los derechos de agua (Tabla 1), siendo el 1% restante derechos de agua muy antiguos.

Los caudales otorgados que se muestran en la Tabla 1 corresponden al total de los caudales consuntivos y no consuntivos, medidos en acción y en L/s (para efectos de este análisis se consideran como misma unidad). Se observa que las magnitudes de caudal otorgado son mayores en la cuenca del Río Rapel, dado que en esta cuenca existen derechos de agua para uso de energía hidroeléctrica no consuntivos.

Tabla 1. Situación Información CPA Derechos superficiales

Cuenca	N° Derechos	Caudal (Acciones +L/s)	N° derechos con coordenadas	Caudal con coordenadas (Acciones +L/s)	Derechos con coordenadas (%)	Derechos localizados en subcuenca
Río Limarí	1.514	75.265	234	13.896	15	1.511 (99%)
Río Aconcagua	1.017	421.339	196	247.654	20	1.013 (99%)
Río Rapel	1.210	1.776.060	565	894.496	47	1.192 (99%)

Fuente: Elaboración Propia con información del CPA, Noviembre 2014

- c) Se recopiló y analizó la totalidad de la estadística fluviométrica en las tres cuencas estudiadas, para la cual se cuenta con la información presentada en la Tabla 2.

Dada la información disponible, sólo se rellenó información en las estaciones de la cuenca del río Rapel, ya que el promedio de información es inferior a 30 años, longitud aceptada como representativa del régimen hidrológico a largo plazo.

La información original y rellenada fue analizada estadísticamente a través de un análisis de frecuencia, en base al cual se determinaron los caudales asociados a diferentes probabilidades de excedencia en todas las estaciones vigentes y con una cantidad de información mayor a 15 años.

Tabla 2. Comparación de información fluviométrica entre cuencas

Cuenca	Número de estaciones	Estaciones vigentes	Promedio años registro	Promedio años vigentes
Limarí	35	20	35	48,6
Aconcagua	34	11	18	40,4
Rapel	23	17	18	19,8

Fuente: Elaboración propia con información del BNA

- d) Se realizó un levantamiento de información en terreno en Juntas de Vigilancia existentes en las cuencas piloto (Tabla 3). Se recopiló información de acciones y equivalencias, usuarios, distribución del caudal (turnos), y especialmente la situación actual de escasez hídrica.

La mayoría de las reuniones se concretó en la cuenca del río Limarí, llegando a un 64% del total de asociaciones, lo que es bastante importante dada la sequía presente en la zona. En la cuenca del río Aconcagua sólo se pudo contactar a dos organizaciones, una de ellas aún no constituida, mientras que en la cuenca del río Rapel se pudo concretar reuniones con las Juntas de Vigilancia del río Cachapoal, río Claro y algunos esteros, sin lograr realizar reunión con alguna Junta de Vigilancia del río Tinguiririca.

Tabla 3. Resumen Levantamiento Información en terreno

Cuenca	Número de Juntas de Vigilancia/ Asociaciones de Canalistas	Reuniones Concretadas	% del total
Río Limarí	11	7	64%
Río Aconcagua	5	2	40%
Río Rapel	14	7	50%

Fuente: Elaboración Propia

Destaca en estas reuniones lo mencionado por don José González, presidente de la Junta de Vigilancia del río Limarí, y del Sistema La Paloma, respecto a que la Comisión Nacional de Riego (CNR) tiene dentro de sus instrumentos de financiamiento y fomento, incentivos para aumentar la superficie de riego, con su consecuente aumento de demanda del recurso hídrico, generando problemas de abastecimiento, en especial en los periodos de sequía.

Otro aspecto importante a destacar es que muchas comunidades de agua o asociaciones de canalistas pertenecen a una Junta de Vigilancia, y aparecen duplicados en la base de datos del registro de la DGA. Además, dado que no se pudo concretar reuniones con todas las organizaciones no se tiene claridad del total de acciones ni las equivalencias entre el valor de la acción y caudal.

2 ESTIMACIÓN DE DEMANDA HÍDRICA

Se realizó una estimación de demanda hídrica en las cuencas considerando los principales usos, concluyendo que el riego representa más del 90% de necesidad de agua en las cuencas del río Limarí y río Rapel, mientras que en el río Aconcagua representa el 77%.

La demanda de riego y agua potable en la cuenca del río Limarí se estimó usando como referencia la información del estudio "Diagnóstico Plan Maestro para la gestión de recursos hídricos, Región de Coquimbo" (CONIC-BF, 2013). La información usada es la zonificación y superficies de riego, la cual fue ajustada a las subcuencas del río Limarí, información de evapotranspiración potencial y coeficientes de cultivo.

Para las cuencas de río Aconcagua y río Rapel la demanda hídrica para riego se estimó en base al cálculo de evaporación real, y valores de coeficientes de cultivo tabulados para las zonas. Las superficies de riego y sus respectivos cultivos se obtuvieron del Censo Agropecuario (INE, 2007); dicha información está a nivel de distrito censal, por lo que se estimó para cada sección en el río Aconcagua, y para cada subcuenca del río Rapel.

En la estimación de demanda hídrica no se incluyó el sistema de riego usado en cada cuenca, por lo que no considera el factor eficiencia, lo que influye en la demanda hídrica total.

La demanda de agua potable para la cuenca del río Aconcagua está estimada en el Plan de Desarrollo de Esva (2010), y se revisó en el CPA los derechos asociados a APR. En la cuenca del río Rapel la información usada corresponde al estudio "Estimación de demanda de agua y proyecciones futuras" (Ayala, Cabrera y Asociados, 2007), dado que era la información disponible.

Con respecto a la minería, la demanda se basó en la información de los derechos superficiales consuntivos del CPA, cuyos titulares fueran empresas mineras, y que no estuvieran afectos a pago de patente por no uso. La estimación se hizo considerando a la gran minería, que en las cuencas estudiadas corresponde a las faenas de Codelco Andina y El Teniente.

En la Tabla 4 se muestran las demandas hídricas por distintos usos para cada cuenca, y los datos de caudal otorgado de uso consuntivo y caudal por concepto de organizaciones de usuarios, para lo que se consideró que una acción equivale a 1 L/s.

Cabe señalar que la información de caudal otorgado del CPA puede estar sobreestimada, producto de que algunos registros corresponderían a perfeccionamientos, o en ocasiones el caudal mostrado no corresponde al caudal real otorgado. Además, como ya se mencionó, se puede dar el caso de que las organizaciones de usuarios que pertenecen a una Junta de Vigilancia aparezcan duplicados en el registro de la DGA, sumado a que no existe claridad del total de acciones de cada usuario ni las equivalencias entre acción y caudal.

Tabla 4. Demanda Hídrica y Derechos otorgados

Cuenca	Demanda Hídrica (m ³ /s)				Caudal Otorgado consuntivo (m ³ /s)	Caudal Usuarios (m ³ /s)
	Riego	Agua Potable	Minería	Industria		
Río Limarí	16,3	0,4	-	-	44,2	41,0
Río Aconcagua	18,2	0,5	1,0	3,9	208,9	83,0
Río Rapel	96,0	0,8	8,7	1,2	159,8	321,2

Fuente: Elaboración Propia

3 CAUDAL ECOLÓGICO EN EL MARCO REGULATORIO CHILENO

Como parte del estudio se entrega el marco legal y normativo para definir caudales ecológicos, considerando la metodología vigente establecida en el Decreto Supremo N°71 (Ministerio del Medio Ambiente (MMA), 2014), que modifica el Decreto Supremo N°14 (MMA, 2012) al reconocer que la aplicación de los criterios establecidos para la determinación del caudal ecológico mínimo han demostrado no ser los más idóneos para cumplir con la finalidad de velar por la preservación de la naturaleza y la protección del medio ambiente (como la exigencia del uso de los últimos 25 años de estadística hidrológicas, y la determinación de caudales ecológicos mínimas en los casos de vertientes, lagos ni lagunas).

La metodología vigente contempla dos criterios para el establecimiento del caudal ecológico, los que fueron utilizados para estimarlos en todas las estaciones fluviométricas de cuencas pilotos con información suficiente para el análisis.

De la aplicación de ambos criterios se observó que las diferencias porcentuales entre ambas estimaciones son elevadas en la cuenca del río Limarí, donde los caudales medios son del orden de litros por segundo, y disminuyen en las cuencas de Aconcagua y Copiapó, donde los caudales medios son del orden de metros cúbicos por segundo. Esto indica que las

metodologías entregan resultados similares en las cuencas de la zona centro sur, donde los gastos medios son más altos.

Otro punto a destacar es que es posible obtener caudales ecológicos mínimos cercanos a cero en cauces con bajos caudales. Esto levanta la inquietud si es correcto establecer caudales ecológicos mínimos nulos.

En este contexto es importante destacar que, aunque exista una metodología definida para la estimación del caudal ecológico, los análisis técnicos hidrológicos que es necesario realizar para aplicar estas metodologías son tan variados y manipulables, que se puede tener muchas estimaciones para un mismo tramo. Esto pasa por ejemplo con las estadísticas de caudales utilizadas, las que se modifican con cada año de información adicional.

En este sentido se considera necesario acotar aún más los métodos de cálculo o, en su defecto, estimar a nivel nacional los valores de caudales ecológicos, de manera de estandarizar la metodología de cálculo. Por ejemplo, como parte de una actualización del Balance Hídrico Nacional, y de esta manera contar con una fuente referencial para su asignación a cada nuevo derecho.

Con respecto a posibles contradicciones entre la normativa vigente de la Dirección General de Aguas y otros servicios, se revisó de manera general las relaciones que la normativa tiene con el Servicio de Evaluación Ambiental (SEA) y las políticas de fomento al riego que poseen los servicios asociados al Ministerio de Agricultura.

Frente al establecimiento de un caudal ecológico por el SEA, la DGA podrá pronunciarse con respecto a la magnitud de dicho caudal ambiental, indicando que el caudal ecológico dentro del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA) tiene un concepto más amplio que el del cálculo meramente hidrológico, y tiene por objetivo mantener la biodiversidad tanto en el agua como en su medio ambiente asociado.

El establecimiento del caudal ecológico en el SEIA no presenta la posibilidad de modificar el caudal ecológico de los derechos de agua en forma retroactiva. En el caso de los proyectos que ingresan al SEIA, el caudal ecológico de los derechos de agua debe ser corroborado a fin de no afectar el objetivo de mantener la biodiversidad tanto en el agua como en su medio ambiente asociado; además se deben considerar metodologías que incluyan variables ecológicas y antrópicas.

En la relación con los servicios dependientes del Ministerio de Agricultura, se observa que existen incentivos contrapuestos al promover el aumento de áreas de riego y por otro lado la disminución de la oferta hídrica por medio de la imposición de caudales ecológicos a respetar en el cauce. En este sentido, es necesario analizar la situación particular de cada cuenca y subcuenca, y determinar a través de un instrumento de planificación para la gestión de recursos hídricos, cuáles son los objetivos de cada localidad y de esta forma actuar de manera coordinada entre los distintos servicios de gobierno.

4 IMPACTO EN LOS DERECHOS DE APROVECHAMIENTO Y LA DEMANDA REAL

Para la evaluación de los impactos del establecimiento de caudales ecológicos en las cuencas del río Limarí, Aconcagua y Rapel, se desarrolló un modelo de simulación de caudales.

El modelo tiene dos aplicaciones:

- Extrapolar información fluviométrica a puntos sin control, para obtener la disponibilidad hídrica teórica y así establecer un balance hídrico en el largo plazo en distintos puntos de interés,
- Evaluar el impacto del establecimiento de caudales ecológicos a la totalidad de los derechos de aprovechamiento en el déficit hídrico, mediante la realización específica de la serie histórica.

Para el análisis se considera como disponibilidad hídrica al caudal asociado a 85% de probabilidad de excedencia para el punto de interés, y como déficit hídrico la demanda no satisfecha para cada subcuenca o sección (según las demandas estimadas en el Capítulo 5 del Informe Final).

El balance entre oferta y demanda se realizó utilizando un modelo de simulación de caudales programado en ExtendSim, utilizando series de caudales medios mensuales.

La evaluación se realiza a nivel agregado para lo cual cada cuenca se dividió en subcuencas o secciones de río. Éstas se representan en el modelo como un módulo (subcuenca) en el cual se realiza el balance entre oferta y demanda que la caracteriza. Para ello en cada módulo se unifican todas las demandas hídricas de cada subcuenca o sección, y se ubica en la salida de cada unidad.

Para el caso particular de los derechos mineros en las cuencas del río Aconcagua y Rapel, se generó un módulo subsubcuenca independiente para una mejor evaluación de los efectos locales de esta actividad económica, y se ubicaron en el tramo de río desde donde se producen las extracciones (río Blanco en la cuenca del Aconcagua y río Coya, en la del río Rapel).

Los caudales de entrada al modelo, ubicados en la cabecera de los cauces considerados, se asumen representativos del régimen natural (pese a que se reconoce intervención antrópica aguas arriba).

Para la modelación de caudales, se consideraron 29 años para las cuencas de los ríos Limarí y Rapel, y 44 años para la cuenca del río Aconcagua, suficientes para una estimación a largo plazo.

Como una primera etapa, se realizó una calibración de los parámetros del modelo ajustando el más sensible (g/p), el cual determina las ganancias o pérdidas de un tramo de río, y manteniendo los demás fijos de acuerdo a valores teóricos que determinan los escurrimientos superficiales, como la propagación de caudales.

Para la evaluación de los efectos de la aplicación de la normativa se realizó un balance de oferta - demanda en la situación actual, y otro en la situación con establecimiento de caudal

ecológico, siendo la diferencia entre dichos balances el impacto de aplicar una nueva normativa.

Para el primer escenario se asumió que en la actualidad, y pese a la existencia de derechos de aprovechamiento de agua constituidos con caudales ecológicos, éstos no se respetan por problemas operativos, debido a la coexistencia en un mismo cauce de derechos con y otros sin caudal ecológico, lo que dificulta la fiscalización y exigencia del cumplimiento de la norma.

Del análisis del balance entre oferta y demanda en el largo plazo (Tabla 5, Tabla 6 y Tabla 7) se observa que la disponibilidad hídrica en las partes altas de cada cuenca es suficiente para cubrir las demandas, salvo en río Huatulame en Limarí y Estero Alhué en Rapel, donde las demandas son mayores que las ofertas. Hacia aguas abajo los requerimientos hídricos aumentan y con eso también lo hace el déficit hídrico. Es importante mencionar que para la estimación del caudal demandado y la evaluación de los impactos de la inclusión del caudal ecológico en la cuenca del río Aconcagua, no se consideraron 2,86 m³/s del sector industrial por no tener claridad de la fuente de estas aguas.

En el largo plazo, la inclusión del caudal ecológico afecta principalmente a aquellas subcuencas que se encuentran en su límite de uso hídrico (es decir, las demandas son cercanas a la oferta hídrica), como el Río Hurtado en Limarí, Tercera y Cuarta sección en Aconcagua, y Río Rapel en Rapel.

Tabla 5. Oferta hídrica cuenca del río Limarí simulada¹ (m³/s)

Subcuenca Limarí	Q med.	Q 20%	Q 50%	Q 85%	Q eco	Qdda	Q85%-Qdda	Q85%-Qdda-Qeco
Río Hurtado Alto	2,8	3,9	2,4	1,3	0,3	0,6	0,7	0,4
Río Hurtado Bajo	1,4	2,0	1,2	0,7	0,2	0,6	0,1	-0,1
Río Grande Medio	6,3	9,2	4,5	1,9	0,6	1,0	0,9	0,3
Río Grande Alto	6,3	9,0	4,9	2,4	0,5	1,3	1,1	0,6
Río Huatulame	3,0	4,5	1,7	0,5	0,0	3,8	-3,3	-3,3
Río Grande Bajo	10,2	14,9	6,0	1,9	0,3	0,8	1,1	0,8
Río Limarí	13,8	19,7	9,8	4,2	1,6	8,6	-4,4	-6,0

Fuente: Elaboración Propia

¹ Q med.: Caudal medio simulado

Q20%: Caudal asociado al 20% de probabilidad de excedencia

Q 50%: Caudal asociado al 50% de probabilidad de excedencia

Q 85%: Caudal asociado al 85% de probabilidad de excedencia

Qeco: Caudal ecológico

Qdda: Caudal de demanda estimado

Q85%-Qdda: Balance entre oferta hídrica (asociada a 85% de prob. De excedencia) y demanda estimada

Q85%-Qdda-Qeco: Balance entre oferta hídrica (asociada a 85% de prob. De excedencia), demanda estimada y demanda por caudal ecológico

Tabla 6. Oferta hídrica cuenca del río Aconcagua simulada¹ (m³/s)

Subcuenca Aconcagua	Q med.	Q 20%	Q 50%	Q 85%	Q eco	Qdda	Q85%-Qdda	Q85%-Qdda-Qeco
Primera sección (minería)	9,1	13,8	7,1	3,2	0,9	0,8	2,4	1,6
Primera sección	34,3	48,7	29,4	15,8	4,9	4,5	11,3	6,4
Putando	7,5	10,8	6,0	2,9	0,9	2,8	0,1	-0,8
Segunda sección	24,9	36,7	20,4	9,9	4,9	4,9	5,0	0,1
Tercera sección	20,2	36,4	13,2	3,8	4,9	5,0	-1,2	-6,1
Cuarta sección	16,3	29,1	10,3	2,3	6,1	2,5	-0,2	-6,3

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 7. Oferta hídrica cuenca del río Rapel simulada¹ (m³/s)

Subcuenca Rapel	Q med.	Q 20%	Q 50%	Q 85%	Q eco	Qdda	Q85%-Qdda	Q85%-Qdda-Qeco
Tinguiririca Alto	59,7	72,7	57,6	43,2	7,7	1,2	42,0	34,2
Tinguiririca Bajo	64,8	81,0	61,6	44,0	9,1	31,8	12,2	3,1
Cachapoal (minería)	2,3	3,3	2,0	1,1	0,1	7,5	-6,4	-6,5
Cachapoal Alto	47,5	58,6	45,7	33,6	9,3	0,8	32,8	23,6
Cachapoal Bajo	93,2	119,2	87,8	60,3	7,4	37,2	23,1	15,7
Estero Alhué	5,4	7,8	3,7	1,5	0,5	4,9	-3,4	-3,9
Río Rapel	94,0	138,5	77,3	37,6	17,1	23,6	14,0	-3,1

Fuente: Elaboración Propia

Para evaluar el impacto que tendría el establecimiento de caudales ecológicos en la demanda hídrica de cada cuenca, se comparó la situación actual (que no considera el establecimiento de caudal ecológico) con la situación en que cada punto de control debe dejar pasar el caudal ecológico definido para cada subcuenca.

Para ello se estimó el déficit hídrico en ambas situaciones, siendo la diferencia entre ellos el efecto del establecimiento de los caudales ecológicos en el sistema. Este análisis se presenta en la Tabla 8 para la cuenca del Limarí, Tabla 9 para Aconcagua y Tabla 10 para Rapel. En cada tabla se presenta por subcuenca la demanda hídrica total (Total Q), los déficit hídrico en la situación actual (Sin Q_{eco}) y con el establecimiento de un caudal ecológico (Con Q_{eco}), y el impacto de implementar esta medida (Dif y Dif %), todo esto para cada escenario de análisis. Este impacto se calcula como la diferencia entre los déficit hídricos estimados en base a la demanda hídrica total (Ecuación 1).

$$Dif (\%) = \frac{Con\ Q_{eco} - Sin\ Q_{eco}}{Total\ Q} \quad \text{Ecuación 1}$$

En general, el mayor impacto se observa en la cuenca del río Aconcagua, mientras que el menor ocurre en la cuenca del río Limarí. En el caso del Limarí el bajo impacto se explica porque en la situación actual la cuenca ya se encuentra en un estado deficitario importante,

por lo que la influencia de la normativa en el déficit sería menor; por el contrario, la cuenca del río Rapel se encontraría en una situación hídrica más favorable, con una oferta hídrica disponible para satisfacer gran parte de la demanda, por lo que el impacto también sería moderado. En cambio, para la cuenca del Aconcagua, que es una situación intermedia entre las anteriores, la inclusión de un caudal ecológico tendría un efecto considerable ya que su situación sería más cercana a un equilibrio entre oferta y demanda, por lo que esta normativa tendería hacia una mayor demanda y por ende a un mayor déficit hídrico.

Del análisis acotado a los periodos de bajos caudales, en el que naturalmente se produce un mayor conflicto con los usuarios para respetar los caudales ecológicos, se observa que para la cuenca del río Limarí el impacto de la nueva normativa no varía significativamente, independiente del período considerado, mientras que para las otras cuencas, el impacto aumenta para períodos más críticos. Estos ocurre principalmente en la cuenca del Aconcagua donde el déficit hídrico aumenta a 13 m³/s en el periodo marzo de 2010 a diciembre de 2013, que equivale al 60% de la demanda total (en Rapel el déficit aumenta a un 35% de la demanda). El impacto mayor para clase cuencas de la zona central-sur, también está explicado porque la estimación del caudal ecológico depende de la estadística fluviométrica, lo que en estas cuencas resulta en una demanda ecológica mayor.

Los resultados presentados se acotan a demandas asociadas a derechos otorgados considerando la disponibilidad hídrica como el caudal de 85% de probabilidad de excedencia, y de tipo permanente y consuntivo. Se espera que en demandas asociadas a derechos eventuales, los impactos de respetar un caudal ecológico sean menores al ser dependientes de la disponibilidad hídrica.

Tabla 8. Déficit hídrico con inclusión de caudal ecológico en cuenca del río Limarí (m³/s)

Sección	Total Q	Déficit actual (toda la serie)				Déficit años Q _{ma} <Q50%				Déficit (mar10-dic13)			
		Sin Q _{eco}	Con Q _{eco}	Dif.	Dif (%)	Sin Q _{eco}	Con Q _{eco}	Dif.	Dif (%)	Sin Q _{eco}	Con Q _{eco}	Dif.	Dif (%)
Río Grande Alto	1,26	0,08	0,13	0,04	3,5	0,12	0,20	0,07	5,6	0,26	0,40	0,14	11,4
Río Grande Medio	1,02	0,25	0,27	0,03	2,7	0,36	0,41	0,05	4,4	0,57	0,64	0,07	6,7
Río Grande Bajo	0,78	0,01	0,02	0,01	1,3	0,01	0,03	0,02	2,1	0,20	0,23	0,03	4,2
Río Limarí	8,64	2,99	3,68	0,69	8,0	3,74	4,56	0,82	9,5	6,30	6,87	0,57	6,6
Río Hurtado	1,29	0,13	0,17	0,03	2,7	0,23	0,29	0,06	4,3	0,39	0,47	0,08	6,3
Río Huatulame	3,79	2,32	2,41	0,09	2,4	2,24	2,30	0,05	1,4	3,12	3,13	0,01	0,2
Total	16,78	5,78	6,68	0,90	5,4	6,71	7,77	1,06	6,3	10,85	11,75	0,90	5,4

Tabla 9. Déficit hídrico con inclusión de caudal ecológico en cuenca del río Aconcagua (m³/s)

Sección	Total Q	Déficit actual (toda la serie)				Déficit años Q _{ma} <Q50%				Déficit (mar10-dic13)			
		Sin Q _{eco}	Con Q _{eco}	Dif.	Dif (%)	Sin Q _{eco}	Con Q _{eco}	Dif.	Dif (%)	Sin Q _{eco}	Con Q _{eco}	Dif.	Dif (%)
Primera	5,32	0,02	0,43	0,41	7,7	0,03	0,89	0,86	16,3	0,06	1,19	1,13	21,2
Segunda	4,86	0,14	0,83	0,69	14,3	0,31	1,79	1,48	30,5	0,55	3,36	2,81	57,9
Tercera	4,96	1,06	1,93	0,87	17,5	2,28	3,38	1,10	22,3	3,88	4,82	0,94	19,0
Cuarta	2,55	0,81	1,23	0,42	16,5	1,52	1,97	0,45	17,5	2,45	2,55	0,10	4,1
Putauendo	2,82	0,39	0,62	0,24	8,4	0,58	0,92	0,34	12,1	0,61	1,13	0,52	18,3
Total	20,51	2,41	5,04	2,63	12,8	4,72	8,96	4,24	20,7	7,54	13,05	5,51	26,8

Tabla 10. Déficit hídrico con inclusión de caudal ecológico en cuenca del río Rapel (m³/s)

Sección	Total Q	Déficit actual (toda la serie)				Déficit años Q _{ma} <Q50%				Déficit (mar10-dic13)			
		Sin Q _{eco}	Con Q _{eco}	Dif.	Dif (%)	Sin Q _{eco}	Con Q _{eco}	Dif.	Dif (%)	Sin Q _{eco}	Con Q _{eco}	Dif.	Dif (%)
Cachapoal Bajo	37,40	0,58	1,34	0,75	2,0	1,20	2,73	1,53	4,1	1,41	3,89	2,48	6,6
Cachapoal Alto	8,44	5,60	5,72	0,12	1,4	6,12	6,31	0,18	2,1	6,84	7,04	0,21	2,5
Río Rapel	23,04	3,17	5,07	1,90	8,2	5,55	8,78	3,24	14,1	10,64	15,02	4,38	19,0
Estero Alhué	4,86	3,13	3,47	0,34	7,0	3,49	3,91	0,42	8,6	3,55	3,86	0,31	6,4
Tinguiririca Alto	1,21	0,00	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00	0,00	0,0
Tinguiririca Bajo	31,75	0,78	3,08	2,30	7,2	1,26	4,40	3,13	9,9	2,12	7,40	5,27	16,6
Total	106,70	13,26	18,68	5,41	5,1	17,62	26,13	8,50	8,0	24,55	37,20	12,65	11,9

5 EVALUACIÓN DE IMPACTO ECONÓMICO A ACTIVIDADES PRODUCTIVAS

Se evaluó el impacto que generaría la aplicación del caudal ecológico sobre las actividades productivas desarrolladas en las cuencas, principalmente agricultura y minería.

Las pérdidas se estimaron en los tres periodos analizados en la modelación, es decir:

- efecto en toda la serie modelada;
- efecto sólo en aquellos años en que el caudal medio anual (Q_{ma}) es menor que el caudal de 50% de excedencia en cada subcuenca;
- efecto en un periodo particularmente seco, comprendido entre marzo de 2010 a diciembre de 2013 para las cuencas del río Aconcagua y Rapel, y para la cuenca del río Limarí se incluyó el año 2014.

El impacto en la actividad agrícola se estimó en base al caudal de la demanda hídrica de las zonas cultivadas de cada cuenca y las hectáreas involucradas. Con ello se obtuvieron las hectáreas que dejarían de regarse si ocurre una disminución en la oferta hídrica producto de la aplicación del caudal ecológico.

En la cuenca del río Limarí, considerando el periodo de sequía, se estima que se dejan de regar 23.115 ha, las que aumentan en un 14% si se aplica caudal ecológico, llegando a un déficit de 26.286 ha.

El déficit sin caudal ecológico implica una pérdida en hectáreas de riego que fluctúa entre un 21% (en un escenario que considera toda la serie) a un 45% (periodo de sequía) con respecto a la superficie total destinada a riego en la cuenca. El establecimiento de caudales ecológicos provoca que estas pérdidas aumenten entre 25% a 51%.

En la cuenca del río Aconcagua, el déficit alcanza cerca de las 20.000 ha, lo que aumenta a 36.200 ha (84%) si se aplica el caudal ecológico, considerando el periodo de sequía.

Las pérdidas en relación a la superficie total de riego de la cuenca fluctúan entre un 11% a 32%, sin caudal ecológico, para el escenario que considera la serie completa y en el escenario de sequía, respectivamente. Al aplicar el caudal ecológico a los derechos, las pérdidas aumentan entre un 24% a 58%.

Por último, en la cuenca del río Rapel, se observa que en el periodo de sequía las pérdidas en hectáreas regadas ascienden a 23.569 ha, y la aplicación del caudal ecológico incrementa éstas en más del 100%, llegando a 50.226 ha de déficit.

En esta zona las superficies de riego disminuyen entre un 5% a un 10% respecto al área total de riego de Rapel, y al aplicar el caudal ecológico, estas disminuciones aumentan entre un 10% a 21%.

De esta manera, considerando toda la serie analizada, la aplicación del caudal ecológico implica disminuciones en las superficies de riego de aproximadamente un 25% en las cuencas del río Limarí y río Aconcagua, mientras que en la cuenca del río Rapel, la disminución de las superficies de riego es de un 10%. En un periodo de sequía, el impacto de aplicar caudal ecológico es mayor sobre las superficies de riego, siendo del orden de un 54% la disminución de hectáreas en Limarí y Aconcagua, y de un 21% en Rapel.

La disminución de hectáreas de riego implica que baje la producción agrícola, por lo que se cuantificó la cantidad de frutas, verduras o derivados que dejan de producirse, para cada cuenca, en base a información de productividad promedio de cada especie.

La disminución en la productividad implica una baja en el ingreso monetario de los agricultores. Para cuantificar estas pérdidas se estimó el impacto por concepto de exportación, para lo cual se usó la información del porcentaje de producción frutícola que se exporta, y las estadísticas de monto de exportación de la ODEPA. Las pérdidas monetarias (en millones de dólares, MM USD) serían del orden de MM USD38 para la cuenca del río Limarí, MM USD 171 en Aconcagua, y MM USD 54 en Rapel (Tabla 11). A este impacto se debe incluir las pérdidas por concepto de venta en el mercado nacional.

Tabla 11. Pérdidas monetarias por concepto de exportación

Especie	Limarí	Aconcagua	Rapel
	Millones de dólares (FOB)	Millones de dólares (FOB)	Millones de dólares (FOB)
Mandarino	14		
Nogal		16	
Palto	9	34	
Vid de mesa	15	120	38
Ciruelo europeo			2
Manzano rojo			14
Total	38	171	54

Fuente: Elaboración Propia

Para la evaluación de los impactos en la actividad minera, el análisis se enfocó en las cuencas de los ríos Aconcagua y Rapel, en donde se encuentran operando Andina y El Teniente respectivamente, ambas de CODELCO.

De acuerdo a los resultados del modelo de simulación, en relación al déficit hídrico para minería en Aconcagua, se observa que no hay déficit de agua en la situación base, es decir, situación sin caudal ecológico. Al aplicar el caudal ecológico, el déficit aumenta, llegando a 0,37 m³/s en un periodo de sequía.

Para el análisis en la cuenca del río Rapel se estimó el déficit hídrico de acuerdo a dos escenarios, uno con la demandas igual a todos los derechos consuntivos otorgados (a), y otro con la demandas informados por COCHILCO (b).

El déficit de agua en esta cuenca asciende a 6,8 m³/s para el primer escenario, el cual aumenta a 7 m³/s considerando la aplicación de caudal ecológico. Para el segundo escenario, la aplicación de caudal ecológico no tiene mayor impacto en la disponibilidad de agua para minería, y es del orden de 0,06 m³/s.

Para estimar el impacto en la producción de cobre que generaría la inclusión del caudal ecológico, se consideraron los datos de producción de tonelada de mineral del año 2014, de acuerdo a las estadísticas de COCHILCO. Las pérdidas estimadas para periodo de sequía con aplicación de caudal ecológico se presentan en la Tabla 12.

Tabla 12 Pérdidas en producción para CODELCO División Andina y El Teniente

Sector	Aumento de déficit con Qeco (m ³ /s)	Toneladas de cobre	% Producción anual	US\$ Millones
Aconcagua	0,31	53.593	23%	365
Rapel a	0,13	37.064	8%	252
Rapel b	0,06	17.106	4%	116

Fuente: Elaboración Propia

Adicionalmente, se evaluó el impacto en los servicios sanitarios, en particular para cuenca del río Aconcagua, dada la información disponible. El abastecimiento de agua potable en las zonas urbanas está a cargo de la compañía Esval. Considerando la producción de las captaciones superficiales de la compañía, y el porcentaje de la demanda de agua potable por sobre la demanda total de la cuenca, se tiene que el déficit hídrico en un periodo de sequía es de 0,8 m³/s sin caudal ecológico, mientras que al aplicar caudal ecológico este déficit aumenta a 1,4 m³/s.

Para cuantificar este impacto, en este análisis se evaluó la situación en el sistema Gran Valparaíso, que es el que cuenta con mayor población, llegando a una dotación de 179 L/hab/día en el año 2014. Con la inclusión de caudal ecológico en el periodo de sequía, se tiene que la dotación baja a 92 L/hab/día, o bien, manteniendo la dotación diaria, la población abastecida baja en casi 2.000 persona.

Finalmente, considerando las pérdidas mencionadas para los sectores productivos, se calculó el monto que implicaría suplir dichas pérdidas. Para ellos se estimó el precio del agua en base a las transacciones de derechos, en base a la información del Conservador de Bienes Raíces (CBR), disponible en el portal web de la DGA. Se analizaron las transacciones que sólo consideraban compraventa de derechos de agua y no involucraban otros bienes tales como propiedad o predio. Los precios de las transacciones fueron recalculados en UF, de acuerdo al año en que se realizó la compraventa, considerando que una acción equivale a 1 L/s.

De este análisis se desprende que la estimación del precio del agua tiene una alta variabilidad interregional y es dependiente de la metodología, supuestos y períodos considerados. El análisis presentado en este estudio está orientado en la evaluación hidrológica e hídrica de los impactos de implementar una normativa que establezca caudales ecológicos retroactivos, y por tanto el análisis económico es meramente referencial, y una evaluación precisa y detallada deberá considerar los aspectos particulares que se involucran, además de una evaluación social debido al bien considerado.

Para la cuenca del río Limarí, se estima un precio del agua entre 200 y 400 UF/L/s, con el análisis presentado en este estudio y en presentado por EMG Consultores (2011). En Aconcagua es donde se obtienen mayor variabilidad en la estimación, con un valor del orden de 1.200 UF/L/s obtenido en este estudio, y entre 50 y 80 UF/L/s por EMG Consultores (2011) y ODEPA (2010), respectivamente. En Rapel el precio del agua estimado es de 350 UF/L/s, y no se cuenta con referencias para comparar este valor. La alta variabilidad de la estimación, provoca por tanto una alta variabilidad en la estimación económica del impacto que tendría establecer la normativa evaluada.

6 COMENTARIOS Y CONCLUSIONES

Motivado por la discusión que permitiría el establecimiento retroactivo de caudales ecológicos mínimos para todos los derechos de aprovechamiento existentes, este trabajo tuvo por objetivo identificar y evaluar los posibles impactos que generaría esta normativa. Para ello se analizó la situación en las cuencas del río Limarí, río Aconcagua y río Rapel.

Para el desarrollo del estudio se levantó información que permitió conocer la situación de oferta y demanda hídrica en la zona, y con ello se desarrolló un modelo de simulación de caudales superficiales orientado a la evaluación del objetivo planteado.

Una de las principales fuentes de información fue el Catastro Público de Aguas (CPA), lo que permitió tener una aproximación de la presión hídrica sobre las cuencas, los usos y la existencia de caudal ecológico estimado.

Los principales comentarios y conclusiones, se presentan a continuación.

- Existe cierta incertidumbre en el análisis del total de derechos y caudal otorgado, producto de situaciones tales como: derechos duplicados al cambiar de titular (transferencia), cambios de punto de captación, perfeccionamientos, entre otros, por lo que no se tiene claridad si es que se está usando información duplicada.

Con respecto al análisis de caudal otorgado, el principal problema es que se presenta tanto en L/s como en acción, lo que dificulta realizar análisis y sumatorias para determinar las extracciones debido a la variabilidad en la equivalencia entre ambas definiciones.

- Las reuniones con las Juntas de Vigilancia permitieron conocer el funcionamiento de los sistemas, y además conocer la situación actual en la que se encuentran, bajo una escasez hídrica. Si bien se recabó suficiente información, contar con la dotación por canal resulta incierta, y sólo en algunos casos se tuvo dicho dato. Por esa razón, para los análisis se asumió la dotación 1 acción a 1 L/s.
- En cuanto a derechos con caudal ecológico asociado, sólo el 8% del total en las 3 cuencas posee caudal ecológico, debido principalmente a que la mayoría de ellos corresponden a derechos otorgados antes de la década del 90.

Del análisis se constató que para un mismo río hay distintos caudales ecológicos estimados, dada la diferencia de año de otorgamiento, y por ende, distinta metodología aplicada para estimar dicho caudal, principalmente al considerar la variación estacional de los caudales a nivel mensual (DGA,2008). También la convivencia para un mismo tramo de río de derechos otorgados con un establecimiento de caudal ecológico mínimo (en un bajo porcentaje) y otros sin esta restricción, lo que dificulta el cumplimiento y fiscalización de la normativa.

Como resultado, se observa que las consecuencias de establecer un caudal ecológico obligatorio a todos los derechos son diferentes según cada zona y su disponibilidad hídrica.

- De la evaluación de los impactos hídricos e hidrológicos, se estima que la cuenca que se vería más afectada sería la del río Aconcagua, mientras que en la cuenca del río Limarí los efectos de la normativa serían menores. En el caso del Limarí el bajo

impacto se explica porque en la situación actual la cuenca ya se encuentra en un estado deficitario importante, por lo que la influencia de la normativa en el déficit sería menor; por el contrario, la cuenca del río Rapel se encontraría en una situación hídrica más favorable, con una oferta hídrica disponible para satisfacer gran parte de la demanda, por lo que el impacto también sería moderado. En cambio, para la cuenca del Aconcagua, que es una situación hídrica intermedia entre las anteriores, la inclusión de un caudal ecológico tendría un efecto considerable ya que su situación sería más cercana a un equilibrio entre oferta y demanda, por lo que esta normativa tendería hacia una mayor demanda y por ende a un mayor déficit hídrico.

- Para analizar los resultados obtenidos, es importante tener en cuenta las limitaciones y supuestos considerados para la construcción del modelo de simulación de caudales:
 - La escala del modelo permite análisis regionales desagregados a nivel de subcuenca. Esta escala, si bien permite una buena aproximación y comprensión de los balances hídrico, no favorece para evaluación de comportamientos locales en tramos acotados de ríos y así representar, por ejemplo, condiciones específicas de determinadas juntas de vigilancia (río Rapel y Mostazal en la cuenca del Limarí, 3° sección en la cuenca del Aconcagua, y 2° sección en la cuenca del río Rapel).
 - Es un modelo orientado a la evaluación hídrica superficial que no integra la interacción de éste con el sistema subterráneo. Este supuesto es válido a escala regional, pero a medida que se refina la escala de trabajo (más local) el efecto se vuelve más importante.
 - Dada la información disponible, se asumen representativos del régimen natural (sin intervención antrópica) los caudales de entrada al modelo dados por las estadísticas de las estaciones fluviométricas, ubicados en las cabeceras de los cauces considerados.
 - Para la evaluación del impacto del establecimiento de caudales ecológicos se asumió que en la actualidad éstos no se respetan, lo que es consistente con la operatividad que hoy en día tiene respetar caudales ecológicos en bocatomas donde conviven derechos con y sin caudal ecológico (este supuesto no incluye caudales ecológicos establecidos por el SEA).
 - Para la estimación de demandas se consideraron sólo derechos de aprovechamiento de aguas superficiales, consuntivos y de ejercicio permanente.
- Se considera que el establecimiento de los caudales ecológicos debería ser definido para cada zona en particular como objetivos a perseguir, por ejemplo, dentro de los planes estratégicos de recursos hídricos, considerando su situación histórica, disponibilidad hídrica y vocación productiva, de tal manera de alinear a los servicios públicos y actores privados a cumplir dicho objetivo.
- Un análisis adicional en este estudio fue la estimación del precio del agua de donde se desprende que la estimación del precio del agua tiene una alta variabilidad interregional y es dependiente de la metodología, supuestos y períodos considerados. El análisis presentado en este estudio está orientado en la evaluación hidrológica e hídrica de los impactos de implementar una normativa que establezca

caudales ecológico retroactivos, y por tanto el análisis económico realizado permite tener una aproximación del funcionamiento del mercado del agua, pero una evaluación precisa y detallada deberá considerar los aspectos particulares que se involucran, además de una evaluación social debido al tipo de bien considerado.

Para la cuenca del río Limarí, se estimó un precio del agua entre 200 y 400 UF/L/s, con el análisis presentado en este estudio y el presentado por EMG Consultores (2011). En Aconcagua es donde se obtienen mayor variabilidad en la estimación, con un valor del orden de 1.200 UF/L/s obtenido en este estudio, y entre 50 y 80 UF/L/s por EMG Consultores (2011) y ODEPA (2010), respectivamente. En Rapel el precio del agua estimado es de 350 UF/L/s, y no se cuenta con referencias para comparar este valor. La alta variabilidad de la estimación, provoca por tanto una alta variabilidad en la estimación económica del impacto que tendría establecer la normativa evaluada.

- Se evaluó el impacto de aplicar caudal ecológico para los usos principales de las cuencas, enfocado en disminución de hectáreas de riego, disminución de capacidad de producción de cobre y en los servicios sanitarios. Cabe destacar en este punto que esta estimación es una aproximación y no incluye un análisis económico profundo.

La disminución de hectáreas equivaldría a pérdidas monetarias para los productores, las cuales fueron estimadas en base a información de producción por las especies más representativas en cada cuenca, y los precios de exportación, considerando que cierto porcentaje se exporta. Las pérdidas monetarias (en millones de dólares, MM USD) serían del orden de MM USD38 para la cuenca del río Limarí, MM USD 171 en Aconcagua, y MM USD 54 en Rapel. A este impacto se debe incluir las pérdidas por concepto de venta en el mercado nacional.

En cuanto a la producción minera, las pérdidas en toneladas de cobre se estimaron considerando las extracciones y los datos de producción de toneladas publicadas por COCHILCO. En base a ello, y el precio de transacción del cobre, se estimó la pérdida monetaria. Las pérdidas monetarias (en millones de dólares, MM USD) serían del orden de MM USD365 para la cuenca del río Aconcagua, y entre MM USD115 y MM USD250 en la cuenca de Rapel, dependiendo del escenario analizado.

En los servicios sanitarios, se evaluó el impacto en la cuenca del río Aconcagua, dada la información disponible. Para cuantificar este impacto, en este análisis se evaluó la situación en el sistema Gran Valparaíso, que es el que cuenta con mayor población, llegando a una dotación de 179 L/hab/día en el año 2014. Con la inclusión de caudal ecológico en el periodo de sequía, se tiene que la dotación baja a 92 L/hab/día (menor a lo recomendado por la OMS, que define el acceso óptimo como un promedio de 100 L/hab/día), o bien, manteniendo la dotación diaria, la población abastecida baja en 2.000 personas aproximadamente.

Como comentario final, la evaluación presentada en este estudio aborda el conflicto de manera agregada, a modo de delinear los impactos y consecuencias que generaría el establecer caudales ecológicos mínimos de manera retroactiva en las cuencas analizadas. Por lo mismo, evaluaciones específicas requerirán de un análisis detallado para precisar los impactos reales.