

LA PLANIFICACIÓN DEL MANEJO DE LOS RECURSOS HÍDRICOS EN EL CONTEXTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO. UNA APLICACIÓN A LA REGIÓN DEL COMAHUE, PATAGONIA, ARGENTINA.

PLANNING THE MANAGEMENT OF WATER RESOURCES IN THE CONTEXT OF CLIMATE CHANGE. AN APPLICATION TO THE COMAHUE REGION, PATAGONIA, ARGENTINA

Nadal, Gustavo¹; Girardin, Osvaldo¹; Losano, Fernando²; Marizza, Marta³; Cello, Pablo³; Bucciarelli, Lisandro⁴; Forni, Laura⁵; Camilloni, Inés⁶; Bravo, Gonzalo¹; Lallana, Francisco¹; Di Sbroiavacca, Nicolás¹

Resumen

El presente trabajo muestra la aplicación de una metodología para el diagnóstico de un sistema hídrico complejo y extenso, la cual facilita la toma de decisiones robustas de largo plazo en un contexto de elevada incertidumbre tanto climática como no climática. Para ello se modela y se evalúa la ocurrencia de potenciales fallas en el sistema hídrico constituido por las cuencas de los ríos Limay, Neuquén y Negro en la Patagonia Argentina, para múltiples escenarios a lo largo del periodo 2010-2050. Dicha evaluación se realiza utilizando el software WEAP⁷ y tomando en cuenta diversas incertezas que se presentan hacia el futuro (e.g. el clima, la evolución de la superficie bajo riego y del tipo de cultivos), y posibles alternativas de intervención (e.g. la construcción de centrales hidroeléctricas, la adopción de medidas de eficiencia hídrica en conducción y riego). Los resultados permiten determinar que la construcción de embalses así como la mejora de eficiencia en riego y conducción agrícola (incluyendo la remodelación y / o construcción de infraestructura de riego y drenaje), podrían ser efectivas para mitigar los impactos negativos para la mayor parte de los escenarios climáticos y de superficie bajo riego considerados.

Palabras clave: planificación hídrica; cambio climático; riego; explotación hidrocarburífera; embalses; hidroelectricidad

Abstract

The present work shows the application of a tool for the diagnosis of a complex and extensive water system, which facilitates taking robust long term decisions in a context of high climatic and non-climatic uncertainty. In order to do this, the occurrence of potential faults is modeled and evaluated for the water system constituted by the basins of the rivers Limay, Neuquén and Negro in the Patagonia Argentina, for multiple scenarios throughout the period 2010-2050. This evaluation is carried out using WEAP software and taking into account various future uncertainties (e.g. climate, evolution of irrigated land and type of crops), and possible intervention alternatives (e.g. the construction of hydropower plants, the adoption of efficiency measures in water conduction and irrigation). The results show that reservoir construction as well as improved irrigation and agricultural management efficiency (including remodeling and / or construction of irrigation and drainage infrastructure) could be effective in mitigating negative impacts for most climatic and irrigation scenarios under consideration.

Key words: water planning; climate change; irrigation; hydrocarbon exploitation; dams; hydroelectricity

1. INTRODUCCIÓN

La planificación de largo plazo de la gestión de los recursos hídricos enfrenta muchos desafíos vinculados al alto grado de incertidumbre asociado tanto al uso del recurso como a la disponibilidad del mismo en las próximas décadas. Esto último es especialmente relevante en regiones donde se espera que los efectos derivados del cambio climático afecten significativamente el comportamiento de la temperatura y las precipitaciones en la zona de recarga de una determinada cuenca. Tal es el caso

de la región del Comahue, ubicada al noroeste de la Patagonia Argentina, donde el conocimiento científico disponible actualmente nos permite afirmar que el clima ha venido cambiando desde hace algunas décadas (Fundación Torcuato Di Tella, 2006), y algunos escenarios climáticos desarrollados para el proyecto Climagua parecen indicar que esta tendencia continuará hacia el futuro. Estos escenarios climáticos señalan para el periodo 2010-2100 un incremento de la temperatura media, una reducción

¹ Fundación Bariloche. gnadal@fundacionbariloche.org.ar; logirardin@fundacionbariloche.org.ar; gbravo@fundacionbariloche.org.ar; franlallana@fundacionbariloche.org.ar; ndisbro@fundacionbariloche.org.ar

² Universidad Nacional del Comahue. losanofernando@gmail.com

³ Universidad Nacional del Litoral. martasmarizza@yahoo.com; pcellov@gmail.com

⁴ Subsecretaría de Recursos Hídricos del Neuquén. lfbucciarelli@gmail.com

⁵ Stockholm Environment Institute-Davis. laura.forni@sei-us.org

⁶ Universidad Nacional de Buenos Aires. ines@cima.fcen.uba.ar

⁷ Water Evaluation and Planning System, desarrollado por el Stockholm Environment Institute (Yates, 2005a) (Yates, 2005b)

de las precipitaciones en la cordillera de los Andes, incluyendo una reducción de la nieve acumulada, y una modificación del régimen hidrológico de los principales ríos que nacen en la misma (ríos Limay, Neuquén y Negro) (Losano, 2015). Dichos cambios podrían tener importantes efectos sobre los habitantes de la región Comahue y las actividades económicas que allí se desarrollan. Efectivamente, por el lado de los requerimientos hídricos cerca de un millón de personas y 150,000 hectáreas de cultivos bajo riego están vinculados actualmente a las cuencas de los mencionados ríos, existiendo un importante potencial para la expansión de diversos centros urbanos y actividades productivas de envergadura tales como la agricultura bajo riego, la generación hidroeléctrica y la explotación de hidrocarburos, los cuales dependen en forma crítica de la existencia de estos recursos hídricos.

Esta situación motivó a un grupo de investigadores a desarrollar el proyecto Climagua, en el marco del cual se llevó a cabo una modelación y prospectiva del sistema hídrico de la región Comahue con el fin de realizar un diagnóstico de los potenciales problemas de la cuenca y de identificar las principales estrategias de adaptación que podrían implementarse. Los resultados más importantes de esta modelación se describen en el presente documento.

El proyecto Climagua llevó a cabo una modelación del comportamiento de las cuencas de los ríos Limay, Neuquén y Negro entre los años 2010 y 2050 en el contexto de diversos escenarios climáticos, de expansión de la superficie agrícola bajo riego, de tipo de estructura de cultivos y de alternativas de intervención. La modelación del sistema hídrico fue el punto de partida para realizar un diagnóstico de los principales problemas que podrían enfrentar las cuencas de los ríos Limay, Neuquén y Negro en el mediano y largo plazo. Dicho diagnóstico a su vez sirve de base para la formulación de lineamientos estratégicos, instrumentos y acciones que permitan a los organismos de gestión intervenir sobre la cuenca basándose en información que posee un fundamento científico y que puede ser actualizada en la medida que vaya mejorando el conocimiento sobre el sistema hídrico real.

Si bien la modelación realizada no pretende predecir el futuro, sus resultados intentan establecer los potenciales impactos del cambio climático sobre la región y determinar las mejores estrategias de adaptación para enfrentar los problemas de escasez de agua en un contexto de elevada incertidumbre. Dado que la toma de decisiones de mediano y largo plazo puede involucrar la necesidad de llevar a cabo obras de infraestructura muy costosas y con un tiempo de maduración e implementación de varios años, se ha aplicado una metodología que permite la identificación de medidas de intervención robustas que sean válidas para los diversos escenarios que reflejan las principales incertidumbres que afectan al sistema hídrico (Flores, 2012).

La modelación de los requerimientos hídricos de la región Comahue presentó desafíos vinculados a la disponibilidad de información actualizada para la calibración del modelo y para la proyección de algunas de las variables explicativas. Otro reto importante se relacionó con el equilibrio necesario entre, por un lado, el grado de detalle mínimo requerido para obtener resultados que permitan realizar recomendaciones concretas de intervención, y por otro lado, la gran extensión y complejidad de la zona de estudio. Los resultados permiten definir en forma integrada un abanico de posibles comportamientos del sistema hídrico y algunos de los principales problemas a enfrentar, pero presentan algunas limitaciones para extraer conclusiones detalladas sobre áreas de riego o centros urbanos específicos. Ello se debe a que la representación de la infraestructura de riego y de abastecimiento de agua no es muy detallada (e.g. solo se representan los canales principales de riego en forma individual, mientras que las redes menores se agrupan dentro de un único canal de conducción), debido principalmente a la falta de información y a la extensión del sistema a modelar.

2. METODOLOGÍA

El objetivo que busca la metodología planteada es contribuir a identificar las inversiones prioritarias en grandes obras de infraestructura hídrica en el Comahue tomando en cuenta aspectos que habitualmente no eran considerados dentro de la toma de decisiones pero que han cobrado mucha relevancia en la última década. La metodología contempla la utilización de un modelo de prospectiva y gestión del recurso hídrico para la realización de un diagnóstico cuantitativo de los principales problemas que enfrentarían las cuencas analizadas en las próximas décadas en función de diversos escenarios. Dicho modelo se alimenta de información socioeconómica y de los resultados de modelos climáticos, y provee datos de disponibilidad hídrica para generación para la corrida de un modelo energético a nivel nacional. Los resultados son analizados cuantitativamente mediante dos índices (profundidad y frecuencia de falla) para detectar y cuantificar las principales fallas del sistema hídrico de forma de priorizar los problemas y formular lineamientos de políticas y propuestas de intervención para mitigar los impactos. Esta metodología podría ser aplicada a las principales cuencas de la Argentina de tal forma de priorizar las grandes inversiones hídricas a nivel nacional, y eventualmente establecer si existen impactos que justifiquen introducir modificaciones en el diseño de las obras ya planificadas.

2.1 Modelo de Gestión y Prospectiva Hídrica

La representación del sistema hídrico conformado por las cuencas de los ríos Limay, Neuquén y Negro se llevó adelante mediante el modelo

Water Evaluation And Planning System (WEAP). El modelo WEAP ha sido usado previamente en América Latina para realizar estudios de manejo de cuencas⁸, aunque en menor escala que en el presente estudio. El análisis abarcó el periodo 2010-2050 con un paso de tiempo mensual. La modelación comprendió tanto la componente activa de la cuenca, ubicada sobre la cordillera de los Andes, como las principales demandas

(centros urbanos, áreas agrícolas bajo riego, explotación de hidrocarburos convencionales y no convencionales, generación hidroeléctrica). En la parte de abastecimiento del modelo se representaron 9 sub-cuencas activas, divididas a su vez en diversas áreas que son alimentadas con los datos de precipitación y temperatura generados por cada uno de los siete escenarios climáticos considerados (Tabla 1).

Tabla 1. Alternativas de intervención e incertidumbres climáticas y no climáticas definidas en el modelo hídrico Comahue

Tipo de variable (número de escenarios)	Escenarios
Alternativas de intervención o estrategias (10)	<ul style="list-style-type: none"> • Base (Evolución tendencial de las variables explicativas del sistema; e.g. población, superficie irrigada, eficiencia) • Reducción paulatina de Pérdidas en Conducción Agrícola al 50% del valor del año base • Incremento paulatino de la eficiencia en Riego Agrícola, de riego por gravedad (35%-40%) a riego tecnificado (65%-85%) • Uso Racional de Agua en Ciudades (reducción progresiva de la intensidad de uso de agua por habitante al 50% de la correspondiente al año base) • Cambio de la Norma de Operación del Embalse Piedra del Águila (incremento del nivel máximo de operación normal del embalse en determinados meses del año) • Implementación de Centrales Hidroeléctricas de Alta Factibilidad (entrada de Chihuido I 2020, Michihuao 2027, Pantanitos 2035) • Implementación de Centrales Hidroeléctricas de Alta y Baja Factibilidad (entrada adicional de Collón Cura 2030, La Invernada 2027, Pini Mahuida 2027, Cerro Rayoso 2027, Huitrin 2027, Chihuido II 2027, Integral Río Negro 2035) • Canal de riego Guardia Mitre-Patagones (entrada en operación año 2025, máxima desviación 50m3/s) • Canal de trasvase Chelforo-Río Colorado (entrada en operación año 2025, máxima desviación 50m3/s) • Combinada (Eficiencia conducción agrícola + Eficiencia riego agrícola + Uso racional de agua en ciudades + Cambio norma de operación + Centrales de alta y baja factibilidad+ Canal Guardia Mitre-Patagones)
Incertidumbre climática (7)	<ul style="list-style-type: none"> • Ciclo histórico • GFDL 4.5 • GFDL 8.5 • MIROC 4.5 • MIROC 8.5 • ESM2 4.5 • ESM2 8.5
Incertidumbres no climáticas (4)	<ul style="list-style-type: none"> • Superficie agrícola bajo riego (Escenario de Referencia y Escenario Potencial, Tabla 2) • Tipo de cultivos (Escenario Tradicional y Escenario Alta rentabilidad). El escenario de Alta rentabilidad plantea la penetración de cultivos como cereales y forrajeras en detrimento de frutales tradicionales)

Fuente: elaboración propia

⁸ (Condom, 2012), (Escobar, 2016), (Escobar, 2013), (Jaramillo, 2016), entre otros.

El modelo WEAP asigna el agua disponible a cada nodo de demanda en función de los requerimientos y mediante un esquema de prioridades relativas. Para el presente estudio se reflejó el orden de prioridad que indican las normas de manejo de la cuenca,

asignando la máxima prioridad al abastecimiento a centros urbanos, luego a las áreas agrícolas y la explotación de hidrocarburos, y por último a la generación hidroeléctrica.

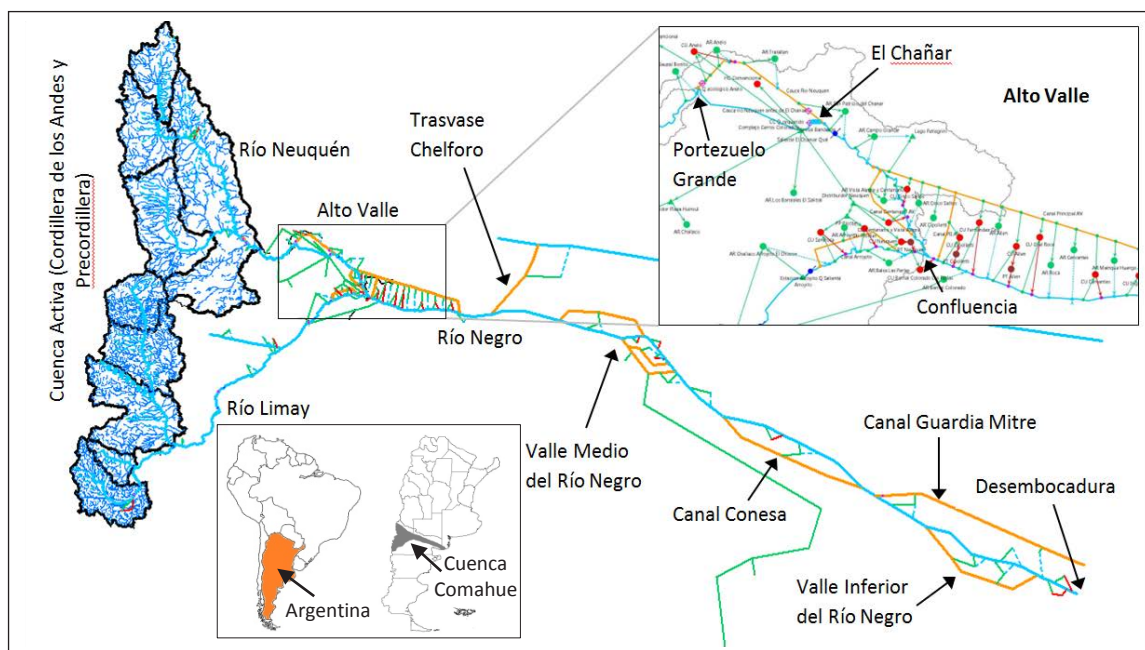


Figura 1. Localización de la zona de estudio y esquema del modelo WEAP de las cuencas de los ríos Limay, Neuquén, y Negro

2.2 Escenarios

La modelación toma en cuenta, a través de la metodología de escenarios, tanto las principales incertidumbres que se presentan hacia el futuro (el clima, la evolución de la superficie bajo riego y de la estructura de cultivos), como diez alternativas de intervención (e.g. la implementación de diversas centrales hidroeléctricas, y las medidas de eficiencia hídrica que podrían ser adoptadas). Cada uno de estos escenarios es seleccionado dentro del modelo WEAP variando la magnitud que adoptan determinadas variables de control, las cuales a su vez pueden ser modificadas mediante un script para automatizar las corridas del modelo. En la Tabla 1 se listan las características de los escenarios considerados, cuya combinación da como resultado un total de 280 escenarios futuros que fueron analizados.

En relación con la incertidumbre climática, para el presente estudio la misma se tomó en cuenta considerando los cambios en temperatura y

precipitaciones asociados a seis escenarios climáticos, derivados de la combinación de dos escenarios de trayectorias de concentración representativas de emisiones gases de efecto invernadero (RCP 4.5 y RCP 8.5⁹), y tres modelos de circulación general (MIROC5¹⁰, GFDL-ESM2G¹¹, CanESM2¹²). Dichos modelos son los que mejor explican la temperatura y precipitaciones de la región para el periodo de referencia 2001-2010. Adicionalmente, se consideró un escenario climático de referencia que resulta de repetir el ciclo de clima histórico de la década 2001-2010.

La Tabla 2 presenta la evolución planteada de la superficie bajo riego por área agrícola en cada uno de los escenarios considerados para el periodo 2010-2050. Se pueden observar dos escenarios, uno que representa una evolución tendencial de la superficie bajo riego (Escenario Tendencial) y otro que plantea una fuerte expansión de la misma (Escenario Potencial).

⁹ Representative Concentration Pathway. El número indica el grado de forzamiento radiativo en W/m² al año 2100 respecto de valores preindustriales. El forzamiento radiativo es función de la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera (IPCC, 2014).

¹⁰ University of Tokyo, National Institute for Environmental Studies, and Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Japón.

¹¹ Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (GFDL), EEUU.

¹² Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis, Canadá.

Tabla 2. Superficie neta regada por provincia para el año base y dos escenarios de superficie agrícola bajo riego al año 2050 (Hectáreas)

Área de riego	Superficie neta bajo riego (Hectáreas)			
	Año Base	Escenario Tendencial	Escenario Potencial	Δ (Potencial - Tendencial)
	2010/2011	2050	2050	
AR Provincia de Neuquén (Ha)	32,400	91,175	146,707	55,532
Ar Provincia de Río Negro (Ha)	116,903	193,080	372,692	179,612
Ar Provincia de Buenos Aires (Ha)	700	2,100	7,000	4,900
Total (Ha)	150,003	286,355	526,399	240,044

Fuente: elaboración propia

2.3 Medidas de desempeño y evaluación de la severidad de falla del sistema

El comportamiento del sistema hídrico para cada escenario se evaluó mediante el monitoreo de diversas variables del modelo WEAP denominadas medidas de desempeño. La comparación de dichas medidas con niveles de referencia o umbrales de falla indica si se está ante una condición de falla.

La severidad de la falla se cuantifica en base a la profundidad y frecuencia de ocurrencia de los eventos de falla para cada medida de desempeño, y la misma permite identificar, comparar y priorizar los problemas que enfrenta el sistema hídrico en cada escenario, y para cada década y ubicación espacial. La Tabla 3 presenta las medidas de desempeño utilizadas para evaluar el comportamiento del sistema hídrico Comahue.

Tabla 3. Medidas de desempeño y umbrales de falla definidos para el sistema hídrico Comahue

Grupo	Medida de desempeño	Umbral de falla
(1) Caudales en ríos	Caudal río Neuquén antes de Portezuelo Grande	100 m ³ /s (mínimo)
	Caudal río Neuquén antes de la toma superior de San Patricio de Chaña	7 m ³ /s (mínimo)
	Caudal río Neuquén antes de dique Ballester	115 m ³ /s (mínimo)
	Caudal río Neuquén después de dique Ballester	30-35 m ³ /s (mínimo), 600 m ³ /s (máximo)
	Caudal río Negro en Clonfluencia	400 m ³ /s (mínimo)
	Caudal río Limay a la salida de embalse Arroyito	280-300 m ³ /s (mínimo verano), 180 m ³ /s (mínimo invierno)
	Caudal río Negro antes de la toma para el canal Margen Norte	400/500 m ³ /s (mínimo)
	Caudal río Negro antes de la bocatoma Beltrán	300 m ³ /s (mínimo)
	Caudal río Negro antes de la bocatoma IDEVI	300 m ³ /s (mínimo)
	Caudal río Negro en la desembocadura	250 m ³ /s (mínimo)
(2) Coberturas	Coberturas agrícolas	85% (mínimo)
	Coberturas urbanas	100%
(3) Capacidad de Canales de riego	Caudal máximo en canal Principito Alto Valle	80 m ³ /s máximo
	Caudal máximo en canal Centenario	7 m ³ /s máximo
	Caudal máximo en canal Arroyito	15 m ³ /s máximo
	Caudal máximo en canal Margen Norte Valle Medio	6 m ³ /s máximo
	Caudal máximo en canal Gran Matriz (Valle Medio)	90 m ³ /s máximo
	Caudal máximo en canal Conesa	28 m ³ /s máximo
	Canal Guardia Mitre Patagones	50 m ³ /s máximo
	Caudal máximo en canal Valle Inferior	39 m ³ /s máximo
	Caudal máximo en canal Microregión Añelo	10 m ³ /s máximo
	Caudal máximo en canal San Patricio	7 m ³ /s máximo
	Caudal máximo en canal Los Barreales	19 m ³ /s máximo
(4) Embalses	Nivel de Marí Menuco	Cota 411,5 en Marí Menuco (mínimo)
	Volumen en Piedra del Águila	7,7739.9 hm ³ (Topo of Buffer)
	Volumen en Chocón	13,000 hm ³ (Topo of Buffer, valor medio)
	Volumen en Cerros Colorados	38,000 hm ³ (Topo of Buffer, valor medio)
(5) Generación	Volumen en Chihuido I	10,504.83 hm ³ (Topo of Buffer)
	Generación anual de energía	13,900 GWh (generación anual promedio 2000-2010 Alicura, Piedra del Águila, El Chocón, Arroyito, Cerros Colorados, Pichi Picún Leufú)

Fuente: elaboración propia

En relación a la cobertura de los requerimientos para centros urbanos y áreas de riego, es necesario aclarar que las medidas de desempeño aquí definidas solo registran potenciales problemas relacionados con los caudales en los ríos y canales pero no aquellos relacionados con la altura de las captaciones u otros problemas de infraestructura.

Se considera que se está ante un evento de falla cuando el valor de una medida de desempeño está por debajo (si se refiere a un mínimo) o por encima (si se refiere a un máximo) del umbral de falla. La condición de falla se evalúa en forma mensual a lo largo de determinado periodo de análisis para determinar la frecuencia de falla (FF) y la profundidad de falla (PF).

La frecuencia de falla se define en base a la cantidad de veces que el sistema falla por unidad de tiempo para determinada medida de desempeño:

$$(1) \text{ Frecuencia de falla (FF)} = (\text{Número de eventos de falla en determinado periodo} / \text{Número de meses en el periodo}) * 100$$

Por otra parte, la profundidad de la falla asociada a un evento de falla se define como:

$$(2) \text{ Profundidad de falla (PF)} = ((\text{Umbral de falla} - \text{valor medida de desempeño}) / \text{Umbral de falla}) * 100$$

Fuera del evento de falla, la profundidad de falla adopta por definición un valor igual a 0%.

Para un mínimo, la profundidad de falla da una idea de cuánto desciende el valor de una medida de desempeño por debajo del umbral de falla. La profundidad de falla se calcula mes a mes a lo largo de todo el periodo de análisis, incluyendo aquellos meses para los cuales no hay falla. La profundidad de falla calculada para un periodo determinado de meses brinda un promedio de la profundidad de falla de los meses considerados, y por ende también es función de la frecuencia de falla.

La frecuencia y la profundidad de falla de cada medida de desempeño son valores porcentuales y se evalúan para todas las combinaciones de escenarios indicadas anteriormente (280). La magnitud de estos indicadores de falla permite identificar los problemas prioritarios del sistema hídrico y por lo tanto constituye la base para realizar el diagnóstico integrado de las cuencas y la definición de lineamientos estratégicos para la planificación del sistema.

2.4 Corrida del modelo WEAP y visualización de resultados

Para facilitar la interpretación de los resultados en el contexto de múltiples combinaciones de escenarios (280), la frecuencia y profundidad de falla se muestran en forma gráfica mediante matrices construidas con el software Tableau según una metodología desarrollada por el Stockholm Environment Institute

(Forni, 2016)¹³. Estas matrices presentan en sus columnas las diversas alternativas de intervención (Base, Mejora de Eficiencia en Conducción Agrícola, Mejora de Eficiencia de Riego Agrícola, Implementación de Centrales Hidroeléctricas de Alta y Baja Factibilidad, Estrategia Combinada, etc.) y en sus filas las incertidumbres (Climas, Superficie Bajo Riego y tipo de Estructura de Cultivos). De esta forma, para cada medida de desempeño o para un conjunto de ellas, una sola matriz es capaz de mostrar visualmente la magnitud de falla para todas las combinaciones de escenarios.

Se presentan, a continuación, matrices con valores absolutos de frecuencia o profundidad de falla por estrategia, y matrices con valores relativos a la estrategia Base, que sirven para resaltar el efecto de cada estrategia respecto de la estrategia Base. Cada celda de una matriz presenta el valor porcentual de la frecuencia o de la profundidad de falla de una determinada medida de desempeño por medio de un color. Para las matrices con valores absolutos el color verde oscuro representa una situación con falla muy baja o nula (0%) y el rojo oscuro una situación con falla muy alta (100%). En el caso de las matrices con valores relativos a la estrategia Base los colores se interpretan de la siguiente forma: azul oscuro (mejora significativa, -50%), gris (sin cambios, 0%), naranja oscuro (empeoramiento significativo, +50%).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación se analiza la profundidad y frecuencia de falla para algunas de las medidas de desempeño listadas en la Tabla 3.

El grupo de medidas de desempeño que presenta mayor magnitud de falla en el contexto de las incertidumbres climáticas y no climáticas corresponde a los caudales mínimos en puntos específicos de las cuencas (Grupo 1, Tabla 3), algunos de los cuales muestran una significativa frecuencia y profundidad de falla, para la mayor parte de los escenarios climáticos, en el escenario de superficie potencial de riego hacia la década 2041-2050 (Figura 2). Tal es el caso del caudal del río Neuquén entre Portezuelo Grande y la Confluencia de los ríos Limay y Neuquén, y el caudal del río Negro en la desembocadura al Mar Argentino (Figura 1). La influencia del escenario de superficie bajo riego sobre los caudales mínimos se explica por el hecho de que la agricultura bajo riego representa la principal demanda consuntiva de la región en términos anuales (aproximadamente 88% de la demanda anual, escenario Base, año 2049/2050), seguida por la demanda urbana (aproximadamente 11% de la demanda anual, escenario Base, año 2049/2050), y la demanda para explotación de hidrocarburos convencionales y no convencionales (inferior al 1% de la demanda anual, escenario Base, año 2049/2050).

¹³ El marco metodológico general para el apoyo a la toma de decisiones se puede encontrar en (Lempert, 2003)

El grupo de medidas de desempeño asociado con la cobertura en áreas de riego presenta una significativa severidad de falla para tres de los siete escenarios climáticos (MIROC 8.5, ESM2 4.5, ESM2 8.5) en áreas de riego específicas y para el escenario de superficie potencial (aquellas vinculadas al tramo inferior del río Neuquén a partir de Añelo hasta San Patricio del Chañar) (Figura 3).

La capacidad de los canales principales de riego presenta una severidad de falla elevada en casi todos los escenarios para el Canal Margen Norte, Canal Conesa, y Canal Principal del Valle Inferior (Figura 4). Para el resto de los canales la severidad de falla depende del clima y de la magnitud del desarrollo agrícola asociado

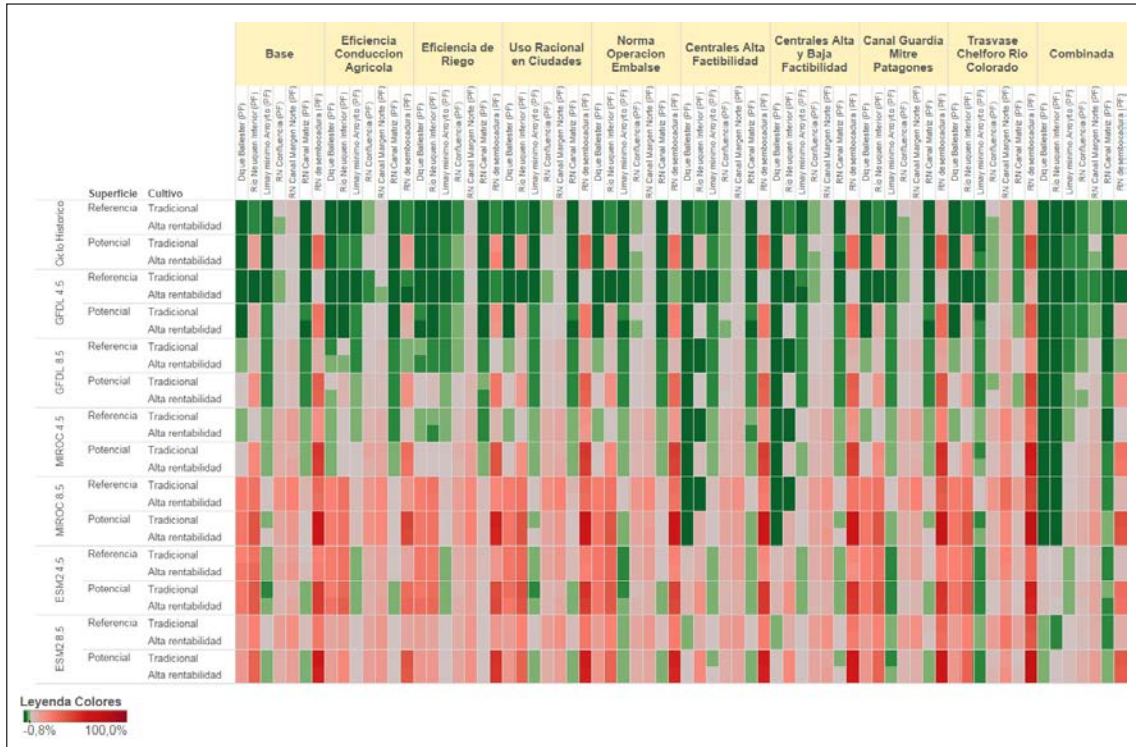


Figura 2. Profundidad de falla de los caudales en puntos específicos del sistema hídrico en la década 2041-2050, Diciembre-Febrero

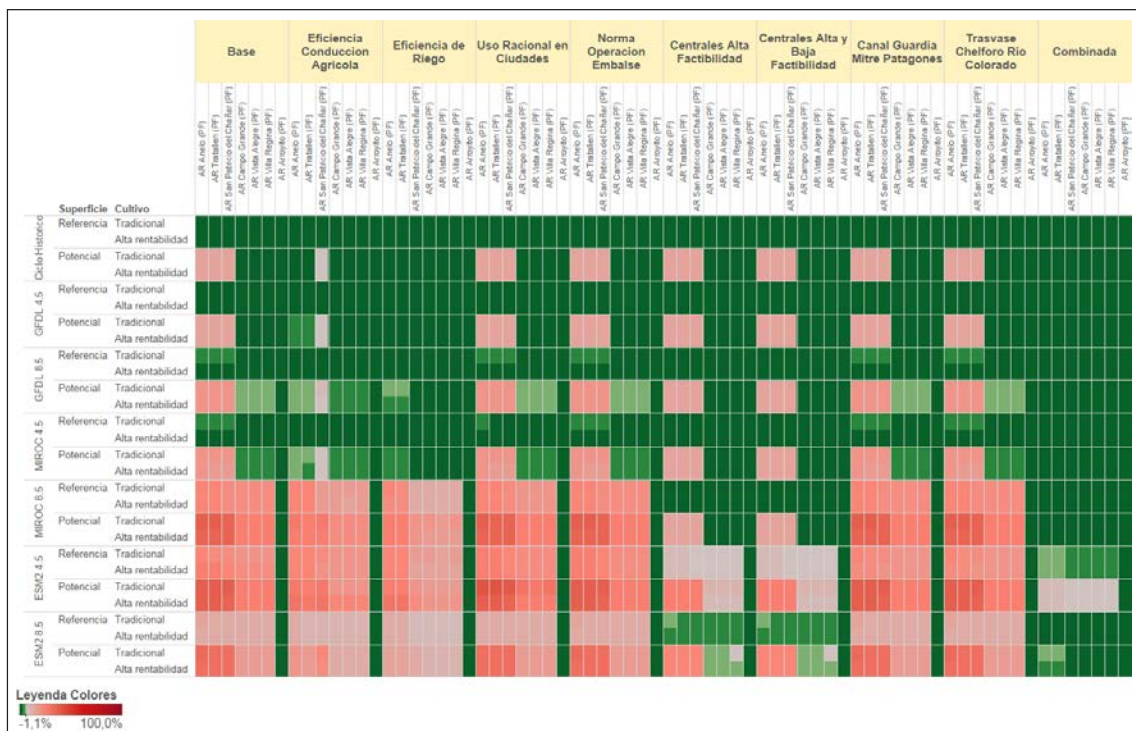


Figura 3. Profundidad de falla de la cobertura de los requerimientos de riego en áreas de riego seleccionadas durante la década 2041-2050, Diciembre-Febrero

Los centros urbanos presentan una muy baja a nula severidad de falla en todos los escenarios (Figura 5). En relación a los embalses, el embalse Cerros Colorados presenta una profundidad de falla moderada a baja (Figura 6) y una frecuencia de baja a significativa dependiendo del escenario climático. La

profundidad y frecuencia de falla es más significativa para Chihuido I, con una severidad que depende del escenario climático. Los menores valores de falla se vinculan al ciclo de clima histórico y los mayores a MIROC 8.5, ESM2 4.5, y ESM2 8.5. El embalse Piedra del Águila no presenta falla bajo ninguno de los escenarios considerados.



Figura 4. Frecuencia de falla de la capacidad de los canales de riego en la década 2041-2050, Diciembre-Febrero



Figura 5. Frecuencia de falla de la cobertura urbana para centros urbanos seleccionados en la década 2041-2050, Diciembre-Febrero



Figura 6. Profundidad de falla del volumen de los principales embalses ya construidos, para la década 2041-2050, Diciembre-Febrero



Figura 7. Profundidad de falla de la generación hidroeléctrica anual en la década 2041-2050

Para observar más claramente el efecto de las diversas estrategias sobre la magnitud de la falla, en las siguientes figuras se resta para cada estrategia el efecto de la estrategia Base. La estrategia de implementación de Centrales Hidroeléctricas de Alta y Baja Factibilidad tiene un

efecto positivo moderado sobre la severidad de falla del caudal mínimo en el tramo inferior del río Neuquén (Figura 8) y la cobertura de las áreas de riego asociadas (escenarios climáticos MIROC 8.5, ESM2 4.5, y ESM2 8.5) (Figura 9).

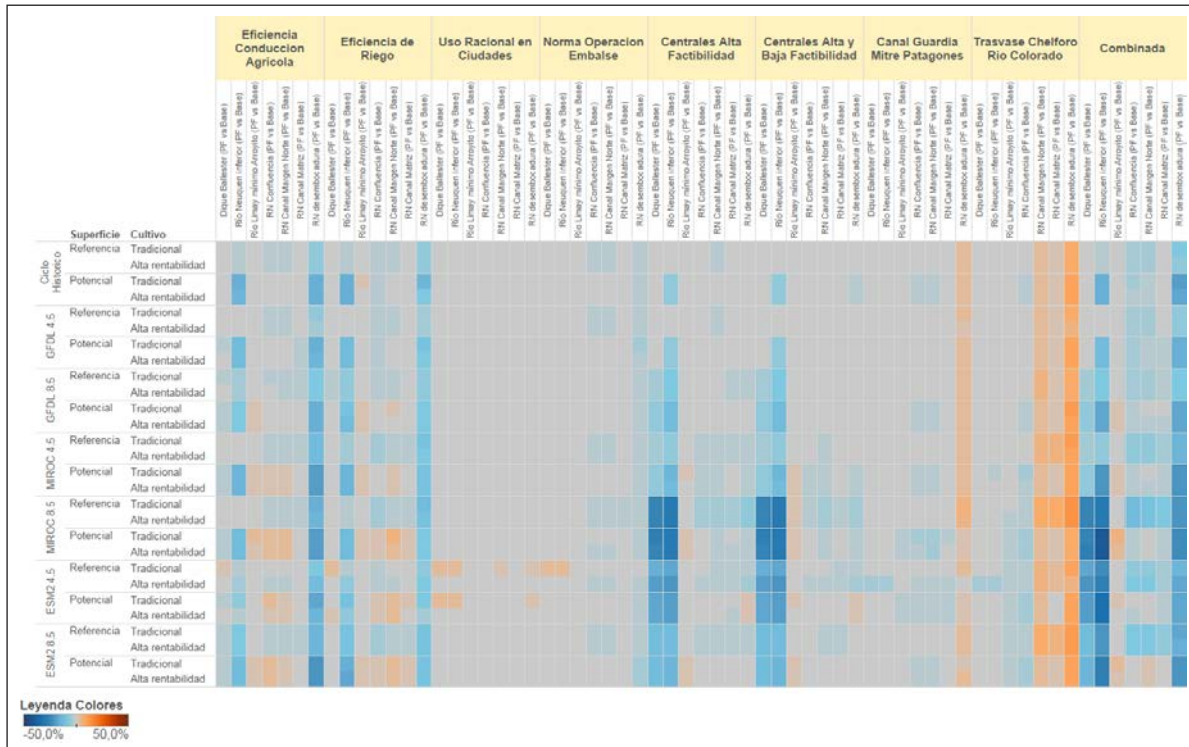


Figura 8. Profundidad de falla de los caudales en puntos críticos del sistema hídrico en la década 2041-2050 respecto de la estrategia Base, Diciembre-Febrero

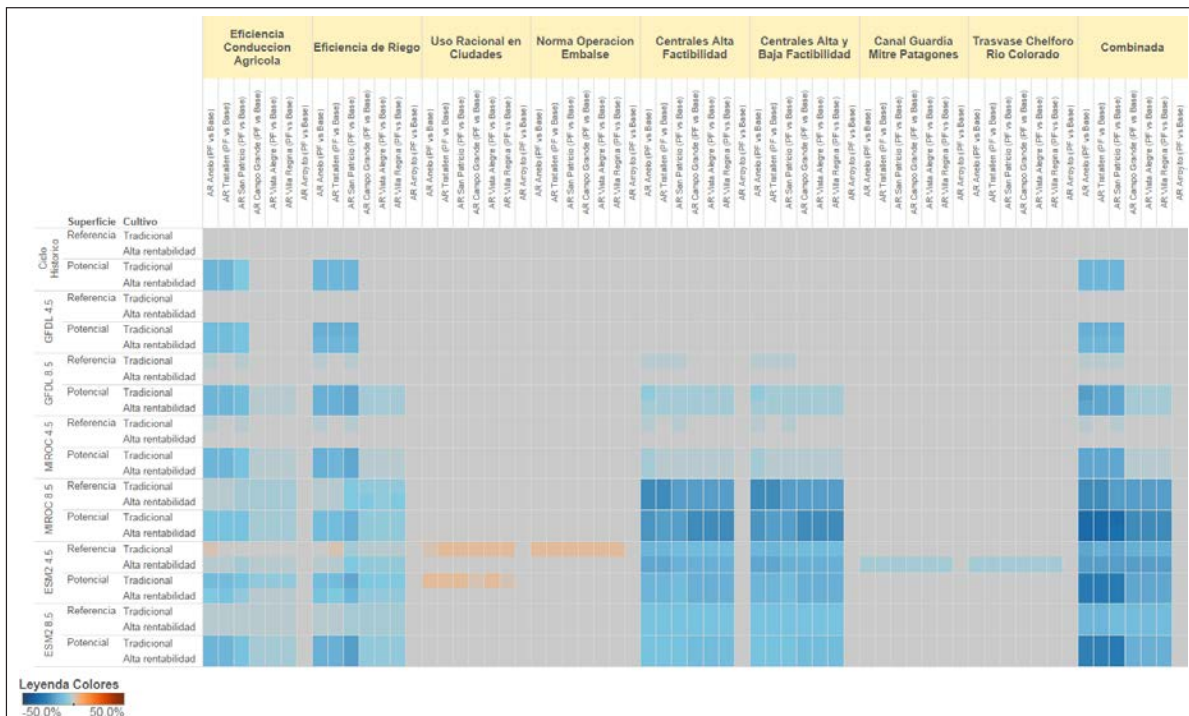


Figura 9. Profundidad de falla de la cobertura de los requerimientos de riego en áreas de riego seleccionadas durante la década 2041-2050 respecto de la estrategia Base, Diciembre-Febrero

En relación a la generación hidroeléctrica, la estrategia de implementación de Centrales de Alta y Baja Factibilidad tiene un efecto positivo en todos los escenarios climáticos, compensando con creces las reducciones que se observan en los escenarios

más negativos (Figura 7). En el caso del volumen de Cerros Colorados, la estrategia de implementación de Centrales de Alta Factibilidad es efectiva para reducir en forma moderada la severidad de falla en los climas más negativos (Figura 11).

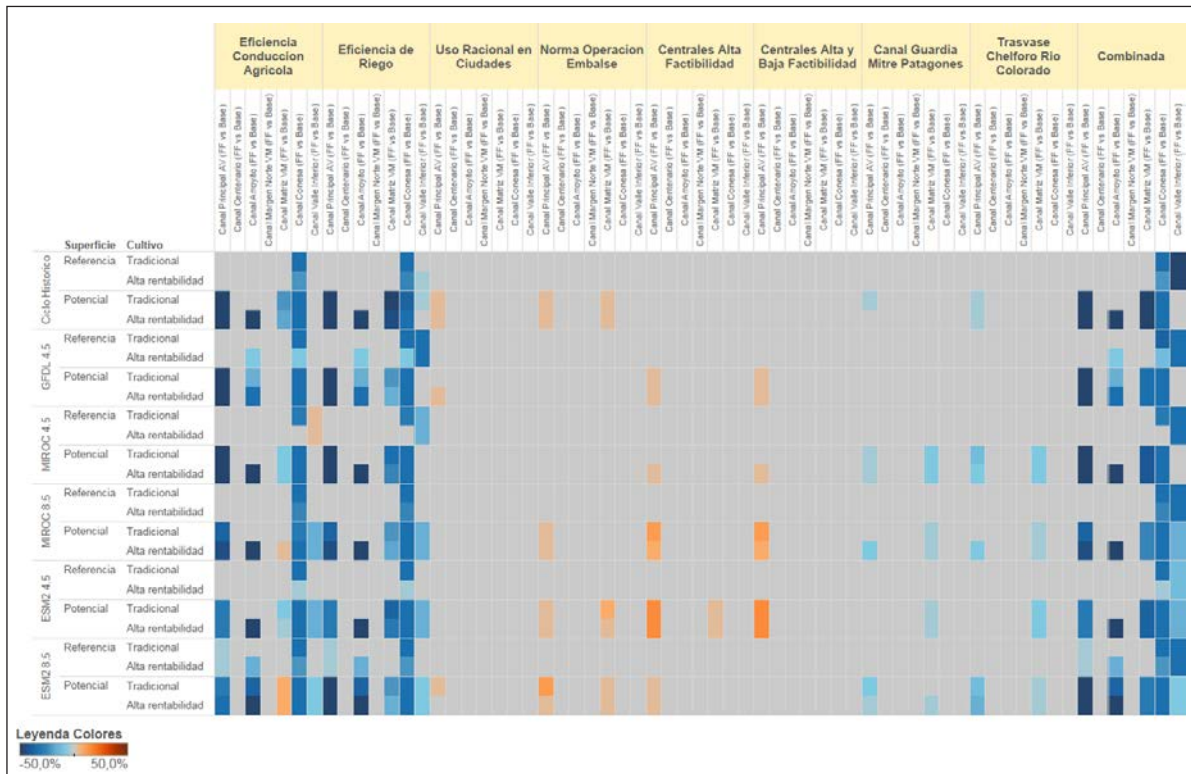


Figura 10. Frecuencia de falla de la capacidad de los canales de riego en la década 2041-2050 respecto de la estrategia Base, Diciembre-Febrero

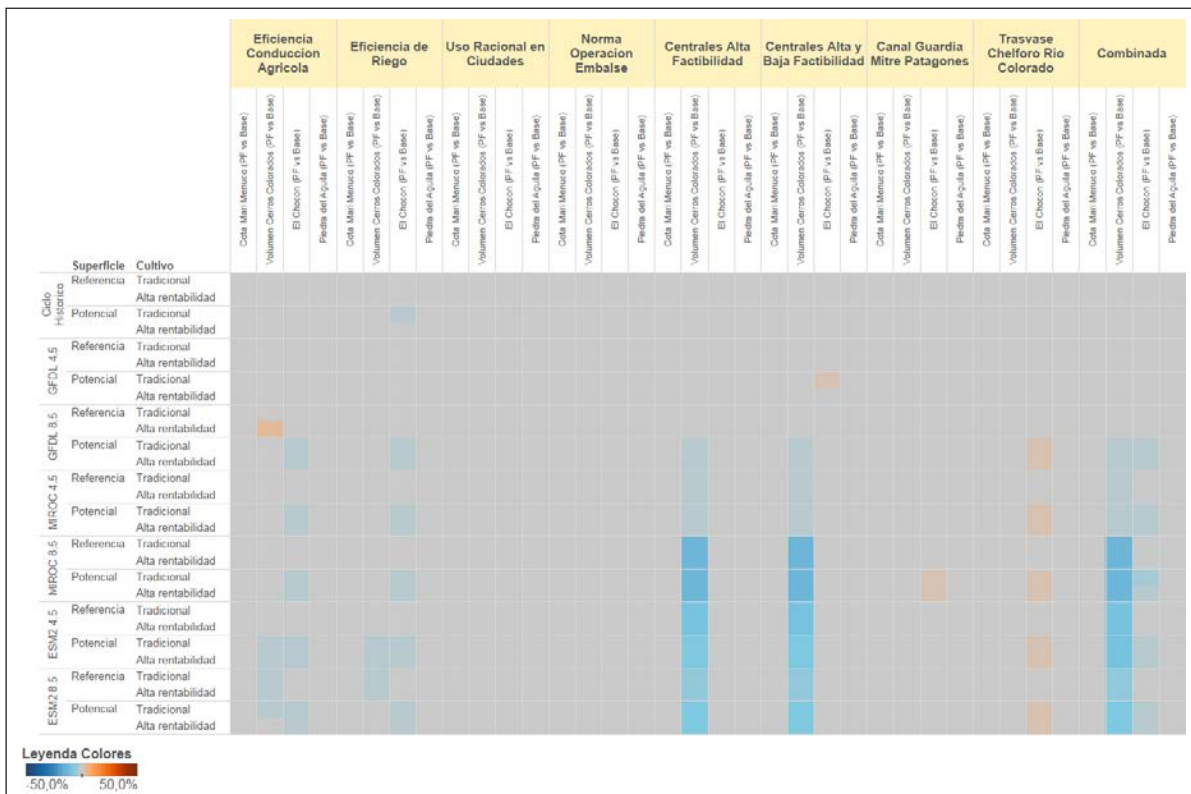


Figura 11. Profundidad de falla del volumen de los principales embalses ya construidos, para la década 2041-2050 respecto de la estrategia Base, Diciembre-Febrero

Las estrategias de eficiencia en conducción agrícola y eficiencia en riego tienen un efecto positivo sobre algunos caudales mínimos (Figura 8), cobertura de riego (Figura 9) y capacidad de canales (Figura 10), pero su magnitud es muy variable en función de los escenarios de incertidumbres.

La estrategia de trasvase (Canal Chelforo-Río Colorado) y en menor medida la implementación del canal Guardia Mitre-Patagones (ambas plantean derivar un máximo de 50 m³/s del caudal del río Negro) incrementan en forma moderada la severidad de falla del río Negro a la altura de Valle Medio e Inferior (en el primer caso) y Valle Inferior (en el segundo), para todos los escenarios de clima, superficie y tipo de cultivo (Figura 8).

La estrategia combinada se presenta como efectiva para reducir la severidad de falla en casi todos los escenarios climáticos en el tramo inferior del río Neuquén y en la desembocadura del río Negro, tendiendo a compensar los efectos negativos del canal Guardia Mitre-Patagones. También tiene un efecto positivo significativo sobre la severidad de falla de las áreas de riego vinculadas al tramo inferior del río Neuquén, pero solamente para los

escenarios climáticos más negativos. El efecto sobre la generación hidroeléctrica es altamente positivo.

Desde el punto de vista de las incertidumbres que enfrenta el sistema hídrico Comahue, la modelación indica que las que mayor influencia tienen sobre la severidad de falla son la climática y la superficie bajo riego. Con respecto a la primera, tres de los siete escenarios climáticos (MIROC 8.5, ESM 4.5 y ESM2 8.5) incrementan la severidad de falla para todos los grupos de medidas de desempeño con excepción de la capacidad de los canales de riego, que se ve más afectada por la expansión de la superficie bajo riego.

En síntesis, los resultados de la modelación señalan la posibilidad de que se registren en las próximas décadas caudales medios mensuales, en algunos tramos de los ríos Neuquén y Negro, que son inferiores a los niveles considerados como aceptables, principalmente durante el verano. Otro impacto potencial de relevancia, que se observa para algunos escenarios climáticos, es el descenso de los volúmenes embalsados por debajo del nivel mínimo de operación normal para los embalses Cerros Colorados, El Chocón y Chihuido I. Asociado a este impacto se observa una reducción en la generación hidroeléctrica respecto del promedio histórico.

Tabla 4. Síntesis de principales impactos y estrategias de adaptación

Impacto	Estrategias
1. Caudales mínimos por debajo del umbral de falla en determinados tramos. Principalmente: río Neuquén entre Portezuelo Grande y Confluencia, desembocadura del río Negro).	Implementación de Centrales Hidroeléctricas de Alta Factibilidad (Chihuido I, Michihuao, Pantanitos); Eficiencia en conducción y riego agrícola; Estrategia Combinada
2. Cobertura de riego agrícola (principalmente áreas de riego sobre el río Neuquén entre Portezuelo Grande y El Chañar). Mayores impactos para 3 de los 7 climas (MIROC 8.5, ESM2 4.5, ESM2 8.5) y escenario de superficie agrícola Potencial.	Implementación de Centrales Hidroeléctricas de Alta Factibilidad (Chihuido I, Michihuao, Pantanitos); Eficiencia en conducción y riego agrícola; Estrategia Combinada
3. Volumen de embalses por debajo del mínimo de operación normal (principalmente Cerros Colorados, El Chocón, Chihuido I).	Implementación de Centrales Hidroeléctricas de Alta Factibilidad (Chihuido I, Michihuao, Pantanitos)
4. Generación hidroeléctrica. El peor escenario climático implica una reducción de 170 TWh (acumulado 2011-2050), equivale a 1.2 veces la generación de Argentina del año 2015)	Implementación de Centrales Hidroeléctricas de Alta Factibilidad (Chihuido I, Michihuao, Pantanitos) y Baja Factibilidad
5. Capacidad de canales de riego: Canal Margen Norte Valle Medio, Canal Conesa, Canal Principal Valle Inferior.	Eficiencia en riego y conducción agrícola

Fuente: elaboración propia

En el sector agrícola los impactos en los climas con mayor reducción de las precipitaciones señalan potenciales fallas en la cobertura durante la temporada de riego, principalmente para las áreas de regadío ubicadas sobre el río Neuquén entre Portezuelo Grande y El Chañar. Estos impactos se adelantarían en el tiempo si se registrara una expansión significativa de la superficie agrícola bajo riego ya que tanto ésta como la evolución de las tecnologías y prácticas de riego tendrán una gran influencia sobre la demanda futura de agua. Como

resultado, la expansión potencial de la superficie bajo riego incrementa la severidad de falla en el caso de algunas medidas de desempeño asociadas a los caudales mínimos, las coberturas de riego y la capacidad de los canales, para todos los escenarios climáticos. Dicha expansión también traería aparejada una mayor utilización de los canales de riego, cuya capacidad en algunos casos alcanzaría el límite máximo de conducción de agua. Tal es el caso del Canal Margen Norte de Valle Medio, el Canal Conesa y el Canal Principal de Valle Inferior. Gracias

a su elevado nivel de prioridad y a la magnitud relativamente reducida de los requerimientos urbanos, este uso no se vería comprometido desde el punto de vista del caudal disponible en los ríos. Sin embargo, se deben estudiar los potenciales problemas de cobertura urbana relacionados con la infraestructura de abastecimiento, aspectos que no han sido modelados en el presente trabajo. La Tabla 4 brinda un resumen de los principales impactos y estrategias de adaptación.

4. CONCLUSIONES

Existen políticas y acciones concretas que permitirían morigerar los impactos descritos anteriormente (Tabla 4). Una de las principales estrategias de adaptación es la implementación de los embalses Chihuido I, Michihuao y Pantanitos (Centrales de Alta Factibilidad). Estas obras permitirían mejorar la capacidad de regulación que posee el sistema hídrico y sostener los niveles históricos de generación hidroeléctrica en los escenarios climáticos más severos. Estas obras poseen un prolongado tiempo de maduración e implementación y un costo estimado en 5,000 millones U\$S. Cabe enfatizar que estas obras poseen un buen nivel de factibilidad en los listados oficiales de proyectos en cartera, y que los resultados del presente estudio señalan la necesidad de priorizar las mismas dentro del conjunto de proyectos existentes a nivel nacional.

Una segunda estrategia muy relevante sería la mejora de eficiencia en riego y conducción agrícola, incluyendo la remodelación y/o construcción de infraestructura de riego y drenaje. Ello se debe a que los requerimientos para riego agrícola explican la mayor parte de la demanda hídrica consuntiva anual del sistema, tanto en el presente como hacia el futuro. Por lo tanto, resulta prioritaria la implementación de medidas de adaptación en el sector agrícola, independientemente del escenario climático que se considere. La estrategia de mejora de eficiencia permitiría la expansión de áreas de riego, reduciendo o postergando impactos negativos y tiene un costo estimado de 1,900 millones U\$S.

Por último, la implementación de centrales hidroeléctricas de Baja Factibilidad (adicionales a las de Alta Factibilidad) permitiría incrementar además la generación hidroeléctrica respecto del promedio histórico, incluso en los climas más severos. Entre estas centrales podemos mencionar Collón Cura, La Invernada, Pini Mahuida, Cerro Rayoso, Huitrín, Chihuido II e Integral del Río Negro. Estas obras poseen un prolongado tiempo de maduración e implementación, y un costo estimado de 9,600 millones U\$S.

El impacto potencial de las fallas analizadas tiene implicancias concretas sobre el desarrollo y la sustentabilidad de diversas actividades productivas y de los asentamientos poblacionales de la región Comahue. La mayor parte de estos impactos podrían

ser atenuados mediante la adopción temprana de las medidas de adaptación aquí identificadas. Todas estas medidas deberían ser impulsadas desde el Estado, y requerirán de la activa colaboración de la población, organizaciones de la sociedad civil e instituciones privadas.

Si bien muchos de los impactos se vuelven significativos a partir de la década 2041-2050, consideramos que es muy importante ir avanzando en un proceso de planificación que los tome en cuenta, ya que las obras de infraestructura propuestas tienen asociados tiempos de maduración e implementación relativamente prolongados y un costo acumulado que puede ser cercano a los 16,000 millones de dólares.

Para avanzar en el conocimiento del sistema hídrico del Comahue e incrementar la utilidad del modelado como herramienta para la gestión es necesario mejorar la calidad de la información disponible para la calibración y actualizar el modelo hídrico-climático en forma periódica. Para ello es recomendable realizar un trabajo conjunto y sistemático entre las instituciones de investigación científica y los organismos encargados de realizar la gestión del sistema hídrico.

Todos los resultados, recomendaciones y herramientas generadas por el proyecto Climagua han sido puestos a disposición de los diversos organismos encargados de la gestión del recurso hídrico en el Comahue para que puedan ser tomados en cuenta en el proceso de planificación y toma de decisiones ante una problemática tan compleja como es el cambio climático. El reconocimiento por parte de las autoridades de la del severidad de los impactos potenciales identificados podría motivar la realización de estudios adicionales sobre las cuencas de los ríos Limay, Neuquén y Negro, y eventualmente la expansión del análisis a otras cuencas como herramienta para la definición de prioridades para el desarrollo de grandes obras de infraestructura hídrica a nivel nacional.

Agradecimientos

Queremos agradecer especialmente al International Development Research Centre de Canadá (IDRC), sin cuyo apoyo hubiese sido imposible el desarrollo del proyecto Climagua y la obtención de los resultados aquí presentados. También agradecemos la provisión de información para el modelado y la participación en talleres de discusión a: Carlos Merg, Martín Nini y Federico Schmidt del Departamento Provincial de Aguas de Río Negro; Marcela González y Daniel Lima de la Subsecretaría de Recursos Hídricos del Neuquén; Aníbal Asencio y Ana Martínez de la Autoridad Interjurisdiccional de las Cuencas de los ríos Limay, Neuquén y Negro; Juan Galeazzi de la Universidad Nacional del Comahue; David Purkey, Marisa Escobar y Charles Young del Stockholm Environment Institute – Davis.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Condom, T., M. Escobar, D. Purkey, J. Pouget, W. Suarez, C. Ramos, J. Apaestegui, T. Arnaldo, J. Gomez. 2012. Simulating the implications of glaciers' retreat for water management: a case study in the Rio Santa basin, Peru. *Water Int.* 37, 442–459. doi:10.1080/02508060.2012.706773
- Escobar, M., B. Carvajal, J. Rubiano, M. Mulligan, C. Candelo. 2016. Building hydroliteracy among stakeholders for effective water benefit sharing in the Andes. *Water Int.* 1–18. doi:10.1080/02508060.2016.1174546
- Escobar, M., N. Lima, D. Purkey, D. Yates, L. Forni. 2013. Modelación hidrológica y escenarios de cambio climático en cuencas de suministro de agua de las ciudades La Paz y El Alto, Bolivia. *Aqua-LAC* 5, 23–34.
- Flores, F., M. Escobar, D. Purkey, L. Forni, H. Segura. 2012. Un Marco de Apoyo a la Toma de Decisiones para Adaptación al Cambio Climático, Reporte Final del Proyecto: Modelación del Rol de Páramo en la Hidrología Bajo un Escenario de Cambio Climático. Stockholm Environment Institute, 40 páginas.
- Forni, L., S. Galaitsi, V. Mehta, M. Escobar, D. Purkey, N. Depsky, N. Lima. 2016. Exploring scientific information for policy making under deep uncertainty. *Environmental Modelling & Software*, 86, pp. 232–247.
- Fundación Torcuato Di Tella. 2006. Vulnerabilidad de la Patagonia y Sur de La Pampa y de Buenos Aires al cambio climático, Argentina: Actividades habilitantes para la Segunda Comunicación Nacional sobre cambio climático. Buenos Aires, 368 páginas.
- IPCC. 2014. *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 páginas.
- Jaramillo, M.F., A. Galvis, M. Escobar, L. Forni, D. Purkey, J. Sieber, G. Lozano, C. Rodríguez, J. Castaño, C. Sabas. 2016. Integración de los modelos WEAP y QUAL2K para la simulación de la calidad del agua de fuentes superficiales. Caso de estudio: Cuenca del río La Vieja, Colombia. *Aqua-LAC* 8, 14–24.
- Lempert, R.J., S. Popper, S. Bankes. 2003. *Shaping the next one hundred years - New Methods for Quantitative, Long-Term Policy Analysis*. The Rand Pardee Center, Santa Monica, California, USA.
- Losano F., P. Cello, M. Marizza, L. Forni, C. Young, G. Nadal, O. Girardin, L. Bucciarelli, R. Vallejos, & S. Godoy. 2015. Modelo de gestión para la evaluación del estrés hídrico en la región del Comahue. VIII Congreso Argentino de Presas y Aprovechamientos Hidroeléctricos, Santa Fe, Argentina.
- Yates, D., J. Sieber, D. Purkey, and A. Huber-Lee. 2005a. WEAP a Demand, Priority, and Preference Driven Water Planning Model: Part 1, Model Characteristics. *Water International* 30(4):487–500.
- Yates, D., J. Sieber, D. Purkey, and A. Huber-Lee. 2005b. WEAP21 – A Demand-, Priority-, and Preference-Driven Water Planning Model. Part 2: Aiding Freshwater Ecosystem Service Evaluation. *Water International*, 30(4), pp. 501-512.