

**SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA**  
**XXIV CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA**

**ADAPTACIÓN FRENTE AL CAMBIO CLIMÁTICO. PROPUESTA DE CAMBIO DE  
MATRIZ DE CULTIVOS EN LA CUENCA DEL RÍO RAPEL**

**MARÍA JOSÉ GONZÁLEZ MOLINA.<sup>1</sup>**  
**XIMENA VARGAS MESA.<sup>2</sup>**  
**NICOLÁS VÁSQUEZ PLACENCIA.<sup>3</sup>**

**RESUMEN**

Según las proyecciones dadas por el cambio climático, se espera en Chile un aumento de la temperatura y disminución de la precipitación. La cuenca del Río Rapel, ubicada en Chile Central, presenta una actividad agrícola relevante económicamente, que depende de la disponibilidad hídrica estival, por lo que su desarrollo es sensible a las proyecciones futuras climáticas. Por esta razón, este trabajo se centra en el estudio de las modificaciones del uso de suelo agrícola y cambio climático en la cuenca del Río Rapel, con el fin de plantear recomendaciones al uso de suelo actual. Se utiliza el modelo hidrológico VIC (Variable Infiltration Capacity) y se simula la cuenca en régimen natural, en base a los registros meteorológicos históricos (1979-2014) y forzantes futuras (2015-2060) derivadas de cuatro modelos de circulación global, asociadas al escenario de emisiones de dióxido de carbono RCP8.5.

A nivel de celda, se identifican diferencias en la escorrentía según cultivo, sin embargo, a nivel de cuenca solo se aprecian diferencias en la demanda evapotranspirativa entre escenarios. Se proyecta una reducción de la escorrentía con respecto al periodo histórico, de cerca de 10% para el periodo (2015-2039) y de 20% para el periodo (2040-2059). Se concluye que todos los escenarios planteados, entre diciembre a marzo, proyectan déficit en Cachapoal, mientras que en Tinguiririca se identifican escenarios sin déficit. Debido a la disponibilidad de agua a nivel anual, es necesario tomar medidas de almacenamiento de la escorrentía para los meses de déficit.

---

<sup>1</sup>Memorista, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile – maria.gonzalez.m@ug.uchile.cl

<sup>2</sup>Profesora Asociada, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile – xvargas@uchile.cl

<sup>3</sup>Ingeniero Civil, M.Sc., Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile – nicolas.vasquez.pl@uchile.cl

## 1. INTRODUCCIÓN

El cambio climático, proyecta a nivel nacional en aumento de la temperatura y disminución de la precipitación (INFODEP, 2016), lo cual tiene efecto directo en la disponibilidad hídrica proyectada. Otros, agentes como las propiedades físicas del suelo tienen influencia en la respuesta hidrológica (Dunn & Mackey, 1995), así también, las alteraciones en la cubierta vegetal pueden influir en propiedades como la rugosidad de la superficie terrestre o el índice del área foliar, entre otros, que pueden generar cambios en el balance de energía superficial y en la evapotranspiración (Pielke & Avissar, 1990; Greene et al., 1999). De hecho, el cambio de uso de suelo puede afectar la frecuencia de inundaciones, las pérdidas por evaporación a la atmósfera, el contenido de humedad del suelo, la escorrentía y los patrones del flujo base (Mao & Cherkauer, 2009).

De este modo, es urgente estimar la disponibilidad hídrica futura, considerando ambos aspectos, cambio climático y modificaciones de uso de suelo. Para ello, es de utilidad los modelos hidrológicos, que permiten representar los procesos físicos del ciclo del agua. En particular, la modelación hidrológica es útil para predecir inundaciones, sequías, recarga de aguas subterráneas e intercambio tierra-atmósfera, y es una herramienta relevante para el desarrollo de estrategias de planificación y gestión de recursos hídricos (Hrachowitz & Clark, 2017).

En particular, el modelo VIC (Variable Infiltration Capacity; Liang et al., 1994) corresponde a un modelo hidrológico distribuido y de base física, el cual resuelve balances de masa y de energía. Fue desarrollado por Xu Liang en la Universidad de Washington y ha sido aplicado en varias cuencas. Ejemplos de esto, son los estudios de cambio de uso de suelo y/o cambio climático desarrollado en: río Qingyi en China (Liu et al., 2013), río Yellow en China (Cuo et al., 2013), río Pennar de India (Garg et al., 2017), entre otros.

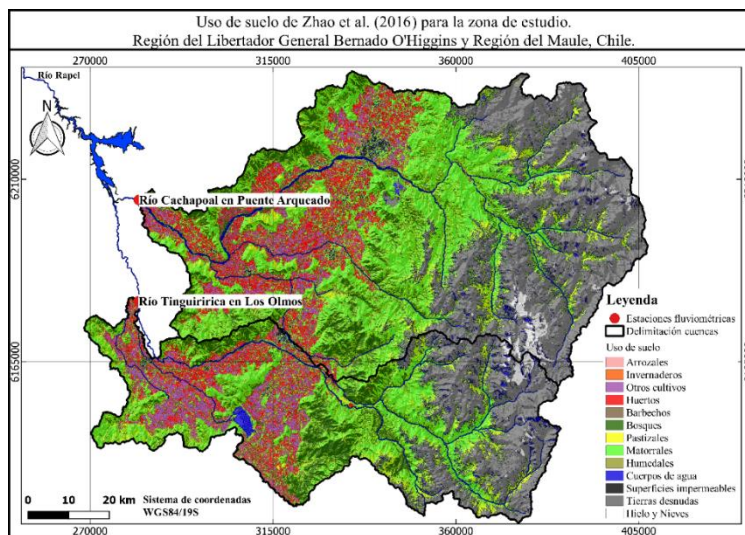
Dado que la Cuenca del Río Rapel se constituye como una zona donde la actividad agrícola es de importancia, es necesario analizar medidas de adaptación a las nuevas condiciones de limitación de recurso hídrico dadas por el cambio climático. Según el Atlas del agua (MOP, 2016) esta Macrozona posee uno de los suelos más fértiles de Chile, debido a la abundancia de agua producto de los deshielos, lo que ha conducido a la producción de una gran variedad de frutas y hortalizas, mayoritariamente para exportación. Sin embargo, según Bozkurt et al. (2018), considerando el escenario de mayor emisión de dióxido de carbono, es decir, RCP8.5, se espera para esta zona una reducción de la precipitación, cuyos valores medios son: un 10% para el 2040, de 18% para el 2070 y 30% para el 2100, con respecto al periodo histórico, lo cual tendría efecto en la disponibilidad hídrica para el desarrollo de la agricultura y otros usos.

En este contexto, este trabajo se basa en el análisis de la respuesta hidrológicas en base a cambio de uso de suelo agrícola y cambio climático, para ello se simulan las subcuencas del río Tinguiririca y río Cachapoal, en el modelo hidrológico VIC. Para llevar a cabo la serie de simulaciones se utiliza el supercomputador Leftraru del Centro de Modelamiento Matemático (CMM) de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, de la Universidad de Chile. Y se considera el trabajo base realizado por el proyecto “Aplicación de la Metodología de Actualización del Balance Hídrico Nacional en las cuencas de las macrozonas Norte y Centro” (DGA, 2018)

## 2. ZONA DE ESTUDIO

La zona de estudio corresponde a la cuenca del río Rapel, ubicada en Chile Central (~34-35°S), cuya área comprenden la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins y la Región del Maule. El río Rapel se compone de las subcuencas del río Cachapoal (Código BNA 6019003) y río Tinguiririca (Código BNA 6035001) (Ver Figura 1). La subcuenca del Río Cachapoal comprende un área de 6265 [km<sup>2</sup>], mientras que la subcuenca del Río Tinguiririca comprende un área de 3.535 [km<sup>2</sup>].

Debido a la necesidad de conocer las áreas de cultivos de la zona de estudio, es de utilidad el uso de suelo desarrollado por el Laboratorio de Geomática y Ecología de Paisaje GEP (Zhao et al., 2016), el cual se presenta en la Figura 1.



**Figura 1:** Uso de suelo de la Cuenca del Rapel. Fuente: (Zhao et al., 2016)

A partir del uso de suelo de Zhao et al. (2016) de la Figura 1, en la cuenca del Rapel, se tiene un 19% de cultivos (que incluye: arrozales, invernaderos, huertos, barbechos y otros cultivos), un 15% de bosques, un 15% de pastizales, un 18% de matorrales, 3% de cuerpos de agua, 3% de superficies impermeables, 25% tierras desnudas y 1% de hielo y nieves.

## 3. METODOLOGÍA

Para conocer la respuesta hidrológica bajo diferentes usos de suelo agrícola, se simulan ambas subcuencas en el periodo histórico (1979-2014) y en el periodo futuro (2015-2060). Para las forzantes históricas se utiliza el producto grillado CR2MET (DGA, 2018). Para las forzantes futuras, se utilizan los modelos de circulación global: CCSM4 (Community Climate System Model), CSIRO (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation), IPSL (Institut Pierre Simon Laplace), y MIROC (Model for Interdisciplinary Research on Climate), asociados al escenario de emisiones de dióxido de carbono RCP8.5. Dichos modelos se denominan en adelante como GCMs y son obtenidos de DGA (2018), al igual que los parámetros de suelo.

El uso de suelo base, se denomina CBC y utiliza el área de cultivo dada por el uso de suelo de Zhao et al. (2016) y comprende un conjunto de 40 cultivos representativos de la zona de estudio. Dichos

cultivos se distribuyen en el área de cultivo según el porcentaje dado por el Censo Agropecuario y Forestal del año 2007 del Instituto Nacional Estadística (INE). De esto modo, el CBC es un uso de suelo que presenta un mayor detalle en cuanto a agricultura. Los 40 cultivos comprenden 19 frutales, 1 viñedo, 14 hortalizas y 6 anuales.

Para representar los cultivos en el modelo VIC, se estiman los parámetros de vegetación propios para cada cultivo. Los parámetros LAI (índice de área foliar, en sus siglas en inglés) y albedo, son estimados a partir de información derivada de las imágenes Landsat 8 y dos catastros agrícolas (el Catastro Hortícola del 2017 y el Catastro Frutícola del 2018, ambos de CIREN). Otros parámetros, como la resistencia mínima estomática, radiación mínima a la que se inicia la transpiración, profundidad y distribución de las raíces en cada capa, altura del cultivo y la fracción del tronco libre de hojas, se estiman en base a bibliografía.

### **Análisis a nivel de celda**

En una primera instancia, se evalúa la respuesta hidrológica promedio por cultivo, de modo de estimar su demanda evapotranspirativa (denominada en adelante como DE). En este estudio, la DE representa la estimación del requerimiento hídrico de la planta, la cual se estima como la diferencia entre la evapotranspiración potencial (PET) y la evapotranspiración real (ET), ambas derivadas de la modelación.

Para cada cultivo, se simulan todas las celdas factibles de cultivar, tanto en el periodo histórico como el futuro. Las celdas factibles de cultivar se definen como aquellas que se encuentran bajo el límite de la cota 1000 (m.s.n.m) y de la pendiente de 17°, comprendiendo el límite erosivo según García (1954). Para comparar la respuesta hidrológica de cada cultivo, se utiliza el promedio anual en el periodo respectivo y promedio entre celdas factibles de cultivar.

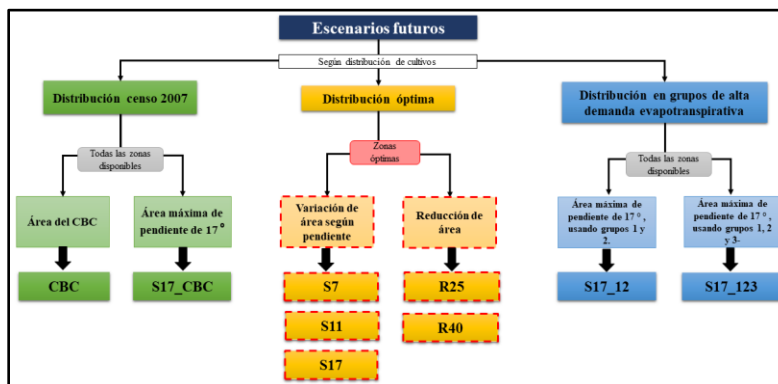
Debido a la similitud entre algunos cultivos, se plantean grupos, donde el grupo 1 es el de mayor demanda evapotranspirativa y el grupo 8 el de menor demanda. Dicha clasificación se realiza aplicando el algoritmo Kmeans y la minimización de la distancia euclidiana, en base a los valores promedio de escorrentía, índice de aridez (P/PET) y demanda evapotranspirativa (PET-ET).

A partir de la asignación de grupos, se define una “distribución óptima” de cultivo, la cual en base al CBC reduce el porcentaje de los grupos demandantes y aumenta el porcentaje de los grupos de menor demanda. Además, se obtiene la “ubicación óptima” de los cultivos, al identificar las celdas que reportan una DE menor o igual al promedio entre celdas factibles de cultivar.

### **Análisis a nivel de celda**

Para el periodo futuro, se evalúa el CBC y los escenarios futuros propuestos por subcuenca. Los escenarios planteados se definen en base a una “distribución óptima”, o bien, utilizan la distribución base dada por el Censo 2007; además, utilizan “zonas óptimas” o bien, emplean todas las celdas disponibles dadas por su área máxima. Las áreas máximas por cultivar se definen de acuerdo con la pendiente de terreno, las cuales son: de 7°, 11° y 17°, asociada a 12%, 20% y 30% por ciento de pendiente, respectivamente. Esto es debido a que en 12% de pendiente se inicia la erosión del terreno y en 30% se establece el límite erosivo según el trabajo de García (1954). El cálculo de dichas áreas se realiza en base al modelo de elevación digital ALOS PALSAR (ASF DAAC, 2019).

En la Figura 2 se presenta un diagrama de cómo se definen estos escenarios, clasificados de acuerdo con la distribución de cultivos adoptada.



**Figura 2:** Diagrama definición escenarios futuros.

Los escenarios CBC y S17\_CBC, utilizan la distribución de cultivos del CBC, dada por el Censo del 2007, el primero es el caso base histórico y el segundo es una proyección de aumento de área hasta el límite de 17° de pendiente. En ambos casos, se emplean todas las celdas disponibles, incluyendo celdas óptimas y no óptimas.

En la distribución óptima de cultivo, se tiene los escenarios de área máxima dada por las pendientes de 7° (S7), de 11° (S11) y de 17° (S17), los cuales solo consideran las celdas óptimas presente en su área máxima. Además, se plantean dos escenarios de reducción de área de cultivo: reducción de un 25% (R25) y de un 40% (R40) con respecto al área cultivada del CBC, que utilizan celdas óptimas presentes hasta la pendiente de 7°, de modo de privilegiar las zonas planas, de mayor acceso.

Finalmente, se utiliza la distribución en grupos de alta demanda evapotranspirativa, donde se emplea el total de área disponible hasta la pendiente de 17°, lo cual comprende celdas óptimas y no óptimas. Donde el escenario S17\_12 posee los cultivos del grupo 1 y 2, y el escenario S17\_g123 emplea los cultivos de los grupos 1, 2 y 3, donde el grupo 1 es el más demandante y el 8 el menos demandante.

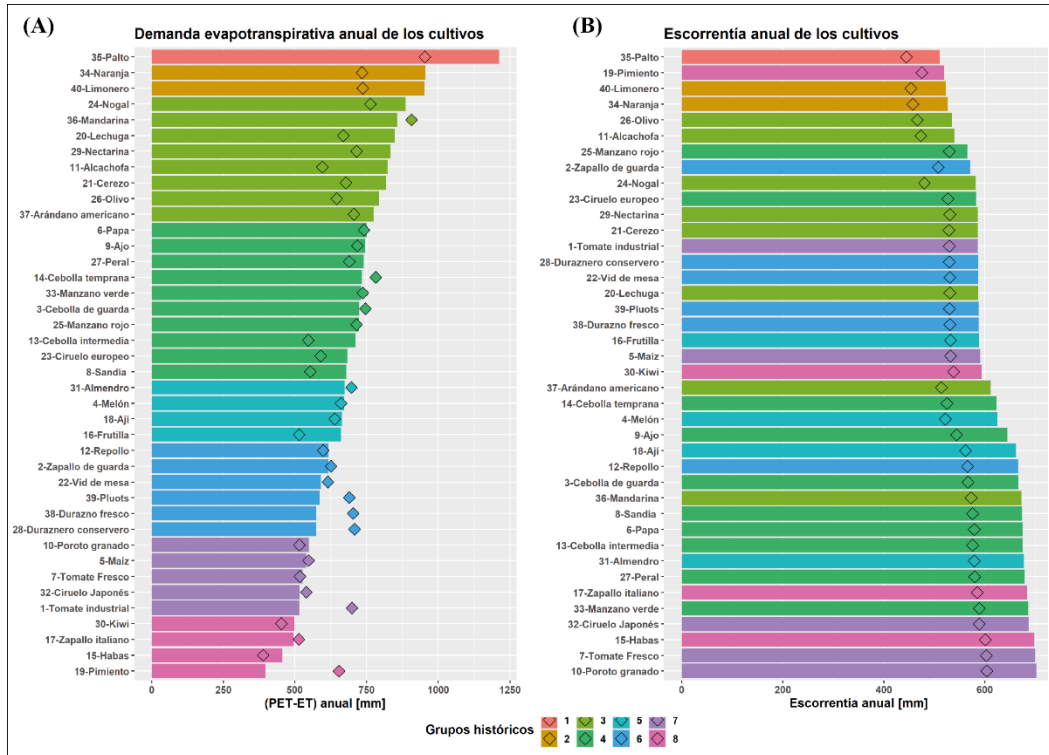
Para analizar la relación entre demanda y disponibilidad, a la DE derivada de los escenarios, se agregan los derechos de aprovechamiento de agua, derivados del trabajo de Budde et al. (2019). Debido a que el modelo VIC, trabaja a nivel superficial, se emplean solo los derechos de agua de tipo consuntivo y superficial, con usos distintos al de riego. Cabe mencionar que la demanda evapotranspirativa de los escenarios considera el solo el área con cultivos agrícolas, excluyendo las otras clases de vegetación, por ello, los resultados son presentados en términos de volumen.

## 4. RESULTADOS

### Análisis a nivel de celda

En la Figura 3, en (A) se presenta la DE anual de cada cultivo, correspondiente al promedio entre celdas factibles de cultivar y promedio anual, ordenados según DE, donde el grupo 1 es el más

demandante. Luego en (B) se presenta la escorrentía, ordenados de menor a mayor escorrentía. En barras se presenta el resultado del periodo histórico (1984-2014) y en rombo el resultado en el periodo futuro (2015-2059), mientras que el color corresponde al grupo al cual pertenece, el cual se define según las forzantes históricas.



**Figura 3:** Demanda evapotranspirativa (A) y escorrentía promedio (B) por cultivo, cuyos colores definen al grupo al cual pertenecen. En barras se representa el periodo histórico y en rombos el periodo (2015-2059).

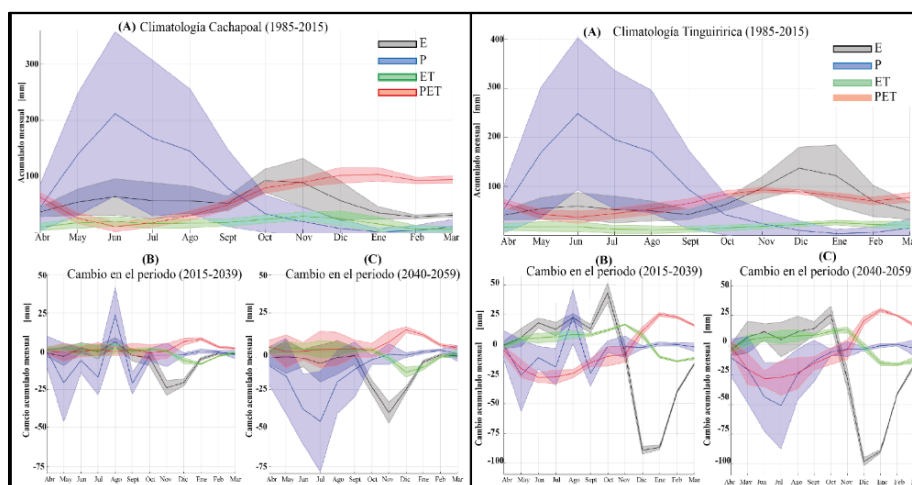
En (A) que la DE varía de 300 a 1250 mm/año entre cultivos, donde el grupo 1 contiene solo al Palto, el cual en el periodo futuro disminuye su demanda promedio, pero sigue siendo el más demandante del conjunto; el grupo 2 contiene a los cítricos (naranja y limonero); y el grupo 3 se compone de seis frutales y dos hortalizas (la lechuga y alcachofa). Luego en los grupos menos demandantes, se destaca el grupo 6 que contienen frutales como vid de mesa, el durazno fresco y conservero. Luego el grupo 7, comprende al kiwi y ciruelo, tomate industrial, tomate fresco, maíz, y poroto granado. Luego en cuanto a la comparación entre periodo histórico y futuro, se observa que en los frutales la mayoría disminuye su demanda evapotranspirativa, a excepción del nogal, almendro, pluots, durazno fresco y conservero, que aumentan su demanda evapotranspirativa. Y en las hortalizas, el pimiento, tomate y cebolla temprana aumenta en cierta medida su demanda evapotranspirativa, mientras que el resto mantiene o disminuye su valor.

Luego (B) se aprecia que la escorrentía varía en un rango menor de 500 a 700 mm/año, donde los grupos 1 y 2, junto con el pimiento, presentan menor escorrentía. Luego, al ir aumentando la demanda no se observa una tendencia clara donde los cultivos más demandantes sean los de menor escorrentía. Sin embargo, en los valores de mayor escorrentía se identifican principalmente cultivos del grupo 7 y 8. Además, en la comparación entre el periodo histórico y futuro, se identifica que

todos los cultivos reducen la escorrentía en el periodo futuro, manteniendo la relación que poseen entre sí en el periodo histórico, salvo excepciones.

### Cambio estacional proyectado a nivel de cuenca

Con ello, en Figura 4, para cada subcuenca, se presenta en (A) la climatología para el CBC en el periodo histórico (1985-2014), donde en línea continua se presenta los valores medios y en sombra el delta de error de los datos de cada año del periodo histórico. En (B) y (C), se presenta el cambio del monto mensual de cada variable en los periodos futuros (2015-2039 y 2040-2059, respectivamente), con respecto al promedio del periodo histórico, considerando los cuatro GCMs.



**Figura 4:** En (A) la climatología, en (B) el cambio en el periodo (2015-2039) y en (C) el cambio en el periodo (2040-2059) con respecto al promedio del periodo histórico.

En la Figura 4, para la subcuenca de Cachapoal, en (A) se aprecia que la precipitación alcanza los 200 mm/mes en junio, principalmente entre abril y octubre. La escorrentía (E) presenta su máximo valor entre octubre y noviembre llegando a los 100 mm/mes, apreciándose un segundo máximo en junio de 70 mm/mes, lo que verifica el régimen nivo-pluvial de la subcuenca. La DE tiene su mínima en el mes de junio alcanzando 10 mm, y entre octubre a marzo se encuentra la máxima DE cercana a los 100 mm/mes. En los meses de julio la DE es cercana a 0 por la presencia de precipitación. Y la evapotranspiración (ET) presenta valores relativamente constantes.

En Tinguiririca en (A) se aprecia un mayor nivel de precipitaciones que en Cachapoal, las cuales se presentan entre los meses de abril a octubre. El valor máximo se presenta en el mes de junio, cuyo valor medio es de 250 mm/mes. La escorrentía presenta su mayor magnitud en el mes de diciembre con 140 mm/mes, observándose también un valor máximo en el mes junio de 70 mm/mes, lo que ratifica el régimen nivo-pluvial de la subcuenca. El máximo de la DE se encuentra entre los meses de diciembre a enero. Y la ET presenta valores relativamente constantes.

En el futuro, para ambas subcuencas se proyecta un déficit de precipitación en los meses preferentes de lluvias (de abril a septiembre), presentando un leve aumento de las precipitaciones en agosto. Y se proyecta una disminución de la escorrentía de deshielo en los meses de septiembre a octubre, donde en Tinguiririca esto va acompañado de un leve aumento de la escorrentía de abril a octubre.



## Análisis a nivel de cuenca

En la Tabla 1 se presenta las distribuciones de porcentajes por grupos de cultivos, aplicada en los escenarios, por cada subcuenca. Y en la Tabla 2 se presentan las características de cada escenario planteado.

**Tabla 1:** Distribución de cultivos aplicado en los escenarios planteados.

Porcentaje de cada grupo de cultivos por escenario.									
Subcuenca Cachapoal					Subcuenca Tinguiririca				
Grupo	Censo	Óptima	g12	g123	Grupo	Censo	Óptima	g12	g123
1	2,6%	2,6%	50%	33%	1	0,20%	0,2%	50%	33%
2	3,6%	3,6%	50%	33%	2	1,4%	1,4%	50%	33%
3	9,2%	6,7%	0%	33%	3	6,4%	6,4%	0%	33%
4	11,8%	9,3%	0%	0%	4	11,0%	8,0%	0%	0%
5	7,7%	12,7%	0%	0%	5	10,0%	13,0%	0%	0%
6	30,4%	30,4%	0%	0%	6	21,5%	21,5%	0%	0%
7 y 8	34,6%	34,6%	0%	0%	7 y 8	49,5%	49,5%	0%	0%

En la Tabla 1 se aprecia en la distribución base del Censo 2007, que cada subcuenca presenta mayor porcentaje de grupos menos demandantes, donde en la subcuenca de Cachapoal se presenta mayores porcentajes en los grupos 3, 4, 6, 7 y 8, y en Tinguiririca se tiene mayores porcentajes en los grupos 4, 5, 6, 7 y 8. A su vez los grupos 1 y 2 son los menos cultivados en ambas subcuencas. En base a esto, Tinguiririca posee una distribución inicial de cultivos menos demandantes que Cachapoal.

**Tabla 2:** Características de los escenarios futuros y el CBC, para la subcuenca de Cachapoal (C) y Tinguiririca (T).

Escenario de uso de suelo	Distribución de cultivos	¿Utiliza todas las zonas o solo las óptimas?	¿Reemplaza bosques, pastizales y matorrales?	Porcentaje celdas óptimas utilizadas		Porcentaje de área cultivada c/r área total		Porcentaje de área cultivada c/r área del CBC	
				C	T	C	T	C	T
<b>CBC</b>	Censo 2007	Todas	No	-	-	20,8%	28%	100%	100%
<b>R25</b>	Óptima	Todas	No	100%	100%	15,6%	21%	75%	75%
<b>R40</b>	Óptima	Todas	No	100%	100%	12,5%	17%	60%	60%
<b>S7</b>	Óptima	Óptima	No	85%	88%	21,5%	25%	103%	89%
<b>S11</b>	Óptima	Óptima	No	78%	83%	21,7%	26%	104%	91%
<b>S17</b>	Óptima	Óptima	No	70%	73%	21,9%	26%	105%	93%
<b>S17C_cbc</b>	Censo 2007	Todas	Sí	70%	73%	31,4%	36%	151%	126%
<b>S17C_g12</b>	Grupos 1 y 2	Todas	Sí	70%	73%	31,4%	36%	151%	126%
<b>S17C_g123</b>	Grupos 1, 2 y 3	Todas	Sí	70%	73%	31,4%	36%	151%	126%

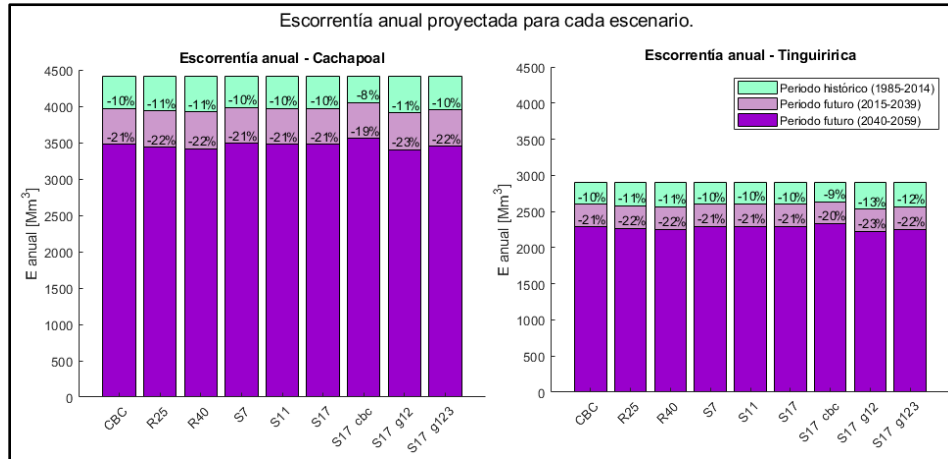
De la Tabla 2 se aprecia que los escenarios de pendiente (S7, S11 y S17) comprenden escenarios de leves aumentos de áreas con respecto al CBC para Cachapoal, mientras que para Tinguiririca



comprenden reducción, esto debido a que se seleccionan solo las celdas óptimas disponibles en el área máxima. Y los escenarios S17\_cbc, S17c\_g12 y S17\_g123, debido a que no se disponen de suficientes áreas con suelo desnudo, para completar dicha área máxima se debió cambiar las clases de bosques, pastizales y matorrales por cultivos.

*Cambio escorrentía a nivel de cuenca*

En la Figura 5 se presenta los valores anuales es de escorrentía para cada escenario y en cada periodo.

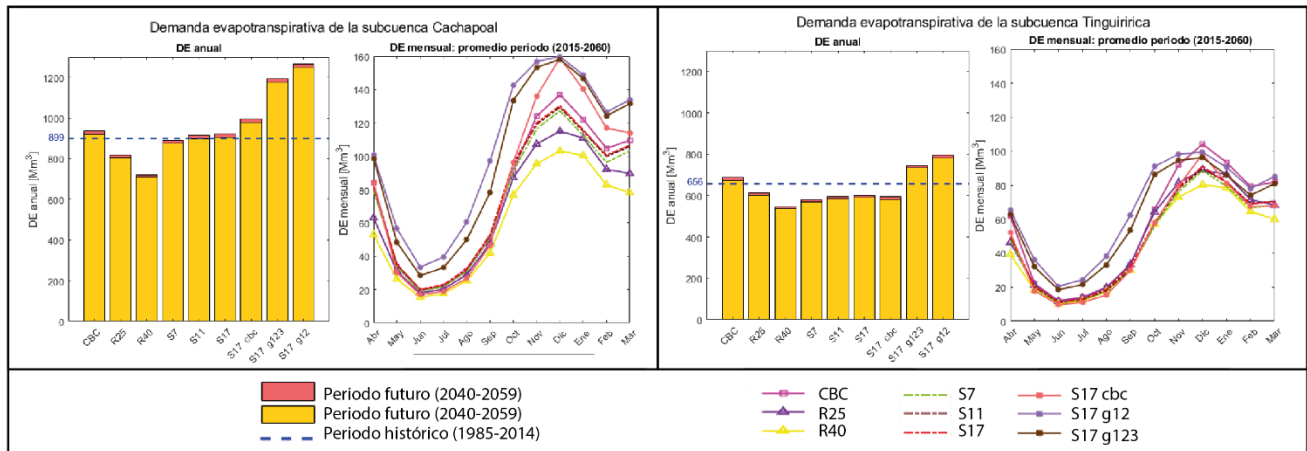


**Figura 5:** Volumen de escorrentía (en Mm<sup>3</sup>), en cada periodo. Y en el interior de las barras se presenta el porcentaje de cambio la escorrentía futura respecto al periodo histórico (1985-2015).

A partir de la Figura 5 en la subcuenca de Cachapoal se aprecia una escorrentía histórica de cerca de 4500 [Mm<sup>3</sup>], luego entre escenarios no se presentan diferencias significativas, donde para el periodo (2015-2039) se aprecia que la escorrentía se reduce a 4000 [Mm<sup>3</sup>], y en el periodo (2040-2059) a 3500 [Mm<sup>3</sup>]. Mientras que en la subcuenca de Tinguiririca se aprecia una escorrentía histórica de cerca de 2850 [Mm<sup>3</sup>], luego entre escenarios tampoco se presentan diferencias significativas, donde para el periodo (2015-2039) se aprecia que la escorrentía se reduce a 2650 [Mm<sup>3</sup>] y en (2040-2059) a 2450 [Mm<sup>3</sup>]. En ambas subcuencas, ordenando los escenarios según reducción de escorrentía se tiene: S17\_g12 > S17\_g123 ≈ R40 ≈ R25 > CBC ≈ S7 ≈ S11 ≈ S17

*Cambio demanda a nivel de cuenca*

Se presentan en la Figura 6, para cada subcuenca, un gráfico de la demanda anual para el periodo histórico y los periodos futuros (2014-2039 y 2040-2069), y un gráfico de la demanda evapotranspirativa mensual para el promedio del periodo histórico (2015-2059).



**Figura 6:** Demanda evapotranspirativa de cada escenario.

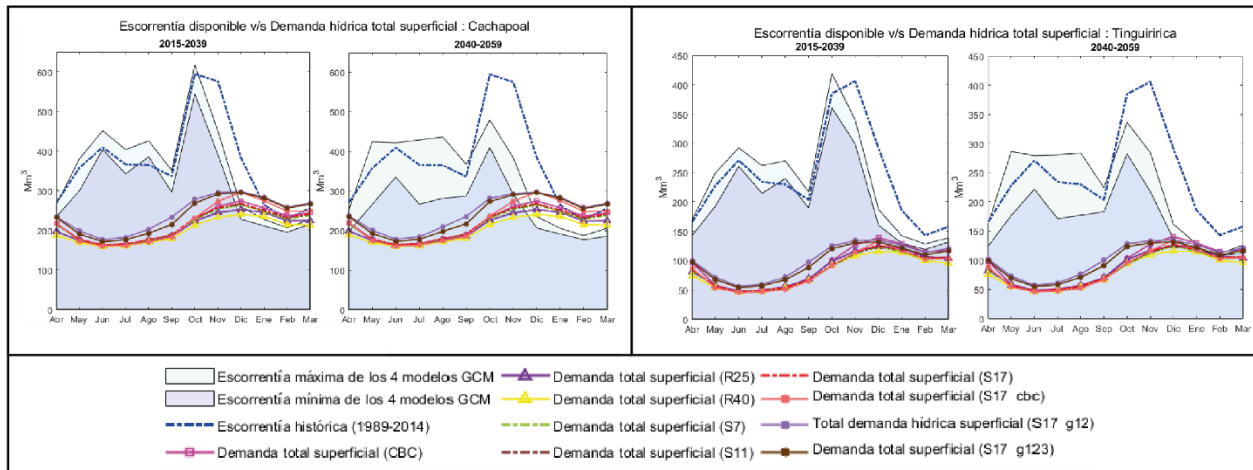
A partir de la Figura 6, se aprecia en ambas subcuencas la demanda evapotranspirativa presenta su mínimo en el mes de junio, incrementando hasta llegar a septiembre donde crece a una tasa mayor. Luego de octubre a marzo se identifican la mayor demanda, con máximo en el mes de diciembre. En Cachapoal, los escenarios ordenados según su demanda evapotranspirativa anual, corresponden a lo siguiente:  $S17\_g12 > S17\_g123 > S17\_cbc > CBC \approx S17 \approx S11 > S7 > R25 > R40$

Para Cachapoal, la demanda evapotranspirativa anual del CBC en el periodo histórico es de 899 [ $Mm^3$ ] y en el periodo futuro se incrementa. Se aprecia, además, que solo los escenarios R25, R40 y S7, comprende una reducción de la demanda evapotranspirativa a un nivel menor que la actual, pero la reducción de S7 es despreciable. Luego, los escenarios ordenados según su demanda evapotranspirativa anual, corresponden a lo siguiente:  $S17\_g12 > S17\_g123 > CBC > R25 \approx S11 \approx S17 \approx S17\_cbc > S7 > R40$

Para Tinguiririca, la demanda evapotranspirativa anual del CBC en el periodo histórico corresponde a 656 [ $Mm^3$ ], con lo cual se aprecia que el CBC en el periodo futuro se incrementa, y solo los escenarios S17\_g12 y S17\_g123, comprende un aumento de la demanda evapotranspirativa con respecto a este nivel histórico, mientras que el resto de los escenarios reducen a un nivel más bajo que la demanda evapotranspirativa actual.

### *Balace entre escorrentía disponible y demanda hídrica total superficial*

En la Figura 7 se compara a nivel de volumen mensual, la escorrentía y la demanda hídrica total superficial de cada escenario, lo cual comprende la suma de la demanda evapotranspirativa simulada con el modelo y la suma de derechos superficiales consuntivos de usos distintos al de riego. En estos gráficos, se presenta un balance para el periodo futuro (2015-2039 y 2040-2059), en donde la escorrentía futura se representa como gráfico de área, en donde a partir de los cuatro GCMs se obtiene un valor mínimo y máximo para la escorrentía, cuyos valores se presentan como límites. Mientras que la escorrentía histórica se presenta como línea segmentada de color azul.



**Figura 7:** Comparación entre escorrentía y demanda hídrica total superficial.

En cuanto a la escorrentía, en ambas subcuencas se observa que la escorrentía histórica de mayo a septiembre se ubica en los límites de la escorrentía futura, para ambos periodos. Luego, en el periodo futuro (2040-2059) se aprecia una mayor dispersión del valor de la escorrentía en los meses de mayo a septiembre. Además, en el periodo futuro (2015-2039) se aprecia que a partir del mes de octubre la escorrentía futura es menor a la histórica, mientras que para el periodo futuro (2040-2059), esto ocurre antes, en el mes de septiembre, presentándose una reducción del caudal de deshielo de mayor magnitud.

En Cachapoal, en cuanto a la demanda evapotranspirativa, en el periodo futuro (2015-2039) se aprecia, que existe déficit de escorrentía desde el mes de diciembre a marzo, donde en el mes de diciembre, solo los escenarios R25 y R40 están bajo el límite superior de la escorrentía futura, sin embargo, de enero a marzo todos los escenarios presentan déficit. Luego, en el periodo de (2040-2059) se tiene que desde diciembre a marzo se presenta déficit para todos los escenarios planteados.

En Tinguiririca, en cuanto a la demanda evapotranspirativa, en el periodo futuro (2015-2039) se aprecia, que no existe déficit, incluso en los meses de mayor demanda. Sin embargo, en el periodo de (2040-2059) se tiene que desde diciembre a marzo se puede suplir la demanda, pero de manera acotada, donde los escenarios CBC, S17\_g12 y S17\_g123, en los meses de enero y febrero pasan a tener déficit. Cabe notar que en cuanto a volumen anual, el escenario S17\_g123 tiene mayor demanda evapotranspirativa que el CBC, sin embargo, como se aprecia en la Figura 7 en el mes de noviembre el escenario CBC comienza a superar el escenario S17\_g123, lo cual está ligado al cambio en la estacionalidad de los cultivos de los grupos 1, 2 y 3 con respecto a los cultivos del CBC. Además, en el periodo de (2040-2059) se aprecia que solamente el escenario R40 se encuentra en el límite inferior de la escorrentía futura proyectada, por lo que sería recomendable en cualquier situación.

## 5. CONCLUSIÓN

En ambas subcuencas, se proyecta déficit de la precipitación con respecto al periodo histórico, en los meses preferentes de lluvias (de abril a septiembre), presentando un leve aumento en las precipitaciones de agosto. Se proyecta la disminución de la escorrentía de deshielo en los meses de

septiembre a octubre, lo que va acompañado de un aumento en menor medida de la escorrentía durante los meses de invierno. En particular, la reducción de la escorrentía se proyecta que se inicie en el mes de octubre para el periodo 2015-2039, y en septiembre para el periodo 2040-2059. El porcentaje de reducción de la escorrentía es cercana al 10% en los años 2015-2039 y al 20% en los años 2040-2059, con respecto al periodo histórico.

En cuanto a los escenarios planteados, se concluye que, a partir de la utilización de ubicación óptima y el uso de una distribución de cultivos adecuada, en donde se fomente el cultivo de especies de menor demanda, se logra reducir la demanda evapotranspirativa total de la cuenca. Sin embargo, esto es solo aplicable para Tinguiririca.

Luego, en la comparación entre disponibilidad y demanda hídrica total, para Cachapoal, se concluye que para el periodo 2015-2039 se proyecta déficit entre enero y marzo para todos los escenarios, mientras que para el periodo 2040-2059, entre diciembre a marzo se presenta déficit para todos los escenarios. En Tinguiririca, para el periodo 2015-2039 no se proyecta déficit de escorrentía, y para el periodo 2040-2059 entre diciembre a marzo se supe la demanda de manera acotada, donde los escenarios CBC, S17\_g12 y S17\_g123 en los meses de enero y febrero pasan a tener déficit. En particular, el escenario R40 se mantiene en el límite inferior de la escorrentía, por lo cual se recomienda como escenario.

Por ello, a pesar de que Tinguiririca presenta escenarios en los cuales se alcanza a suplir la demanda, para el periodo 2040-2059 la demanda se supe de manera acotada, por lo que para ambas cuencas se recomienda utilizar los escenarios de menor demanda y el empleo de técnicas de almacenamiento de la escorrentía. Debido a que la reducción del caudal de deshielo es relevante, esto motiva un cambio en la forma en que se ha utilizado el recurso en los años anteriores, en donde se dependía en gran medida de este caudal.

## **AGRADECIMIENTO**

Powered@NLHPC: Esta investigación fue parcialmente apoyada por la infraestructura de supercómputo del NLHPC (ECM-02).

## **REFERENCIAS**

ASF DAAC (2019), ALOS PALSAR Radiometric Terrain Corrected High res; © JAXA / METI 2011. Acceso a través de ASF DAAC el 30 de septiembre de 2019.

Bozkurt, D., Rojas, M., Boisier, J. P., & Valdivieso, J. (2018). Projected hydroclimate changes over Andean basins in central Chile from downscaled CMIP5 models under the low and high emission scenarios. *Climatic Change*, 150(3-4), 131-147.

Budde, N., Mendoza, P., Vasquez, N., Alvarez, C., & Barría, P. (2020). Diagnóstico de la información de derechos de agua en Chile, Santiago, Chile. XXIV Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica.

Cuo, L., Zhang, Y., Gao, Y., Hao, Z., & Cairang, L. (2013). The impacts of climate change and land cover/use transition on the hydrology in the upper Yellow River Basin, China. *Journal of Hydrology*, 502, 37-52.

DGA (2018), Aplicación de la metodología de actualización del balance hídrico nacional en las cuencas de las macrozonas norte y centro. SIT N° 417, Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación, Santiago, Chile. Realizado por: Fundación para la transferencia tecnológica Pontificia Universidad Católica de Chile.

García Nájera, J. M. (1954). Pendientes máximas admisibles en las tierras de cultivo y cálculo de las terrazas intermitentes con desagüe para la conservación del suelo (banquetas de infiltración). Instituto Forestal de Investigaciones y Experiencias. Madrid.

Garg, V., Aggarwal, S. P., Gupta, P. K., Nikam, B. R., Thakur, P. K., Srivastav, S. K., & Kumar, A. S. (2017). Assessment of land use land cover change impact on hydrological regime of a basin. *Environmental Earth Sciences*, 76(18), 635.

Greene, E. M., Liston, G. E., & Pielke Sr, R. A. (1999). Relationships between landscape, snowcover depletion, and regional weather and climate. *Hydrological Processes*, 13(14-15), 2453-2466.

Hrachowitz, M., Clark, M., P. (2017). Hess Opinions: The complementary merits of competing modelling philosophies in hydrology.

Información para el Desarrollo Productivo Ltda. (INFODEP) por Santibáñez, F. et al (2016). Elaboración de una base digital del clima comunal de Chile: línea base (1980-2010) y proyección al año 2050. Informe final Julio 2016. Elaborado en el marco del Proyecto "Tercera Comunicación Nacional sobre cambio climático". Ministerio del Medio Ambiente. Departamento de Cambio Climático.

Liang, Xu, Lettenmaier, Dennis P. (1994). A simple hydrologically based model of land surface water and energy fluxes for general circulation models. *Journal of Geophysical Research*, vol. 99(D7). 14,415-14,428, jul. 1994.

Liu, Y., Zhang, X., Xia, D., You, J., Rong, Y., & Bakir, M. (2013). Impacts of land-use and climate changes on hydrologic processes in the Qingyi River watershed, China. *Journal of Hydrologic Engineering*, 18(11), 1495-1512.  
Pielke, R. A., & Avissar, R. (1990). Influence of landscape structure on local and regional climate. *Landscape Ecology*, 4(2-3), 133-155.

MOP (2016) Atlas del Agua, A. (2016). Chile. Santiago.

Zhao, Y., Feng, D., Yu, L., Wang, X., Chen, Y., Bai, Y., ... & Radke, J. D. (2016). Detailed dynamic land cover mapping of Chile: Accuracy improvement by integrating multi-temporal data. *Remote Sensing of Environment*, 183, 170-185.