



CENTRO DE  
**POLÍTICAS  
PÚBLICAS UC**

TEMAS DE LA AGENDA PÚBLICA

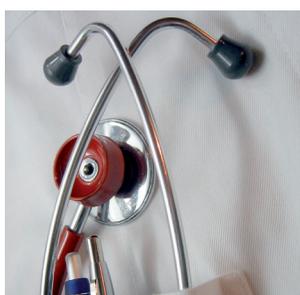
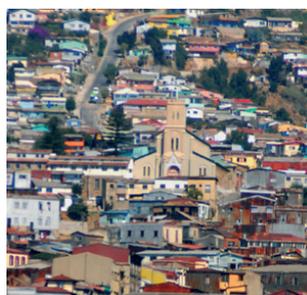
# Los nuevos desafíos para la gestión de los recursos hídricos en Chile en el marco del Cambio Global

**SEBASTIÁN VICUÑA**

Centro Interdisciplinario de Cambio Global

**FRANCISCO JAVIER MEZA**

Facultad de Agronomía e Ingeniería Forestal



# Los nuevos desafíos para la gestión de los recursos hídricos en Chile en el marco del Cambio Global

SEBASTIÁN VICUÑA

Centro Interdisciplinario de Cambio Global

FRANCISCO JAVIER MEZA

Facultad de Agronomía e Ingeniería Forestal

## Introducción

Quizás no hay en nuestro imaginario un elemento que se encuentre más estrechamente ligado a la vida que el agua. Como un reflejo de la dependencia biológica de todos los organismos, las distintas actividades humanas entablan un vínculo con los recursos hídricos, de manera que su acceso oportuno y en cantidades y calidad suficientes se transforma en una condición necesaria para poder proyectar sus caminos de desarrollo.

Puesto que la oferta de recursos hídricos es altamente variable y dado que la demanda es creciente, se requiere de planes de aprovechamiento para un uso eficiente de los recursos. Tradicionalmente estos planes se han basado en la premisa de que es posible caracterizar el comportamiento de los recursos hídricos y estimar su variabilidad al examinar la historia reciente.

No obstante, este paradigma ha sido puesto en entredicho por la posibilidad inminente de un cambio climático como consecuencia de la interferencia que tiene la actividad humana en la física de la atmósfera. Aun cuando persiste la incertidumbre sobre su magnitud, existe un relativo consenso que, de continuar con la trayectoria recientemente observada de uso de combustibles fósiles y de deforestación, es posible que en las próximas décadas se experimente un cambio climático de proporciones significativas (IPCC, 2007). A nivel nacional las investigaciones han proyectado una disminución en los montos de precipitaciones y un aumento de temperatura, los cuales impactan directamente a los recursos hídricos disponibles.

No obstante su magnitud e injerencia, el cambio climático no es el único factor que pone en jaque la disponibilidad y el actual sistema de distribución de recursos hídricos en Chile. Existen otros factores que operan a es-

cala regional o global y que actúan como determinantes (*drivers*) de grandes cambios en el comportamiento del ciclo hidrológico y de la relación entre oferta y demanda de agua. Entre ellos se encuentran el crecimiento poblacional, el mayor consumo de agua asociado a mayores niveles de desarrollo socioeconómico, y la transformación de territorio que implica la sustitución de la vegetación natural y/o el avance del área urbana.

Este trabajo tiene por objeto poner en relieve una serie de problemas y desafíos para la gestión de recursos hídricos en el contexto del cambio global y discutir de qué manera ellos se ven agravados por la presencia de elementos institucionales que confieren al sistema un considerable nivel de inflexibilidad.

El documento se organiza de la siguiente manera. Primero entregamos una reflexión acerca de los impactos del cambio global en la oferta y demanda de agua en Chile. Esta reflexión se complementa con una descripción resumida de las principales características del sistema de gestión de recursos hídricos imperantes en Chile. El análisis de la relación entre el sistema de gestión de recursos hídricos en Chile y los posibles impactos del cambio global se efectúa en una tercera sección del documento. Finalmente se entregan conclusiones y principales lineamientos que nacen de este análisis.

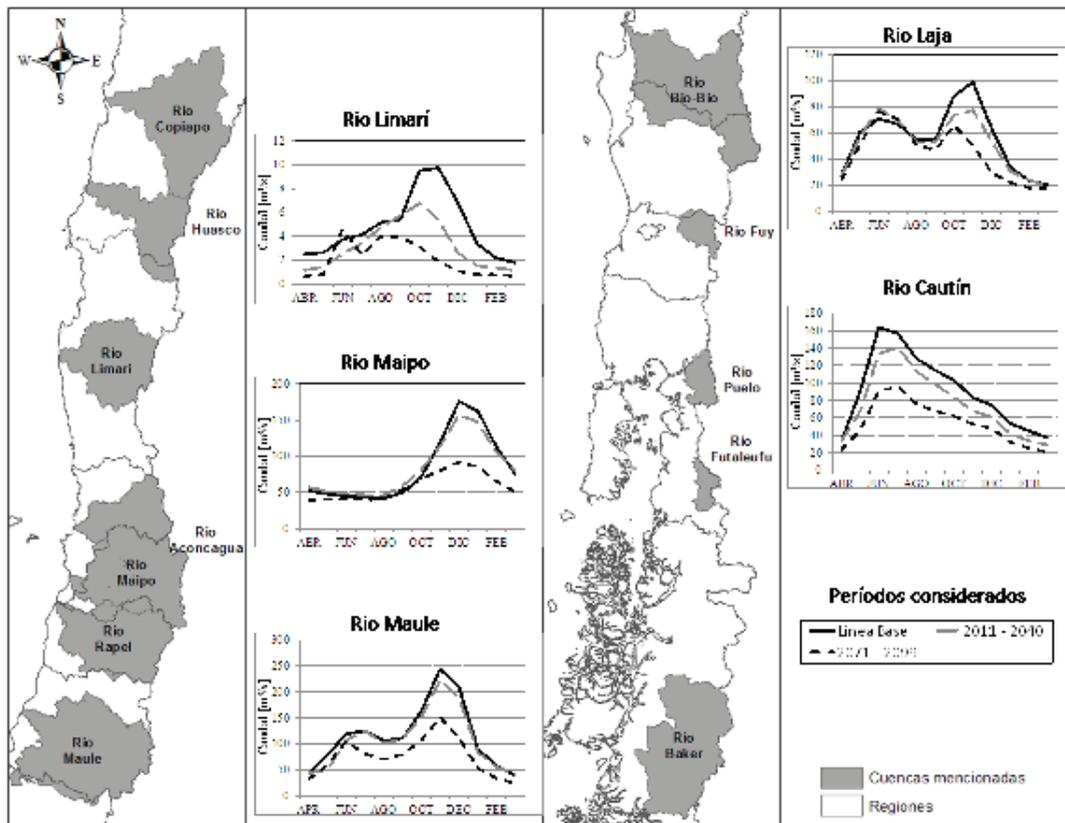
## 1. Los impactos del cambio global en los recursos hídricos en Chile

En Chile se han desarrollado importantes esfuerzos por estudiar los potenciales impactos del cambio en el clima (Ministerio del Medio Ambiente, 2011; CEPAL, 2009) usando modelos de circulación global (GCM) bajo distintos escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI).

En función de sus resultados se proyecta una disminución en las precipitaciones que afectaría a la zona central y sur del país (aproximadamente entre los paralelos 30 y 42S). Esta reducción se hace más importante hacia fines de siglo con valores en torno al 30%. Junto con ello, se han realizado estudios sobre la incidencia de eventos extremos de precipitaciones (CEPAL, 2012), estimándose un aumento en la probabilidad de ocurrencia de eventos de sequía hacia mediados y fin de siglo, junto con una mayor incidencia de eventos de precipitación intensa y temperaturas elevadas, aumentando el riesgo de inundaciones (CEPAL, 2012). Para el caso de la temperatura, se proyecta un incremento en todas las regiones del país, con cambios más intensos en un gradiente mar-cordillera, alcanzando aumentos que varían entre 2°C y 4°C hacia finales de siglo.

A consecuencia de lo anterior, se prevén dos efectos principales sobre los caudales. En primer lugar, una disminución de los volúmenes totales disponibles en la cuenca, dada la disminución en las precipitaciones y la menor capacidad de acumulación de nieve en la cordillera y en segundo lugar, cambios en la estacionalidad de estos caudales, expresado como un adelantamiento en la fecha del centroide<sup>1</sup> respecto al período histórico (Ministerio del Medio Ambiente, 2011). En este ámbito se han realizado diversos estudios que buscan cuantificar este impacto de manera particular en cuencas relevantes a nivel nacional mediante la modelación de su hidrología, incorporando diversos modelos y escenarios de cambio climático, pudiéndose observar en todas ellas y en diverso grado, los impactos antes mencionados. Ejemplos de los impactos en diversas cuencas se presentan en la Figura 1.

Figura 1 | **Proyección futura de los caudales promedio mensuales para cuencas seleccionadas en Chile**  
 (se presentan en la figura cuencas nombradas en otras secciones del documento)



Fuente: MMA, 2011; Vicuña *et al.*, 2011.

1 El centroide es aquel punto en el cual se encuentra el centro de masa de la serie anual de dicha variable. Es definido como el momento del año en el cual ha ocurrido el 50% del total anual observado. Cambios en el centroide se asocian a modificaciones del régimen de caudales (nival, pluvial, mixto)

Además de los cambios proyectados en los componentes naturales que regulan la oferta de los recursos hídricos, es importante considerar que existen otros procesos que implican una modificación en sus patrones de demanda, y que por tanto deben ser considerados al plantear los desafíos a la gestión de los recursos hídricos.

Actualmente se observa un aumento en la población total del país, con proyecciones de crecimiento poblacional desde los actuales 17 millones a 20 millones de habitantes hacia mediados de siglo (Ministerio del Medio Ambiente, 2011). Sumado a este aumento, se observan procesos de migración desde las zonas rurales a las ciudades, las cuales concentran el 87% de la población total del país. Por tanto se prevé un considerable aumento en la demanda de agua potable.

De igual forma se espera un aumento de la demanda de energía eléctrica. Actualmente la capacidad instalada de energía alcanza los 16.800 MW, de los cuales más de un tercio corresponde a hidroelectricidad. Si se sigue la tasa de crecimiento proyectada, se prevé una necesidad de aumentar en 8.000 MW la oferta de electricidad al año 2020, cuando la hidroelectricidad debiera continuar tomando un papel relevante en la matriz energética (Ministerio de Energía, 2012).

El sector agrícola, que hace uso de cerca del 80% del agua dulce disponible, alcanza actualmente las 1,1 millones de hectáreas regadas, concentradas en la zona central del país. Se espera un crecimiento de la superficie regada, incorporando aproximadamente 350.000 nuevas hectáreas, lo que supone un aumento futuro de un 30% del área regada.

Con esto, es posible configurar una situación en la que se proyectan importantes desbalances entre la oferta y demanda de recursos hídricos que redundan en una situación de alta vulnerabilidad al cambio global, que debe ser incorporada para una correcta planificación y gestión de los recursos hídricos a nivel país (Ministerio del Medio Ambiente, 2011).

## 2. La gestión de los recursos hídricos en Chile

Con el aumento de la competencia por el uso del agua se ha vuelto cada vez más difícil conciliar las necesidades de abastecimiento de agua para consumo humano, producción de alimentos, los ecosistemas y otros usos productivos. Los sistemas de gestión de recursos hídricos (GRH) entregan las bases institucionales y de infraestructura que tratan de resolver el problema de

asignación y distribución de los recursos hídricos. Esta asignación y distribución de aguas se torna necesaria toda vez que la demanda en un determinado lugar y tiempo supera la oferta de agua, particularmente en situaciones en que más de un tipo de usuario demanda aguas provenientes de una misma fuente.

La oferta de agua en Chile varía significativamente tanto en términos espaciales como temporales (Foro Consultivo Científico y Tecnológico, 2012). Si nos enfocamos en la zona central del país, que abarca aproximadamente desde la Región de Coquimbo (lat. 30 °S) hasta la Región de Los Lagos (lat. 40 °S) nos encontramos con un régimen de precipitaciones altamente concentrado en los meses de otoño e invierno. En esta región también se evidencia un efecto orográfico que, debido a los gradientes de elevación asociados a la Cordillera de los Andes, resulta en un incremento significativo en los montos de precipitación y ofrece la posibilidad de acumular agua durante la época de lluvias en forma de nieve, para que posteriormente quede disponible para consumo durante los meses de primavera y verano. La agricultura se ve ampliamente beneficiada por estas condiciones naturales ya que las mayores necesidades de agua en este sector se dan justamente en esos meses cálidos pero secos, mientras que las necesidades de otros sectores productivos son de carácter más constante en el tiempo. En función de las condiciones naturales de disponibilidad de aguas en Chile y su concentración en el tiempo, se ha desarrollado infraestructura de acumulación y distribución de agua, en especial para necesidades de riego.

El otro ámbito relevante asociado a la gestión de los recursos hídricos corresponde a los aspectos institucionales. La base de la institucionalidad asociada a la gestión de recursos hídricos en Chile radica en el Código de Aguas del año 1981. Este código define las relaciones básicas que existen en torno al uso del agua en el país y los roles que deben tener el sector privado (tanto a nivel agregado como individual) como público. La base del sistema la constituye la asignación de derechos de aprovechamiento de agua (*daa*) que se constituyen de manera independiente al uso de la tierra y que pueden ser transados en el mercado para reasignar el uso de agua a diferentes actividades.

Algunos de los aspectos básicos en relación a la asignación y ejercicio de estos *daa* quedan expresados en diferentes artículos del Código de Aguas. Por ejemplo, con respecto a la asignación, se estipula que el *daa* se debe

expresar en un volumen por unidad de tiempo (artículo 7). Sin embargo, se deja en claro que el ejercicio del *daa* queda restringido en circunstancias que la fuente de abastecimiento no contenga la cantidad suficiente para satisfacerlos en su integridad, en cuyo caso el caudal se distribuirá en partes alícuotas (artículo 17). Este aspecto es clave ya que la oferta de agua por lo general no es constante en el tiempo. En términos prácticos se asume típicamente que la disponibilidad de agua que permite el normal desarrollo de alguna actividad productiva es aquella que se supera en al menos el 85% del tiempo. Este nivel típicamente define la disponibilidad natural de agua en el proceso de asignación de *daa*. Una manera de poder mejorar la disponibilidad natural en el ejercicio de un *daa* es a través del desarrollo de infraestructura de regulación como embalses, que permiten acumular excedentes de agua a lo largo de un año o entre años.

Otro aspecto relevante en el sistema chileno es que no existen prioridades en la asignación y ejercicio de *daa* para diferentes sectores. Sin perjuicio de lo anterior se reconocen diferentes categorías de derechos en función del tipo (consuntivo o no consuntivo, artículo 13-15) y frecuencia de uso (permanente o eventual, artículo 17 y 18). La asignación inicial de *daa* es gratuita y se mantiene a perpetuidad. En las reformas del 2005 se introdujo una modificación importante al introducir la exigencia del pago de una patente anual en aquellos casos en que el titular de un *daa* no demuestre el uso del mismo (artículo 129 *bis* 4, *bis* 5 y *bis* 6).

Con respecto a la relación entre usuarios ubicados en diferentes puntos de la cuenca se introduce en el código la idea de una sección legal que separe la cuenca en entidades independientes en materia de distribución de aguas. Cada sección en la que se divide una cuenca puede desarrollar su propia organización de usuarios con la atribución de asignar completamente las aguas tal como si se tratasen de ríos distintos (artículo 264). Por otra parte, no existe ninguna regulación (salvo que se solicite el traslado del derecho) con respecto a la generación o reducción de derrames<sup>2</sup> por el ejercicio de

un *daa* (artículo 46). En este sentido, se permite por ejemplo la reducción de derrames a través de mejoras en eficiencia de riego sin perjuicio de que esto pueda afectar la disponibilidad de agua en usuarios localizados aguas abajo.

Como se comentaba anteriormente, el ejercicio real de un *daa* puede verse beneficiado por el efecto regulador de un embalse. La operación de estas obras que muchas veces abastecen de agua a diferentes sectores productivos se basa generalmente en condiciones hidrológicas históricas y se manifiesta en convenios (ej. Convenio de operación entre Endesa y regantes en la cuenca del Maule por la operación de la Laguna Maule) o reglas de operación (ej. Reglas de operación del Sistema Paloma en la cuenca del Limarí).

Por otra parte, así como la construcción de un embalse puede aumentar la disponibilidad real de un *daa*, consideraciones asociadas a la institucionalidad ambiental pueden limitar el ejercicio del mismo. Hasta el año 2005 (año en que se introdujeron reformas al Código de Aguas) no se reconocía un usuario de las aguas de un cauce que no fuera productivo. En dicha reforma se reconoció la necesidad de mantener agua en los ríos sin asignación a través de un caudal ecológico que se determina en base a un análisis estadístico de las condiciones hidrológicas de la fuente de agua natural (artículo 129 *bis* 1). Es importante destacar que esta modificación recién empezó a implementarse en el proceso de asignación de *daa* a partir del año 2008. Con anterioridad a dicha fecha los recursos hídricos de la gran mayoría de las cuencas del país fueron asignados a cabalidad, especialmente en las cuencas ubicadas en la zona centro norte del país (Banco Mundial, 2012). Adicionalmente a esta restricción inicial en la asignación, el ejercicio del *daa* puede ser restringido de manera adicional en el proceso de evaluación ambiental del proyecto que pretenda utilizar dicho *daa*. A través de este proceso de evaluación se genera la figura de caudal ambiental, que puede limitar el ejercicio de un *daa* a través de su Resolución de Calificación Ambiental (RCA).

<sup>2</sup> Derrame o excedente luego del uso del caudal captado. Generalmente esta "ineficiencia" alimenta cursos subterráneos, o son utilizados por usuarios aguas abajo en el sistema.

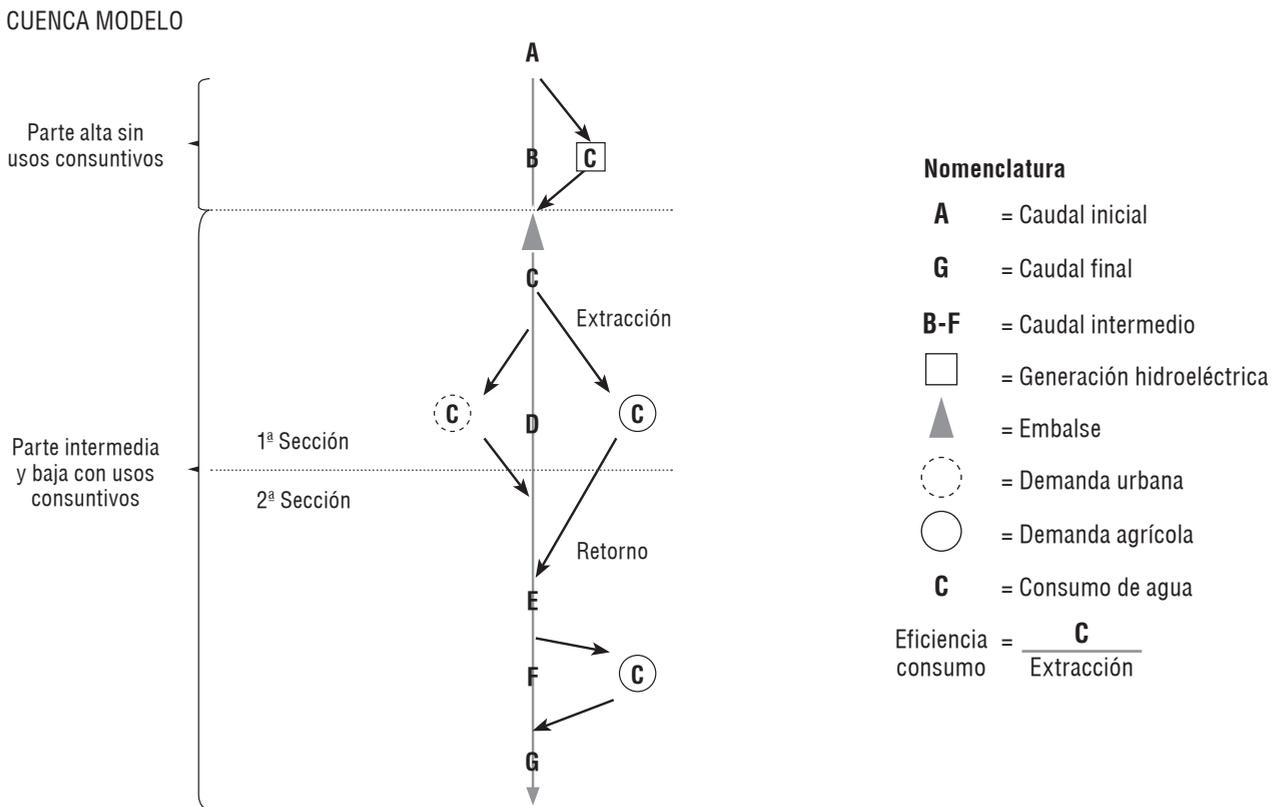
### 3. Casos de estudio que ejemplifican los potenciales impactos del cambio global en la gestión de los recursos hídricos en Chile

#### Introducción a los ejemplos

Para explicar los desafíos que el cambio global implica en la gestión de los recursos hídricos en Chile hemos diseñado casos de estudio, simplificando las cuencas y sus

elementos (ríos, canales, embalses), en diagramas estilizados que representan diferentes realidades presentes en el país. El modelo general se presenta en la Figura 2. Los elementos característicos de esta cuenca modelo lo constituyen los diferentes usuarios de los recursos distribuidos espacialmente en la cuenca, sus niveles de consumo (o niveles de eficiencia en el consumo) y elementos relevantes de la infraestructura existente como son los embalses.

Figura 2 | Cuenca prototipo para diseñar cuencas estilizadas



Fuente: elaboración propia.

Se han concebido cuatro variaciones de esta cuenca modelo a través de modelos estilizados que representan diferentes realidades de cuencas en Chile. Estos casos de estudio se presentan en la Figura 3 con características específicas expuestas en la Tabla 1. Los números utilizados para cada una de las cuencas tipo representan una situación ficticia (pero cercana a la realidad) con el pro-

pósito de mostrar los efectos asociados al cambio global bajo diferentes circunstancias. La condición representada equivale a la de un año hidrológico cuyo caudal es superado el 85% del tiempo. Las unidades se entregan en términos relativos al caudal inicial de la cuenca al cual se le ha asignado el valor de 100. La información que se entrega se asocia al consumo de agua para dife-

rentes usuarios (demanda, eficiencia de consumo y asignación de *daa*) incluyendo las demandas ambientales existentes en el cauce del río.

El primero de los casos de estudio (cuenca Tipo A) corresponde a una cuenca con solo un usuario relevante (generalmente agrícola) al cual se le han asignado todos los *daa* disponibles (anterior a la aplicación del concepto de caudal ecológico) y con alta eficiencia en el consumo. En este tipo de cuenca existe una capacidad de regulación importante que aumenta la disponibilidad natural de agua en periodos de escasez (se asume de manera conservadora un aumento de un 20%). Esta cuenca representa características típicas actuales del centro norte del país como son la cuenca del Limarí, Huasco, Copiapó. Una segunda tipología (cuenca Tipo B) corresponde a una cuenca donde existen al menos dos usuarios relevantes con diferentes niveles de eficiencia en el consumo. Ambos poseen *daa* de tipo consuntivo. La capacidad de embalse es relativamente baja. Este tipo de cuenca podría representar la situación de la cuenca del Maipo, donde el segundo usuario en ese caso correspondería a la ciudad de Santiago. También se asume en este caso la asignación completa de *daa* en especial en las partes altas e intermedias de la cuenca. Una tercera cuenca (cuenca Tipo C) representa condiciones típicas de la zona centro sur del país, donde existe una competencia por la disponi-

bilidad de agua entre el sector agrícola y el hidroeléctrico. Cuenca típicas que representan esta condición son las del Maule, Laja o Biobío. La eficiencia en el uso del agua para la actividad agrícola es menor que en los casos anteriores y por lo general en estas cuencas existen grandes obras de almacenamiento cuya operación se comparte entre estos sectores, en algunos casos por la vía de convenios de operación que datan del momento en que la obra de regulación fue construida. En las partes altas de estas cuencas también existen centrales hidroeléctricas de pasada desarrolladas en muchos casos con anterioridad a la aplicación de las reformas del Código de Aguas en relación a caudales ecológicos. Finalmente reconocemos una cuarta realidad (cuenca Tipo D) que corresponde a aquellas cuencas o subcuencas con un bajo desarrollo de consumo de agua de tipo consuntivo (escasa población o baja necesidad de riego actual) pero con un gran potencial hidroeléctrico que se encuentra en este momento en proceso de desarrollo y que por lo tanto es de esperar que se aplique un caudal ecológico y ambiental que limite el ejercicio de los derechos de aprovechamiento. Este tipo de cuenca o subcuenca existe en las partes altas de todos los tipos de cuencas descritos con anterioridad, siendo mayor su predominancia en las zonas más australes del país, como en las cuencas de las regiones de Los Ríos, de Los Lagos y Aysén.

Figura 3 | Cuatro cuencas estilizadas para ejemplificar los desafíos del cambio global en la gestión de los recursos hídricos en Chile

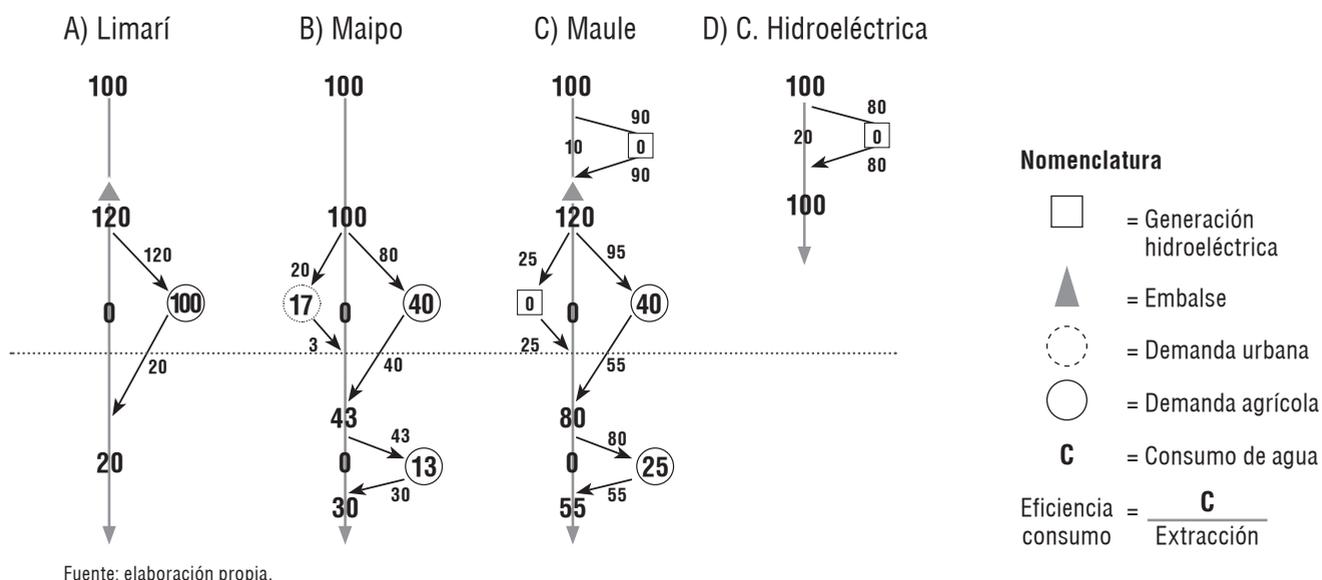


Tabla 1 | Información de base asociada a cuencas estilizadas

Variable		Cuenca A (p.ej. Río Limarí)	Cuenca B (p.ej. Río Maipo)	Cuenca C (p.ej. Río Maule)	Cuenca D (Cuenca Hidroeléctrica)
Caudal histórico		100	100	100	100
Demanda ambiental	Parte alta	0	0	0	20
	Parte baja	20	25	40	NA
Derechos hidroel. parte alta		NA	NA	90	80
Aporte embalse		20	NA	20	NA
Derechos parte alta	Agrícola	100%	80%	95 (convenio)	NA
	Urbano	NA	20%	NA	NA
	Hidroeléctrico	NA	NA	25 (eventual)	NA
Eficiencia parte alta	Agrícola	83%	50%	42%	NA
	Urbano	NA	85%	NA	NA
	Hidroeléctrico	NA	NA	100%	NA
Eficiencia agrícola parte baja		NA	30%	31%	NA

Fuente: elaboración propia.

Nota: La información numérica se provee normalizando con respecto a la disponibilidad natural de agua en la cabecera de la cuenca. Es decir, el valor de 100 corresponde al caudal anual en cabecera que se excede un 85% de los años. Todos los otros valores, expresados en el texto como unidades de caudal, se presentan en relación a este caudal y bajo la misma frecuencia de ocurrencia.

Cada uno de estos casos de estudio estilizados se complementa con información específica en base a estudios previos.

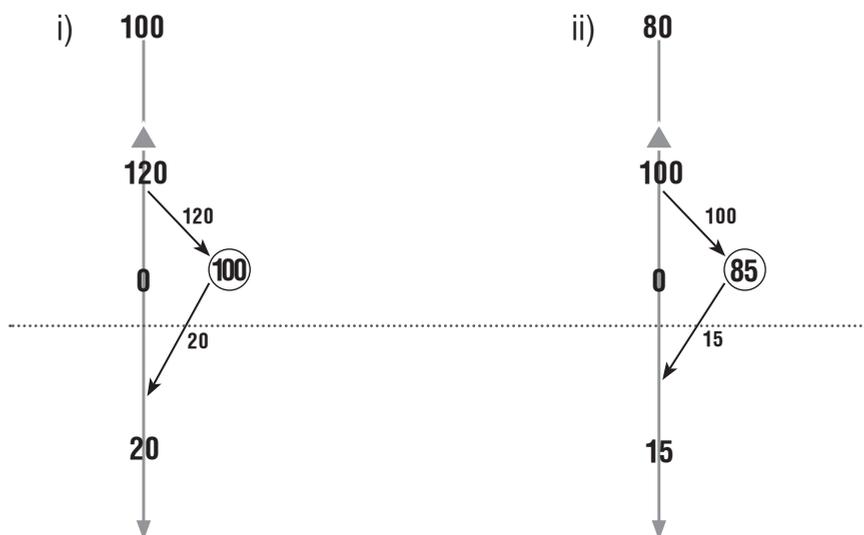
### **Cuenca modelo: Río Limarí. Cuenca con un principal usuario de tipo consuntivo. Alta capacidad de regulación. Eficiencia en consumo alta**

La cuenca del Limarí se encuentra en el corazón de la región semiárida de Chile, unos 400 kilómetros al norte de la ciudad de Santiago. Esta cuenca de 15.000 km<sup>2</sup>, tiene condiciones hidroclimáticas que se caracterizan por niveles bajos (alrededor de 150 mm de precipitación anual) y variables de precipitación y con predominio de suministro de agua en épocas de deshielo. La alta variabilidad en la disponibilidad de agua en la cuenca queda demostrada al comparar el caudal promedio anual de 14,3 m<sup>3</sup>/s con el caudal anual que se supera el 85% de los años (disponibilidad natural) equivalente a 2,8 m<sup>3</sup>/s. Las condiciones climáticas ideales para el desarrollo de la agricultura de alto valor y la gran fluctuación en la

oferta motivaron la construcción de un sistema de embalse denominado Sistema Paloma, con una capacidad de almacenamiento de alrededor de 1.000 mm<sup>3</sup>.

Se asumen dos efectos del cambio climático en la cuenca. Por una parte se asume una disminución de un 20% en el caudal aportante al sistema de embalses. Por otra parte, aumenta la demanda real de los cultivos en el sistema en un 10% (a 110) con respecto a la demanda histórica. Para poder ajustarse a estos cambios en oferta y demanda, los agricultores en la región aumentarían la eficiencia de riego. Asumiendo, a efecto ilustrador, que la eficiencia de riego tiene un techo de 85%, los agricultores en esta cuenca solo podrían subir su eficiencia de 83% a 85%. No sería posible bajo este supuesto suministrar la demanda total de agua para el sector agrícola, produciéndose una pérdida en torno a un 22%. La demanda ambiental que es satisfecha en condiciones históricas tiene una pérdida de 5 unidades (25% de pérdida).

Figura 4 | **Representación estilizada de los potenciales impactos del cambio global en cuenca tipo A (Limarí).**  
**Se presenta la situación actual (i) y efectos del cambio climático (ii)**



Fuente: elaboración propia.

Es importante destacar que en el caso del río Limarí, las pérdidas en cobertura de riego se darían probablemente para cultivos de alto valor y con altos costos de infraestructura. Al reducirse la existencia de cultivos anuales (un proceso que ha ido ocurriendo en la cuenca de manera progresiva) disminuyen las capacidades de reaccionar frente a estos potenciales cambios en la disponibilidad de recursos. Lamentablemente esta situación ya está ocurriendo en la actualidad en esta cuenca que se ha visto enfrentada a una sequía de 9 años que ha imposibilitado que se llenen de agua los embalses de la cuenca. Con anterioridad a la situación actual la cuenca sufrió otro período importante de sequía durante los años 1995-1997. La situación actual es bastante más dramática debido a que las estrategias disponibles para enfrentar la sequía en dicha oportunidad se encuentran con un potencial bastante más limitado en la actualidad. Por ejemplo, ya no existen grandes oportunidades en materia de mejoras de eficiencia de riego, o tampoco la posibilidad de dejar grandes extensiones de tierra sin regar y por ende de generar posibles excedentes de agua para vender a través de mercado de *daa*. Resulta paradójico que el efecto positivo asociado a la construcción de un embalse haya aumentado las condiciones de vulnerabilidad de la cuenca al reducir las posibilidades de reacción frente a disminuciones importantes en la disponibilidad de recursos hídricos.

**Cuenca modelo: Río Maipo. Cuenca con múltiples usuarios de tipo consuntivo distribuidos en secciones. Capacidad de regulación baja. Eficiencia en consumo media**

Con más de 15.000 Km<sup>2</sup>, la cuenca del Maipo representa una zona de gran interés para la gestión de recursos hídricos puesto que alberga a dos polos de demanda de gran dinamismo como son la ciudad de Santiago y la actividad agrícola de la región. La agricultura de riego abarca una superficie de 136.000 há., alzándose como el principal usuario de aguas en la cuenca. Más del 60% de esta superficie es regada mediante sistemas superficiales, por lo que su nivel de eficiencia media bordea el 50%. El segundo usuario más importante, en términos de volumen, corresponde a la empresa Aguas Andinas que abastece a cerca de 6 millones de habitantes en la ciudad de Santiago. La empresa cuenta hoy con aproximadamente un 20% de los derechos totales definidos para la primera sección de la cuenca del río Maipo

La principal fuente de agua en la región durante la mayor parte del año es el río Maipo, cuya oferta de agua sigue una estacionalidad similar a la de la demanda, existiendo una mayor disponibilidad del recurso en los períodos de mayor requerimiento, especialmente en la primera sección de la cuenca, donde se encuentra gran parte de la superficie agrícola de la región.

Siguiendo el esquema general propuesto anteriormente, la Figura 5.i muestra una representación de las condiciones del Maipo y de los principales actores que intervienen en ella. Sin una capacidad de regulación importante, la cuenca tiene, a grandes rasgos, dos importantes nodos de consumo, los cuales potencialmente son capaces de repartir todo el caudal disponible. Puesto que los niveles de eficiencia de uso de la agricultura de riego son relativamente bajos, el caudal de retorno es significativamente alto e implica que vuelven a estar disponibles 43 unidades de caudal (solo 3 son aportados por los retornos provenientes del sector urbano). Aguas abajo solo resta por satisfacer a la agricultura de riego de la segunda y tercera secciones, las cuales en forma agregada serían capaces de consumir 13 unidades de caudal y permitir que todavía quede un escurrimiento final de 30 unidades.

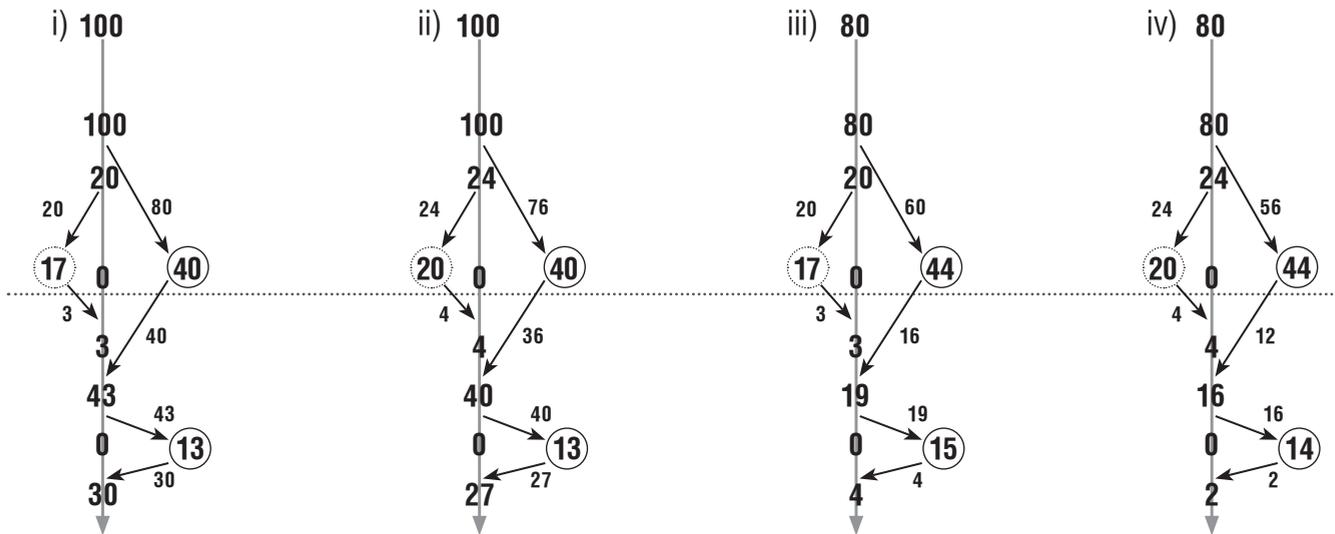
La Figura 5.ii muestra el cambio que experimentaría la situación anterior a consecuencia de una modificación en la demanda urbana (por ejemplo debido al crecimiento poblacional y mayores niveles de consumo). En este caso la demanda urbana bruta se incrementaría en 10%. Históricamente la manera en que el sector urbano ha suplido este aumento es a través de mejoras en eficiencia, aumento en capacidad de bombeo o compra de *daa* de usuarios del sector agrícola. Asumiendo aquí que la adaptación por parte del sector urbano se llevará a cabo solo por la vía de compras de derechos del sector agrícola, se presume que esta tenga que mejorar la eficiencia de riego para satisfacer sus necesidades. En el ejemplo presentado la eficiencia pasa de un 50% a 53% en la primera sección y de un 30% a 33% en las secciones aguas abajo. El resultado neto de este cambio es que el escurrimiento al final de la cuenca sufre una merma de un 10% (al pasar del escenario i al ii).

Una situación más dramática se vive bajo un escenario de cambio climático. La Figura 5.iii ilustra una situación en la que, a consecuencia del cambio climático, la oferta de agua en el Maipo ha caído en un 20% (en relación al escenario inicial). Por otra parte, la demanda en el sector agrícola aumenta en un 10%. Suponiendo que la disponibilidad a pagar por agua es mayor en el

sector urbano, la demanda de este sector tenderá a ser satisfecha nuevamente a través de la compra de *daa* desde el sector agrícola. En estas condiciones, el sector agrícola tiene que realizar un esfuerzo significativo en términos de eficiencia de uso de agua para poder suplir las demandas de agua, pasando de un 50% a un 73% en la primera sección (con esto se logra satisfacer también la demanda incremental a consecuencia del cambio climático) y pasar de 30% a casi 80% de eficiencia en el sector de riego aguas abajo. Este cambio es muy importante y requiere de un esfuerzo de inversión en adaptación de grandes proporciones. El efecto del cambio climático y de las medidas de adaptación del sector agrícola tiene como consecuencia que el caudal a la salida de la cuenca se ve notablemente resentido. En las secciones de aguas arriba los dos grandes consumidores toman virtualmente la totalidad de la oferta, mientras que los aumentos de eficiencia van a implicar que la fracción de retorno es sustancialmente más baja. Con esto el caudal de salida del sistema baja de 30 a 4 unidades, claramente inferior a las 25 unidades asumidas como demanda ambiental en este tramo. Esto representa un 84% de pérdida con respecto a estas necesidades.

Finalmente, la Figura 5.iv muestra la misma situación anterior de cambio climático, solo que esta vez se presenta combinada con un aumento de la demanda de la población urbana, lo que implica un efecto sinérgico de los dos principales agentes determinantes de la seguridad hídrica (crecimiento poblacional y mayor consumo asociado a cambio climático actuando sobre oferta de caudales y demanda agrícola). En esas condiciones el esfuerzo que debe realizarse en términos de adaptación del sector agrícola es aun mayor (alcanzando casi 80% en la primera sección y 85% en los sectores aguas abajo). Una vez más el principal afectado es el caudal a la salida de la cuenca que cae en más de 90% en comparación a la situación original. Asumiendo nuevamente un nivel máximo de eficiencia de 85% se aprecia también que es imposible sostener la demanda de riego para la segunda sección del río (existen 14 unidades disponibles versus 15 unidades de demanda).

Figura 5 | Representación estilizada de los potenciales impactos del cambio global en cuenca tipo B (Maipo). Se presenta la situación actual (i), efectos de un aumento en población (ii), efectos del cambio climático (iii) y efectos de un aumento de población y del cambio climático (iv)



Fuente: elaboración propia.

**Cuenca modelo: Río Maule. Cuenca con usuarios agrícolas e hidroeléctricos. Alta capacidad de regulación. Eficiencia en consumo baja**

La cuenca del río Maule se encuentra en la región del Maule, en el centro sur de Chile. Tiene una superficie de poco más de 20.000 km<sup>2</sup> y un clima mediterráneo templado típico de esta zona. El régimen del río Maule es principalmente nival, es decir, su máximo caudal se da en épocas de deshielo (octubre-enero), pero también presenta importantes crecidas en respuesta a las lluvias invernales. En esta cuenca coexisten dos de los principales usuarios de recursos hídricos del país: la hidroelectricidad y la agricultura de riego. El sector hidroeléctrico del Maule produce más de un tercio de la hidroelectricidad y alrededor de un 20% de la energía total generada en el país<sup>3</sup>, mientras que la actividad agrícola, con sus más de 240.000 há. representa más de un 20% de terrenos agrícolas bajo riego en Chile (Censo Agropecuario, 2007). Existen importantes obras hidráulicas de regulación asociadas al sistema, dentro de las que destacan por un lado la Laguna del Maule (1.400 mm<sup>3</sup>),

embalse de cabecera destinado principalmente a la acumulación de agua de riego y gestionado por la Dirección de Obras Hidráulicas (DOH), y el sistema de embalses Colbún-Machicura (1.500 mm<sup>3</sup>) para la generación de energía, ubicado en la zona media de la cuenca.

Existe una serie de instrumentos legales que apuntan a normar y establecer las reglas de operación del sistema de embalses y derechos de agua en la cuenca. El primero de ellos es el convenio Riego-ENDESA, suscrito en el año 1947, entre la Dirección de Riego (actual Dirección de Obras Hidráulicas) y la entonces estatal ENDESA. Este convenio establece las normas de operación de la Laguna del Maule, determinando según el volumen acumulado, las porciones correspondientes a la agricultura y a la generación hidroeléctrica. Posteriormente, la Dirección General de Aguas, en su Resolución 105/83, establece los caudales destinados a la agricultura siguiendo una dotación mensual que presenta un máximo en los meses de verano coincidiendo con la demanda del sector agrícola en la fecha en que se suscribió dicho convenio.

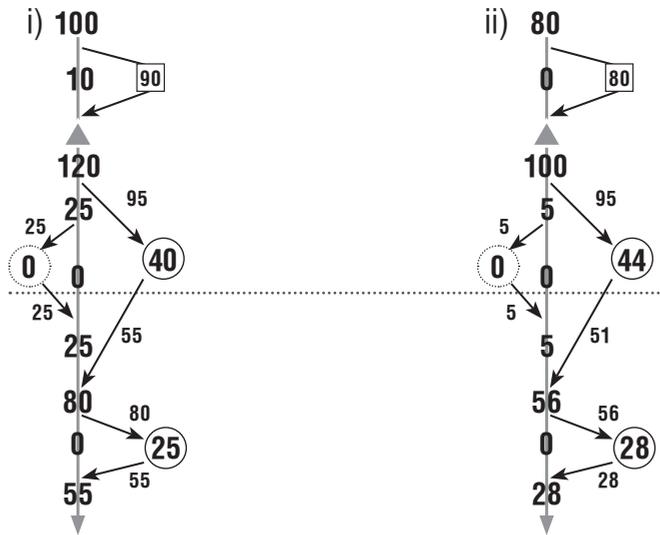
<sup>3</sup> CDEC, 2009. Disponible en <https://www.cdec-sic.cl/>

Al igual que en el primer caso, la cuenca presenta una importante capacidad de regulación, por la presencia de la Laguna del Maule y el Embalse Colbún. El sector hidroeléctrico se ubica principalmente en las zonas cordilleranas. Luego, aguas abajo, el sector agrícola usa las aguas determinadas por la resolución 105/83 y el Embalse Colbún almacena el caudal sobrante del río Maule para la generación.

En condiciones históricas, las centrales hidroeléctricas de la zona alta canalizan gran parte del caudal natural así como también excedentes almacenados en la Laguna Maule para la generación de energía devolviendo íntegramente las aguas algunos kilómetros aguas abajo de los puntos de captación, dejando un caudal en el río asociado más bien a la capacidad máxima de generación que a impedimentos legales o ambientales. Luego y según el mes, las aguas son distribuidas hacia el sector agrícola de acuerdo a los convenios de operación

y los excedentes son nuevamente almacenados en el Embalse Colbún. En la versión simplificada presentada en el ejemplo se agregan las capacidades de almacenamiento de la Laguna Maule y Embalse Colbún en un solo embalse desde el cual pueden extraer aguas ambos usuarios (hidroeléctrico y agrícola) (ver Figura 6.i). Las eficiencias de riego en esta cuenca son en general bajas si se comparan con cuencas del norte o centro norte del país, ya que en esta zona, la principal forma de riego es por surco o tendido, con eficiencias del orden de 40% asumidas para este ejemplo. Aguas abajo, el río vuelve a traer agua gracias a los retornos producto de ineficiencias de riego y las descargas de la generación hidroeléctrica del sistema Colbún-Machicura y otras centrales menores. Luego, estas aguas son usadas nuevamente en sistemas de riego con baja eficiencia de riego, las que nuevamente por derrames y retornos, vuelven al cauce del río en la última sección.

Figura 6 | Representación estilizada de los potenciales impactos del cambio global en cuenca tipo C (Maule). Se presenta la situación actual (i) y efectos del cambio climático (ii)



Fuente: elaboración propia.

Bajo un escenario de cambio climático (Figura 6.ii), se asume en el ejemplo que los caudales en cabecera disminuirían en un 20%. Para el caso de las centrales hidroeléctricas de pasada de la zona alta del río, se espera que la disminución de la generación sea igual a la disminución de caudal, ya que no existe capacidad de regulación de caudal interanual como para contrarrestar periodos prolongados de sequías.

Como en casos anteriores se esperaría que la demanda para el sector agrícola aumente con respecto al período histórico en un 10%, obligando al sector agrícola de la primera sección a mejorar su eficiencia de riego de un 42% a 48%. Sin embargo, la importante reducción de caudales de cabecera no implica una necesidad de adaptación relevante en el sector gracias a su prioridad en los derechos otorgados según la R105/83 y

la capacidad de regulación de Laguna del Maule. Por otra parte, el sector hidroeléctrico pierde parte de los excedentes que históricamente se acumularían en los embalses reduciendo su uso potencial en un 80%.

Nuevamente las zonas bajas de la cuenca resultan afectadas con estos cambios. Por una parte la eficiencia de riego en la segunda sección debe aumentar de un 26% a un 50% y el caudal a la salida de la cuenca podría disminuir a aproximadamente un 50% de su valor histórico.

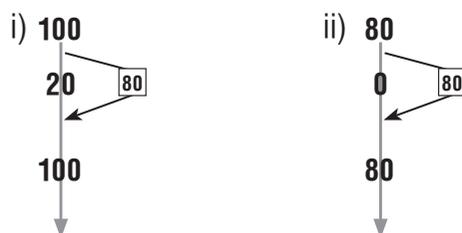
**Cuenca modelo: Subcuencas de alta cordillera, cuencas en Región de Los Ríos, Los Lagos y Aysén. Cuenca sin usuarios relevantes de tipo consuntivo y con alto potencial de generación hidroeléctrico aun sin desarrollar**

Este tipo de cuencas o subcuencas se caracterizan por tener potencial hidroeléctrico, ya sea por sus caudales o por el cambio abrupto de altura. Se caracterizan también por su alto valor turístico, deportivo, y como patrimonio ambiental. Algunos ejemplos emblemáticos corresponden a los ríos San Pedro, Fuy, Puelo, Futaleufú o Baker. Actualmente una serie de proyectos hidroeléctricos se encuentran en proceso de estudio o desarrollo. Se asume en el ejemplo que los *daa* en estos casos han sido asignados con posterioridad a las reformas del

2005, restringiendo el caudal que puede ser extraído del río. Por otra parte, en el proceso de evaluación de impactos ambientales se pueden dar dos escenarios: una alternativa es que se restrinja adicionalmente la extracción de agua para el proyecto o alternativamente que se obligue a mantener un caudal en el río.

Al igual que en el caso de las cuencas anteriores, se asume que este tipo de cuencas puede sufrir una reducción de caudal del orden de un 20%. Si el proceso de protección del caudal ambiental solo se define en función de montos máximos a ser extraídos desde el río, se puede producir en este escenario una reducción total del caudal necesario para sostener los servicios ambientales de este tramo de río (Figura 7.ii). Por otra parte se podría plantear que al igual que otros tipos de demandas de agua, la demanda ambiental pueda ser diferente en el futuro. Por ejemplo, para actividades recreacionales, o servicios ecosistémicos no reconocidos, pueden aumentar las demandas en el futuro. En ese caso, independiente del tipo de restricción que se haya invocado (en extracción o en el caudal que quede en el río), existiría un déficit en el logro de dicha necesidad de una manera que sería imposible de satisfacer en el marco institucional actual, salvo que se redefina la RCA (situación que se ve agravada producto del pago de patente por no uso).

Figura 7 | Representación estilizada de los potenciales impactos del cambio global en cuenca tipo D (subcuenca hidroeléctrica). Se presenta la situación actual (i) y efectos del cambio climático (ii)



Fuente: elaboración propia.

#### 4. Conclusiones y propuestas para el futuro

El cambio global introduce un cambio paradigmático en la visión que tenemos de la disponibilidad de recursos hídricos. En Chile este cambio paradigmático plantea importantes desafíos en la gestión de los recursos hídricos ya sea por disminución y cambios en la temporalidad en la oferta de los recursos (disminución de precipitaciones y aumento de temperatura) y/o aumento de demanda (aumento de temperatura y aumento en el consumo por sectores productivos, por crecimiento de población o por el medio ambiente).

Los cambios en la oferta y demanda de agua implican un ajuste por parte de los usuarios, siendo el Estado uno de ellos. Este ajuste, en el caso particular de Chile, debería ocurrir en el marco de los factores que determinan la gestión de los recursos hídricos. Algunos de estos factores se asocian a condiciones estructurales (capacidad de regulación de embalses o nivel de eficiencia en el uso de recursos) como también a condiciones institucionales o de gestión (en especial en relación a los derechos de aprovechamiento y las normas que regulan su apropiación, uso y transferencia).

Tomando en cuenta las características estructurales del uso de agua entre diferentes consumidores de agua de tipo consuntivos, podemos reconocer que el sector que tiene mayor margen para ajustarse es el agrícola, ya que presenta los menores niveles de eficiencia. Es esperable que en este sentido, el principal mecanismo de ajuste corresponda a un aumento en la eficiencia de riego del sector agrícola, la cual permita la transferencia de derechos hacia sectores con mayor disposición a pagar por el recurso.

Es importante prever algunos de los posibles impactos que ocurrirían bajo este esquema de ajuste o adaptación (a través de mejoras en eficiencia). Primero, es importante reconocer la situación que ha ocurrido en la cuenca del río Limarí, donde los aumentos de eficiencia han sido destinados a incrementar la superficie bajo riego, afectando la seguridad del sistema integral. Por otra parte, se plantea que los aumentos en la eficiencia de riego inducen a una disminución en los caudales de retorno (derrames) hacia las partes bajas de las cuencas, afectando de esta manera usuarios consuntivos o no consuntivos, productivos o ecosistémicos que se encuentren ubicados aguas abajo.

Otra medida que se plantea recurrentemente como estrategia de adaptación, es el desarrollo de infraestructura de almacenamiento de agua (embalses). Efectivamente este tipo de obras tienden a aumentar la disponibilidad de agua en periodos de escasez al acumular aguas en exceso para usarla en periodos de déficit. Esto permite mejoras en el desarrollo de diferentes sectores productivos e incluso podría en potencia, mejorar las condiciones medioambientales en un río (es relevante reconocer, sin embargo, que existen importantes impactos ambientales asociados a la construcción de embalses, como por ejemplo, en el corte de arrastre de sedimentos o áreas inundadas). Este tipo de obras normalmente se diseñan y operan tomando en cuenta las condiciones históricas de disponibilidad de agua. En el caso de las grandes cuencas en que el agua se comparte entre el sector hidroeléctrico y la agricultura (Maule, Laja) esta operación tiene la forma de convenios rígidos de operación de antigua data que no representan las condiciones actuales ni claramente las condiciones futuras de disponibilidad de recursos.

Resulta interesante destacar que en todos los casos analizados el principal afectado en este tema es el medio ambiente (representado en estos análisis a través de un caudal ambiental). En algunos casos el efecto corresponde a problemas históricos. Por ejemplo, el reconocimiento tardío de este tema en muchas de las cuencas del centro norte del país. Hacia el futuro se espera que esta situación empeore. Mejoras en las eficiencias de consumo o transferencias de derechos hacia consumos más intensivos en el tiempo (ej. desde el sector agrícola al urbano) implican una reducción en el caudal presente en el río. Por otra parte, es posible prever que las demandas medioambientales (incluyendo demandas recreativas o turísticas) asociadas a la mantención de caudales en el río puedan ir evolucionando en el tiempo. No existe en la institucionalidad actual la manera de redefinir la asignación de *daa* considerando estos posibles impactos. En caso de que los *daa* se asocien a un proyecto que es evaluado en el Sistema de Evaluación Ambiental, de acuerdo a las últimas modificaciones de este sistema, sería posible modificar su Resolución de Calificación Ambiental (RCA) en caso que existieran cambios importantes en la base ambiental sobre la cual se calificó el proyecto; por lo que potencialmente este tipo de impactos podrían ser

recogidos. Este tipo de situaciones son previstas en otros países como Estados Unidos, donde se exige una revisión periódica de permisos de operación de centrales hidroeléctricas (CADE, 2011).

Los desafíos que impone el cambio global sobre la gestión de los recursos hídricos en Chile plantea la necesidad de reevaluar los procesos de decisión, planificación y diseño de obras de infraestructura, haciendo necesario considerar la incorporación de elementos que reconozcan:

- Una visión integral (a nivel de cuenca como un todo y no a nivel de secciones de cuenca) de los posibles beneficiados y perjudicados asociados a la construcción de la obra.
- Una visión de largo plazo que reconozca los posibles cambios en la disponibilidad de agua asociada al cambio climático.

Por otra parte, con respecto a la operación de sistemas ya existentes, es necesario incorporar los conceptos de gestión adaptativa que limiten al máximo posible elementos de excesiva rigidez relacionados, por ejemplo, con convenios de operación, RCAs o el proceso de asignación de *daa*. Con respecto a los convenios de operación de embalses compartidos entre el sector agrícola e hidroeléctrico, sería conveniente revisar el estado de ellos, tomando en cuenta las condiciones hidrológicas más recientes.

En términos generales la gran conclusión que se desprende de este análisis es que la posibilidad real de que las condiciones de oferta y demanda de agua cambien en el tiempo requiere de sistemas de gestión de recursos hídricos que sean flexibles, dinámicos y que permitan incorporar perspectivas de largo plazo y de integridad a nivel de cuenca. Pese a los logros que han tenido la institucionalidad y la infraestructura asociadas a la gestión de los recursos hídricos en Chile, creemos que la magnitud de los desafíos implica la necesidad de generar cambios importantes que permitan la sustentabilidad del recurso para futuras generaciones.

## Agradecimientos

Este trabajo se ha desarrollado con el aporte del proyecto CORFO-INNOVA 09CN14-5704, Fortalecimiento de las capacidades para enfrentar los desafíos del cambio global en Chile. Quisiéramos reconocer el trabajo fundamental llevado a cabo por Eduardo Bustos y David Poblete, investigadores del Centro de Cambio Global, cuyo aporte ha sido decisivo en la estructuración de este documento.

## Referencias

- Banco Mundial**, 2012. *Chile. Diagnóstico de la gestión de los recursos hídricos*. Banco Mundial, Departamento de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible. Región para América Latina y el Caribe.
- CADE**, 2011. Informe de la Comisión Asesora de Desarrollo Eléctrico. Santiago, Chile.
- CDEC**, 2009. Disponible en <https://www.cdec-sic.cl/>
- Censo Agropecuario**, 2007. Disponible en <http://www.censoagropecuario.cl/index2.html>
- CEPAL**, 2009. *La Economía del Cambio Climático en Chile*. Santiago.
- CEPAL**, 2012. *La Economía del Cambio Climático en Chile*. Documento de proyecto. Santiago.
- Foro Consultivo Científico y Tecnológico**, 2012. Diagnóstico del agua en las Américas, Foro Consultivo Científico y Tecnológico AC de México.
- IPCC**, 2007. Cuarto informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC).
- Ministerio de Energía**, 2012. Estrategia Nacional de Energía.
- Ministerio del Medio Ambiente (MMA)**, 2011. Segunda comunicación nacional de Chile ante la convención marco de las Naciones Unidas sobre cambio climático.
- Vicuñaa, S., Garreaud, R. McPhee, J.**, 2011. Climate change impacts on the hydrology of a snowmelt driven basin in semiarid Chile, *Climatic Change*, doi: 10.1007/s10584-010-9888-4.



PONTIFICIA  
UNIVERSIDAD  
CATÓLICA  
DE CHILE



CENTRO DE  
**POLÍTICAS  
PÚBLICAS UC**

[www.politicaspublicas.uc.cl](http://www.politicaspublicas.uc.cl)  
[politicaspublicas@uc.cl](mailto:politicaspublicas@uc.cl)

**SEDE CASA CENTRAL**

Av. Libertador Bernardo O'Higgins 340, piso 3, Santiago.  
Teléfono (56-2) 2354 6637.

**SEDE LO CONTADOR**

El Comendador 1916, Providencia.  
Teléfono (56-2) 2354 5658.

**CENTRO DE POLÍTICAS PÚBLICAS UC**

- Facultad de Arquitectura, Diseño y Estudios Urbanos • Facultad de Ciencias Económicas y Administrativas
- Facultad de Ciencias Sociales • Facultad de Derecho • Facultad de Educación
- Facultad de Historia, Geografía y Ciencia Política • Facultad de Ingeniería • Facultad de Medicina