



EL CAMBIO CLIMÁTICO Y EL AGUA EN CHILE IMPACTOS Y PROPUESTAS DE ADAPTACIÓN

Conclusiones Generales y Propuestas de Políticas

2026

Comisión de Cambio Climático y Agua¹

¹ La Comisión fue conformada por: Luis Nario M. (presidente), Humberto Peña T. (edición y coordinación general), Pablo Daud M., Jorge Gironás L., Fernando Hidalgo T., Marcelo Olivares A., Nelson Pereira M., Ximena Vargas M., y Rodrigo Gómez A.

Preámbulo

El Instituto de Ingenieros de Chile, cumpliendo con sus objetivos estatutarios desde su fundación en el año 1888, de contribuir con propuestas a la solución de los grandes temas nacionales que afectan el desarrollo del país, a fines del año 2023, creó la Comisión de Cambio Climático y Agua, con el objeto de realizar un diagnóstico de la situación en este relevante tema y proponer políticas para superar los problemas que fueran identificados. Cabe hacer presente que el tema del Cambio Climático ha estado presente en las reflexiones del Instituto de Ingenieros desde hace varias décadas. Así, en la publicación “La Ingeniería Chilena en el S. XXI.” (1989) preparada con motivo de su centenario, analiza cómo el cambio climático será una de las 3 fuerzas que determinarán la gestión hídrica en el siglo XXI (las otras son el desarrollo económico y el cambio tecnológico). Asimismo, en 2013 publicó el informe “Cambio Climático. Percepciones e Impactos para Nuestra Economía”.

Para cumplir con estos objetivos el Instituto se propuso trabajar mediante dos tipos de actividades:

- Convocar a un grupo base de profesionales relacionados con el tema para conformar un grupo de trabajo estable y que se reuniera periódicamente. Este grupo constituyó lo que llamamos “La Comisión”;

- Invitar a exponer sus ideas a profesionales reconocidos como expertos en distintas áreas en los temas de interés de la Comisión.

Producto del trabajo en reuniones de la Comisión, y su interacción con el Directorio del Instituto, se generó un informe que consta de 9 capítulos y 6 anexos que analizan: el impacto esperado del cambio climático en los sistemas hidrológicos chilenos (capítulo 2); el impacto que tendría en los aprovechamientos para uso humano, en la agricultura y en los usos mineros e industriales (capítulos 3, 4 y 5), el impacto en el balance hídrico entre disponibilidad y la demanda a nivel de las cuencas (capítulo 6) y los impactos relacionados con el medio ambiente asociado al agua (capítulo 7). Finalmente se presentan los temas relativos a la seguridad contra aluviones e inundaciones (capítulo 8).

El presente documento reproduce capítulo 9, el que contiene un resumen de los principales hallazgos deducidos de los distintos análisis y presenta el conjunto de propuestas de políticas para la adaptación recomendadas por la Comisión. Se ha resuelto preparar esta edición de las conclusiones y recomendaciones en forma separada considerando que ellas sintetizan los mensajes más relevantes que se estima urgente transmitir a la Opinión Pública².

² En el presente documento se hacen referencias a los capítulos y anexos del informe extenso publicado por el Instituto de Ingenieros, por si el lector se interesa en acceder a los antecedentes originales.

1. CONCLUSIONES GENERALES.

En los capítulos temáticos se ha realizado un análisis tanto del comportamiento esperado de los sistemas hidrológicos en el escenario de cambio climático como de sus impactos relacionados en las distintas dimensiones de las actividades.

Para los propósitos del informe, cuyo objetivo se centra en la identificación de las políticas públicas que debiera impulsar el país en las próximas décadas para adaptarse a los impactos, conviene destacar las siguientes conclusiones que resultan del análisis de los antecedentes sobre el cambio climático a nivel mundial y su manifestación en Chile y de los diagnósticos sectoriales:

- Existe una evidencia científica abrumadora acerca de la existencia de un proceso de cambio climático a nivel global que implica cambios en las zonas climáticas y en el comportamiento del ciclo hidrológico de muchas regiones, así como un aumento de la temperatura media a nivel global (las mejores estimaciones indican que el calentamiento global a mediano plazo (2041-2060) en los escenarios más favorables estarán en torno a 1,6-1,7 °C). Además, se ha comprobado el aumento de la frecuencia e intensidad de las sequías en algunas regiones y de la intensidad de las precipitaciones máximas a escala mundial (Anexo 1)
- En el caso de Chile, existe la certeza de que en la mayor parte del territorio se presentarán cambios significativos en los sistemas hidrológicos, los que debieran ser tomados en cuenta en numerosas actividades para un normal desenvolvimiento del país. Sin perjuicio de lo anterior, existe una importante dispersión en los resultados de los modelos climáticos que han sido utilizados y la proyección de las variables relevantes para la gestión del agua presentan una elevada incertidumbre (Cap. 2, anexo 1).
- Las simulaciones en los escenarios más desfavorables de contenido de gases de invernadero proyectan aumentos de temperatura para todo Chile Continental, que oscilan entre los 0,5 y 3°C a mediados de siglo. Respecto de las precipitaciones, prácticamente en todo el territorio que se extiende de Puerto Montt al norte, los modelos proyectan disminuciones en el rango del 5 al 20% a nivel anual (cap. 2), siendo la reducción de la precipitación decreciente hacia el sur del país. Respecto de la disponibilidad hídrica, para el período de mayor demanda (meses de primavera -verano), las simulaciones para mediados de siglo en los escenarios más desfavorables en las cuencas aportantes a los valles presentan una reducción de la disponibilidad que se estima en el rango del 10 al 30%, con la excepción del norte grande, donde las proyecciones presentan resultados contradictorios (Caps. 2 y 6).
- La demanda de recursos hídricos para agua potable y saneamiento representa un 16% de la demanda total, y ella es abastecida en un 56% por aguas subterráneas, un 43% por fuentes superficiales y un 1% por diversas fuentes salinas. El análisis del impacto del cambio climático en este sector muestra que se reflejará principalmente por el deterioro de las fuentes de abastecimiento subterráneas asociadas al descenso de niveles freáticos, tendencia que ya se presenta en diversos acuíferos del norte chico y de la zona central; y por la reducción de la disponibilidad de aguas superficiales a niveles críticos en fuentes frecuentemente compartidas con usuarios agrícolas, situación que se observa en la actualidad en algunas cuencas localizadas de la RM al norte. Cabe señalar que estos procesos, además de presentarse en centros urbanos, se observan en numerosos sistemas rurales dispersos en distintas regiones del país. Adicionalmente, se asocia al cambio

climático el aumento de la frecuencia de crecidas con un elevado nivel de la isoterma de cero grados, lo que genera crecidas con una alta concentración de sedimentos en cuencas cordilleranas que atienden importantes centros urbanos, impidiendo su aprovechamiento para abastecer a la población durante ese período.

- La agricultura, que constituye la principal demanda consuntiva del país, con un 73 % del total, se ve afectada por el cambio climático debido al aumento de los requerimientos hídricos, la disminución de la disponibilidad hídrica y el incremento del CO₂ (que incide en la actividad fisiológica de las plantas). Es necesario destacar que, si bien algunos de los impactos del cambio climático global se manifiestan directamente en la actividad agrícola, otros son exógenos al sector, relacionados, por ejemplo, con las políticas públicas, el comercio, el desarrollo tecnológico y la evolución de la sociedad. Así, los análisis realizados por diversos organismos muestran una gran incertidumbre respecto a los reales impactos del cambio climático sobre el PIB de la agricultura chilena, entregando tanto resultados positivos como negativos.
- El impacto del cambio climático en la agricultura nacional y la consiguiente adaptación de su actividad no es algo nuevo. Se viene manifestando desde hace largo tiempo y se ha acelerado desde los años 80. Así, se observa que en el presente siglo: i) La superficie total de riego en Chile ha disminuido alrededor de 200.000 ha, ii) Se han modificado los tipos de cultivo, con una dramática reducción en cereales, forrajeras y cultivos industriales, y un considerable incremento de las plantaciones frutales, y iii) Junto con la disminución de las zonas regadas en las zonas del norte y central, se observa un significativo incremento en la zona sur.
- Debido al aumento de la evapotranspiración de los cultivos se estima un incremento de demanda de agua a nivel nacional en un 10,4%. Si se consideran las tendencias relativas al mejoramiento de la eficiencia en la aplicación del agua de riego, asumiendo la estabilización de las superficies regadas, el aumento de la demanda sería pequeño, representando solo el 3,5% de la demanda actual.
- Las actividades mineras e industriales representan alrededor del 11% de los usos consuntivos a nivel nacional y solo constituyen un porcentaje relevante en las regiones de Tarapacá, Antofagasta, Valparaíso y Biobío. Debido al desarrollo de un acelerado plan de incorporación de aguas de mar como fuente de suministro alternativo que lleva el sector minero, se espera que esa demanda muestre una disminución en términos absolutos, llegando a representar a 2040 solo un 2,9% de los usos consuntivos. Como contrapartida, se proyecta que la demanda industrial se incremente al año 2040 en un 77% respecto al año 2015. Así, en relación con el desafío que significa el cambio climático, los usos mineros e industriales tendrían una incidencia significativa en la región de Biobío, en la cual podrían llegar a representar del orden del 40% de los usos consuntivos y, en menor medida, en la región de Valparaíso donde, aunque representarían solo del orden del 6%, ello se daría en un escenario con una disponibilidad hídrica muy comprometida.
- El balance entre la disponibilidad hídrica y las demandas muestra que la condición estrés hídrico es elevada en la actualidad desde la Región Metropolitana hacia el norte. En los escenarios de cambio climático analizados, se comprueba que esa condición de escasez se podría incrementar alcanzando en las regiones de Valparaíso y Metropolitana valores que superan el umbral considerado como un nivel de estrés crítico. Esta condición de escasez decrece paulatinamente a partir de la

Región de O´Higgins, llegando a las Regiones de Biobío-Ñuble a niveles considerados bajos (se vuelve sobre este tema en el párrafo 4. del presente documento).

- En general el cambio climático impacta en forma sinérgica a los procesos de carácter antrópico que afectan al medio ambiente, los ecosistemas y la biodiversidad (degradación y pérdida de hábitats, sobreexplotación, contaminación, especies exóticas invasoras). En particular, afecta el deterioro de humedales, los que están presentes en una enorme diversidad en Chile (bofedales, vegas y salares, lagos, lagunas, pantanos, ríos, ñadis, turberas entre otros). En esta materia existen diversas normativas que son aplicadas solo parcialmente pero que en el contexto de cambio climático debieran ser plenamente utilizadas, como es el caso de las regulaciones relativas a la calidad ambiental de las aguas de ríos y lagos, a la reserva de caudales ecológicos y a la gestión de las aguas subterráneas. También se observan alteraciones indirectas en el comportamiento hidrológico de las cuencas debidas al cambio climático, como sucede, por ejemplo, con los períodos de sequía y olas de calor que favorecen la existencia de incendios forestales, destruyendo bosques, vegetación y deteriorando el suelo.
- La puesta en marcha de la legislación específica asociada al cambio climático presenta limitaciones en lo relativo a los temas de adaptación asociados a la gestión hídrica, por falta de una institucionalidad que permita jerarquizar, priorizar y focalizar las iniciativas con una visión integradora en el marco de los desafíos que presenta el país y cada cuenca en particular.
- En relación con las inundaciones y aluviones, se debe destacar que en Chile existe una diversidad territorial y climática importante: La amplia extensión latitudinal del país y su relieve determinan la coexistencia de múltiples tipos de inundaciones. Esta diversidad exige estrategias diferenciadas de gestión, adaptadas a las particularidades de cada región.
- Los antecedentes disponibles muestran que el principal factor de riesgo de inundaciones y aluviones asociados al cambio climático no será un aumento en la magnitud de las precipitaciones máximas (salvo en el extremo norte), sino la combinación de eventos de precipitación con temperaturas más altas (eventos de precipitación cálida).
- Aunque existe un marco legal y regulatorio amplio en materia de urbanismo, aguas lluvias y gestión de desastres, se observan limitaciones en su aplicación. En particular existen déficits en la necesaria integración y coordinación entre las diversas normativas, en la articulación entre actores institucionales, y en la adaptación a los nuevos escenarios e incertidumbre hidrológica asociados al cambio climático. En este marco, resulta necesario además fortalecer medidas no estructurales, tales como la planificación territorial, la educación comunitaria, los sistemas de alerta temprana y los seguros, en forma paralela a las estructurales para lograr una reducción efectiva del riesgo.

2. PRINCIPIOS DE UNA POLÍTICA DE ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO.

Una política de adaptación al cambio climático en lo relativo a la gestión hídrica debiera estructurarse sobre la base de las siguientes consideraciones:

a) Debiera tener como objetivo garantizar la seguridad hídrica y reconocer el papel clave del agua en el desarrollo nacional:

La gestión del recurso hídrico en un país como Chile, con extensas zonas áridas y semiáridas, resulta crítica no solo por el necesario abastecimiento de agua a la población, el cual tiene una prioridad establecida en la legislación, y por su incidencia en la sostenibilidad de valiosos ecosistemas, sino también por la relevancia de su uso productivo. Al respecto, se debe hacer presente que el uso productivo del agua participa en más del 80 % de las exportaciones (minería, fruticultura, vinos, celulosa, acuicultura), un 23% de la capacidad de generación eléctrica, más del 20% del empleo y, en algunas regiones, las actividades dependientes del aprovechamiento del agua representan sobre el 50% del PIB. Para ese propósito, desde hace casi dos siglos se ha construido un complejo sistema con más de 12.000 canales y 50.000 pozos, que atienden las demandas de unos 400.000 usuarios. Esto significa que una política de adaptación debe estar orientada a garantizar la seguridad hídrica en sus distintas dimensiones desde una perspectiva social, económica y ambiental, y tener una elevada prioridad en la agenda pública y un cumplimiento consistente a lo largo del tiempo.

b) Se formula y desarrolla en un marco de incertidumbre y con un horizonte de largo plazo:

Como se ha expuesto, el impacto del cambio climático en los sistemas hidrológicos, sin perjuicio de la certeza de su existencia, presenta importantes incertidumbres respecto de su magnitud y oportunidad. Así, las políticas que se formulen necesariamente deben elegirse considerando su robustez (evaluando distintos escenarios) y su flexibilidad (permitiendo ajustes a medida que se dispone de mejor información). Por estas razones el esfuerzo debiera centrarse en asegurar la existencia de políticas y un sistema institucional, jurídico y económico que garantice la planificación, diseño e implementación de las acciones y obras de adaptación oportunas y adecuadas, así como su permanente monitoreo y evaluación.

c) Debe tener la capacidad de priorizar y ordenar las iniciativas según su importancia estratégica y urgencia.

También, conviene destacar que no todos los impactos asociados al cambio climático tienen la misma urgencia, probabilidad y magnitud. Así, el esfuerzo de las políticas públicas se debe focalizar en temas y áreas específicas que, con el conocimiento disponible, se identifican como especialmente vulnerables. Además, hay que considerar que la urgencia de las políticas de adaptación al cambio climático tiene relación con los tiempos que se estiman necesarios para que el país alcance el grado de adaptación requerido, de modo que se deben considerar, por ejemplo, los tiempos que usualmente toma el desarrollo de las obras de infraestructura mayor, o el que supone la formulación, aprobación y plena implementación de una nueva normativa.

d) Incluye iniciativas cuya formulación y aplicación corresponden al Estado y a los particulares

Tratándose de un desafío nacional, que afecta a la comunidad en su conjunto, se trata de un desafío que por su propia naturaleza debe ser liderado por el Estado, a través de políticas que se puedan calificar “de Estado”, es decir que superen en el tiempo y en el espacio las limitaciones de gobiernos y poderes locales, aunque en muchas de ellas corresponda su implementación a los diversos actores sociales (empresas, particulares, universidades, OUAs, etc.).

De acuerdo con lo anterior, conviene distinguir entre aquellas iniciativas orientadas a la adaptación al cambio climático que corresponden a:

- i. Políticas, planes y proyectos desarrollados por el Estado, eventualmente en colaboración con los privados.
- ii. Acciones de iniciativa privada que responden parcial o totalmente a incentivos y regulaciones incorporados por el Estado para la adaptación.
- iii. Acciones de iniciativa privada, que constituyen respuestas a los desafíos del cambio climático en el marco de los incentivos y regulaciones generales que presenta el marco económico y legal existente. Un ejemplo de estas acciones es el permanente proceso de adaptación del patrón de cultivos a las nuevas condiciones, incluidas las relativas al clima, que realizan los agricultores como resultado de la operación de los mercados. Asimismo, se tienen iniciativas de las organizaciones de usuarios de aguas que realizan mejoras en la distribución de las aguas de riego.

El presente capítulo se orienta a hacer propuestas de políticas públicas de los tipos i y ii. Las acciones puramente privadas, señaladas en iii, forman parte del ordenamiento general actualmente existentes en el país y no están incluidas. A continuación, se presentan las propuestas de políticas de adaptación distinguiendo entre:

- Las políticas e iniciativas generales que se aplican a nivel de todo el país.
- Las políticas relativas al abastecimiento de recursos hídricos, según los desafíos que presenta el nivel de estrés al que están sometidas las distintas regiones del país.
- Las políticas orientadas al control de los riesgos de inundaciones y aluviones.

3. POLÍTICAS DE APLICACIÓN NACIONAL.

3.1 Adaptación del marco institucional de la gestión hídrica a los nuevos desafíos.

Como se ha analizado en los capítulos precedentes, los impactos asociados al cambio climático constituyen un importante desafío para el normal desarrollo de los servicios de agua potable y saneamiento y de las actividades productivas en los ámbitos agrícola, minero e industrial, así como para la protección del medio ambiente. Además, representan una grave amenaza por eventos hidrológicos extremos tales como inundaciones y aluviones.

Para estos propósitos, en el ámbito público se requiere establecer, implementar y coordinar, a lo largo del tiempo, políticas, planes, proyectos y programas de diversos ministerios y servicios públicos, que actúan en las distintas regiones del país, los cuales disponen de diversas facultades y funciones en el ámbito regulatorio y de inversión en relación con bienes e infraestructura públicos.

Por otra parte, los impactos asociados al cambio climático se manifiestan en el mediano y largo plazo en forma compleja, afectando en el ámbito local y nacional a múltiples actores. Tanto los impactos como las soluciones a los desafíos que levanta el cambio climático se presentan en el marco de las cuencas hidrográficas, en un sistema de gestión caracterizado por las abundantes interacciones entre los actores y las externalidades económicas, y que genera beneficios y costos de carácter público y privado. Así, la respuesta a los nuevos desafíos requiere de un enfoque holístico, capaz de integrar la acción de actores e instrumentos de distinta naturaleza en el marco de la cuenca.

Estos requerimientos de largo plazo en condiciones de incertidumbre, y de coordinación de la actuación de actores públicos y privados, constituyen un enorme desafío para la gestión hídrica y exceden las capacidades del marco institucional actual. Los déficits detectados se presentan en dos niveles: a nivel nacional en la organización de la institucionalidad pública y a nivel de la gestión de las cuencas (o grupos de cuencas). Para atender esta necesidad se propone avanzar en los siguientes cambios institucionales, ya planteados con anterioridad por distintas comisiones de estudio:

a) **Nivel nacional:** se propone la creación en la Administración del Estado de un ente rector, de nivel jerárquico superior y con liderazgo efectivo sobre el tema. Dicho organismo debiera atender a la formulación e implementación de una política nacional de recursos hídricos, formular y coordinar las políticas públicas y la planificación estratégica del sector a nivel del Estado, coordinar la acción del Estado y constituirse en el responsable político de gobierno en la materia. Esta entidad inserta en el aparato público podría ser complementada con un organismo consultivo con participación de los distintos sectores del país involucrados en el tema. Cabe destacar que sobre esta materia ya existe un proyecto de ley en el Congreso propuesto por el Poder Ejecutivo después de un largo proceso participativo, el cual plantea la creación de una Subsecretaría de Recursos Hídricos, la que, con los ajustes que se acuerden en el proceso legislativo, pudiera ser una solución adecuada.

b) **Nivel de cuencas:** Se requiere crear a nivel de cuencas una instancia institucional de carácter formal, autónoma, con participación pública - privada, reconocida como representante legítima de los beneficiarios e interesados (no solo de titulares de derechos de aprovechamiento de agua) de la cuenca, con la capacidad de generar y promover una visión integrada y sustentable de mediano y largo plazo de la gestión del agua y desarrollar las coordinaciones necesarias. En esa instancia se debiera estudiar, aprobar e implementar el Plan de Recursos Hídricos de la Cuenca de carácter

estratégico, orientado a promover una gestión integrada y sustentable de mediano y largo plazo de los recursos hídricos, considerando los aspectos sociales, ambientales y económicos involucrados. Sobre este requerimiento el Instituto de Ingenieros preparó una propuesta detallada para la creación de Consejos de Recursos Hídricos a nivel de cuencas o grupo de cuencas³.

3.2 Adecuación y aplicación de normativas específicas para la resiliencia.

a) Evaluación de la inversión pública en resiliencia.

Para hacer frente a los impactos del cambio climático, existen normativas y prácticas que resultan importantes porque inciden directamente en la decisión de invertir en la prevención o mitigación de dichos impactos. Al respecto, se propone impulsar cambios en los criterios e indicadores para la evaluación económica de la inversión pública relacionada con la resiliencia frente a los impactos del cambio climático. En esta materia es importante incorporar procedimientos y criterios que reconozcan que se trata de iniciativas de carácter estratégico, con impactos críticos en el mediano y largo plazo, pero que la valoración presente de los beneficios a través de metodologías convencionales no refleja adecuadamente su importancia para la sociedad y los objetivos de una estrategia nacional de resiliencia.

b) Aprovechamiento de aguas servidas tratadas.

En la actualidad el uso de aguas servidas tratadas no tiene una definición legal explícita, lo que en ocasiones genera incertidumbres jurídicas y conflictos judiciales entre empresas sanitarias y agricultores, inhibiendo el desarrollo de proyectos de reúso. Al respecto, se propone solucionar este problema mediante la dictación de una ley que defina claramente la titularidad de los derechos de aprovechamiento de las aguas regeneradas y las condiciones ambientales, los procedimientos y los arreglos institucionales para su reúso (como sucede en otros países), lo que facilitaría la formulación de proyectos para el aprovechamiento de dichos recursos. Cabe recordar que actualmente se descargan al mar unos 6,5 m³/s en la zona altamente demandante de recursos hídricos que se extiende entre Valparaíso y Arica, los que podrían ser aprovechados⁴.

c) Intercambio de agua entre sectores de usuarios.

El aprovechamiento más eficiente desde una perspectiva social, económica y ambiental de los recursos hídricos en una cuenca, en ocasiones solo se puede obtener a través de arreglos complejos para intercambios de agua entre distintos sectores usuarios. Ello implica generar las condiciones para alcanzar acuerdos entre diversos actores considerando aspectos relacionados con alternativas técnicas, distribución de costos y beneficios, regulaciones legales y restricciones asociadas a la calidad del agua, entre otras. Es el caso, por ejemplo, de la posible liberación de aguas captadas por una empresa sanitaria en el curso superior de un río para su uso por otros usuarios, debido a la incorporación de aguas desalinizadas para el abastecimiento de demandas costeras. Acuerdos para soluciones de este tipo serán necesarios en el futuro, pero no tienen precedentes en el país y los

³ H. Peña, G. Ahumada, C. Berroeta, E. Brown, J. Carvallo, M. Contreras, B. Espíldora, R. Gómez, J. F Muñoz. "Hacia una Gestión Integrada de los Recursos Hídricos. Una Propuesta". Instituto de Ingenieros de Chile (2012).

⁴ Diagua Consultores/ CORFO (2019). Desarrollo de un Modelo Regulatorio-Institucional-Financiero que Viabilice el Reúso de las Aguas Residuales en Chile. Programa de Fomento (IFI) denominado "Plan de Inversiones Estratégicas en Recursos Hídricos para la Competitividad Meso-Región Norte Chico",

actuales marcos institucionales y normativos no los consideran en forma expresa. Así, resulta necesario revisar las disposiciones existentes con el propósito de hacerlas funcionales a acuerdos como los señalados y considerando una visión integrada (ver 3.1b).

d) Adecuada aplicación de normativas existentes relativas a la protección de los cuerpos de agua, la planificación del territorio, y la adaptación al cambio climático.

Existen regulaciones vigentes relativas a la prevención del deterioro ambiental, tales como las relativas a la aplicación de normas secundarias de calidad ambiental a los cuerpos de agua, la prevención de la sobreexplotación de acuíferos y la reserva de caudales ambientales, que no son plenamente aplicadas en la actualidad. Tratándose de problemas que se espera que se vean agravados en las condiciones de cambio climático, se hace necesario desarrollar iniciativas para la completa implementación de las normativas existentes. Además, se hace necesario que para la aplicación de la legislación existente asociada al cambio climático se desarrollen instancias y capacidades que permitan jerarquizar y focalizar los esfuerzos con una visión estratégica de las urgencias del país en la materia.

3.3 Política nacional de mejora de la eficiencia en el uso del agua.

Aunque la mejora de la eficiencia de aprovechamiento del agua resulta insuficiente para atender el desbalance oferta-demanda de recursos hídricos, una política nacional dirigida a ese propósito constituye un elemento esencial de una política de adaptación. A continuación, se presentan propuestas relativas al uso doméstico y a la agricultura, las que requieren de iniciativas públicas específicas con ese fin. Se estima que los usos industriales y mineros en general no las requerirían ya que los incentivos de mercado y las regulaciones vigentes se han mostrado adecuadas, sin perjuicio de la continuidad de programas de Gobierno, tales como los Acuerdos de Producción Limpia (APL) y las Estrategias Hídricas Locales, de la Agencia de Sustentabilidad y Cambio Climático de Corfo, que aplican a diversas actividades económicas y constituyen un aporte al uso eficiente de recursos hídricos y a la adaptación de las actividades económicas al cambio climático

a) Agua Potable y Saneamiento

La mejora de eficiencia en este aprovechamiento debe distinguir entre los sectores urbano y rural, ya que responden a distintos incentivos.

Aunque en el sector urbano la normativa regulatoria (DFLs 382 y 70) es explícita en que las tarifas deben regir para prestadores eficientes, ello no se ha demostrado efectivo. En efecto, en 2023 existía un promedio nacional de 33% de Agua no Facturada (ANF), pese a que las tarifas reembolsan solamente un 15%. Así, un 18% de costo prácticamente invariable por años solo se explica por posibles subsidios cruzados. De acuerdo con estos antecedentes resulta necesario incorporar modificaciones a la normativa regulatoria y a los sistemas de fiscalización en aplicación, aprovechando la técnica disponible de instrumentación, digitalización y control de los sistemas de AP, para reducir efectivamente el ANF a ese 15%.

En el sector rural los caudales comprometidos son muy pequeños y difícilmente podrían restringir sus demandas. Una forma de disminuir su consumo sería la promoción de sistemas de disposición de aguas servidas conocidos como secos, con descargas separadas de desechos líquidos y sólidos y su disposición sanitariamente aceptable, solución sobre la que existe experiencia internacional al

respecto (Perú). Esta alternativa podría analizarse con la autoridad sanitaria para su eventual aplicación.

b) Uso agrícola.

Mejorar la eficiencia del agua en la agricultura es de trascendental importancia dado que representa aproximadamente el 73 % del consumo de agua en Chile. Esta eficiencia se refiere al volumen de agua que utilizamos desde que la extraemos desde la fuente natural hasta que la aprovecha la planta para su desarrollo considerando las pérdidas de agua del suelo por el fenómeno de evaporación y las demandas de agua de las plantas debido al fenómeno de transpiración, requerimientos que se conocen como evapotranspiración (ET). Además, se presentan requerimientos hídricos debido a los procesos fisiológicos de las plantas (captar nutrientes, fotosíntesis, etc.), pero ellos no representan más del 0,1% al 5% de la demanda por ET.

Así, mejorar la eficiencia de aprovechamiento del agua en la agricultura supone desarrollar iniciativas a nivel del consumo de la planta, del manejo a nivel predial, a nivel del sistema de captación, conducción, distribución y almacenamiento, y a nivel de la gestión general del recurso hídrico en las cuencas. A continuación, se presentan brevemente las iniciativas propuestas en cada uno de estos temas:

- **Eficiencia del uso del agua a nivel de la planta («Water Use Efficiency» o WUE):** Una línea de investigación actual de la biotecnología consiste en identificar genotipos de plantas y bioestimulantes, que permitan cultivos más eficientes en el uso del agua y resistentes a la sequía. En Chile se están realizando ensayos biotecnológicos para obtener variedades de trigo y algunos frutales resistentes a la sequía. Estas iniciativas debieran incluirse en una política de mejora de la eficiencia hídrica e incentivarse desde el Estado y la Academia.

- **Eficiencia de Riego a Nivel Predial:** Existen diferentes métodos de riego tecnificados, como el riego por aspersión, microaspersión y goteo, que permiten una aplicación más eficiente del agua al suelo. Estos sistemas, combinados con sensores de humedad del suelo para ajustar el riego en tiempo real, son métodos muy efectivos para mejorar la eficiencia de riego, en especial si se tiene acceso a los parámetros climatológicos para determinar la ET de los cultivos. Al respecto, se propone:

a) Seguir con políticas de Estado que promueven e incentiven el uso de riego tecnificado, tales como la Ley de Fomento al Riego y Drenaje (Ley 18.450) que ha demostrado ser un instrumento valioso en aumentar la eficiencia del uso del agua para riego en Chile. Asimismo, es importante apoyar y expandir los programas de información, evaluación y asistencia técnica en terreno sobre la eficiencia del uso del agua que se brindan a través de los servicios de extensión agrícola, tales como el INIA e INDAP.

b) Promover la utilización de las nuevas tecnologías que permiten un uso más eficiente del agua por las plantas, mediante el empleo de sensores de humedad del suelo, del clima y del estado hídrico de la planta. Del mismo modo, interesa apoyar el uso de teledetección satelital y de drones para determinar la evapotranspiración y el estrés hídrico de las plantas. Estas iniciativas se debieran complementar con el desarrollo del Internet de las cosas (IoT) y la Inteligencia artificial (IA). En paralelo a lo anterior, se propone continuar con los programas de instalación de redes de estaciones

agrometeorológicas, conectadas entre sí que entreguen datos diarios de evapotranspiración (ET) mediante conexión digital con los agricultores.

- **Eficiencia de riego a nivel de sistemas de captación, distribución y acumulación:** En el marco de los instrumentos de fomento del riego del Estado, se debe incentivar: el uso de sistemas automatizados de distribución del agua a nivel de canales, la distribución de agua en presión, el revestimiento de canales, y el uso de embalses o estanques acumuladores de agua, reduciendo pérdidas y facilitando la adecuación del suministro de agua a las demandas. Cabe destacar que este proceso de modernización en la distribución de las aguas debiera estar acompañada de un mayor dinamismo del mercado, con la correspondiente flexibilidad en la asignación de las aguas. Para estos propósitos resulta importante el fortalecimiento de la asistencia técnica a las Organizaciones de Usuarios del Agua (OUA) por parte del Estado y una mejora en la eficiencia en los procesos administrativos asociados a la aplicación de la legislación de aguas.

- **Eficiencia a nivel de la gestión del agua en el marco de la cuenca:** El proceso de mejora de la eficiencia de agua se da en el marco de la cuenca. En ese contexto se presentan limitaciones, oportunidades y múltiples externalidades asociadas a dichas iniciativas, las que deben ser identificadas e incorporadas en el plan director de la gestión integrada de sus recursos hídricos de la cuenca, según la propuesta señalada en 3.1. Sin perjuicio de lo anterior, existen algunos temas que interesa destacar:

a) Los modelos de planificación de la gestión de recursos hídricos, incluyendo los efectos del cambio climático, debieran determinar las oportunidades y los impactos de las externalidades asociados a las iniciativas de mejoramiento de la eficiencia considerando los beneficios y mejoras de eficiencia en forma integral, a nivel del conjunto de los usos de la cuenca. Así, corresponde que los planes evalúen la eficiencia del uso del agua a escala de cuenca y determinen las áreas con mayores requerimientos, proporcionando información valiosa para la formulación de los planes de los organismos públicos.

b) Para que sean efectivas, las políticas e incentivos del Estado para el mejoramiento de la eficiencia por los particulares no debieran asociarse a la pérdida de los derechos de agua sobre las aguas ahorradas, sin perjuicio de la incorporación de normativas que prevengan el incremento descontrolado de las superficies regadas por parte de los agricultores para aprovechar las ganancias de eficiencia, fenómeno que en la experiencia mundial conduce a mantener o acrecentar los déficits.

3.4 Política de investigaciones para la adaptación.

El cambio climático proyecta en Chile numerosos desafíos con situaciones nuevas, sobre las cuales existe un conocimiento insuficiente para una toma de decisiones adecuadamente informada. Así, debiera formularse una política orientada a incentivar la investigación en distintas disciplinas, en las instituciones públicas y privadas que realizan investigación. A continuación, se identifica un conjunto de temas específicos relacionados con la disponibilidad y aprovechamiento de los recursos hídricos que pudieran ser parte de ese esfuerzo:

a) Climatología, hidrología y glaciología:

- Actualización permanente de los escenarios climáticos a lo largo de Chile de acuerdo con los avances científicos asociados al proceso de calentamiento global que se presentan a nivel internacional y las recomendaciones del IPCC.
- Preparación de series hidrológicas representativas de los caudales y de los eventos extremos en las cuencas y localizaciones de mayor importancia, considerando el impacto del cambio climático y los cambios previsibles en el uso del suelo y las demandas.
- Estudio de la hidrología de crecidas y aluviones en zonas áridas, en escenarios con cambio climático.
- Ampliación del monitoreo hidrometeorológico mejorando la resolución espacio-temporal de la información con foco en las zonas geográficas más sensibles (pre-cordillera y cordillera, sistemas lacustres, napas subterráneas, etc.).
- Investigación del impacto del cambio climático en la calidad del agua y en los ecosistemas asociados al recurso hídrico, para lo cual resulta imprescindible desarrollar un programa para mejorar la información de calidad del agua requerida para calibrar los modelos y simular sus proyecciones.
- Determinación de la evolución y de las proyecciones asociadas al impacto del cambio climático de las zonas con glaciares y de su aporte hídrico a las cuencas.

b) Biotecnología, cultivos y riego:

- Desarrollo de variedades que sean resistentes al stress hídrico y rentables económicamente, de plantas de cultivo habitual en Chile, aprovechando los avances en el tema de la convergencia biodigital, en especial a partir de la investigación de la genómica de plantas⁵.
- Investigaciones destinadas a la adaptación del patrón de cultivos y a la nueva disponibilidad de recursos hídricos y condiciones climáticas en las distintas zonas.
- Tecnologías para el aprovechamiento de aguas grises y otras no potables para el riego de jardines, parques y áreas rurales controladas.

⁵ Sobre la materia el Instituto de Ingenieros constituyó la Comisión Convergencia Biológica Digital, la que resumió su trabajo en el informe “Convergencia Biodigital” (Steiner et al, 2025). El informe destaca las posibilidades de la exploración de la genómica de plantas para lograr especies vegetales que se adapten al cambio climático (CCG) permitiendo cultivos más resistentes y sostenibles.

4. ADAPTACIÓN A LOS DESAFÍOS EN EL BALANCE OFERTA -DEMANDA DE AGUA, EN LAS DISTINTAS MACROZONAS.

Más allá de las políticas generales a nivel nacional, reseñadas en 9.3, en este punto se hacen las propuestas con sus fundamentos, orientadas a atender los desafíos que presenta el balance oferta-demanda en las distintas macrozonas en las que se puede dividir el país. Como se señala en el capítulo 6, el estrés hídrico al que se espera estén sometidas las distintas regiones en el nuevo escenario asociado al cambio climático es muy diverso, de modo que resulta fundamental que las políticas de adaptación y los esfuerzos que realice el país reflejen dichas urgencias y prioridades.

A continuación, se presentan las propuestas considerando la situación de cada macrozona.

4.1 Regiones de Arica y Parinacota, Tarapacá y Antofagasta:

Como se ha señalado, en esta macrozona las modelaciones climáticas resultan especialmente inciertas, informando tanto de posibles incrementos como de disminución de la disponibilidad hídrica. Además, frecuentemente, debido a las particularidades de su hidrología, los cauces presentan caudales base, especialmente estables. Debido a estas consideraciones, antes de adoptar otras medidas relativas a la gestión hídrica, resulta aconsejable concentrar los esfuerzos en la mejora del pronóstico de los futuros escenarios, a partir de un adecuado aprovechamiento de los futuros avances en la modelación climática a nivel mundial y del desarrollo de investigaciones para una mejor modelación de la hidrología de la zona.

4.2 Regiones de Atacama y Coquimbo:

En la actualidad se comprueba que en esta macrozona la producción agrícola ya depende de la disponibilidad hídrica del año. Así, resulta inevitable que el impacto en la disponibilidad de agua asociada al cambio climático también afectará directamente la extensión de las superficies regadas e inclusive amenazará la seguridad del abastecimiento a las zonas urbanas. Además, las posibilidades de obtener recursos hídricos por la mejora en su gestión son escasas considerando que en la actualidad los caudales están regulados prácticamente en su totalidad mediante embalses. En este contexto, las políticas necesariamente debieran hacer uso de aguas desalinizadas y de las aguas servidas urbanas debidamente tratadas, según planes de gestión de recursos hídricos que involucren a los distintos sectores usuarios debidamente acordados en el marco de los cambios institucionales y normativos propuestos (ver 9.3). En especial dichos planes debieran considerar:

- a) La desalinización de agua de mar para asegurar el abastecimiento del uso doméstico. En esta materia resulta de interés la búsqueda de alternativas tecnológicas que reduzcan los costos aprovechando las condiciones climáticas de la zona, por ejemplo, considerando la técnica de instalación de paneles de generación fotovoltaica sobre cuerpos de agua, embalses y eventualmente canales, que tiene la ventaja de disminuir parte la evaporación superficial directa.
- b) Incorporación para la producción de recursos hídricos adicionales, mediante el reúso de las aguas servidas de las ciudades costeras, como forma de atenuar el proceso de reducción de las superficies regadas.
- c) En casos especiales de cultivos de alto valor, dependiendo de los análisis económicos y de la evolución de los costos y precios, pudiera ser alternativa la desalinización de agua de mar.

4.3 Regiones de Valparaíso y Metropolitana:

Para responder al incremento crítico del estrés hídrico en esta macrozona, que pasa en las modelaciones más desfavorables de niveles medio/alto, a un valor considerado de severo, en torno a un 40%, además de las iniciativas propuestas para su implementación a nivel nacional, resulta imprescindible dar una alta prioridad a una política específica orientada a desarrollar la resiliencia frente al cambio climático. Ella debiera analizarse en profundidad en el plan hídrico de cada cuenca y considerar la importancia estratégica que significa la seguridad hídrica de una zona que concentra aproximadamente el 50% de la población y del PIB del país y un 20% de sus zonas regadas.

El análisis del plan de cada cuenca debiera considerar entre sus elementos centrales para esta zona, los siguientes:

- a) Evaluar la necesidad de incrementar en forma sustancial la capacidad de regulación de los recursos hídricos superficiales, ya que en la actualidad se dispone de una infraestructura de almacenamiento mínima. Dependiendo de sus resultados, será necesario analizar alternativas técnicas de regulación considerando riesgos hidrológicos, impactos ambientales y costos.
- b) Desarrollar la gestión integrada de los recursos hídricos superficiales y subterráneos, incluyendo la posibilidad de recarga artificial de acuíferos; y
- c) La posibilidad de asegurar el abastecimiento de las ciudades costeras (Valparaíso, Viña del Mar, San Antonio, balnearios) mediante agua desalinizada. Esta iniciativa debiera considerar además la eventual liberación de recursos hídricos de aguas arriba para las actividades productivas y el medioambiente, en el marco de una gestión que integre a nivel de la cuenca a los distintos sectores usuarios compartiendo costos y beneficios.

4.4 Regiones O'Higgins a Biobío:

En esta macrozona, aun con las mejoras de eficiencia, se prevé un incremento del estrés hídrico, aunque con valores menores a los de las regiones de más al norte y, en general, las modelaciones con resultados más desfavorables se alcanzan niveles medios o bajos (entre 4 y 35%). Sin perjuicio de lo anterior, se puede esperar que se presenten dificultades locales en algunas zonas para atender las demandas. Así, el plan de gestión integrada de los recursos hídricos a nivel de las cuencas debiera detectar la necesidad de mejoras específicas al sistema de suministro y a las prácticas de manejo de agua, las que debieran ser encauzadas a través de los instrumentos de política pública existentes.

4.5 Regiones al sur del Biobío

En esta macrozona existe una condición de abundancia de recursos hídricos en relación con las demandas, la que se mantendrá inclusive en el escenario de cambio climático definido como prudencial. De modo que desde la perspectiva del suministro de agua a las demandas no se espera una condición de escasez. Sin perjuicio de lo señalado, cabe destacar que la disminución de las precipitaciones asociada al cambio climático hará necesaria una importante ampliación de las superficies regadas, con la consiguiente necesidad de desarrollo de la infraestructura de riego. Así, en esta macrozona los instrumentos de apoyo al riego gestionados por el sector público (CNR, INDAP, SAG) debieran ser activados para ese objetivo.

5. RIESGOS ASOCIADOS A INUNDACIONES Y ALUVIONES EN ÁREAS CRÍTICAS

Chile concentra un conjunto de amenazas hidrometeorológicas cuya severidad aumenta en función de factores geográficos, climáticos y antrópicos. La ocurrencia conjunta de cordones montañosos abruptos, cuencas pequeñas y de respuesta rápida, zonas áridas con suelos poco permeables y una acelerada expansión urbana, tienden a exacerbar el riesgo asociado a los posibles impactos del cambio climático sobre la ocurrencia y magnitud de los extremos hidrometeorológicos, en la forma de crecidas, aluviones e inundaciones.

Algunos eventos recientes (2015, 2017, 2023) evidencian que el cambio climático está modificando los mecanismos que detonan las inundaciones, particularmente mediante el aumento de las precipitaciones cálidas y la elevación significativa de la isoterma 0°C, lo que incrementa el área que recibe lluvia líquida y favorece escorrentías súbitas de gran magnitud. Simultáneamente, el crecimiento urbano, la ocupación de zonas inundables y la infraestructura insuficiente elevan la exposición y vulnerabilidad de la población.

A continuación, se presenta un breve análisis, junto con propuestas respectivas para tres zonas geográficas críticas en el país, para las cuales la amenaza hidrometeorológica (y los correspondientes riesgos) podrían ser más elevados y recurrentes. Estas tres áreas priorizadas se caracterizan por distintos mecanismos que controlan la ocurrencia y magnitud de la amenaza: (1) las zonas urbanas inmediatas a la cordillera de Los Andes con cuencas precordilleranas contribuyentes muy sensibles a la ubicación de la Isoterma 0°C y altos niveles de exposición, (2) las zonas aluvionales en el norte grande y chico, sensibles a eventos de precipitación intensos y cálidos, y (3) las zonas en riesgo asociada a crecidas rápidas vinculadas al derretimiento nival y glaciario repentino.

5.1 Zonas urbanas inmediatas a la Cordillera de Los Andes.

Las ciudades ubicadas en el piedemonte andino, particularmente ubicadas en la zona centro-sur del país, presentan un conjunto particular de riesgos derivados de su proximidad a pendientes fuertes, quebradas activas y cuencas de respuesta muy rápida. A esto se agregan las tendencias al alza en la temperatura, que lleva a mayores áreas recibiendo precipitación líquida. Estas zonas concentran buena parte de los eventos más severos observados en Chile central durante las últimas décadas. Como tal, deben ser priorizadas en el desarrollo de política pública y acciones para controlar el riesgo hidroclimático, con foco en medidas tanto estructurales como no estructurales:

Dentro de las medidas estructurales, destaca el desarrollo de un plan de evaluación de las obras existentes cuya insuficiencia pudiera resultar crítica (por ejemplo: canalizaciones urbanas, embalses, etc.) para verificar que resultan adecuadas en el escenario con cambio climático y modificarlas si fuera el caso. Además, se deberá impulsar la implementación y operación de nuevas obras fluviales que, en sus diseños, consideren proyecciones climáticas futuras, de modo de hacerse cargo de las precipitaciones cálidas de relevancia en estas zonas. Lo anterior requiere de la actualización de manuales de cálculo de crecidas, particularmente en lo referido a la ubicación de la línea de nieves.

De aún mayor relevancia es la limitación de los aumentos del nivel de exposición de la población en las ciudades ubicadas en estas zonas. El desarrollo periurbano de las ciudades motiva la ocupación de eventuales zonas de riesgo, sobre todo cuando hay una sensación de seguridad propiciada por la

presencia de infraestructura fluvial. El éxito de esta medida estructural radica en una buena identificación de las zonas inundables, así como en la existencia de instrumentos de planificación territorial (IPT) actualizados, con perspectiva de riesgo, y capacidad efectiva de fiscalización. Estos IPTs deben coordinarse con los Planes Maestros de Aguas Lluvias, los que por su parte deben ser actualizados y deben especificar estas zonas de inundación.

5.2 Zonas con amenazas aluvionales en regiones de Atacama y Coquimbo.

Esta macrozona contiene algunas de las cuencas más vulnerables del país por su geografía, clima y ocupación territorial aguas abajo. Las quebradas de respuesta torrencial, los suelos con baja infiltración, y la dificultad en preservar la memoria histórica en lo relacionado a aluviones y crecidas dado lo poco frecuente que son estos fenómenos, configuran condiciones de riesgo extremo. Esta misma falta de memoria histórica lleva a la ocupación, muchas veces informal, del lecho de esteros y ríos. Nuevamente los IPTs son claves acá.

Se hace relevante en estos lugares limitar e impedir la ocupación de las zonas de inundación. Adicionalmente, las precipitaciones en estas zonas áridas y semiáridas del país presentan una tendencia bastante robusta al alza en el futuro (en torno al 10% en el mediano plazo), y los caudales presentan una elevada sensibilidad al aumento de las precipitaciones, por lo que los diseños hidrológicos deben considerar este cambio junto con el aumento de la elevación de la isoterma 0°C.

Por último, se debe recordar la existencia de una serie de tranques y acopios de relaves en estas zonas áridas y semiáridas. Es crítico realizar estudios de riesgo de estos relaves frente la amenaza hidrometeorológica y su posible comportamiento futuro. Esto es prioritario dado el gran impacto negativo que tendría su colapso.

5.3 Zonas con amenazas asociadas a vaciamientos glaciares.

En la zona centro-sur y especialmente en Patagonia, la afectación del cambio climático sobre los procesos nivo-glaciares constituye una de las amenazas con mayor potencial destructivo y, al mismo tiempo, una de las menos consideradas en planificación territorial. Las elevadas temperaturas pueden significar un aumento en la frecuencia de las crecidas tipo GLOFS, que conllevan elevadísimos caudales alcanzados en tiempos muy cortos. Para el control del riesgo en estas zonas se propone la realización y actualización permanente de un inventario de lagos glaciares. Este inventario debe identificar y priorizar aquellos lagos con mayor complejidad, junto con la geomorfología de las cuencas involucradas, de manera de poder construir modelos hidrodinámicos de vaciamiento.

La otra medida esencial es la implementación de sistemas de monitoreo y alerta temprana, junto con protocolos de comunicación del riesgo y evacuación. Estos sistemas deben basarse en la medición continua de variables críticas relacionadas con las detonantes de estas crecidas repentinas. Conocida es la dificultad que existe en el mantenimiento y operación de estos sistemas, particularmente por la dificultad de acceso que tienen los glaciares y lagos involucrados. Esto trae consigo la necesidad de asegurar este financiamiento, el que además debe tomar en cuenta la resiliencia y redundancia que deben tener estos sistemas. Sensores remotos de bajo costo, y distintas alternativas de transmisión de datos son entonces elementos claves de estos sistemas.

NOTA FINAL: Como se ha señalado, el presente documento corresponde al capítulo 9: “Conclusiones Generales y Propuestas de Políticas para la Adaptación”, del informe sobre el cambio climático y el agua en Chile, preparado por el Instituto de Ingenieros de Chile. Se invita a los lectores a acceder al texto in extenso, compuesto de 9 capítulos y 6 anexos, disponible en el sitio del Instituto de Ingenieros de Chile en la dirección: <https://www.iing.cl/informes/>