

EL CAMBIO CLIMÁTICO Y EL AGUA EN CHILE



ISBN 978-956-08329-2-4

COMISIÓN CAMBIO CLIMÁTICO Y EL AGUA 2026

Participantes



Luis Nario Matus
(Presidente)

Ingeniero Civil de la Universidad de Chile. Postgrado en Hormigón Armado y Pretensados de París (CHEBAP), Centro de Altos Estudios (Francia).



Humberto Peña Torrealba
(Edición y Coordinación General)

Ingeniero Civil Hidráulico de la Universidad Católica de Chile.



Pablo Daud Miranda

Ingeniero Civil Industrial de la Universidad de Chile.



Jorge Gironas León

Ingeniero Civil Hidráulico de la Pontificia Universidad Católica de Chile. Magíster en Ciencias de la Ingeniería, PhD in Civil Engineering.



Rodrigo Gómez Álvarez

Ingeniero Civil de la Universidad de Chile. Especialidad en Hidráulica.



Fernando Hidalgo Tapia

Ingeniero Civil Hidráulico de la Universidad de Chile.



Marcelo Olivares Alveal

Ingeniero Civil de la Universidad de Chile.



Nelson Pereira Muñoz

Ingeniero Agrónomo de la Universidad de Concepción. Postgrado en Ingeniería de Regadíos (Master), CEDEX (España). Magíster Scientiae Pontificia Universidad Católica de Chile.



Ximena Vargas Mesa

Ingeniero Civil de la Universidad de Chile. Especialista en Hidrología y Cambio Climático.

INSTITUTO DE INGENIEROS DE CHILE

Fundado en 1888

Miembro de la American Society of Civil Engineers (ASCE)

JUNTA EJECUTIVA

Presidente

José Orlandini Robert

Primer Vicepresidente

Juan Carlos Barros Monge

Segundo Vicepresidente

Jorge Yutronic Fernández

Secretaria

Alejandra Acuña Villalobos

Prosecretario

Mauro Grossi Pasche

Tesorero

Ricardo Nicolau del Roure G.

Protesorero

Cristian Hermansen Rebolledo

DIRECTORIO 2026

Alejandra Acuña Villalobos

Elías Arze Cyr

Marcial Baeza Setz

Juan Carlos Barros Monge

Alex Chechilnitzky Zwicky

Pablo Daud Miranda

Rodrigo Fernández Aguilera

Álvaro Fischer Abeliuk

Javier García Monge

Jorge Gironás León

Mauro Grossi Pasche

Gloria Henríquez Díaz

Cristian Hermansen Rebolledo

Viviana Meruane Naranjo

Germán Millán Valdés

Claudio Muñoz Zúñiga

Ricardo Nanjarí Román

Luis Nario Matus

Christian Nicolai Orellana

Ricardo Nicolau del Roure G.

José Orlandini Robert

Jorge Pedrals Guerrero

Humberto Peña Torrealba

Daniela Pollak Aguiló

Miguel Ropert Dokmanovic

Mauricio Sarrazín Arellano

Alejandro Steiner Tichauer

Perla Valdés Calquín

Scarlett Vásquez Paulus

Jorge Yutronic Fernández

Secretario General

Carlos Gauthier Thomas

SOCIEDADES ACADÉMICAS MIEMBROS DEL INSTITUTO

ASOCIACIÓN CHILENA DE SISMOLOGÍA
E INGENIERÍA ANTISÍSMICA, ACHISINA.

Presidente: Mario Lafontaine T.

ASOCIACIÓN INTERAMERICANA
DE INGENIERÍA SANITARIA Y AMBIENTAL –
CAPÍTULO CHILENO, AIDIS.

Presidente: Alexander Chechilnitzky Z.

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA
HIDRÁULICA, SOCHID.

Presidente: Jorge Gironás L.

SOCIEDAD CHILENA
DE GEOTECNIA, SOCHIGE.

Presidente: Rafael Iglesias A.

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA
DE TRANSPORTE, SOCHITRAN.

Presidenta: Paola García T.

SOCIEDAD CHILENA DE EDUCACIÓN
EN INGENIERÍA, SOCHEDI.

Presidente: Rodrigo Herrera V.

COMISIONES DEL INSTITUTO

Resiliencia del Sector Eléctrico Chileno.

Presidente: Cristian Hermansen R.

Antecedentes y Reflexión sobre el Mercado Laboral Chileno en Ingeniería.

Presidente: Mauro Grossi P.

Hacia la Sociedad del Conocimiento.

Presidente: Alejandro Steiner T.

Situación y Desarrollo de la Ingeniería en las Instituciones del Estado.

Presidente: Humberto Peña T.

Desregulación de Permisos para Materializar Proyectos de Inversión e Infraestructura (Ad-hoc).

Presidente: Pablo Daud M.

De Mantenimiento y Conservación de Puentes (Ad-hoc).

Presidente: Ricardo Nicolau del Roure G.

Ingenieros en la Historia Presente.

Presidente: Miguel Ropert D.

CONSEJO CONSULTIVO

Renato Agurto Colima

Raquel Alfaro Fernandois

Iván Álvarez Valdés

Elías Arze Cyr

Dante Bacigalupo Marió

Marcial Baeza Setz

Juan Carlos Barros Monge

Bruno Behn Theune

Sergio Bitar Chacra

Francisco Brieva Rodríguez

Mateo Budinich Diez

Juan Enrique Castro Cannobbio

Alex Chechilnitzky Zwicky

Silvana Cominetti Cotti- Cometti

Raúl Demangel Castro

Álvaro Fischer Abeliuk

Eduardo Frei Ruiz-Tagle

Roberto Fuenzalida González

Alejandro Gómez Arenal

Tomás Guendelman Bedrack

Diego Hernández Cabrera

Jaime Illanes Piedrabuena

Sergio Lavanchy Merino

Nicolás Majluf Sapag

Jorge Mardones Acevedo

Carlos Mercado Herreros

Rodrigo Muñoz Pereira

Ricardo Nanjarí Román

Luis Nario Matus

Andrés Navarro Haeussler

Ricardo Nicolau del Roure G.

Guillermo Noguera Larraín

Humberto Peña Torrealba

Luis Pinilla Bañados

José Rodríguez Pérez

Rodolfo Saragoni Huerta

Mauricio Sarrazín Arellano

Alejandro Steiner Tichauer

Raúl Uribe Sawada

Luis Valenzuela Palomo

Ximena Vargas Mesa

Andrés Weintraub Pohorille

Jorge Yutronic Fernández



INSTITUTO DE INGENIEROS
C H I L E

El Cambio Climático y el agua en Chile

Impactos y propuestas de adaptación

PRESIDENTE

Luis Nario M.

EDICIÓN Y COORDINACIÓN GENERAL

Humberto Peña T.

PARTICIPANTES:

Pablo Daud M.

Jorge Gironás L.

Rodrigo Gómez A.

Fernando Hidalgo T.

Marcelo Olivares A.

Nelson Pereira M.

Ximena Vargas M.

Comisión Cambio Climático y Agua · 2026

ISBN 978-956-08329-2-4



ÍNDICE

Preámbulo	3
Estructura del Informe	4
Agradecimientos	5
Capítulo 1. Introducción	6
Capítulo 2. Los sistemas hidrológicos chilenos y el cambio climático	11
Capítulo 3. Impacto del cambio climático en el uso humano. Alternativas de adaptación	26
Capítulo 4. Impacto del cambio climático en el uso agrícola. Alternativas de adaptación	41
Capítulo 5. Impacto del cambio climático en los usos mineros e industriales. Alternativas de adaptación	54
Capítulo 6. Análisis del impacto del cambio climático a nivel del balance hídrico de las cuencas	67
Capítulo 7. Impacto del cambio climático en la seguridad contra aluviones e inundaciones	79
Capítulo 8. Impacto del cambio climático en el medio ambiente asociado al agua	104
Capítulo 9. Conclusiones generales y propuestas de políticas para la adaptación	121
Anexos	
Anexo I. El cambio climático a nivel global y en Chile. Antecedentes	140
Anexo II. Antecedentes sobre el abastecimiento de agua para el uso doméstico	167
Anexo III. Antecedentes sobre el uso agrícola del recurso hídrico	192
Anexo IV. Antecedentes sobre usos mineros e industriales	205
Anexo V. Antecedentes técnicos y normativos sobre inundaciones	208
Anexo VI. Regulación ambiental relativa al cambio climático	222
Referencias	235

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”;
- Convocar a colaborar 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 genera este documento que contiene los aspectos más relevantes que se quiere transmitir a la Opinión Pública.

ESTRUCTURA DEL INFORME

El Informe consta de 9 capítulos. Se inicia con una Introducción (capítulo 1), y una presentación del impacto esperado del cambio climático en los sistemas hidrológicos chilenos (capítulo 2); a continuación, se analiza 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). En los capítulos 6 y 7, los antecedentes de demanda y disponibilidad hídrica obtenidos se consolidan y evalúan a nivel de las cuencas y se presentan los impactos del cambio climático relacionados con el medio ambiente asociado al agua. Los temas relativos a la seguridad contra aluviones e inundaciones se presentan en el capítulo 8; y el capítulo 9 contiene un resumen de los principales hallazgos deducidos de los distintos análisis y se presenta un conjunto de propuestas de políticas para la adaptación. Finalmente, se incluyen 6 anexos conteniendo información complementaria con un mayor detalle.

AGRADECIMIENTOS

El Instituto de Ingenieros de Chile agradece la dedicación y compromiso de los integrantes de la Comisión Presidida por Don Luis Nario Matus, la dirección, coordinación y edición general del Sr. Humberto Peña¹, y la colaboración activa y colectiva en cada uno de los capítulos que integran este informe de la Sra. Ximena Vargas² y los Sres. Pablo Daud³, Jorge Gironas⁴, Fernando Hidalgo⁵, Rodrigo Gómez, Marcelo Olivares⁶ y Nelson Pereira⁷. También se agradece la participación en algunas de las diversas reuniones de este grupo de trabajo, opiniones y colaboraciones realizadas por el Sr. Ricardo Nicolau del Roure G.

¹ Autor principal capítulo 5 y 9.

² Autora principal capítulo 2.

³ Autor principal capítulo 8.

⁴ Autor principal capítulo 7.

⁵ Autor principal capítulo 3.

⁶ Autor principal capítulo 6.

⁷ Autor principal capítulo 4.

CAPÍTULO 1

Introducción

1.1. Sobre este documento y la relevancia del cambio climático

El cambio climático ya no es un fenómeno futuro, sino una condición estructural que está redefiniendo cómo vivimos, producimos y protegemos nuestros ecosistemas. Sus manifestaciones - aumento sostenido de temperaturas, alteraciones en los patrones de precipitación, retroceso de nieve y glaciares, mayor frecuencia e intensidad de eventos extremos y elevación del nivel del mar - convergen en un mismo lugar: el ciclo del agua. Por ello, pensar el cambio climático en Chile exige situar el agua en el centro de la planificación y la gestión.

La reciente evidencia internacional refuerza la gravedad del problema. Sequías prolongadas han deteriorado producciones agrícolas tradicionalmente estables en el Mediterráneo europeo, mientras que, en Estados Unidos, el agotamiento de acuíferos estratégicos ha expuesto la fragilidad de sistemas urbanos y agrícolas que crecieron asumiendo disponibilidad estable. Estos ejemplos no buscan describir exhaustivamente otras realidades, sino subrayar que la crisis hídrica es global y que las soluciones requieren portafolios de adaptación robustos en distintos escenarios.

En Chile, la relación clima-agua es especialmente crítica por tres razones: Primero, una geografía extensa y contrastada que integra desiertos, cordillera alta, valles mediterráneos, bosques templados y zonas australes; Segundo, una economía y un bienestar social fuertemente dependientes de la disponibilidad de agua para consumo humano, alimentos, energía, minería y turismo; y, Tercero, una alta vulnerabilidad climática reconocida internacionalmente. Esta combinación implica que cambios en precipitación o temperatura pueden tener efectos significativos sobre la disponibilidad efectiva y la estacionalidad de los caudales en algunas zonas, y además impactos en la economía y bienestar de la población.

Los impactos no se distribuyen de manera homogénea. En la macrozona norte, sistemas urbanos y productivos operan en un escenario de escasez estructural, por lo que la gestión de acuíferos, la recarga, el reúso y la desalinización con salvaguardas ambientales ya tienen un carácter estratégico. En la macrozona centro - donde se concentra la población y parte importante del PIB - convergen la disminución de precipitaciones, la mayor

evapotranspiración y la pérdida de almacenamiento de nieve, elevando la competencia entre usos e incrementando la exposición a sequías multianuales y crecidas súbitas. En la macrozona sur y austral, si bien la precipitación media es mayor, emergen cambios en su estacionalidad e intensidad, con efectos sobre hidroelectricidad, bosques, turberas, humedales, terrenos inestables y zonas costeras.

El presente informe, adopta la seguridad hídrica como criterio rector: garantizar acceso a agua de calidad y cantidad adecuadas para los usos domésticos y productivos, de manera sostenible en el tiempo, con resiliencia frente a eventos extremos y protegiendo las funciones ecosistémicas. Para ello, considerando la gran variabilidad climática que presenta el país, organiza la discusión sobre la base de sus distintas macrozonas y regiones y, cuando resulta necesario, la escala de cuenca, unidad de análisis que facilita la conexión de la información hidrológica y de demandas con decisiones de gestión, desarrollo y operación de infraestructura y salvaguardas ambientales.

¿Qué encontrará el lector? Un capítulo hidrológico que traduce los cambios previstos en las variables climáticas en su efecto en la disponibilidad hídrica, incluyendo su estacionalidad y valores extremos; capítulos sobre los impactos del cambio en la disponibilidad hídrica en los usos humanos, con atención a poblaciones vulnerables e infraestructura crítica; y en los usos agrícolas, mineros e industriales; un capítulo que contrasta la información sobre oferta y demanda hídrica en las nuevas condiciones climáticas y analiza las implicancias en la confiabilidad del suministro; y un capítulo que sintetiza las conclusiones de los capítulos previos y propone iniciativas relativas a la institucionalidad y políticas de adaptación, a nivel nacional y de las diferentes zonas del país.

En síntesis, Chile ingresa a una fase en la que el clima del pasado es una guía cada vez menos confiable para el futuro. La respuesta estratégica no es gestionar crisis puntuales una y otra vez, sino pasar a una gestión preventiva del riesgo con una institucionalidad nacional y de cuencas capaz de coordinar actores y resolver conflictos, con iniciativas y carteras de inversión robustas y planificadas en distintos escenarios, y con mecanismos y reglas que permitan anticipar acciones frente a sequías y crecidas. El propósito de esta Introducción es establecer el marco común para ese tránsito y ordenar la conversación pública hacia decisiones oportunas y coherentes.

1.2. Mensajes clave

- La crisis del agua es global y sistémica; experiencias internacionales muestran que sobreexplotación y variabilidad climática convergen, reforzando la urgencia de actuar.
- El cambio climático ya afecta la seguridad hídrica de Chile; sus señales se manifiestan en zonas con una disminución de la precipitación, mayor evapotranspiración, reducción

de superficies con glaciares, reducción de caudales y mayor frecuencia de situaciones críticas asociadas a eventos hidrológicos extremos.

- Los impactos son territoriales y diferenciados; la gestión debe realizarse considerando la situación de las diferentes cuencas para responder con iniciativas e inversiones acordes a cada realidad.
- La adaptación efectiva combina medidas habilitantes, eficiencia y diversificación de fuentes y una gobernanza intersectorial que considere roles públicos y privados, una información abierta y criterios de equidad para distribuir costos y beneficios.

1.3. Sobre la apreciación científica hoy día¹

Actualmente, existe amplio consenso en la comunidad científica internacional de que el fenómeno del cambio climático es un hecho inequívoco, causado principalmente por la acción del hombre.

El cambio climático se manifiesta a través de diversas transformaciones climáticas tales como aumento de la temperatura media global, modificaciones al patrón de precipitaciones, alza del nivel del mar y reducción de la criósfera y modificación en los patrones de eventos climáticos extremos (IPCC 2007,2012 y 2013).

El cambio climático es consecuencia de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) que se originan en diversas actividades antropogénicas, principalmente derivadas de la quema de combustibles fósiles, del cambio del uso del suelo, de las actividades agrícolas y ganaderas y de los desechos. Estas transformaciones climáticas están causando efectos económicos, sociales y ambientales significativos (IPCC 2013)

Hace cuatro décadas se empezó a detectar que existiría un cambio en el equilibrio de las condiciones climáticas del planeta, lo que llevó a la comunidad internacional representada por las Naciones Unidas, a fundar, el año 1988, el Panel Intergubernamental del Cambio Climático conocido por las siglas IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change).

En el marco del sistema de Naciones Unidas el IPCC se relaciona con la Organización Meteorológica Mundial (OMM) y con el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) y opera con la asistencia de miles de científicos y expertos de todo el mundo, incluido Chile. Este Organismo Internacional es reconocido como referente en el tema del cambio climático.

El objetivo del IPCC es suministrar evaluaciones científicas sobre la información existente del riesgo del cambio climático provocado por la actividad humana y sus potenciales

¹ El Anexo I contiene un análisis detallado de esta temática.

impactos en las actividades socioeconómicas y ambientales y las posibles soluciones para adaptarse o mitigar sus efectos.

El citado organismo ha elaborado seis informes de síntesis a la fecha y diferentes informes temáticos. Los dos primeros informes del IPCC fueron publicados en 1990 y 1992, respectivamente, en tanto el tercero en 1995. Este último informe dio origen al Protocolo de Kioto (1997) el cual estableció metas cuantificables y definió mecanismos para su cumplimiento, según lo establecido en la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), comprometiéndolo a los países industrializados a limitar y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) de conformidad con las metas individuales acordadas y que en concreto compromete a 36 países industrializados y la Unión Europea a reducir la emisión de GEI en 5%, en comparación al año 1990, en el quinquenio 2008-2012. Este acuerdo fue modificado por la Enmienda de Doha (2013) que estableció un segundo período de compromiso que comenzó el 2013 y terminó en 2020 en que se establece una reducción del 18% de las emisiones de GEI respecto a 1990. Lamentablemente muchos países no han cumplido el acuerdo de Kioto y la enmienda de Doha aún no se implementa.

El cuarto informe del IPCC concluye claramente y de manera unánime que el Calentamiento Global es un fenómeno evidente y distinguible de la variabilidad natural que tiene el clima, en el cual el aporte del hombre es fundamental (IPCC, 2007b y c).

El quinto informe del IPCC (2013) señala que el calentamiento en el sistema climático es inequívoco y, desde la década de 1950, muchos de los cambios observados no han tenido precedentes en los últimos decenios a milenios. La atmósfera y el océano se han calentado, los volúmenes de nieve y hielo han disminuido, el nivel del mar se ha elevado y las concentraciones de GEI han aumentado. En efecto, los datos de temperatura de la superficie terrestre y oceánica, combinados y promediados globalmente, calculados a partir de una tendencia lineal, muestran un calentamiento de 0,85 °C (0,65 a 1,06) durante el período 1880-2012 (IPCC 2013).

Por otra parte, en los últimos años, las concentraciones atmosféricas de dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) y óxido nitroso (N₂O) (los tres gases más importantes del efecto invernadero, además de los fluorados) han aumentado a niveles sin precedentes.

En ausencia de esfuerzos adicionales de mitigación, las emisiones de gases de efecto invernadero continuarán creciendo, y causarán un aumento de la temperatura media de la superficie global de más de 3 y hasta 5 grados Celsius al 2100, con respecto a los niveles pre-industriales. Así, se requerirán fuertes reducciones de las emisiones de gases de efecto invernadero para limitar los niveles de calentamiento a 2 °C en relación con los niveles preindustriales, lo que supondrá un importante reto tecnológico, económico, institucional y de comportamiento (IPCC, 2013)

En relación con la temperatura superficial del planeta, se estima que continuará incrementándose hasta mediados de siglo, bajo todos los escenarios de emisiones considerados. El calentamiento global de 1,5 °C a 2 °C será excedido durante el siglo XXI, a menos que se

produzcan fuertes reducciones de los GEI. En el peor escenario se podría llegar a un aumento de la temperatura de 4,4 °C entre los años 2081-2100.

Chile, por su ubicación geográfica y condiciones climáticas, es uno de los países que está siendo más afectado por el Cambio Climático, considerando que: “el país cumple con siete de los nueve criterios de vulnerabilidad enunciadas por la Convención Marco de la Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) a saber: posee áreas costeras de baja altura; zonas áridas y semiáridas; zonas de bosques; territorio susceptible a desastres naturales; áreas propensas a sequía y desertificación; zonas urbanas con problemas de contaminación atmosférica y ecosistemas montañosos” (MMA, 2017a).

Hace más de 30 años que Chile participa de manera firme y constante en temas relacionados al Cambio Climático, principalmente relacionados a la mitigación. A pesar de que Chile no es considerado, a nivel mundial, un emisor relevante de Gases de Efecto Invernadero (GEI), ha ratificado acuerdos internacionales como la Convención Marco de las Naciones Unidas por el Cambio Climático (CMNUCC) el año 1994, el Protocolo de Kioto el año 2006 y el Acuerdo de París en 2017, en los que se ha comprometido a realizar inventarios y seguimientos de las emisiones para evitar su aumento.

CAPÍTULO 2

Los sistemas hidrológicos chilenos y el cambio climático

2.1. Disponibilidad hídrica en Chile

Durante las últimas décadas instituciones públicas y privadas han implementado y adoptado diversas metodologías y estrategias para comprender, mitigar y adaptarse a los impactos del cambio climático. Algunos sectores se han enfocado en la vulnerabilidad y adaptación, identificando las regiones más afectadas por el cambio climático y desarrollando estrategias de adaptación que incluyan medidas para reducir la vulnerabilidad de la diversa infraestructura que presenta una comunidad, como también las redes de salud, agricultura, gestión del agua, entre otros. Por otro lado, hay quienes velan por la planificación estratégica y política de lo que implica el fenómeno climático.

Para el análisis de la disponibilidad hídrica en Chile continental, se adoptan los resultados del proyecto de actualización del balance hídrico nacional (DGA, 2022), en el que se calibró el modelo VIC (Variable Infiltration Capacity), usando los datos del producto grillado CR2MET, en cuencas en régimen natural y luego se regionalizaron los parámetros al resto de las cuencas del país. De esta manera se determinó el balance hídrico nacional cuyas componentes principales (P, ET y Q) se visualizan en la [Figura 2.1](#), apreciándose que, especialmente en la zona norte, la escorrentía queda fuertemente condicionada por la evapotranspiración.

Posteriormente, usando las forzantes determinadas en el período histórico y futuro, a base de los cuatro modelos GCM (CCSM4, CSIRO-Mk3-6-0, IPSL-CM5A-LR y MIROC) se usó el modelo hidrológico para simular los flujos y estados de los 114 sistemas (cuencas DARH) de Chile continental que se muestran la [Figura 2.2](#). De esta manera se obtienen los cambios hidrológicos que se visualizan en la [Figura 2.3](#).

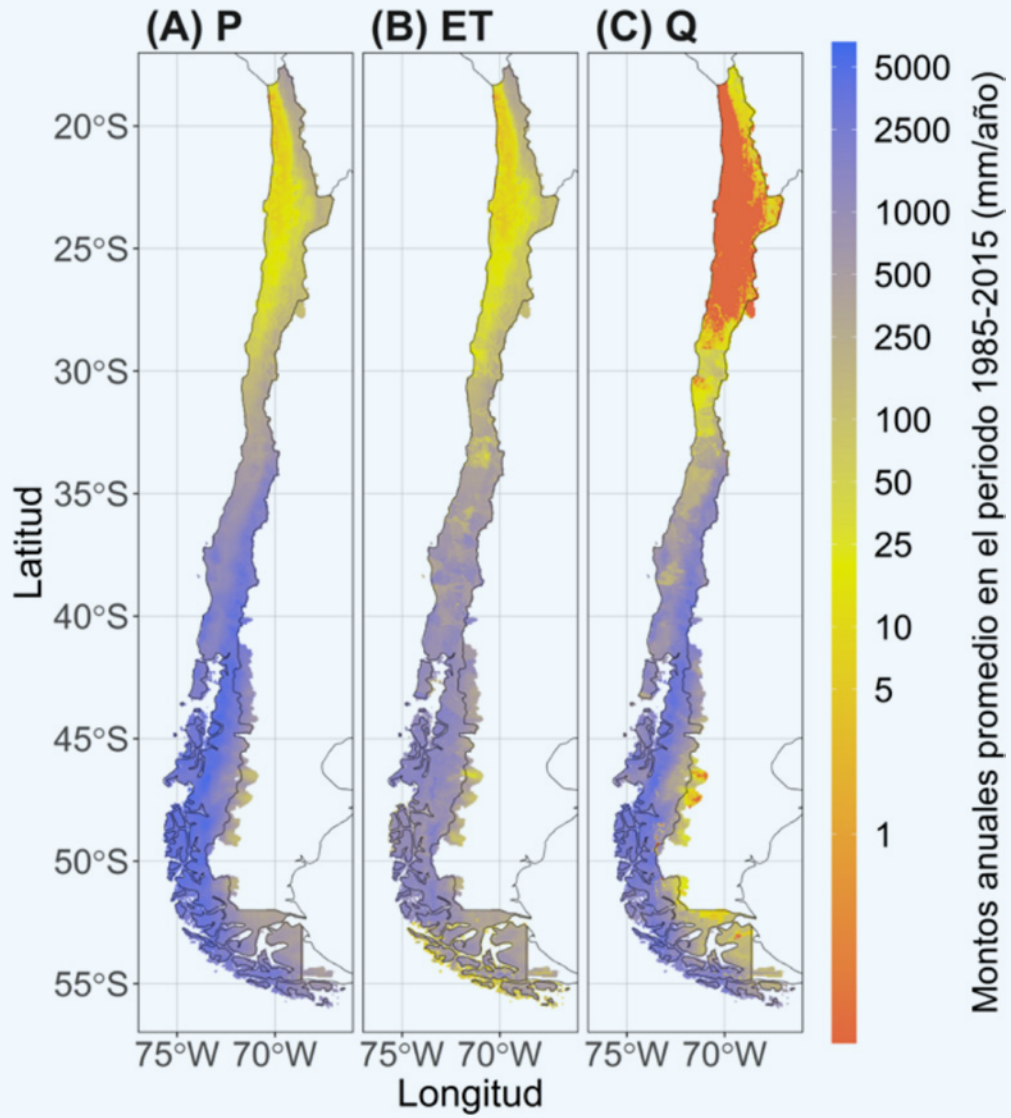


Figura 2.1. Principales componentes del balance hídrico anual en mm/año: (A) P: precipitación, (B) ET: evapotranspiración natural y (C) Q: escorrentía anual promedio (periodo 1985-2015) a lo largo de Chile continental. Fuente DGA, 2022.

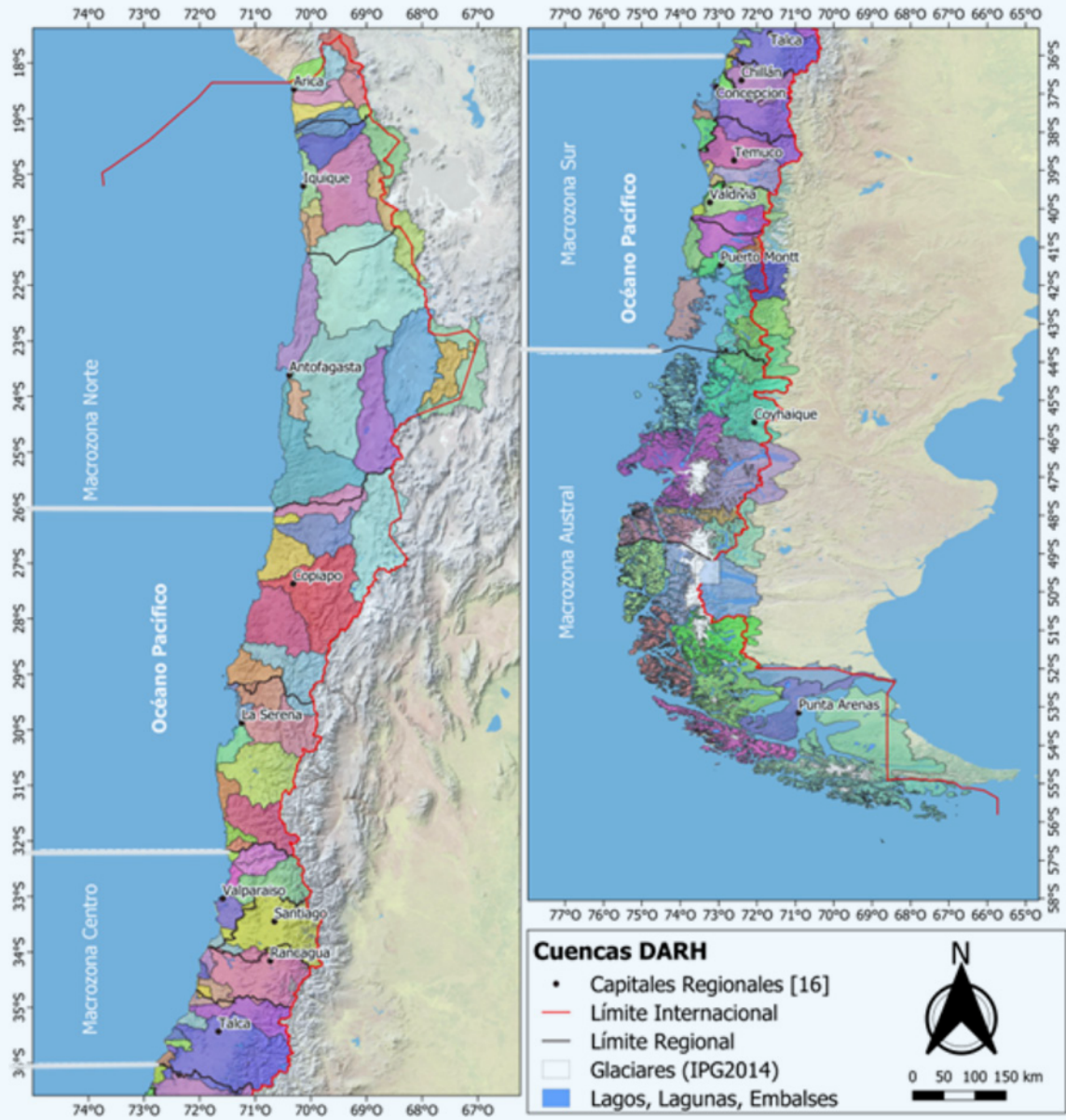


Figura 2.2. Cuencas DARH definidas en Chile continental. Fuente DGA, 2022.

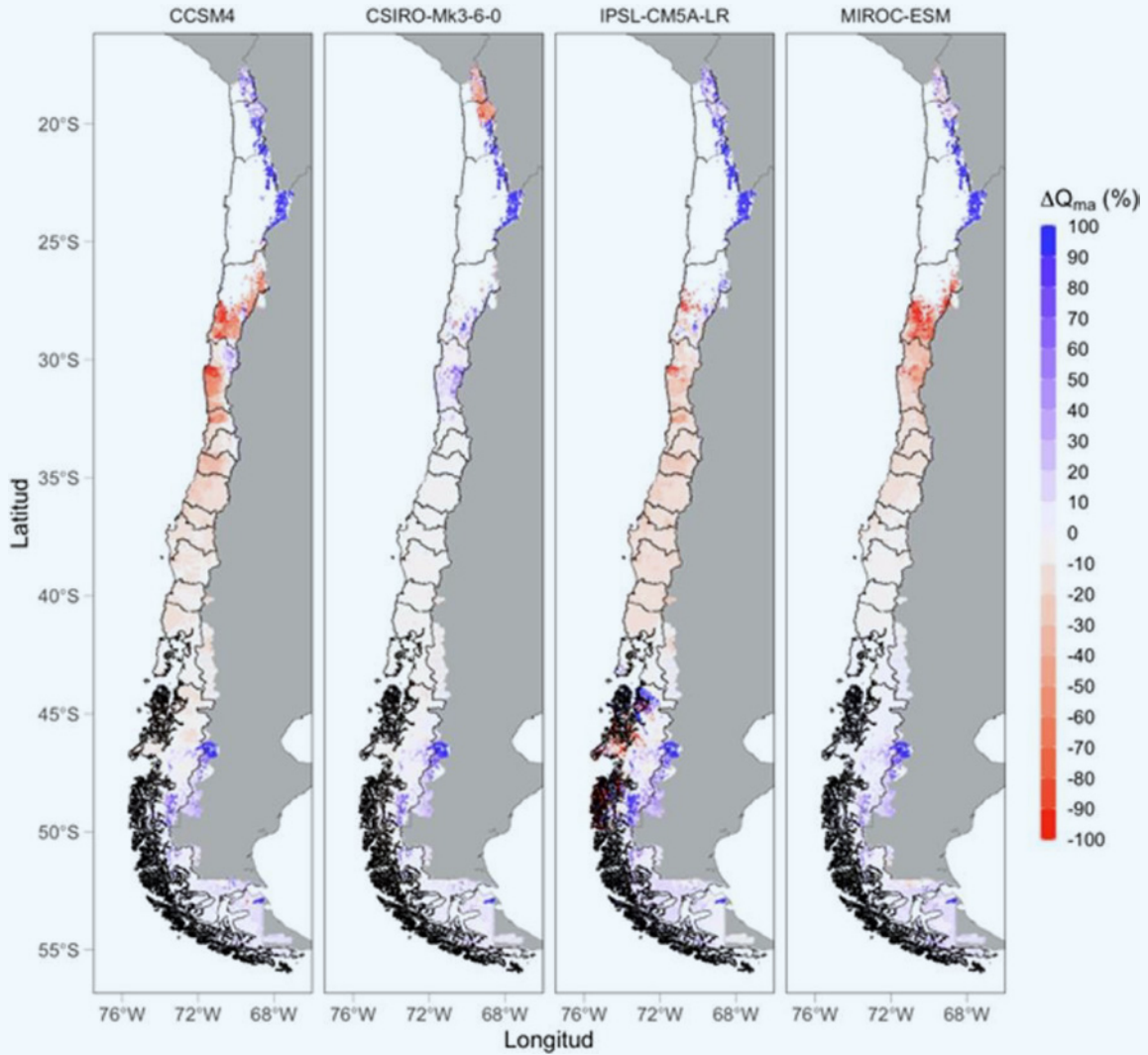


Figura 2.3. Cambios (%) proyectados para el período 2030-2060 para la escorrentía media anual considerando como referencia el periodo 1985-2015 según los GCMs CCSM4, CSIRO-MK3-6-0, IPSL-CM5A-LR y MIROC-ESM. Fuente DGA, 2022.

En la **Figura 2.4** se presentan, a escala de cuenca, los cambios porcentuales de los cuatro modelos climáticos, asociados a las tres variables principales del balance hídrico. Se obtiene que, en promedio, para un 72% de las cuencas DARH (i.e., 84 de 116) se proyecta una disminución en el caudal promedio en el periodo 2030-2060 respecto al periodo 1985-2015. En dichas cuencas, la disminución de caudal, DQ, coincide con la disminución de la precipitación, DP y, en general, con la disminución de evapotranspiración real, DET, (en 58 cuencas, en promedio, disminuye P, ET y Q). Asimismo, resulta interesante notar que existen 5/114 cuencas que proyectan, en promedio, un aumento en P, ET y Q. Por otro lado, 18 cuencas reportan un aumento en ET y disminución en P y Q. De acuerdo con lo anterior, dependiendo de la cuenca, las proyecciones hidrológicas para el periodo 2030-2060 dan cuenta de la incertidumbre en los cambios en la partición P-ET-Q en comparación al periodo de referencia 1985-2015.

El análisis de los resultados en el Norte Grande muestra que tres de los modelos proyectan mayores caudales, aunque las precipitaciones y evapotranspiraciones proyectadas pueden ser mayores o menores que las del período histórico. El modelo CSIRO, en general, señala proyecciones a la baja de todas las variables en estudio. En el Norte Chico, las proyecciones indican importantes disminuciones de caudal (hasta de 70%) asociadas a disminuciones (hasta de 30%) de evapotranspiración y precipitación, sin embargo, en algunas cuencas los modelos (excepto MIROC) proyectan aumentos de caudal a pesar de las disminuciones de las otras variables. En la zona centro, los modelos son más consistentes en los valores de disminución de la precipitación (no superior al 20%) que se traduce en disminuciones de caudal porcentualmente mayores en algunas cuencas, destacando el comportamiento más homogéneo en toda esa zona del modelo CSIRO que proyecta cambios inferiores al 10% en las tres variables. En la zona sur todos los modelos proyectan consistentemente disminuciones de precipitación cercanas al 10% y de caudal de hasta 20%. Finalmente, en la zona austral se aprecia que, en general, las proyecciones de precipitación y evapotranspiración tienden a aumentar y dependiendo de la magnitud del aumento relativo entre estas, los caudales proyectados pueden aumentar o disminuir.

2.2. Análisis de disponibilidad hídrica en cuencas representativas

Para este análisis se han seleccionado 11 cuencas de las distintas macrozonas (**Figura 2.5**) que permitan visualizar tanto las incertidumbres de las proyecciones asociadas a las variables como sus tendencias futuras.

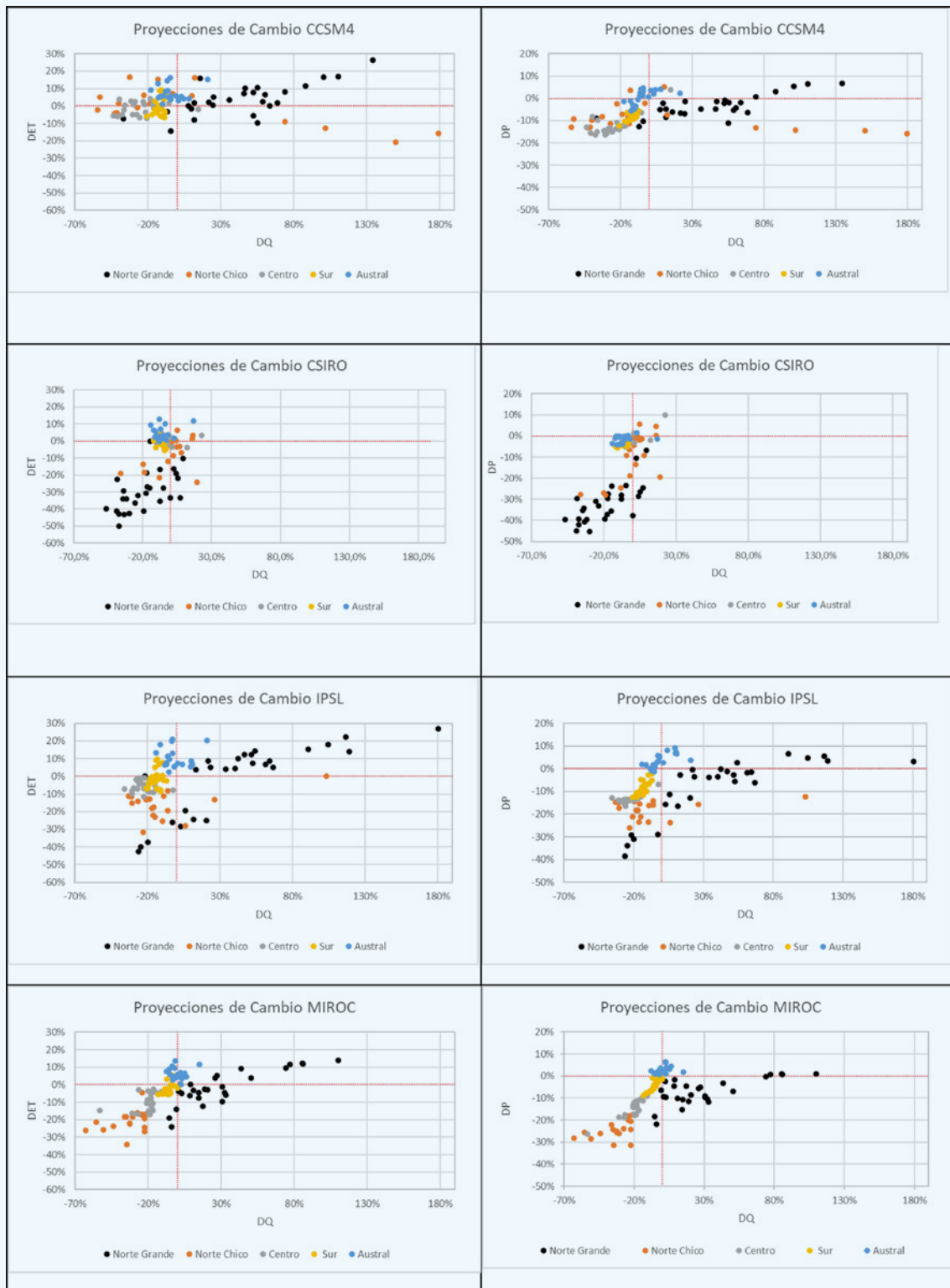


Figura 2.4. Proyecciones de cambio hidrológico, según cada modelo climático, en el periodo 2030-2060 respecto al periodo 1985-2015 a nivel de cuenca DARH. Fuente: Elaboración propia de la Comisión en base a DGA (2022).

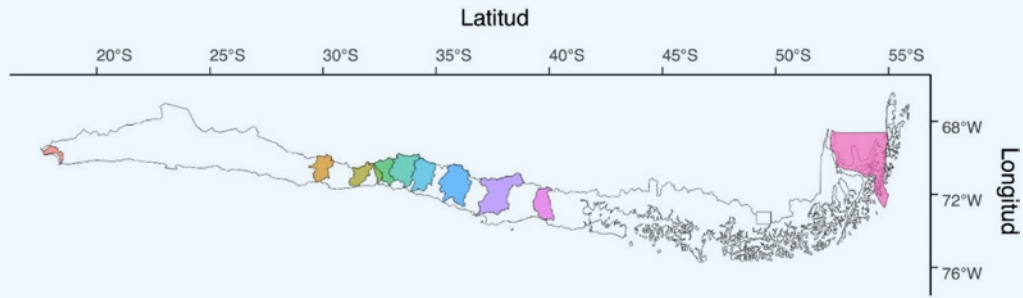


Figura 2.5. Ubicación de las cuencas seleccionadas. Fuente: Elaboración propia de la Comisión.

La **Figura 2.6** muestra las características hidrológicas de las cuencas escogidas en el periodo histórico. Se obtiene (DGA, 2022) que las cuencas de la macrozona norte (Norte Grande y Norte Chico) presentan errores de cierre del balance hídrico que pueden ser superiores al 20%, lo que se puede atribuir tanto a incertidumbres en las variables de precipitación y temperatura como a la información sobre los usos del recurso hídrico. En las cuencas de la zona centro al extremo austral del país dicho error es siempre inferior al 20% (DGA, 2022), debido principalmente a la mayor cantidad de estaciones disponibles que permiten una mejor estimación del producto CR2Met utilizado para la distribución espacial de las variables.

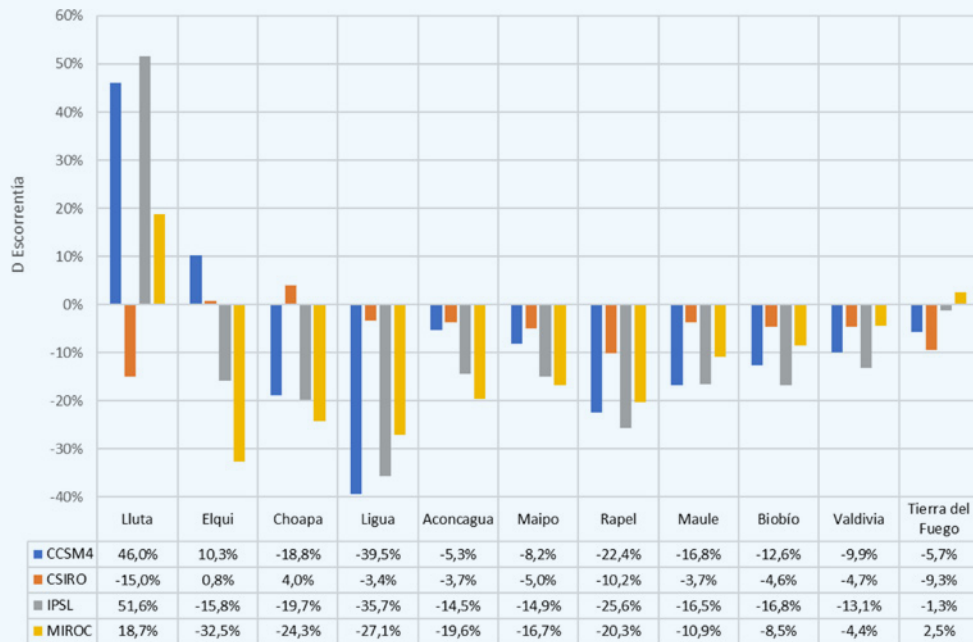


Figura 2.6. Escorrentía (barras azules), Evapotranspiración (barras naranjas) y Precipitación (Barras grises). Valores anuales (mm) promedios en periodo 1985-2015. Fuente Elaboración propia en base a DGA, 2022.

Las proyecciones de cambio determinadas en el proyecto de actualización del balance hídrico nacional (DGA, 2022) para el período 2030-2060, bajo el escenario RCP8.5, se muestran en las Figuras 2.7, 2.8 y 2.9, para la precipitación, evapotranspiración y escorrentía, respectivamente.

Se aprecia en la Figura 2.7 que los cambios porcentuales de precipitación proyectados por todos los GCM son a la baja, excepto el modelo CCSM4 en la cuenca del río Elqui y todos los GCM en Tierra del Fuego. Destaca también que el modelo CSIRO proyecte los menores cambios (inferiores a -5%), excepto en la cuenca del río Lluta. Sistemáticamente el modelo IPSL proyecta cambios porcentuales entre -10 y -15% entre Elqui y Valdivia. Los cambios porcentuales de precipitación que proyecta el modelo MIROC disminuyen desde -25% en la cuenca del río Elqui hasta menos de -5% en la cuenca del río Valdivia, y es el proyecta el mayor cambio porcentual en la cuenca de Tierra del Fuego.

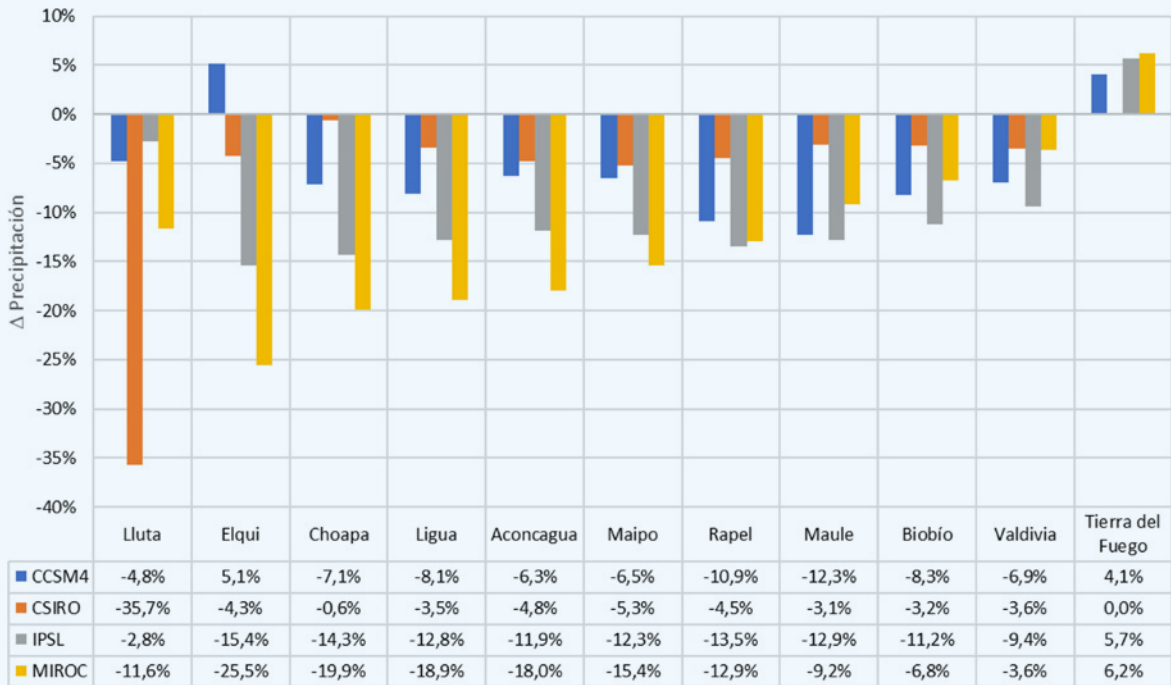


Figura 2.7. Cambio promedio de precipitación anual en el período 2030-2060 de los modelos CCSM4 (barras azules), CSIRO (barras naranjas), IPSL (Barras grises) y MIROC (barras amarillas). Respecto a periodo 1985-2015. Fuente elaboración propia de la Comisión en base a DGA, 2022.

Los cambios porcentuales en la evapotranspiración anual promedio en el período 2030-2060 que se presentan en la Figura 2.8 son diversos según la cuenca y modelo GCM. El modelo CCSM4 proyecta cambios positivos de esta variable no superiores a 7% en todas las cuencas seleccionadas. El modelo CSIRO proyecta el mayor cambio porcentual negativo (cercano al

28%) en la cuenca del río Lluta lo que concuerda con la disminución de la precipitación (cercana al 36%) que este modelo proyecta; en el resto de las cuencas no proyectan cambios significativos de esta variable (<5%).

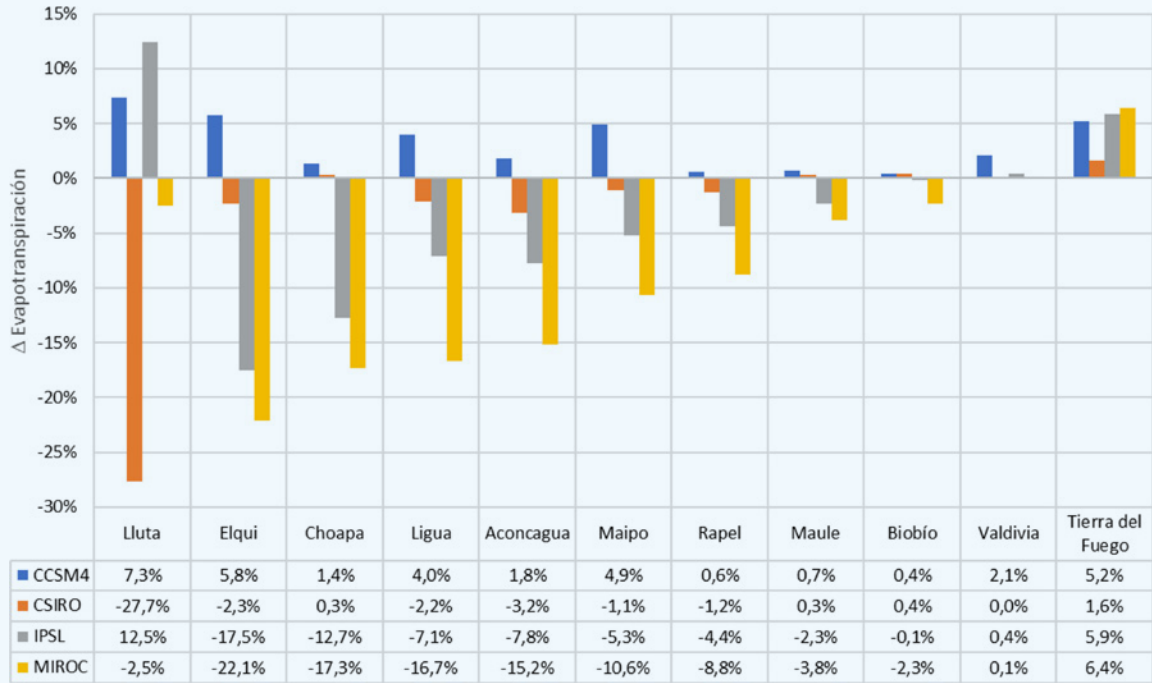


Figura 2.8. Cambio promedio de evapotranspiración anual en el período 2030-2060 de los modelos CCSM4 (barras azules), CSIRO (barras naranjas), IPSL (Barras grises) y MIROC (barras amarillas). Respecto a periodo 1985-2015. Fuente elaboración propia en base a DGA, 2022.

Con el modelo IPSL la evapotranspiración aumenta (en valores menores a 12,5%) en las cuencas de los ríos Lluta, Biobío y Valdivia y en Tierra del Fuego; en el resto de las cuencas desde el río Elqui al Maule esta variable decrece (desde -15% hasta -2,3%). El modelo MIROC proyecta decrecimiento de la evapotranspiración disminuyendo su impacto (-22,1% a -2,3%) desde las cuencas de los ríos Elqui al Biobío. En las cuencas del río Valdivia y Tierra del Fuego este modelo proyecta cambios positivos, de manera similar a los otros GCMs.

La **Figura 2.9** muestra los cambios de escorrentía media anual proyectados para el período 2030 a 2060. Se observa que, en general, la escorrentía proyectada con los GCM disminuye. Sin embargo, en la cuenca del río Lluta sólo el GCM CSIRO proyecta disminuciones del orden de 30% mientras que el resto de los modelos indican aumentos entre 19% y 52%. En la cuenca del río Elqui el modelo CCSM4 proyecta aumentos del 10% y el modelo CSIRO señala aumentos del 1% mientras que los modelos IPSL y MIROC indican disminuciones de la escorrentía entre 16% y 33%. En la cuenca del río Choapa solo el modelo CSIRO proyecta

aumentos de 4% mientras que los otros modelan señalan disminuciones entre 19 y 24%. Desde la cuenca del río La Ligua hasta la del río Valdivia, las proyecciones de los modelos muestran disminuciones entre 4% y 40% aproximadamente, destacándose el modelo CSIRO, que proyecta las menores reducciones. En Tierra del Fuego sólo el modelo MIROC indica aumentos de la escorrentía del orden de 2,5% mientras el resto de los GCM señalan disminuciones de hasta 10%, siendo más desfavorables las proyecciones del modelo CSIRO.

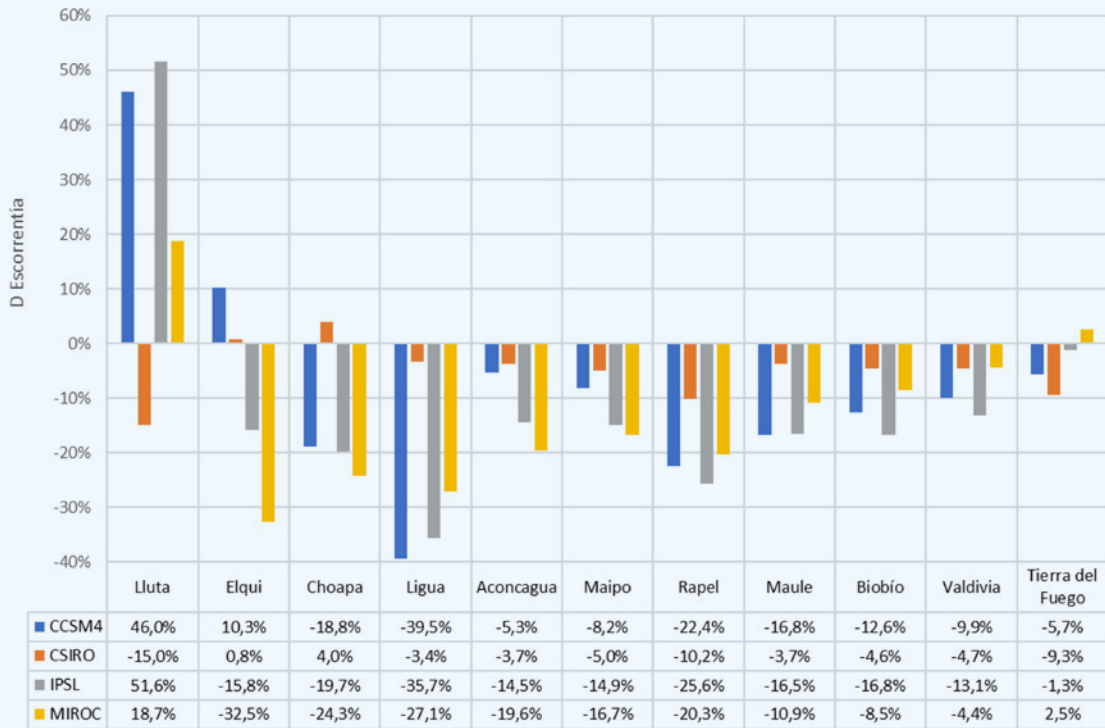


Figura 2.9. Cambio promedio de escorrentía anual en el período 2030-2060 de los modelos CCSM4 (barras azules), CSIRO (barras naranjas), IPSL (Barras grises) y MIROC (barras amarillas). Respecto a período 1985-2015. Fuente elaboración propia de la Comisión en base a DGA, 2022.

En la [Figura 2.10](#) se visualiza la distribución mensual de la escorrentía modelada en las cuencas seleccionadas en el período histórico 1985-2015 y la incertidumbre de las proyecciones para el período futuro 2030-2060. Se hace notar que los valores máximos y mínimos futuros en cada mes se han estimado usando los porcentajes de variación que cada modelo climático proyecta y el valor máximo y mínimo de variación se ha aplicado a la simulación del período histórico usando el producto CR2Met.



Figura 2.10. Escorrentía mensual en mm histórica (línea negra) y futura (zona sombreada) en las cuencas analizadas. Fuente elaboración propia de la Comisión en base a DGA, 2022.

Si bien existe una alta incertidumbre en el período enero a abril en la cuenca del río Lluta y prácticamente durante todo el año en la cuenca del río Elqui, donde la escorrentía puede aumentar o disminuir según los modelos climáticos, se aprecia, en el resto de las cuencas, una tendencia generalizada a la disminución de la escorrentía, especialmente en el período octubre a marzo. Esto se refleja más claramente en la [Tabla 2.1](#).

Tabla 2.1. Escorrentía estacional en las cuencas analizadas. Fuente elaboración propia de la Comisión en base a DGA, 2022.

Cuenca	Escorrentía (mm)					
	Abril- Septiembre			Octubre -Marzo		
	1985-2015	Máx 2030-2060	Mín 2030-2060	1985-2015	Máx 2030-2060	Mín 2030-2060
Lluta	4,4	9,1	5,7	20,6	31,7	11,5
Elqui	29,4	35,7	21,2	37,9	41,9	24,2
Choapa	48,2	55,1	34,8	43,8	41,3	31,4
Ligua	32,0	35,1	18,1	30,7	26,2	17,7
Aconcagua	103,1	106,2	83,6	139,0	127,1	110,7
Maipo	201,1	216,6	167,6	242,6	218,9	193,4
Rapel	262,7	273,3	196,4	238,0	179,3	160,1
Maule	517,5	544,2	416,8	342,2	296,9	262,8
Biobío	821,8	857,5	679,9	274,7	234,5	201,5
Valdivia	1215,2	1187,4	824,0	463,5	430,6	232,8
Tierra del Fuego	160,1	181,8	158,6	224,1	216,2	190,5

El análisis de la disponibilidad futura en otras cuencas de cabecera e intermedias en el país muestra resultados similares, tal como se aprecia en la [Figura 2.11](#) y [Tabla 2.2](#), donde nuevamente la mayor incertidumbre se proyecta en la cuenca de más al norte analizada, Huasco en Santa Juana, pero en el periodo abril-noviembre. Igualmente, en algunas cuencas, Mapocho en Los Almendros y Maipo en El Manzano, se observa que se proyecta una leve tendencia al aumento de la escorrentía en el periodo junio-septiembre.

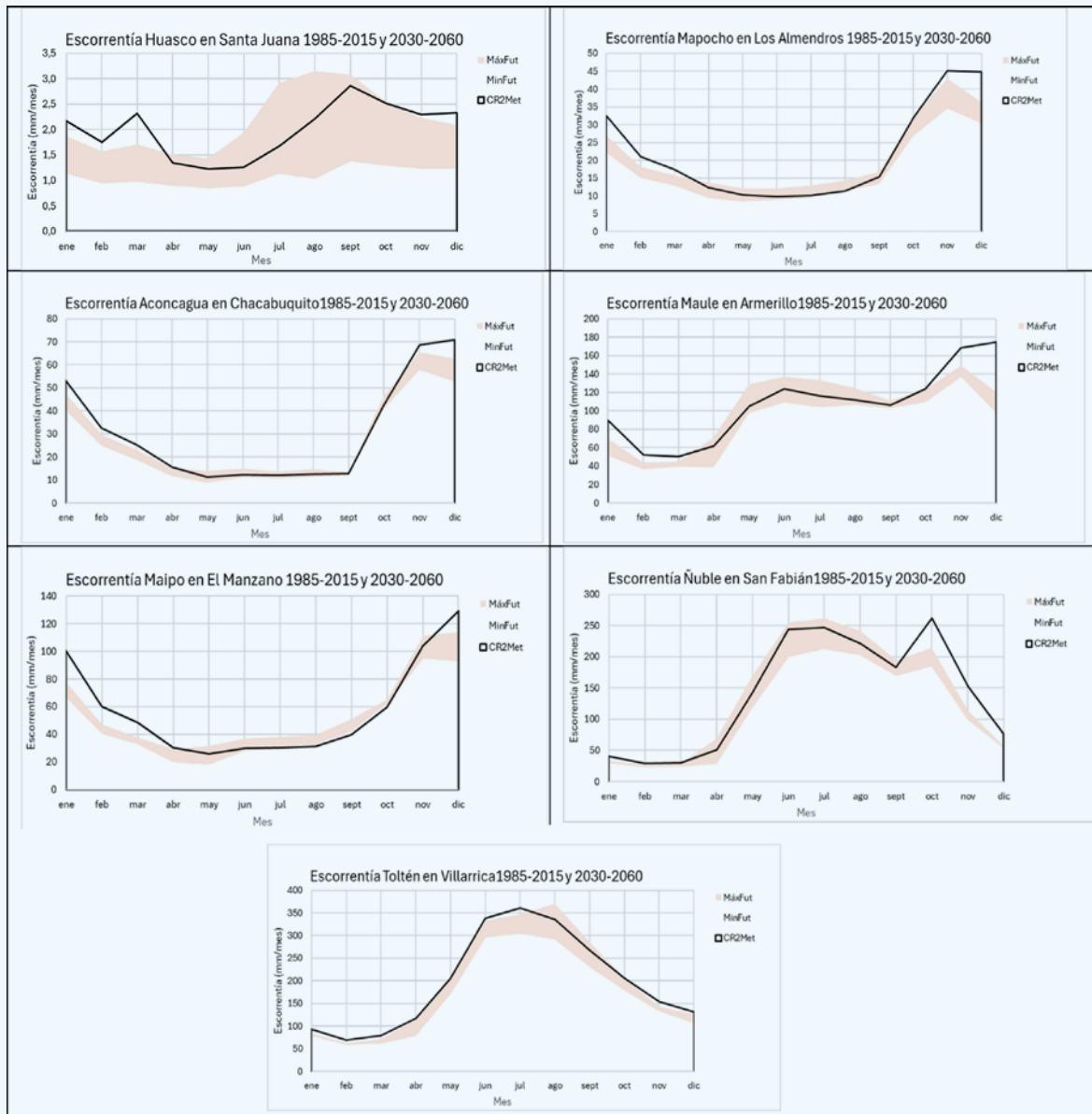


Figura 2.11. Escorrentía mensual en mm histórica (línea negra) y futura (zona sombreada) en otras cuencas analizadas. Fuente elaboración propia de la Comisión en base a DGA, 2022.

Tabla 2.2. Escorrentía estacional en otras cuencas analizadas. Fuente elaboración propia de la Comisión en base a DGA, 2022.

Cuenca	Escorrentía Abril-Sep (mm)			Escorrentía Oct- Marzo (mm)		
	1980-2015	2030-60 Máx	2030-60 Mín	1980-2015	2030-60 Máx.	2030-60 Mín.
Huasco en Santa Juana	10,6	14,0	6,2	13,4	12,0	6,8
Aconcagua en Chacabuquito	76,6	86,0	65,9	293,3	274,3	235,0
Maipo en El Manzano	186,8	225,4	170,5	501,9	452,0	389,9
Mapocho en Los Almendros	69,2	81,8	61,0	192,9	172,2	142,2
Maule en Armerillo	625,3	705,7	559,1	658,4	552,2	471,9
Ñuble en San Fabián	1087,4	1190,7	930,1	590,4	473,3	412,4
Toltén en Villarrica	1625,3	1662,8	1374,0	733,7	692,0	615,8

El aporte de la escorrentía glacial a la escorrentía total es una variable de interés para el análisis de la disponibilidad futura del recurso hídrico. De acuerdo con el estudio de actualización del balance hídrico nacional (DGA, 2022), en el período histórico 1985 a 2020, en algunas cuencas de la Región de Atacama (Pulido en Vertedero y Manflas en Vertedero) la contribución media anual es superior al 20% pudiendo alcanzar valores superiores al 55% en el mes de máxima contribución. Asimismo en cuencas de regiones como Coquimbo (Hurtado en Angostura de Pangue, Mostazal en Caren y Rapel en Junta), Valparaíso (Aconcagua en Chacabuquito), Metropolitana (Maipo en El Manzano, Estero Yerba Loca antes Junta San Francisco) y O'Higgins (Rio Cachapoal 5 km Aguas Abajo Junta Cortaderal) la contribución media anual es cercana o superior a 15% pudiendo alcanzar valores máximos superiores a 25% en las cuencas de la región de Coquimbo, supera el 40% en las cuencas de la región Metropolitana y 67% en la región de O'Higgins. En cuencas de las regiones de Aysén (río Ventisquero en Carretera Austral y Baker en Desagüe Lago Bertrand) y región de Magallanes (Paine en Parque Nacional 2 y río Grey antes Junta Serrano) la contribución glacial media anual es superior a 50%, alcanzando estos aportes valores superiores al 70% y 90% en el mes de máxima contribución.

Los cambios porcentuales de área glacial para el período 2030-2060 en la zona Norte y Central de Chile, reportados en el estudio de actualización del Balance Hídrico Nacional (DGA, 2022) indican reducciones entre 25% y 75% para las latitudes entre -25° y -30° y algunos aumentos para otras latitudes. Desde la banda latitudinal comprendida entre -34° y -45° , las reducciones de área proyectadas son del orden del 75%, disminuyendo hacia el sur a valores entre 25% y 50%. En la [Figura 2.12](#) se sintetiza el cambio porcentual de caudal glacial por banda latitudinal para el periodo 2030-2060 proyectado por los modelos climáticos CCSM4, CSIRO, IPSL y MIROC bajo el escenario de cambio climático RCP 8.5 (DGA, 2022).

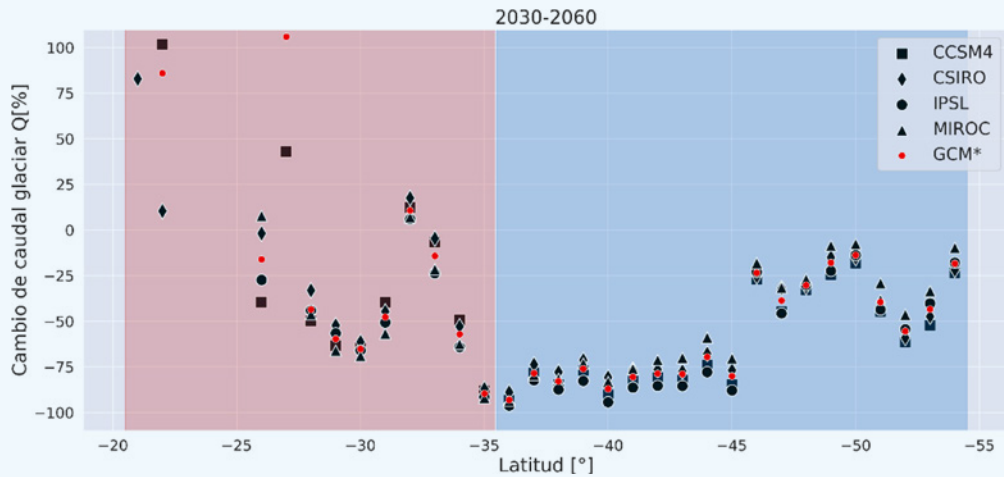


Figura 2.12. Cambio de caudal glacial por banda latitudinal para el periodo 2030-2060 proyectados por los modelos de cambio global bajo el escenario de cambio climático RCP 8.5. GCM* es valor promedio de los resultados modelados. El recuadro sombreado rosa representa las latitudes de la Zona Centro y Norte de Chile. El recuadro sombreado celeste representa las latitudes de la Zona Sur y Austral de Chile. Fuente (DGA, 2022).

Para complementar los valores anteriores se analiza, en particular, la evolución de la escorrentía glacial en el mes de febrero para la cuenca Maipo en El Manzano (latitud -33,7°). En la **Figura 2.13** se aprecia la clara tendencia a la disminución de los promedios móviles decadales proyectándose para la década de 2050 reducciones de la escorrentía glacial desde 27% (modelos CCSM4 y CSIRO) hasta 50% (modelos IPSL y MIROC) respecto a la década de 1990.

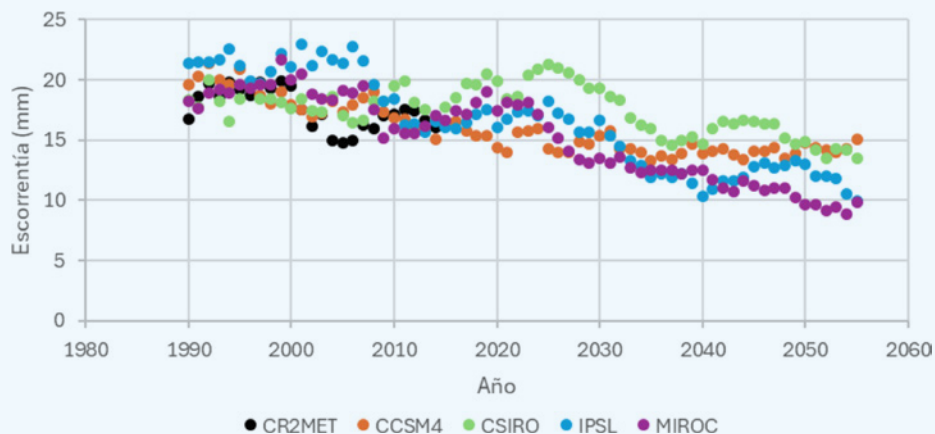


Figura 2.13. Evolución del promedio móvil decadal de la escorrentía glacial en el mes de febrero simulada para el periodo 1985-2060 (Maipo en El Manzano) a base de las forzantes climáticas de los modelos climáticos globales y simulada con el producto CR2MET para el periodo 1985-2020. Fuente elaboración propia de la Comisión en base a DGA, 2022.

CAPÍTULO 3

Impacto del cambio climático en el uso humano. Alternativas de adaptación

3.1. Introducción

Este análisis busca identificar los diferentes aspectos de la calidad y cantidad del agua de consumo humano, reconocida como “potable”, susceptibles de ser afectados negativamente por una evolución desfavorable debida a los efectos del Cambio Climático y su probable desarrollo futuro, con los efectos colaterales para su consumo, usos y restitución al medio ambiente.

Dada la particular geografía de Chile, pueden esperarse impactos diversos en los distintos sectores que comparten condiciones ambientales singulares. Igualmente es importante diferenciar entre las condiciones naturales de las fuentes de origen de las aguas, dadas básicamente por la geografía, clima y geología, y las alteraciones inducidas por el desarrollo antrópico: contaminación, diseminación y dispersión de agentes infecciosos inusuales, cambios en la disponibilidad y régimen en caudales y embalsamientos tanto naturales como artificiales, volúmenes efectivos disponibles y sus fluctuaciones, y esencialmente variaciones significativas de la temperatura ambiental. Como conclusión se han de detallar las medidas de adaptación posibles de ser acometidas desde la ingeniería para contrarrestar los riesgos de mayor trascendencia identificados.

3.2. Descripción de situación actual

Los efectos del Cambio Climático Global sobre la disponibilidad hídrica han sido abordados en el Capítulo 2 y en el Anexo I. Aquellos que afectan directamente en el consumo humano, y que en la actualidad ya están siendo constatados a nivel mundial se resumen en los siguientes tópicos:

- Aumento de eventos de crecida que generan desbordes e inundaciones en ríos.
- Sequías severas y persistentes, acompañadas de reducción de los caudales de estiajes.
- Aceleración del derretimiento de los hielos glaciares y polares, con flujos que aportan aumento de nivel de mares.
- Calentamiento global de las aguas oceánicas con elevación adicional de su nivel por dilatación térmica.
- Modificación de patrones de flujo de las corrientes oceánicas y su repercusión en el transporte global de calor.
- Reducción gradual de disponibilidad natural de agua dulce para consumo humano y riego.
- Migración de poblaciones desde las regiones más expuestas a escasez de aguas, o por su exceso, tanto por inundaciones ribereñas como sumergencia de costas marítimas en niveles crecientes de los mares.

En general las consecuencias de estos factores adversos para la disponibilidad de agua potable están dadas por la creciente disminución y, en casos extremos, el agotamiento de agua en las fuentes, el deterioro de su calidad potable, pérdida de suelos agrícolas, dispersión de las poblaciones así afectadas hacia territorios más favorables para obtener agua de bebida, riego, ganadería, alimentación y fuentes de trabajo; estas migraciones repercuten en la transferencia y aparición de pestes y plagas invasoras hacia otras regiones, todo lo cual es agravado por el aumento de temperatura y humedad a nuevos niveles. Esto amerita el análisis de los impactos posibles para la seguridad de abastecimiento de los usos domésticos en Chile y estrategias de adaptación.

3.3. Afectación según tipos de fuentes

Fuentes subterráneas. En 2022, 2023 y 2024¹ estas fuentes aportaron una producción media de 61,5 m³/s, 62,0 m³/s y 62,3 m³/s a los servicios urbanos concesionados (con 16,1; 16,2 y 16,4 millones de habitantes abastecidos) y la mayor parte de los 3,8 m³/s requeridos por los Servicios Sanitarios Rurales (del orden de 2,2 millones abastecidos). Puede agregarse un aporte marginal a los servicios particulares rurales y servicios turísticos e industriales con fuente propia. Conforman así el principal origen de suministro de agua para consumo humano, con un aporte del orden de 2.000 millones de m³ anuales. La regla de operación de las fuentes subterráneas corresponde a volúmenes de regulación multianual embalsados en el subsuelo, sujetos a ciclos de descarga y recarga en necesario equilibrio para mantener su

¹ SISS: Informes de Gestión 2022 a 2024.

funcionalidad. La fragilidad de estas fuentes está en la creciente insuficiencia en cantidad y calidad de su recarga respecto de una creciente extracción, lo que deprime en exceso su nivel freático, dejando inoperantes las captaciones más someras (norias, drenes, punteras) y sondajes sin posibilidad de mayor profundización hacia rellenos productivos. El Cambio Climático puede incidir disminuyendo la infiltración debido a las menores precipitaciones, acelerando el derretimiento de glaciares y mermando los caudales base de cursos superficiales en estiajes que proveen recarga natural permanente a los acuíferos, o por la tendencia mostrada por las tormentas de ser más espaciadas e intensas, propiciando un vaciamiento rápido de las cuencas y restando capacidad de recarga hacia los acuíferos desde los ríos en crecidas. Todo esto ha sido más patente en las cuencas de los ríos Elqui, Petorca, Ligua y Aconcagua. Además de esta afectación a la recarga natural, la infiltración desde áreas de riego, en muchas ocasiones componente importante de recarga, puede disminuir en la medida que se incrementa la eficiencia en su aplicación con riego más tecnificado, y con el efecto adverso de incorporar contaminación con fertilizantes de la agricultura y desechos orgánicos de la ganadería, a lo que se puede agregar la contaminación por sustancias no abatibles en el tratamiento convencional de las aguas residuales urbanas y rurales. Otra afectación relevante es el descenso de los niveles freáticos forzado por la sobreexplotación, que obliga a la captación desde los niveles más profundos, que suelen presentar concentraciones mayores de elementos adversos más densos (nitratos, sulfatos, arsénico, entre otros); esto es particularmente notorio en acuíferos del extremo norte que captan aguas fósiles, con mínima o nula recarga. Por cierto, los acuíferos también son drenados por otros sectores, antrópicos y naturales, demandantes del recurso, como la industria, minería, el agro, vegetación nativa y artificial, más flujos directos al mar desde acuíferos costeros.

Fuentes superficiales. Contribuyeron a la demanda doméstica en 2022, 2023 y 2024 con un caudal medio de 45,9 m³/s, 46,1 m³/s 47,7 m³/s para los servicios concesionados, más una proporción menor de los 3,8 m³/s estimados de demanda del sector rural organizado en servicios sanitarios rurales (SSR), y una fracción aún menor de aguas captadas directamente desde vertientes. Así, su participación es del orden de 1.500 millones de m³ anuales. Las fuentes de agua superficial utilizadas para captación de agua potable están representadas por ríos, lagos y lagunas, necesariamente con disponibilidad permanente, lo que descarta esteros con flujos esporádicos. El origen de estas aguas es ciertamente la precipitación directa incidente en las cuencas en forma sólida o líquida, más, indirectamente, afloramientos desde napas subterráneas. La fortaleza de estas fuentes es amenazada por el Cambio Climático en varios aspectos: el aumento de la temperatura global que induce mayor evaporación desde las superficies líquidas e incluso congeladas (sublimación), el retroceso de glaciares incluso hasta su desaparición en el caso de los más expuestos, la marcada tendencia a ocurrir ciclos de tormentas breves y más severas y sequías más prolongadas, la mayor potencia de las crecidas resultantes que inciden en socavación y arrastre de material que

alteran los cauces en su perfil transversal e incluso el cambio de sus ejes longitudinales, aumento de la contaminación difusa desde el entorno de cauces, lagos y lagunas, eventuales aluviones de efectos destructivos en la infraestructura de captaciones y conducciones, y que generan sobrecargas excesivas sobre los sistemas de potabilización. A estos efectos adversos directos sobre los cuerpos de agua se suman efectos indirectos importantes, como el incremento sostenido de temporadas de incendios forestales de gran magnitud e incontrolables, con generación masiva de CO₂ y pérdida de capacidad de su reabsorción, se alteran significativamente los suelos aportantes a las cuencas hidrográficas, incluso menoscabando sus regímenes pluviales.

Fuentes de aguas salobres. Desde tiempos antiguos se ha recurrido a las aguas salinas como último recurso ante escasez crítica del recurso, inicialmente por destilación mediante calor y recuperación por condensación de la evaporación resultante, pero en los tiempos modernos se ha obtenido grandes avances en la aplicación de procesos con membranas de microfiltración (MF), nanofiltración (NF), ultrafiltración (UF) y osmosis reversa o invertida (OI). El Cambio Climático, al expandir la superficie de zonas áridas del planeta, está favoreciendo estos desarrollos como el último recurso explotable con la más alta confiabilidad y ambientalmente tolerable en muchos países costeros, tanto para consumo humano como industrial, minero y agrario, e incluso en Chile en algunos Servicios Sanitarios con Rurales (SSR). Los efectos adversos están dados por el consumo elevado de energía en el proceso de desalinización y, dependiendo de la elevación sobre el nivel del mar, de bombeo, los que pueden ser paliados ambientalmente con generación eléctrica fotovoltaica y eólica. Otras implicancias derivadas del Cambio Climático son las dificultades ambientales en la selección de emplazamientos para la infraestructura requerida, la solución eficiente de la disposición inocua de los residuos salinos sobrecargados de productos de rechazo, y el riesgo eventual de elevación del nivel mar.

Otras fuentes. Cuando la necesidad de agua se hace imperiosa, se ha intentado obtenerla de diversas maneras. Un caso estudiado y aplicado experimentalmente en Chile han sido los sistemas de mallas atrapanieblas, con resultados discretos (desde 0,2 a 5 l/m²/día), y por tanto solo aptos para consumos mínimos y donde la niebla es de alta presencia. Otra opción es la recolección de las aguas lluvias en tiempo invernal en techumbres de casas y galpones para su almacenamiento en cisternas subterráneas, para su rescate en el estío. También hace ya años se estudió por la Rand Corporation la captura de icebergs desprendidos del territorio antártico, con remolque marítimo y anclaje en lugar de destino para su deshielo. Una estrategia similar consideró la intervención para acelerar el derretimiento de los glaciares de alta montaña, lo que por cierto hoy se desecha. Una última y reciente experiencia ha sido aplicada en España, donde se cuenta con 327 plantas desalinizadoras, de las cuales no todas operan a plena capacidad; ante la aguda escasez en algunas zonas (Barcelona, por

ejemplo), se ha recurrido al transporte marítimo de agua desalinizada desde lugares con plantas con margen para aportar sus excedentes hacia los puntos deficitarios. Por último, está el abastecimiento mediante camiones aljibe, que por su amplio uso en Chile amerita su posterior análisis separado. Puede concluirse que estas diversas fuentes alternativas son en general tentativas, de bajos rendimientos, con costos elevados (el rango típico de precios observados en Chile está entre \$15.000 y \$35.000 pesos chilenos por m³), incluso con reparos respecto de la calidad potable, y no resuelven situaciones de mayor relevancia.

Dado que los suministros de agua potable a los servicios urbanos acogidos a la ley sanitaria (DFL 382) son usualmente la mayor demanda del recurso hídrico requerido por este sector, se resumen los valores de las capacidades nominales de derechos, captación y procesamiento en L/s desde las distintas fuentes. Hay un marginal aumento de aporte de aguas desalinizadas respecto de las continentales, pero con múltiples proyectos en desarrollo (Tabla 3.1.).

Tabla 3.1. Origen del agua potable disponible para servicios urbanos concesionados y sus capacidades. Fuente: Informes de Gestión SISS, años 2022, 2023 y 2024.

Fuentes de producción	Subterránea	Superficial	Desalinizada	Totales
Capacidad en L/s - 2022	61.484	45.867	1.602	108.953
Porcentajes - 2022	56,43%	42,10%	1,47%	100%
Capacidad en L/s - 2023	61.984	46.134	1.602	109.720
Porcentajes - 2023	56,49%	42,05%	1,46%	100%
Capacidad en L/s - 2024	62.352	477.06	1.606	111.660
Porcentajes - 2024	56,3%	42,2%	1,5%	100%

3.4. Déficits y situaciones críticas

Déficits de suministro de agua potable. Hay distintas situaciones causantes de déficits, con diferentes niveles de gravedad definidos por su intensidad y su duración.

Situaciones transitorias. Comprenden interrupciones de suministro desde algunas horas y hasta 2 o 3 días, tiempo en que se puede paliar la emergencia gracias a avisos previos a la contingencia cuando esta es programada, dando tiempo para almacenamientos y medidas supletorias del déficit mediante almacenamiento y distribución mediante repartos puntuales; un recurso adicional es la restricción del consumo, con reducción de presiones e incluso

cortes sectoriales alternados. Se intenta asegurar una disponibilidad del orden de 50 litros por habitante por día como mínimo. Pueden tener origen en intervenciones programadas de la infraestructura de servicio o imprevistos que afecten brevemente a elementos críticos del sistema productivo o daño de la calidad del agua en las fuentes, fallas de suministro eléctrico que superen la capacidad de autogeneración, o anticipación de eventos climáticos extremos que perturban la captación y el tratamiento previo de agua potable. Con ocasión de los primeros estudios tarifarios se propuso a la SISS la conveniencia de incorporar en la empresa modelo una reserva estratégica de agua cruda almacenada para sobrellevar con mayor autonomía este tipo de contingencias, ya aplicado con buen éxito en varios sistemas, con embalsamientos de agua cruda y sondajes suplementarios.

Situaciones graves. Corresponden a afectaciones infrecuentes de más de tres días y hasta semanas de duración en áreas de servicio extensas, y que exceden la capacidad de respuesta oportuna para su remediación, requiriendo recursos extraordinarios. Se originan en trastornos geológicos y naturales importantes (erupciones volcánicas, terremotos, aluviones catastróficos, inundaciones que inhabiliten seriamente la infraestructura productiva), colapso funcional de represas por sequías como Lautaro, Recoleta, Paloma, Cogotí, Peñuelas grandes incendios, episodios inabordables de contaminación de fuentes, intrusión salina de acuíferos, terrorismo y conflictos bélicos. La resolución oportuna de estas situaciones requiere soportes técnicos y financieros extraordinarios no siempre disponibles, pudiendo ser necesario el apoyo desde otras regiones no afectadas, e incluso desde países colaborantes e instituciones de apoyo internacional.

Situaciones críticas. Se producen cuando los sistemas de abastecimiento en operación enfrentan pérdidas irremediabiles en alguno de sus componentes, lo que obliga a cambios radicales y la adopción de soluciones de reemplazo, demorando más que lo tolerable para la salud de una comunidad. Su ocurrencia es usual en grandes terremotos de tipo cataclismo (Chillán en 1939, Valdivia en 1960), erupciones volcánicas con flujos laháricos (Chaitén en 2008, Pompeya año 79), avalanchas y aluviones que arrasan localidades (Antofagasta 1991, Chañaral y Llanta, Copiapó, 2015), y pérdidas irreversibles en la infraestructura de agua potable, ya sea por agotamiento y extinción de glaciares o por pérdida de acuíferos costeros por intrusión salina debida a su sobreexplotación o el ascenso progresivo del nivel mar. En tales circunstancias se ha de evacuar y reubicar la población afectada hacia lugares que aseguren su subsistencia en forma permanente.

3.5. Población en zonas potencialmente afectadas por cambio climático

En resumen, la población de Chile, según la proyección del INE basada en Censos desde 1982 a 2017, indica 21.626.079 habitantes al año 2050, y su composición extrapolada de los datos de 2022 de la SISS para población urbana y los sistemas sanitarios rurales SSR indicaría (ver sustento y detalles de esta hipótesis en Anexo III.1):

- -17.581.305 habitantes urbanos en Territorios Operacionales bajo concesiones sanitarias, sobre un total de 18.981.210.
- -2.644.819 habitantes en zonas rurales (se supone el 100% con servicio, situación por ahora deseable).

El análisis de la población potencialmente afectada por la evolución futura del Cambio Climático enfrenta diversas incertidumbres, derivadas de las incertezas de mediano y largo plazo en la proyección de la población por sus tendencias diferentes según la variada distribución geográfica de norte a sur y emplazamientos en costa, valles y montaña; de hecho, la propia forma de evolución de este Cambio puede tener incidencia en el poblamiento si incentiva migraciones desde lo rural a lo urbano (o vice versa). Se debe agregar que los patrones esperables de consumo de agua serán influidos por los costos de suministro, probablemente crecientes si hay escasez hídrica y la misma disponibilidad en fuentes, lo que podría contrarrestarse si se avanzara en el grado de eficiencia que puedan obtenerse con políticas de reducción del agua no contabilizada (lo que se analiza más adelante). En un documento complementario de este análisis se ha evaluado² una probable evolución de la población de Chile hacia 2050, que por cierto sería la población potencialmente afectada por el Cambio Climático, lo que posibilita la estimación de sus demandas distribuidas de norte a sur. Los cuadros siguientes resumen las conclusiones obtenidas sobre los caudales esperables al 2050 en L/s discretizados por lo rural y lo urbano, en cada región de la división administrativa, y totales agrupados en macrozonas homogéneas en su exposición a ese Cambio: Norte, Centro, Sur y Austral. Se puede considerar que estos caudales tengan una mayor probabilidad de estar más bien sobreestimados que subestimados, atendido a:

- La natalidad y tasa de crecimiento poblacional sostenidamente decrecientes.
- La tendencia decreciente de la dotación de consumo de agua potable.
- Alza sostenida de tarifas de agua potable y alcantarillado.
- La disminución de productividad en algunas fuentes de agua potable.
- Las demandas crecientes de otros usuarios del recurso hídrico.
- La necesaria reducción del excesivo nivel actual de agua no contabilizada en torno de 32%.

² Ver Anexo 3.1: Demanda para Consumo de Agua Potable.

Como contraparte pueden mencionarse:

- La posible y necesaria incorporación y desarrollo de nuevas fuentes de agua potable.
- La disposición establecida para priorizar el consumo humano sobre las otras demandas de agua (Tablas 3.2, 3.3 y 3.4).

Tabla 3.2. Estimación de demandas de agua potable (L/s) al 2050 en Zonas Urbanas en cuatro zonas geográficamente similares. Fuente: Elaboración propia.

Zona Norte	Arica/Par. Tarapacá	Antofagasta	Atacama	Coquimbo		Total	%
		1.422	1.512	757	1.872		5.563
Zona Centro	Valparaíso	Metropolitana	O'Higgins	Maule	Ñuble	Total	%
	5.972	28.305	2.786	2.845	1.303	41.211	70,7
Zona Sur	Biobío	La Araucanía	Los Ríos (parcial)	Los Lagos Los Ríos (parcial)		Total	%
	5.596	1.882	506	2.615		10.599	18,2
Zona Austral	Aysén	Magallanes Antártica	Dispersos			Total	%
	182	366	394			942	1,6
País	Demandas Totales Por Regiones y Zonas Características, en L/s					58.315	100,0

Tabla 3.3. Estimación de demandas de agua potable (L/s) al 2050 en Zonas Rurales en cuatro zonas geográficamente similares. Fuente: Elaboración propia.

Zona Norte	Arica/ Par.	Tarapacá	Antofagasta	Atacama	Coquimbo	Total	%
		29,3	21,1	28,9	35,5	291,1	405,9
Zona Centro	Valparaíso	Metropolitana	O'Higgins	Maule	Ñuble	Total	%
	369,1	354,7	595	607,6	271	2.197,4	57,9%
Zona Sur	Biobío	La Araucanía	Los Ríos	Los Lagos/Los Ríos		Total	%
	242,1	340,1	203,4	354,3		1.139,9	30,0%
Zona Austral	Aysén		Magallanes Antártica			Total	%
	47,4		5,5			52,9	1,4%
País	Demandas Totales por Regiones y Zonas Características, en L/s					3.796,1	100,0%

Tabla 3.4. Resumen de demandas de agua potable urbana (TT.OO.) y rural (SSR), en L/s. Fuente: Elaboración propia.

Zona	En Territorios Operacionales (TT.OO.)	En SSR	Total	%
Norte	5.563	405,9	5.968,9	9,6%
Centro	41.211	2.197,4	43.408,4	69,9%
Sur	10.599	1.139,9	11.738,9	18,9%
Austral	942	52,9	994,9	1,6%
País	58.315	3.796,1	62.111,1	100,0%

3.6. Análisis de políticas relativas a asegurar el uso humano urbano y rural en escenario con cambio climático

Eficiencia en el suministro. Los Informes de Gestión del Sector Sanitario de la SISS señalan porcentajes de Agua No Facturada (ANF) de 33,0% en 2021, de 33,4% en 2022, de 33,0% en 2023, y de 32,2 en 2024, con extremos por concesionarios máximo en 2023 de 48.6% (SMAPA) y mínimo de 6,5% (Aguas Santiago Poniente); este nivel global superior a 30% es persistente desde larga data, sin mejoras significativas, y denota un derroche general, con importante volumen anual para dos de las mayores empresas nacionales, SMAPA y Grupo Aguas, que producen sobre 1.200 Hm³/año, y exceden del 30% de ANF. Caben las siguientes apreciaciones:

- Las ANF informadas por la SISS comprenden una diversidad de componentes disímiles, que incluyen usos operacionales no siempre medibles (lavado de redes y estanques), robos y sustracciones, aportes gratuitos, usos en combate de incendios, evaporación desde embalses, y otros; su análisis es abordado en la [Tabla 3.6](#) más adelante
- Se verifica que es factible alcanzar niveles de ANF inferiores al 10% en Chile, lo que debiese ser el patrón indicador de la calidad de servicio y ser benchmark instalado en los estudios tarifarios.
- La tarificación de las empresas sanitarias aplica solamente 15% reconocible como ANF y justificable para cobro, pasando a incobrable todo exceso sobre ese valor; en Chile hay empresas que operan bajo 10%.
- El 15% indicado pudo ser apropiado en sus inicios, pero no ha sido incentivo suficiente para obtener mejoras reales en la eficiencia de los recursos financieros y de uso responsable del recurso hídrico.
- Debe entenderse que existen otras formas de ingreso que compensan ese costo no menor en la forma de subsidios cruzados.
- Puede estimarse que una fuente de financiamiento es el recurso de incorporar como costo la rotura y reposición ficticias de pavimentos cada 5 años en la empresa modelo

para la instalación de redes públicas, cuando la lógica señala que la infraestructura de una empresa sanitaria modelo no puede ni debe ser posterior a la ejecución de pavimentos.

- Puede también considerarse que la reposición de cañerías de AP obsoletas al término de su vida útil, la que sí es considerada en tarifas, puede ser diferida bajo el criterio de que, mientras no haya falla, no es necesaria; el promedio nacional de reposición del parque instalado en 2023 ha sido de 0,49%, y 0,44% en 2024, con lo que se requeriría del orden de 50 años para renovar solo un 21,4% de la red, y 75 años para la renovación del 30,5%.
- En las empresas sanitarias hay una alta correlación entre nivel de ANF y porcentaje de cañerías de asbesto cemento (A/C) en red en 2023, aunque con diferencias entre las cuatro de mayor demanda hídrica; se ha de resaltar que un porcentaje de las cañerías más antiguas tiene asbesto en su composición, lo que hoy es objetable por razones de salud, y por su incidencia en ANF (Tabla 3.5).

Tabla 3.5. Relación entre ANF y proporción de redes de A/C. Fuente: SISS y elaboración propia.

Empresa	ESVAL	AA. ANDINAS	SMAPA	ESSBIO	Todas País
% Red A/Cemento	32,0%	51,6%	56,60%	23,80%	35,10%
Nivel% de ANF	37,20%	32,20%	48,60%	34,00%	33,00%
Relación (A/C) / ANF	0,86	1,60	1,16	0,70	1,06

- Ante escasez, la demanda de agua potable tiene el privilegio de surtir prioritariamente sobre los demás demandantes, lo que debiese tener como contrapartida el no diferir las inversiones necesarias para optimizar la eficiencia hídrica.
- Los aspectos señalados pueden explicar la persistencia de la alta tasa de ANF, que por cierto es, de un modo u otro, soportada finalmente por los clientes y restantes demandantes del recurso hídrico.

Control de pérdidas en los sistemas de agua potable. Hay abundante información sobre técnicas de reducción de pérdidas tanto correspondientes a usos operativos propios, más ANF e incobrables, por lo que se reseñan aquí las estrategias más relevantes ya indicadas en 2006 por el Banco Mundial, y que han sido en general adoptadas por varios países avanzados como estándares de calidad de servicio. En síntesis, se ha de lidiar con pérdidas visibles e invisibles, en que las primeras son evidentes y pueden ser detectadas y reparadas con prontitud, mientras que las segundas pueden ser inadvertidas durante largo tiempo y afectar severamente la funcionalidad

La primera acción de una estrategia de control de pérdidas es establecer la línea base de la condición operativa de cada sistema respecto del ANF, la que se puede resumir en una tabla de uso internacional, referida por la IWA y el Banco Mundial. A partir de este análisis inicial, cabe encontrarse con una situación extrema de tal complejidad que no tiene solución factible, o recurrir a aplicar los recursos tecnológicos avanzados hoy disponibles para reducir la cifra de ANF, normalmente en etapas y por sectores. El criterio para discernir su progreso es comparar el costo marginal de la unidad de consumo economizable (m³) y su costo marginal de producción. Para establecer esta línea base es necesario que el sistema cuente con un catastro fiable y actualizado de su infraestructura productiva y de distribución, incluyendo registro de caudales producidos y facturados, catastro de redes de distribución (longitudes, diámetros, antigüedad y materiales de red, historial de fallas y su frecuencia espacial y temporal, parque de macro y micromedidores), modelación hidráulica de la operación y de presiones de servicio de redes. Si bien es usual reportar el ANF como la proporción entre ANF y volumen producido total, es más funcional tener índices de medición específicos que permiten una mejor evaluación entre sistemas diferentes (Tabla 3.6):

- Índice de Pérdidas Comerciales (%): Pérdidas Comerciales/Consumos Autorizados.
- Índice de Pérdidas Físicas (m³/día/km): Pérdidas Físicas diarias /Longitud de redes.
- Índice de Pérdidas Físicas (L/día/conexión): Pérdidas Físicas diarias /Número de conexiones.

Tabla 3.6. Diagrama de destinos del agua producida. Fuente: IWA, Banco Mundial.

Volumen de agua producido	Consumos autorizados	Consumos autorizados facturados	Consumos medidos facturados	Agua facturada
			Consumos no medidos facturados	
		Consumos autorizados no facturados	Consumos medidos no facturados	
			Consumos no medidos no facturados	
	Pérdidas de agua	Perdidas comerciales	Consumos no autorizados	Agua no facturada (ANF)
			Errores de medida y proceso de datos	
Perdidas físicas		Fugas en conducciones y distribución		
		Fugas en conexiones domiciliarias antes de medidor		

La línea base deberá así cuantificar el volumen total de ANF, establecer sus distintos orígenes, las causas de su ocurrencia, evaluar acciones posibles de mejoría de los índices y apuntar a programar soluciones que sean permanentes.

Para abordar la reducción de ANF comercial es procedente optimizar el parque de macro y micromedidores de caudal y consumo, reemplazando unidades antiguas por equipos de última generación, idealmente de lectura remota y en línea, priorizando los de mayores consumos.

Complementariamente, se ha de pesquisar el robo de agua con conexiones fraudulentas, intervenciones ilícitas en medidores, y posible corrupción de personal a cargo de procesamientos, en especial en los grandes consumos.

En cuanto a la reducción de las pérdidas físicas de ANF, usualmente las más significativas, se deben abordar cuatro tipos de acciones correctivas:

- Control activo de fugas en las redes, posible solo mediante auditoría detallada de los flujos y presiones, idealmente en forma remota y en línea; dado que el diseño de redes de distribución normalmente forma cuarteles de cañerías del orden de 2 kilómetros de extensión posibles de ser aisladas para cortes eventuales por faenas en su interior, es apropiado considerar una fragmentación en unidades de control que abarquen, por ejemplo, cinco cuarteles o 10 kilómetros de red, con ingreso de agua único y provisto de mediciones de flujo y presión representativa permanentes. Como ejemplo, dado que en 2023 se tuvo un promedio nacional de 33% de ANF, dotación de consumo de 16,8 m³/cliente/día, y 7 m de red/ cliente, en 10 km se tendría $10.000/7 \times 16,8 = 24.000$ m³/mes de consumo y 31.170 m³/mes de producción, con 7.170 m³/mes y 86.000 m³/año de ANF.
- Control activo de frecuencia de roturas de cañerías de red, atendiendo a materiales y vida útil remanente, y activando la reposición integral y programada de tramos recurrentes en fallas; el beneficio de estas acciones es claramente medible en la auditoría de ANF, y apunta a disminuir la necesidad de acciones correctivas de emergencia.
- Optimización del tiempo de respuesta para hacer reparaciones en redes en caso de detección de fallas, con personal de buena calificación y stock de equipamiento y materiales oportunamente disponibles.
- Dada la linealidad entre las presiones en red y ANF física, es apropiado el manejo en forma automatizada de las presiones de alimentación a lugares que pueden comprender sectores extensos con características homogéneas, regulando con válvulas reductoras de presión que controlen en su alimentación la presión en función de las consignas de presiones adecuadas; se podrá así actuar disminuyendo la presión en horas de baja demanda y responder ante variaciones inusuales de la presión, como sería el caso de caídas de presión ante roturas importantes de cañerías (reducción de presión), o aumento de caudal (y su registro) por accionamiento de grifos en caso de incendios o usos indebidos.

Debe tenerse presente que la tecnología hoy disponible ofrece el apoyo de instrumentación de bajo costo para la medición en línea de caudales y presiones, el accionamiento remoto de equipos de control, y su reporte a centrales de datos del estado de los sistemas, posibilitando con Inteligencia Artificial la respuesta oportuna y adecuada ante sus variaciones. Estas aplicaciones pueden ser importantes en estas tareas, sin requerir apoyo humano directo, perfeccionables y auditables de manera expedita.

El manejo analítico de los distintos factores que determinan los orígenes del ANF permite diseñar las estrategias de acción para optimizar su reducción en términos económicamente convenientes; se hace notar que estas iniciativas pueden ser abordadas directamente por los prestadores del servicio de agua potable, o ser contratados mediante tercerización, usualmente concentrando los esfuerzos en las zonas en función de su mayor nivel de ANF. Se presentan diversas modalidades de contratación, básicamente apuntando a tener solo diagnósticos y planeamiento de las estrategias a aplicar, o a entregar también la ejecución de las obras conducentes a las metas; también es posible contratar acciones con metas de reducción de ANF, o acordar incentivos en función de los resultados obtenidos a partir de una base mínima.

Lo que hasta aquí se plantea es claramente apropiado a los sistemas urbanos, pero, salvo algunos aspectos, poco factible para los sistemas rurales: su amplia dispersión geográfica, tamaños muy diversos, y condiciones ambientales muy variadas, hacen impracticables las soluciones generales de mejoría en eficiencia productiva. Sin embargo, la reciente formulación de los Servicios Sanitarios Rurales ha establecido la regulación tarifaria de estos servicios por parte de la SISS, lo que abre la oportunidad de que mediante este mecanismo se oriente el desarrollo de los sistemas productivos con metas de optimización de sus eficiencias en uso de recursos hídricos, energéticos y administrativos, en lo que les pueda ser aplicable. Se presenta aquí la oportunidad de esta gestión de optimización sea convenida por los SSR con terceras partes, las que podrían actuar con la SISS con altos grados de especialización no siempre alcanzables por sus administraciones.

Eficiencia en el consumo. Es también relevante la búsqueda de la eficiencia por parte de los usuarios finales del agua potable, tanto urbanos como rurales, y domésticos e industriales; en primer término, son aplicables las siguientes estrategias para reducción del consumo en hogares urbanos y rurales, y establecimientos institucionales como colegios (especialmente en la primera edad), regimientos, universidades, e industrias. Es importante destacar que, si bien los ahorros que se logran con las tecnologías o cambios de conducta propuestos pueden parecer menores, la suma de millones de usuarios implica ahorros significativos para el sistema.

- i, Duchas. Siendo el baño de ducha idealmente mejor que uno de tina, su consumo individual del orden del orden de 10 a 12 l/min hace apropiado limitar su duración a no más de 3 a 5 minutos. Sin embargo, esto puede ser excesivo en casos de escasez,

y se puede lograr mejores resultados al insertar un diafragma con perforación de pequeño diámetro en el cabezal de la ducha, limitando el flujo a voluntad, cerrar el flujo durante la etapa de enjabonado, y abrir solo para enjuague. Existen dispositivos de mayor costo, hidráulicos y electrónicos, que pueden programar ciclos de cierre y apertura con igual finalidad.

- ii. Chorro. Debe evitarse el uso a chorro continuo para lavado de dientes, de manos, afeitado, lavado de loza y lavado de vehículos; el lavado de frutas y verduras puede hacerse en recipientes, lo que permite su descarga posterior a riego.
- iii. Aireadores. La instalación de aireadores de chorros mejora la capacidad de mojado en menos tiempo en duchas y llaves en general.
- iv. Lavavajillas y lavadoras de ropa deben ser ocupados a plena carga.
 - v. Inodoros. Deben ser de descarga inferior a 6 litros por ciclo, idealmente de doble descarga; es adecuado complementarlos con un papelero para evitar descargar basuras evitables, más la colocación de botellas llenas de agua en el estanque.
- vi. Aguas grises. La Ley 21.075 y su reglamento han regulado la recolección, reutilización y disposición de las aguas grises, lo que es particularmente apropiada en zonas áridas; la recolección separada de estas aguas libres de contenido fecal y aptas para diversos reúsos según tratamientos simplificados para cada caso, permite tanto disminuir la demanda de agua fresca como reducir la carga de recolección y tratamiento de las plantas de tratamiento centralizadas. Su procesamiento mediante membranas adecuadas es recomendable.
- vii. Baño seco con descarga separada para sólidos con disposición en recipiente desechable y los líquidos recuperables como parte de aguas grises.
- viii. Jardines con plantas, arbustos y árboles de bajo consumo de agua, cambio de césped por xerofitas o pasto artificial, riego automatizado sin mangueras y de aplicación nocturna, riego por goteo de árboles.
- ix. Recolección de aguas lluvia. Dependiendo de la estacionalidad y cuantía de la pluviosidad, es posible captar, filtrar y almacenar en sentinas apropiadas o pozas las aguas incidentes en techumbres de casas, estacionamientos, establos, galpones y bodegas, posibilitando su empleo en período estival para ganado, riego de huertos, lavado, entre otros, con economía de demanda de agua fresca.
- x. Registro de lecturas ocasionales del medidor domiciliario al anochecer y en la mañana para detectar fugas invisibles en red interior.
- xi. Obligación de urinarios en baños masculinos de oficinas y otras instalaciones públicas, como requisito en permisos de construcción o similares.

Nuevas fuentes para enfrentar el cambio climático. Un reciente informe de World Resources Institute (WRI)³ ubica a Chile entre las 37 naciones que ya ocupan el 80% de sus actuales recursos hídricos, que por cierto han sido los más accesibles, y por tanto el 20% restante será el más expuesto a los efectos adversos del Cambio Climático. Esto ya está siendo experimentado en formas más marcadas a lo menos en las Zona Norte y Centro de Chile, en las que ese margen de 20% tiene la más alta probabilidad de agotarse por el deshielo acelerado de glaciares, la mayor ocurrencia de sequías prolongadas y lluvias intensas irregulares que drenan cuencas de corta extensión y gran desnivel, que desaguan prontamente al mar.

Dada la necesidad perentoria de asegurar a todo evento la provisión de agua potable para el consumo humano, (del orden de 10 a 12% de toda la demanda hídrica), y la no menor necesidad de proveer a las fuentes alimentarias e industriales también dependientes de agua, es imprescindible desarrollar nuevas fuentes de suministro que aporten los mínimos de sustentación para salud y actividad económica. Estas eventualidades han sido recurrentes en nuestra historia, y al ser de menor escala fueron abordadas, o intentadas, con soluciones de limitados alcances: sembradío de nubes, atrapanieblas, incremento artificial (hoy impensable) de producción desde glaciares, captura y transporte marítimo de témpanos polares, transporte en camiones aljibe o extensos acueductos de sur a norte desde lugares presuntamente menos afectados.

Se debe establecer en consecuencia que las soluciones de nuevas fuentes deben estar exentas de limitaciones previsibles, ser resilientes a los distintos embates esperables del Cambio Climático y eventos naturales catastróficos, de costos abordables, con calidad de agua adecuada a cada uso final, y factibilidad ambiental, técnica y económica. Así, se ha de evaluar para posibles nuevas fuentes su seguridad en cuanto a su cuantía, persistencia en el tiempo, calidad fisicoquímica apta para ser acondicionada a sus usos finales, y su factibilidad geográfica de accesibilidad; son opciones promisorias de nuevas fuentes para Chile la desalinización de agua salada, el reúso de aguas residuales, (siempre que estén tratadas conforme al DS 90/2000 para aguas marinas y continentales superficiales), y la infiltración hacia acuíferos deprimidos (siempre que cumplan el DS 46/2002), lo que se aborda en el Anexo 3.2. Cada reúso tiene sus propias exigencias de tratamiento.

³ Water Stress by Country. WRI, <https://www.wri.org/data/water-stress-country>

CAPÍTULO 4

Impacto del cambio climático en el uso agrícola. Alternativas de adaptación

4.1. Introducción

La producción agrícola se lleva a cabo a través de la selección de cultivos que se adapten a una región específica, de tal manera, que la agricultura es una bio-industria dependiente del clima y con importantes características regionales. Estas características se refieren a los ecosistemas, los cuales son determinados básicamente por el clima de la región en cuestión. Algunas de estas peculiaridades regionales han podido ser atenuadas con el uso del riego y la manipulación de recursos genéticos.

El cambio climático irrumpe y desordena el ecosistema agrícola, resultando en una alteración de los elementos climáticos que afectan a la agricultura, tales como la temperatura, la precipitación, la intensidad de la radiación solar, la concentración de CO₂, la humedad relativa y el viento.

Todos los factores antes enumerados influyen en la Evapotranspiración de los cultivos, la que se verá aumentada con el calentamiento global producto del cambio climático, con el consiguiente incremento en la demanda del agua para satisfacer las necesidades de las plantas.

La disminución de las precipitaciones y el aumento de la temperatura, que está afectando al territorio chileno, impacta sobre una menor disponibilidad de recursos hídricos, tanto superficiales como subterráneos, así como en una menor calidad del agua.

El panorama de la agricultura al que nos enfrenta el cambio climático significa entonces, un aumento en los requerimientos hídricos por una parte y por la otra, en una disminución de la disponibilidad de dichos recursos. Además, implica nuevos desafíos a la Gestión y Gobernanza del Agua.

Todo lo anterior implica que, para mitigar los efectos del cambio climático en la agricultura nacional, se deben hacer cambios sustantivos en la infraestructura de riego para aumentar la eficiencia en el uso del agua, en la localización de las especies vegetales en los territorios que menos afecten su rendimiento y en mejoras en la adaptabilidad a las nuevas condiciones climáticas mediante el mejoramiento genético. Por lo tanto, los cambios futuros en la agricultura vinculados al cambio climático serán fundamentales para el desarrollo de ella y la definición de su rol en las sociedades. Además, procesos socioeconómicos, tales como cambios en patrones de consumo e incrementos en la capacidad de compra en países en desarrollo, tendrán una gran influencia en la definición de qué y cuánto se consume, así como de qué y dónde se produce, que se agregarían a los impactos previstos del cambio climático. De la misma manera, cambios en la composición de la matriz energética y en patrones de uso de energía (nuevas fuentes de energía, eficiencia energética), así como desarrollos en el ámbito de la ciencia y la tecnología, especialmente en el campo de la biotecnología, tendrán gran influencia en definir cómo, dónde y para qué se produce, y en (re) definir el rol de la agricultura en las sociedades.

Muchos de esos cambios serán exógenos al desarrollo de la agricultura. Otros serán inducidos por el mismo cambio climático y otros más por políticas públicas, dentro y fuera de la agricultura. Por ello, los reportes del IPCC reconocen que la vinculación de los impactos del cambio climático con sectores como la agricultura aún requiere de mayor evidencia para demostrar relaciones de causa-efecto (CEPAL, 2011).

Los impactos del cambio climático en la agricultura se pueden representar en la [Figura 4.1](#).

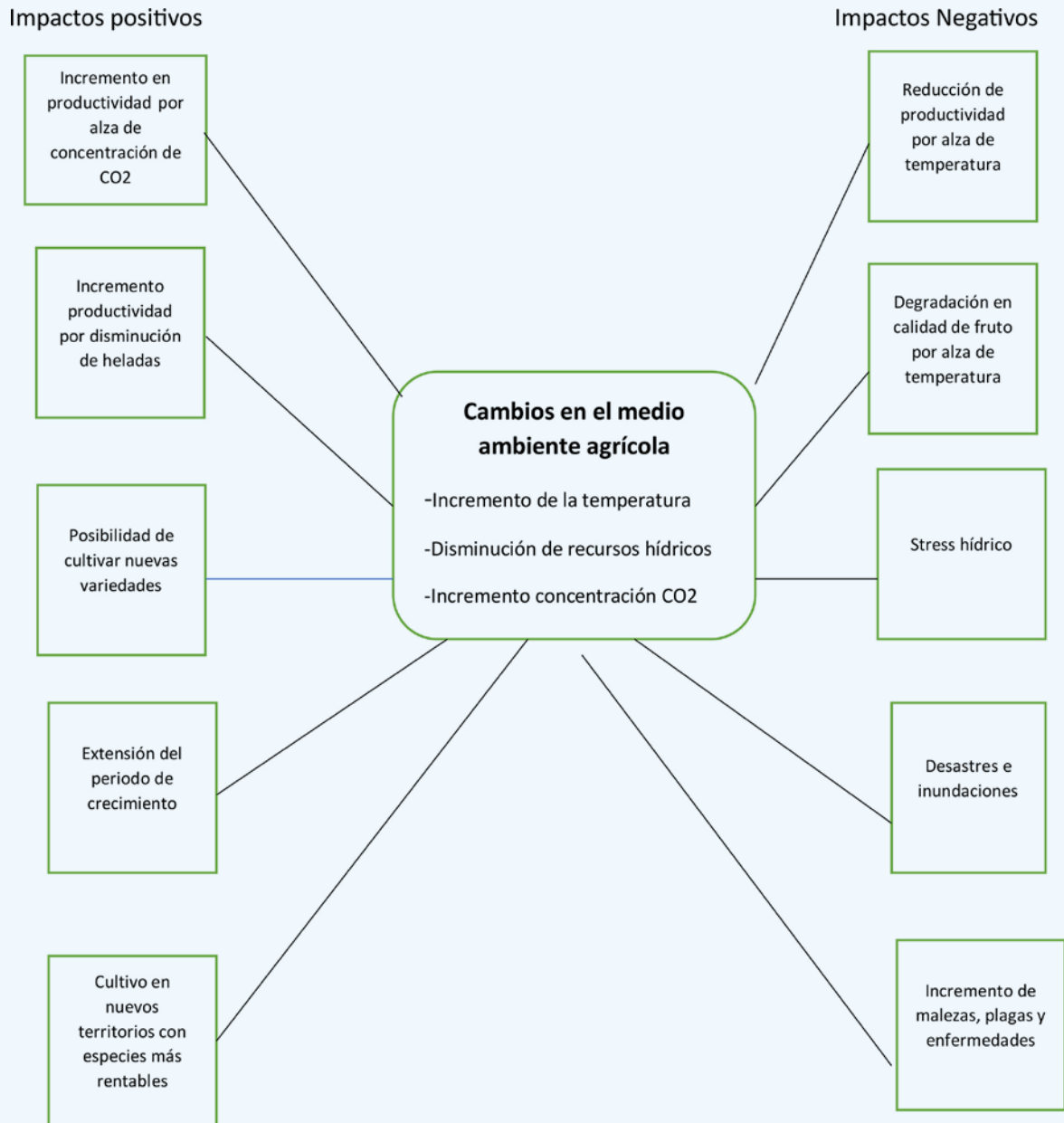


Figura 4.1. Impactos del cambio climático en la agricultura.

Fuente: Kim, C. (2012) y elaboración propia.

4.2. El sector agrícola chileno

El sector agrícola chileno es el principal consumidor de agua, con extracciones de alrededor del 73% del total del país (MOP, 2013), por lo tanto, la importancia de este sector como gran consumidor de agua en el cómputo general de recursos hídricos es de la mayor relevancia.

La participación del Sector Silvoagropecuario en la economía chilena promedia un 3,3% entre el año 2013 y el 2022, tal como se muestra en el [Tabla 4.1](#) (ODEPA, 2023).

Tabla 4.1. Producto Interno Bruto, Silvoagropecuario y Nacional (1). Fuente: elaborado por ODEPA (2023) con información del Banco Central de Chile.

Miles de millones de pesos					
Años	Silvoagropecuario	Nacional	Tasas de variación		Participación sector silvoagropecuario en el PIB (1)
			Silvoagropecuario	Nacional	
			(Volumen a precios del año anterior encadenado, referencia 2018)		
2013	5.493	169.864			3,1%
2014	5.283	172.909	-3,8%	1,8%	3,2%
2015	5.663	176.630	7,2%	2,2%	3,3%
2016	5.917	179.726	4,5%	1,8%	3,6%
2017	5.877	182.166	-0,7%	1,4%	3,4%
2018	6.050	189.435	2,9%	4,0%	3,2%
2019	5.989	190.843	-1,0%	0,7%	3,2%
2020	6.033	179.115	0,7%	-6,1%	3,6%
2021	6.284	200.138	4,2%	11,7%	3,1%
2022	6.290	205.023	0,1%	2,4%	2,8%

(1) Cifras preliminares para 2021 y cifras provisionales para 2022.

De acuerdo con el Banco Central (2023), todos sus componentes mostraron reducciones a excepción de la fruticultura. Respecto a la producción agrícola, las hortalizas presentaron la mayor contribución a la baja, en particular las destinadas a consumo fresco. Los cultivos anuales también incidieron en los resultados, producto de una menor superficie de siembra de trigo y maíz. En cuanto a la fruticultura, su aumento fue liderado por las cerezas de exportación y otras frutas de carozo. La producción de uva de mesa también contribuyó.

Esta tendencia, en el cambio de la incidencia de los cultivos más rentables, se podría explicar por las condiciones climáticas que conducen a que los agricultores utilicen sus recursos hídricos en este tipo de cultivos.

En la **Figura 4.2**, se presenta la participación en el PIB Silvoagropecuario de cada región del país, donde se destaca la participación de las Regiones de O'Higgins, Maule y Metropolitana.

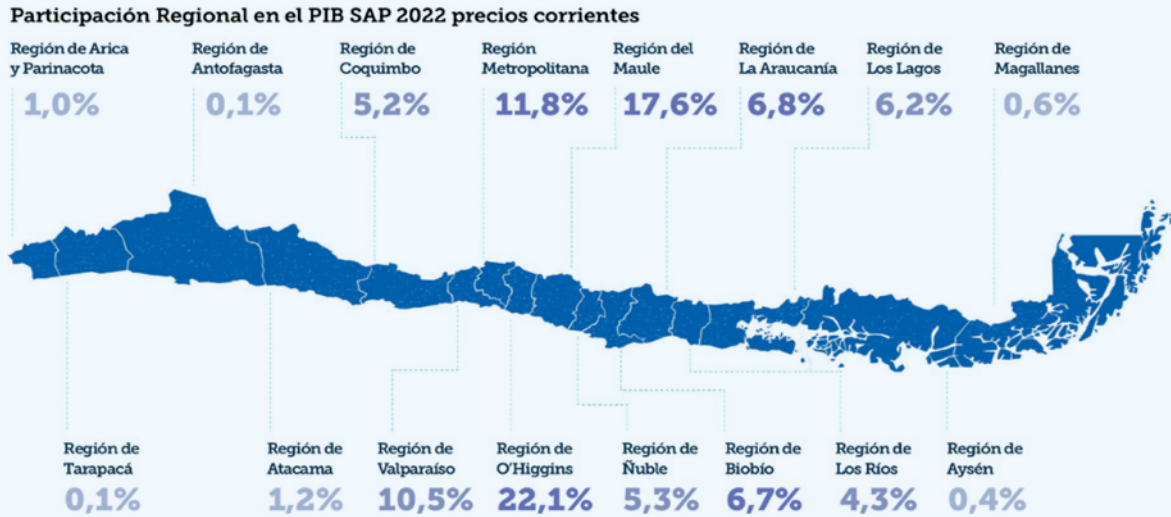


Figura 4.2. Participación del sector silvoagropecuario en el PIB regional.

Fuente: ODEPA 2023.

En relación con la superficie agrícola chilena, se dispone de los resultados finales del VII Censo Agropecuario y Forestal de 2021, publicado por INE y cuyos resultados, en relación a la superficie de riego y tipo de cultivos se presentan en la **Tabla 4.2** (<https://www.ine.gob.cl/censoagropecuario/resultados-finales/graficas-nacionales>).

La superficie de Cereales, Forrajeras y Praderas Mejoradas suman 155.200 ha de riego, lo cual constituye un colchón muy importante si en el futuro deba reducirse la superficie regada por efecto de la reducción hídrica producto del cambio climático. Este tipo de cultivos representa la menor rentabilidad comparado con los restantes cultivos de riego, por lo tanto, es presumible que sea esta, precisamente la superficie afectada. Lo anterior es concordante con lo detectado por el Banco Central para la temporada agrícola 2022 (Banco Central, 2023).

Tabla 4.2. Superficie de riego nacional, regional y tipo de cultivo. Fuente: INE 2023 y elaboración propia.

Total Nacional-Región	Total superficie	Cereales	Leguminosas Tubérculos	Cultivos industriales	Hortalizas	Frutales	Vides viníferas	Flores	Semilleros	Viveros	Forrajeras	Praderas mejoradas
	ha	ha	ha	ha	ha	ha	ha	ha	ha	ha	ha	ha
Total Nacional	900.396	151.362	29.248	19.542	60.829	359.446	89.886	911	17.759	3.189	86.034	82.190
Arica Parinacota	6.452	48	39	2	2.883	560	3	6	37	6	915	1.953
Tarapacá	1.513	47	24	0	938	266	4	3	0	1	229	0
Antofagasta	984	24	13	0	248	94	5	1	0	4	593	1
Atacama	11.155	164	107	22	721	8.096	481	6	3	11	1.482	62
Coquimbo	44.822	192	1.425	5	7.735	26.065	6.906	55	78	70	2.154	138
Valparaíso	63.233	1.129	551	43	3.572	44.733	7.718	418	144	329	4.284	312
Metropolitana	112.698	9.438	3.407	217	13.475	57.526	8.612	50	2.816	868	14.334	1.953
O'Higgins	179.642	27.743	1.374	3.401	9.260	91.593	33.068	60	2.679	494	8.922	1.249
Maule	228.227	46.882	5.415	4.155	10.365	86.921	31.163	47	7.554	631	14.084	21.010
Ñuble	85.884	31.647	3.666	4.835	4.399	17.525	513	17	2.047	194	10.758	10.284
Biobío	67.112	23.723	1.383	4.587	2.322	8.842	1.323	38	1.702	122	13.790	9.280
Araucanía	51.315	8.899	6.239	2.131	3.600	10.696	65	117	426	242	5.636	13.264
Los Ríos	23.056	1.252	2.173	3	474	3.929	22	45	192	46	3.812	11.109
Los Lagos	17.583	166	3.366	143	711	2.303	2	38	74	155	2.399	8.227
Aysén	2.819	8	51	0	100	290	3	6	7	4	1.236	1.115
Magallanes	3.702	0	14	0	27	6	0	1	0	12	1.407	2.236

4.3. Los efectos del cambio climático que impactan en la agricultura

El efecto del cambio climático se ha venido manifestando desde hace un siglo en el territorio chileno, produciéndose una aceleración de sus efectos en la agricultura desde los años 80. (Santibáñez F., 2015; Santibáñez F. *et al.*, 2014, Villalba *et al.*, 2003). Los modelos regionales pronostican una disminución gradual de las precipitaciones totales anuales, un aumento sostenido de las temperaturas máximas y mínimas en regiones interiores del territorio, una disminución de las temperaturas diurnas en las zonas costeras, una elevación de las isotermas afectando a las reservas de nieves en la cordillera de Los Andes, un ligero cambio de estacionalidad de las precipitaciones y un alza sostenida en los requerimientos de evapotranspiración que implican un aumento en las demandas de riego, principalmente para frutales.

Al subir la temperatura de la atmósfera, producto del cambio climático, el viento toma mayor velocidad sobre el océano, haciendo que las aguas profundas y frías de la corriente de Humbolt, suban a la superficie en mayor cantidad enfriando las aguas del Pacífico cercanas al litoral. Con esto, las masas de aire que ingresan al continente se enfrían al pasar sobre las aguas heladas del océano. Este mismo enfriamiento, más el aumento de la actividad convectiva de la zona intertropical, haría que el anticiclón del Pacífico tienda a desplazarse más al sur de Chile. Es posible que esto tenga además como consecuencia que solo los frentes dotados de más energía logren franquear al anticiclón, trayendo lluvias con menor frecuencia a la zona central. Quizás por esta razón, el número de lluvias anuales ha tendido a disminuir en los últimos 100 años, tendencia que podría prolongarse por algunas décadas más (Santibáñez, 2016).

El territorio chileno, comprendido entre los paralelos 28 y 42 S, observó una declinación pluviométrica de 10% a 25% durante el siglo XX, especialmente en regiones costeras. Esto ha provocado un desplazamiento hacia el sur de las isoyetas del orden de 0,4 a 0,5 km por año (IPCC, 2007).

La aridización del régimen pluviométrico, junto a un aumento de la temperatura del orden de 0,5 a 0,6 °C, produjo una caída en los rendimientos de los cereales que hizo desaparecer casi por completo su cultivo en casi la totalidad de las regiones desde Arica hasta Valparaíso (Santibáñez *et al.*, 2014)

Se agregan a estos síntomas un aumento en la frecuencia de temperaturas altas principalmente en verano y un aumento en la intensidad de las precipitaciones (Santibáñez F., 2016).

La agricultura chilena enfrenta dos grandes problemas de origen natural, el primero de ellos dice relación con que la mayor precipitación y caudal de los ríos se produce en invierno, disminuyendo en verano, donde la agricultura de riego tiene la mayor demanda recursos hídricos, lo cual debe ser solucionado mediante regulación de las cuencas. El

segundo problema dice relación con distribución espacial del agua. En efecto, la Zona Norte (Regiones de Arica y Parinacota, Tarapacá, Antofagasta, Atacama y Coquimbo) y en menor grado la Zona Central de Chile (Regiones de Valparaíso, Metropolitana, O'Higgins y Maule), poseen un clima privilegiado para la Agricultura, pero una menor o escasa disponibilidad de agua. Por otro lado, en la Zona Sur de Chile existe una mayor disponibilidad de recursos hídricos, pero se aprecian algunas limitaciones para el desarrollo agrícola de cultivos más rentables, especialmente por falta de temperatura. El cambio climático podría ayudar a resolver este segundo problema, en atención a que las condiciones de temperatura favorables de la Zona Central se estarían desplazando hacia el Sur, permitiendo el desarrollo de cultivos rentables como los frutales y en un escenario de mayores recursos hídricos.

Por otro lado, en la Zona Central existirían condiciones favorables para mantener producción frutícola en zonas costeras donde la influencia del mar aplacaría el alza de la temperatura, con lo cual es probable que la demanda hídrica en esta zona no decline. Esta situación se visualiza con los datos que se analizan en el punto 5.4.

4.4. Impacto del cambio climático en la superficie de riego y en los tipos de cultivos

En la [Tabla 4.3](#), se presenta la superficie total de riego del país, obtenida en los Censos Agropecuarios de 1976, 1997, 2007 y 2022. Se agrega la superficie estimada para el año 2015, calculada en un Estudio de la DGA (2017), la cual arroja una cifra similar a la del Censo 2021.

Se observa que, en los últimos años, la superficie de riego en Chile ha disminuido alrededor de 200.000 ha, lo cual es consecuente con lo observado en la disminución de los recursos hídricos en los últimos años producto de la sequía que azota nuestro país, atribuible a la Oscilación del Sur en el Océano Pacífico o Fenómeno del Niño y la Niña y al fenómeno cambio climático (ENSO) (Santibáñez F., 2008).

Tabla 4.3. Superficie de riego total país según censos agropecuarios. Fuente INE y elaboración propia.

Censo (años)	Superficie total de riego (ha)
1976	1.073.912
1997	1.058.356
2007	1.093.813
2015 (1)	906.224
2022	900.396

(1) Estimación DGA 2017.

Adicionalmente a los factores naturales derivados del cambio climático, los recursos hídricos vienen dando señales de agotamiento hace ya varias décadas en la zona centro norte de Chile. El aumento desmedido de la demanda por la agricultura y la minería está haciendo de este recurso un elemento crónicamente deficitario de Santiago al norte y frecuentemente deficitario de Santiago al sur. Contribuye a esta situación el aumento de la evapotranspiración debida al calentamiento global. Todo esto está intensificando la aridez de la zona central, proceso que es parte de un fenómeno más global, llamado “desertificación” (Santibáñez *et al.*, 2015).

En la [Tabla 4.4](#), se presenta la evolución de la superficie de los cultivos bajo riego obtenida de los censos 1976, 1997, 2007, 2022 y DGA 2015. Se observa una dramática reducción en cereales, forrajeras y cultivos industriales, todos cultivos de gran consumo de agua y más baja rentabilidad que los frutales. Estos últimos presentan un considerable aumento en la superficie plantada, lo cual viene a demostrar que los agricultores se adaptan a las nuevas condiciones climáticas de escasez de agua concentrándola en aquellos cultivos de mayor rentabilidad. Este cambio en la composición de los cultivos implica una mayor rentabilidad de la agricultura chilena, lo cual es consecuente con lo indicado por el Banco Central para la fruticultura, lo cual podría ser considerado un efecto positivo del cambio climático. El avance de esta tendencia tiene que observarse con detención, puesto que los pequeños agricultores están menos provistos de recursos económicos para enfrentar estos cambios estructurales de su agricultura.

Tabla 4.4. Evolución de la superficie de los cultivos de riego censos 1976, 1997, 2007, 2022 y DGA 2015. Fuente INE1998, 2008, 2022, CIREN 1983 y 2025, y elaboración propia.

Censo	Frutales	Cereales	Cultivos ind.	Viñas y parrones	Hortalizas	Flores	Viveros	Semilleros	Leguminosas y tubérculos	Praderas
1976	89.488	341.813	74.182	106.321	102.694	941	—	—	97.411	214.415
1997	233.973	236.138	44.436	97.370	111.642	1.471	2.339	29.620	54.706	216.196
2007	285.700	180.541	35.646	104.212	95.551	2.124	2.298	42.402	32.309	
2015	304.434		—	128.274	—	—	—	—		136.453
2022	359.446	151.362	19.542	89.886	60.829	911	3.189	17.759	29.248	86.034

4.5. Impacto del cambio climático en la distribución territorial de la superficie de riego

En la [Tabla 4.5](#) se presenta la evolución de la superficie de riego desde los Censos 1976, 1997, 2007 hasta 2022 y se le agrega la estimación DGA para el año 2015 (DGA 2017).

Tabla 4.5. Superficies de riego por regiones. Censos 1996, 1997, 2007, 2022 y DGA para 2015.

Nacional/Región	Censo 1976	Censo 1997	Censo 2007	DGA 2015	Censo 2022
Total superficie (ha)	1.073.919	1.058.356	1.093.813	906.224	900.396
Arica y Parinacota	7.699	8.035	11.168	5.223	6.462
Tarapacá			1.113	1.023	1.513
Antofagasta	3.047	2.960	2.296	1.835	984
Atacama	12.731	14.185	19.545	14.426	11.155
Coquimbo	72.903	49.459	75.709	56.251	44.822
Valparaíso	78.544	68.808	86.157	79.271	63.233
Metropolitana	158.278	144.845	136.732	120.015	112.698
O'Higgins	206.435	206.976	210.691	209.379	179.642
Maule	303.865	319.826	299.060	248.551	228.227
Biobío y Ñuble	191.747	180.253	166.476	126.184	152.996
Araucanía	32.507	50.724	49.771	34.595	51.315
Los Ríos	-		8.117	5.196	23.056
Los Lagos	-	7.007	4.417	3.070	17.538
Aysén	2.882	3.485	2.767	592	2.819
Magallanes	3.281	1.793	19.794	614	3.702

De acuerdo con estas cifras se observa que la mayoría de las regiones ubicadas al Norte de la Región de la Araucanía, presenta una disminución de la superficie regada, lo que evidencia escasez de recursos hídricos. En algunas cuencas, esta disminución de la superficie regada puede deberse, también, a otros factores tales como el aprovechamiento de una mayor eficiencia de riego para obtener una mayor seguridad en el suministro de agua; la existencia de una cierta rigidez que impide una asignación óptima disponibilidad de suelo vs agua, de modo que los suelos disponibles no coinciden espacialmente con la ubicación de las aguas potencialmente disponibles, lo cual sería debido a que el mercado de

aguas y tierras no es suficientemente activo para reasignarlos; la reconversión de terrenos que dejan de ser agrícolas para dedicarse a urbanización, agroindustria, parcelas de agrado; y el reemplazo de cultivos anuales por especies arbóreas más rentables y que demandan mayor cantidad de agua.

Sin embargo, desde la Región de la Araucanía al Sur hay un incremento notable en la superficie regada siendo particularmente notorio en la Regiones de Los Ríos y Los Lagos con un aumento de 28 mil ha.

Con la finalidad de examinar cual es la estructura de cultivos que cambia en las distintas Regiones, se analizará este tema agrupando las Regiones en 4 Zonas.

4.5.1. Zona Norte

Todas las Regiones presentan una disminución de la superficie regada, la cual es más pronunciada en la Región de Coquimbo, presentando una pérdida de alrededor de 30.000 ha entre el año 2007 y 2022. Esto evidencia la crisis hídrica que está azotando a esta Región, la cual, a pesar de contar con casi todas sus cuencas reguladas con Embalses, estos no han podido llenarse en los últimos años por el déficit de precipitaciones.

En la [Tabla 4.6](#). se presenta una comparación entre las superficies de riego para los diferentes cultivos entre los años 2007 y 2022. La mayor caída en la superficie corresponde a los cultivos de cereales y forrajeras, lo cual es consistente con la planteado, es decir, que los agricultores maximizan el rendimiento económico focalizando los recursos hídricos en los cultivos más rentables.

Tabla 4.6. Región de Coquimbo. Superficie de riego por cultivo, años 2007 y 2022.

Fuente INE 2022 y elaboración propia.

Año	Superficie (ha)	Cereales	(1)	(2)	Hortalizas	Frutales	Vides	Flores	Forrajeras
2007	75.709	3.069	3.541	472	11.401	31.740	12.201	403	12.882
2022	44.822	192	1.425	153	7.735	26.065	6.906	55	2.292

(1) Leguminosas y tubérculos.

(2) Semilleros, cultivos industriales y viveros.

Igualmente existe una importante disminución de los frutales y vides, lo que evidencia la crisis hídrica.

4.5.2. Zona Centro

Comprende las Regiones de Valparaíso, Metropolitana, O'Higgins y Maule. Todas estas Regiones presentan una disminución de la superficie de riego de alrededor de 20 mil ha en cada una de ellas al comparar los años 2007 y 2022; con la excepción de la Región del Maule que experimenta una reducción de 70 mil ha.

Al analizar la distribución de los cultivos de la [Tabla 4.7](#), se detecta una disminución en la superficie dedicada a los cultivos anuales, alcanzando a 60 mil ha menos, en las regiones de O'Higgins y Maule. Por su parte hay un fuerte aumento de la superficie plantada con frutales, alcanzando a 58 mil ha en esta zona.

Tabla 4.7. Superficie de cultivos anuales y frutales bajo riego. Regiones de Valparaíso, O'Higgins, Metropolitana y Maule. Años 2007 y 2022. Fuente INE 2007, INE 2022, ODEPA-CIREN 2025 y elaboración propia.

Región	Cereales, leguminosas, tubérculos, industriales y hortalizas		Frutales	
	Año 2007	Año 2022	Año 2007	Año 2022
Valparaíso	14.796	5.295	50.885	44.733
Metropolitana	46.579	26.537	48.063	57.226
O'Higgins	71.813	41.778	75.239	91.593
Maule	96.738	66.817	48.280	86.921

4.5.3. Zona Sur

Comprende las regiones de Biobío, Araucanía, Los Ríos y Los Lagos. Como se señaló anteriormente, estas Regiones presenta un aumento considerable en la superficie regada al comparar los años 2007 y 2022. En la [Tabla 4.8](#) se presenta la superficie de riego de cultivos anuales y la de frutales para los dos años citados.

En esta zona, se observa un gran aumento de la superficie de frutales, siendo notorio en las Regiones de Ñuble-Biobío, Araucanía y Los Ríos. Esto confirma que la zona de cultivos más rentables se está desplazando hacia el sur.

Tabla 4.8. Superficie (ha) de cultivos anuales y frutales bajo riego. Regiones de Biobío, Araucanía, Los Ríos y Los Lagos. Fuente INE 2009, INE 2022, ODEPA-CIREN 2025 y elaboración propia.

Región	Cereales, leguminosas, tubérculos, industriales y hortalizas		Frutales	
	Año 2007	Año 2022	Año 2007	Año 2022
Biobío - Ñuble	72.469	76.562	11.231	26.367
Araucanía	11.873	20.869	7.302	10.696
Los Ríos	3.206	3.902	1.553	3.929
Los Lagos	4.760	4.386	2.520	2.303

4.5.4. Zona Austral

Esta zona, que abarca las Regiones de Aysén y Magallanes, no presenta extensiones de riego significativas, aunque es posible proyectar aumentos de la superficie de riego en la Región de Magallanes, en praderas mejoradas. También existen nichos de cultivos bajo invernadero, tipo frutales menores y hortalizas, que requerirán a futuro de riego.

CAPÍTULO 5

Impacto del cambio climático en los usos mineros e industriales. Alternativas de adaptación

5.1. Características generales de los usos mineros e industriales

Para los fines de analizar el posible impacto del nuevo escenario hidrológico asociado al cambio climático en las actividades mineras e industriales, resulta conveniente precisar algunas características de los aprovechamientos que ellas hacen, las que en alguna medida las distinguen de otros e inciden en las políticas para su adaptación al nuevo escenario. Entre ellas conviene destacar las siguientes:

Se trata de usos que no están presentes en forma relevante en la generalidad de las cuencas del país, localizándose en forma apreciable solo en lugares que constituyen centros mineros o industriales. De este modo, salvo las excepciones que se presentan en las zonas áridas, sus demandas resultan cuantitativamente marginales respecto del resto de los aprovechamientos, y su incidencia en los balances hídricos a nivel de cuenca resulta menor. Además, se trata de aprovechamientos que en general presentan menos restricciones de calidad, de modo que en algunos casos utilizan recursos hídricos que no son atractivos para usos alternativos, circunstancia que presenta interés para el reúso de aguas residuales y de otras con restricciones de calidad. Estas características hacen que en la mayor parte del país las demandas mineras e industriales no sean determinantes en los análisis del impacto climático.

El uso del agua en estos sectores, en la mayoría de los casos, presenta un costo pequeño en comparación a otros costos de producción y al valor de los bienes. En este contexto, la disposición al pago por el suministro de agua a estos sectores es significativamente superior al de los usos alternativos de los recursos de agua. Por estas circunstancias, en un marco donde operen los incentivos de mercado, las limitaciones que surjan al abastecimiento de estas demandas originadas en el cambio climático, tenderán a traspasarse a otros usuarios con una menor disposición al pago.

Las características productivas propias de la actividad minera e industrial hacen que los requerimientos de seguridad hídrica sean especialmente elevados, de modo que se busquen soluciones para el suministro que en lo posible no estén sometidas a la variabilidad hidrológica o dispongan de volúmenes de emergencia suficientes.

Las consideraciones anteriores se expresan con frecuencia en el uso de aguas subterráneas como fuente de abastecimiento; en la posibilidad de recurrir a terceros para la provisión de aguas, por ejemplo, empresas sanitarias, y eventualmente, en la utilización de fuentes alternativas, tales como agua de mar, con o sin desalinización, o aguas servidas tratadas.

5.2. Situación actual de los usos mineros e industriales

5.2.1. Antecedentes

El estudio de los usos mineros e industriales de agua más actualizado disponible corresponde al realizado para la Dirección General de Aguas en el año 2017: “Estimación de la Demanda Actual, Proyecciones Futuras y Caracterización de la Calidad de los Recursos Hídricos” (en adelante DGA2017). En dicho estudio se determinaron los usos consuntivos y no consuntivos para los distintos sectores usuarios a nivel nacional y de cada región para el año 2017 y se hizo una proyección hasta el año 2040. Adicionalmente, respecto del uso minero, existen informes anuales que prepara Cochilco referidos a la Gran Minería del Cobre, y SONAMI ha publicado informes periódicos que incluyen, además, el uso del agua por la mediana minería del cobre y las demandas asociada a otros metales y a la minería no metálica. En lo que respecta al uso industrial, no existen antecedentes disponibles de carácter general. A partir de esta información, a continuación, se presenta una visión general del aprovechamiento de los recursos hídricos por ambos sectores.

5.2.2. Situación actual del aprovechamiento de recursos hídricos por la minería

Los principales resultados obtenidos a nivel nacional y regional en el estudio DGA2017, en lo relativo a la demanda minera se resumen en la [Tabla 5.1](#). En dicha tabla se entrega a nivel nacional o regional:

- Las demandas mineras totales en miles de m³/año y como porcentaje de la demanda consuntiva correspondiente al conjunto de los sectores según corresponda.
- Las demandas correspondientes a la minería de cobre, de otros metales y de no metales en miles de m³/año y como porcentaje del uso consuntivo minero.
- Las demandas atendidas por agua de mar en el año 2015, y su porcentaje respecto del abastecimiento de la minería a nivel nacional.

Tabla 5.1. Demandas de agua de la minería en el año 2015. Fuente: DGA (2017).

Región		Tipo de minería (miles m ³ /año)			Demanda total (miles m ³ /año)	Agua de mar (miles m ³ /año)	Porcentaje sobre total de usos consuntivos %
		Cobre	Otros metales	No-metálica			
XV	Arica y Parinacota	252		319	571	16	0,7
I	Tarapacá	32.271		19.263	51.534		54,2
II	Antofagasta	111.420	16.113	22.706	150.239	65.051	56,8
III	Atacama	24.453	15.497		39.950	13.843	20,2
IV	Coquimbo	32.889	9.078		41.967		7,5
V	Valparaíso	45.814	1.757		47.571		4,4
RM	RM	23.442	6.389		29.831		1,1
VI	O'Higgins	63.644	688		64.332		3,7
VII	Maule	1.044			1.044		0,0
VIII	Biobío	0		31	31		0,0
IX	Araucanía	0			0		0,0
XIV	Los Ríos	0			0		0,0
X	Los Lagos	0			0		0,0
XI	Aysén	0	2846		2.846		22,5
XII	Magallanes	0		591	591		2,7
Total		335.229	52.368	42.910	430.507	78.910	3,9
Total (m ³ /s)		10,6	1,7	1,4	13,7	2,5	
% de consumo minero total		78	12	10	100	18,3	

De estos antecedentes conviene destacar los siguientes aspectos:

- Al año 2015 la demanda minera a nivel nacional se podía estimar en aproximadamente 430 millones de m³/año (13,7 m³/s), la cual estaba distribuida básicamente entre las regiones de Tarapacá y O'Higgins, destacándose por su magnitud la existente en la Región de Antofagasta.
- Las demandas mineras solo representaban un 3,9% de los usos consuntivos a nivel nacional. Sin perjuicio de lo anterior, existen 2 regiones (Antofagasta y Tarapacá) en las que ellos representan más de la mitad de los usos consuntivos, una (Atacama) cercana al 20% y tres (Coquimbo, Valparaíso y O'Higgins) con demandas entre el 7,5 y el 3,7%.

- Las demandas mineras correspondían principalmente a la minería de cobre, con un caudal de 10,7 m³/s, lo que representaba el 78% del total de uso consuntivo minero. Otros metales, principalmente hierro, oro y zinc, demandaban 1,7 m³/s con un 12% del total. Finalmente, la minería no metálica, con explotaciones de compuestos de boro, yodo, nitratos, litio, potasio, y carbón, requería 1,3 m³/s equivalentes al 10% del total.
- Los antecedentes de 2015 ya mostraban el impacto del uso de agua de mar en la minería, en particular en la minería de cobre, con un aporte al suministro de 2,5 m³/s, que representaba un 18% del consumo minero total.

Por otra parte, en informes preparados por la SONAMI (SONAMI, 2021), se presenta el consumo minero distinguiendo entre la Gran Minería del Cobre (GMC), la Mediana Minería del Cobre (MMC), la minería de otros metales y no metales (OM-NM), y los consumos asociados a las plantas de fundición. Sobre la base de esa clasificación, se entrega información sobre el consumo de agua continental, los tipos de fuentes que permiten atender las demandas, la recirculación de agua en las faenas mineras, y el uso de agua de mar. Estos antecedentes se presentan en la [Tabla 5.2](#).

Esta información muestra que:

- La demanda de agua de la minería corresponde principalmente a la GMC que representa el 91% de la demanda total. Si se considera solo la demanda neta servida por fuentes continentales, descontando aquellas que son atendidas por la recirculación o por el agua de mar, ella compromete aproximadamente un 80% del total, lo que se compara con el 7% que demanda la mediana minería del cobre, el 9% del resto de la minería y el 3% del consumo de las fundiciones.
- La recirculación del agua en los procesos es fundamental para la atención de las demandas, alcanzando a atender en el caso de la GMC un 75% de la demanda total. En los otros sectores de la minería, aunque también es muy importante con aproximadamente un 64 y un 50%, no ha alcanzado el nivel de eficiencia que presentan los grandes yacimientos.
- Respecto de las fuentes externas (descontando la recirculación) el abastecimiento mediante aguas de mar, con o sin desalinización, en la fecha del informe ya era de gran importancia, de modo que con 5,6 m³/s representaba el 31% de las fuentes externas, mientras que las aguas continentales contribuían con el otro 69%. En estas últimas las fuentes superficiales y subterráneas hacían cada una un aporte relativamente equilibrado.

Tabla 5.2. Antecedentes sobre la demanda y suministro de aguas para distintos sectores de la actividad minera

	Gran Minería del Cobre	Mediana Minería del Cobre	Otros metales y no metálicos	Fundición y refinería	Total
Demanda total (incluye recirculación)					
Caudal m ³ /s	61,6	2,8	3,1	0,4	67,9
porcentaje	90,7	4,1	4,6	0,6	100
a) Uso de agua continental					
Caudal m ³ /s	10,2	0,9	1,2	0,4	12,7
% sobre demanda	16,6	32,1	38,7	100	18,7
% del sector	80,3	7,1	9,3	3,3	100
a.1) Uso de fuentes de agua superficial					
Caudal m ³ /s	4,3	0,5	0,3	s/i	5,1
% sobre demanda	7,1	16,7	8,4	s/i	40,8
a.2) Uso de fuentes de agua subterránea					
Caudal m ³ /s	5,2 (1,2)	0,4 (0,1)	0,9 (0,0)	s/i	6,5
% sobre demanda	8,4	12,8	28,5	s/i	52,0
a.3) Suministro de agua por terceros					
Caudal m ³ /s	0,7	0,1	0,1	s/i	0,9
% sobre demanda	1,1	2,6	2,7	s/i	7,2
b) Uso de agua de mar					
Caudal m ³ /s	5,2	0,1	0,3	s/i	5,6
% sobre demanda	8,4	4,2	10,2	s/i	8,2
c) Recirculación de agua					
Caudal m ³ /s	46,2	1,8	1,5	s/i	49,5
% sobre demanda	75,0	63,7	50,2	s/i	72,9

(*) Entre paréntesis se presenta el caudal subterráneo correspondiente a aguas del minero.
s/i: sin información.

Adicionalmente, los informes de SONAMI presentan la evolución del abastecimiento de agua para el período 2015-2020, determinando para cada uno de los sectores (GMC/MMC/OM-NM) las tasas de recirculación de aguas, y el suministro total proveniente de las fuentes externas, ya sean continentales o agua de mar. Asimismo, se informa el aporte de las llamadas “aguas del minero”, que corresponden a aquellas que afloran naturalmente en las faenas. En la [Tabla 5.3](#) se presentan dichos antecedentes.

Tabla 5.3. Evolución del suministro de agua a la minería

	Unidades	Años					
		2015	2016	2017	2018	2019	2020
Aporte total de fuentes externas	m ³ /s	17,4	17,8	18,1	19,4	17,7	18,3
Fuentes continentales	m ³ /s	14,5	14,9	14,8	14,8	13,6	12,7
Agua de mar	m ³ /s	2,9	2,9	3,3	4,6	4,1	5,6
	%	17	16	22	31	30	31
Tasa de recirculación							
Gran Minería del Cobre	%	75	75	77	78	79	75
Mediana Minería del Cobre	%	55	58	60	58	63	64
Otros metales y no-metales	%	26	28	34	33	43	50
Porcentaje de uso de agua de mar							
Gran Minería del Cobre	%	17	17	20	26	26	34
Mediana Minería del Cobre	%	22	18	10	14	13	21
Otros metales y no-metales	%	8	9	8	9	8	12
Aprovechamiento de aguas del minero							
Gran Minería del Cobre	%	-	-	10,5	7,6	10,4	11,4
Mediana Minería del Cobre	%	-	-	2,4	2,4	4,7	5,9
Otros metales y no-metales	%	-	-	0,8	1,7	1,0	0,3

Como se observa en la [Tabla 5.3](#), las condiciones de escasez y la compleja relación ambiental que existe en las cuencas donde se desarrollan las actividades mineras ha motivado a las empresas a desarrollar en la última década diversas iniciativas orientadas a disminuir la dependencia de las fuentes de recursos hídricos naturales. Ello ha quedado reflejado en la creciente importancia del uso de agua de mar en la gran minería del cobre, pasando de representar un 17% de los aportes de las fuentes externas a un 34%, y en la minería de otros metales y no

metales de un 8 a un 12%. Además, estos antecedentes muestran que en la GMC la posibilidad de disminuir la demanda mejorando la recirculación de las aguas es reducida, considerando que se ha alcanzado una eficiencia muy elevada (75%). Este no es el caso de los otros sectores de la minería, donde aún hay espacios de mejora. Respecto de las aguas del minero, se observa que en los últimos años no ha sido un recurso que se haya incrementado en forma significativa.

5.2.3. Situación de la demanda hídrica industrial

Como se ha indicado, la demanda de agua para usos industriales a nivel nacional solo ha sido evaluada en el informe DGA2017. En ese estudio se recurrió a los antecedentes sobre riles incluidos en las bases de datos del ministerio de Medio Ambiente y de la Superintendencia de Servicios Sanitarios, y a la aplicación de coeficientes técnicos para determinar el uso de agua industrial. En la [Tabla 5.4](#) se presentan las demandas estimadas con dicho procedimiento a nivel regional y nacional para el año 2015, y su relación con el uso consuntivo del conjunto de los sectores productivos.

Tabla 5.4. Demanda de agua para uso industrial

Región		Uso	Distribución regional	Porcentaje de uso consuntivo total
		Miles de m ³ /año	%	%
XV	Arica y Parinacota	195	0,0	0,2
I	Tarapacá	4.387	0,6	4,6
II	Antofagasta	29.563	4,0	11,1
III	Atacama	15	0,0	0,0
IV	Coquimbo	4.742	0,6	0,9
V	Valparaíso	16.554	2,3	1,5
RM	Metropolitana	38.468	5,3	1,9
VI	O'Higgins	12.276	1,7	0,6
VII	Maule	33.304	4,6	1,1
VIII	Biobío	350.470	48,0	30,9
IX	Araucanía	25.822	3,5	9,3
XIV	Los Ríos	75.491	10,3	66,1
X	Los Lagos	137.943	18,9	73,1
XI	Aysén	1.018	0,1	8,0
XII	Magallanes	603	0,1	2,8
Total		730.853	100,0	6,7

Los antecedentes proporcionados por la [Tabla 5.3](#) dejan en evidencia que en el contexto nacional los usos industriales resultan comparativamente marginales, representando solo un 6,7% de las demandas. En relación con su distribución regional, conviene destacar su importante concentración en la región de Biobío, con casi un 50% del uso nacional y en la que alcanza del orden del 30% de los usos consuntivos regionales. En otras regiones en las que comparativamente presentan una elevada participación de los usos consuntivos, como las de Los Ríos y Los Lagos, ello se debe al bajo caudal de los consumos, al carecer de riego.

5.3. Los impactos del cambio climático en los usos mineros e industriales. Alternativas de adaptación

El impacto del cambio climático en los aprovechamientos mineros e industriales dependerá de: a) las políticas que implemente el sector para reducir el uso de agua fresca a través de mejoras en la eficiencia de aprovechamiento y de la incorporación de fuentes alternativas, b) la evolución de dichas demandas sectoriales, y c) la situación que se presente en relación con las fuentes que se utilizan y su gestión.

5.3.1. Eficiencia de uso y aprovechamiento de fuentes alternativas.

Mejora de la eficiencia de uso. Desde la década de 1980 se observó en la minería e industria chilena un proceso de mejora de la eficiencia de aprovechamiento asociado a la creciente competencia por el acceso a los recursos hídricos, al desarrollo tecnológico y a la preocupación ambiental. Así, el make up en la minería del cobre, que inicialmente presentaba valores superiores a 2 m³ de agua/ton mineral tratado, a principios de los años 2000 se había reducido a 0,75 m³ de agua/ton. En el mismo período, la principal industria consumidora de agua, la producción de celulosa y papel pasó de consumos de alrededor de 130 m³/ton a sólo 40 m³ de agua por tonelada de producto (H. Peña, M. Luraschi y S. Valenzuela, 2004). Además, la producción para la exportación se desarrolla en un contexto internacional de altas exigencias ambientales que incluyen reportes sobre temas tales como sustentabilidad corporativa, huella hídrica, y la contribución a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la ONU, y las principales empresas exportadoras con frecuencia participan de instancias internacionales que promueven guías y certificaciones (por ejemplo, la Global Reporting Initiative (GRI) y el Consejo Internacional de Minería y Metales (ICMM)), con el fin de generar confianza entre los diferentes grupos de interés e inversores relacionados con sus actividades y productos y, en general, mejorar su imagen frente a la sociedad y prevenir riesgos medioambientales o legislativos. Estos antecedentes muestran que en este sector productivo el contexto económico y regulatorio genera incentivos al incremento de la eficiencia, que son incorporados por las empresas para mantener su competitividad.

Adicionalmente, en la actualidad existen algunos instrumentos promovidos por el Estado que contribuyen a la adaptación al cambio climático y que están disponibles a través de la Agencia de Sustentabilidad y Cambio Climático (ASCC) de la CORFO, entre los que se pueden mencionar los Acuerdos de Producción Limpia que contribuyen al desarrollo sustentable de actividades económicas, en particular mejorando la eficiencia hídrica; el Acuerdo Voluntario para la Gestión de Cuencas y Seguridad Hídrica, que busca contribuir a la adaptación por cambio climático, con especial interés en los efectos de sequías; y el Programa de Estrategias Hídricas Locales, centrado en el uso eficiente del agua, a nivel de comunas.

Los Acuerdos de Producción Limpia (APL) son un instrumento de gestión pública que busca fomentar el rendimiento ambiental de las empresas por medio de metas y acciones específicas a través de la firma de convenios voluntarios entre empresas o grupos de empresas y el sector público. En Chile fueron establecidos como política pública el año 2001, y a la fecha se han puesto en marcha 228 APL, con la participación de 9.551 empresas. Según la estimación de la ASCC ellos generarían un ahorro de agua dulce de 175 Hm³/año (S. Carvallo, 2024).

Con un enfoque similar, orientado al fomento de la eficiencia ambiental por parte de las empresas, desde el año 2021 el Ministerio de Hacienda ha liderado un proceso para elaborar un Sistema de Clasificación de Actividades Económicas Medioambientalmente Sostenibles o Taxonomía. La preparación de una Taxonomía es una forma de abordar las consecuencias del cambio climático sobre los procesos productivos y orientar los recursos hacia áreas prioritarias, por ejemplo, facilitando acceso a financiamiento. En el anexo IV se entregan más antecedentes respecto de esta iniciativa.

Aprovechamiento de fuentes alternativas. Para atender a las dificultades de suministro, el desarrollo minero e industrial ha recurrido en ocasiones a la utilización de aguas servidas domésticas tratadas y al uso de agua de mar, con o sin desalación, y se espera que en el futuro se recurra crecientemente a estas fuentes.

Respecto del reúso de aguas residuales urbanas, los estudios realizados sobre la materia (Diagua Consultores, 2019) muestran que existe un interesante caudal de aguas servidas tratadas que alcanza en total a 40 m³/s, siendo enviados al océano unos 8,8 m³/s de ese total. Mientras las aguas que se retornan a la red hidrográfica usualmente son aprovechadas en la agricultura, las que se destinan al océano son escasamente aprovechadas. Las causas que limitan un mayor aprovechamiento se refieren a la falta de seguridad jurídica respecto de la propiedad de las aguas, a la ausencia de una normativa ambiental acorde con naturaleza de las aguas y a las limitaciones a la inserción del caudal de reúso en distintos tipos de aprovechamiento. Así, para una utilización más intensa de estos recursos sería conveniente realizar ajustes en el marco jurídico e institucional que actualmente las regula.

En relación con el uso de agua de mar, resultan de especial interés los proyectos existentes en las empresas de la Gran Minería del Cobre (GMC) orientados a aumentar el aporte de agua de mar (desalada o no desalada) al abastecimiento de las faenas. Al respecto los informes que prepara anualmente Cochilco muestran, como se aprecia en la **Figura 5.1**, que el uso de agua de mar pasaría en ese sector de 5,7 m³/s en el año 2021 a 15,3 m³/s en 2033, lo que equivale a incrementar su aporte desde un 33% al 71% de las fuentes externas de suministro de agua. Es relevante hacer presente que esta orientación del sector ha sido reafirmada en la política minera acordada en 2021, la que estableció como meta disminuir “el porcentaje de agua continental usado en la industria minera, no superando el 10% de las aguas totales utilizadas al 2030 y el 5% al 2050, promoviendo otras fuentes que no compitan con el consumo humano”.

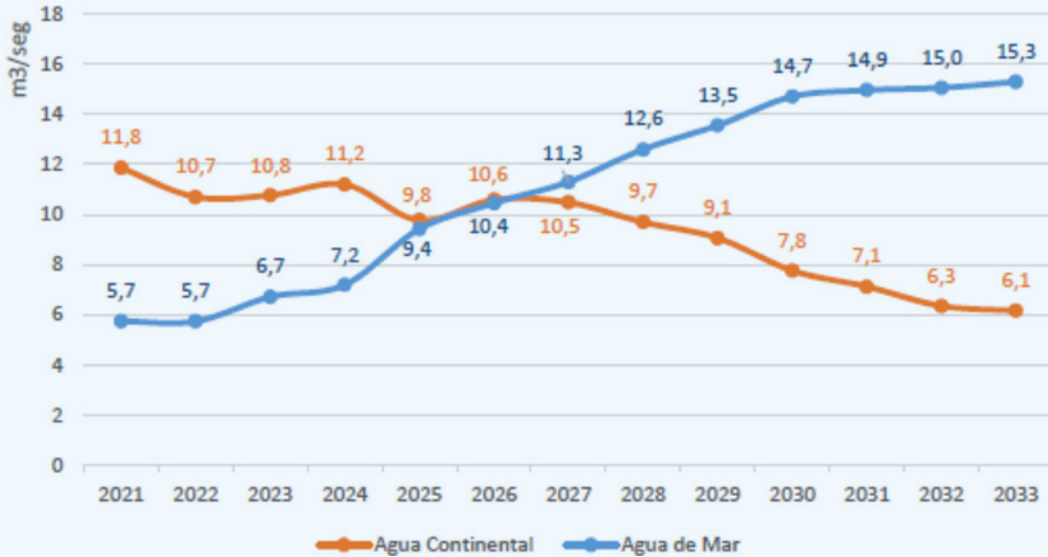


Figura 5.1. Proyección esperada demandada de agua en la minería del cobre según origen (2022-2033). Fuente Cochilco, 2022.

5.3.2. Demandas mineras e industriales futuras.

Respecto de la evolución de las demandas mineras e industriales en las **Tablas 5.5 y 5.6** se presentan las proyecciones según la estimación del informe DGA2017. Ellas contienen las estimaciones para el año 2015 así como las proyecciones para los años 2030 y 2040 para el nivel nacional y regional, expresadas en millones de m³/año y en porcentaje del valor obtenido en el mismo estudio para el conjunto de los usos consuntivos, ya sea al nivel nacional como regional.

En lo que respecta a las actividades mineras, esos antecedentes muestran una disminución de la demanda en términos absolutos, debido al uso de agua de mar y mejoras en la eficiencia, y en la proporción del total de usos consuntivos, pasando de representar un 3,9% a solo un 2,9%.

Tabla 5.5. Proyección de la demanda hídrica minera, 2015-2040

Región		Demanda minera (miles m ³ /año)			Demanda minera (% de uso consuntivo total)		
		2015	2030	2040	2015	2030	2040
XV	Arica y Parinacota	571	719	849	0,7	0,7	0,8
I	Tarapacá	51.534	48.043	49.368	54,2	46,9	44,8
II	Antofagasta	151.072	99.566	75.990	56,8	42,2	33,3
III	Atacama	39.950	48.629	33.543	20,2	18,9	12,7
IV	Coquimbo	41.967	46.021	40.900	7,5	5,5	4,5
V	Valparaíso	47.571	48.169	42.604	4,4	4,4	3,7
RM	Metropolitana	23.442	26.152	25.649	1,1	1,2	1,1
VI	O'Higgins	70.721	75.154	73.960	3,7	3,7	3,4
VII	Maule	1	0	0	0,0	0,0	0,0
VIII	Biobío	31	34	32	0,0	0,0	0,0
IX	Araucanía	0	0	0	0,0	0,0	0,0
XIV	Los Ríos	0	0	0	0,0	0,0	0,0
X	Los Lagos	0	0	0	0,0	0,0	0,0
XI	Aysén	2.846	971	1.654	22,5	7,5	11,4
XII	Magallanes	591	643	1.041	2,7	2,6	4,1
Total nacional (m ³ /s)		430.296 (13,6)	394.100 (12,5)	345.590 (11,0)	3,9	3,5	2,9

En relación con las demandas del sector industrial, como muestra la [Tabla 5.6](#), se espera que se incrementen en términos absolutos y en proporción al conjunto de los usos consuntivos. Así, se proyecta un incremento al año 2040 del 77% respecto al año 2015, lo que equivale a pasar de un 6,7% al 10,8% del total de los usos consuntivos. Respecto de la distribución regional no se observan cambios.

Tabla 5.6. Proyección de la demanda hídrica industrial, 2015-2040

Región		Demanda industrial (miles m ³ /año)			Demanda industrial (% de uso consuntivo total)		
		2015	2030	2040	2015	2030	2040
XV	Arica y Parinacota	195	255	290	0,2	0,3	0,3
I	Tarapacá	4.387	6.973	8.686	4,6	6,8	7,9
II	Antofagasta	29.563	48.836	59.703	11,1	20,7	26,2
III	Atacama	15	26	36	0,0	0,0	0,0
IV	Coquimbo	4.742	6.629	8.037	0,9	0,8	0,9
V	Valparaíso	16.554	19302	20911	1,5	1,7	1,8
RM	Metropolitana	38.468	75.894	99.170	1,9	3,5	4,3
VI	O'Higgins	12.276	16.597	18.985	0,6	0,8	0,9
VII	Maule	33.304	50.660	62.628	1,1	1,9	2,4
VIII	Biobío	350.470	423.289	544.534	30,9	36,6	42,7
IX	Araucanía	25.822	47.107	60.444	9,3	15,9	19,6
XIV	Los Ríos	75.491	146.189	196.059	66,1	72,6	77,2
X	Los Lagos	137.943	186.168	211.415	73,1	74,4	75,9
XI	Aysén	1.018	1.611	2.010	8,0	12,5	13,9
XII	Magallanes	603	788	908	2,8	3,2	3,5
Total nacional (m ³ /s)		730.853 (23,2)	1.030.325 (32,7)	1.293.804 (41,0)	6,7	9,0	10,8
Demanda año X/ Demanda 2015 (%)		100	141	177			

5.3.3. Situación de las fuentes hídricas asociadas a los usos mineros e industriales y su gestión, en el escenario de cambio climático

En relación con esta materia conviene señalar lo siguiente:

- Las fuentes utilizadas por estos sectores se distribuyen en todo el país, presentando cada cuenca una situación particular dependiendo de los impactos en la disponibilidad hídrica.
- Solo en las regiones de Tarapacá y Antofagasta los usos mineros constituyen un porcentaje relevante de los usos consuntivos. Sin embargo, se espera que el impacto en dichas zonas no será crítico para el sector minero, considerando que para esos usos se ha desarrollado un acelerado plan de incorporación de aguas de mar como fuente de

suministro y que en esas zonas se estima que el cambio climático tendrá un impacto relativamente moderado en la disponibilidad hídrica. De este modo, se considera que en esta zona la política de los grandes consumidores del sector minero otorgará a su actividad una importante resiliencia frente al cambio climático (esta condición no exime de la conflictividad que pudieran presentar al margen de las condiciones impuestas por el cambio climático, como es el caso de la que se presenta por razones ambientales).

- En general en las distintas regiones, los usos mineros e industriales se deberán integrar a la gestión de los recursos hídricos al conjunto de los usuarios incorporándose a la gestión de las situaciones deficitarias que se presenten a nivel de las distintas cuencas, según el análisis del conjunto de los usos. Sin embargo, considerando que en general los usos mineros e industriales son aprovechamientos relativamente marginales respecto del caudal comprometido con los otros usos productivos y en relación con las disponibilidades hídricas, y corresponden a los usos con mayor disposición al pago, se espera que finalmente los eventuales impactos se trasfieran al uso agrícola (asumiendo la prioridad legal otorgada al uso doméstico), proceso que dependiendo de situaciones locales en algunos casos pudiera ser complejo y conflictivo.
- Sin perjuicio de lo anterior, se identifican dos regiones en que la relación de los usos mineros e industriales con el resto de los consumos pudiera resultar especialmente compleja: a) la región de Valparaíso, con demandas mineras e industriales del orden del 6% de los usos consuntivos, pero en un escenario con una disponibilidad hídrica altamente comprometida con los distintos usuarios y muy sensible al cambio climático; y b) la región de Biobío, en la cual se espera un incremento de la demanda industrial, la que podría llegar a representar del orden del 40% de los usos consuntivos y, además, se encuentra en una zona con una posible disminución de la disponibilidad hídrica asociada al cambio climático.

CAPÍTULO 6

Análisis del impacto del cambio climático a nivel del balance hídrico de las cuencas

6.1. Consideraciones generales

La Ley Marco de Cambio Climático define la seguridad hídrica como la “posibilidad de acceso al agua en cantidad y calidad adecuadas, considerando las particularidades naturales de cada cuenca, para su sustento y aprovechamiento en el tiempo para consumo humano, la salud, subsistencia, desarrollo socioeconómico, conservación y preservación de los ecosistemas, promoviendo la resiliencia frente a amenazas asociadas a sequías y crecidas y la prevención de la contaminación”.

Según lo anterior, una primera aproximación a la seguridad hídrica está asociada al balance hídrico en las cuencas, que compara la disponibilidad de agua de diversas fuentes con la demanda de agua para distintos usos.

En una primera instancia, se consideró realizar este análisis a partir de los resultados de los Planes Estratégicos de Gestión Hídrica (PEGH) impulsados por la Dirección General de Aguas entre 2019 y 2022. Específicamente, se revisó la información de las cuencas de Lluta, Copiapó, Elqui, Limarí, Choapa, La Ligua, Aconcagua, Maipo, Maule y Biobío. Sin embargo, para resguardar la consistencia del análisis entre cuencas, así como carácter general y estratégico del presente informe, se optó por desarrollar un análisis basado en las estimaciones de disponibilidad y demandas para distintos usos según los escenarios incluidos en los capítulos precedentes.

Cabe destacar que en los PEGH la información de disponibilidad y balance se obtiene de simulaciones detalladas realizadas utilizando la plataforma WEAP en conjunto con modelos de aguas subterráneas desarrollados en MODFLOW. Para las proyecciones de disponibilidad de agua se tomó el escenario RCP8.5 y los modelos climáticos utilizados varían de estudio en estudio. Por ejemplo, para las cuencas de Elqui, Choapa, y Maule, se utilizó el modelo CSIRO-MK3-6-0. Para el caso de Aconcagua, se escogió el modelo CCSM4. Lamentablemente no existe una adecuada justificación de la selección del modelo climático utilizado en

los PEGH, por lo que la decisión parece haber sido arbitraria. Más aún, como se vio en el capítulo 2, el modelo CSIRO-MK3-6-0 tiende a proyectar un impacto más leve en términos de reducción de precipitación y aumento de temperaturas. De igual forma, la proyección de las demandas futuras presenta algunas diferencias con las tendencias observadas en años recientes y en ciertos casos inconsistencias, de difícil explicación, entre las proyecciones de las distintas cuencas.

6.2. El impacto en la disponibilidad de recursos hídricos

En relación con la disponibilidad de agua, como se presenta en el Capítulo 2 de este informe, todos los modelos climáticos considerados en la actualización del Balance Hídrico Nacional (DGA, 2022) proyectan una reducción de las precipitaciones en el período 2030-2060 con respecto al período 1985-2015.

Los resultados presentados en el Capítulo 2 se refieren a los componentes principales del balance hídrico, esto es, precipitación (P), evapotranspiración (ET) y escorrentía (Q). Cabe mencionar que la componente de evapotranspiración incluye los suelos naturales y cultivados, con un patrón de cultivos y superficies constantes tanto para el período histórico como para las proyecciones futuras. En este sentido, esta componente del balance ya contiene la demanda neta de riego asociada a las superficies y cultivos supuestos. Por otro lado, la componente de escorrentía incluye tanto el flujo base, aportando desde el subsuelo, como la escorrentía directa. A partir de los resultados del balance no es posible directamente estimar la componente de recarga neta de agua subterránea. En todo caso, cabe advertir que las cuencas chilenas presentan a lo largo del curso de los ríos un activo intercambio de caudales entre la escorrentía superficial y subterránea, dependiendo de las características locales del acuífero la importancia de la fracción que escurre en forma subterránea.

A partir de los cambios en P, ET y Q presentados en la [Figura 2.4](#), se puede observar que tres modelos climáticos (CCM4, IPSL y MIROC) proyectan una reducción de la precipitación anual de hasta 30% en la mayor parte de las cuencas, a excepción de un puñado de cuencas en el norte grande y parte de las cuencas de la zona Austral, donde se proyectan aumentos de hasta un 10% con respecto al promedio 1985-2015. En contraste, el modelo CSIRO proyecta reducciones de precipitación para prácticamente todo el país, pero especialmente para todo el Norte Grande, donde se proyectan disminuciones de hasta un 45%.

6.2.1. Impacto a nivel de la disponibilidad media anual de las cuencas

En relación con la escorrentía, tres modelos climáticos (CCM4, IPSL y MIROC) proyectan reducciones de escorrentía media anual para las cuencas de la zona Centro y Sur del país de hasta un 60% con respecto al período 1985-2015. Los mismos tres modelos proyectan

un aumento de la escorrentía en el norte grande, incluso superiores al 100% con respecto al período histórico.

Para un análisis más detallado de los impactos proyectados en la disponibilidad de agua, en el capítulo 2 se seleccionaron 11 cuencas representativas de las 4 macrozonas consideradas en el Balance Hídrico (DGA, 2022). Estas cuencas son: Lluta, Elqui, Choapa, Ligua, Aconcagua, Maipo, Rapel, Maule Biobío, Valdivia y Tierra del Fuego.

A partir de los resultados presentados en la [Figura 2.7](#), se proyecta para todas las cuencas, excepto Tierra del Fuego, una reducción de la precipitación de alrededor de un 10% como promedio de los 4 modelos climáticos, con disminuciones máximas del orden de 15% a 20% en la mayoría de las cuencas. Las cuencas de Lluta y Elqui muestran reducciones más significativas, de hasta 35% y 25%, respectivamente. En Tierra del Fuego se observan aumentos de hasta 5% de la precipitación anual para el período 2030-2060.

En relación con la escorrentía anual ([Figura 2.9](#)), todas las cuencas entre Ligua y Valdivia proyectan reducciones de entre 3% y 40% dependiendo de la cuenca y del modelo climático considerado. La cuenca de Ligua presenta las reducciones más significativas, de hasta casi un 40% con respecto al período 1985-2015. En el caso de la cuenca del río Lluta, tres modelos (CCSM4, IPSL, y MIROC) muestran aumentos de entre un 20% y 50% de la escorrentía anual, mientras que el modelo CSIRO proyecta una reducción del orden de 15%. Para la cuenca de Elqui, los modelos IPSL y MIROC sugieren reducciones significativas (15,8% y 32,5%), mientras los otros dos modelos sugieren aumentos de la escorrentía anual (0,8% y 10,3%). Para Choapa todos los modelos excepto CSIRO proyectan una reducción considerable de la escorrentía.

En la [Tabla 6.1](#) se presenta el rango (Min y Max) de los cambios de escorrentía relativos al período 1985-2015 a partir de la [Figura 2.9](#). Para todas las cuencas entre Ligua y Valdivia, todos los modelos proyectan una reducción de la escorrentía, esto es, tanto el máximo valor de escorrentía como el mínimo son inferiores al promedio histórico. Para las cuencas de Elqui y Choapa, es posible tanto un aumento como una disminución de escorrentía, aunque el rango se encuentra más bien hacia la reducción. En relación con el rango de dispersión, es decir la diferencia entre el máximo y el mínimo proyectado en base a distintos modelos climáticos, todas las cuencas de La Ligua al norte muestran intervalos superiores al 28%. Para la cuenca del río Lluta el rango de dispersión entre los modelos climático es el más significativo de todas las cuencas, superando el 66%. En este caso, el rango se ubica principalmente en la zona de aumento de escorrentía, que podría llegar al 50%. Las cuencas de Aconcagua hasta Tierra del Fuego muestran proyecciones mucho más similares entre los distintos modelos climáticos, con un rango de dispersión inferior al 16%. La cuenca de río Valdivia es la que presenta menor dispersión entre las proyecciones de escorrentía, inferior al 9% del promedio histórico.

Tabla 6.1. Rango de cambios en la escorrentía período 2030-2060 relativos a 1985-2015 (%).

Fuente: Elaboración propia a partir de la Figura 2.9, Capítulo 2.

Cuenca	Máximo	Mínimo	Rango (Max-Min)
Lluta	51,6%	-15,0%	66,6%
Elqui	10,3%	-32,5%	42,8%
Choapa	4,0%	-24,3%	28,3%
Ligua	-3,4%	-39,5%	36,1%
Aconcagua	-3,7%	-19,6%	15,9%
Maipo	-5,0%	-16,7%	11,7%
Rapel	-10,2%	-25,6%	15,4%
Maule	-3,7%	-16,8%	13,1%
Biobío	-4,6%	-16,8%	12,2%
Valdivia	-4,4%	-13,1%	8,7%
Tierra del Fuego	2,5%	-9,3%	11,8%

6.2.2. Impacto en la disponibilidad hídrica considerando la variación estacional de los caudales

Más allá de los efectos en los valores anuales de escorrentía, para analizar la escasez es relevante contar con la estacionalidad de la disponibilidad y demanda de agua. Como una aproximación a la estacionalidad en la disponibilidad de agua, se presentó en la [Tabla 2.1](#) la escorrentía, tanto histórica como proyectada, para las 11 cuencas seleccionadas. En la [Tabla 6.2](#) se presenta el cambio porcentual de la escorrentía relativo a la escorrentía de la estación del año durante el período histórico. Es posible observar para todas las cuencas, a excepción del río Lluta, la proyección más baja de escorrentía, que correspondería al peor escenario, es significativamente inferior a la escorrentía histórica para ambas estaciones del año. Solo las proyecciones para el río Lluta sugieren un aumento inequívoco (entre 30% y 107%) de caudal en el período abril-septiembre. En este caso, el rango entre modelos es de un 77%, que, aunque significativo en términos relativos, corresponde a un valor bastante pequeño en términos absolutos. En ese sentido, es importante hacer notar que los porcentajes de la [Tabla 6.2](#) se calculan con respecto de la escorrentía histórica del mismo período del año, y por lo tanto un porcentaje en el período abril-septiembre no es comparable con otro del período octubre-marzo. Esto significa que, por ejemplo, una reducción del 10% de la escorrentía en octubre-marzo no necesariamente se compensa con un aumento del 10% en la estación abril-septiembre, sino que dependerá del régimen hidrológico histórico.

Tabla 6.2. Cambio en la escorrentía a nivel estacional para cuencas seleccionadas (%).

Fuente: Elaboración propia.

Cuenca	Cambio estacional en la escorrentía (%)					
	Abril- Septiembre			Octubre -Marzo		
	Máximo	Mínimo	Rango	Máximo	Mínimo	Rango
Lluta	106,8%	29,5%	77,3%	53,9%	-44,2%	98,1%
Elqui	21,4%	-27,9%	49,3%	10,6%	-36,1%	46,7%
Choapa	14,3%	-27,8%	42,1%	-5,7%	-28,3%	22,6%
Ligua	9,7%	-43,4%	53,1%	-14,7%	-42,3%	27,7%
Aconcagua	3,0%	-18,9%	21,9%	-8,6%	-20,4%	11,8%
Maipo	7,7%	-16,7%	24,4%	-9,8%	-20,3%	10,5%
Rapel	4,0%	-25,2%	29,3%	-24,7%	-32,7%	8,1%
Maule	5,2%	-19,5%	24,6%	-13,2%	-23,2%	10,0%
Biobío	4,3%	-17,3%	21,6%	-14,6%	-26,6%	12,0%
Valdivia	-2,3%	-32,2%	29,9%	-7,1%	-49,8%	42,7%
Tierra del Fuego	13,6%	-0,9%	14,5%	-3,5%	-15,0%	11,5%

Cambios positivos en azul y negativos en rojo.

El grado de dispersión entre los modelos climáticos, representado por el rango de las proyecciones, muestra un comportamiento distinto para ambas estaciones del año. En general, el período abril-septiembre, correspondiente con la época en que se concentran las precipitaciones excepto para la cuenca de Lluta, muestra un comportamiento más dispar entre modelos que la temporada de estiaje. Esto se puede apreciar tanto en el hecho de que para todas las cuencas excepto Lluta y Valdivia, el rango de cambio proyectado abarca tanto un potencial aumento como una reducción de escorrentía, como en el amplio rango definido entre esos extremos, que varía entre un 22% y un 53%. En todos estos casos, el rango no se encuentra centrado en cero, sino desplazado significativamente hacia la disminución de la escorrentía.

En el período octubre-marzo, para todas las cuencas de Choapa al sur se proyecta una reducción de escorrentía, resultado consistente entre los distintos modelos climáticos. De esas cuencas, aquellas entre Aconcagua y Biobío presentan rangos entre mínimo y máximo del orden del 10%, lo cual sugiere una baja dispersión entre modelos climáticos y menor incertidumbre de las proyecciones. Las cuencas de Choapa y La Ligua presentan un rango de dispersión entre modelos climáticos de 23% y 28%, respectivamente. En el caso de la cuenca del río La Ligua, lo anterior implica posibles reducciones de escorrentía entre 15% y 42%.

Además de La Ligua, otro caso de reducción de escorrentía, pero con amplia incertidumbre entre modelos es Valdivia, donde la escorrentía podría disminuir entre 7% y 50%, lo que implica un rango de 43%. El caso de la cuenca de Elqui es particular, porque las proyecciones incluyen tanto un posible aumento de 10% como una reducción de 36% de la escorrentía, definiendo un intervalo de aproximadamente 50% de la escorrentía histórica de la temporada. Esto corresponde a más del doble del rango de incertidumbre en Choapa. Finalmente, la cuenca del río Lluta es la que muestra mayor incertidumbre en el cambio proyectado de escorrentía para la temporada octubre-marzo. En este caso, es posible desde un aumento del 54% hasta una reducción de 44% de la escorrentía con respecto al período histórico, lo cual significa un rango de 98%, indicando que la incertidumbre es el orden del promedio de escorrentía histórica para dicha temporada. Es importante señalar que en la cuenca de Lluta la escorrentía histórica se concentra prácticamente en su totalidad entre enero y abril. En la temporada octubre-marzo no es posible establecer una reducción significativamente superior en las cuencas intermedias, con respecto a los resultados globales.

Para los propósitos del presente informe resulta de especial importancia analizar la posible reducción de los caudales del período octubre-marzo, meses que en la generalidad de las cuencas son los más críticos para el abastecimiento de las demandas. Al respecto se puede destacar que la reducción máxima de los caudales esperada, de acuerdo con los resultados de las modelaciones según lo presentado en la [Tabla 6.2](#), son consistentemente mayores a las obtenidas para el mismo parámetro a nivel del caudal medio anual, según la [Tabla 6.1](#), con una reducción de la disponibilidad hídrica entre el Copiapó y el Biobío que varía entre un 20 y un 40%.

6.2.3. Impacto en la disponibilidad hídrica a nivel de las subcuencas superiores aportantes a los valles

Los valores de escorrentía presentados hasta aquí corresponden al global de toda la cuenca. Sin embargo, es relevante conocer la disponibilidad asociada a estaciones fluviométricas localizadas en los puntos de ingreso de los cauces a los valles principales de las cuencas, donde se concentran las demandas para distintos usos. En la [Tabla 6.3](#) se presenta el rango de proyecciones de cambio de escorrentía para las temporadas abril-septiembre y octubre-marzo en una muestra de estaciones seleccionadas en la [Capítulo 2](#). Aunque la información de la [Tabla 6.3](#) no corresponde a las cuencas analizadas en el punto anterior ([Tablas 6.1 y 6.2](#)), entrega antecedentes valiosos para ilustrar la situación que pudiera afectar en la práctica a los puntos de los cauces donde se instalan la mayoría de las captaciones.

Tabla 6.3. Cambio en la escorrentía a nivel estacional para cuencas superiores seleccionadas.

Fuente: Elaboración propia.

Cuenca	Rango estacional de cambio en la escorrentía (%)					
	Abril- Septiembre			Octubre -Marzo		
	Máximo	Mínimo	Rango	Máximo	Mínimo	Rango
Huasco en Santa Juana	32,1%	-41,5%	73,6%	-10,4%	-49,3%	38,8%
Aconcagua en Chacabuquito	12,3%	-14,0%	26,2%	-6,5%	-19,9%	13,4%
Maipo en El Manzano	20,7%	-8,7%	29,4%	-9,9%	-22,3%	12,4%
Mapocho en Los Almendros	18,2%	-11,8%	30,1%	-10,7%	-26,3%	15,6%
Maule en Armerillo	12,9%	-10,6%	23,4%	-16,1%	-28,3%	12,2%
Ñuble en San Fabián	9,5%	-14,5%	24,0%	-19,8%	-30,1%	10,3%
Toltén en Villarrica	2,3%	-15,5%	17,8%	-5,7%	-16,1%	10,4%

Cambios positivos en azul y negativos en rojo.

En la [Tabla 6.3](#) se aprecia que todas las estaciones muestran un comportamiento similar. Para la temporada abril-septiembre se proyectan tanto aumentos como disminuciones de escorrentía (Máximo positivo y mínimo negativo), con rangos porcentuales de incertidumbre entre modelos que superan al de la temporada octubre-marzo para cada una de las cuencas. Además, para todas las cuencas se observa un rango más amplio en la temporada abril-septiembre que en octubre-marzo, lo que sugiere mayor incertidumbre en las proyecciones de escorrentía durante la temporada pluvial. Para la temporada octubre-marzo, se proyecta en forma inequívoca una disminución de escorrentía para todas estas cuencas superiores, con rangos de incertidumbre entre 10% y 16%. Solo Huasco en Santa Juana presenta un rango más significativo de dispersión entre modelos, proyectando reducciones de entre 10% y 49%.

Comparando los resultados de las [Tablas 6.2 y 6.3](#) para las cuencas de Aconcagua, Maipo y Maule, es posible identificar un comportamiento cualitativamente similar. Sin embargo, las cuencas superiores muestran un rango más amplio de incertidumbre en ambas temporadas, pero especialmente en abril-septiembre, alcanzando un 30% en Mapocho en Los Almendros, mientras la cuenca de Maipo en su globalidad presenta un rango de 24%. Respecto de la reducción de la disponibilidad de agua en el período crítico de octubre-marzo según las modelaciones más desfavorables, las que resultan de especial interés para una política prudencial, conviene destacar que las estimaciones para la cuenca superior muestran una reducción de los caudales levemente mayor que las obtenidas para el total de la cuenca. Así, en el río Aconcagua la reducción en ambos casos alcanza al 20%, en el Maipo sube de 20 a 22% y en el Maule pasa del 23 al 28%.

De acuerdo con estos antecedentes, y considerando el rango de incertidumbre que presentan las actuales modelaciones, es posible asumir que, en general, el análisis de la afección a la disponibilidad hídrica asociada al cambio climático puede quedar razonablemente reflejada por las estimaciones realizadas para el período octubre-marzo a nivel de la totalidad de la cuenca.

Una situación especial, no incluida en la conclusión anterior, se presenta en las cuencas con una importante presencia de superficies con glaciares, considerando que los antecedentes muestran que la disminución de la superficie con glaciares de las últimas décadas resulta alarmante. Por ejemplo, en la cuenca del Maipo, se ha estimado que entre los años 1955 y 2000 la reducción alcanzó a un 32% (Ayala *et al*, 2019). En estos casos, la disponibilidad hídrica en casos de extrema sequía en los meses de verano recibe un aporte sustantivo de caudales de deshielo, cuyo valor es independiente de la condición meteorológica del año. Así, en el escenario de cambio climático la disminución de las superficies con glaciares tiene un impacto directo en la disponibilidad hídrica en los meses de verano de años de sequía, adicional al impacto de las condiciones hidrológicas del año. En Chile esta situación se presenta en las cuencas del Aconcagua, Maipo y Rapel. Al respecto, las simulaciones incluidas en el estudio de actualización del Balance Hídrico Nacional (DGA, 2022) estiman para el período 2030-2060, en las latitudes de Chile central, una reducción de la superficie glacial del 75% con el correspondiente impacto en los caudales aportados por los glaciares. En el caso de la cuenca superior del Maipo en los meses críticos de verano las simulaciones de los distintos modelos muestran una disminución a mediados de siglo de entre el 25 y el 50%. De acuerdo con estos antecedentes, en las cuencas con presencia significativa de glaciares el impacto del cambio climático en la disponibilidad hídrica en años extremos debiera ser aún mayor al indicado en las estimaciones de las [Tablas 6.2 y 6.3](#).

6.3. Evolución esperada de las demandas

Las demandas de agua a nivel regional para consumo humano, riego agrícola, e industria y minería, fueron proyectadas en los capítulos 3, 4 y 5 del presente trabajo. En la [Tabla 6.4](#) se presenta un resumen. En general, las proyecciones de demanda agrícola y de agua potable no son muy superiores a los períodos recientes, del año 2015 y 2022, según la base considerada para la proyección. Las demandas industriales y mineras, por su parte, sí presentan un aumento significativo, superior al 40% como total nacional. Como se vio en el Capítulo 5, este aumento corresponde casi exclusivamente a la demanda industrial no minera, incluso considerando que la demanda de agua continental para uso minero se reduce fuertemente en algunas cuencas debido a la incorporación de nuevas fuentes de agua, como agua de mar, desalada y no desalada, así como reúso de aguas servidas tratadas combinadas con mecanismos de *swaps* de agua.

Tabla 6.4. Resumen de Demandas para Distintos Usos. Fuente: Elaboración propia según las estimaciones de los capítulos 3, 4 Y 5.

Región	Dda. Agrícola (Hm ³ /año)			Dda. AP (Hm ³ /año)		Dda. Ind/Min (Hm ³ /año)	
	2015	2050 (ET)	2050 (ET+ Ef)	2022	2050	2015	2040
Arica-Parinacota	73,00	80,30	75,28	42,68	46,43	0,77	1,14
Tarapacá	17,09	18,80	17,63			55,92	58,05
Antofagasta	46,23	50,85	47,67	43,71	47,68	180,64	135,69
Atacama	140,22	154,24	144,60	23,01	24,99	39,97	33,58
Coquimbo	462,09	472,09	442,58	63,33	68,22	46,71	48,94
Valparaíso	672,34	746,30	699,66	184,02	199,97	64,13	63,52
Metropolitana	1269,82	1409,50	1321,41	828,60	903,81	61,91	124,82
O'Higgins	1723,42	1913,00	1793,44	99,34	106,62	83,00	92,95
Maule	2822,60	3133,09	2937,27	101,41	108,88	33,31	62,63
Ñuble	475,98	528,34	495,32	46,23	49,64	350,50	544,57
Biobío				169,45	184,11		
Araucanía	172,48	193,18	181,11	65,12	70,08	25,82	60,44
Los Ríos	5,46	6,12	5,74	21,05	22,37	75,49	196,06
Los Lagos	2,61	2,92	2,74	86,80	93,64	137,94	211,42
Aysén	0,73	0,82	0,77	6,76	7,23	3,86	3,66
Magallanes				10,77	11,72	1,19	1,95
TOTAL	7884,07	8709,55	8165,22	1781,49	1933,68	1159,95	1637,46

Respecto de las demandas agrícolas conviene destacar los siguientes aspectos del análisis de las demandas, según lo que se indica en el capítulo 4:

- Considerando que los resultados de los últimos censos muestran un estancamiento o descenso de las superficies regadas del Biobío al norte se asume que no resulta ni prudente ni realista la ampliación de esas zonas regadas.
- Una situación distinta se presenta más al sur, donde las condiciones climáticas incentivarán la incorporación de nuevas superficies al riego.
- El incremento de la eficiencia de aprovechamiento del agua en la agricultura de Biobío al norte solo permite compensar parcialmente el incremento de las demandas debido al aumento de la evapotranspiración de los cultivos.

6.4. Impacto de la evolución de la oferta y demanda en los niveles de estrés hídrico

A partir de los datos históricos y de las proyecciones de demanda y disponibilidad de agua, es posible estimar un indicador de estrés hídrico, definido como la relación porcentual entre la demanda y la disponibilidad, para regiones que sean asimilables a cuencas hidrográficas DGA contenidas en el Balance Hídrico Nacional (DGA, 2022). Este indicador ha sido utilizado en informes a nivel mundial como una aproximación sencilla al tema de la escasez, considerándose el umbral del 40% como representativo de un valor alto o crítico^{1,2}. En la [Tabla 6.5](#) se presentan los datos de disponibilidad y demandas de aguas como volumen anual para las regiones entre Coquimbo y Biobío, donde el balance oferta-demanda hídrica pudiera presentar una mayor sensibilidad frente al cambio climático.

Tabla 6.5. Resumen disponibilidad y demanda anual de agua en regiones seleccionadas

Región	Disponibilidad (Hm ³ /año)	Disminución disponibilidad (%)		Demanda (Hm ³ /año)	
	2015	Mín.	Máx.	2015	2050
Coquimbo	2.301	16	33	572	560
Valparaíso	2.880	15	20	920	963
R. Metropolitana	6.812	15	17	2.160	2.350
O'Higgins	7.761	10	26	1.906	1.993
Maule	24.565	4	17	2.957	3.109
Ñuble/Biobío	41.929	5	17	1.042	1.274

A partir de los datos de la [Tabla 6.5](#) es posible estimar el indicador de estrés hídrico que se muestra en la [Tabla 6.6](#). De los resultados es posible apreciar que al año 2015, para las regiones consideradas entre Coquimbo y O'Higgins, la demanda representaba entre un 25% y un 32% de la disponibilidad anual. Cabe advertir que en estos valores se incluye como referencia la menor superficie de riego de 2015, lo que incide especialmente en el cálculo del indicador de la región de Coquimbo, la que sin esa merma presenta un indicador similar a los de las regiones localizadas inmediatamente al sur.

¹ Alcamo, Joseph, Thomas Henrichs, and Thomas Rosch. World Water in 2025: Global modeling and scenario analysis for the World Commission on Water for the 21st Century. Kassel World Water. Series Report No. 2, Center for Environmental Systems Research, Germany: University of Kassel, 2000.

² WRI. Technical Note Aqueduct 4.0: Updated decision-relevant global water risk indicators.

Tabla 6.6. Estimación de Indicador de Estrés Hídrico (%) en regiones seleccionadas de Chile

Región	2015	Mín. 2050	Máx. 2050
Coquimbo	25	30	36
Valparaíso	32	38	42
R. Metropolitana	32	37	42
O'Higgins	25	27	35
Maule	12	13	15
Ñuble/Biobío	2	3	4

Al año 2050 se espera que el indicador de estrés aumente en todos los casos, alcanzando valores de hasta 42% en las regiones de Valparaíso y Metropolitana para el escenario más desfavorable de reducción de disponibilidad. La situación es bastante más holgada hacia el sur, con un indicador de estrés hídrico al 2015 de 12% y 2% para Maule y Ñuble/Biobío. En estas regiones, el estrés puede aumentar hasta un 15 y un 4%, respectivamente.

Considerando que el riego agrícola constituye la mayor demanda consuntiva de agua y que presenta una marcada estacionalidad, se presenta a continuación una estimación y análisis del estrés hídrico en la temporada octubre-marzo. Para este análisis se consideró que este período concentra la totalidad de la demanda agrícola, mientras que las demandas de otros usos se distribuyen proporcionalmente en el año. En la [Tabla 6.7](#) se presentan los datos y estimación del estrés hídrico al 2015 y proyectado al 2050 para el escenario de mayor reducción de disponibilidad estacional.

Tabla 6.7. Indicador estrés hídrico considerando el período octubre-marzo

Región	Disponibilidad octubre-marzo (Hm ³)		Demanda octubre-marzo (Hm ³)		Estrés hídrico octubre-marzo (%)	
	2015	2050	2015	2050	2015	2050
Coquimbo	1.296	827	517	501	40	61
Valparaíso	1.654	1.317	796	831	48	63
R. Metropolitana	3.724	2.969	1.715	1.836	46	62
O'Higgins	3.689	2.481	1.815	1.893	49	76
Maule	9.778	7.509	2.890	3.023	30	40
Ñuble/Biobío	10.504	7.705	674	792	6	10

En la [Tabla 6.7](#) se puede observar que el estrés hídrico aumenta significativamente con respecto al análisis anual. En la temporada octubre-marzo, al año 2015 el estrés hídrico entre Coquimbo y O`Higgins se ubica entre 40% y 49%, duplicándose con respecto al valor anual para la región de O`Higgins. Para la región del Maule, el estrés hídrico en la temporada de riego corresponde a más del doble del estrés hídrico anual. En el caso de las regiones de Valparaíso y Metropolitana, el estrés hídrico al año 2015 durante la temporada de riego se multiplica por 1,5 con respecto al estrés anual.

Al año 2050, el indicador de estrés hídrico durante la temporada de riego podría superar el 60% entre Coquimbo y Metropolitana, y alcanzar hasta un 76% en la región de O`Higgins. La región del Maule, por su parte, podría experimentar un estrés hídrico al 2050 de 40%, equivalente a la región de Coquimbo al año 2015. A estos resultados habría que agregar las consideraciones sobre la disminución del aporte de las áreas con glaciares señaladas anteriormente. Estos resultados evidencian la necesidad de tomar acciones que permitan enfrentar la tendencia de creciente escasez de agua en la mayor parte del territorio nacional, con énfasis en las regiones entre Coquimbo y Maule y un especial grado de urgencia desde la RM al norte.

CAPÍTULO 7

Impacto del cambio climático en la seguridad contra aluviones e inundaciones

Debido a sus particulares características geográficas y climáticas, distintas locaciones en Chile se ven periódicamente afectadas por inundaciones y aluviones que en muchos casos han producido impactos socioeconómicos significativos. Estos eventos tienen distintas causas, siendo relevantes típicamente factores climáticos, pero también los relacionados con el uso de suelo y la ocupación de zonas inundables. Actualmente, y en función de la experiencia internacional, así como de eventos recientemente acaecidos, existe una preocupación en el país sobre el posible impacto del cambio climático en la ocurrencia futura de inundaciones y aluviones, particularmente en lo referido a cambios en la frecuencia y magnitud de estos eventos. Este capítulo analiza el estado del arte y la práctica en lo referido a riesgos hidrometeorológicos y cambio climático, para luego presentar estrategias para enfrentar estos riesgos.

7.1. Introducción

El cambio climático es una amenaza global y uno de los mayores desafíos para el planeta. Chile es altamente vulnerable a las consecuencias del fenómeno, lo que está trayendo nuevos escenarios en términos de temperatura, precipitaciones y biodiversidad (Pinto, 2019). En particular, se espera que el cambio climático impacte varias condiciones hidroclimáticas en Chile. Las proyecciones climáticas indican que habrá una reducción en las precipitaciones anuales y estacionales, mientras que las temperaturas aumentarán (e.g., Chadwick *et al.*, 2018). Estos cambios afectarán gravemente los recursos hídricos, provocando una reducción y un desplazamiento temporal en los caudales (e.g., Vicuña *et al.*, 2011; Meza *et al.*, 2012; Vicuña *et al.*, 2012; Demaría *et al.*, 2013). El capítulo 2 del presente informe presenta en detalle los impactos del cambio climático en los recursos hídricos del país.

Sin embargo, las reducciones esperadas en los caudales no están necesariamente relacionadas con una disminución en la probabilidad de inundaciones. Aunque la precipitación anual y los caudales están mostrando reducciones significativas en buena parte de Chile, particularmente la zona comprendida desde la región de Coquimbo a la región de Los Lagos, no es claro que las crecidas significativas, inundaciones y aluviones lo estén haciendo. Una serie de eventos recientes parecieran reflejar un aumento en caudales máximos o un aumento en la frecuencia de crecidas significativas conducentes a afectaciones importantes, pérdidas de vidas humanas y daños a la infraestructura pública y privada. Parece entonces necesario evaluar en detalle el impacto del cambio climático en la seguridad contra aluviones, crecidas e inundaciones, entendiendo que los cambios en el clima son acompañados por otras dinámicas territoriales que afectan la vulnerabilidad y la exposición de la población.

El objetivo de este capítulo es analizar los impactos del cambio climático en los riesgos de tipo hidrometeorológicos asociados a los aumentos significativos de escurrimiento de agua, ya sea aluviones y crecidas, y su posterior manifestación en la forma de inundaciones. Junto a esto, se proponen acciones y soluciones para enfrentar el aumento de estos riesgos. El lector es referido al [Anexo V.1](#), donde se presenta un glosario con definiciones relevantes para el capítulo.

7.2. Crecidas y aluviones en Chile

Tipos de inundaciones. En su larga y estrecha extensión latitudinal, Chile abarca una amplia gama de zonas climáticas y presenta una geografía dominada por la Cordillera de los Andes y la Cordillera de la Costa (Toledo y Zapater, 1991). El clima, la actividad sísmica y volcánica, y la presión antrópica sobre las cuencas hacen que el territorio sea propenso a la ocurrencia de diferentes tipos de crecidas y eventuales inundaciones, en particular de carácter fluvial y pluvial (Di Castri y Hayek, 1976; Peña y Klohn, 1990). Otro tipo de inundaciones desencadenadas por la interacción con el mar (es decir, inundaciones costeras y marejadas), eventualmente también afectas al cambio climático, no se consideran en este capítulo. Rojas *et al.* (2014) proponen clasificar las inundaciones como:

1. inundaciones fluviales detonadas por precipitación,
2. inundaciones detonadas por procesos nivo-glaciares y vaciamiento repentino de lagos glaciares (GLOF),
3. inundaciones detonadas por acciones humanas, la gestión del territorio o causada por la infraestructura, y
4. las inundaciones pluviales urbanas.

A estos tipos se agregan las originadas por procesos volcánicos y co-sísmicos, no vinculables directamente al cambio climático. Claramente, muchas de las inundaciones comparten características de más de uno de los tipos identificados por Rojas *et al.* (2014), siendo común la existencia de más de una detonante, como por ejemplo una precipitación importante junto con una mala gestión territorial. El [Anexo V.2](#) detalla cada tipo de inundación.

Si bien los distintos tipos de inundaciones propuestos por Rojas *et al.* (2014) se han observado en todo el territorio, se identifica un comportamiento general a tener en cuenta para guiar acciones y soluciones futuras. Por una parte, las *inundaciones fluviales producidas por precipitaciones* se producen en todo el país, aunque con algunas diferencias generalizables. Estos eventos son mayoritariamente de carácter cálido en el Norte Grande y Norte Chico, donde las precipitaciones pueden ser significativas, pero donde hay en muchos casos temperaturas concurrentes altas, lo que genera cantidades inusualmente altas de escorrentía. Por otra parte, hacia el sur las lluvias cálidas también se manifiestan, pero adquieren más relevancia su magnitud, la que puede ser significativa y prolongada. La mayoría de las inundaciones detonadas por procesos nivo-glaciares y GLOFs ocurren desde la zona centro, con algunos eventos de desprendimientos de glaciares hacia el sur. Particularmente, la incidencia de estos eventos en la Patagonia es mayor, aunque también han ocurrido en la cuenca del Río Copiapó. En lo referido a las *Inundaciones detonadas por acciones humanas y gestión del territorio*, destaca la ocurrencia de aluviones por activación de quebradas en el norte de Chile. En este caso se confabula una alta precipitación con una ocupación territorial inadecuada, muchas veces informal, lo que conlleva una alta exposición y grandes afectaciones sobre viviendas y personas. Por último, las *inundaciones pluviales urbanas* se manifiestan mayoritariamente en las ciudades intermedias y de gran tamaño del país, localizadas entre la región de Coquimbo y de los Lagos. Es en este territorio donde el desarrollo urbano ha tomado más fuerza, muchas veces sin una visión hacia la reducción de la exposición y el control de la escorrentía adicional que se va generando producto de la impermeabilización de los suelos.

7.3. Aspectos institucionales y normativos en la gestión del riesgo de desastre de origen hidrometeorológico

Si bien existen muchas direcciones y divisiones del Estado, que tienen alguna competencia relacionada con el recurso hídrico, pocas entidades se relacionan con la gestión de amenazas hidrometeorológicas: La Dirección General de Aguas (DGA) y la Dirección de Obras Hidráulicas (DOH) del Ministerio de Obras Públicas (MOP), y el Ministerio del Medio Ambiente (MMA). La DGA está a cargo del monitoreo de variables hidrometeorológicas y, en parte, de la evaluación de amenaza hidrometeorológica a través de su manual para el cálculo de crecidas. Esta dirección

además autoriza obras hidráulicas y modificaciones de cauce, y está a cargo de la gestión de obras mayores, la operación de embalses durante crecidas, y la prevención de obras cuyo deterioro pueda causar riesgo. Por otra parte, la DOH tiene competencias principalmente en el diseño, desarrollo y operación de infraestructura hidráulica, particularmente dedicada a la protección de cauces y el drenaje urbano.

7.4. Marco normativo: leyes y políticas

En la actualidad, hay una normativa, conformada principalmente por leyes y políticas, orientada a los distintos aspectos involucrados en el riesgo de desastres de origen hidrometeorológico. Esta normativa se ha desarrollado tanto para la planificación y gestión territorial, la mitigación y adaptación al cambio climático, así como también para el control de aluviones, crecidas, inundaciones y drenaje urbano.

7.5. Manuales y herramientas de diseño relacionados con la gestión del riesgo hidrometeorológico

Junto al marco normativo descrito en el [Anexo V.3](#), actualmente se utilizan manuales y herramientas de distinto origen y antigüedad en el diseño y análisis de obras de infraestructura condicionadas por eventos climáticos, ya sea para proteger otra infraestructura, servicios o a la misma población, o para funcionar de buena manera en su propia operación. A continuación, se describen someramente los principales instrumentos y manuales utilizados en el diseño hidrológico e hidráulico de infraestructura, los que se implementan en las tareas asociadas a las acciones descritas en los diferentes marcos normativos previamente señalados.

Precipitaciones de 1, 2 y 3 días. Documento de la DGA (1987) que proporciona mapas de isoyetas de precipitaciones máximas de 24, 48 y 72 horas para estimar precipitaciones de diseño, y apoyar el cálculo de caudales máximos para obras hidráulicas. Dada la antigüedad del documento, la información que proporciona se suele complementar con los registros actualizados en diversas estaciones dentro del territorio nacional, así como con productos grillados definidos para todo el país como, por ejemplo, CR2Met (Boisier, 2023)

Manual de Carreteras. Manual de la Dirección de Vialidad (MOP, 2024), de actualización periódica, que entrega criterios, políticas y metodologías de diseño hidrológico para obras viales. Incluye curvas IDF y métodos de estimación de caudales máximos.

Manual de Cálculo de Crecidas. Manual de la DGA (DGA, 1995) que propone métodos simples para la estimación de la escorrentía directa y de caudales extremos en cuencas con poca o nula información hidrológica.

Manual de Drenaje Urbano. Manual de la DOH (MOP, 2013) orienta la planificación, diseño, construcción y operación de redes de drenaje de aguas lluvias. Proporciona información histórica y métodos de estimación de caudales de diseño, junto con recomendaciones para la adaptación, incluyendo monitoreo y actualización de información y planes maestros, diseño adaptativo de soluciones, y promoción de enfoques multifuncionales

Planes Maestros de Aguas Lluvia. Aunque no son documentos con métodos de diseño hidrológico/hidráulico, los planes maestros caracterizan la hidroclimatología de relevancia para el control de las aguas lluvias, evalúan los sistemas de drenaje existentes y proponen soluciones priorizadas de drenaje. En su mayoría, los planes maestros no consideran el cambio climático, aunque sí proyectan cambios demográficos y de uso de suelo.

7.6. Cambio climático e impacto en fenómenos hidrometeorológicos extremos

El posible cambio en el comportamiento de las precipitaciones extremas y de crecidas e inundaciones es un tema de relevancia para el país. En términos teóricos, el cambio climático intensifica el ciclo hidrológico al aumentar la temperatura atmosférica, lo que eleva la capacidad del aire de retener vapor de agua. Esta mayor disponibilidad de agua debiese favorecer precipitaciones más intensas cuando se dan las condiciones de inestabilidad, incrementando la posibilidad de tormentas extremas. En consecuencia, las cuencas pueden recibir volúmenes de agua superiores en cortos periodos de tiempo, generando crecidas más abruptas y peligrosas. Por otra parte, los denominados eventos cálidos debiesen tender al alza dado el aumento generalizado de las temperaturas. Con temperaturas altas, grandes porciones de la cuenca recibirían precipitación líquida, la que eventualmente podría además caer sobre acumulación nival previa, lo que llevaría a magnitudes de escorrentía altas, así como la erosión y arrastre de mucho sedimento. Ahora bien, el aumento esperado tanto de la frecuencia de las precipitaciones intensas como de eventos de precipitación cálida se manifestará en las distintas cuencas o localidades dependiendo de los patrones geográficos y climáticos dominantes de estos lugares.

En esta sección se busca comprender mejor la manera en la que históricamente se ha estado manifestado el cambio climático en lo referido a estas condiciones de precipitación y temperatura detonantes de crecidas significativas. Por otra parte, se analiza a la luz de las proyecciones vigentes de cambio climático lo que se espera a futuro para el país.

7.7. Tendencias históricas recientes

Precipitaciones máximas. En el reciente estudio de la DOH del MOP (DOH, 2025) “*Estudio de caracterización de los eventos de precipitaciones y crecidas de ríos ocurridos en junio y agosto de 2023 en la zona central de Chile*” se realiza un análisis del comportamiento histórico de las precipitaciones significativas. En particular se evaluó posibles tendencias en las precipitaciones diarias máximas anuales en 15 estaciones pluviométricas del Río Rapel, 8 del río Mataquito, 31 del río Maule, 20 del río Itata y 18 del río Biobío. El análisis de tendencia basado en la significancia de la pendiente de la regresión lineal ajustada a las precipitaciones diarias máximas anuales vs. tiempo arrojó para todas las estaciones un coeficiente de regresión negativo, reflejando una tendencia a la disminución generalizada en las últimas cuatro décadas, tanto si se consideran las series históricas hasta 2022, como si se incluye también el año 2023, año en que ocurrieron las crecidas significativas de junio y agosto. De las 92 estaciones analizadas en la zona, 61 presentan una tendencia a la disminución, con un nivel de confianza del 80%, cuando se considera la serie hasta 2022. Al incluir el año 2023, 41 estaciones mantienen esta tendencia significativa. El efecto de incluir el año 2023 en el análisis de tendencia es más evidente en las cuencas del Rapel, Mataquito y Maule, mientras que en las cuencas del Itata y Biobío el impacto es mínimo.

Estos resultados se condicen con lo reportado por la Dirección Meteorológica de Chile, dirección que actualiza periódicamente el comportamiento de índices climáticos extremos, indicadores que permiten evaluar cambios de largo plazo de eventos extremos climáticos definidos a partir de datos diarios de precipitación y temperatura. Por ejemplo, las **Figuras 7.1 y 7.2** muestran la tendencia de la precipitación máxima diaria en el año a lo largo del territorio nacional. La **Figura 7.1** confirma —y generaliza— lo reportado por DOH (2025), identificando tendencias neutras o a la baja de esta variable en prácticamente todo Chile. Sólo en Puerto Aysén hay una tendencia importante al alza, de 5,2 mm/década, mientras que en Chile central hay significativas tendencias a la baja. A modo de ejemplo, esta tendencia es de -4,3 mm/década en Estación Liceo Agrícola El Carmen de San Fernando, -7,4 mm/década en la estación Embalse El Yeso, o de -9,7 mm/década en la Estación Rodelillo en la costa de la Región de Valparaíso. Por otra parte, la **Figura 7.2** muestra bajas importantes en la cantidad de días con lluvias significativas al año, medidos a través del indicador R20mm (i.e. número de días en el año con precipitación sobre 20 mm). Esta disminución es de entre 1 y 2,3 días por década en la zona centro-sur, y de hasta 4 días por década en Chiloé.

En resumen, la evidencia es bastante robusta con respecto al comportamiento de las precipitaciones extremas diarias. Estas no mostrarían tendencia o estarían tendiendo a la baja, tanto en magnitud como en frecuencia u ocurrencia anual. Esta tendencia es más fuerte en la zona centro-sur del país, y menos clara en los extremos norte y austral. Faltan estudios que evalúen la existencia de tendencias para duraciones más cortas, particularmente horarias.

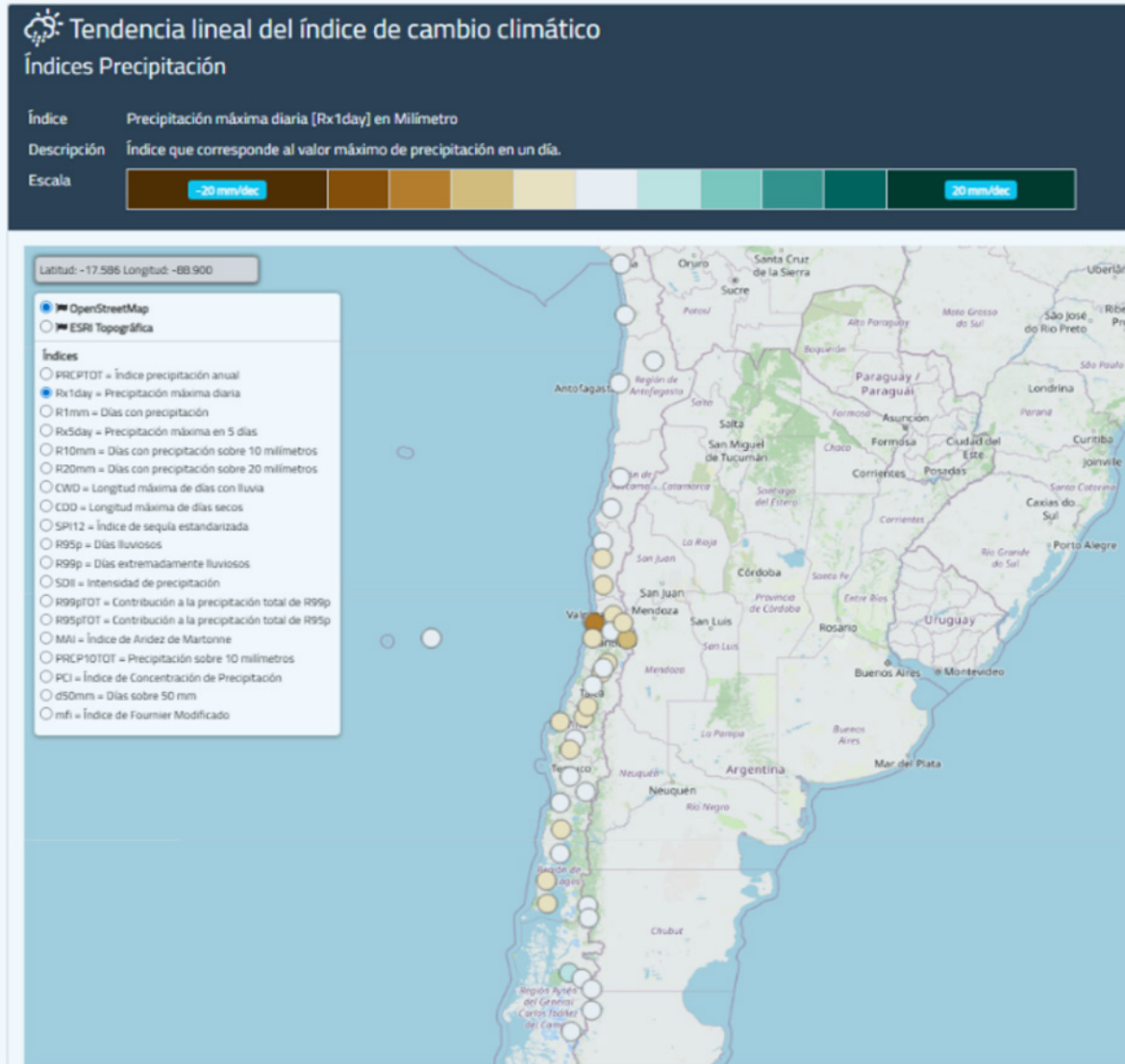


Figura 7.1. Tendencia lineal para todo el territorio nacional en (a) precipitación diaria máxima anual para todo el territorio nacional. Fuente: Dirección Meteorológica de Chile <https://climatologia.meteochile.gob.cl/application/historico/mapaIndicesClimaticos/0>

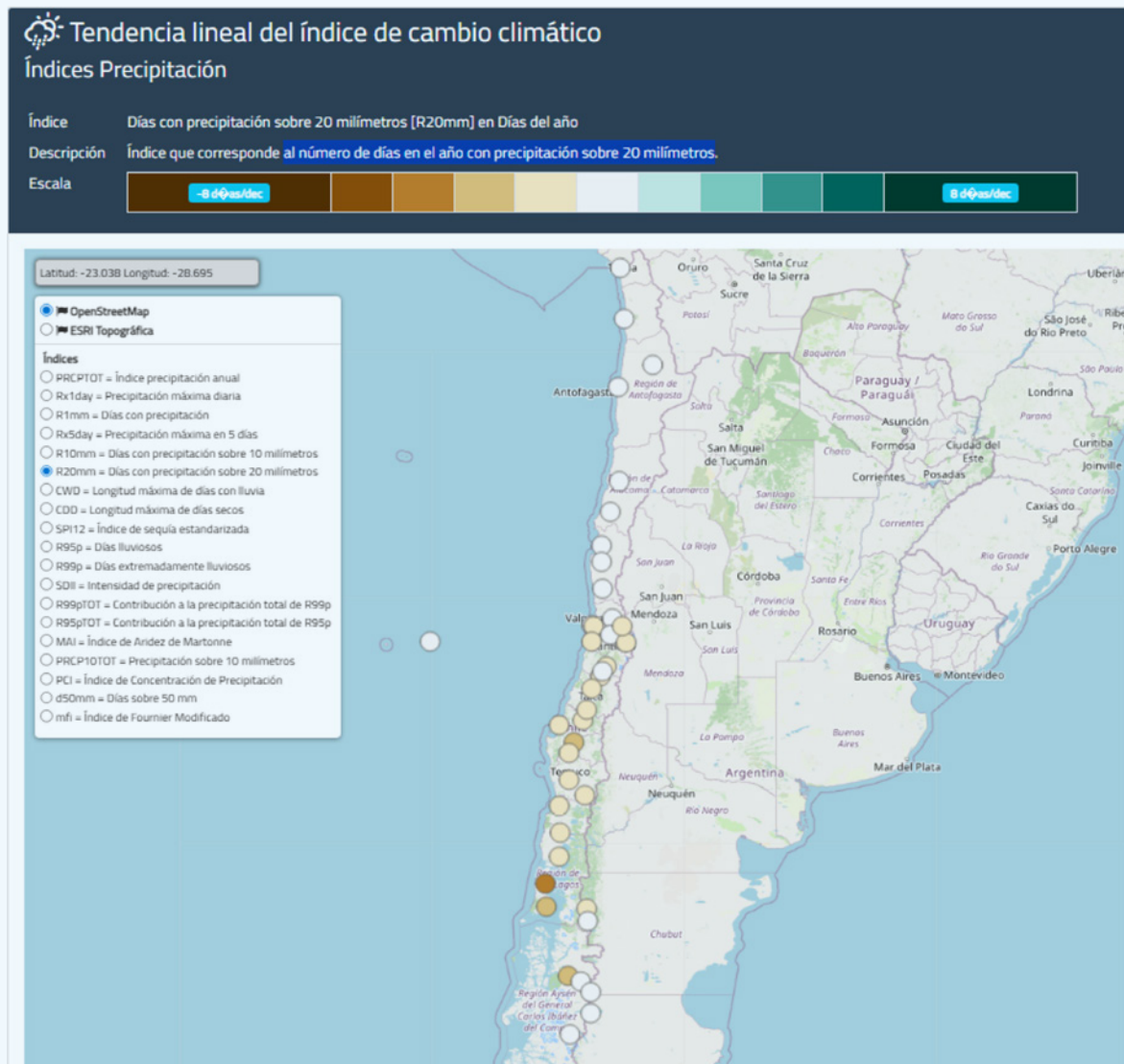


Figura 7.2. Tendencia lineal para todo el territorio nacional en días al año con precipitación mayor a 20 mm. Fuente: Dirección Meteorológica de Chile <https://climatologia.meteochile.gob.cl/application/historico/mapaIndicesClimaticos/0>

Temperaturas y ubicación de la isoterma 0 °C en días de lluvia. La DOH (2025) también presenta un análisis de la evolución histórica de la elevación de la isoterma 0 °C durante días con precipitación por año, encontrándose una tendencia al alza significativa. La **Tabla 7.1** muestra, para distintas cuencas de la zona centro-sur del país, el aumento de la elevación promedio de la isoterma 0 °C en los días de lluvia en m/década, y del área aportante en km² que recibe precipitación líquida. El alza se presenta en términos del área involucrada y en porcentaje del área total de la cuenca (%). En general, hay un alza de la elevación de la isoterma 0 °C del orden de 75-100 m/década, con excepción de la cuenca del Río Biobío, donde este aumento ha sido incluso mayor (169 m/década). También se observa que, durante todo el periodo de análisis, el que recibe precipitación líquida ha aumentado en cada cuenca significativamente, llegándose a una situación bastante notable en la cuenca del Río Biobío, donde esta área aportante ha aumentado, en promedio, en un 22%.

Tabla 7.1. Tendencia histórica promedio de la posición de la isoterma 0 °C en días con lluvia para cuencas de la zona centro-sur. Fuente: DOH (2025).

Cuenca	Rapel	Mataquito	Maule	Itata	Biobío
Aumento de elevación de la isoterma 0 °C por década (m/déc)	+98	+74	+82	+99	+169
Aumento de área aportante durante periodo 1983-2023 (km ²) y (%)	+676 (+4,9%)	+361 (+5,7%)	+1.612 (+7,7%)	+833 (+7,4%)	+8.744 (+22,4%)

Entre paréntesis se muestra el porcentaje del área total de la cuenca asociada al aumento de área en el periodo analizado.

Por otra parte, DOH (2025) también realiza un análisis conjunto de la posición de la isoterma 0 °C y la ocurrencia de precipitación, con objeto de evaluar el comportamiento histórico de las precipitaciones cálidas. Para este propósito, se evaluó la cantidad de días con precipitación por año en los que la isoterma 0 °C se ubicó por encima del percentil 90 histórico. Los resultados, presentados en la **Figura 7.3**, muestran que, a partir del año 2010, se observa un aumento en todas las cuencas en la cantidad de días de precipitación concurrentes con una altura de isoterma 0 °C elevada y, por lo tanto, una mayor área aportante que recibe precipitación líquida y contribuye al escurrimiento directo.

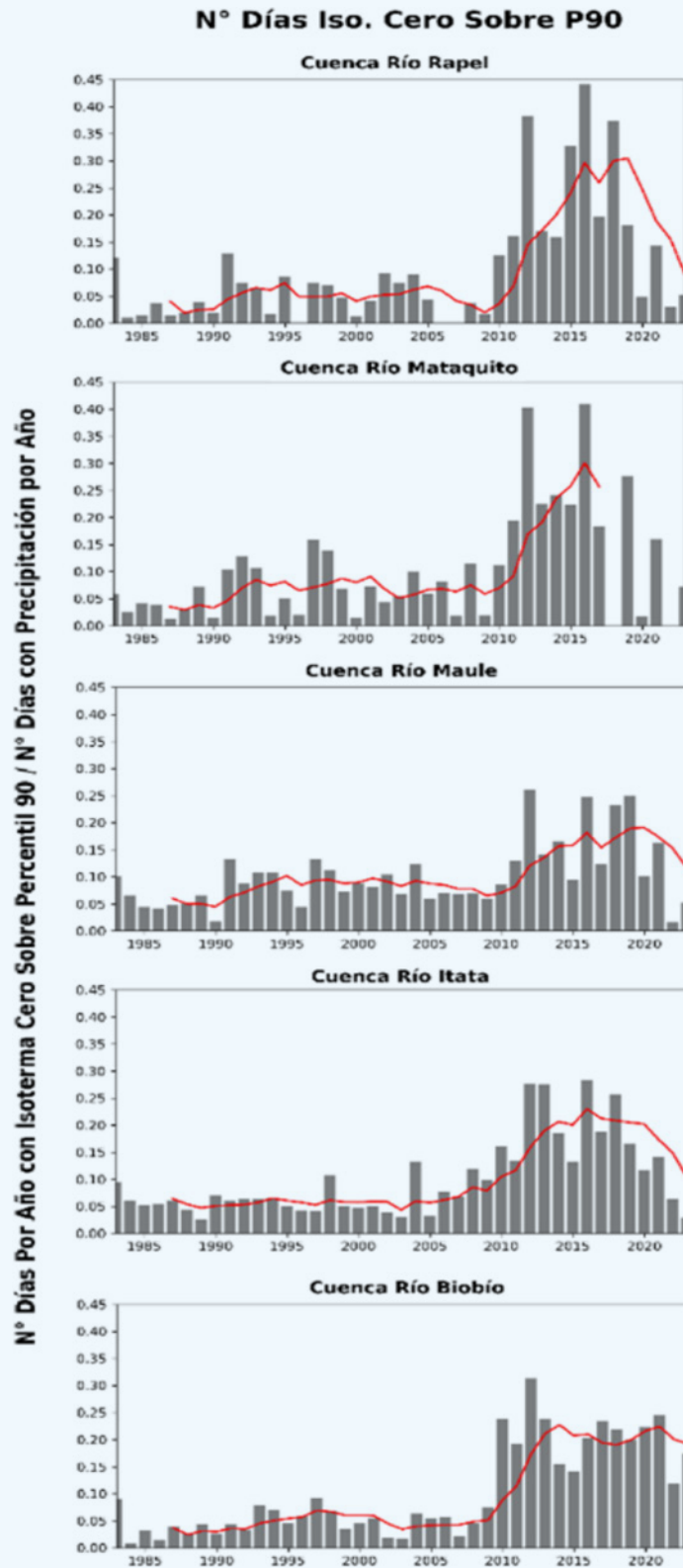


Figura 7.3. Porcentaje de días por año con precipitación e isoterma 0 °C sobre percentil 90 histórico. Fuente: DOH (2025).

Además, DOH (2025) realiza un análisis conjunto de la altitud de la isoterma 0 °C y la ocurrencia de precipitación, con objeto de evaluar el comportamiento histórico de las precipitaciones cálidas. En particular, se evaluó la cantidad de días al año con precipitación en los que la isoterma 0 °C se ubicó sobre el percentil 90 histórico. Los resultados, presentados en la [Figura 7.3](#) para las cuencas de los ríos Rapel, Mataquito, Maule, Itata y Biobío, muestran que, a partir del año 2010, y coincidente con el inicio de la megasequía, hay un aumento generalizado en la cantidad de días de precipitación concurrentes con una altitud de isoterma 0 °C elevada y, por lo tanto, días con lluvia en los que hay un área significativa de la cuenca que recibe precipitación líquida y contribuye a la escorrentía directa. Es interesante notar la leve tendencia a la baja en la frecuencia de estos días en los últimos 3-5 años, por lo que se debe seguir monitoreando el comportamiento al largo plazo de esta variable.

Una vez identificado el aumento histórico en el número de días de precipitaciones con isoterma 0 °C elevada, DOH (2025) evalúa los cambios en la frecuencia del número de días de precipitación significativa en estas condiciones. Se contabilizaron, para cada estación con buen registro histórico, los días por año con más de 15, 30 y 45 mm de precipitación y, simultáneamente, con una isoterma 0 °C sobre el percentil 90 histórico de días lluviosos. Luego se analizaron las tendencias en el tiempo de esta frecuencia anual. La [Tabla V.A.1 \(Anexos\)](#), detalla las tasas de cambio para estaciones en las cuencas del Rapel, Mataquito, Maule, Itata y Biobío, junto con su significancia estadística. Hay aumentos significativos en el número de días con precipitación cálida y magnitud importante en las cuencas del Rapel, Mataquito e Itata, siendo estas tendencias bastante consistentes en la cuenca del Rapel. Destaca también la mayor robustez de estas tendencias en las distintas cuencas para las precipitaciones diarias cálidas sobre 15 mm. Por otra parte, los días cálidos de precipitación sobre 30 mm en la cuenca del Maule tienden a la baja. Estos resultados muestra en general —y de manera robusta— que, más que un aumento en la magnitud o frecuencia de las precipitaciones diarias extremas, hay un aumento significativo en número de días de precipitación cálida con magnitud moderada o alta en la zona centro-sur. A esto se agrega un aumento significativo de la temperatura los días que llueve, lo que se traduce en isotermas 0 °C concurrentes a las precipitaciones que tienden a ser más elevadas.

Caudales máximos. Usando el mismo test ya presentado, basado en la significancia de la pendiente de la regresión lineal en la subsección dedicada al análisis de tendencias de las precipitaciones, la DOH (2025) evaluó posibles tendencias en los caudales diarios máximas anuales en 9 estaciones fluviométricas del Río Rapel, 7 del río Mataquito, 20 del río Maule, 13 del río Itata y 11 del Biobío. El análisis arrojó valores negativos del coeficiente de regresión, lo que indica una tendencia a la disminución de esto caudales en los últimos 40 años. Esto ocurre tanto si se consideran o no los caudales de 2023, año en que ocurrieron las crecidas de junio y agosto. De las 60 estaciones analizadas en la zona, 51 muestran una tendencia significativa a la baja si se considera las series de caudales hasta 2022, con un

nivel de confianza del 80%. Al incluir el año 2023, 30 estaciones mantienen esta tendencia a la baja. Incluir el año 2023 tiene mayor impacto en las cuencas del Rapel y Mataquito, menor en la del Itata, y no afecta la Cuenca del río Biobío. Ahora bien, tal como lo ilustra la **Figura 7.4** para la estación Upeo en el estero Upeo (Cuenca del Río Mataquito), más que una tendencia lineal clara a la baja, en general se tiene un cambio brusco en la magnitud y variabilidad de los caudales máximos durante la megasequía, entre los años 2009 y 2023. Si las precipitaciones no hubiesen descendido, es posible que estas tendencias a la baja no se manifestaran, y que incluso pudieran aparecer tendencias al alza. De hecho, Vicuña *et al.* (2013) en un estudio que consideró los registros hasta 2009 (i.e. justo antes del inicio de la megasequía), muestran tendencia al alza de los caudales diarios máximos anuales. Estos caudales máximos históricos en general aumentaban debido al alza en el tiempo de la isoterma 0 °C cuando llueve.

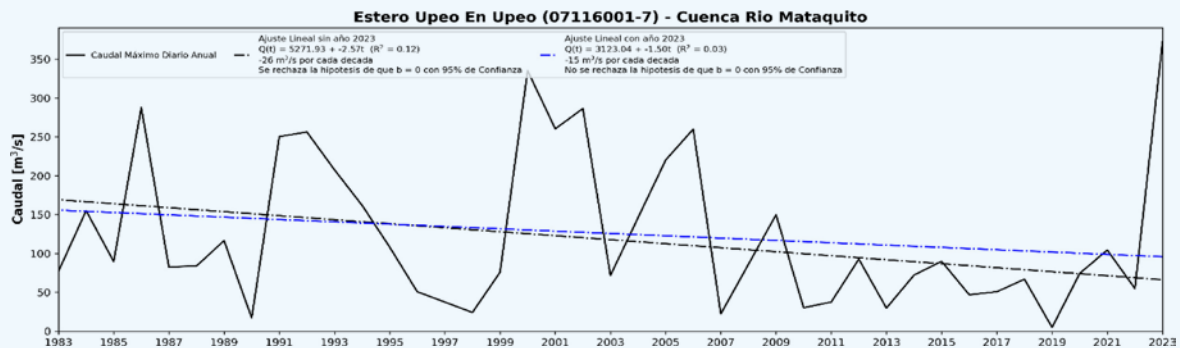


Figura 7.4. Caudales diarios máximos anuales, estación Upeo en estero Upeo (Cuenca Río Mataquito) junto con regresión lineal con y sin considerar el año 2023. Fuente: DOH (2025).

7.8. Escenarios futuros esperados

La estimación de condiciones climáticas futuras se realiza a partir de las proyecciones climáticas de los modelos climáticos globales (GCMs) bajo distintos escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero. Estas proyecciones presentan incertidumbres significativas que se incrementan con el horizonte temporal, y que se derivan de la evolución futura de las emisiones, las limitaciones estructurales de los GCMs y la variabilidad interna del sistema climático. Para generar información útil a escala de cuenca o local, estas proyecciones se someten a una reducción de escala espacio-temporal (downscaling) y corrección de sesgo, aumentando la incertidumbre y dificultándose la captura de procesos locales y fenómenos extremos que controlan la ocurrencia de crecidas e inundaciones. Por ello, las proyecciones climáticas deben interpretarse probabilísticamente como rangos de posibles condiciones futuras, reconociéndose su utilidad para la planificación y sus limitaciones intrínsecas.

Chile cuenta con proyecciones climáticas elaboradas en el proyecto de Atlas de Riesgos Climáticos (ARCLIM, <https://arclim.mma.gob.cl/>), las que han sido procesadas para poder visualizar el comportamiento histórico y proyecciones futuras de variables ligadas con riesgos climáticos (i.e. amenazas climáticas). En lo referido a crecidas e inundaciones, una de las variables más relevantes es la precipitación máxima diaria anual. En general, tanto para los escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5, los cambios porcentuales proyectados por comuna para esta variable para el periodo 2035-2065 están acotados a un rango entre -2% y 10%, lo que implica cambios relativamente menores (Figura A.2 [Anexos]). Considerando la incertidumbre asociada, estos cambios podrían estar dentro, incluso, del margen propio de una situación estacionaria. También, sin importar el escenario, hay un comportamiento identificable de las tasas de cambio por macrozonas: los aumentos más pronunciados de la precipitación máxima anual en torno al 6%-10% se dan en los extremos norte y sur del país, mientras que los menores se dan en la zona centro-sur. En el escenario SSP2-4.5, las tasas de cambio podrían incluso ser negativas en la región de Valparaíso, así como en sectores de las regiones de Coquimbo y Metropolitana. Por otra parte, las diferencias son bastante menores, con una ligera tendencia a mayores cambios (positivos) en el escenario 5-8.5 para la zona central cordillerana, y una tendencia a menores cambios en las regiones de la Araucanía y de los Ríos.

En resumen, la situación más crítica en términos de inundaciones y aluviones relacionados con posibles aumentos de precipitación pareciera ser la que se podría tener en las zonas áridas del Norte Grande y Norte Chico, donde un aumento de la intensidad de precipitaciones combinado con las condiciones del suelo, pueden potenciar la ocurrencia significativa de escorrentía superficial. Por otra parte, proyectar cambios significativos de la precipitación máxima diaria en el resto del territorio nacional no es tan evidente como sí lo puede ser para precipitaciones agregadas a escala anual. Estas proyecciones se condicen con lo reportado recientemente, puesto que no se observan tendencias claras al alza en la precipitación máxima diaria. Resultados similares se obtuvieron en DOH (2025) para el comportamiento futuro de esta variable en la zona centro-sur.

Por otra parte, el aumento en la frecuencia de los eventos cálidos de precipitación es la otra preocupación relevante para el futuro en la zona centro-sur del país. Las precipitaciones con isoterma 0 °C concurrentes más elevadas ocurrirán sobre áreas contribuyente mayores, presentándose mayores volúmenes y caudales de escorrentía directa. Una primera estimación de las condiciones futuras asociadas a este tipo de eventos puede obtenerse a través de análisis de los cambios de temperatura media. En particular, es relevante evaluar las variaciones esperadas durante los meses de invierno, cuando ocurren las mayores precipitaciones frontales. Pero también es importante caracterizar los cambios de temperatura en verano, período en que las lluvias pueden generar aluviones en zonas cordilleranas y aumentar la turbidez, afectando significativamente el abastecimiento de agua potable en ciudades dependientes de fuentes superficiales. En general, se proyectan alzas en todo el territorio nacional, las

que son más significativas en la zona norte bajo el escenario SSP5-8.5 (Figura A.3 [Anexos]). Los aumentos tienden ser mayores en verano, existiendo diferencias más grandes en los cambios en la zona central.

Actualmente, el Manual de Cálculo de Crecidas de la DGA (DGA, 1995) propone la ubicación de las líneas de nieve para el cálculo de áreas aportantes de escorrentía directa. Estas líneas están propuestas según la latitud a partir de los trabajos originales de Peña y Vidal (1993) y Escobar y Vidal (1992) (Tabla 7.2). A partir de los resultados en la Figura A.3 (Anexos), se podría considerar una tasa de cambio de 2 °C en la temperatura para el futuro, la que podría usarse para actualizar la ubicación de las líneas de nieve suponiendo un gradiente de temperatura. Utilizando un valor de este gradiente de 0,5 °C/100 m (DGA, 1995), y considerando el caso conservador de la mayor elevación de la línea de nieve cuando se propongan dos para una misma elevación, se obtienen los valores propuestos en la columna derecha de la Tabla 7.2 (i.e., un alza de 400 m con respecto a la original). Es importante recordar que los valores propuestos en la tabla son promedio, por lo que se debe considerar una variabilidad estacional a lo largo del año. Más aún, los valores reportados en DGA (1995) de Peña y Vidal (1993) corresponden a valores medios de una distribución de probabilidades determinados para el periodo mayo-agosto, asumiendo una temperatura umbral de 1 °C para diferenciar precipitación líquida de sólida. De hecho los autores identifican una distribución de probabilidad para el comportamiento dentro del territorio nacional de la línea de nieve. De acuerdo a esta distribución, el aumento a 2 °C adicionales está asociado con una probabilidad de excedencia de aproximadamente un 25%.

En años recientes, ha habido eventos de precipitación significativos, con registros de isoterma 0 °C muy altos, por sobre los valores identificados en la Tabla 7.2. Por ejemplo, se estima que una altitud de esta isoterma de 4.500 msnm para las precipitaciones en Atacama, de 2015 (CR2, 2015; Wilcox *et al.*, 2016). Más aún, las precipitaciones más intensas del evento de junio de 2023 se dieron con isoterma 0 °C sobre los 3.000 m.s.n.m. (DOH, 2025). Estos valores distan bastante de los recomendados en la Tabla 7.2, e incluso superan con creces los que se podrían proponer asumiendo un aumento en 2 °C en los días de lluvia.

Para abordar esta situación, la DOH (2025) indica que los análisis propios del diseño hidrológico de infraestructura fluvial e hidráulica en general, así como aquellos relacionados con la identificación de áreas de inundación, típicamente implican escalas temporales mucho más finas (escala diaria o sub-diaria) invisibilizadas en los valores promedios de altura de nieve. En este caso, se debe evaluar una condición puntual y más conservadora de la ubicación de la línea de nieves (i.e. una elevación mayor). De este modo, se propone utilizar cuantiles elevados de la ubicación de la línea de nieve, calculados a partir desviaciones de la situación promedio mediante el uso de factores de frecuencia propios de una distribución normal que se aplican a la desviación estándar histórica de la isoterma 0 °C durante los días de lluvia. En particular, se propone considerar el cuantil 95%. La Tabla 7.3 proponen valores de líneas de nieve para distintos periodos futuros bajo un escenario SSP5-8.5.

Tabla 7.2. Elevación de Línea de nieves promedio según DGA (1995) y actualización considerando un alza de 2 °C. Fuente: Modificada de DGA (1995).

Latitud (°)	Peña-Vidal (m.s.n.m)	Escobar-Vidal Promedio junio-octubre (m.s.n.m)	Propuesta dado un cambio a futuro en 2 °C
27,5	2690		3090
28,0	2620		3020
28,5	2550		2950
29,0	2490		2890
29,5	2420		2820
30,0	2350		2750
30,5	2280		2680
31,0	2210		2610
31,5	2150		2550
32,0	2080		2480
32,5	2010		2410
33,0	1940		2340
33,5	1870		2270
34,0	1780		2180
34,5	1640		2040
35,0	1470	1980	2380
35,5	1300	1820	2220
36,0	1150	1680	2080
36,5	1000	1510	1910
37,0	920	1420	1820
37,5	880	1390	1790
38,0	850	1360	1760
38,5	800	1330	1730
39,0	770	1300	1700

Tabla 7.3. Propuesta de línea de nieve según escenario SSP5-8.5 y periodos de tiempo futuro para cuencas de la zona centro-sur de Chile. Como referencia se incluye la altitud promedio y máxima de la isoterma 0 °C durante el eventos de junio. Fuente: adaptado de DOH (2025).

Cuenca	Altitud Promedio/Máxima de Isoterma 0 °C junio 2023 [msnm]	Periodo	Propuesta Nueva Línea de Nieves [msnm]
Rapel	2807 / 3278	2020-2040	3171
		2040-2070	3283
		2070-2100	3481
Mataquito	2936 / 3300	2020-2040	3001
		2040-2070	3163
		2070-2100	3383
Maule	2891 / 3763	2020-2040	2792
		2040-2070	2892
		2070-2100	3124
Itata	2571 / 3185	2020-2040	2360
		2040-2070	2522
		2070-2100	2716
Biobío	2707 / 3458	2020-2040	2355
		2040-2070	2503
		2070-2100	2731

Se puede ver que las elevaciones de las líneas de nieve alcanzadas durante junio de 2023 están en torno a los valores propuestos. En general los valores máximos observados para el evento de junio son bastante altos, por lo que también podrían usarse en el diseño o análisis hidrológico en situaciones altamente conservadoras.

7.9. Inundaciones y otros riesgos climáticos relacionados en el futuro: cadenas de impactos propuestas por ARCLIM

Junto con una estimación y cuantificación de la amenaza climática futura, la plataforma ARCLIM propone una serie de cadenas de impactos que permiten estimar el riesgo climático. Una cadena de impacto considera el mapa de la amenaza climática, e información espacialmente distribuida sobre la exposición y sensibilidad del sistema afectado. Estas tres variables se combinan para determinar el riesgo debido al cambio climático sobre el

sistema en cuestión. Cuatro son las cadenas de impacto relevantes en lo referidos a exceso de agua que se presentan en ARCLIM: Inundaciones y su efecto en la salud de las personas, inundaciones por desbordes de río, inundaciones en zonas urbanas e Impacto de la alta pluviometría en relaves mineros. No es objetivo de esta sección entrar en detalle con respecto a cada una de estas cadenas de impacto y el cálculo del riesgo asociado. A modo de resumen, se detectan algunas situaciones críticas que motivan la focalización para las acciones de adaptación: (1) el riesgo de inundaciones por desborde de ríos es alto en las regiones del norte grande y chico, así como algunas localidades de la región del Maule; (2) el riesgo de inundación urbana (aguas lluvias) aumenta entre las regiones de Valparaíso y del Biobío; (3) como es de esperarse, el riesgo en relaves por alta pluviometría se localiza principalmente entre las regiones de Antofagasta y del Libertador General Bernardo O'Higgins. Se invita al lector a visitar el sitio web de ARCLIM. Vale la pena destacar que estas y otras cadenas de impacto están siendo utilizadas activamente en la práctica profesional y en la generación de diversos instrumentos orientados a la gestión del riesgo climático. En particular, los Planes de Acción Comunal de Cambio Climático a elaborarse para todo Chile están considerando la información proporcionada por ARCLIM según lo recomienda PNUD (2023).

7.10. Acciones de adaptación para el control de aluviones y crecidas

Según lo visto en la sección de definiciones relevantes de este capítulo, en el campo de la gestión del riesgo de desastres, este se puede concebir como una función de la interacción entre la amenaza, y la exposición y vulnerabilidad de los elementos expuestos, lo que determina las consecuencias o pérdidas potenciales. La amenaza corresponde a la probabilidad de ocurrencia de un evento peligroso con determinadas características como intensidad, extensión o duración; en el caso hidrológico, puede ser una crecida de río con un periodo de retorno específico. Las consecuencias, en cambio, representan el grado de afectación de los sistemas construidos o naturales frente a dicha amenaza, considerando factores como la localización de viviendas en planicies de inundación, la calidad de la infraestructura o la capacidad de respuesta institucional. Un ejemplo ilustrativo es el de una crecida fluvial. La amenaza se materializa en la probabilidad de que el caudal supere niveles críticos, generando inundaciones. Las consecuencias se expresan en daños a viviendas e infraestructura, interrupción de servicios básicos, pérdidas económicas y sociales, etc. Así, el riesgo no depende exclusivamente de la ocurrencia de la crecida y de sus características, sino también de la magnitud de las consecuencias derivadas de la interacción entre el evento y los elementos expuestos.

En este marco, las medidas estructurales (e.g., defensas ribereñas, embalses de laminación o encauzamientos) buscan reducir la probabilidad de contacto del agua con los asentamientos humanos, actuando sobre la componente de la amenaza. En paralelo, las medidas no estructurales (e.g., la planificación y ordenamiento territorial, la zonificación de usos de suelo, los sistemas de alerta temprana o los seguros contra desastres) apuntan a disminuir la vulnerabilidad y, con ello, las consecuencias. Es fundamental destacar que el objetivo último no es eliminar la amenaza, algo no factible en sistemas socio-naturales dinámicos e inciertos, sino reducir el riesgo. Dado que las soluciones estructurales y no estructurales actúan sobre componentes distintos del riesgo, ambas son necesarias, complementarias y deben estar articuladas bajo un enfoque integral de gestión que asegure resiliencia a largo plazo. Esta sección propone acciones estructurales y no estructurales, transmitiendo la necesidad de que la ingeniería trascienda sus dominios más cercanos al primer tipo de soluciones, e integre y proponga un conjunto más amplio de opciones a la sociedad. Muchas de las propuestas forman parte de lo disponible en el reporte de DOH (2025) el cual se recomienda consultar para más detalles.

7.11. Medidas estructurales: consideraciones generales para el diseño hidrológico

Diseño y gestión adaptativa del riesgo. Es recomendable orientar los proyectos hacia un diseño adaptativo de infraestructuras, capaces de responder con mayor resiliencia frente a cambios futuros no previstos en sus condiciones de operación y funcionamiento. La incertidumbre en ingeniería es inherente, no solo por los efectos del cambio climático, sino también por cambios en otros factores como variaciones en la demanda, transformaciones en el uso de suelo y modificaciones territoriales diversas. Por ello, resulta esencial privilegiar enfoques adaptativos en el diseño, que incorporen la incertidumbre, y que aumenten la resiliencia y capacidad de respuesta ante escenarios imprevistos y cambiantes. A eso se agrega el continuo monitoreo y evaluación de desempeño de medidas orientadas a la reducción del riesgo. En esta línea, se proponen las siguientes consideraciones:

- Factores de seguridad y márgenes adicionales: incorporar holguras en las variables de diseño frente a condiciones futuras inciertas o ausencia de información histórica robusta. En obras hidráulicas, esto se traduce en establecer revanchas o bordes libres en los parámetros más sensibles a cambios en las condiciones de diseño.
- Capacidad hidráulica flexible y mejoramiento de cauces naturales/red de drenaje: preferir sistemas abiertos por sobre cerrados para transportar flujos sujetos a crecidas. Este enfoque es relevante en colectores de aguas lluvias, diseñados para periodos de retorno relativamente bajos, pero que eventualmente enfrentarán eventos mayores. Los colectores cerrados entran rápidamente en presión al superarse las condiciones

de diseño, siendo costosa o inviable su adecuación. Por el contrario, los colectores abiertos permiten conducir caudales superiores sin mayores dificultades y pueden ser ampliados con relativa facilidad. Además, ofrecen valor agregado en entornos urbanos al habilitar usos complementarios como espacios recreativos, ciclovías y parques, incluyendo parques “inundables”, aumentando la rentabilidad social de la infraestructura. De esta manera, cauces naturales y otros elementos de la red de drenaje pueden incorporar diseños multifuncionales que consideren el régimen dinámico de caudal, con componentes paisajísticos o recreacionales para operar con caudales bajos, y el uso de la planicie de inundación frente a crecidas mayores.

- Uso de soluciones basada en la naturaleza (SbN): estas soluciones representan una alternativa de gestión adaptativa del riesgo que, a distintas escalas espaciales, aprovechan procesos ecosistémicos para reducir la amenaza de inundaciones y aluviones, al tiempo que generan beneficios ambientales y sociales adicionales. Ejemplos incluyen la restauración de humedales, la reforestación de cabeceras de cuenca, jardines de infiltración, y pavimentos permeables. No obstante, su efectividad depende de una adecuada planificación, diseños robustos y contextualmente apropiados, así como de un mantenimiento sistemático y de largo plazo. Para que funcionen como infraestructura confiable, requieren del mismo rigor técnico e ingenieril que se exige a las soluciones tradicionales. Más aún, el rango de acción de estas soluciones puede no ser suficiente para abarcar problemas urgentes de adaptación al cambio climático, particularmente en territorios profundamente modificados por el accionar humano (ciudades consolidadas, cauces modificados, etc.), donde las posibilidades de implementación y los efectos de las SbN suelen ser limitados. Por último, es importante recordar que el país tiene poca experiencia todavía con este tipo de soluciones, por lo que los desafíos en operación y conservación aún no son claros y pueden ser más demandantes de lo esperado.
- Uso de criterios flexibles y dependientes del daño esperado para la selección y diseño de obras y soluciones: generalmente, y con objeto de una mayor simplicidad y homogeneidad en el diseño de infraestructura, y en un contexto regulatorio y administrativo poco flexible, se suelen considerar enfoques y criterios muy rígidos en el control de inundaciones y aluviones. Estos deben ser flexibilizados, de manera de incorporar formalmente aspectos de resiliencia, y análisis costo-eficiencia o costo-beneficio que tomen en cuenta los distintos costos y beneficios y constantemente se estén actualizando en función de la evidencia empírica y el estado del arte y la práctica.

Consideración explícita de la incertidumbre estadística. La estimación de crecidas está sujeta a una elevada incertidumbre, particularmente para periodos de retorno superiores a la longitud de la serie de datos disponible. Esta se incrementa para mayores periodos de retorno y depende de la selección de la función de distribución y del método utilizado para estimar sus parámetros. Esta incertidumbre estadística no siempre es incorporada de manera explícita en los estudios aplicados, lo que limita la confiabilidad de los diseños derivados. Por ello, resulta fundamental avanzar hacia prácticas que integren de forma sistemática la cuantificación y consideración de dicha incertidumbre. Esto no solo permitiría obtener diseños más robustos y seguros, sino que también favorecer una gestión del riesgo más realista, alineada con la variabilidad natural de los procesos hidrológicos y la limitación inherente de los datos disponibles. En esta línea, se proponen las siguientes orientaciones (DOH, 2025):

- **Longitud de los registros:** utilizar series de datos lo más extensas y actualizadas posible, con una recomendación mínima de 30 años.
- **Regiones con información escasa:** emplear análisis regionales, considerando cuencas hidrológicamente homogéneas, como alternativa para robustecer las estimaciones.
- **Funciones de distribución:** priorizar distribuciones de probabilidad para valores extremos, definidas en el dominio positivo y con capacidad de representar asimetrías, tales como la Generalizada de Valores Extremos (GEV), o Gamma de tres parámetros. La distribución Log-Normal puede ser empleada en casos específicos, aunque resulta menos flexible. En general, las distribuciones de tres parámetros ofrecen mayor versatilidad, especialmente cuando se requiere representar colas pesadas o asimetrías notables en los registros.
- **Métodos de estimación de parámetros:** utilizar técnicas robustas como el Método de Máxima Verosimilitud (MML) o el Método de Momentos Ponderados por Probabilidad (MMP), el cual presenta ventajas cuando las muestras son reducidas y se busca dar mayor peso a los valores extremos.
- **Cuantificación de la incertidumbre:** incluir la estimación de intervalos de confianza en los cuantiles de diseño. Se recomienda calcular bandas de incertidumbre del 80% y 90% de probabilidad central.
- **Aplicación en diseño hidráulico:** en el dimensionamiento de obras se suele complementar la crecida de diseño con una de verificación. Se recomienda que esa crecida de verificación pueda eventualmente incorporar la incertidumbre estadística. Una alternativa práctica sería adoptar como valor de verificación el mayor entre la crecida correspondiente a un periodo de retorno superior y la crecida de diseño ajustada según la banda de incertidumbre del 80%.

Consideración de proyecciones futuras de temperatura y precipitación. En la sección 5.4 se presentó la estrategia para analizar eventos hidrometeorológicos extremos en el contexto de cambio climático, con objeto de fortalecer el diseño de obras. En la medida de que sea necesario y factible, se propone adoptar la metodología propuesta y aplicarla al caso particular de trabajo, en particular cuando los costos de las obras involucrados son altos (y por ende las pérdidas en caso de falla), y cuando la vida útil de estas obras es razonablemente larga (más de 20 años). Una alternativa a este enfoque sería una simplificación donde no se modele localmente el efecto del cambio climático, sino que se incorporen en la forma de variaciones recomendadas de las variables hidrometeorológicas de diseño. En este caso, se recomienda la preparación y uso de tablas u otras herramientas simplificadas para este propósito, como las estimaciones de línea de nieve presentadas en la [Tabla 7.3](#). Si a la definición de una nueva línea de nieve para el cálculo de crecidas futuras a partir de esta tabla se agrega una decisión simple con respecto a la precipitación de diseño, se podría entonces implementar los modelos hidrológicos tradicionalmente utilizados para un diseño que considere cambio climático. Por ejemplo, DOH (2025) propone considerar un aumento del 10% de la precipitación de 10 años y 24 horas actual para, de manera simple, considerar eventuales aumentos en la frecuencia de lluvias extremas.

7.12. Medidas no estructurales

Planificación y ocupación territorial. La planificación y regulación del uso de suelo constituyen herramientas clave para reducir la exposición al riesgo de inundaciones y aluviones. Mediante planes reguladores, zonificación y ordenamiento territorial, se puede restringir o desincentivar la construcción en zonas inundables, cauces naturales o laderas inestables. Esta medida actúa directamente sobre la vulnerabilidad, reduciendo las consecuencias potenciales de eventos extremos. Su implementación requiere coordinación interinstitucional y coherencia con las políticas de desarrollo urbano y rural. Además, los Planes Maestros de Aguas Lluvias y los Instrumentos de Planificación Territorial (IPT) deben ser vinculantes. Una consideración crítica es la fiscalización efectiva y la actualización periódica de los IPT para incorporar cambios en el clima y otras modificaciones estructurales.

Sistemas de alerta temprana hidrometeorológico. Si bien no tienen relación directa con el cambio climático, y que su implementación es deseable más allá de la existencia del fenómeno, es relevante potenciar el uso sistemas de alerta temprana que permitan anticipar la ocurrencia de crecidas o aluviones, y proporcionar tiempo para implementar medidas de protección y evacuación. Pueden ser de corto plazo, basadas en datos en tiempo real de caudales, precipitaciones y temperaturas, o de mediano plazo, sustentadas en pronósticos meteorológicos de varios días. Su eficacia depende de la calidad de la información, la robustez

de los modelos de pronóstico y la comunicación oportuna a la población. Un aspecto clave es asegurar que los mensajes sean claros y accesibles, considerando además pruebas periódicas y protocolos bien establecidos de respuesta comunitaria e institucional. Ejemplos de este tipo de sistema son los propuestos por Contreras *et al.* (2020) o De la Fuente *et al.* (2019). A ellos se agrega el monitoreo de glaciares peligrosos, a través de alguna unidad especialmente dedicada a este propósito, emulando lo que se hace con los volcanes activos en el país. Este servicio de vigilancia de glaciares peligrosos no solo debiese monitorear el estado de estos cuerpos de hielo, sino también definir alertas, así como áreas de exposición para aportar a la planificación territorial.

Manuales y guías técnicas. Los manuales y guías técnicas son instrumentos que sistematizan criterios, metodologías y estándares para el diseño, construcción y operación de obras para el control de crecidas e inundaciones. Estos documentos buscan homogeneizar prácticas entre distintas instituciones y profesionales, promoviendo decisiones basadas en evidencia y experiencia acumulada. Son esenciales para asegurar coherencia entre proyectos, evitando criterios dispares. Deben ser actualizados regularmente para incorporar nuevas tecnologías, conocimientos y escenarios de cambio climático, a la vez que difundidos efectivamente, con el correspondiente proceso de capacitación. Además, y en conjunto con los planes de reevaluación que se mencionan en la próxima subsección, debe haber una consideración particular y acuciosa de aquellas obras de larga vida útil cuya falla puede causar severos daños.

Gestión dinámica y flexible de infraestructura. La gestión dinámica de la infraestructura busca optimizar su funcionamiento frente a condiciones cambiantes, reduciendo la vulnerabilidad sin necesidad de modificar físicamente las obras. Esto incluye la operación adaptativa de embalses, compuertas o sistemas de drenaje, en función de información en tiempo real y pronósticos meteorológicos. El enfoque flexible permite responder a crecidas de distinta magnitud, maximizando la eficiencia del sistema y disminuyendo el riesgo. Su implementación requiere disponibilidad de datos confiables, coordinación interinstitucional y protocolos de operación claros. Una limitación es la necesidad de capacidad técnica permanente y de inversión en monitoreo y control.

A lo anterior se agrega una revisión permanente de la infraestructura ya construida. Por ejemplo, es crucial diseñar y ejecutar un plan de reevaluación de obras, con objeto de identificar situaciones de falla de alto impacto que estas puedan tener. Ejemplos de esto es la evaluación permanente de vertederos de descarga de embalses, la reevaluación de tranques de relave y proyectos de abandono de explotación minera, revisión de infraestructura de aguas lluvias en ciudades en permanente expansión, análisis periódico de acuerdos sectoriales e intersectoriales originalmente concebidos para la gestión del riesgo, etc. La actitud proactiva y preventiva detrás de estas prácticas de reevaluación permitiría generar evidencia contundente para la mejor toma de decisión a futuro.

Educación y gestión del conocimiento. La educación y la gestión del conocimiento son pilares para construir resiliencia comunitaria frente a inundaciones y aluviones. La educación formal e informal permite sensibilizar a la población sobre los riesgos, fomentar conductas preventivas y preparar a las comunidades para responder de manera organizada. La gestión del conocimiento implica recopilar, sistematizar y compartir información científica, técnica y local relevante, asegurando que llegue a tomadores de decisión y a los distintos públicos que componen la ciudadanía.

Seguros. Los seguros son una herramienta financiera que permite transferir parte del riesgo de pérdidas económicas hacia aseguradoras u otros mecanismos de compensación. No reducen la amenaza ni la exposición, pero ofrecen resiliencia económica al cubrir costos de reparación y recuperación tras un evento. Para su efectividad, es necesario que los productos sean accesibles, adaptados a la realidad local y vinculados a evaluaciones técnicas de riesgo. Un problema difícil de gestionar se da cuando todos los asegurados se siniestran en el mismo momento, como ocurre con desastres naturales, lo que dificulta que las aseguradoras estén dispuestas a tomar riesgo. Existen instrumentos financieros y con apoyo estatal que pueden abordar este tipo de problemas, como ya se hace con seguros agrícolas.

7.13. Conclusiones

Este capítulo examina los impactos que el cambio climático y las dinámicas territoriales ejercen sobre la seguridad frente a aluviones, crecidas e inundaciones en Chile. Se presentan definiciones conceptuales, una revisión de los tipos de inundaciones observados en el país, un diagnóstico territorial de sus manifestaciones, y un repaso de los marcos institucionales y normativos asociados a la gestión del riesgo hidrometeorológico. Asimismo, se analizan tendencias históricas y proyecciones futuras en variables climáticas críticas, como precipitaciones extremas, temperaturas y elevación de la isoterma 0 °C, discutiendo su efecto en la ocurrencia de eventos de gran magnitud. Finalmente, se abordan metodologías y propuestas de adaptación tanto estructurales como no estructurales, con énfasis en la necesidad de articular ambos enfoques. Las principales conclusiones son las siguientes:

- El riesgo es multifactorial: El riesgo de inundaciones y aluviones no se explica solo por la amenaza hidrometeorológica, sino por la interacción entre esta, los niveles de exposición, y las condiciones de vulnerabilidad de los sistemas sociales y ambientales.
- Existe una diversidad territorial y climática importante: La amplia extensión latitudinal del país determina la coexistencia de múltiples tipos de inundaciones. Esta diversidad exige estrategias diferenciadas de gestión, adaptadas a las particularidades de cada región.

- Los eventos de precipitación cálida son relevantes: Aunque las precipitaciones extremas muestran tendencias decrecientes en varias cuencas, los episodios de lluvias cálidas con isotermas 0 °C elevadas tienden al aumento. Estos eventos amplían las áreas que reciben lluvia líquida en cuencas cordilleranas, incrementando caudales y volúmenes de esorrentía, con efectos particularmente críticos en el centro-sur del país.
- Las proyecciones climáticas en la zona central del país muestran tendencias, pero hay incertidumbre: Los modelos no muestran aumentos significativos en las precipitaciones máximas anuales futuras, pero sí un alza generalizada en las temperaturas. Por lo tanto, el principal factor de riesgo no será, probablemente, un aumento en la magnitud de la lluvia (salvo en el extremo norte), sino en la combinación con temperaturas más altas. Más allá de esta tendencia, es relevante la interpretación probabilística y la consideración de la incertidumbre.
- Hay tendencias contrastantes en caudales: A pesar de que los registros muestran una disminución en los caudales máximos anuales durante la megasequía, la evidencia histórica sugiere que esta reducción responde más a condiciones excepcionales de déficit hídrico que a una tendencia estructural. De mantenerse escenarios de mayor temperatura y lluvias cálidas, los caudales de crecida podrían incluso incrementarse en el futuro.
- Existe un déficit en planificación y normativa: Aunque hay un marco legal y regulatorio amplio en materia de urbanismo, aguas lluvias y gestión de desastres, su aplicación e integración ha sido discontinua y heterogénea, y su actualización debe ser más dinámica.
- La ingeniería es fundamental en la gestión adaptativa: Es esencial que el diseño de infraestructuras hidráulicas y urbanas incorpore explícitamente escenarios de cambio climático e incertidumbre hidrológica. Esto implica adoptar diseños adaptativos, establecer factores de seguridad, promover soluciones multifuncionales y considerar la complementariedad con soluciones basadas en la naturaleza.
- Es necesario fortalecer medidas no estructurales: La planificación territorial, la educación comunitaria, los sistemas de alerta temprana y los seguros constituyen herramientas críticas para reducir la vulnerabilidad y las consecuencias sociales y económicas de las inundaciones. Estas medidas deben implementarse de forma paralela a las estructurales para lograr una reducción efectiva del riesgo.
- La articulación institucional es importante: La gestión del riesgo hidrometeorológico involucra a múltiples actores (DGA, DOH, MINVU, MMA, SENAPRED, gobiernos regionales y locales, carabineros, bomberos) que deben estar coordinados para superar la fragmentación y garantizar respuestas coherentes, desde la planificación preventiva hasta la gestión de emergencias.

- La gestión del riesgo requiere de un enfoque integral y resiliencia: El objetivo final no debe ser controlar completamente la amenaza, sino reducir el riesgo a niveles aceptables. Esto requiere combinar medidas estructurales y no estructurales, integrar el conocimiento científico con la práctica ingenieril y asegurar la resiliencia a largo plazo.

CAPÍTULO 8

Impacto del cambio climático en el medio ambiente asociado al agua

8.1. Antecedentes generales

Como se ha indicado, el cambio climático es uno de los desafíos más relevantes que la humanidad enfrenta en la actualidad. Chile -como miembro activo de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) presentó su Contribución Nacional Determinada (NDC), en el marco del Acuerdo de París, comprometiéndose a desarrollar e implementar políticas y acciones climáticas que permitan, a nivel local, la adaptación, la mitigación y el cumplimiento de los acuerdos globales.

Como se sabe¹ Chile es un país altamente vulnerable al cambio climático, verificándose la mayoría de los nueve criterios de vulnerabilidad enunciadas por la CMNUCC, a saber: posee áreas costeras de baja altura; zonas áridas y semiáridas; zonas de bosques; territorio susceptible a desastres naturales; áreas propensas a sequía y desertificación; zonas urbanas con problemas de contaminación atmosférica; y ecosistemas montañosos.

Tal como lo señala el Anteproyecto de Plan de Adaptación al Cambio Climático para el sector de los recursos hídricos (PACC-RH, mayo 2024), en materia de recursos hídricos, *“la crisis climática se traslapa con la crisis hídrica que ha mantenido bajo un estado de megasequía a gran parte del territorio nacional durante más de 10 años (CR2, 2015). Esto está asociado a una disminución sostenida de las precipitaciones en relación con el promedio histórico observado y la alteración en el patrón de las precipitaciones, el aumento de la altura de la isoterma cero, la disminución de los volúmenes de glaciares y acuíferos, entre otros (Stehr et al., 2019; DGA, 2022b; DGAC, 2022). De hecho, el sector de los recursos hídricos ya es mencionado como crítico en el PANCC 2008-2012 y, posteriormente, en su actualización mediante el PNACC del año 2014 (MMA, 2014). A este contexto, se añaden los desafíos producto de la gestión humana de los recursos hídricos del*

¹ Plan de Acción Nacional de Cambio Climático 2017-2022.

país, la cual evidencia competencia por el recurso, alta dispersión institucional en la gestión y escasez hídrica, entre otras situaciones que plantean obstáculos adicionales para la adaptación del sector (Saravia-Matus et al., 2020)".

La localización de Chile y su extensión latitudinal determinan, como se ha indicado (PACC-RH, 5), uno de los entornos climáticos más extremadamente variables del mundo, determinando una heterogeneidad climática reflejada en un sistema hídrico diverso (McPhee, 2018). En su globalidad, Chile puede ser considerado un país privilegiado en materia de recursos hídricos (Barría et al., 2021; DGA, 2016). Ello, por cuanto, la esorrentía media total (es decir, el volumen de agua procedente de las precipitaciones que escurren por los cauces superficiales y subterráneos) equivale a un promedio nacional per cápita de 51.218 m³/persona/año. Este valor es más alto que la media mundial de 6.600 m³/persona/año y muy superior al valor de 2.000 m³/persona/año considerado internacionalmente como el umbral para el desarrollo sostenible (Banco Mundial, 2011).

Sin embargo, cuando se analiza dicho valor promedio en términos regionales (es decir, considerando las distintas latitudes de la extensión del territorio nacional), se hace evidente la heterogeneidad hídrica del país.

En consecuencia, y en virtud de la diversidad geográfica que presenta el país, Chile enfrenta desafíos no menores debido al cambio climático, que impactan de manera significativa la disponibilidad y calidad del agua en el país, con sus consecuentes efectos sobre los componentes del medio ambiente. En este capítulo se analizará, principalmente desde un punto de vista cualitativo, la relación entre la disponibilidad de recursos hídricos en calidad y cantidad, el cambio climático y el medio ambiente en Chile, analizando las consecuencias de esta situación y los posibles cursos de acción.

8.2. Breve diagnóstico de la situación del agua en Chile y sus implicancias en medio ambiente

Chile es un país que depende en gran medida de sus recursos hídricos para la agricultura, la minería y el consumo humano, entre otras actividades. Así, por ejemplo, las exportaciones de bienes cuya producción y competitividad en los mercados depende de una adecuada gestión hídrica representa más del 80% de las exportaciones del país². A su vez, la disponibilidad de agua dulce es limitada y se concentra principalmente en el sur del país. En el norte, donde se encuentra el Desierto de Atacama, las fuentes de agua son escasas y se ha dependido principalmente de acuíferos subterráneos y recientemente de la desalinización del agua de mar.

² Banco Central de Chile. Estadísticas Económicas (2019).

La variabilidad climática y el cambio climático han exacerbado la escasez de agua en varias regiones. Según el Ministerio de Agricultura de Chile, en las últimas décadas, el país ha experimentado una reducción significativa en las precipitaciones, especialmente en el centro y norte del país, donde se han registrado sequías prolongadas (MINAGRI; noviembre 2022; “Cambio climático: Chile sumará 14 años consecutivos de sequía y proyectan aumento en olas de calor”). Estas sequías podrían estar afectando la producción agrícola y otros sectores industriales y la disponibilidad de agua para consumo humano, provocando pérdidas económicas y pudiendo amenazar la seguridad alimentaria.

Por su parte, el cambio climático podría estar alterando el ciclo hidrológico a lo largo del país, lo que resulta en modificaciones en los patrones de precipitación y un aumento en la frecuencia de eventos extremos como sequías e inundaciones. La proyección de un aumento de la temperatura promedio en Chile para las próximas décadas probablemente implicará un deshielo acelerado de glaciares, que en algunas cuencas son fuentes vitales de agua dulce. Esto no solo puede afectar la disponibilidad de agua a corto plazo, sino que también puede tener efectos a largo plazo en los ecosistemas, la biodiversidad y las comunidades locales que dependen de aquellos.

Además, el cambio climático podría estar llevando a un cambio en la calidad (por salinización) de los suelos y la alteración cualitativa de fuentes de agua. Las comunidades vulnerables, especialmente aquellas en áreas rurales, son las que más sufren estos impactos, enfrentando la escasez de agua potable, una peor calidad de ellas y la falta de infraestructura adecuada.

En cuanto a fuentes y demanda de agua para fines ambientales, Chile presenta la siguiente estadística: 1.251 ríos, 368 lagos, 12.416 lagunas, 212 acuíferos y 26.169 glaciares (DGA, 2016, 2017b). Se ha estimado que la demanda *in situ* asociada a caudales de protección ambiental al año 2015 en áreas protegidas (tales como SNASPE, sitios RAMSAR u otros), donde existía monitoreo DGA de flujos superficiales, se situó en torno a 4.624 m³/s a nivel país, flujos requeridos mayoritariamente en la Macrozona Sur³ (41%) y Austral (44%) (DGA, 2017b) (Figura 8.1).

³ Para estos efectos, se ha considerado la Macrozona Norte (MZ Norte) a las regiones de Arica y Parinacota, Tarapacá, Antofagasta, Atacama y Coquimbo; Macrozona Centro (MZ Centro) a las regiones de Valparaíso, Metropolitana, O'Higgins y Maule; Macrozona Sur (MZ Sur) a las regiones de Ñuble, Biobío, Araucanía, Los Ríos y Los Lagos; y Macrozona Austral (MZ Austral) a las regiones de Aysén y Magallanes y Antártica Chilena.



Figura 8.1. Disponibilidad de recursos hídricos. Fuente: PACC-RH, mayo 2024; Figura 4.2-1.

Por su parte, respecto del estado de la calidad de las aguas, según el reporte país del ODS 6.3.2, al año 2020, un 84% de las cuencas presenta buena calidad ambiental (UN Water, 2024). A nivel de lagos y lagunas, según información de la condición trófica para 30 cuerpos de agua, el 60% se encuentra en condición oligo o oligo-mesotrófica (DGA, 2018b). Respecto de humedales costeros, 11 de un total de 21 humedales monitoreados presentaron un estado mesotrófico (52%) (MMA, 2020b). Respecto de las aguas subterráneas, 41 acuíferos de 48 bajo muestreo (85%) el año 2019 presentó una buena calidad ambiental según criterios del objetivo ODS 6.3.2, con una cobertura de monitoreo entre la Macrozona Norte (Coquimbo) y la Macrozona Sur (Los Ríos) (DGA, 2021); estos 41 acuíferos representan el 41% del número total de acuíferos delimitados por la DGA (99 acuíferos) (Figura 8.2).

Otra situación compleja que se presenta respecto de la disponibilidad de agua, cambio climático y medio ambiente, dice relación con riesgos en asentamientos humanos y su correlato con el ordenamiento territorial. En efecto, el agua es un recurso crítico y esencial para el sustento de la vida y su escasez es una de las principales preocupaciones en contexto de cambio climático (Gosling & Arnell, 2016); sin embargo, en la situación inversa, el exceso de agua, originado por eventos climáticos extremos, también puede ocasionar impactos significativos tanto en la dimensión social, como en la ambiental y económica (Pizarro *et al.*, 2022). En este sentido, existen riesgos sobre asentamientos humanos debido a un insuficiente ordenamiento territorial, relacionados con las inundaciones (en zonas urbanas, por desbordes de colectores de agua lluvia y por desborde de ríos) así como cortes viales por aluviones (MMA, 2020a), lo cual se ha abordado en capítulos anteriores del presente informe. Es importante considerar el riesgo de aluviones y/o deslizamientos de tierra post evento de precipitación extrema, localizados principalmente en la Macrozona Austral, en zonas montañosas con isoterma 0 °C alta y con inadecuadas condiciones de conectividad vial.

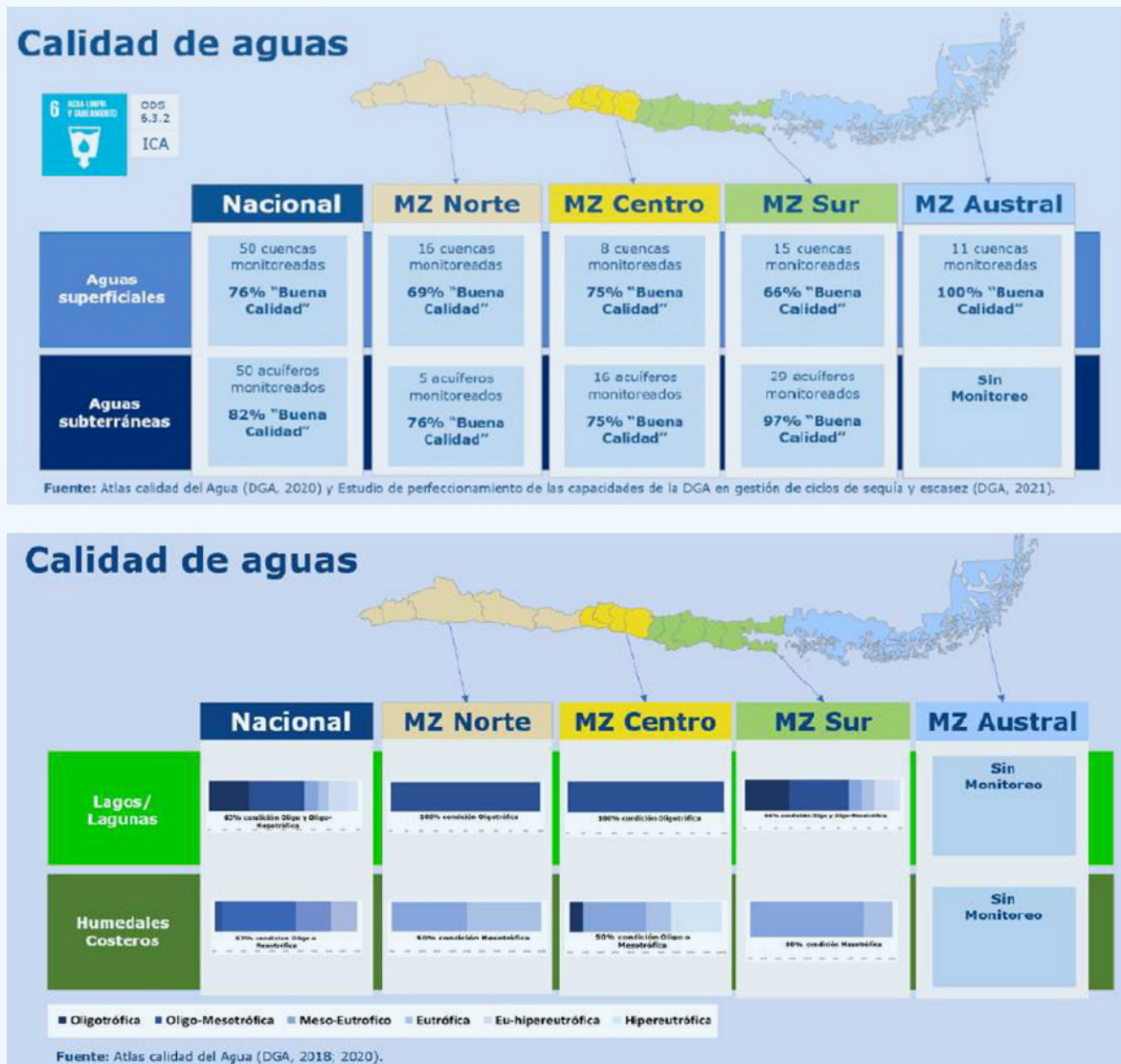


Figura 8.2. Calidad de los recursos hídricos. Fuente: PACC-RH, mayo 2024; Figuras 4.2-3 y 4.2-4.

Asimismo, se vislumbran riesgos sobre los usos culturales del agua y sobre los sistemas de vida y costumbres de determinados grupos humanos. Según la proyección de las amenazas climáticas tales como disminución de precipitaciones y sequías meteorológicas, los fenómenos de estrés hídrico han aumentado y continuarán haciéndolo en la Macrozona Norte y zona central, con usos de agua que alcanzan o superan la disponibilidad hídrica (Álvarez-Garretón *et al.*, 2023). Esto sugiere que las prácticas tradicionales en torno al uso del agua podrían derivar en nuevas formas de vinculación con el recurso, cambios en las prácticas productivas y en las formas de vida cotidianas de sus habitantes. Todo lo anterior, además, puede derivar en fuentes de conflicto y controversias territoriales por el uso y disponibilidad equitativa del agua.

Sin perjuicio de todo lo anterior, y atendiendo al objetivo y focalización del presente capítulo, a continuación, se hace hincapié en las implicancias del cambio climático (CC) en el medio ambiente; en los ecosistemas y en la biodiversidad.

8.3. Implicancias del cambio climático en cuerpos de agua superficiales, subterráneos y criósfera

La disminución en la esorrentía media anual determina riesgos en la disponibilidad de agua para fines ambientales y/o ecosistémicos, especialmente en la Macrozona Norte y Centro.

Además, se proyecta un deterioro de los humedales, producto de falta de precipitación (y alzas en el nivel del mar en aquellos costeros), determinando potenciales pérdidas de superficie y servicios ecosistémicos asociados. Por su parte, las aguas subterráneas presentan un deterioro y disminución sostenido de sus niveles. La reducción de precipitaciones y caudales ha impactado en la recarga natural de los cuerpos subterráneos que, además, se han convertido en un complemento o reemplazo de las aguas superficiales para el desarrollo de actividades productivas, como el riego agrícola principalmente en la Macrozona Centro. Además, se observa un retroceso de glaciares, con un aceleramiento de este proceso dado el contexto de megasequía, particularmente en la Macrozona Centro. Las proyecciones climáticas muestran repliegues de las áreas glaciares en todas las macrozonas sobre el 35% para el periodo 2030-2060, siendo mayores en la Macrozona Sur y la Macrozona Austral (DGA; Anteproyecto de plan de adaptación al cambio climático para el sector de los recursos hídricos (PACC-RH); 2024). Así, las reservas hídricas, tales como las aguas subterráneas contenidas en los acuíferos, así como los glaciares y fuentes nivales, son claves para garantizar la seguridad hídrica y el equilibrio ecosistémico o ambiental, pero al mismo tiempo presentan una alta sensibilidad a los efectos adversos del cambio climático (Caretta *et al.*, 2023). La sobreexplotación de los acuíferos por parte de los distintos usos del agua, producto de la falta de agua superficial, en conjunto con un escenario de megasequía, puede estar causando un descenso sostenido de estas reservas, principalmente en la zona central del país (Álvarez-Garretón *et al.*, 2023; Fernández *et al.*, 2021). Esta situación podría estar configurando una afectación a la sustentabilidad de algunos acuíferos, generando impactos socioeconómicos y ambientales, así como crecientes escenarios de conflictos entre usuarios del agua (Álvarez-Garretón *et al.*, 2023).

8.4. Implicancias respecto de la calidad de las aguas: zonas latentes y saturadas

Una brecha importante a nivel nacional es el desarrollo insuficiente o baja aplicación efectiva (donde realmente se justifique) del instrumento de gestión ambiental de Normas Secundarias de Calidad Ambiental de las aguas (NSCA) a nivel de cuencas, lo que implica que no puedan dictarse por normativa planes de prevención y/o descontaminación, dificultando la mantención y mejoramiento de la calidad de las fuentes, especialmente en zonas saturadas (Stehr *et al.*, 2019). A la fecha solo existen 6 cuerpos superficiales que cuentan con NSCA, mientras que estas son inexistentes para fuentes subterráneas (Fuster *et al.*, 2017); en efecto, se han dictado NSCA para las cuencas de: Aconcagua y Maipo (en la Macrozona Centro); Biobío, Lago Villarrica, Río Valdivia y Lago Llanquihue (en la Macrozona Sur) y río Serrano (en la Macrozona Austral). Derivado de lo anterior, en la Macrozona Sur existe un (1) caso de declaración de Zona Saturada, mediante Decreto Supremo N°43 del año 2018, por contaminación de clorofila “a”, transparencia y fósforo disuelto en la cuenca del Lago Villarrica, para la cual, mediante Resolución Exenta N°1067 con fecha 6 de octubre de 2023 del MMA, se encuentra aprobada una ampliación para la elaboración del proyecto definitivo del Plan de Descontaminación (PDA). Asimismo, con fecha 27 de agosto de 2024, se publicó en el Diario Oficial el D.S. N° 21, de 2023, del MMA, que declara zona saturada por oxígeno disuelto (OD); conductividad eléctrica (CE); potencial de hidrógeno (pH), cloruro (Cl); sulfato (SO_4^{-2}); nitrato (N-NO_3); ortofosfato (P-PO_4^{-3}); zinc disuelto (Zinc_{dis}); y, latente por demanda biológica de oxígeno (DBO5), a diversos tramos de la cuenca del río Maipo.

8.5. Otras implicancias sobre el ciclo del agua

El cambio climático aumenta la frecuencia e intensidad de sequías, inundaciones y precipitaciones extremas, lo que contribuye a la desertificación y erosión del suelo (MMA, 2020a). La degradación del suelo y la escasez de agua están estrechamente relacionadas, ya que un suelo “sano” tiene una capacidad natural para almacenar y filtrar agua, pero esta capacidad se pierde cuando este se degrada (Rubio *et al.*, 2009). La escasez de agua y las sequías pueden acelerar los procesos de degradación del suelo, por ejemplo, debido a prácticas agrícolas inadecuadas o a una gestión deficiente del riego y el drenaje. Por tanto, para combatir fenómenos de sequía y lograr la seguridad hídrica a largo plazo, es necesario gestionar y preservar tanto el suelo y la vegetación nativa, como los recursos hídricos y su ciclo natural (UNCCD & FAO, 2020). Se ha identificado riesgo de pérdida de espacios naturales y, en particular, en el verdor en bosques nativos, constituido por dos amenazas conjuntas, condiciones de sequía y olas de calor (sumado a la pérdida de espacios naturales debido al uso de suelo rural para fines distintos), cuya exposición corresponde a la superficie de

bosque nativo, reconociendo, en términos de concentración de este riesgo, principalmente en la Macrozona Centro y Sur (MMA, 2020a). Parte de este territorio ha experimentado sequía y escasez de agua durante los últimos años (Álvarez-Garretón *et al.*, 2023). Es clave reconocer cómo la pérdida del verdor de los bosques nativos podría afectar las dinámicas del ciclo del agua en las cuencas, la interceptación de la precipitación, los niveles de evapotranspiración y escorrentía, entre otros. La ocurrencia de incendios forestales (o más bien, vegetacionales) representa también una amenaza multidimensional para los ecosistemas y la gestión del agua en las cuencas hidrográficas, dado que estos eventos pueden desencadenar riesgos como la reducción de la infiltración del agua en el suelo debido a la destrucción de la capa vegetal protectora. Esta capa vegetal, crucial para el ciclo hidrológico, facilita la absorción gradual del agua de lluvia en el suelo, contribuyendo así a la recarga de los acuíferos y la regulación de los caudales de los ríos.

8.6. Efectos e implicancias sobre ecosistemas y la biodiversidad

La bibliografía disponible coincide en que la degradación de la biodiversidad es preocupante. A nivel global, desde 1970 se observa un descenso promedio de 69% en las poblaciones de especies silvestres. Este descenso es más dramático en América Latina y el Caribe, donde llega al 94%. Chile no es una excepción. El 62,4% de las especies clasificadas en algún grado de conservación y el 49,6% de los ecosistemas terrestres se encuentran amenazados⁴.

Tal como ocurre a nivel global, las principales amenazas a la biodiversidad⁵ en Chile incluyen: 1) pérdida y degradación de hábitats, principalmente por cambio de uso de suelo (por ejemplo, sustitución de bosques nativos o espacios naturales por cultivos agrícolas, praderas, plantaciones forestales, desarrollos inmobiliarios, humedales reemplazados por desarrollos urbanos, etc.); 2) alteración de la calidad ambiental (por ejemplo, el alto uso de insumos químicos, tales como pesticidas y fertilizantes, en la agricultura intensiva puede generar la pérdida de servicios ecosistémicos; el uso inadecuado del plástico, las descargas residenciales, etc.); 3) sobreexplotación de recursos, principalmente de recursos marinos pelágicos y bentónicos; 4) especies exóticas invasoras, de las cuales 1.170 han sido registradas en Chile, incluyendo especies altamente dañinas como el castor, el ciervo colorado, el visón, la avispa chaqueta amarilla, el conejo, y varias especies vegetales, entre otros; y 5) el cambio climático, que exacerba todas las anteriores amenazas. Todas ellas actúan en conjunto y de

⁴ “Conservación efectiva de la biodiversidad: 30 medidas urgentes para 2030”; Informe de la Comisión Conservación, Institucionalidad y Filantropía; Centro de Estudios Públicos, CEP (julio de 2023).

⁵ “Conservación efectiva de la biodiversidad: 30 medidas urgentes para 2030”; Informe de la Comisión Conservación, Institucionalidad y Filantropía; Centro de Estudios Públicos (julio de 2023).

forma sinérgica, por lo cual no pueden ser estudiadas ni enfrentadas de manera aislada, sino que de manera integral (Centro de Análisis de Políticas Públicas 2019).

En este contexto, el cambio en el clima es particularmente preocupante, por cuanto actúa en forma sinérgica, agrava el impacto de las otras causas de cambio global y potencia la pérdida de biodiversidad y la degradación de los servicios ecosistémicos, tal como se ilustra en la [Figura 8.3](#).

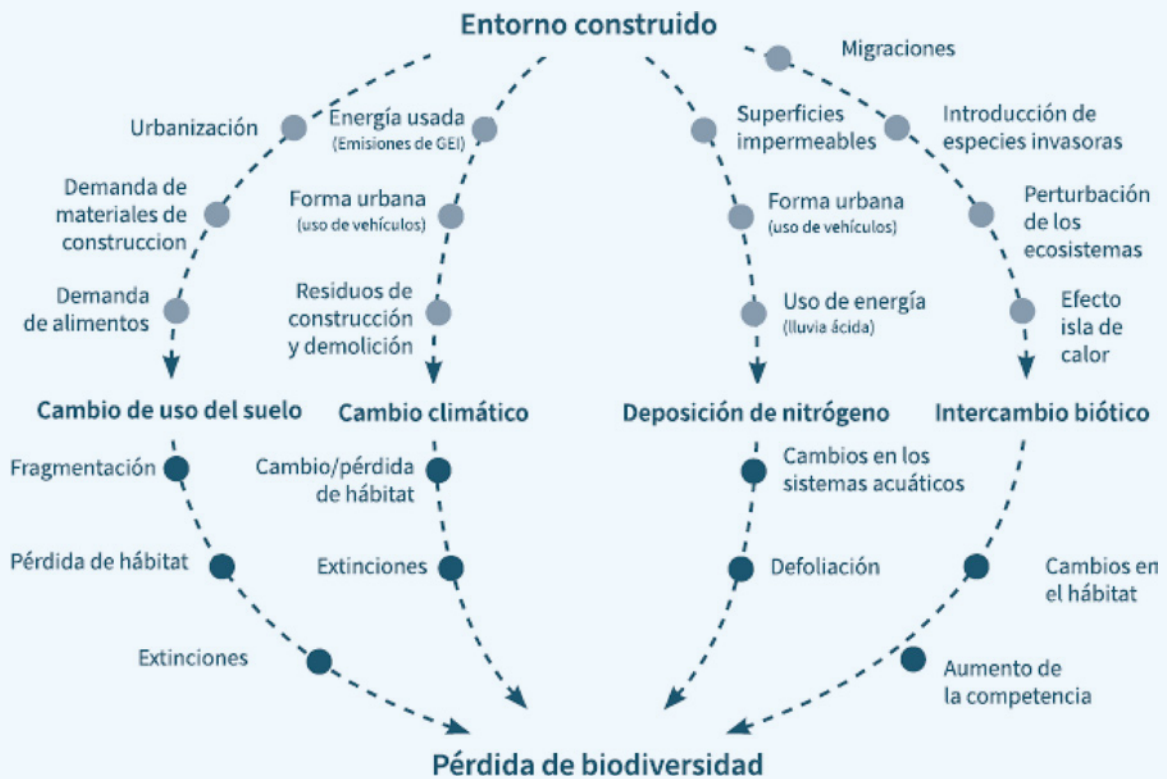


Figura 8.3. Relación causal entre la acción antrópica y la pérdida o degradación de la biodiversidad. Fuente: Informe “Conservación efectiva de la biodiversidad: 30 medidas urgentes para 2030”; Centro de Estudios Públicos (2023), sobre la base de Maibritt Pedersen Zari (2014).

Por su parte, específicamente sobre ecosistemas y funciones ecosistémicas, el cambio climático y cambio de uso de suelo sugieren escenarios que requieren poner atención.

Así, dentro de las causas que amenazan la biodiversidad -situación que pudiera estar siendo exacerbada por el fenómeno de cambio climático- se puede señalar como prioritaria, el cambio de uso de suelo y pérdida de cobertura natural: el problema radica en la pérdida de suelo que sostiene biodiversidad, y la pérdida de cobertura vegetal y de aquellos elementos ambientales para la captura de carbono. Dicho en otras palabras: la pérdida de espacios naturales.

A modo de ejemplo, a continuación, se presenta la distribución regional de los principales contribuyentes a la pérdida de bosque nativo en el periodo 1995-2016 (Figura 8.4). Habilitaciones se refiere a la habilitación de terrenos agrícolas donde antes existía bosque nativo; sustitución se refiere a la sustitución del bosque nativo por plantaciones forestales (Proyecto Monitoreo de cambios y actualizaciones del catastro). La cifra indicada para región de Biobío incluye a Ñuble, creada en 2018.

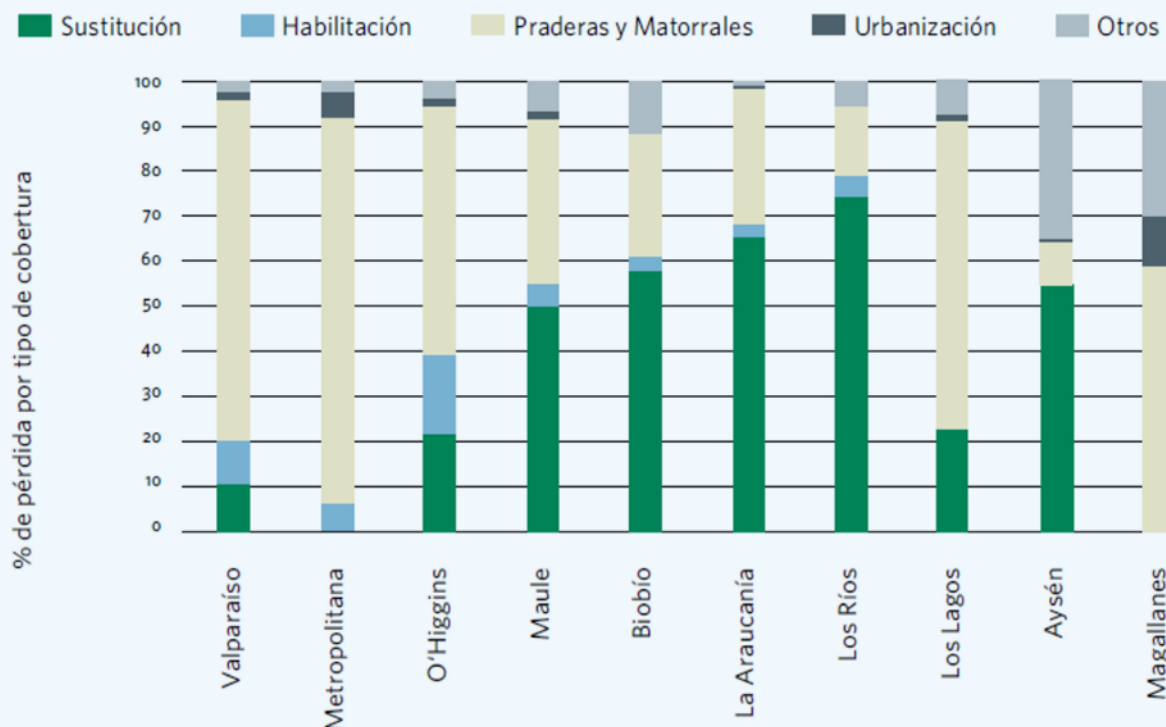


Figura 8.4. Evolución de pérdida de espacios naturales. Fuente: Marquet P. A., A. Altamirano, M. T. K. Arroyo, M. Fernández, S. Gelcich, K. Górski, E. Habit, A. Lara, A. Maass, A. Pauchard, P. Pliscoff, H. Samaniego y C. Smith-Ramírez (editores) (2019). Biodiversidad y cambio climático en Chile: Evidencia científica para la toma de decisiones. Informe de la mesa de Biodiversidad. Santiago: Comité Científico COP25; Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación (en adelante, ByCC19).

Al respecto, sobre esta situación, según ByCC19, se han planteado las siguientes recomendaciones:

- Detener la transformación y/o cambio de uso de suelo sostenedor de biodiversidad y la pérdida de cobertura.
- Minimizar las emisiones por pérdidas de cobertura vegetal asociadas a incendios, deforestación, otros cambios de uso de suelo y degradación de bosques, turberas, humedales y otros ecosistemas naturales.

- Mantener o incrementar los aportes, de todas las regiones biogeográficas, ecosistemas terrestres, regiones administrativas y actividades, según su potencial, al cumplimiento de las metas climáticas de Chile.
- Asegurar que cualquier medida o incentivo considere una perspectiva de largo plazo, en que toda captura adicional de carbono se transforme en secuestro (almacenamiento permanente de carbono según la dinámica del ecosistema respectivo).
- Proteger los bosques nativos intactos (sin intervención) o que presentan baja intervención por acción antrópica, y los bosques ribereños (claves para mantener el servicio ecosistémico de provisión de agua en calidad y cantidad).
- Conservar humedales (destacan turberas en Magallanes y Aysén, bofedales de relevancia en zona altiplánica entre regiones de Arica y Parinacota y Coquimbo, vegas, humedales de juncáceas y ciperáceas, bosques pantanosos y/o hualves. Además de ser ecosistemas, son reservorios de carbono, contribuyen a mantener los flujos de agua y son hábitat de fauna diversa particular).

Otra situación que abordar es la amenaza sobre la biodiversidad de ecosistemas dulceacuícolas. En efecto, los ecosistemas de agua dulce o humedales presentan una enorme diversidad en Chile: desde bofedales, vegas y salares en el norte a bosques pantanosos y/o hualves, ñadis y turberas en el sur, incluyendo lagos, lagunas, pantanos, ríos, esteros y arroyos, entre otros. Todos ellos tienen en común contar con un cuerpo de agua permanente o intermitente contenido en una matriz terrestre, de la cual depende el estado y calidad de la cuenca hidrográfica.

La biodiversidad de estos ecosistemas es desproporcionadamente alta respecto de otros ecosistemas, si se considera que su superficie cubre menos del 1% del planeta (a nivel mundial, el 50% de los cauces de ríos han sido alterados y el 80% de la superficie de humedales se ha perdido).

De manera similar, los ecosistemas dulceacuícolas de Chile y su biota se encuentran alterados o amenazados (sobre todo en zona norte y zona central) (Figura 8.5)..

Al respecto, a modo de recomendación para abordar esta amenaza, se han sugerido los siguientes cursos de acción:

- Implementar medidas de conservación y restauración.
- Gestionar medidas asociadas a caudales ecológicos (o “caudales ambientales”).
- Fortalecer medidas asociadas a derechos de aprovechamiento de aguas, de modo de realizar un mejor control de su uso.
- Fortalecer las medidas asociadas a la información y monitoreo.
- Promover una gobernanza más ordenada para la protección de ecosistemas dulceacuícolas.

Presiones Antrópicas

Vulnerabilidad al cambio climático

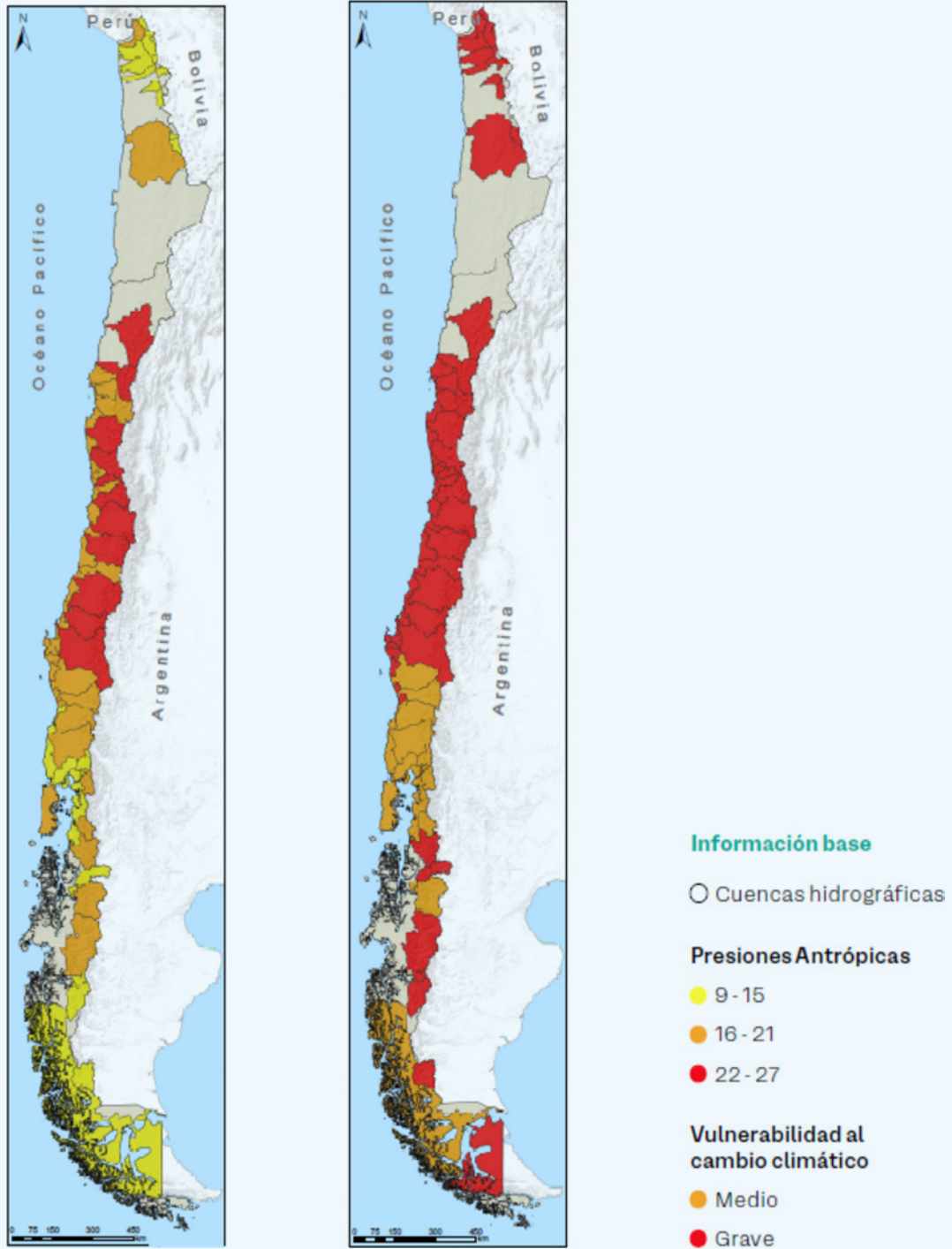


Figura 8.5. Presiones antrópicas y vulnerabilidad al cambio climático de los ecosistemas dulceacuícolas. Fuente: ByCC19.

8.7. Análisis de aspectos regulatorios ambientales generales y propuestas de acción

Como se ha visto, al considerar la relación entre agua, cambio climático y medio ambiente, se presentan diversos desafíos respecto de las regulaciones relacionadas con la conservación y preservación ecosistémica.

a. Caudales ambientales. La reforma del Código de Aguas (CdA) del año 2022 contiene avances en la protección ecosistémica, entre otros, mediante la potestad que se le otorga a la DGA en la dictación de decretos de reserva de caudales. Si bien la facultad de establecer “caudales ecológicos” en el otorgamiento de derechos de aprovechamiento de aguas (DAA) data del año 2005, lo adicional que se incorporó en el año 2022 es la posibilidad que dicho caudal se puede establecer por adelantado o en forma independiente de la petición de un DAA, en particular en áreas bajo protección de la biodiversidad, incluyendo sitios prioritarios de primera prioridad, facultad que se observa de una amplia y discrecional aplicación.

En tal sentido, se identifica la necesidad de revisar, a nivel país, la actual aplicación del caudal mínimo ecológico (o, más bien, ambiental) en un contexto de cambio climático, donde se proyecta, en términos generales, una disminución en los flujos superficiales.

Dado que los “caudales ecológicos” (QEc) son valores fijos, la ocurrencia de menores caudales registrados implicará una reducción de los usos, pero no del QEc. Ante ello, a modo de recomendación, parece relevante:

- Establecer una política activa para adaptar al Cambio Climático el desempeño de ciertos proyectos (que sean relevantes desde el punto de vista del uso de recursos hídricos) que, en su proceso de calificación ambiental futura sean sometidos a las restricciones y/o desafíos de adaptación que pudiere implicar la consideración de las variables relacionadas con el Cambio Climático, e
- Incorporar en la institucionalidad la facultad de hacer efectiva una gestión integrada a nivel de la cuenca para evitar que la menor disponibilidad general afecte en forma indirecta y desmedida los caudales asociados a la protección del medio ambiente, mediante la aplicación de los instrumentos legales disponibles.

b. Calidad de las aguas. Asimismo, se hace prioritario un impulso en la generación de Normas Secundarias de Calidad Ambiental (NSCA), adecuadamente fundadas y priorizadas en sectores específicos, permitiendo fortalecer el monitoreo con un enfoque territorial o “sitio-específico”, generando planes de prevención y/o descontaminación donde efectivamente se requieran (y evitando sobre-regular en sectores que no son prioritarios), propiciando acciones tendientes hacia la conservación de la adecuada calidad en las aguas y considerando la adaptación al cambio climático.

A nivel nacional también existen brechas en cuanto al control de la contaminación difusa vinculada con las técnicas de riego agrícola, la minería y silvicultura, así como en la gestión segura y tratamiento de aguas residuales, las que en muchos casos son dispuestas directamente en esteros, ríos, lagos y lagunas (Parra & Chiang, 2013; Stehr *et al.*, 2019), sin mayor regulación, sin normas de secundarias de calidad ambiental que protejan la calidad de las fuentes de agua y de los ecosistemas, y sin fiscalización. Considerando los efectos adversos del cambio climático, específicamente en relación con la disminución de la escorrentía y de la recarga acuífera, una mayor presión sobre los cuerpos de agua repercutirá sobre su calidad.

c. Protección de humedales y biodiversidad. También surge la necesidad de avanzar en el mejoramiento de la protección de los recursos como acuíferos, lagos, lagunas y humedales, en general, los que contribuyen a la calidad ambiental de los recursos hídricos, explorando la factibilidad de implementar mecanismos complementarios a los existentes que posibiliten la protección del ecosistema hídrico, incentivando a privados en dicha protección (y de su biodiversidad), donde programas del tipo pagos por servicios ambientales a nivel de cuenca o cuerpo de agua, pudiesen ser una contribución a este propósito. En todo caso, se sugiere que este avance en el mejoramiento de la protección de los recursos se restrinja a los instrumentos legales actualmente existentes, evitando la creación de nuevas regulaciones, aplicando las facultades y disposiciones vigentes.

Por su parte, actualmente, el manejo de situaciones de escasez por medio de Decretos de Escasez Hídrica presenta una contraposición cuando se aplica de forma estructural, al permitir la extracción de aguas subterráneas (y superficiales) para satisfacer los niveles de demanda existentes (sin necesidad de constituir DAA y sin la limitación del caudal ecológico mínimo), reduciendo sus niveles y potenciando el riesgo de insostenibilidad de uso de la fuente, perjudicando su protección, función ecosistémica y usos de mediano y largo plazo del recurso. En este sentido, una adecuación de este instrumento de gestión en un escenario de cambio climático parece pertinente.

Por otro lado, la reforma al CdA del año 2022 en el inciso 5° de su Artículo 5, consignó que no se podrán constituir derechos de aprovechamiento sobre glaciares; sin embargo, aún no existe una normativa específica (o son incipientes los criterios de regulación) que establezca a los glaciares, nieves, ambiente periglacial y permafrost, como objetos de protección frente al cambio climático y a la acción humana. Además, el conocimiento del impacto de las Soluciones basadas en la Naturaleza (SbN) sobre el ciclo del agua es un aspecto a desarrollar en términos de gestión hídrica, para lo cual previamente se debe impulsar la “infraestructura verde” y soluciones alternativas tales como la recarga de acuíferos u otros. No obstante, la protección de glaciares no debe basarse en un simplismo ideológico de una mera protección o conservación, sino que en los servicios ambientales efectivamente comprometidos y en el uso racional de los recursos hídricos que se originan de las masas

de hielo y nieve. Al respecto, se sugiere considerar lo indicado en el Informe “Los Glaciares, ¿qué queremos proteger?” del Instituto de Ingenieros de Chile (2020).

Específicamente, en materia de protección y conservación de ecosistemas, se debe reconocer y enfatizar que las áreas protegidas, en la medida que sean adecuadamente administradas, son el principal instrumento para la protección de la biodiversidad, mediante el establecimiento, entre otros instrumentos disponibles, de caudales ecológicos y/o ambientales. Ellas cumplen un rol relevante en materia de conservación y provisión de servicios ambientales, incluyendo aquellos más directamente vinculados al bienestar integral de las personas, así como oportunidades de recreación y de conocimiento. Las áreas protegidas pueden ser también un motor de desarrollo de los territorios, no solo en áreas rurales, trayendo progreso y oportunidades a las comunidades aledañas a las zonas de protección existentes, tanto en zonas remotas como más densamente pobladas⁶.

8.8. Regulación específica respecto del cambio climático

Con fecha 13 de junio de 2022, se publicó en el Diario Oficial la Ley N° 21.455 LEY MARCO DE CAMBIO CLIMÁTICO (LMCC).

El Proyecto de LMCC inició su tramitación en el año 2020, como resultado, o camino lógico, luego de haber implementado, en nuestro país los Planes de Acción Nacional de Cambio Climático, en 2008-2012⁷ y 2017-2022⁸ (PANCC I y PANCC II, respectivamente), el Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático, en 2014⁹, y planes de adaptación sectoriales (ej. Sector turismo¹⁰, sector silvoagropecuario¹¹). Adicionalmente se debe considerar que el país se comprometió con una meta de reducción de emisiones de carbono, mediante la firma del Acuerdo de París en el año 2015¹² y su posterior ratificación en 2017.

Los fundamentos de la propuesta de LMCC los constituyen la “alta vulnerabilidad” que tendría nuestro país a los efectos del Cambio Climático, según se ha documentado extensamente, y se ha recogido en PANCC I y PANCC II, y se menciona también en el mensaje con que se dio inicio al Proyecto de Ley.

⁶ “Conservación efectiva de la biodiversidad: 30 medidas urgentes para 2030”; Informe de la Comisión Conservación, Institucionalidad y Filantropía; Centro de Estudios Públicos (julio de 2023).

⁷ <https://mma.gob.cl/cambio-climatico/plan-de-accion-nacional-de-cambio-climatico-2008-2012-pancc/>

⁸ <https://mma.gob.cl/cambio-climatico/plan-de-accion-nacional-de-cambio-climatico-2017-2022-pancc-ii/>

⁹ <chrome-extension://efaidnbnmnnibpcajpcglclefindmkaj/https://mma.gob.cl/wp-content/uploads/2016/02/Plan-Nacional-Adaptacion-Cambio-Climatico-version-final.pdf>

¹⁰ <http://www.subturismo.gob.cl/documentos/plan-de-adaptacion-al-cambio-climatico-sector-turismo/>

¹¹ <https://www.odepa.gob.cl/temas-transversales/plan-de-adaptacion-nacional-al-cambio-climatico-sector-silvoagropecuario>

¹² <https://unfccc.int/es/process-and-meetings/the-paris-agreement/el-acuerdo-de-paris>

Los principales objetivos que persigue la LMCC responden, entre otros, a la necesidad de mejorar la gestión asociada al desarrollo de políticas climáticas de largo plazo, a la institucionalidad asociada, y a los instrumentos de gestión del Cambio Climático.

El objetivo de este acápite es identificar y analizar los nuevos desafíos que plantea la implementación de la LMCC, en el desarrollo y gestión de proyectos. Principalmente, en el marco de la evaluación de proyectos en el Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA), en tanto se deben incorporar medidas de acción y adaptación que implica la consideración del Cambio Climático (en adelante CC) en los procesos de evaluación ambiental.

Tal como se lee en el primer artículo de la ley, su objetivo es hacer frente a los desafíos que presenta el cambio climático, transitar hacia un desarrollo bajo en emisiones de gases de efecto invernadero y otros forzantes climáticos, hasta alcanzar y mantener la neutralidad de emisiones de gases de efecto invernadero al año 2050, adaptarse al cambio climático, reduciendo la vulnerabilidad y aumentando la resiliencia a los efectos adversos del cambio climático, y dar cumplimiento a los compromisos internacionales asumidos por el Estado de Chile en la materia.

Para el logro de sus objetivos, en primer término, menciona los principios en que se basa la nueva norma, entre los que se destacan: Costo-Efectividad¹³, Equidad y Justicia Climática¹⁴, Participación ciudadana¹⁵, No regresión¹⁶, Progresividad, Transparencia, y Territorialidad, entre otros.

En el [Anexo VI](#) del presente Informe se presenta el detalle de las disposiciones establecidas en esta legislación.

¹³ Costo-Efectividad: “la gestión del cambio climático priorizará aquellas medidas que, siendo eficaces para la mitigación y adaptación, sean las que representen menores costos económicos, ambientales y sociales, considerando los costos indirectos de la inacción para la adaptación”.

¹⁴ Equidad y Justicia Climática: “es deber del Estado procurar una justa asignación de cargas, costos y beneficios, resguardando la capacidad de las generaciones futuras de satisfacer sus propias necesidades, con enfoque de género y especial énfasis en sectores, territorios, comunidades y ecosistemas vulnerables al cambio climático”. “La justicia climática busca el trato justo de todas las personas, así como evitar las discriminaciones que pueden conllevar determinadas políticas y decisiones que pretenden abordar el cambio climático”.

¹⁵ Participación ciudadana: “es deber del Estado contar con los mecanismos que permitan asegurar la participación de toda persona o agrupación de personas en la gestión del cambio climático, tanto a nivel nacional, como regional y local”.

¹⁶ No regresión: “la gestión del cambio climático no podrá ser modificada cuando se comprometan los objetivos de mitigación o adaptación establecidos o cuando ello implicare retroceder en los niveles de protección ambiental alcanzados o establecidos previamente”.

8.9. Discusión, conclusiones y recomendaciones

De todo lo anterior, es posible sostener que las amenazas que implica el cambio climático vienen a potenciar las demás amenazas sobre los ecosistemas y la biodiversidad; esto es, sobre la pérdida y degradación de hábitats, principalmente por cambio de uso de suelo; la alteración de la calidad ambiental; la sobreexplotación de recursos, principalmente de recursos marinos pelágicos y bentónicos; y la presencia de especies exóticas invasoras. Todas estas amenazas actúan en conjunto y de forma sinérgica, por lo cual no pueden ser estudiadas ni enfrentadas de manera aislada, sino que de manera integral.

Chile recientemente ha establecido la regulación marco sobre cambio climático y se encuentra en la implementación casi completa de su reglamentación e instrumentos de gestión. Como se presenta en Anexos, estos instrumentos se aplican en distintos niveles y consideran una amplia participación de entidades públicas y privadas y de la ciudadanía en general. En el caso de los esfuerzos relativos a la mitigación, ellos tienen como orientación los compromisos nacionales en el ámbito internacional, lo que supone una labor acumulativa de los diversos sectores y regiones según sus características propias para alcanzar metas nacionales definidas. Sin embargo, en los temas de adaptación asociados a la gestión hídrica esta estructura presenta limitaciones, ya que la aplicación de aquellas disposiciones que pudieren ser más efectivas y eficientes debieran ser jerarquizadas, priorizadas y focalizadas en el marco de los desafíos que presenta cada cuenca, lo que requiere de una institucionalidad adecuada a esos fines.

Finalmente, el país no cuenta con una adecuada evaluación respecto de la oferta y demanda de recursos para sostener fines ecosistémicos y/o ambientales a nivel de las cuencas y subcuencas. En efecto, si bien existe para otros rubros o situaciones una mayor cuantificación respecto del balance hídrico (por ejemplo, la existencia de balances de agua para consumo humano, o para fines productivos -minería, agricultura, etc.-), no existe análogamente una cuantificación de los recursos necesarios para sostener la biodiversidad y los servicios ecosistémicos, recomendándose avanzar en este sentido.

CAPÍTULO 9

Conclusiones generales y propuestas de políticas para la adaptación

9.1 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 de origen antropogénico 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 (ver párrafo 9.4).
- 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.

9.2. Principios de una políticas 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 (9.3).
- 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 (9.4).
- Las políticas orientadas al control de los riesgos de inundaciones y aluviones (9.5).

9.3. Políticas de aplicación nacional

9.3.1. 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 cuencas¹.

9.3.2. 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 aprovechados².

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

¹ 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).

² 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",

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 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 9.3.1b).

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.

9.3.3. 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 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 9.3.1. 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.

9.3.4. 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 plantas³.
- 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.

9.4. 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.

9.4.1. 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

³ 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.

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.

9.4.2. 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.

9.4.3. 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.

9.4.4. 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.

9.4.5. 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.

9.5. 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 glaciar repentino.

9.5.1. 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.

9.5.2. 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.

9.5.3. 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.

ANEXOS

ANEXO I

El cambio climático a nivel global y en Chile. Antecedentes

I.1. Introducción

Cambio climático se refiere a la variación del estado del sistema climático del planeta, que considera la atmósfera, hidrósfera, criósfera, litósfera y biosfera, durante períodos suficientemente largos (décadas o más años) hasta alcanzar un nuevo equilibrio. En la [Figura I.1](#), a través de la representación de la función densidad de probabilidades acumulada de una variable cualquiera, se visualiza el impacto de los cambios en los valores medios y variabilidad en las disponibilidades medias y extremas.

Se puede apreciar que, en cualquiera de las situaciones descritas, tanto la mediana cambia como también los valores extremos, en particular aquellos asociados a probabilidades de 10 y 90%. Así los valores bajos de la variable (asociados a probabilidades de 10%) disminuyen respecto de su valor original, mientras que los valores altos (asociados a probabilidades de 90%) pueden aumentar o disminuir frente a un cambio en la desviación estándar. Sin embargo, históricamente tanto la evaluación de los recursos hídricos como su gestión se han realizado considerando la estacionariedad de las series hidrológicas, por ello la información pasada, aunque valiosa, puede no representar los eventos y procesos hidrológicos futuros. El ciclo hidrológico es afectado por el cambio climático a través de muchos procesos y las interacciones entre estos son conocidas sólo parcialmente y medidas a escalas que pueden no ser las adecuadas; por esto, es difícil su cuantificación y la proyección de sus consecuencias. Además, incluso cuando se detectan cambios hidrológicos, la atribución de causas, incluido el cambio climático, a menudo sigue siendo incierta (ONU-Agua, 2019)¹.

¹ ONU-Agua. 2019. Climate Change and Water. Un-Water Policy Brief. Ginebra, ONU-Agua. www.unwater.org/publications/un-water-policy-brief-on-climate-change-and-water/

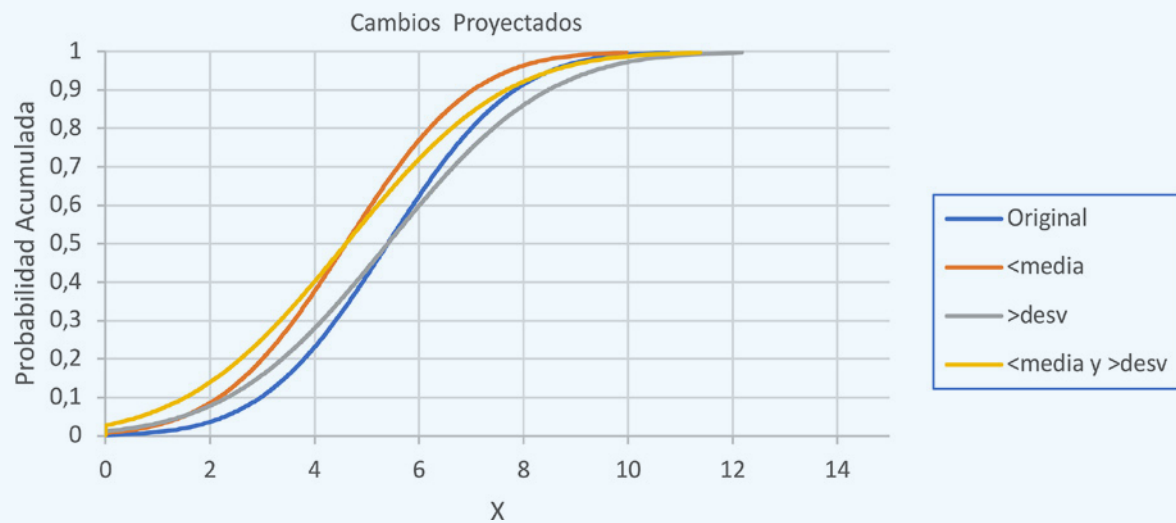


Figura I.1. Función densidad de probabilidades acumulada de una variable con media y desviación estándar dada (línea azul); al disminuir su valor medio (línea roja); al aumentar su desviación estándar (línea gris) y al disminuir su valor medio y aumentar su desviación estándar (línea naranja).

Los cambios hidrológicos, debido al cambio climático, implican mayores riesgos para la sociedad, no solo a través de alteraciones en los procesos hidrometeorológicos que rigen el ciclo hidrológico, sino también indirectamente, por riesgos para la producción de energía, seguridad alimentaria, desarrollo económico y desigualdad social, entre otros.

Cómo afecta el cambio climático en las componentes del ciclo hidrológico no es fácilmente observable. Cambios en los patrones de precipitación, intensidades y valores extremos, efectos en el derretimiento del hielo y nieve, cambios en el vapor de agua atmosférico, cambios en la evaporación y evapotranspiración, como también cambios en la humedad del suelo y la escorrentía, son determinados muchas veces a base de modelaciones.

Tal como se aprecia en la [Figura I.2](#), en la década del 70 en el siglo pasado, se inician las publicaciones científicas sobre el cambio climático y en 1988 la Organización Meteorológica Mundial (WMO por sus siglas en inglés) junto al Programa Ambiental de las Naciones Unidas (UNEP, por sus siglas en inglés) establecen el Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés). En 1990 este panel publica su primer reporte de evaluación del Cambio Climático (FAR).

En 1992 se instaura la Convención Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático cuyo objetivo es estabilizar las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera y de esa manera impedir perturbaciones peligrosas de carácter antropogénico en el sistema climático. En el año 1995 se establece el Protocolo de Kioto para limitar el crecimiento de las emisiones de gases de efecto invernadero, reforzando de manera significativa los principios de la Convención.

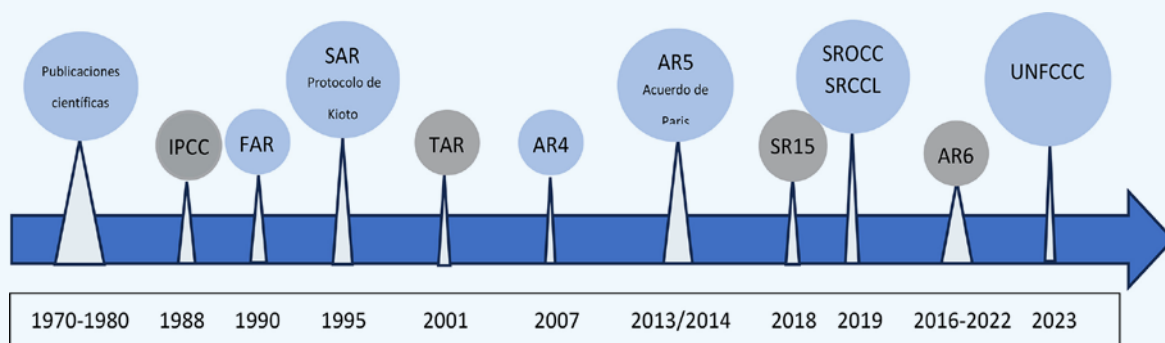


Figura I.2. Línea de tiempo sobre antecedentes de Cambio Climático. Fuente: Elaboración propia de la Comisión en base a IPCC (2023).

En el año 1995 se emite el segundo reporte (SAR) del IPCC, que revisa y actualiza tanto el FAR como el complemento publicado en 1992 para contribuir al debate en la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático en la Cumbre de Tierra, que tuvo lugar en Río de Janeiro en 1992.

En el tercer reporte (TAR) que se publica el año 2001 se identifica con mayor confiabilidad la influencia humana en el clima, concluyendo que hay pruebas nuevas y más sólidas de que la mayor parte del calentamiento observado en los últimos 50 años es atribuible a las actividades humanas. En este reporte se proponen grupos de escenarios futuros de emisiones de GEI organizados en cuatro familias: las familias de escenarios A1 y A2 ponen el énfasis en el desarrollo económico pero difieren en cuanto al grado de convergencia económica y social; las familias B1 y B2 hacen hincapié en el desarrollo sostenible también difieren en cuanto al grado de convergencia; incluyen además, dos escenarios, el A1F1 y el A1T, que ilustran otros posibles adelantos tecnológicos en materia de energía en el mundo del escenario A1.

En el reporte del IPCC del año 2007, conocido como AR4 (por sus siglas en inglés de *4th Assessment Report*) se actualiza la información conocida con respecto al cambio climático evaluando desde los puntos de vista científico, técnico y socioeconómico, sus efectos potenciales y las alternativas de mitigación y adaptación a este. En este mismo año el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático y Albert Arnold Gore Jr. fueron galardonados con el Premio Nobel de la Paz “por sus esfuerzos para construir y difundir un mayor conocimiento sobre el cambio climático causado por el hombre y poner las bases para tomar las medidas necesarias para contrarrestar ese cambio.

El quinto informe de evaluación del IPCC (AR5 por sus siglas en inglés) se publica en el año 2013 y se agregan en el año 2014 al menos dos informes (IPCC, 2014 a y b) que abordan aspectos de impactos, adaptación y vulnerabilidad como también de mitigación. En la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, COP21, realizada en París a fines de 2015, 196 países firman un tratado internacional sobre el cambio climático jurídicamente vinculante, que se conoce como El Acuerdo de París y que entró en vigor el 4

de noviembre de 2016. Su objetivo es limitar el calentamiento mundial a un aumento muy por debajo de 2 °C, preferiblemente a 1,5 °C, en comparación con los niveles preindustriales. Para alcanzar este objetivo de temperatura a largo plazo, los países se proponen alcanzar el máximo de las emisiones de gases de efecto invernadero lo antes posible para lograr un planeta con clima neutro para mediados de siglo XXI.

El IPCC presentó en el año 2018 el Informe especial (SR15) sobre el calentamiento global de 1,5 °C, informe basado en la evaluación de unas 6.000 publicaciones difundidas en los últimos años, el que confirma que el cambio climático ya está afectando a las personas, los ecosistemas y los medios de vida de todo el mundo. Además, demuestra que, según las leyes de la química y la física, es posible limitar el calentamiento a 1,5 °C, pero para ello se necesitarían transiciones sin precedentes en todos los aspectos de la sociedad. Se llega a la conclusión de que mantener el calentamiento en 1,5 °C en lugar de alcanzar o superar 2 °C presenta claras ventajas, mencionando entre estas que ello permitiría propiciar la consecución de otros objetivos mundiales, como la Agenda para el Desarrollo Sostenible. Se enfatiza en el documento que al 2030 deberían haberse reducido las emisiones de gases de efecto invernadero ya que en caso contrario el calentamiento global superará los 1,5 °C y se producirá la pérdida irreversible de los ecosistemas más frágiles y una crisis tras otra afectará a las personas y sociedades más vulnerables.

Los reportes especiales del IPCC (SROCC) sobre el océano y la criósfera en un clima cambiante y (SRCCL) sobre el cambio climático y la tierra fueron publicados en el año 2019. El primero de estos describe los efectos del calentamiento global observados y los probables efectos futuros sobre los océanos y la criósfera, junto con discutir las consecuencias, positivas y negativas, de estos cambios sobre los humanos y ecosistemas, así como alternativas de manejo para la mitigación y adaptación al cambio climático. En el segundo se abordan los impactos del cambio climático en la desertificación, la degradación de los suelos, la gestión sostenible de las tierras, la seguridad alimentaria y la emisión de gases de efecto invernadero en los ecosistemas terrestres de las Naciones Unidas.

Estos reportes especiales cuyos temas fueron definidos en el año 2016, forman parte del sexto informe de evaluación del IPCC (AR6) cuyos capítulos (La base de la ciencia física; Impactos, adaptación y vulnerabilidad y Mitigación del cambio climático) se publican parcialmente entre los años 2021 y 2022 mientras el informe de síntesis se entrega a inicios del año 2023. Dichos resultados indican que el cambio climático es generalizado, rápido y se está intensificando. A fines de 2023 se presenta el reporte de síntesis de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (UNFCCC, por sus siglas en inglés) el que proporciona una evaluación del progreso colectivo hacia el logro del propósito y los objetivos a largo plazo del Acuerdo de París e informa a las Partes sobre áreas potenciales para actualizar y mejorar su acción y apoyo, así como para mejorar la cooperación internacional para la acción climática

I.2. Evidencias del cambio climático a nivel global

La evidencia recopilada a nivel global da cuenta de variaciones en el clima respecto a la era preindustrial. En este contexto, son numerosas las fuentes que dan cuenta de este cambio, logrando cuantificar dichos cambios como también proyectar las condiciones hidrometeorológicas futuras en distintos lugares del mundo.

La **Figura I.3** muestra el cambio observado en la temperatura en superficie entre 1901 y 2012 reportado por el IPCC (2013) apreciándose que, en general, las tendencias al aumento son claras. Por otra parte, en el mismo informe, se señala que el nivel de confianza en los cambios de las precipitaciones promediadas sobre las zonas terrestres a escala mundial desde 1901 es bajo hasta antes de 1951, y medio, a partir de ese año. Tal como se aprecia en la **Figura I.4**, en promedio, sobre las zonas continentales de latitudes medias del hemisferio norte, las precipitaciones han aumentado desde 1901 (nivel de confianza medio antes de 1951, y alto después). En otras latitudes, existe un nivel de confianza bajo en las tendencias, ya sean positivas o negativas, a largo plazo promediadas por zonas.

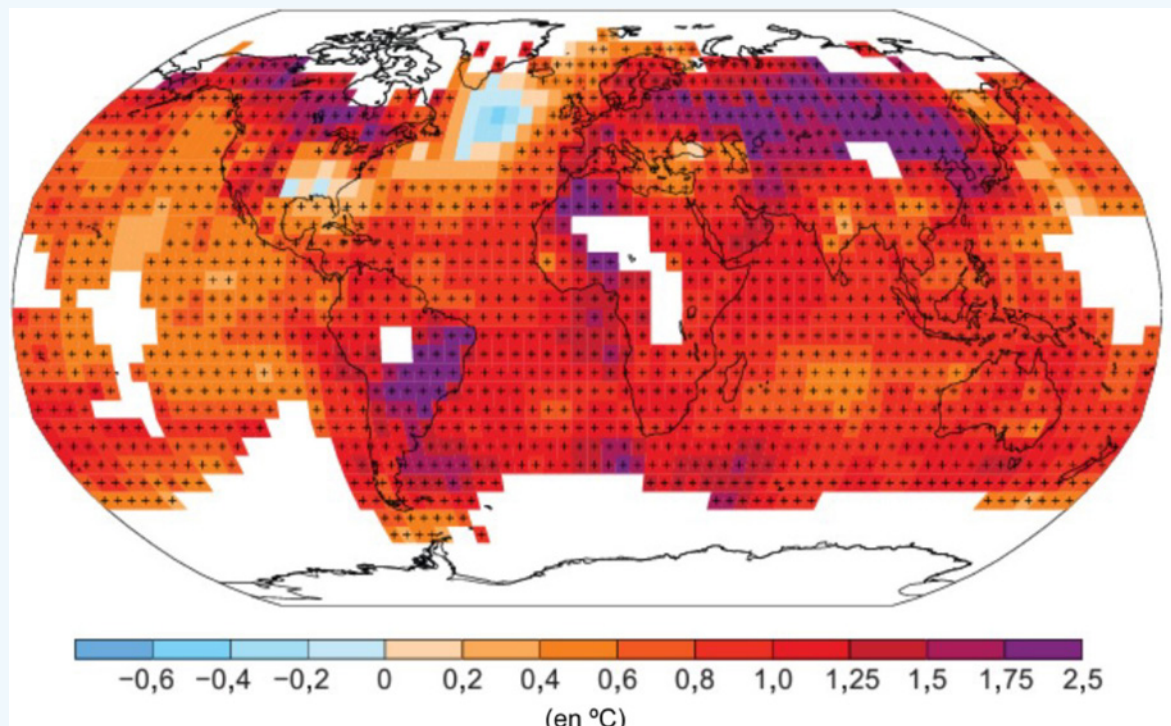


Figura I.3. Cambios observados en la temperatura en superficie entre 1901 y 2012. Las celdas con signo + indican que la tendencia es significativa al nivel del 10%. Fuente: IPCC (2013).

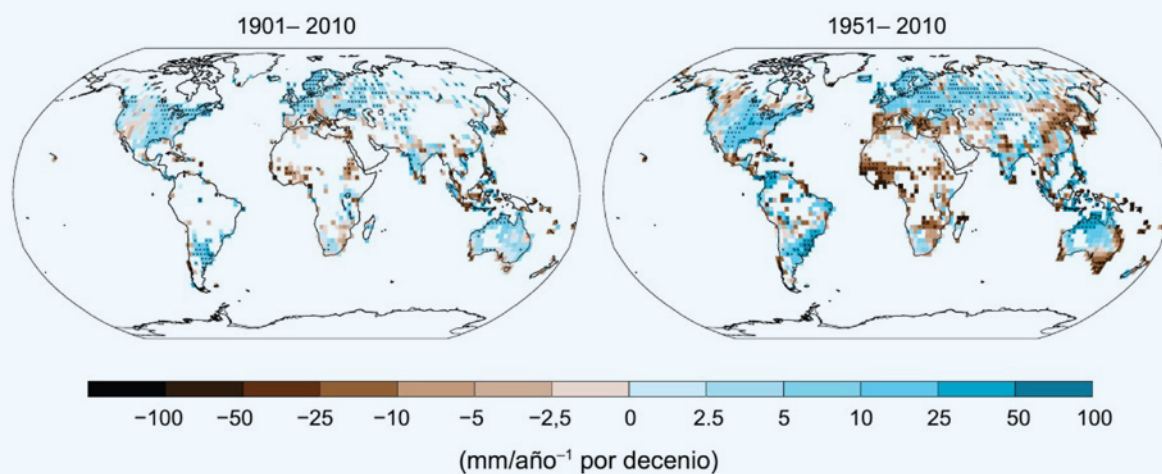


Figura I.4. Cambios observados en la precipitación anual sobre tierra, entre 1901 y 2010, y entre 1951 y 2010. Fuente: IPCC (2013).

En un análisis más detallado, el IPCC determinó en su reporte asociado a la fase AR5 un aumento de la temperatura y una disminución de la precipitación en algunas zonas del mundo; así a nivel global, se constata que los treinta años comprendidos entre 1983 y 2012 muestran un aumento de $0,85\text{ }^{\circ}\text{C}$ con respecto al promedio completo entre 1880 y 2012, siendo dichos años los más cálidos desde que se tienen registros confiables y homogéneamente distribuidos en el globo. En esta misma línea, al cierre del informe del IPCC (2014), se indicaba desde 1950 una tendencia sostenida de $+0,05\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{década}$ en la escala global.

Posteriormente, el informe SR15 del IPCC (2018), concluye que el aumento de la temperatura media anual, en la escala global, oscila entre $0,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $1,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ con respecto a los niveles preindustriales. En este informe, se indica que es probable que, en los próximos 30 años, este nivel de calentamiento se incremente a $1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, acentuando aún más las condiciones de sequía, tanto meteorológicas como hidrológicas. En particular, el documento expone, también, que mientras más reciente se adopta el promedio, las temperaturas globales medias aumentan aún más con respecto al periodo preindustrial, registrando una tendencia sostenida en el tiempo. Otros antecedentes (IPCC, 2023) muestran, además, que desde 1900 la temperatura media observada del aire en la superficie terrestre ha aumentado más que la temperatura media global en superficie considerando el océano (Figura I.5).

En el informe del IPCC del año 2023 se ratifica el impacto de la actividad humana en el aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero, que han ocasionado, en el período 2011-2020, el calentamiento global del planeta de $1,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ por sobre lo existente en el período 1850-1900 que se muestra en la Figura I.5. Asimismo, se indica que estos cambios ya están afectando a muchos fenómenos meteorológicos y climáticos extremos en distintas regiones del mundo, produciéndose daños tanto en la naturaleza como en las personas, especialmente en aquellas comunidades que, históricamente, han contribuido menos a

los cambios de clima actuales. De esta manera se concluye que, aproximadamente, la mitad de la población mundial experimenta actualmente una grave escasez de agua durante al menos parte del año debido a una combinación de factores climáticos y no climáticos.

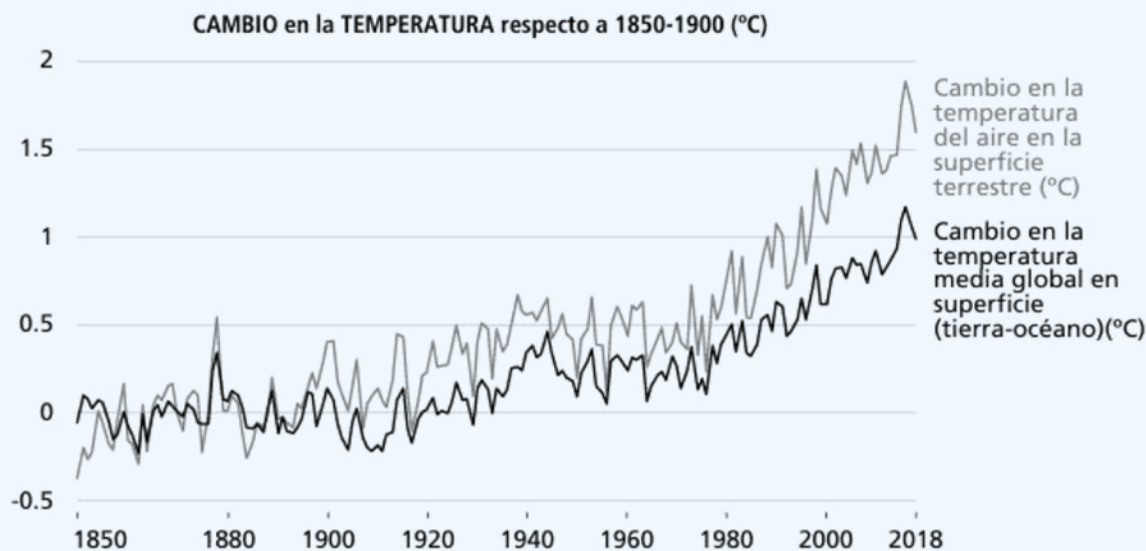


Figura I.5. Incrementos en la temperatura a nivel global. Fuente: IPCC (2021).

En consecuencia, la publicación del reporte de la Fase 6 (AR6, agosto de 2021) confirma los cambios enunciados anteriormente como también proyecta los cambios específicos en el ciclo hidrológico y el efecto del aumento de temperatura en las sequías. De acuerdo con las observaciones y modelaciones expuestas en el informe IPCC (2013) se concluyen los siguientes aspectos:

- El forzamiento radiativo total es positivo y ha dado lugar a la absorción de energía por el sistema climático. La principal contribución al forzamiento radiativo total proviene del aumento en la concentración de CO₂ en la atmósfera que se viene produciendo desde 1750.
- La influencia humana en el sistema climático es clara. Es evidente a tenor de las crecientes concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera, el forzamiento radiativo positivo y el calentamiento observado, y gracias a la comprensión del sistema climático.
- Los modelos climáticos han mejorado desde el Cuarto Informe de Evaluación. Los modelos reproducen patrones y tendencias de la temperatura en superficie a escala continental observados a lo largo de muchos decenios, en particular el calentamiento más rápido producido desde mediados del siglo XX y el enfriamiento que se produce inmediatamente tras las grandes erupciones volcánicas (nivel de confianza muy alto).

- En particular, desde el AR4 se ha mejorado la simulación de los patrones a escala continental de las precipitaciones, no así a escala regional donde la evaluación se ve dificultada por las incertidumbres relativas a las observaciones. Asimismo, actualmente los modelos reproducen mejor algunos fenómenos climáticos importantes como el ENOS.

Otros aspectos que con algún grado de confianza se derivan de los informes del IPCC:

- Se consigna que, con un nivel de confianza medio, en algunas zonas áridas, el aumento de la temperatura del aire en la superficie terrestre y la evapotranspiración y la disminución de la cantidad de precipitación, junto con la variabilidad climática y las actividades humanas, han contribuido a la desertificación.
- Es posible indicar, con un alto nivel de confianza, que el calentamiento global ha ocasionado cambios en las zonas climáticas de muchas regiones del mundo (expansión de las zonas climáticas áridas y la contracción de las zonas climáticas polares) y que, como consecuencia de ello, muchas especies de plantas y animales han experimentado cambios en sus rangos y abundancia y en sus actividades estacionales.
- También con un nivel de confianza alto, se señala que el cambio climático, dependiendo de la gestión de la tierra, puede exacerbar los procesos de degradación de la tierra debido a aumentos en la intensidad de la lluvia, las inundaciones, la frecuencia y severidad de la sequía, la sobrecarga térmica, los períodos de sequía, el viento, el nivel del mar, la acción de las olas y el deshielo del permafrost. Igualmente, aunque con un nivel medio de confianza, se afirma que la erosión costera en curso se está intensificando y, con el aumento del nivel del mar, se está afectando a más regiones lo cual se suma a la presión del uso de la tierra en ciertos casos.
- Con un alto nivel de confianza, se afirma que en la mayoría de las regiones el aumento de temperatura ha provocado una mayor frecuencia, intensidad y duración de los fenómenos relacionados con el calor, incluyendo las olas de calor. También, se señala, con un nivel medio de confianza, que ha aumentado la frecuencia e intensidad de las sequías en algunas regiones (en algunas partes de América del Sur, entre otras) y, también, la intensidad de las precipitaciones fuertes a escala mundial.
- El cambio climático ha afectado negativamente a la seguridad alimentaria y a los ecosistemas terrestres, además de contribuir a la desertificación y a la degradación de las tierras en muchas regiones (nivel de confianza alto).

I.3. Proyecciones climáticas a nivel global para escenarios RCP (AR5) y SSP (AR6)

Se presentan en este acápite los escenarios planteados por el IPCC para las simulaciones pasadas y las proyecciones futuras a nivel global de las variables climáticas y los impactos a los que estos conducen en el planeta.

En 1995 el Grupo de Trabajo en modelos acoplados del Programa Mundial de Investigación del Clima Mundial (WCRP) organizó el Proyecto de Intercomparación de modelos de clima acoplado (CMIP en sus siglas en inglés, *Coupled Model Intercomparison Project*) con el fin de tener un marco de comparación para mejorar tanto el conocimiento del cambio climático como para informar a las agencias nacionales e internacionales acerca de posibles acciones para mitigar los efectos del cambio climático.

CMIP5 es la quinta fase del proyecto completada en 2014. En esta etapa se tenía como objetivo principal responder aspectos científicos complejos surgidos en etapas anteriores, pero, además, generar un mejor entendimiento general del clima, y proveer estimaciones de cambio de clima futuro a corto (hacia 2035) y largo plazo (2100 y más allá), útiles para evaluar tanto las consecuencias como el impacto del cambio climático. Se plantea como base para los escenarios futuros distintas trayectorias de concentración de gases de efecto invernadero representativas (RCP) lo que originaría un rango de valores de forzamiento radiativo en el año 2100.

CMIP6 es la fase más reciente del proyecto² donde se organiza un conjunto de hasta 23 experimentos ejecutados por más de 33 grupos de investigación a base de un conjunto de datos comunes para el forzado histórico de los modelos y que también comparten un conjunto común de los escenarios futuros que combinan escenarios socio-económicos (SSP) con trayectorias de concentración representativas (RCP).

Escenarios RCP (AR5). Las trayectorias de concentración representativas que definen los escenarios futuros se visualizan en la [Figura I.6](#), donde la línea negra representa los valores observados hasta el año 2012. Se aprecia que en los escenarios antiguos SRES más desfavorables (A2 y A1B) se simulaban concentraciones hacia el año 2100 entre los escenarios RCP6.0 y RCP8.5. La nomenclatura de los escenarios se adopta en función de lo indicado en la [Tabla I.1](#) (Moss *et al.*, 2010). En la [Tabla I.2](#) se muestran los cambios proyectados en la temperatura media global en superficie con relación al periodo 1850-1900 para el corto plazo y hacia finales de siglo; estos cambios se visualizan en la [Figura I.7](#) indicando con el mismo color el número de modelos de CMIP5 utilizados para calcular la media del conjunto de proyecciones.

² <https://interactive-atlas.ipcc.ch/>

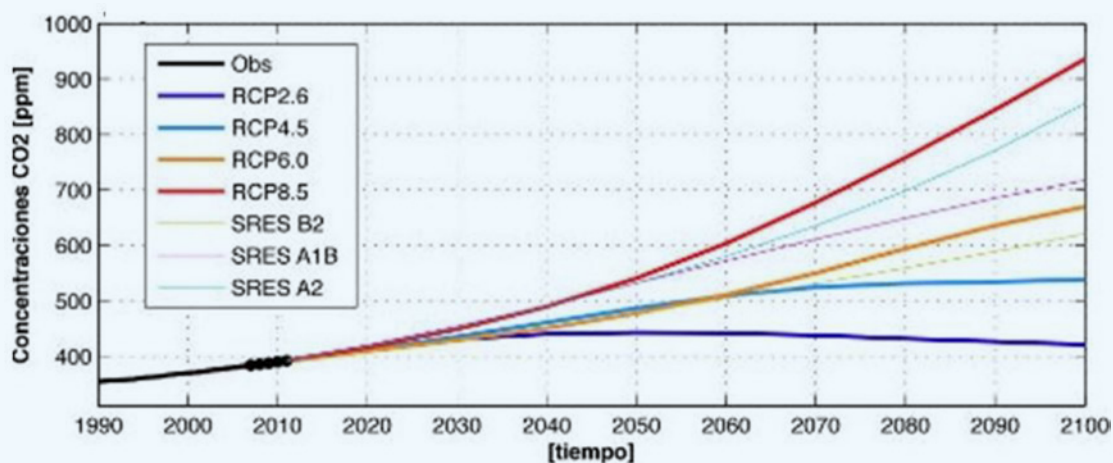


Figura I.6. Escenarios de trayectorias de concentración de CO₂ representativas. Fuente: <https://ingenieria.uchile.cl/noticias/102126/ultimo-informe-del-ipcc-evidencias-del-calentamiento-global>

Tabla I.1. Los escenarios RCP. Fuente: Moss *et al.*, 2010.

Nombre	Forzamiento radiativo	Concentración (ppm)	Trayectoria
RCP8.5	>8,5 Wm ⁻² en 2100	>1.370 CO ₂ -eq en 2100	Aumentando
RCP6.0	~6 Wm ⁻² y se estabiliza después de 2100	~850 CO ₂ -eq y se estabiliza después de 2100	Estabilización sin excedencia
RCP4.5	~4,5 Wm ⁻² y se estabiliza después de 2100	~650 CO ₂ -eq y se estabiliza después de 2100	Estabilización sin excedencia
RCP2.6	Máximo en ~3 Wm ⁻² antes de 2100 y luego declina	Máximo en ~490 CO ₂ -eq antes de 2100 y luego declina	Máximo y declinación

Tabla I.2. Cambio proyectado en temperatura media global en superficie respecto al período 1850-1900 según escenarios RCP. Fuente: IPCC, 2013.

Escenario	A corto plazo 2031-2050		Finales de siglo 2081-2100	
	Media (°C)	Rango probable (°C)	Media (°C)	Rango probable (°C)
RCP2.6	1,6	1,1 a 2,0	1,6	0,9 a 2,4
RCP4.5	1,7	1,3 a 2,2	2,5	1,7 a 3,3
RCP6.0	1,6	1,2 a 2,0	2,9	2,0 a 3,8
RCP8.5	2,0	1,5 a 2,4	4,3	3,2 a 5,4

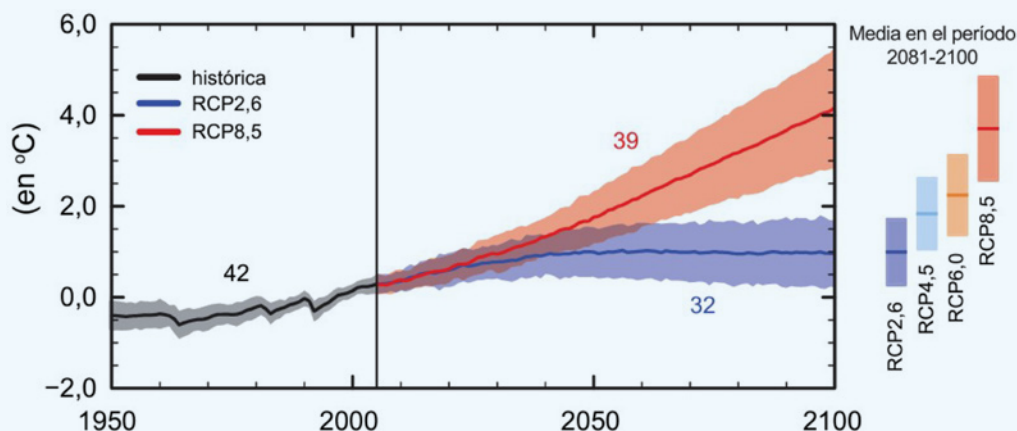


Figura I.7. Evolución del cambio de temperatura media global en superficie según los escenarios RCP. Se indica el número de modelos climáticos utilizados en cada escenario.

Fuente: IPCC (2014).

Concordando con lo señalado en la [Tabla I.2](#) y que se observa en la [Figura I.7](#), en los mapas de la [Figura I.8](#) se visualizan tanto las diferencias que se proyectan entre los cambios de temperatura media en superficie (panel a) y precipitación anual (b) hacia fines de siglo respecto al período 1986-2015, al usar los escenarios extremos RCP2.6 y RCP8.5. El número de modelos de CMIP5, utilizados para calcular la media del conjunto de modelos se muestra en la esquina superior derecha de cada mapa; las tramas sombreadas indican las regiones donde la media de los modelos múltiples es pequeña en comparación con la variabilidad interna natural (esto es, inferior a una desviación típica de la variabilidad interna natural en medias de 20 años). Las tramas punteadas indican las regiones donde la media de los modelos múltiples es grande en comparación con la variabilidad interna natural (es decir, superior a dos desviaciones típicas de la variabilidad interna natural en medias de 20 años) y donde, por lo menos, el 90% de los modelos concuerdan con el signo del cambio.

UNESCO, en el año 2018, teniendo en cuenta la importancia del agua de deshielo de los glaciares en las poblaciones y economías de los países andinos, recopila algunos estudios sobre el impacto del retroceso de glaciares sobre los recursos hídricos y presenta un atlas adoptando como línea base el período 1950-2000 y las proyecciones futuras en el escenario RCP8.5 (IPCC, 2013) de las variables temperatura media diaria y precipitación anual del AR5 que se visualizan en las [Figuras I.9 y I.10](#), respectivamente. En lo que respecta a las previsiones a corto plazo, estas son muy distintas de las observaciones reales, especialmente en las precipitaciones; no obstante, se indica que pueden proporcionar un indicador de las tendencias a largo plazo. Los resultados obtenidos se muestran en la [Figura I.11](#), tanto para la escorrentía pasada como proyectada de los glaciares de los Andes como también el punto en el tiempo de máxima escorrentía por deshielo, denominado “pico hídrico”. Se observa en dicha figura que este valor máximo ya habría ocurrido en la mayoría de los glaciares

que se detallan y el caso más tardío se presenta en el año 2050 para el glaciar Santa Cruz, en Argentina. El retroceso de los glaciares se explica por el aumento de la temperatura en Los Andes y los cambios en precipitación por lo que este retroceso se ha atribuido al cambio climático ya que estos responden relativamente rápido a los cambios de estas variables. De acuerdo con el Atlas Glaciar (2018) este retroceso es principalmente observable en los glaciares pequeños, especialmente en aquellos ubicados a baja altitud en los Andes tropicales. Los resultados indican que la disminución del aporte glacial a la escorrentía provocaría en estas zonas estrés hídrico afectando la agricultura, la minería y la producción de energía hidroeléctrica; se estima también que el sector turístico podría verse afectado por la disminución del tamaño de los glaciares.

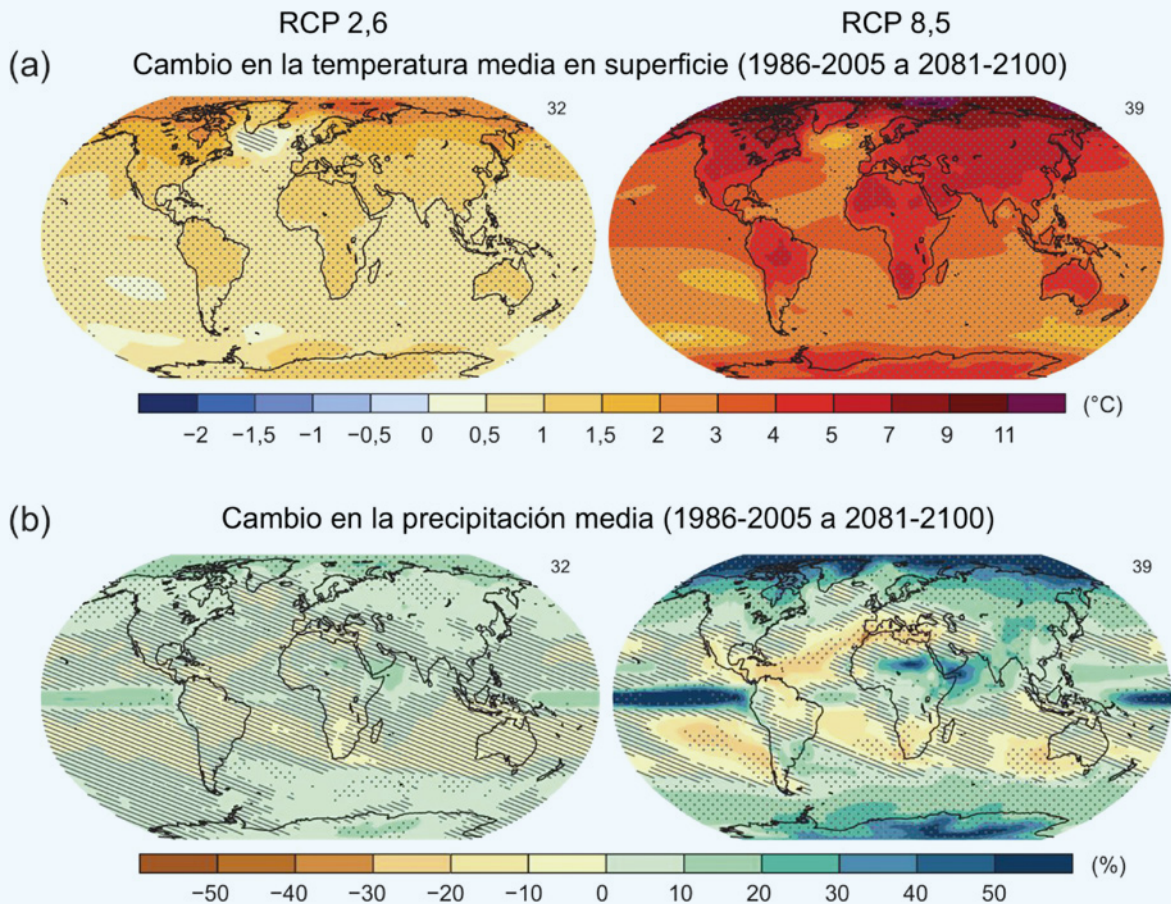


Figura I.8. Cambios de temperatura media en superficie en °C (panel a) y precipitación media (panel b) hacia fines de siglo, respecto del período 1986-2005 en escenarios RCP2.6 y RCP8.5. Fuente IPCC (2013).

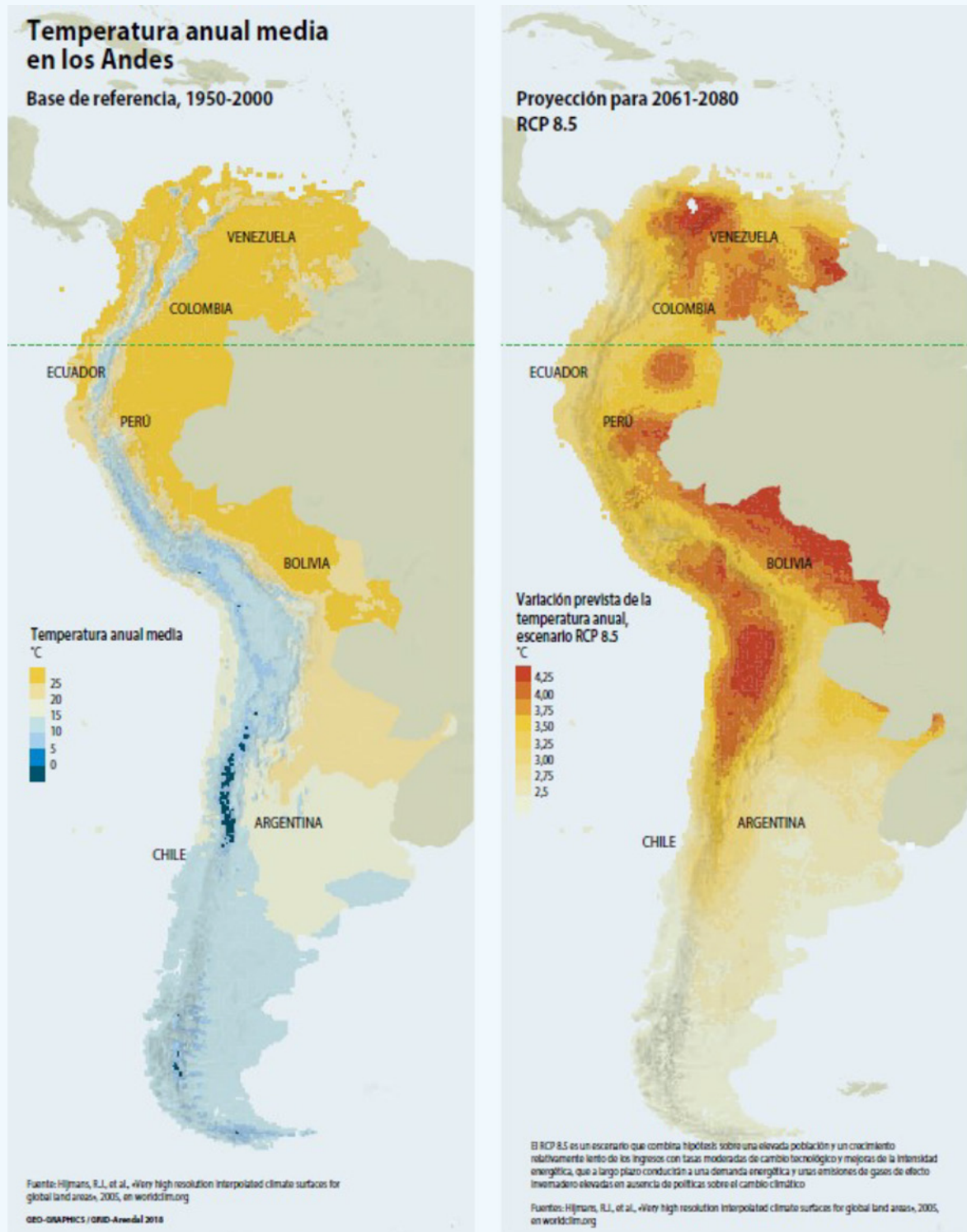


Figura I.9. Temperatura media anual promedio en Los Andes en período 1950-2000 y cambio proyectado para el período 2061-2080 bajo RCP8.5. Fuente UNESCO (2018).

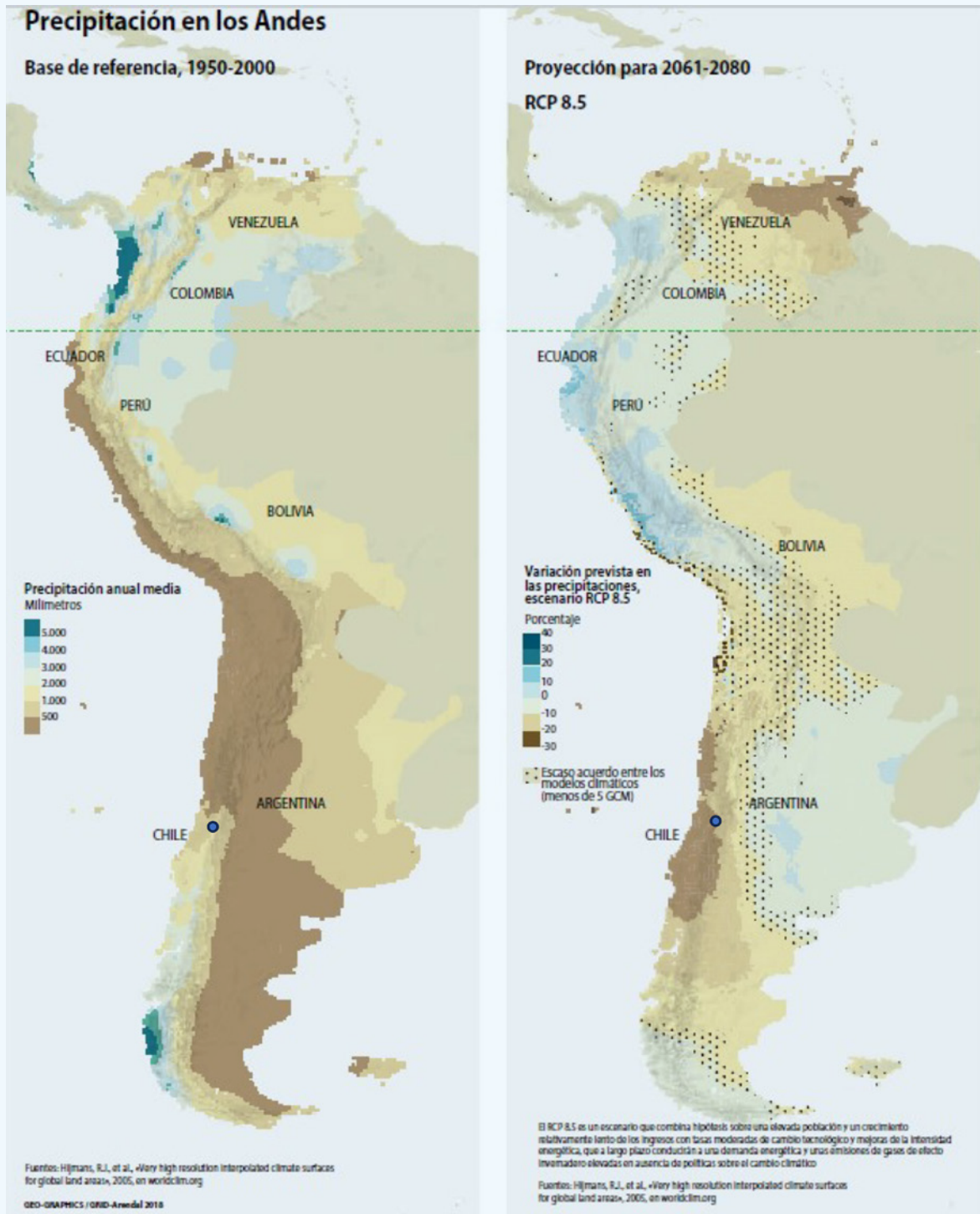


Figura I.10. Precipitación anual promedio en Los Andes en período 1950-2000 y cambio proyectado para el período 2061-2080 bajo RCP8.5. Círculo azul indica ubicación aproximada de Santiago. Fuente UNESCO (2018).

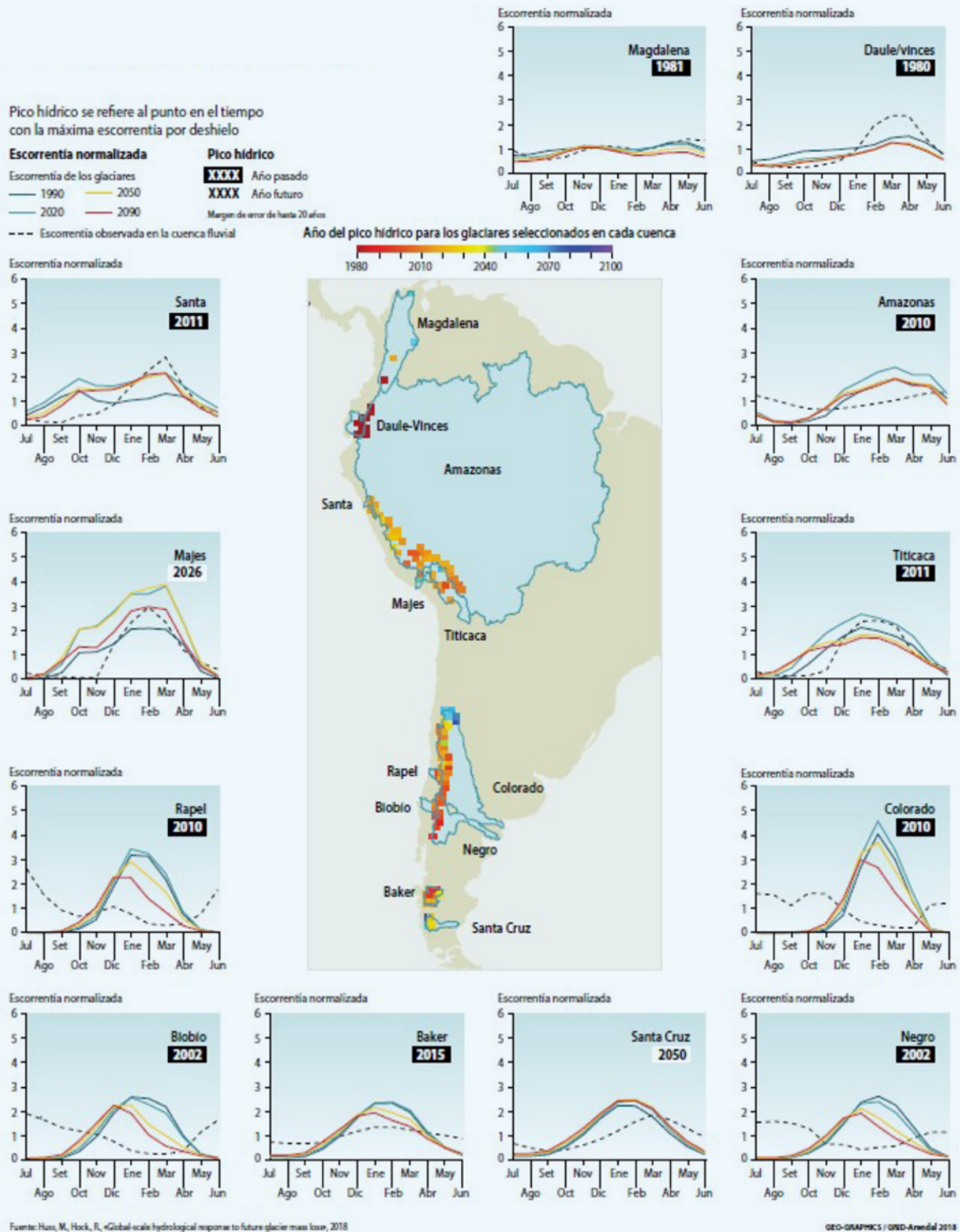


Figura I.11. Escorrentía glacial normalizada en algunas cuencas de los Andes en los años 1990, 2000, 2050 y 2090. Se indica en cada caso el año del “pico hídrico”. Fuente: Unesco, 2018.

Escenarios SSP (AR6). La versión 6 del Programa Mundial de Investigación del Clima del Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados (CMIP6) contempla del orden de 40 modelos producidos por más de 30 instituciones alrededor del mundo que son usados por el IPCC para proyectar el clima futuro. Esta versión usa los modelos climáticos de nueva generación implementados con las últimas tecnologías, mejorando las modelaciones de procesos físicos y actualizando las Trayectorias de Concentración Representativas (RCPs) de la versión anterior (AR5) relacionándolas con el mundo real. De esta manera, los nuevos modelos climáticos se combinan con trayectorias Socio - Económicas (crecimiento de población, urbanización, avances tecnológicos) generándose los escenarios SSP-RCPs. La **Figura I.12** muestra los escenarios socio-económicos que se plantean en el AR6, mientras que en la **Tabla I.3** se presentan las proyecciones de cambio en la temperatura media global en superficie, evaluados para períodos de 20 años seleccionados y los cinco escenarios compuestos del AR6 (combinados con las trayectorias de concentraciones representativas RCP) que describen desde un escenario de desarrollo sostenible (SSP1-1.9 con bajo crecimiento de la población, alto crecimiento económico, altos niveles de educación, gobernabilidad, una sociedad globalizada, cooperación internacional, desarrollo tecnológico y conciencia ambiental) hasta un escenario basado en combustibles fósiles (SSP5-8.5 con un bajo crecimiento en la población, un elevado crecimiento económico y un alto desarrollo humano) y se visualizan en la **Figura I.13**. Los cambios de precipitación media anual (%) con respecto al período 1850-1900 frente a distintos aumentos de la temperatura media global en superficie se observan en la **Figura I.14**.

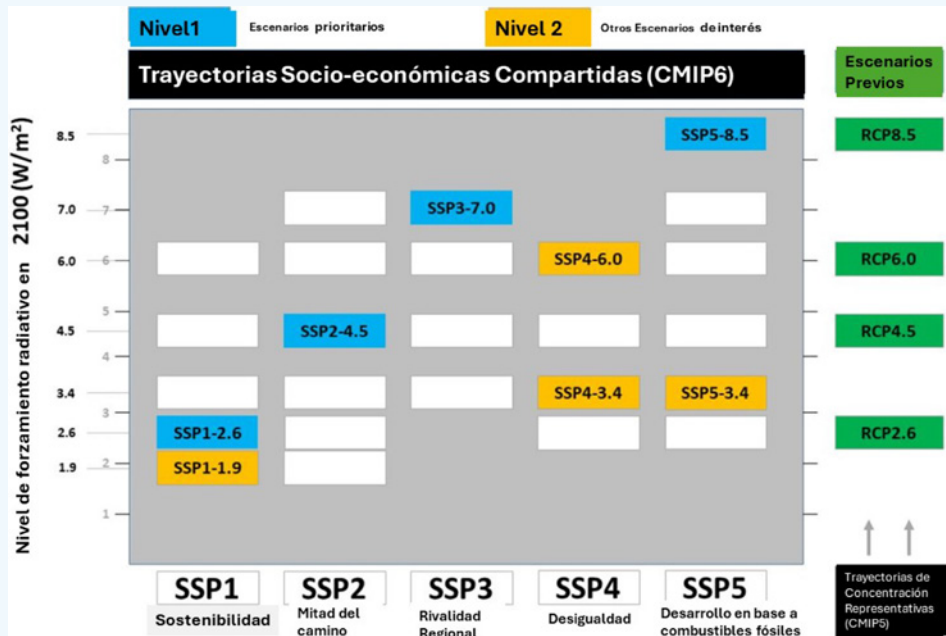


Figura I.12. Escenarios SSP. Fuente: Adaptado de IPCC (2021).

Fuente: <https://climate-scenarios.canada.ca/?page=cmip6-overview-notes>.

Tabla I.3. Cambios en la temperatura media global en superficie en escenarios AR6.

Fuente: IPCC (2021).

Escenario	Corto plazo, 2021-2040		Medio plazo, 2041-2060		Largo plazo, 2081-2100	
	Mejor estimación (°C)	Rango muy probable (°C)	Mejor estimación (°C)	Rango muy probable (°C)	Mejor estimación (°C)	Rango muy probable (°C)
SSP1-1.9	1,5	1,2 a 1,7	1,6	1,2 a 2,0	1,4	1,0 a 1,8
SSP1-2.6	1,5	1,2 a 1,8	1,7	1,3 a 2,2	1,8	1,3 a 2,4
SSP2-4.5	1,5	1,2 a 1,8	2,0	1,6 a 2,5	2,7	2,1 a 3,5
SSP3-7.0	1,5	1,2 a 1,8	2,1	1,7 a 2,6	3,6	2,8 a 4,6
SSP5-8.5	1,6	1,3 a 1,9	2,4	1,9 a 3,0	4,4	3,3 a 5,7

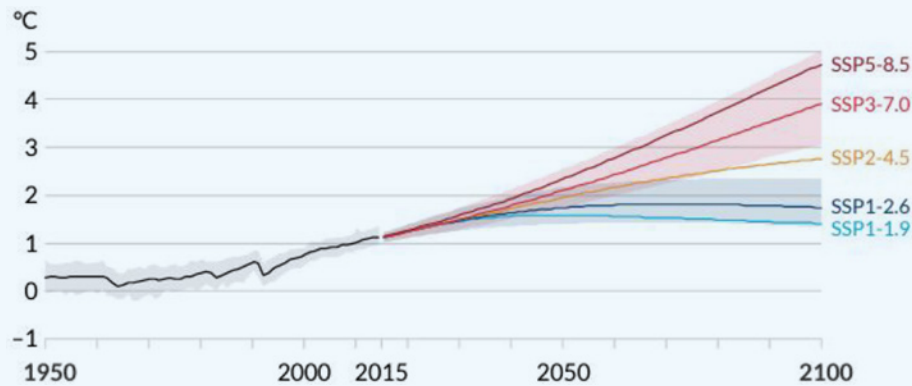


Figura I.13. Cambios de temperatura media en superficie. Fuente: Adaptado de IPCC (2021).

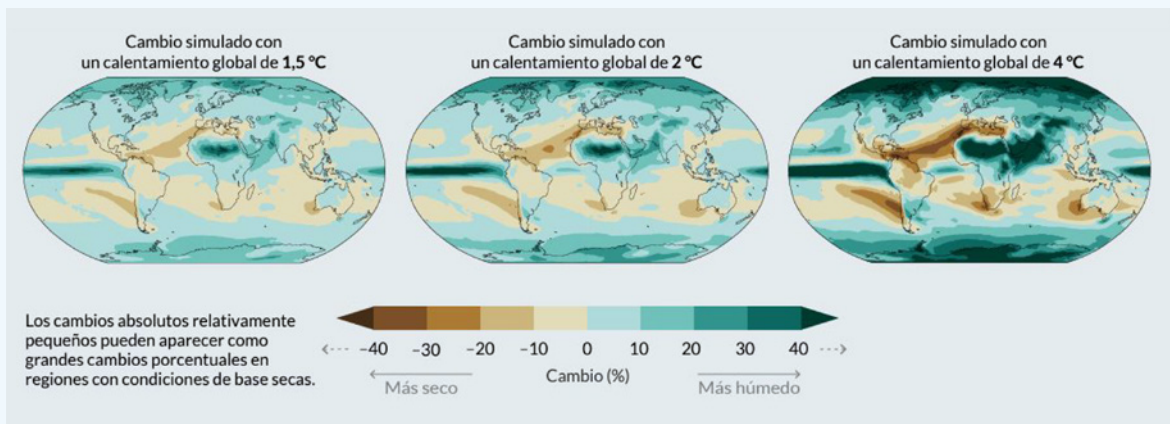


Figura I.14. Cambios de precipitación media anual (%) con respecto al período 1850-1900 frente a distintos aumentos de la temperatura media global en superficie. Fuente: IPCC (2021).

Gutiérrez *et al.* (2021) presentan un atlas interactivo³ que permite explorar los cambios proyectados en el clima a escalas regionales, bajo los escenarios SSP. En las Figuras I.15 y I.16 se aprecian los cambios porcentuales, respecto al período 1850-1900, proyectados en la precipitación anual de la región oeste de Sudamérica hasta fines del siglo XXI para el escenario SSP5-8.5 considerando un calentamiento global de 2 °C y 4 °C, respectivamente. Para iguales condiciones, las Figuras I.17 y I.18 presentan los cambios que se proyectan en la nieve caída, mientras en las Figuras I.19 y I.20 se visualiza el índice de precipitación estandarizado, SPI-6, que generalmente se asocia con las sequías hidrológicas. Se aprecia en estas figuras que los valores de precipitación simulados por los modelos presentan, tanto en el período de observación como en las proyecciones, una dispersión similar señalando claramente una disminución de la precipitación para el futuro en la región, situación que se agudiza con el aumento de la temperatura media global de 2 a 4 °C. Para el caso de la nieve se observa que la dispersión de las simulaciones en el período de observación es menor que la de los valores proyectados futuros y se aprecia una disminución de la nieve hacia el futuro en ambos escenarios de temperatura, aunque no marcadamente diferentes, a pesar de la disminución de modelos en el escenario de aumento de temperatura de 4 °C.

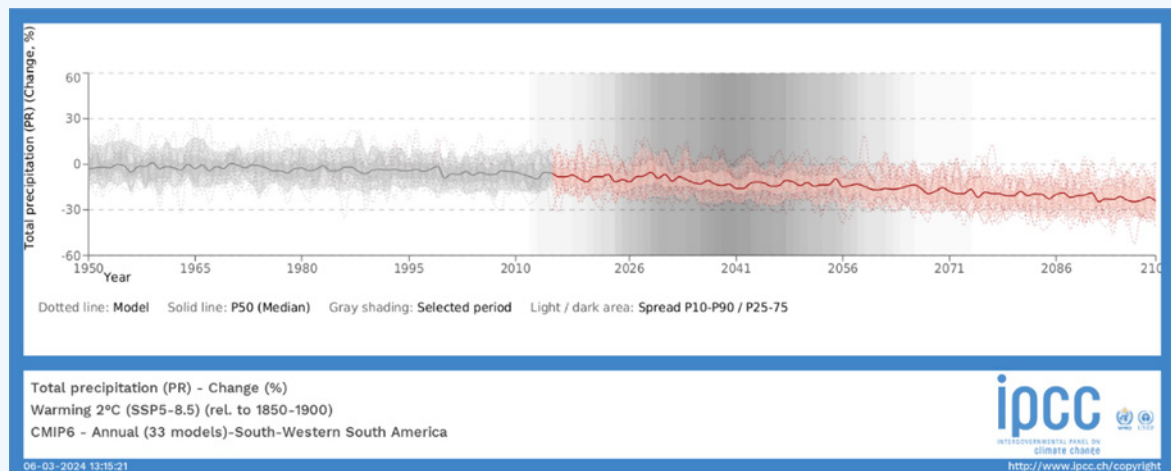


Figura I.15. Cambios (%) respecto del período 1850-1900 proyectados en la precipitación anual de la región oeste de Sudamérica hasta fines del siglo XXI para el escenario SSP5-8.5 considerando un calentamiento global de 2 °C. Fuente: obtenido del Atlas Interactivo (<https://climate-scenarios.canada.ca/?page=cmip6-overview-notes>).

³ <https://interactive-atlas.ipcc.ch/>

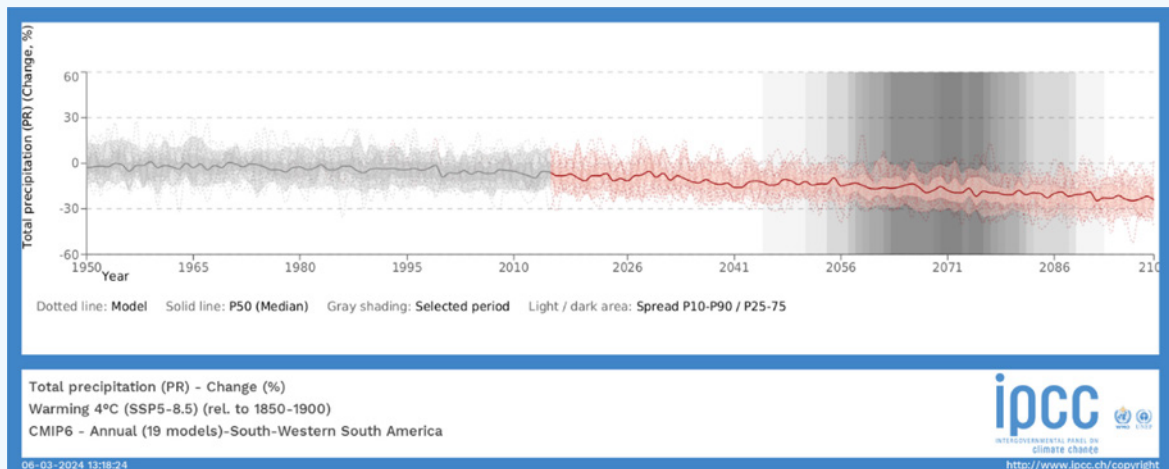


Figura I.16. Cambios (%) respecto del período 1850-1900 proyectados en la precipitación anual de la región oeste de Sudamérica hasta fines del siglo XXI para el escenario SSP5-8.5 considerando un calentamiento global de 4 °C. Fuente: obtenido del Atlas Interactivo (<https://climate-scenarios.canada.ca/?page=cmip6-overview-notes>).

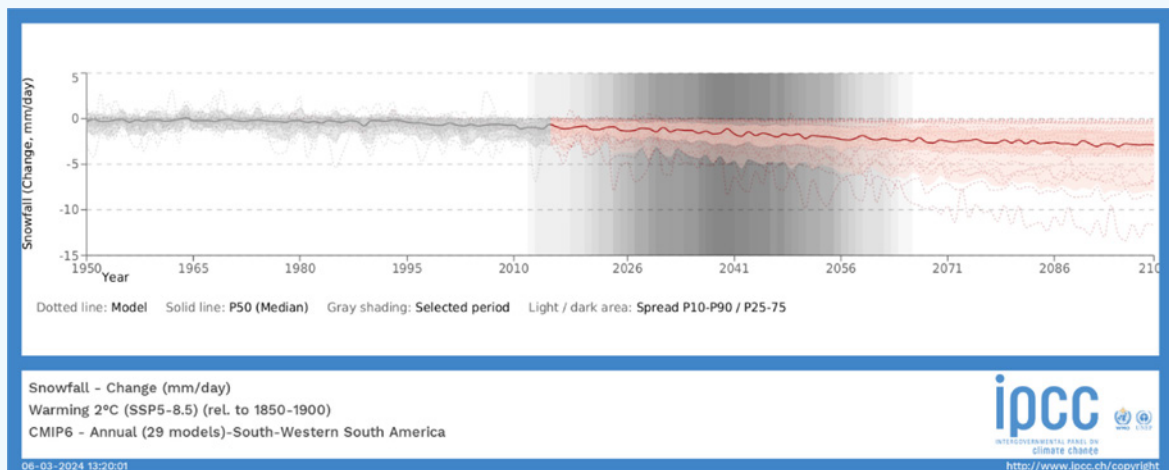


Figura I.17. Cambios (mm/día) respecto del período 1850-1900 proyectados en la nieve caída anual en la región oeste de Sudamérica hasta fines del siglo XXI para el escenario SSP5-8.5 considerando un calentamiento global de 2 °C. Fuente: obtenido del Atlas Interactivo (<https://climate-scenarios.canada.ca/?page=cmip6-overview-notes>).

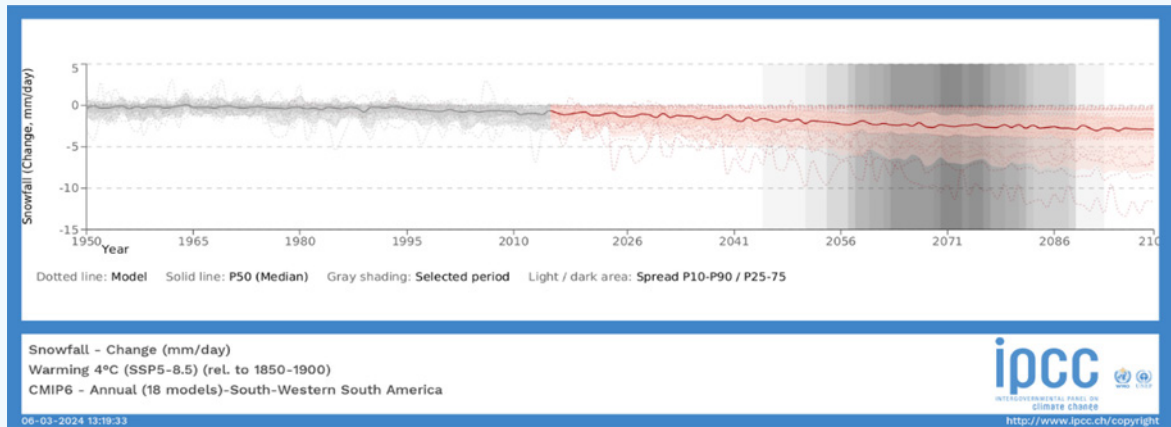


Figura I.18. Cambios (mm/día) respecto del período 1850-1900 proyectados en la nieve caída anual en la región oeste de Sudamérica hasta fines del siglo XXI para el escenario SSP5-8.5 considerando un calentamiento global de 4 °C. Fuente: obtenido del Atlas Interactivo (<https://climate-scenarios.canada.ca/?page=cmip6-overview-notes>).

El índice de precipitación estandarizado IPE-6 presenta un comportamiento similar en ambos escenarios de temperatura, mostrando una gran dispersión en el comportamiento de los modelos climáticos; la variabilidad de estos en el período histórico es también importante, destacándose la falta de sincronía que amerita un análisis estadístico de estos resultados. Tal como se observa en las Figuras I.19 y I.20 los cambios son significativos alcanzando la mediana hasta valores del 80% hacia fines de siglo, lo que significaría un aumento importante de las sequías hidrológicas en la región.

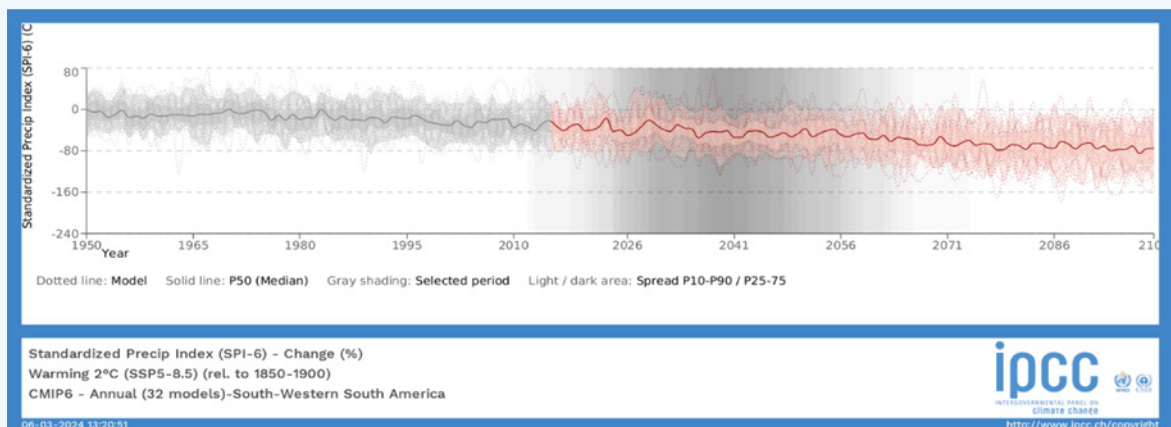


Figura I.19. Cambios (%) respecto del período 1850-1900 proyectados en el índice de precipitación estandarizado (SPI-6) en la región oeste de Sudamérica hasta fines del siglo XXI para el escenario SSP5-8.5 considerando un calentamiento global de 2 °C. Fuente: obtenido del Atlas Interactivo (<https://climate-scenarios.canada.ca/?page=cmip6-overview-notes>).

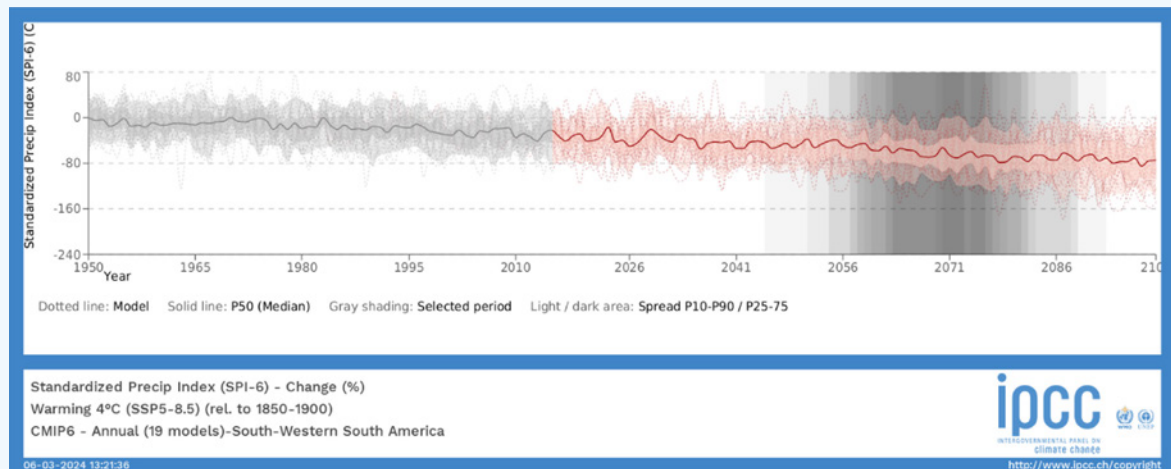


Figura I.20. Cambios (%) respecto del período 1850-1900 proyectados en el índice de precipitación estandarizado (SPI-6) en la región oeste de Sudamérica hasta fines del siglo XXI para el escenario SSP5-8.5 considerando un calentamiento global de 2 °C. Fuente: obtenido del Atlas Interactivo (<https://climate-scenarios.canada.ca/?page=cmip6-overview-notes>).

I.4. Climatología pasada, actual y proyecciones en Chile para el escenario RCP8.5 hacia mediados del siglo 21 (2030-2060)

Chile por su ubicación geográfica y condiciones climáticas, es uno de los países que está siendo más afectado por el Cambio Climático. “El país cumple con siete de los nueve criterios de vulnerabilidad enunciadas por la Convención Marco de la Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) a saber: posee áreas costeras de baja altura; zonas áridas y semiáridas; zonas de bosques; territorio susceptible a desastres naturales; áreas propensas a sequía y desertificación; zonas urbanas con problemas de contaminación atmosférica y ecosistemas montañosos” (MMA, 2017).

Hace más de 30 años que Chile participa en temas relacionados al Cambio Climático, principalmente relacionados a la mitigación. A pesar de que Chile no es considerado, a nivel mundial, un emisor relevante de Gases de Efecto Invernadero (GEI), ha ratificado acuerdos internacionales como la Convención Marco de las Naciones Unidas por el Cambio Climático (CMNUCC) el año 1994 y el Protocolo de Kioto el año 2002 en los que se ha comprometido a realizar inventarios y seguimientos de las emisiones para evitar su aumento.

Los más recientes vaticinios con respaldo científico señalan que el objetivo planteado en 2015 de mantener el calentamiento global en no más de 1,5 °C desde el inicio de la Revolución Industrial está siendo ilusorio, lo que acarreará un incremento de los efectos nocivos del Cambio climático en todo el mundo. Sin embargo, y solo como un comentario basado en las tendencias particulares de los fenómenos climáticos con efecto en Chile, se puede aventurar que:

- El flujo más cálido y creciente de aire atmosférico y de corrientes marinas hacia el Continente Antártico está acelerando el deshielo superficial y sumergido de su manto sólido, con vertimiento de grandes volúmenes de agua fría de baja salinidad y densidad relativas que fluyen hacia el norte, elevando el nivel de los mares (efecto similar ocurre en el hemisferio norte, en menor escala).
- La corriente de Humboldt, asociada a la costa chilena, moviliza parte importante de este flujo, y tiene un ancho del orden de 400 km, un espesor de 100 a 200 m, y se desplaza próxima a la superficie a 28 km/día (13 a 26 Hm³/s). En consecuencia, en el litoral chileno se tiene la porción más fría del mar en el hemisferio sur, con indudable efecto en el establecimiento y la persistencia del anticiclón del Pacífico Sur; así, podría esperarse que este calentamiento global sea menos severo que en el resto del mundo, o que sea parcialmente más lento su desarrollo.
- Este anticiclón del Pacífico Sur es responsable en parte de las sequías en Chile, al bloquear el paso de tormentas, pero eventualmente suele ser sobrepasado por intensos ríos atmosféricos excepcionales a gran altura (Chañaral, en 1972 y 2015, Antofagasta en 1991, Copiapó en 2015, Curicó en 2023, entre otros), con efectos catastróficos.

En caso de darse las situaciones expuestas, y atendiendo a la mayor proporción de población, serían las poblaciones de la Zona Centro, y en menor medida la Zona Norte, las más expuestas a efectos negativos persistentes del Cambio Climático para la disponibilidad de agua potable, y requerirían particulares soluciones estructurales y de gobernanza para sobrellevarlos.

Las proyecciones climáticas que se presentan a continuación para el territorio chileno están basadas, principalmente, en los resultados del proyecto de actualización del Balance Hídrico Nacional (DGA, 2022) y del proyecto ARCLIM⁴ (MMA, 2021). El primero utiliza sólo cuatro modelos climáticos globales (GCMs: CCSM4-CSIRO-MK3-6.0, IPSL-CM5A-LR y MIROC-ESM) que se consideran representativos de las características climáticas de Chile por estar correlacionados con los fenómenos ENSO⁵ y SAM⁶ mientras que en el segundo las proyecciones consideran el promedio de los cambios que todos los modelos de circulación global utilizados en ARCLIM.

Los cambios de temperatura media anual proyectados en DGA (2022) para el periodo 2030-2060 respecto al periodo histórico 1985-2015 se presentan en la [Figura I.21](#). Se observa que todos los modelos de circulación general considerados proyectan aumentos de temperatura para todo Chile Continental, que oscilan entre los 0,5 °C y 3 °C. Solo el modelo

⁴ <https://arclim.mma.gob.cl/amenazas/>

⁵ El Niño Oscilación del Sur.

⁶ Southern Annular Mode, conocido también como Oscilación Antártica.

IPSL-CM5A-LR presenta aumentos de 6 °C localizados en la Patagonia, lo que no parece realista en consideración de otros patrones y estudios observados (IPCC, 2022). Se observa también que los cambios proyectados son mayores en el Altiplano. Adicionalmente, existe un gradiente latitudinal de cambios proyectados de temperatura. En el norte se esperan cambios mayores, mientras que hacia el sur los cambios proyectados son menores, especialmente en las zonas costeras.

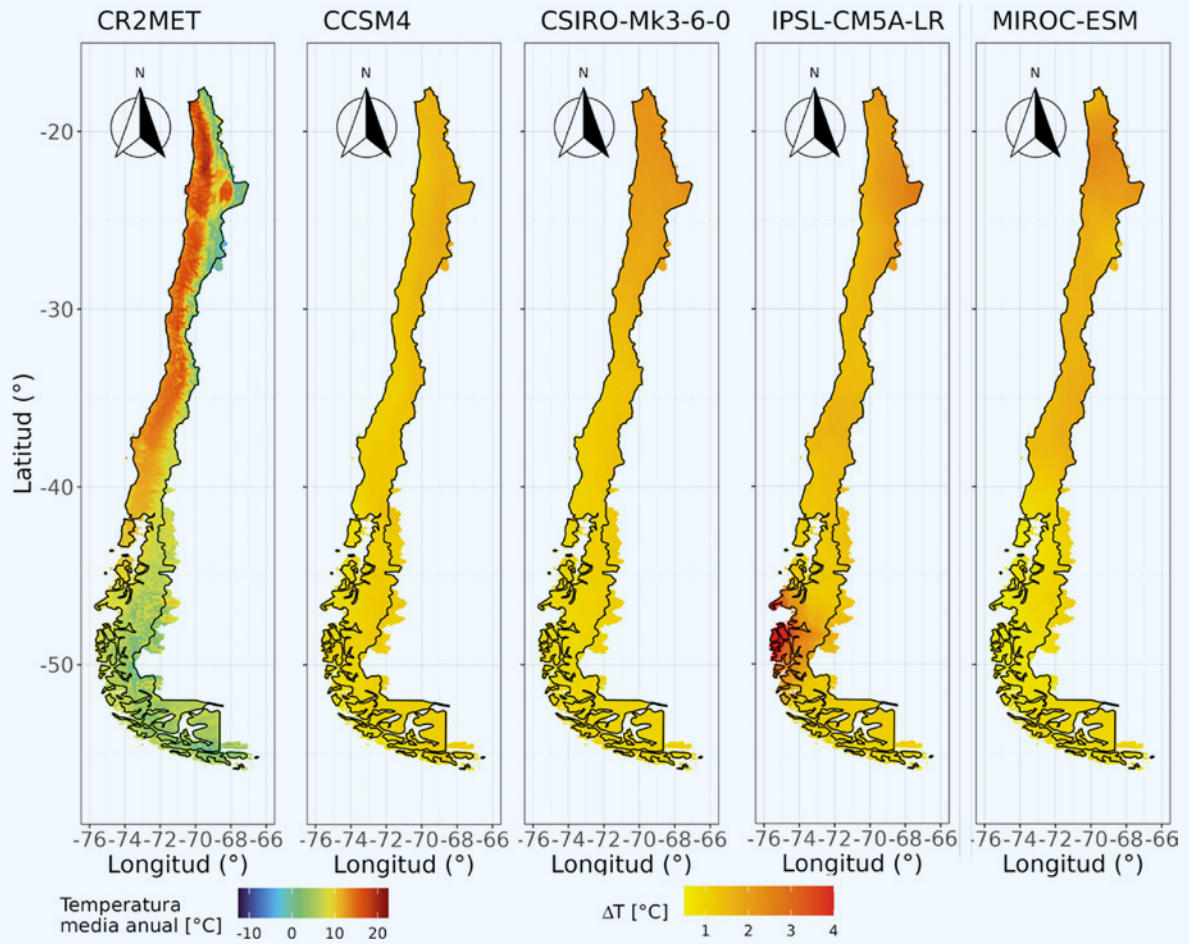


Figura I.21. Temperatura media anual promedio en el periodo histórico 1985-2015 según producto de referencia CR2MET (panel izquierdo) y cambios proyectados hacia el periodo histórico 2030-2060 por los modelos climáticos (resto de los paneles). Fuente DGA, 2022.

En la [Figura I.22](#) se presentan los cambios proyectados para la precipitación anual promedio hacia el periodo 2030-2060, respecto a los obtenidos con base al producto CR2MET en el período histórico, por los modelos usados en DGA (2022). Se aprecia que estos cambios oscilan entre los 550 y 350 mm/año, observándose que los aumentos se concentran en la Patagonia mientras que las reducciones ocurren en la zona sur; también dos de los modelos proyectan una intensificación de las reducciones en el sector cordillerano con respecto al valle. Cabe destacar que la intensidad de estos cambios está en concordancia con la sensibilidad asociada a los modelos, pues las menores reducciones son proyectadas por el modelo CSIRO-Mk3-6-0 de menor sensibilidad mientras que el modelo IPSL-CM5A-LR, de mayor sensibilidad, muestra las reducciones más significativas.

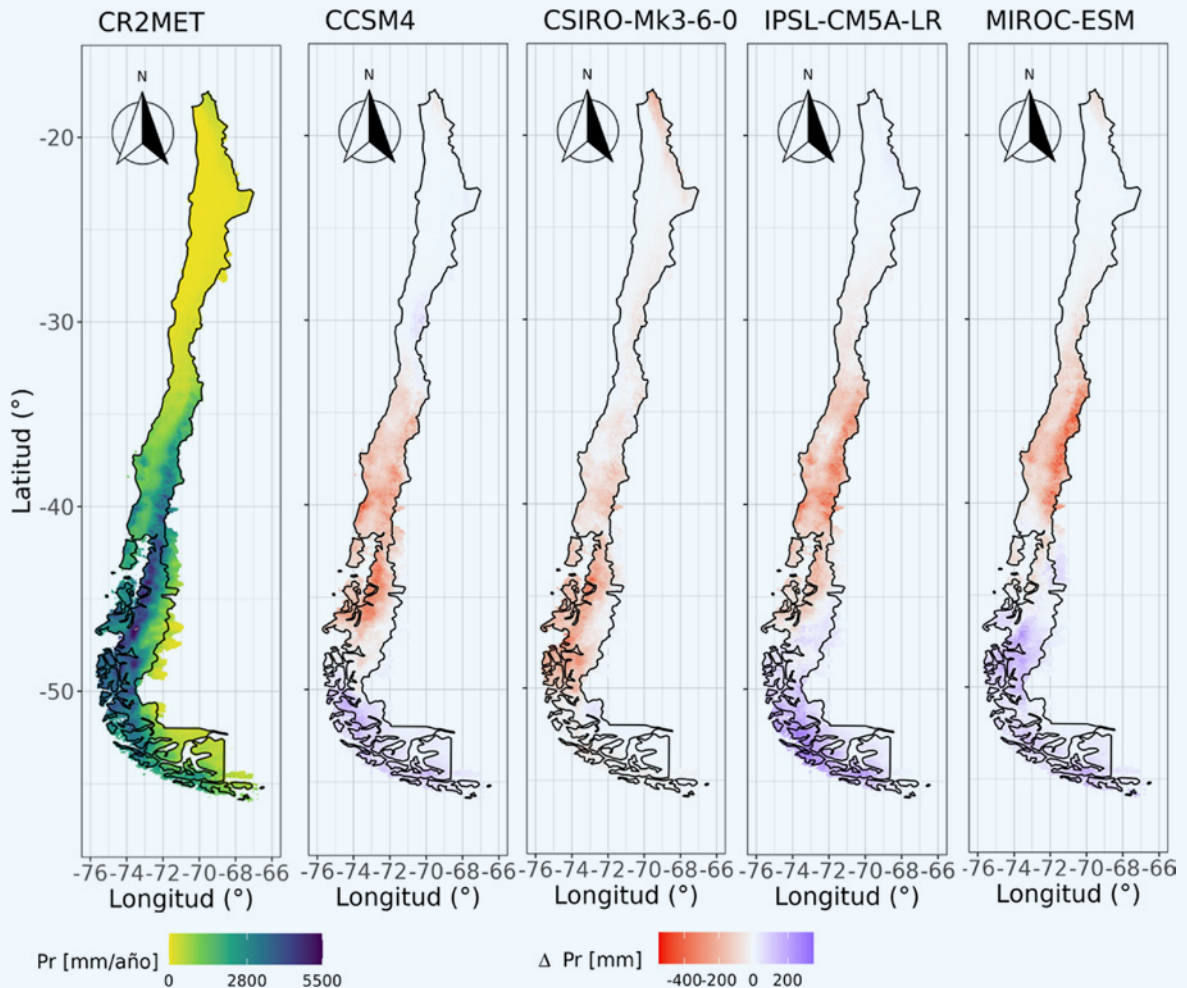


Figura I.22. Precipitación anual promedio en el periodo histórico 1985-2015 según producto de referencia CR2MET (panel izquierdo) y cambios proyectados hacia el periodo histórico 2030-2060 por los modelos climáticos (resto de los paneles). Fuente: DGA, 2022.

Los valores bases de precipitación media anual y los cambios porcentuales promedios de precipitación media anual proyectados, para el mismo período futuro, con el Atlas del proyecto ARCLIM se muestran en la [Figura I.23](#). Si bien se aprecian algunas diferencias en los patrones y magnitudes de los valores de referencia los cambios positivos y negativos proyectados ocurren en las mismas zonas que las señaladas en la [Figura I.22](#).

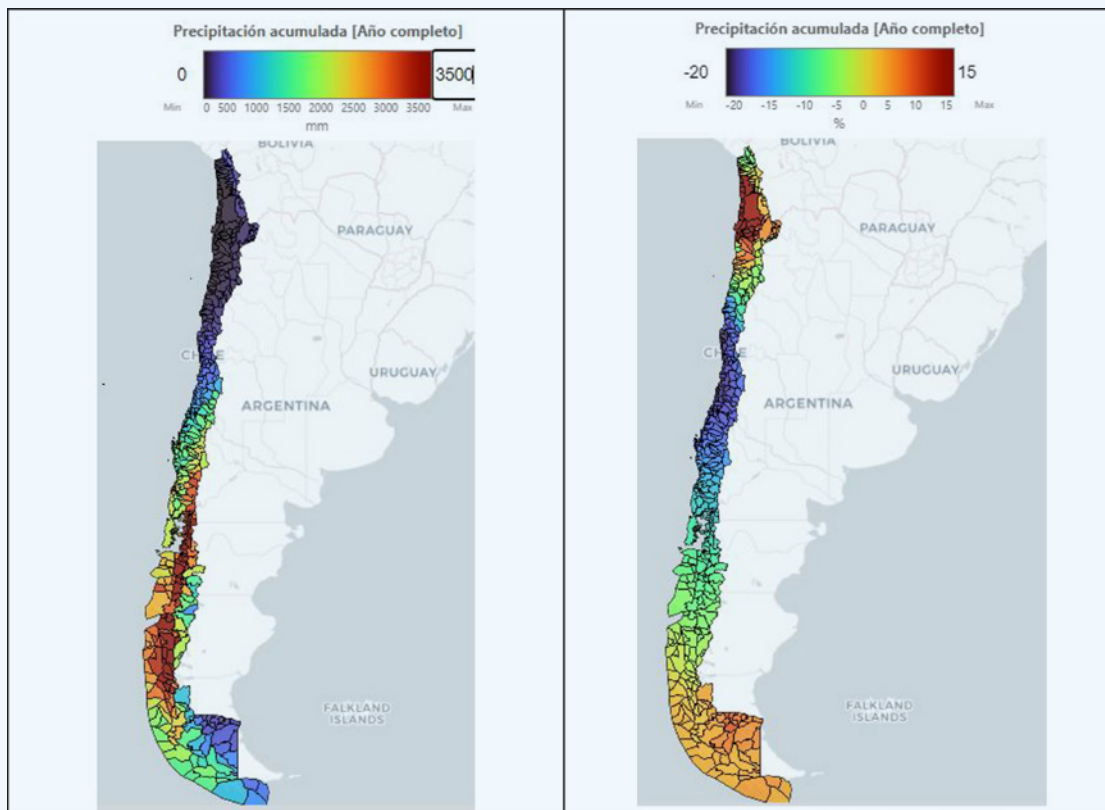


Figura I.23. Precipitación anual promedio para producto de referencia en el periodo histórico (panel izquierdo) y cambios proyectados hacia el periodo histórico 2030-2060 por los modelos climáticos (panel derecho). Fuente Proyecto ARCLIM.

En la [Figura I.24](#), se observan, para cada mes, los días totales del período 1985-2015 en que se tiene una temperatura menor o igual a cero, constatándose que en la zona cordilleranas, en la zona austral y en el extremo norte del país estos ocurren prácticamente en todos los meses mientras que, en la zona central del país, es en el período invernal mayo a agosto donde estas son más frecuentes. La [Figura I.25](#) muestra los cambios proyectados futuros con uno de los modelos de cambio climático (IPSL) que puede considerarse representativo para Chile (DGA, 2022) apreciándose que el número de días con heladas en ciertos lugares puede reducirse casi a la mitad en algunos meses.

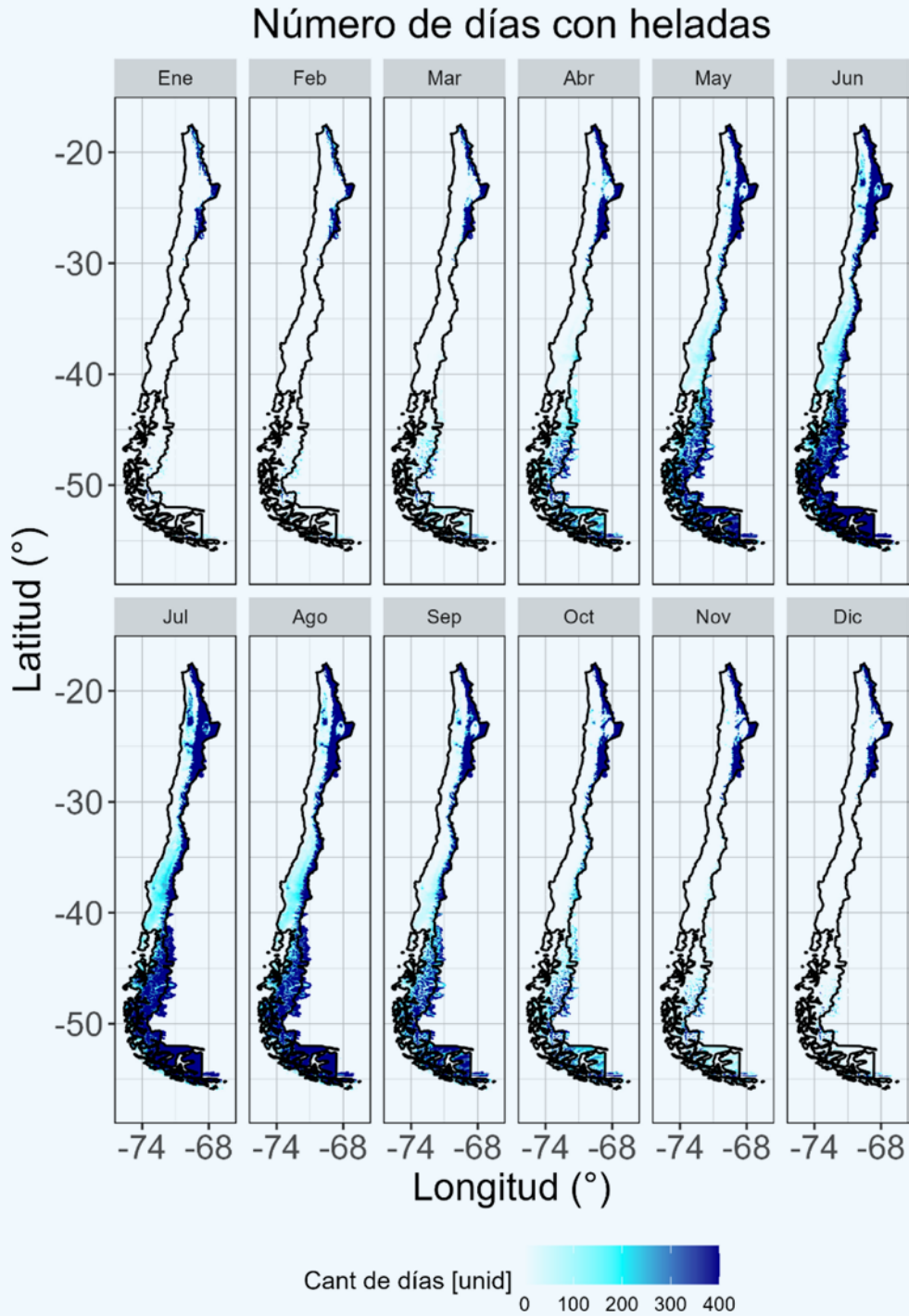


Figura I.24. Número de días con heladas promedio mensual para Chile continental en período histórico 1985-2015, con base en el producto CR2MET. Fuente: Elaboración propia de la Comisión en base a DGA (2022).

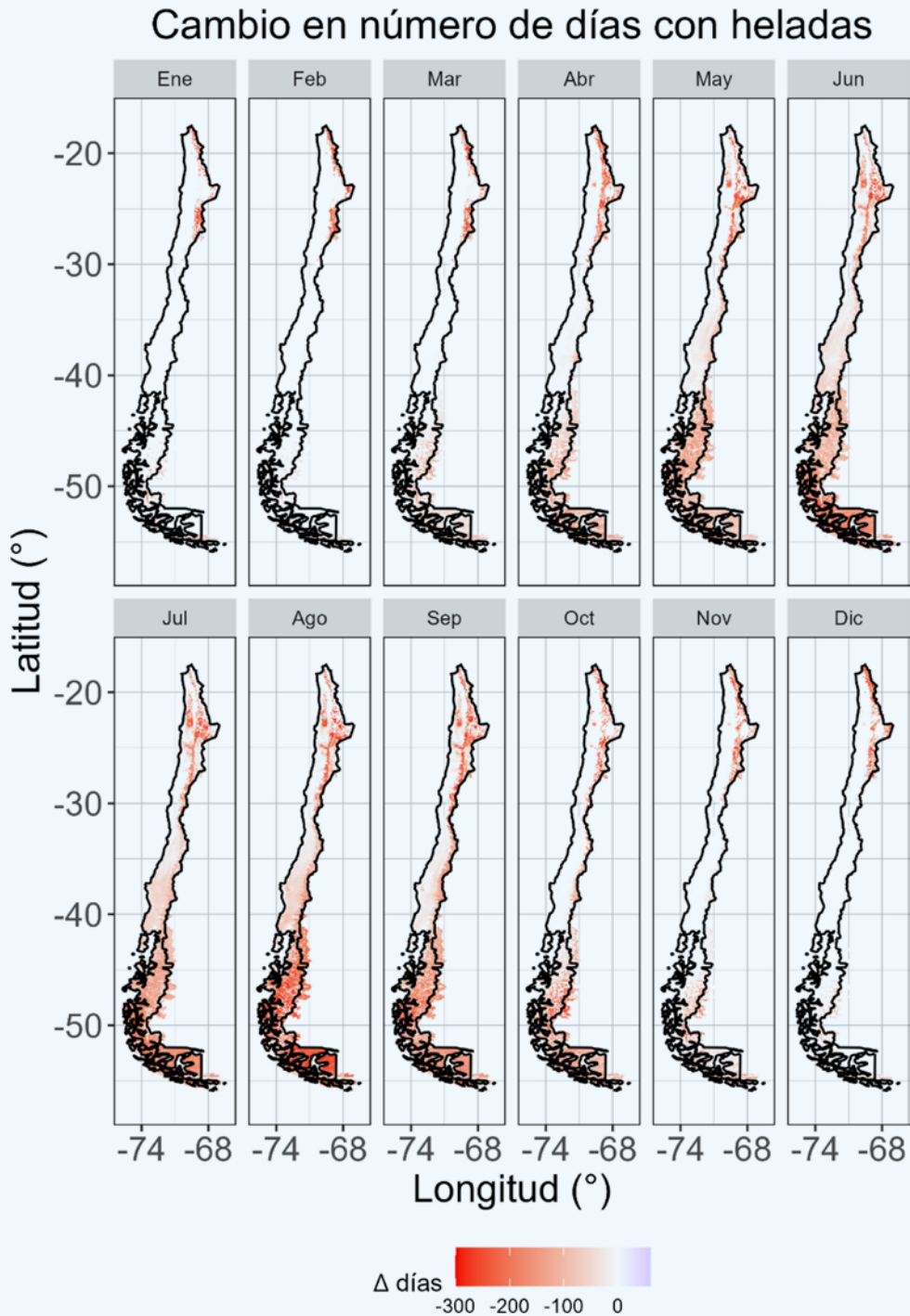


Figura I.25. Cambio en el número promedio mensual de días con heladas para Chile continental proyectados considerando el periodo futuro 2030-2060 respecto al histórico 1985-2015, utilizando el modelo de circulación global IPSL. Fuente: Elaboración propia de la Comisión en base a DGA (2022).

ANEXO II

Antecedentes sobre el abastecimiento de agua para el uso doméstico

II.1. Demanda de agua potable para consumo humano

Se requiere cuantificar las demandas de agua potable esperables a mediano y largo plazo (2050), a fin de que sean consideradas entre las que son ejercidas por los diversos demandantes de agua de Chile. Se tiene en cuenta que las proyecciones en general aumentan su incertidumbre en la medida de que aumenta su extensión en el tiempo, por lo que se ha de recurrir a un escenario más probable de demandas y a considerar alternativas razonables de desviaciones positivas y negativas de los dos factores más determinantes de esta demanda: la población demandante en sus diversas categorías (urbana, rural y otras), y el consumo ejercido individualmente (dotación en L/Hab/día) para los usos directos e indirectos involucrados.

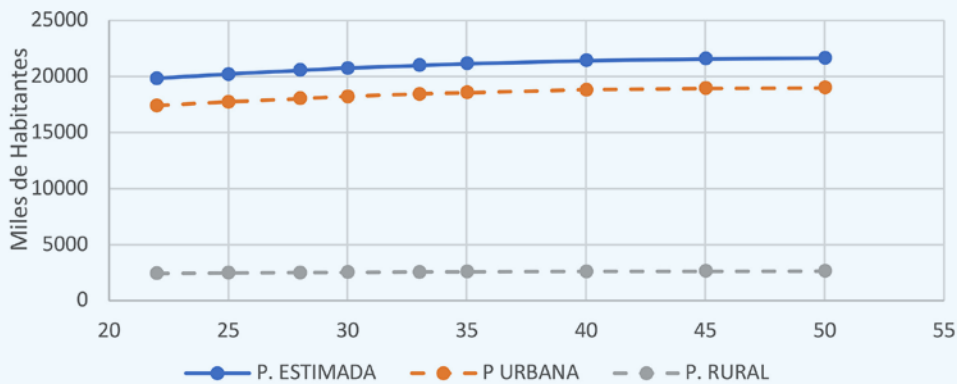
II.1.1. Proyección de la población que se requiere abastecer de agua potable

Se ha establecido en Chile que es prioridad de suministro el que cada habitante disponga de agua potable, en principio para sus usos básicos (bebida, preparación de alimentos, aseo personal y cuidado de la salud) y, en segundo término, para sus actividades habituales de vida diaria (trabajo, educación, mantención de espacios urbanos públicos y privados, control de incendios, esparcimiento, etc.); en consecuencia, ha de ser considerada primeramente la población del país, para luego desagregarla en función de las diversas categorías con afinidades comunes.

Población total del país. Se ha apreciado que la mejor aproximación hasta hoy disponible para el total de la población de Chile hasta el año 2050 es la evolución y revisión de la población total presentada por el INE a partir de su ajuste de los datos censales históricos entre 1992 y 2017 y la subsecuente proyección hecha hasta 2050 (Estimaciones y Proyecciones-Chile-1992-2050-Base-2017-poblacion e indicadores).

La metodología ahí aplicada sigue las pautas internacionales (CELADE, CEPAL, Fondo de Población de las Naciones Unidas), las que atienden las tendencias de fecundidad, mortalidad y migraciones. Este documento muestra una declinación progresiva del crecimiento poblacional en el largo plazo, lo que hace sentido por la marcada disminución de la fecundidad, el aumento de la proporción de tercera edad, y una necesaria contención de la inmigración descontrolada, factores contrapuestos solo por un moderado incremento de la esperanza de vida, la que ya es alta según estándares internacionales.

El resumen de esta proyección y su gráfico apuntan a una amortiguación progresiva del crecimiento poblacional, que según las cifras tendería a estancarse a partir de 2050; por otra parte, se dispone de la información del Censo 2017 del INE que muestra la proporción de población urbana (87.77%) y rural (12.23%) del total del país y su desglose por cada región. Asumiendo como hipótesis de trabajo que lo rural se mantenga en esa misma proporción hacia 2050, se tendría la siguiente composición poblacional en el país, realizando lo correspondiente al año 2022 para su posterior cotejo con la información disponible para los Servicios Sanitarios Rurales (SSR) y la Superintendencia de Servicios Sanitarios (SISS) en ese año, y lo propio respecto de los años 2028 y 2023, que se podrá cotejar a posteriori con otros antecedentes y el total del Censo 2024 (18.480.432), cuando esté disponible en detalle (Figura II.1).



AÑO 2000+	P. ESTIMADA INE	P. URBANA	P. RURAL
20	19.458.310	17.078.559	2.379.751
22	19.828.563	17.403.530	2.425.033
25	20.206.953	17.735.643	2.471.310
28	20.539.666	18.027.665	2.512.001
30	20.735.289	18.199.363	2.535.926
33	20.992.831	18.425.408	2.567.423
35	21.137.769	18.552.620	2.585.149
40	21.409.418	18.791.046	2.618.372
45	21.567.513	18.929.806	2.637.707
50	21.626.079	18.981.210	2.644.869

Figura II.1. Proyección crecimiento poblacional. Fuente: INE.

Población urbana y rural del país. Es apropiado considerar otras fuentes de información disponibles para analizar el desarrollo posible de la población en el largo plazo: se cuenta con el Informe de Gestión del Sector Sanitario-SISS, año 2022, (IGSISS), que abarca 399 localidades urbanas con servicios bajo concesión, contando 5.937.766 clientes urbanos, más 107.871 clientes acogidos al Art. 52 bis de la Ley Sanitaria y por tanto fuera de las concesiones urbanas y sus Territorios Operacionales (TO); además el MOP informa en la Base de Datos de los Servicios Sanitarios Rurales a diciembre de 2022 la existencia de 2.368 Servicios Sanitarios Rurales (SSR), próximamente sujetos a tarificación por la SISS; esta información asume una densidad uniforme de 3,11 habitantes por cada conexión rural registrada. La siguiente tabla ha aplicado la densidad de habitantes por cada conexión urbana, 2,93, y calculado mediante ajuste de valores la de habitantes en servicios acogidos al Art. 52 bis de la Ley Sanitaria, más conexiones comerciales, industriales y otras conexiones, para así conciliar con las cifras SSR y del INE estimadas para 2022. Es de interés que el Censo de 2017 promedió para el total del país 2,704 habitantes por vivienda ([Tabla II.1](#)).

Tabla II.1. Ajuste de poblaciones urbana y rural en 2022. Fuente: Elaboración propia.

SISS Y SSR	Número de conexiones	Hab/ conexión	Cobertura 99,94% habitantes	100% habitantes
Clientes urbanos residentes	5.937.766	2,93	16.053.610	16.063.248
Clientes 52 bis y no residentes	354.240	4,46	1.578.609	1.578.609
Conexiones. Informe SSR	703.967	3,11		2.186.706
INE total estimado 2022				19.828.563

Se comparan las cifras del ajuste practicado con lo informado en el Censo INE de 2017 ([Tabla II.2](#)):

Tabla II.2. Ajuste con información del Censo INE 2017. Fuente: Elaboración propia.

	Total (hab.)	Urbano (hab.)	Rural (hab.)
CENSO 2017	17.574.003	15.424.263 (87,77%)	2.149.740 (12,23%)
AJUSTE 2022	19.828.563	17.641.857 (88,97%)	2.186.706 (11,03%)

Se aprecia una razonable consistencia en la variación quinquenal de las cifras, y se considera apropiado mantener los valores INE estimados para el año 2022 como base de proyección de la población hasta 2050; los próximos procesos censales podrán definir lo adecuado de estas estimaciones.

El paso siguiente es distribuir las cifras globales del país en cuatro macrozonas marcadamente homogéneas en su exposición a los efectos del cambio climático sobre sus disponibilidades de agua potable:

- Zona Norte, con cinco regiones desde Arica-Parinacota a la Región de Coquimbo, que es desértica, árida y semi árida, sus actividades principales son, esencialmente, minera metálica y no metálica, energía fotovoltaica, solar y eólica, con cultivos agrícolas y pecuarios dispersos, más pesca industrial y turismo; sus recursos de agua dulce son algunos ríos de limitados caudales originados en las más altas cumbres andinas y esporádicas tormentas ciclónicas, más la explotación de acuíferos (incluso con aguas fósiles) y, últimamente, agua desalinizada tanto de cursos superficiales y captaciones marinas. La población se concentra en localidades urbanas en general costeras, y villorrios rurales, de origen ancestral y valor patrimonial, e históricamente adaptadas a la escasez hídrica.
- Zona Central, con cinco regiones desde Valparaíso hasta Ñuble, y que detenta un clima mediterráneo benigno que ha propiciado la mayor proporción del asentamiento poblacional del país, con actividad agrícola y ganadera intensiva, industrial y agroindustrial importantes, servicios, minería, turismo; si bien ha tenido históricamente buena disponibilidad de agua, el cambio climático se ha manifestado aquí mezquinando desde el año 2000 la cantidad y continuidad de los varios cursos de agua disponibles, intensificando el uso de aguas subterráneas con el consecuente descenso de niveles freáticos, y descargando esporádicas tormentas intensas de efectos eventualmente catastróficos.
- Zona Sur, comprendiendo 4 regiones, desde la del Biobío a la de Los Lagos con clima de estaciones bien diferenciadas, inviernos normalmente lluviosos, con buena provisión de recursos hidráulicos representados por lagos y ríos de importancia, y ciudades relevantes como cabeceras de actividades industriales, agropecuarias, explotaciones forestales, electro generación hidráulica, pesquería y recursos marinos, y turismo. No obstante, su buen desempeño general, la región de Los Lagos presenta serias dificultades puntuales de escasez hídrica en las provincias de Palena y Chiloé, que carecen de infraestructura adecuada de regadío y tienen pobres condiciones para extracción de aguas subterráneas.
- Zona Austral o Patagónica, con solamente dos regiones: de Aysén más Magallanes y de la Antártica Chilena; su desarrollo ha sido posterior al del resto del país, tiene escasos centros poblados de importancia, su clima es frío y con pluviosidad irregular, presenta los mayores recursos de glaciares y lagos con ríos caudalosos, combinando una

geografía montañosa alternada con estepas; su actividad económica ha combinado la explotación de recursos naturales limitados de petróleo, gas, carbón y minería metálica, más intensiva ganadería lanar, explotación de recursos marinos y salmonicultura.

En esta segmentación, y para los fines de evaluar los impactos del cambio climático en la disponibilidad de agua potable en el territorio continental, necesariamente son excluidos por su desconexión física los territorios de ultramar, Isla de Rapanui, archipiélago de Juan Fernández, y Antártica Chilena, que habría que analizar separadamente con sus singularidades.

Procede desagregar la proyección de población del total del país en cada una de las cuatro zonas establecidas; se mantiene como base de análisis la proporción urbana/rural detallada por región en el Censo INE de 2017 (Figura II.2).

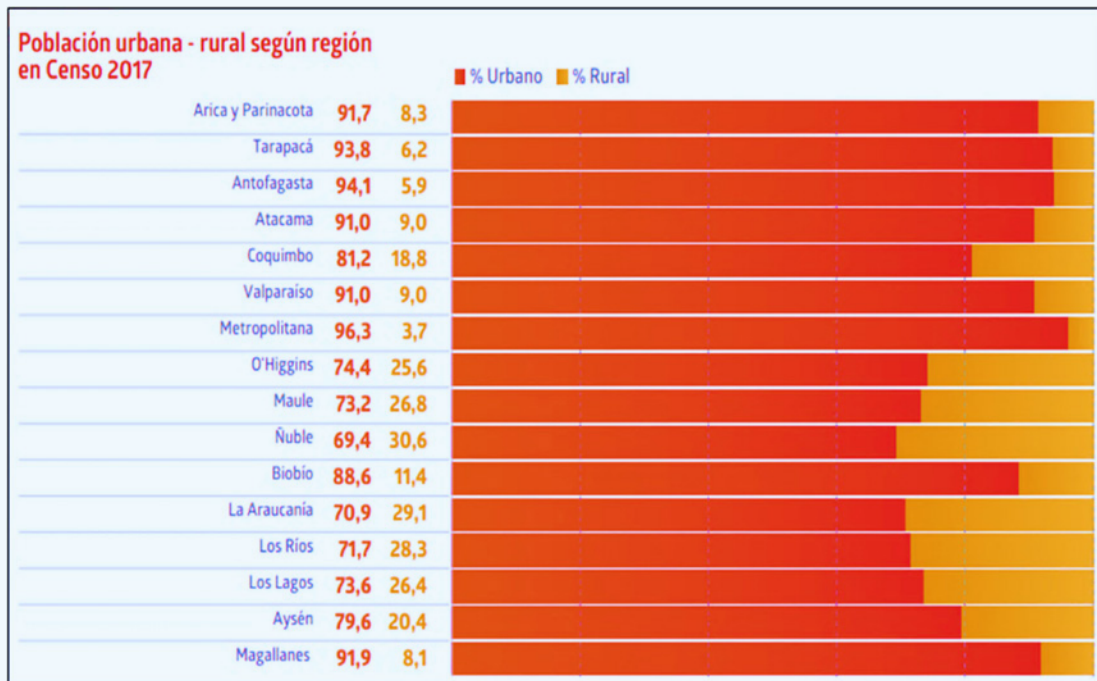


Figura II.2. Población urbana-rural según región. Fuente: INE.

Conservando los porcentajes del INE para 2017 en cada región sobre el total de la población se establece la composición poblacional en cada una de las cuatro zonas establecidas, realizando las desiguales ponderaciones que les caben sobre ese total del país; se hace necesario considerar que la mantención del porcentaje de población rural en 11,03% hasta 2050 puede ser discutible, pero este guarismo es ya bajo si se considera que en los EE. UU. de N.A es del orden de 17%, y de 27% en la Unión Europea, en el año 2020 (Tabla II.3).

Tabla II.3. Resultados Censo INE 2017. Fuente: INE.

Regiones y zonas	Población	% Urbano	% Rural	P. Urbana	P. Rural
Arica y Parinacota	226.068	91,7	8,3	207.304	18.764
Tarapacá	330.558	93,8	6,2	310.063	20.495
Antofagasta	607.534	94,1	5,9	571.689	35.845
Atacama	286.168	91,0	9,0	260.413	25.755
Coquimbo	757.586	81,2	18,8	615.160	142.426
Sub Total Norte	2.207.914	89,0%	11,0%	1.964.630	243.284
Valparaíso	1.815.902	91,0	9,0	1.652.471	163.431
Metropolitana	7.112.808	96,3	3,7	6.849.634	263.174
O'Higgins	914.555	74,4	25,6	680.429	234.126
Maule	1.044.950	73,2	26,8	764.903	280.047
Ñuble	480.609	69,4	30,6	333.543	147.066
Sub Total Centro	11.368.824	90,4%	9,6%	10.280.980	1.087.844
Biobío	1.556.805	88,6	11,4	1.379.329	177.476
La Araucanía	957.224	70,9	29,1	678.672	278.552
Los Ríos	384.837	71,7	28,3	275.928	108.909
Los Lagos	828.708	73,6	26,4	609.929	218.779
Sub Total Sur	3.727.574	79,0%	21,0%	2.943.858	783.716
Aysén	103.158	79,6	20,4	82.114	21.044
Magallanes	166.533	91,9	8,1	153.044	13.489
Sub Total Austral	269.691	87,2%	12,8%	235.158	34.533
Total, País	17.574.003	87,77%	12,23%	15.424.626	2.149.377

Es destacable que la ruralidad sea notoriamente más elevada en la Zona Sur con 21%, mientras que en el resto del país se enmarca entre 9,6% y 12,8%; hay un marcado centralismo de la ruralidad, pues el conjunto de las Zonas Centro y Sur da cuenta del 87,9% del total rural del país, lo que se puede explicar por las dificultades de distanciamiento, climáticas y ambientales para la vida rural en las regiones de los extremos norte y sur de Chile.

Un cuadro complementario permite contrastar por región y por zonas la información censal de 2017 y lo señalado en la base de datos SSR de 2022, cuyos totales son bastante coincidentes, pero con grandes diferencias de región en región; así, se evidencia un mínimo aumento de la ruralidad de solo 1,71% en cinco años y con tasa de 0,34% anual, pero que está focalizado en solo cinco de las dieciséis regiones del país, y con aumento efectivo solo en la

Zona Central; en contraste, para el quinquenio se presenta una estimación del crecimiento de 12,83% para el total país con tasa de 2,44% anual, lo que se ha de tener presente en las posteriores sensibilizaciones de demandas. Puede entenderse que la marcada migración desde el mundo rural a los centros urbanos en la Zona Norte se explique por razones económicas desatadas por el efecto de sequías prolongadas que golpean principalmente los medios de subsistencia en las áreas rurales más precarias, básicamente agrícolas, ganaderas y de la pequeña y mediana minería (Tabla II.4).

Tabla II.4. Comparación de la población rural del año 2017 con la del año 2022.

Fuente: Elaboración propia.

Regiones y zonas	CENSO 2017	Año 2022	% Rural Zona/País	Variación
	P. rural	P. rural SSR		% 2022/2017
Arica y Parinacota	18.764	16.889		-10,0%
Tarapacá	20.495	12.155		-40,7%
Antofagasta	35.845	16.335		-54,4%
Atacama	25.755	20.655		-19,8%
Coquimbo	142.426	167.657		17,7%
Sub Total Zona Norte	243284	233691	10,7%	-3,9%
Valparaíso	163.431	212.217		29,9%
Metropolitana	263.174	204.299		-22,4%
O'Higgins	234.126	342.742		46,4%
Maule	280.047	349.953		25,0%
Ñuble	147.066	156.122		6,2%
Sub Total Zona Centro	1.087.844	1.265.333	57,9%	16,3%
Biobío	177.476	139.441		-21,4%
La Araucanía	278.552	195.892		-29,7%
Los Ríos	108.909	117.146		7,6%
Los Lagos	218.779	204.051		-6,7%
Sub Total Zona Sur	783.716	656.530	30,0%	-16,2%
Aysén	21.044	27.289		29,7%
Magallanes	13.489	3.193		-76,3%
Sub Total Zona Austral	34.533	30.482	1,39%	-11,7%
Total, Rural País	2.149.377	2.186.036	100,0%	1,71%
Tasa Anual Rural País				0,34%

II.1.2. Evaluación de la dotación de agua potable

Juntamente con la población demandante de agua potable se deben considerar los volúmenes de demanda individual esperable para integrar el requerimiento efectivo del sector doméstico sobre las disponibilidades globales del recurso hídrico y su factibilidad de ser provistas; esta variable, denominada Dotación, se establece en litros por habitante por día, (l/H/día), y está sujeta a definiciones y contingencias que es necesario precisar:

- Dotación de consumo: es el volumen en litros de agua que corresponde a cada persona para sus necesidades domésticas habituales de cada día; su determinación se obtiene del registro periódico del medidor domiciliario entre lecturas y del número de personas abastecidas en ese domicilio.
- Dotación de producción: corresponde a la dotación de consumo más el porcentaje de Agua No Contabilizada (ANC) identificable entre la fuente de origen del agua y cada medidor domiciliario; este porcentaje debe incluir los volúmenes medibles o estimados correspondientes a operaciones propias y normales de la producción (lavado de decantadores y filtros) y distribución mayor y menor del agua (lavado de estanques y redes), más lo asignable a usos de grifos en combate de incendios, derrames en roturas de conducciones y vaciamiento de la red para su reparación, fugas en arranques domiciliarios, e incluso vandalismo y robo mediante conexiones fraudulentas o alteración de medidor. Su determinación global puede ser obtenida mediante auditoría precisa y oportuna de flujos si los sistemas de medición de caudales cubren la totalidad del sistema y operan debidamente, y con la necesaria fragmentación en cada etapa del sistema, permitiendo incluso detectar pérdidas invisibles y su seguimiento y corrección.
- Otras dotaciones: pueden señalarse como referencia la dotación de subsistencia, de 50 l/H/día, que sería la cantidad mínima diaria de agua potable para que una persona pueda desarrollar sus actividades básicas de aseo personal, alimentación y bebida, y solo por tiempo limitado, y la dotación de supervivencia, de 3 l/H/día, que permitiría evitar la deshidratación y que, en caso de carencia total de bebida, puede llevar a la muerte por falla orgánica generalizada en solo 3 días.

II.1.3. Demanda de los servicios urbanos concesionados

El Informe de Gestión de la SISS de 2022 (IGSISS) señala que la dotación promedio nacional en los servicios concesionados bajo la Ley Sanitaria fue de 156 L/H/día para consumo, derivada de los registros contabilizados de 17,6 m³/cliente/mes, y cae a 16,8 en 2023; esta cifra era de 18,7 m³/cliente/mes en 2013. Como referencia, la OCDE reporta para los países asociados un promedio de 250 L/H/día, con extremos muy dispares de 100 y 500 L/H/día. Asimismo, el IGSISS (Cuadro 1.9) detalla las dotaciones de consumo en L/H/día verificadas en 2021 y 2022 en las 29 principales empresas sanitarias concesionarias, lo que posibilita asignar su valor representativo en cada región en función de sus territorios operacionales bajo concesión, haciendo los necesarios ajustes contables donde algunas empresas tienen participación en regiones diversas (ESSBIO en O'Higgins, Ñuble y Biobío, ESSAL en Los Ríos y Los Lagos, ESSI y San Pedro dispersas en cuatro regiones cada una). Por su parte, los SSR señalan solo como referencia un registro de 703.967 arranques que surten a 2.186.706 habitantes, promediando 3,11 habitantes por arranque; asumiendo la dotación de diseño típica de producción de 150 L/H/día para la demanda global de este sector sería del orden de 3.800 litros por segundo en 2022.

Una primera aproximación a las demandas futuras de consumo por cada región es posible, si se asume que se mantendrían las dotaciones consideradas en 2022 y se relacionan con las proyecciones regionales de crecimiento de población derivadas de la información del INE, ajustadas a las proporciones de población radicada en sus respectivos Territorios Operacionales y áreas urbanas.

Las demandas urbanas medias propias de cada región dan cuenta así de su valor medio anual, por lo que la capacidad de extracción sobre las fuentes debe referirse al valor máximo estacional, y se deben amplificar los consumos tanto por el factor agua no contabilizada (ANC) como por el factor de punta (*peak*), reseñados para cada empresa (Cuadro 3.1. y Gráfico 1.4 de IGSISS). Las [Tablas II.5, II.6, II.7 y II.8](#) muestran las etapas de desarrollo de los cálculos aplicados para estimar estas demandas bajo los supuestos de que se valida la proyección población del INE, se mantienen las dotaciones, factor de pérdidas y factor de punta de 2022. Sobre estos resultados podrán aplicarse *a posteriori* sensibilizaciones para diferentes alternativas, a fin de evaluar otras situaciones posibles en largo plazo.

Tabla II.5. Valores asumidos para los factores incidentes en la demanda de agua y población urbana proyectada en cada región.

Fuente: Elaboración propia.

Regiones	Consumo L/H/día	% agua no contabilizada	Factor de punta	Habitantes en TO						
				2022	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Arica y Parinacota Tarapacá	130,4	29,8	1,05	577.409	588.428	603.813	615.533	623.444	628.047	629.753
Antofagasta	126,8	30,5	1,05	625.258	637.190	653.850	666.541	675.107	680.093	681.939
Atacama	145,7	32	1,09	256.867	261.769	268.613	273.827	277.346	279.394	280.153
Coquimbo	154,9	26,8	1,12	625.871	637.815	654.491	667.195	675.769	680.759	682.608
Valparaíso	166,46	34,96	1,15	1.607.397	1.638.071	1.680.900	1.713.527	1.735.549	1.748.365	1.753.112
Metropolitana	162,78	33,72	1,18	7.737.181	7.884.830	8.090.989	8.248.038	8.354.037	8.415.726	8.438.579
L. G. B. O'Higgins	205,96	34,7	1,11	630.483	642.515	659.314	672.111	680.749	685.776	687.638
Maule	154	40,3	1,24	704.550	717.995	736.768	751.069	760.721	766.339	768.419
Ñuble	207,17	34,7	1,11	293.129	298.723	306.533	312.483	316.499	318.836	319.702
Biobío	191,32	34,7	1,11	1.363.226	1.389.241	1.425.564	1.453.235	1.471.911	1.482.780	1.486.806
La Araucanía	148,6	32,3	1,17	580.430	591.506	606.972	618.754	626.705	631.333	633.048
Los Ríos	117,4	20,8	1,1	245.716	250.405	256.952	261.940	265.306	267.265	267.991
Los Lagos+ Los Ríos (parcial)	209,21	37,2	1,09	570.570	581.458	596.661	608.243	616.059	620.609	622.294
Aysén	127,7	25,8	1,06	79.219	80.731	82.842	84.450	85.535	86.166	86.400
Magallanes y A. Chilena	149,2	15	1,05	157.338	160.340	164.533	167.726	169.882	171.136	171.601
Dispersos	270,15	27,7	1,28	65.247	66.492	68.231	69.555	70.449	70.969	71.162
País	206,6	33,2	1,12	16.119.891	16.427.508	16.857.026	17.184.227	17.405.068	17.533.593	17.581.205

Tabla II.6. Estimación del caudal medio anual (l/s) proyectado en cada región. Fuente: Elaboración propia.

Regiones	Consumo medio anual en TO (l/s)						
	2022	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Arica y Parinacota Tarapacá	871	888	911	929	941	948	950
Antofagasta	918	935	960	978	991	998	1.001
Atacama	433	441	453	462	468	471	472
Coquimbo	1.122	1.143	1.173	1.196	1.212	1.220	1.224
Valparaíso	3.097	3.156	3.238	3.301	3.344	3.368	3.378
Metropolitana	14.577	14.855	15.244	15.540	15.739	15.855	15.899
L. G. B. O'Higgins	1.503	1.532	1.572	1.602	1.623	1.635	1.639
Maule	1.256	1.280	1.313	1.339	1.356	1.366	1.370
Ñuble	703	716	735	749	759	765	767
Biobío	3.019	3.076	3.157	3.218	3.259	3.283	3.292
La Araucanía	998	1.017	1.044	1.064	1.078	1.086	1.089
Los Ríos	334	340	349	356	360	363	364
Los Lagos+Los Ríos	1.382	1.408	1.445	1.473	1.492	1.503	1.507
Aysén	117	119	122	125	126	127	128
Magallanes y A. Chilena	272	277	284	290	293	296	296
Dispersos	204	208	213	217	220	222	223
País	30.805	31.393	32.214	32.839	33.261	33.507	33.598

Tabla II.7. Proyección de la demanda media anual de producción de los servicios concesionados (l/s). Fuente: Elaboración propia.

Regiones	Demanda media anual en TO (l/s)						
	2022	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Arica y Parinacota Tarapacá	1.241	1.265	1.298	1.323	1.340	1.350	1.354
Antofagasta	1.320	1.346	1.381	1.407	1.426	1.436	1.440
Atacama	637	649	666	679	688	693	695
Coquimbo	1.533	1.562	1.603	1.634	1.655	1.667	1.672
Valparaíso	4.761	4.852	4.979	5.076	5.141	5.179	5.193
Metropolitana	21.993	22.413	22.999	23.445	23.747	23.922	23.987
L. G. B. O'Higgins	2.302	2.346	2.407	2.454	2.485	2.503	2.510
Maule	2.104	2.144	2.200	2.242	2.271	2.288	2.294
Ñuble	1.076	1.097	1.126	1.147	1.162	1.171	1.174
Biobío	4.623	4.711	4.834	4.928	4.991	5.028	5.042
La Araucanía	1.475	1.503	1.542	1.572	1.592	1.604	1.608
Los Ríos	422	430	441	449	455	459	460
Los Lagos+Los Ríos (parcial)	2.200	2.242	2.301	2.345	2.375	2.393	2.399
Aysén	158	161	165	168	170	172	172
Magallanes y A. Chilena	320	326	334	341	345	348	349
Dispersos	282	288	295	301	305	307	308
País	46.446	47.333	48.570	49.513	50.149	50.519	50.657

Tabla II.8. Proyección de la demanda máxima de producción de los servicios concesionados (l/s). Fuente: Elaboración propia.

Regiones	Demanda máxima de producción en TO (l/s)						
	2022	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Arica y Parinacota Tarapacá	1.303	1.328	1.363	1.390	1.407	1.418	1.422
Antofagasta	1.386	1.413	1.450	1.478	1.497	1.508	1.512
Atacama	694	708	726	740	750	755	757
Coquimbo	1.717	1.750	1.795	1.830	1.854	1.867	1.872
Valparaíso	5.476	5.580	5.726	5.837	5.912	5.956	5.972
Metropolitana	25.952	26.447	27.139	27.665	28.021	28.228	28.305
L. G. B. O'Higgins	2.555	2.604	2.672	2.723	2.758	2.779	2.786
Maule	2.608	2.658	2.728	2.781	2.816	2.837	2.845
Ñuble	1.195	1.218	1.249	1.274	1.290	1.300	1.303
Biobío	5.131	5.229	5.366	5.470	5.540	5.581	5.596
La Araucanía	1.725	1.758	1.804	1.839	1.863	1.877	1.882
Los Ríos	464	473	485	494	501	504	506
Los Lagos+Los Ríos (parcial)	2.398	2.444	2.508	2.556	2.589	2.608	2.615
Aysén	167	170	175	178	181	182	182
Magallanes y A. Chilena	336	342	351	358	362	365	366
Dispersos	361	368	378	385	390	393	394
País	53.468	54.490	55.915	56.998	57.731	58.158	58.315

Las [Tablas II.6, II.7 y II.8](#) resumen en la [Tabla II.9](#), en tonalidades azules, más en tonalidades amarillas, las cifras reportadas para 2022 respecto de la capacidad teórica de producción de las empresas concesionarias, dada por la suma de sus derechos de agua constituidos, sus capacidades de potabilización en plantas y las de diseño de sus instalaciones, con 109.035 L/s, y lo reportado como efectivamente entregado, 81.909 L/s, que muy posiblemente incorporan recursos extraordinarios de otras fuentes (arriendo de sondajes de terceros, trasposos extraordinarios a través de la DGA) por causas de la emergencia en sequía. En todo caso, es significativo que, aparentemente, las capacidades disponibles serían suficientes en el largo plazo para demandas globales calculadas. Sin embargo, la situación resulta de mayor complejidad si se analizan las condiciones particulares por regiones, o por conglomerados urbanos, ciudades y, por cierto, el mundo rural y la población abastecida por servicios particulares e informales.

Tabla II.9. Resumen de demanda de servicios concesionados (l/s). Fuente: Elaboración propia.

Tipo de demanda/año	Resumen de demandas totales de consumo/producción/punta en TT.OO. (l/s)						
	2022	2025	2030	2035	2040	2045	2050
De consumo	30.805	31.393	32.214	32.839	33.261	33.507	33.598
De producción	46.446	47.333	48.570	49.513	50.149	50.519	50.657
En punta	55.491	56.514	57.944	59.034	59.772	60.203	60.366
Capacidad operativa - 2022	109.035	Suma total de caudales de diseño, derechos de agua y tratamiento					
Capacidad operada efectiva - 2022	81.909	Total de producciones máximas informadas Incluye otras fuentes					

Es también relevante analizar la contribución de cada una de las tres formas de las fuentes de suministro para la población urbana abastecidas bajo concesiones sanitarias ([Tabla II.10](#)).

Tabla II.10. Fuentes de captación de agua potable en servicios concesionados (l/s).

Fuente: Elaboración propia.

Tipo de fuentes	Subterránea	Superficial	Desalinizada
Capacidad en l/s - 2022	61.483	45.869	1.602
Porcentajes	56,4%	42,1%	1,5%

II.1.4. Demanda de los Servicios Sanitarios Rurales (SSR)

La Base de Datos de los SSR a diciembre de 2022 muestra 2.186.507 habitantes estimados que se abastecían con agua potable en 2.367 servicios en operación. Se puede considerar que la demanda sea asignada considerando una dotación ideal de 150 l/h/día en punta, y desagregada por cada región (Tabla II.11.).

Tabla II.11. Demanda de los servicios sanitarios rurales. Fuente: Elaboración propia.

	Regiones y zonas	# SSR	Beneficiarios estimados	Dotacion l/h/día	Demanda l/s
1	Arica y Parinacota	32	16.889	150	29
2	Tarapacá	25	12.155	150	21
3	Antofagasta	18	16.635	150	29
Subtotal Norte Grande					79
4	Atacama	47	20.457	150	36
5	Coquimbo	216	167.657	150	291
Subtotal Norte Chico			188.114		327
6	Valparaíso	212	212.586	150	369
7	Metropolitana	114	204.299	150	355
8	O'Higgins	220	342.742	150	595
9	Maule	303	349.953	150	608
10	Ñuble	237	156.122	150	271
Subtotal Centro					2.197
11	Biobío	185	139.441	150	242
12	La Araucanía	285	195.892	150	340
13	Los Ríos	151	117.146	150	203
14	Los Lagos	265	204.051	150	354
Subtotal Sur					1.140
15	Aysén	46	27.289	150	47
16	Magallanes	11	3.193	150	6
Subtotal Austral					53
Total, SSR país		2.367	2.186.507	150	3.796

Es entendible que las demandas así calculadas en los SSR difícilmente hayan podido ser satisfechas plenamente y a cabalidad, pues es evidente que la sequía ha afectado fuertemente al sector rural y ha dado lugar a acciones de emergencia con abastecimientos externos mediante camiones aljibe, e incluso con el arrendamiento de captaciones de particulares; se ha desglosado aquí Norte Grande y Norte Chico, pues este último ha sido particularmente afectado por la sequía. La Región de Coquimbo, según información del Diario El Día, mantiene el abastecimiento mediante 84 camiones aljibe con 50 l/día/habitante a 32.233 personas (18.612 en Limarí, 6.834 en Choapa, 6.787 en Elqui); esta situación extrema es altamente precaria, de bajo estándar de salubridad y de un elevado costo financiero.

II.1.5. Consideraciones generales sobre la proyección de demandas de agua potable.

Se ha arribado a una estimación de demandas de agua potable en Chile hasta 2050, soportada básicamente por los datos de población del Censo INE 2017, la proyección de población INE hasta 2050, y datos estadísticos de consumos de la SISS y de los SSR de 2022. Se hace necesario evaluar las posibles desviaciones de estas proyecciones respecto de lo que pueda deparar la realidad futura.

Proyección general de la población. Se concuerda con el INE en la marcada reducción de la tasa vegetativa de crecimiento nacional, y se estima que es más probable una tendencia a valores aun inferiores, atendido el menor atractivo de Chile para la inmigración descontrolada de los últimos años y la muy baja tasa nacional en los nacimientos de 1,3 hijos por mujer fértil (2,1 es el valor de reposición para mantener constante la población), lo que difícilmente sería contrarrestado por la mayor fecundidad de los inmigrantes y la mayor expectativa de años de vida de los chilenos. Así, se postula que la demanda de agua potable a 2050 podría estar solo muy marginalmente subestimada y más bien está sobreestimada. En efecto, la proyección hecha y apoyada en las estimaciones del INE a 2050 ha señalado 19.828.623 habitantes en 2022, pero las cifras preliminares ya disponibles del Censo 2024 reportan solamente 18.480.432 como población total.

Población urbana/rural. Se ha supuesto que la proporción de población rural estimada en 11,03% para 2022 se mantendrá hasta 2050; sin embargo, es evidente la tendencia progresiva de una migración desde el sector rural a las ciudades, espoleada por carencias importantes en la disponibilidad de servicios básicos como agua potable, alcantarillado y su saneamiento, electricidad, comunicaciones, vías de acceso expeditas, etc., así como la pérdida de suelos agrícolas por sequías como fuente de sustento. Un reflejo de esto es el incremento desmesurado de campamentos en las ciudades principales. Así se puede asumir que la demanda estimada del sector rural es un valor máximo con pocas probabilidades de ser excedido.

Dotaciones. Se ha mantenido hasta 2050 la dotación media actual de servicios urbanos en 206 L/h/día; la evidencia reportada por ANDESS (Asociación Nacional de Empresas Sanitarias) en los últimos 25 años señala una disminución del orden del 30%, y la SISS registra una disminución del 1% anual desde 2013 a 2022; esto obedecería a factores como el incremento de costos tarifarios en agua y alcantarillado, la menor disponibilidad de agua en algunas zonas, y el aumento de población en campamentos sin servicio regular de abastecimiento. Sería razonable esperar una disminución de dotaciones hacia 2050, aunque no significativa, habida cuenta de que la cifra media de la OCDE está en 250 L/h/día. Respecto a la dotación de los SSR, bien podría reducirse al ser sometidas a tarificación por la SISS, pero podría aumentar al contar con sistemas de tratamiento de las aguas residuales, resultando en variaciones de segundo orden.

Agua no contabilizada, ANC. Chile acusó en 2022 un 33,2% de ANC en los servicios concesionados, con extremos máximo de 50,3% en SMAPA y mínimos de 7,4% en Aguas Santiago Poniente y 6,1% en COOPAGUA; esta situación es de la mayor gravedad pues las nueve principales empresas están sobre el 30%. Se debe entender que es urgente abordar esta deficiencia, apuntando a una reducción de lo admisible al 10%. Es notorio que el valor fijado en 15% para la empresa modelo no tiene efecto real como incentivo financiero suficiente para atacar los factores que inciden en tan elevadas pérdidas, y que solo compensaciones indirectas permiten soportar este menoscabo que sería solo teórico. Debe tenerse presente que un informe reciente de World Resources Institute, WRI, sitúa a Chile en lugar 16 entre los 25 países con mayor riesgo extremo de crisis de sus recursos hídricos (ocupa más del 80% de su disponibilidad), y con sombrío futuro hacia 2050. Una reducción efectiva del nivel de ANC del orden de 20% en los niveles actuales permitiría atenuar significativamente ese riesgo, al menos en el sector sanitario. Se puede mencionar, entre otras, una herramienta eficaz posible de ser aplicada, como el monitoreo en tiempo real de los sistemas de producción y distribución en sus caudales y presiones en forma remota y continua, discretizados en secciones, sectores y subsectores, para su auditoría con un sistema gemelo de modelación, lo que detectaría anomalías en forma inmediata y activaría respuestas oportunas. Existen medios prácticos y tecnológicos disponibles para ello, y la normativa debiese forzar su aplicación, considerando que su implementación es en general económicamente rentable, y al ser eficiente permitiría justificar la primera prioridad asignada al consumo humano en la asignación de las disponibilidades hídricas.

En todo caso, ha de tenerse presente que se ha calculado esta cifra conservando el nivel de agua no contabilizada actual, del orden de 30%, y que en rigor su impostergable rebaja a lo menos al 15% implicará contar con un margen de seguridad importante sobre la disponibilidad.

En resumen, será apropiado esperar que las demandas aquí calculadas para el año 2050 representen razonablemente los caudales máximos esperables, e impulsar la tecnificación de los sistemas de agua potable para asegurar su operación más eficiente.

II.2. Opciones de reforzamiento de las fuentes de suministro de agua potable

II.2.1. Fuentes de agua en uso

El IGSISS de 2022 (Gráfico 1.5) señala que el agua subterránea provee el 56,4% del consumo, el agua superficial aporta el 42,1%, y el agua desalinizada representa el 1,5%. Respecto de los SSR, no se dispone de información desglosada sobre las fuentes de suministro, pero puede asumirse que en un muy alto porcentaje se recurre a abastecimiento mediante captaciones subterráneas, y excepcionalmente a cursos superficiales y desalinización. A continuación se analizan brevemente las temáticas asociadas a las principales fuentes:

a) Aguas subterráneas. Las principales fuentes de suministro de agua potable en Chile son las aguas subterráneas, y presentan la ventaja propia de los embalses multianuales para mantener razonablemente su productividad año a año. Tienen la contraparte que si su explotación excede su recarga en mediano y largo plazo es inevitable su deterioro por el descenso de sus niveles freáticos, lo que trae aparejada la inutilización de las captaciones más someras, particularmente norias y drenes emplazados próximos o sobre esos niveles, por lo que numerosos sondajes deben ser profundizados, siempre con un límite que depende del espesor del acuífero explotado. Por otra parte, la sobreexplotación incide en un deterioro progresivo de la calidad del agua al predominar las aguas fósiles captadas a mayores profundidades y sin aportes significativos de reposición, lo que redundará en una presencia progresiva de contaminantes fósiles de origen volcánico (sulfatos, carbonatos, arsénico, manganeso, boro) o de aplicaciones agrícolas (fertilizantes, pesticidas, residuos de ganadería) que perjudican la calidad. Adicionalmente, dependiendo del tipo de relleno que conforma el acuífero, puede originarse subsidencia de los suelos (por ejemplo, Ciudad de México) y agrietamientos superficiales importantes y, en el caso de suelos finos, se dificulta una eventual posterior recarga y recuperación de niveles. Una dependencia particular de estos sistemas es su condicionamiento operacional a la continuidad del suministro eléctrico.

b) Aguas superficiales. Las captaciones de aguas dulces superficiales han sido históricamente las que han incidido en el establecimiento de ciudades en los márgenes de ríos y lagos. En el caso de los ríos, su dependencia climática de caudales tanto por déficit o excesos ha redundado frecuentemente en la necesidad de incorporar embalses de regulación que

adicionalmente permiten una cierta invariabilidad de la cantidad y calidad de las aguas, y favorecer el uso compartido del recurso con otras demandas. Sin embargo, las actuales tendencias conservacionistas se oponen a este tipo de soluciones, llegando en ciertos casos a propiciar su eliminación. Otro aspecto relevante en las aguas superficiales es la susceptibilidad de contaminaciones inhabilitantes, ya sean de origen natural (avalanchas, volcanismo) o antrópicas (vertidos industriales, lixiviados mineros, vertidos sanitarios de toda índole, residuos agropecuarios, contaminación accidental), usualmente repentinos e impredecibles, las que obligan a cuidados especiales en sus procesos de potabilización y de control. Un aspecto crítico es la dependencia desde los caudales superficiales con respaldo de origen glacial para sostener los flujos de estiaje, lo que ya ha sido patente en las cuencas de los ríos Elqui, Limarí, Petorca y Ligua.

II.2.2. Opciones de reforzamiento

a) Desalinización. La práctica mundial demuestra que las regiones más áridas del planeta están solucionando progresivamente su insuficiencia hídrica mediante diferentes formas de desalinización, recurriendo a aguas salobres y de mar. En Chile esta práctica se inició en el norte con destilación térmica, evolucionando ventajosamente a empleo de membranas que filtran sales mediante osmosis inversa y otros similares (nanofiltración, ultrafiltración, electrodiálisis)¹. Esta práctica tiene asegurada la obtención de agua a tratar desde mares y océanos a plenitud, con acceso desde bordes costeros, en forma continua, y la técnica permite adecuar la calidad del efluente a las distintas exigencias de uso exclusivo o mixto: agua potable, para riego, industria, minería, refrigeración. Son aspectos favorables para la desalinización el desarrollo de membranas progresivamente más eficientes que disminuyen costos unitarios energía por metro cúbico producido (2 a 3 kWh/m³) y mayor duración de las membranas; en Chile se tienen ventajas adicionales por la menor salinidad de 32 mg/l inducida por la Corriente Humboldt respecto del promedio global de 35 mg/l, la cercanía al mar de los principales centros de consumo, y la ventajosa capacidad de producción de energía eléctrica de menor costo mediante generación eólica y fotovoltaica. Como referencia², puede señalarse que el consumo eléctrico para proveer agua desalinizada en Chile es típicamente de 4 kWh/m³ para entrega a 1000 m.s.n.m. y 100 km de conducción.

La desalinización debe reconocer como restricciones cierto rechazo ambiental a la descarga de sus residuos, asunto ya resuelto técnicamente, y la necesidad de tener elevados factores de carga, siendo ideal su operación continua o con elevado factor de carga, salvo para interrupciones de mantención. Se desprende así la posibilidad de que en períodos

¹ Desalination of Seawater, American Water Works Association, Manual M61, 2011.

² Cuadernos del CPI N°155-Infraestructura para enfrentar la sequía: Nuevas Fuentes. Diciembre, 2023.

de menor demanda de base de la producción de agua potable u otras deba mantenerse su plena operación para usos mixtos, incluso para aportar a embalses con capacidad ociosa o para recarga de acuíferos con costos marginales de producción.

Por otra parte, las perspectivas futuras de la tecnología son promisorias con nuevas técnicas de optimización de eficiencia en membranas, las que podrían con menores costos facilitar la recuperación de aguas de desecho urbanas e industriales, la explotación de acuíferos contaminados, y el riego agrícola y forestal.

b) Reúso. La consecuencia del uso y aumento de demanda de agua es un inevitable incremento de efluentes de descarte, inicialmente devueltos crudos a la naturaleza; los efectos ambientalmente y sanitarios adversos hicieron necesario avanzar en tratamientos de depuración, que desembocaron finalmente en su consideración como suplemento de las captaciones de agua fresca. Esto no puede ser más patente que en el caso extremo de las tripulaciones de exploración espacial, con altísima recirculación. Los beneficios del reúso son evidentes en caso de merma o agotamiento de las fuentes disponibles, y económicos cuando el costo de adecuación para su uso es comparable o menor que recurrir a nuevas fuentes de agua fresca. Esto es evidente en las aguas desalinizadas provistas a faenas mineras cordilleranas a gran altitud, donde se justifica y aplica una alta tasa de recirculación. Así, en Chile se ha avanzado significativamente en la economía circular del agua en los ámbitos minero, agrícola, industrial, refrigeración y, recientemente en California, en el suministro directo de agua potable.

El criterio para aplicación del reúso debe considerar el porcentaje rescatable de agua con calidad apropiada para los nuevos usos requeridos, y su costo; es así posible lograr ciclos repetidos de reúso en la medida que exista factibilidad técnica para ello, y disponibilidad de reposición para la fracción que se descarta definitivamente en cada ciclo de depuración. Puede considerarse que las perspectivas futuras de reúso de las aguas están asociadas tanto a la creciente escasez de disponibilidad en sus fuentes naturales, al necesario resguardo ambiental frente a eliminación de desechos, como a los promisorios avances de las técnicas de depuración y sus costos.

c) Infiltración hacia napas subterráneas. Si bien no es estrictamente una nueva fuente, esto se refiere al modo en que parte de las aguas superficiales percolan en suelos relativamente permeables o fracturas en rocas hacia rellenos del subsuelo con capacidad de almacenamiento. Si bien este proceso ha ocurrido naturalmente, manteniendo equilibrios entre flujos de infiltración y de resurgimientos por afloramientos, el advenimiento desde muy remotos tiempos de técnicas de acceso y explotación de estos volúmenes almacenados, denominados acuíferos (literalmente, “yo llevo agua”), permitió la subsistencia de seres humanos, ganado y algunos cultivos en zonas desérticas. Norias y galerías de drenaje fueron excavadas para ello.

El advenimiento de la era industrial hizo posible la explotación de estas aguas con medios mecanizados de mayores capacidades, derivando en tiempos modernos en la explotación intensa de algunos de estos recursos subterráneos, llegando a desbalancear el equilibrio entre extracción y recarga. Se produce así un descenso sostenido del nivel del agua, inutilizando las captaciones más someras, y requiriendo profundizar pozos para mantener su operatividad. Sin embargo, esto tiene límite al alcanzarse estratos impermeables y, finalmente, el basamento rocoso de los rellenos, más un deterioro de la calidad al captar aguas fósiles no renovadas: se ha presentado arsénico en pozos sobreexplotados para Iquique, Quilicura y Marchigüe, solo como ejemplo. La recuperación de estas fuentes hace así conveniente recurrir a su recarga facilitando más infiltración, tanto natural como artificial. Para ello se requiere tener disponibilidad de agua en cantidad, de calidad adecuada, y geográficamente accesible.

La recarga natural ha sido reforzada desde tiempos remotos por comunidades andinas, encauzando flujos de deshielo hacia bofedales, logrando caudales estivales de supervivencia: se deriva la factibilidad de represar múltiples pequeñas quebradas y esteros, y encauzar en forma controlada sus aguas a terrenos aptos para infiltración (algo observado en carreteras europeas), lo que además contribuye a amortiguar crecidas (por ejemplo, quebrada de Macul, y el parque inundable aguas abajo). Un procedimiento similar es aplicable en estuarios costeros y humedales favorecidos por bajas pendientes en áreas extensas, con el beneficio de limitar la intrusión salina desde el mar (que está en ascenso) y resguardar captaciones subterráneas inmediatas. Es también aplicable el empleo de pavimentos permeables en grandes estacionamientos vehiculares y calzadas, restando caudales pluviales a redes colectoras de aguas lluvia.

Respecto de recargas artificiales, estas se aplican como reúso de aguas residuales urbanas e industriales debidamente acondicionadas para eliminar contaminación del acuífero receptor, e incluso derivando descargas de colectores de aguas lluvia a campos de infiltración; en estos casos, es apropiado descartar los primeros 15 minutos de escorrentía, pues la carga recogida en ese primer tiempo de lavado de la cuenca urbana es altamente contaminante. Resulta evidente que toda recarga de acuífero está condicionada por la factibilidad de que el agua fluya desde la superficie del terreno hacia las capas profundas del terreno, y la disponibilidad de huecos intergranulares del suelo para su almacenamiento; así, no son aptos los suelos altamente arcillosos y de baja permeabilidad. Es necesario para su aplicación un conocimiento hidrogeológico que permita evaluar la condición de los diferentes estratos presentes en el terreno para definir la forma de infiltración más adecuada, que puede ser por inundación superficial, o mediante pozos de infiltración que aseguren el flujo hacia estratos apropiados.

La infiltración de aguas provenientes de descargas de aguas servidas tratadas es particularmente apropiada en reemplazo de vertidos desde emisarios submarinos, en especialmente en zonas altamente áridas del norte de Chile: se tiene un flujo constante, solo

con tratamiento preliminar, y apto para tratamiento secundario que posibilita su infiltración para usos restringidos, o tratamiento terciario para su más amplia disponibilidad. No obstante, el que el consumo doméstico sea del orden de 10% de la demanda hídrica global, y la tasa de recuperación esté entre 0,8 y 0,9, se debe entender que su alcance será siempre limitado en cantidad, pero con la contrapartida de su disponibilidad altamente segura.

II.3. Recomendaciones de estrategias de adaptación para asegurar el uso humano del agua ante cambio climático

a) Priorización sobre otras demandas. El daño potencial de la falta de agua potable sobre la salud fisiológica y mental, higiene personal, preparación de alimentos y sanidad ambiental, e incluso la continuidad de toda la actividad humana, hace necesario reforzar el privilegio de su disponibilidad prioritaria sobre otros usos, pero esto ha de ser condicionado a la adopción de los más elevados estándares de eficiencia. Será apropiado reforzar la normativa legal para incentivar conductas proactivas con este fin, y por cierto penalizar adecuadamente todo abuso.

b) Promoción de desalinización. Chile posee la innegable ventaja de tener la mayoría de sus principales centros de consumo de agua potable inmediatos o cercanos al Pacífico, con costos moderados de transporte, sin afectar a otros demandantes y más bien reeditando un aumento adicional a la disponibilidad global del orden de 80% de lo desalinizado mediante su reúso; se agregan las ventajas de la buena disponibilidad de energías ambientalmente ventajosas, y las muy buenas perspectivas futuras de avances técnicos en membranas en todos sus tipos (MFUE, NE, OI), individualmente o en sus combinaciones de mejores rendimientos, permeabilidades y durabilidad (incorporación de grafeno, por ejemplo).

c) Exigencia de uso eficiente. Siendo un bien escaso, es obligado que su uso sea optimizado sin excusas de orden ajeno a la mejor técnica disponible; esto implica recurrir tanto al monitoreo acucioso en la producción y distribución del agua, sin pérdidas inexcusables, como en la concientización de los usuarios finales en el consumo responsable domiciliario, industrial, municipal e institucional. Es imprescindible aquí abordar soluciones alternativas a la práctica de distribución mediante camiones aljibe, de altísimos costos unitarios, discutible seguridad sanitaria, que resta recursos a otras localidades, y no aporta soluciones permanentes. Puede sumarse el incentivo a la recuperación y reúso de las aguas grises, incluyendo su tratamiento con membranas apropiadas, que bien puede reemplazar ventajosamente a las fosas sépticas en lo rural y lo urbano, y así reducir eficazmente las demandas.

d) Preservación de acuíferos. El que alrededor de un 60% del consumo urbano, y mucho más en lo rural, tenga su origen en napas subterráneas, hace imprescindible la protección de estas fuentes frente a dos amenazas latentes: su sobreexplotación por todos los demandantes, y la indeseable pérdida de su calidad por contaminación en todos sus tipos: fertilizantes, desechos agropecuarios, químicos industriales y orgánicos farmacéuticos, incluso algunos de reciente consideración como los compuestos químicos orgánicos que tras la incorporación de flúor se caracterizan por su extraordinaria estabilidad. Afortunadamente la técnica tiene disponibles los medios para monitorear, a bajos costos, en tiempo real y forma remota, tanto los niveles freáticos como los caudales extraídos en cada captación subterránea, e incluso la calidad química en casos excepcionales. Es también esencial para estos fines precaver toda explotación de aguas subterráneas indebida, abusiva o ilegal. El resguardo de la salud humana amerita estas precauciones.

II.4. Apreciaciones de la condición futura del agua potable según cada zona en particular

De las cifras expuestas sobre la estimación de demandas para consumo humano a largo plazo se pueden derivar algunas conclusiones de orden general.

a) Zona Norte. Su condición históricamente desértica ha condicionado su poblamiento a los escasos recursos hídricos naturales, con solo el 9,6% de la demanda nacional; los desarrollos urbanos costeros de importancia prosperaron inicialmente en parte a expensas de los poblados cordilleranos y su agricultura ancestral (Chintaguay y Matilla, Toconce) y últimamente están recurriendo a desalinización de aguas salinas (río Lluta) y de mar (Tocopilla, Mejillones, Antofagasta, Chañaral, Copiapó). Son factores favorables aquí las ventajas de la generación eléctrica fotovoltaica de bajo costo para la desalinización y la baja elevación necesaria para la conducción a los principales centros de consumo, a lo que se suma cierta tendencia a aumento de la pluviosidad en el extremo norte. En cuanto a los poblados rurales y localidades del interior, estos se benefician de la sustitución con aguas desalinizadas de la explotación de los acuíferos cordilleranos por la industria minera, restituyendo humedales y recarga de acuíferos. Así, con menos de 10% de la demanda de agua potable en el país, la Zona Norte en general se ha desarrollado condicionada por la escasez hídrica, y está en buenas condiciones para enfrentar los efectos adversos del Cambio Climático; puntualmente, sería la región de Coquimbo la más expuesta, por su mayor demanda urbana, rural y agropecuaria, y una fuerte dependencia de fuentes superficiales de origen cordillerano, altamente condicionadas por las sequías. Se plantea aquí la necesidad de abordar el destino futuro de las importantes instalaciones de suministro de agua desalinizada para las grandes minas cuando estas lleguen al final de su explotación y cierre.

b) Zona Centro. Con su demanda de agua potable del 70% del total urbano y rural del país, y su elevada dependencia de las fuentes superficiales amenazadas por el Cambio Climático tanto por exceso (inundaciones, aluviones) como por escasez (sequías multianuales, estiajes dependientes de eventuales nevadas invernales cordilleranas, y enfrentados a la reducción de flujos desde glaciares en franco receso), esta zona se muestra particularmente frágil. Hasta ahora se ha recurrido crecientemente a aumentar progresivamente la dependencia de aguas subterráneas, proceso que incluye a todos los demandantes sobre las fuentes hídricas, y en ocasiones se asocia al otorgamiento importante de nuevos derechos acompañado de una amplia infraestructura de regadío. Así, se evidencia en algunos sectores acuíferos de esta zona central y del Norte Chico, un sostenido descenso de los niveles freáticos, con efecto notable en las captaciones de agua potable urbana más expuestas (Copiapó, Petorca, Ligua, Cabildo, Putaendo, San Felipe, Las Vegas, Los Andes, Casablanca, Chacabuco, San Antonio, entre otros), y con consecuencias más marcadas en los sistemas rurales. El recurrir a la profundización de norias, drenes y sondajes de captación tiene límites, y por cierto hacerlo en una captación subterránea afectará a otras captaciones que comparten el acuífero. Se evidencia aquí la necesidad de actuar por diversos medios para reforzar la seguridad de suministro para el total de los demandantes de manera equitativa, pues el privilegio dado al consumo humano puede llegar a ser inútil ante una escasez extrema.

c) Zona Sur. Si bien la zona ocupa el segundo lugar en las demandas totales de agua potable de Chile, requiere algo menos del 20%; en general dispone de cuencas con una nutrida red de ríos caudalosos de curso permanente y alimentados con buenos recursos de cordillera, pluviosidad de mejor regularidad, y más el respaldo de importantes lagos y lagunas en sus cabeceras. La contrapartida está en algunos territorios singulares que carecen de participación de esos beneficios, en particular sin infraestructura de regadío significativa, y condiciones hidrogeológicas menos favorables para la extracción de aguas subterráneas; esto ha motivado la dictación de diversos decretos de escasez hídrica por la DGA en la región de Los Lagos, abarcando toda la provincia de Chiloé (por su carácter insular e inusual escasez de sus habituales lluvias frecuentes) y las comunas de Puerto Montt, Puerto Varas, Calbuco, Los Muermos, Llanquihue, Maullín, Fresia y Cochamó, siendo los sistemas rurales los más afectados. Una amenaza latente en esta zona, aunque no asociada al Cambio Climático, es el marcado vulcanismo del cordón cordillerano, pero siempre de necesario seguimiento preventivo por su potencial afectación a las fuentes de agua superficial (volcanes activos como Villarrica, Llaima, Chaitén y Calbuco, entre otros).

d) Zona Austral. Tanto en la región de Aysén como la de Magallanes y Antártica Chilena se aprecia una geografía costera e insular de alta pluviosidad, con una vertiente occidental de la cordillera de Los Andes con gran reserva de glaciares, lagos y ríos caudalosos, mientras que la vertiente oriental presenta condiciones esteparias y áridas más propias de la pampa

austral argentina. Así, con escasa población y menos de 2% de la demanda total, los recursos hídricos son ampliamente seguros para abastecer de agua potable a las localidades más cercanas al Pacífico, desde Puerto Aysén hasta Tortel, y de menor confiabilidad para las que se ubican en áreas de clima más estepario, como Balmaceda, Puerto Natales, Punta Arenas y Porvenir, y que presentan precariedades ocasionales. De hecho, Punta arenas ha debido compensar las falencias de su suministro histórico desde el río Las Minas con distantes obras de captación y conducciones.

ANEXO III

Antecedentes sobre el uso agrícola del recurso hídrico

III. 1. Impacto del cambio climático en el PIB agrícola

Respecto de la situación futura, cuatro importantes estudios sobre el efecto del cambio climático (Burke, Hsiang y Miguel 2015; Kalkuhl y Wenz 2020; Roson y Sartori 2016; Kahn *et al.* 2021), concluyen que Chile tendrá una pérdida de PIB baja o moderada producto del cambio climático para el año 2100. Por su parte las estimaciones que ofrece el estudio de Kahn *et al.* (2021), Long-Term Macroeconomic Effects of Climate Change: A Cross-Country Analysis. *Energy Economics* 104, 105624. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2021.105624> señalan que Chile será uno de los países más impactados por el cambio climático. Asimismo, estudios de modelos estructurales del cambio climático presentan estimaciones de pérdida del PIB para Chile iguales o inferiores al 3% (Madeira 2022). Finalmente, otros estudios mencionados por Madeira (2022) en un trabajo para el Banco Central, predicen un impacto del PIB General para Chile, en el año 2100, que fluctúa entre una pérdida de un 11,1% y una ganancia del 32% en el escenario RCP 8,5, lo que muestra que existe una incertidumbre sustantiva en torno a las predicciones del PIB a partir del cambio climático. Esta dispersión de datos también se ve reflejada en la [Tabla III.2](#), más adelante.

Además, según análisis más amplios, Chile puede experimentar un importante grado de estrés y escasez hídrica debido a las bajas precipitaciones, los incendios, la contaminación del aire y los daños ecosistémicos; también una reducción moderada en la pérdida de biodiversidad y una reducción significativa en la abundancia de especies. (Madeira, C. 2022)

En la [Tabla III.1](#), se presentan las estimaciones para Chile desde estudios multinacionales del efecto del cambio climático sobre la temperatura y precipitación.

Tabla III.1. Revisión de las estimaciones para Chile desde estudios multinacionales sobre el impacto del cambio climático en términos de temperatura y precipitación.

Fuente: Madeira,C. 2022 y elaboración propia.

Autores	Horizonte	Resultado	Impacto estimado para Chile
Collins <i>et al.</i> (2013)	2081 -2100	Temperatura	Incremento de 0,5 a 0,75 °C por 1 °C en la temperatura global
Collins <i>et al.</i> (2013)	2081 -2100	Precipitación	-3% a -6% de lluvia caída por 1 °C en la temperatura global
World Bank (2013)	2100	Meses de temperatura alta (en%)	0% a 10% (RCP2,6), 10% a 20% (RCP 8,5)
World Bank (2013)	2071 -2099	Precipitación	-10% a 15% (RCP 2,6), -30% a -35% (RCP 8,5)
Diffenbaugh y Giorgi (2012)	2016-2035	Cambio climático*	0,85 (RCP 4,5), 0,95 (RCP 8,5)
Diffenbaugh y Giorgi (2012)	2045-2065	Cambio climático*	1,35 (RCP 4,5), 1,50 (RCP 8,5)
Diffenbaugh y Giorgi (2012)	2080-2099	Cambio climático*	1,45 (RCP 4,5), 2,60 (RCP 8,5)

* Esta es una medición multivariada del cambio climático con una distancia euclidiana de los cambios relativos a lo largo de siete indicadores climáticos (incluyendo temperatura extrema y precipitación) para cuatro estaciones. La escala euclidiana va desde 0,5 (bajo cambio climático) a 3,0 (alto cambio climático).

La [Tabla III.2](#) muestra las estimaciones del impacto del cambio climático sobre el sector agrícola chileno a través de la reducción de la producción de los cultivos y el valor de la tierra y el PIB. La OECD (2015) estima un impacto positivo de un 0,3% del PIB para la agricultura y de un 0,4% del PIB para la agregación de la agricultura, la pesca y el sector forestal, con un impacto positivo que proviene de una demanda internacional más fuerte de los productos chilenos y de mayores rendimientos en el arroz, las frutas, los vegetales y la remolacha. Sin embargo, estos resultados del impacto agrícola son altamente dependientes del modelo, y otras estimaciones debidas a González y Velasco (2008), Vergara *et al.* (2013) y Bárcena *et al.* (2019) entregan estimaciones negativas del cambio climático para el sector agrícola chileno. Además, el estudio de Hernández y Madeira (2022) muestra que pesca y agricultura serían los dos sectores económicos en Chile más negativamente impactados por el cambio climático mientras que Roson y Sartori (2016) estiman una pérdida insignificante del PIB proveniente de la productividad agrícola.

En la [Tabla III.2](#), se presentan los impactos del cambio climático para la agricultura en Chile, expresados en cambios del PIB y rendimiento de algunos cultivos.

Tabla III.2. Revisión de estimaciones desde estudios multinacionales del impacto en el sector económico agrícola en Chile (relativo a un escenario sin cambio climático).

Fuente: Carlos Madeira 2022. Banco Central 2021.

Autores	Horizonte de tiempo	Resultado	Impacto estimado para Chile
OECD (2015)	2060	PIB agrícola	+0,30% en PIB
OECD (2015)	2060	PIB agrícola	+0,25% en PIB (factores globales)
OECD (2015)	2060	PIB agrícola	+0,05% en PIB (factores domésticos)
OECD (2015)	2060	Agricultura, pesca, silvicultura	+0,40% en PIB +31% (arroz) +9% (frutas y vegetales) +8% (remolacha)
OECD (2015)	2050	Cambios en rendimientos de cultivos	-7% (otros granos) -13% (trigo) -15% (fibras vegetales) -28% (semillas de aceite)
Roson y Sartori (2016)	2062	Agricultura	+0,01% en PIB (RCP 8,5)
Vergara <i>et al.</i> (2013)	2020	Cambios en rendimientos de cultivos	-8% (granos secundarios) 18% (trigo)
Vergara <i>et al.</i> (2013)	2050	Cambios en rendimientos de cultivos	-17% (granos secundarios) 19% (trigo)
González y Velasco (2008)	2100	Valor de terrenos agrícolas	-6,2% (+2,5 °C, -10% precipitación)
Bárcena <i>et al.</i> (2019)	2080	PIB agrícola	-27% (método de cultivo)
Bárcena <i>et al.</i> (2019)	2080	PIB agrícola	-22% (método ricardiano)
Bárcena <i>et al.</i> (2019)	2080	PIB agrícola	-13% (con desarrollo en fertilización)
Bárcena <i>et al.</i> (2019)	2080	PIB agrícola	-24% (sin desarrollo en fertilización)

Como se desprende de los cuadros anteriores, existe una gran dispersión en los resultados del impacto climático en la agricultura y el PIB, los cuales dependen del modelo utilizado. Esto significa que aún existe una gran incertidumbre respecto a los reales impactos del cambio climático y que aún falta mucha investigación al respecto. En lo que sí hay coincidencia es en el impacto en la reducción de los cereales en Chile y un aumento en la importancia de la fruticultura, lo cual es consecuente con lo observado en los últimos años.

III.2. Demanda de agua para uso agrícola actual y proyectado

a) **Demanda de agua para la agricultura según estudios existentes.** Existen diferentes trabajos tendientes a calcular las demandas actuales de recursos hídricos para la agricultura y su proyección, considerando en algunos casos, el impacto del cambio climático. Las demandas actuales en la mayoría de los casos son calculadas sobre la base de la superficie regada y la consecuente estructura de cultivos obtenida del Censo Agropecuario y Forestal del año 2007 y los catastros frutícolas de los años 2014-2016, a los cuales se les hacen proyecciones hacia el año del Estudio correspondiente.

Todas las demandas calculadas consideran la evapotranspiración por cultivo, a la cual se le resta la precipitación efectiva, y las pérdidas asociadas a las eficiencias de aplicación del agua de riego.

Un estudio sobre Demandas Hídricas efectuado por la DGA en el año 2017 calculó las Demandas Agrícolas Actuales (año 2017) y las proyecciones a los años 2030 y 2040 (DGA 2017). En este estudio se presentan demandas futuras mayores a las actuales, fundamentando esta decisión sobre la base de considerar para cada cuenca una proyección de la superficie agrícola actual a partir de los Censos Agrícolas y utilizando la función "TENDENCIA" de Excel. Los resultados obtenidos se presentan en la [Tabla III.3](#).

Como se observa en la [Tabla III.3](#), las demandas aumentan considerablemente en la proyección al año 2030 y 2040, explicado fundamentalmente por el aumento de la superficie bajo riego en los supuestos del Estudio de la DGA. Lo anterior es contradictorio con lo señalado en el presente trabajo, donde se demostró que la superficie permanece casi invariable en los últimos 20-30 años y más aún hay un desplazamiento de esta superficie desde la Región Metropolitana al sur. Ejemplo de esta contradicción es que en el cuadro anterior se observa que la Región del Maule disminuye la demanda hídrica agrícola a futuro. Además, se observa un gran incremento en las Regiones de Atacama y Coquimbo, lo que contradice los últimos censos.

Otro intento por determinar las demandas Agrícolas es un estudio realizado para la DGOP-MOP, por Orphanópoulos D. y RODHOS Asesorías y Proyectos SpA. (2021). En este estudio se analiza una proyección de la demanda hacia los años 2040 y 2050, sobre la base de una demanda modificada al 2020 que tiene como base el Estudio de la DGA del año 2017 antes indicado.

Tabla III.3. Demanda agrícola actual y proyectada a los años 2030 y 2040. Fuente. DGA 2017 y elaboración propia.

Región	Demanda agrícola actual 2017 Hm ³ /año	Demanda agrícola 2030 Hm ³ /año	Demanda agrícola 2040 Hm ³ /año
Arica y Parinacota	73,00	68,09	63,07
Tarapacá	17,09	17,47	16,93
Antofagasta	46,23	42,32	42,40
Atacama	140,22	189,21	210,31
Coquimbo	462,09	720,12	790,98
Valparaíso	672,34	736,45	779,57
Metropolitana	1.269,82	1.216,81	1.253,00
O'Higgins	1.723,42	1.838,78	1.954,69
Maule	2.822,60	2.503,61	2.437,76
Biobío y Ñuble	475,98	432,80	416,30
Araucanía	172,48	167,52	171,06
Los Ríos	5,46	7,03	8,17
Los Lagos	2,61	3,17	3,72
Aysén	0,73	0,49	0,48
Total	7,886,17	7,946,52	8151,43

Según dicho estudio, las demandas agrícolas actuales estarían subestimadas por efectos de la sequía y por lo tanto se reformularon sobre la base de recopilar antecedentes en terreno de superficie y tipos de cultivo predominantes a nivel de cuenca y de otros estudios; y se estimó la demanda neta para tiempos normales, la cual se comparó con la estimada en el estudio de demandas DGA 2017, de ambos datos, y se seleccionó el valor mayor.

Para la proyección de la demanda agrícola al año 2050, se consideró la información de área potencial de riego identificada en los diversos estudios de tipo planificación. Acerca de esta área, es necesario señalar que ella corresponde al área de riego potencial identificada como tal, aunque en la actualidad no se riegue, por efecto de la sequía. Lo que se buscaba era conocer una cota superior de la demanda agrícola en el largo plazo, de modo de evaluar las iniciativas con esa misma mirada.

Indudablemente este análisis no considera que el principal efecto del cambio climático que afectará a la superficie agrícola y por ende a la demanda de agua, es la disminución de los caudales disponibles en cada cuenca.

Finalmente, este estudio se hace parcialmente cargo de la disminución de la oferta hídrica futura, específicamente la escorrentía, al afectarla por un factor que representa un cambio climático futuro en un escenario severo (RCP8.5)

El factor de afectación de la escorrentía de oferta en escenario de cambio climático se obtuvo en base a la estimación que se realiza en el estudio “Actualización Balance Hídrico DGA 2017”.

De la información presentada se dedujo que, para todas las cuencas analizadas de Chile habría una disminución de la escorrentía entre un 2%-15% en la Zona Norte, un 20% a un 30% en la Zona Central y un 15%-30% en la zona sur.

No obstante lo anterior, no se calcularon las nuevas superficies y demandas agrícolas bajo dicho escenario de cambio climático.

En la [Tabla III.4](#), se presentan las demandas agrícolas actuales, las demandas proyectadas al 2050 y las disminuciones de caudal de escorrentía para cuencas seleccionadas, bajo un escenario de cambio climático RCP 8.5.

Tabla III.4. Demandas de agua agrícola actual y proyectada al 2050 y caudal de escorrentía bajo RCP8.5, para cuencas seleccionadas. Fuente DGOP-MOP 2021 y elaboración propia.

Cuenca	Demanda agrícola actual 2020 m ³ /s	Demanda agrícola futura 2050 m ³ /s	Variación escorrentía media anual RCP8.5 %
Río Lluta	0,30	1,76	-2,4
Río San José	0,80	1,23	-12,8
Río Loa	0,48	0,44	-19,2
Río Copiapó	3,22	4,80	14,7
Río Huasco	1,76	5,91	-13,8
Río Elqui	3,71	9,00	-14,9
Río Limarí	12,42	15,60	-17,8
Río Choapa	4,74	6,60	-19,6
Río Aconcagua	27,10	26,43	-21,0
Río Maipo	33,48	50,63	-21,5
Río Mataquito	12,70	14,71	-25,5
Río Maule	42,68	46,16	-29,8
Río Itata	5,63	14,34	-17,9
Río Imperial	1,78	9,00	-17,7
Río Toltén	0,67	9,20	-15,2

Cómo se observa en el cuadro anterior, las demandas proyectadas al 2050 superan ampliamente a las demandas actuales, sin considerar que la situación hidrológica con el cambio climático se verá bastante disminuida, lo cual queda demostrado en la proyección RCP 8.5 de los caudales superficiales, los cuales disminuyen considerablemente en todas las cuencas analizadas, con la excepción de la cuenca del Copiapó.

EL estudio de la DGOP (DGOP 2021) calcula la Demanda Agrícola total para el año 2020, en 290,97 m³/s o 9.025,45 Hm³/año, superior a los 7.886,17 calculado por la DGA para el año 2015. Para la proyección 2050 la calcula en 300,16 m³/s o 9.336,17 Hm³/año, muy superior a la calculada por la DGA 2017, para el año 2040, que alcanzó los 8.151,43 Hm³/año.

Esto se presenta en la [Tabla III.5](#).

Tabla III.5. Demanda agrícola total país, actual y proyecciones. Fuente: DGA 2017 y DGOP 2021 y elaboración propia.

DGA 2015 Hm ³ /año	DGA (2017) proyectada 2040 Hm ³ /año	DGOP proyectada 2020# Hm ³ /año	DGOP proyectada 2050# Hm ³ /año
7886,17	8.151,43	9.025,45	9.336,17

De conformidad con los datos de superficie cultivada bajo riego que no han variado en los últimos años, es posible considerar que la demanda calculada por la DGA para el año 2015, que considera una superficie agrícola regada de 906.234 ha, semejante a la del Censo 2022 de 900.306 ha regadas (Cuadro III.5) puede representar bastante bien la real demanda actual de nuestra agricultura, es decir, del orden de los 7.886 Hm³/año o 254 m³/s.

Estos estudios consideran sólo el uso de las aguas superficiales, por lo tanto, parte del déficit estaría siendo cubierto por las aguas subterráneas, las cuales también han mostrado tendencias negativas en las últimas décadas.

Respecto a las aguas subterráneas, la recarga media estimada, alcanza del orden de los 55 m³/s desde la Región Metropolitana al Norte (Salazar, 2003). Al Sur de la Región de O'Higgins no hay datos precisos; pero se estima una recarga de 160 m³/s (Banco Mundial, 2011).

La utilización efectiva de las aguas subterráneas se estimaba el 2003 en 88 m³/s, de los cuales el 49% se utilizaba en la Agricultura, es decir, alrededor de 43 m³/s (Salazar 2003). Considerando que la demanda agrícola total actual es de alrededor de 254 m³/s como se señaló anteriormente, restando los 49 m³/s de agua subterránea quedaría una demanda de agua superficial del orden de los 205 m³/s o 6.376 Hm³/año.

Para estimar el volumen anual de extracción que pudiera significar una explotación más intensa de los acuíferos, se puede tomar como referencia el caudal de extracción sustentable estimado por la DGA, con el propósito de constituir derechos de aprovechamiento sobre las aguas subterráneas. Los antecedentes disponibles de la DGA (2006, 2012, 2014) permiten concluir que dicho volumen asciende, en los acuíferos más relevantes para el uso agrícola (valle central), a 1.400 millones de m³ (45 m³/s), aproximadamente. Este aporte de agua subterránea, que deberá desarrollarse en el tiempo, significará una importante fuente para satisfacer los requerimientos hídricos de la zona centro-sur.

En conclusión, se puede indicar que los estudios sobre demanda de agua agrícola, realizados a la fecha, presentan una gran disparidad de datos y que las demandas calculadas con proyección a futuro adolecen del problema de no considerar las restricciones hídricas que ocasiona el cambio climático y se basan solamente en aumentos de superficie regada potencial posible, sin considerar los períodos de escasez hídrica.

En las regiones desde la Metropolitana al Norte, todo indica que los esfuerzos de las políticas públicas deben estar enfocados a sostener, en lo posible, la demanda de agua que requiere la superficie actual de riego, bajo las nuevas condiciones que impone el cambio climático. Esto significa aumentos en la tecnificación y eficiencia del riego a nivel de predio, conducción y cuenca; intercambio de aguas con empresas mineras; reducción de pérdidas de conducción; incentivos para el uso de tuberías de presión; entrega de agua según demanda; nuevas fuentes de agua económicamente factibles (desalación, aguas servidas tratadas); incentivos para mejorar y promover el mercado del agua, es decir, una gestión eficiente del recurso hídrico. También deberá evaluarse la construcción de embalses en las Cuencas de Aconcagua y Maipo, que sean económicamente rentables y no signifiquen aumentos de la superficie de riego.

Desde la Región Metropolitana y hasta la Región del Maule debiera tenerse como objetivo mínimo, conservar la superficie de riego histórica con adecuada seguridad de riego y con cultivos altamente rentables. Para lo anterior será necesario realizar una gestión eficiente a nivel de predio, sistema y cuenca.

En esta zona, la mejora de la oferta de recursos hídricos debiera considerar el aumento de la infraestructura de riego, con la construcción de embalses bien evaluados, económicamente rentables, en zonas bien específicas y que excluyan propuestas de aumento de superficie de riego, salvo en casos muy calificados. Se deberá incentivar un uso racional del agua subterránea existente, sistemas de infiltración y recarga de acuíferos, automatización de la distribución del agua, entrega de agua a la demanda, entre otros.

En un estudio realizado por H. Peña (2016) sobre la infraestructura hídrica futura necesaria, indica que es posible, desde la Región de O'Higgins a la Araucanía una regulación del orden de los 1.700 Hm³/año, que representaría sólo un pequeño porcentaje de la esorrentía que sería del orden del 6%.

La situación que avala la construcción de embalses de regulación en nuestro país dice relación con la desigual demanda de riego en el tiempo respecto a los meses de mayor abundancia de precipitaciones. Lo anterior queda demostrado en la [Figura III.1](#) donde se presentan las demandas hídricas agrícolas en los diferentes meses del año en las cuencas desde Aconcagua a Rapel. La demanda integra toda la superficie cultivada, diferenciando rubros con distinta tecnología de riego.

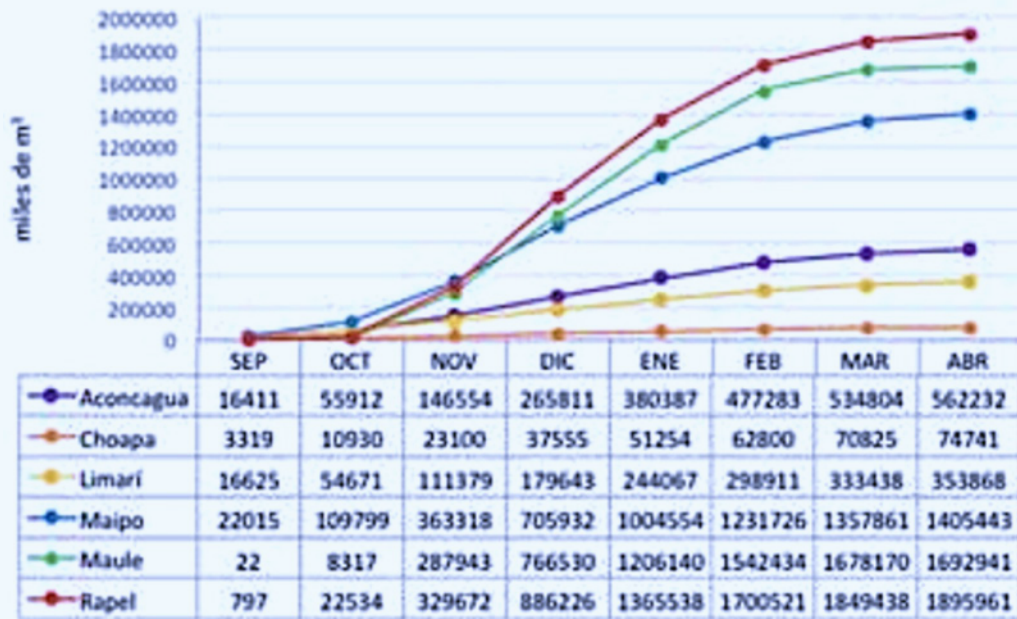


Figura III.1. Demanda integrada de riego en algunas cuencas de Chile. Fuente. Odepa 2017.

Desde la Región de Ñuble al sur, queda de manifiesto, de acuerdo con la disponibilidad de recursos hídricos superficiales y subterráneos, que se puede soportar aumentos significativos de la superficie bajo riego. Situación que está quedando en evidencia por lo señalado precedentemente sobre el desplazamiento de la superficie de riego desde las zonas norte y central hacia esta Macrozona.

b) Determinación de la demanda de agua para la agricultura en el año 2050. Una nueva aproximación para estimar las Demandas de Agua Agrícola a futuro y considerando el efecto del cambio climático, es considerar dos escenarios posibles:

- **Escenario 1.** Proyección de la demanda considerando que se mantiene la situación actual de manejo y eficiencia de riego, superficie cultivada y sólo es afectada por el efecto del cambio climático en la evapotranspiración de los cultivos. En este escenario se considera que la eficiencia de riego actual a nivel nacional es del orden del 65%

- **Escenario 2.** Proyección de la demanda a futuro considerando que el escenario 1 se ve afectado por un aumento en la eficiencia del riego, lo cual se produce naturalmente por la necesidad de los agricultores de enfrentar por un lado la disminución de la oferta de agua y por otro, el aumento de las demandas de riego por efecto del aumento de la evapotranspiración. Este aumento de la eficiencia de riego se explica porque el uso de los sistemas de riego más tecnificados se hace más masivo y también por el incremento en la determinación más precisa de los parámetros que afectan la disponibilidad de agua en el suelo para los cultivos, que afectan el manejo de los sistemas de riego tecnificado. En este escenario se considerará un aumento en la eficiencia de riego para alcanzar un valor del orden del 76% (DGA, 2017).

De conformidad a los datos de superficie cultivada bajo riego que no han variado en los últimos años, es posible considerar que la demanda calculada por la DGA para el año 2015 (DGA 2017), que considera una superficie agrícola regada de 906.234 ha, semejante a la del Censo 2022 de 900.306 ha regada, puede representar bastante bien la real demanda actual de nuestra agricultura, **es decir, del orden de los 7.886 Hm³/año o 254 m³/s (Tabla III.6).**

Tabla III.6. Demanda agrícola actual y proyectada para el año 2050 considerando efecto del cambio climático en la evapotranspiración

Región	Demanda agrícola actual 2015 Hm ³ /año	Demanda agrícola proyectada 2050 Hm ³ /año
Arica y Parinacota	73,00	80,30
Tarapacá	17,09	18,80
Antofagasta	46,23	50,85
Atacama	140,22	154,24
Coquimbo	462,09	472,09
Valparaíso	672,34	746,30
Metropolitana	1.269,82	1.409,50
O'Higgins	1.723,42	1.913,00
Maule	2.822,60	3.133,09
Biobío y Ñuble	475,98	528,34
Araucanía	172,48	193,18
Los Ríos	5,46	6,12
Los Lagos	2,61	2,92
Aysén	0,73	0,82
Total	7.886,17	8.709,55

Escenario 1. Estimación de la evapotranspiración al año 2050 (SSP5-RCP8.5)

Los resultados de algunas investigaciones internacionales, respecto del impacto del cambio climático en la Evapotranspiración (ET) se señalan a continuación:

- En China se indica un aumento de la ETo (Evapotranspiración potencial) en 16% para el 2050 (SRES A1B y B1), (Zhang, D. *et al.* 2013, 2020)
- En México, aumento de 20% de la ET en horizonte 2040-2060 (Monterroso AI. y Gómez J.D. 2021)
- En Eslovaquia, aumento de ETo de 20% escenario SRES A2 (RCP8.5) al 2059 (Minoslava J. *et al.* 2015)
- En Turquía, aumento de ETo en 15%, escenario RCP 8.5 al 2050 (Azlak M., Saylan L. 2024)
- En USA, aumento de ETo de 14,7% al 2050 y con un aumento de CO₂ de 6,8% (Islam A. *et al.* 2012)

En Chile, un estudio del Centro de Cambio Global de la Universidad Católica (2022), señala un aumento de la ET₀ para el Norte Grande y Norte Chico del orden del 10%, para Chile central un incremento del 12% y para la Zona Sur un aumento del 13% (Figura III.2).

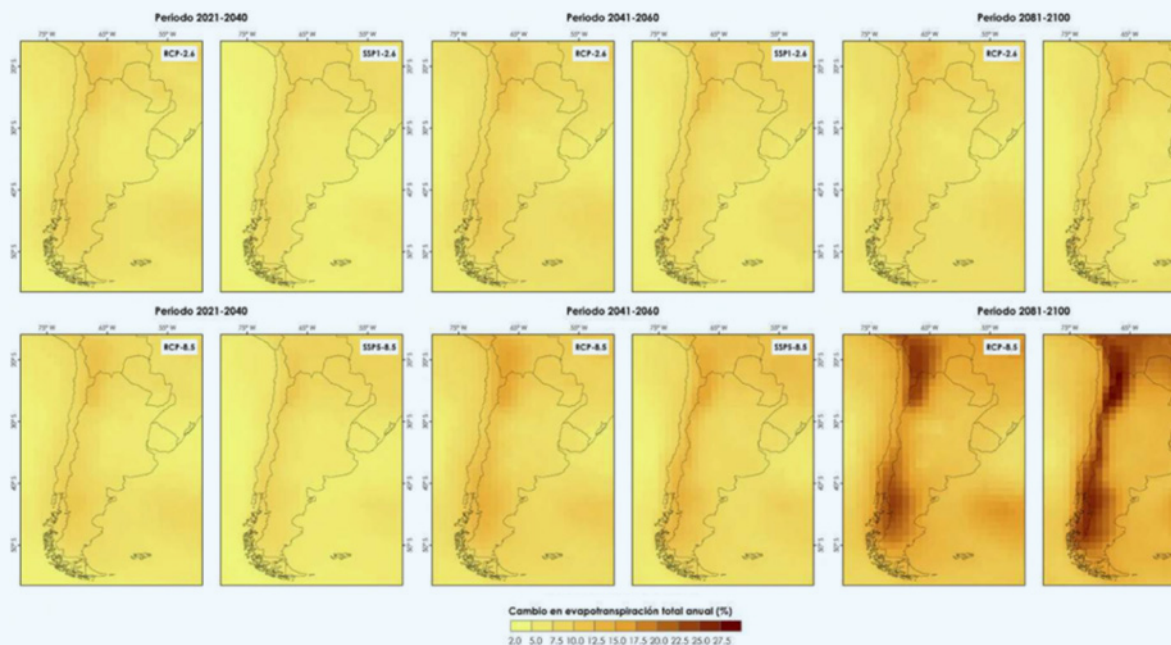


Figura III.2. Cambios porcentuales en evapotranspiración potencial para el promedio de las proyecciones de modelos utilizados en CMIP5 y CMIP6 que consideran forzamiento radiativo de 2,6 y 8,5 W/m², en los tres períodos reportados por AR6. Fuente Centro UC Cambio Global 2022.

Consideraciones para el caso chileno:

- La evapotranspiración en Chile por efecto del cambio climático aumentará en mayor medida en el sur del país, seguida por la zona Central y tendrá menores incrementos en el norte. (Odepa, 2016).
- Los incrementos de la evapotranspiración (ET) para Chile, se consideran entre un 5% a un 8% por cada grado de aumento de T°.
- El IPCC AR6 2021, escenario SSP5 8.5 indica aumento de T° de 1,9 °C a 3 °C. Se considerará para Chile un aumento de 1,5 °C para la Zona Centro Sur y de 2 °C para la Zona Norte. Todos los modelos de circulación general considerados proyectan aumentos de temperatura para todo Chile Continental, que oscilan entre los 0,5 °C y 3 °C. (DGA 2022). Por su parte un estudio que analiza los eventos extremos de temperatura sobre la base de los resultados de la DGA 2022 indica que existe un consenso general en el aumento de temperatura en la condición futura. Durante este periodo futuro se proyecta que las temperaturas aumenten en alrededor de 1,3 °C y 1,9 °C para las olas de calor y 1,3 °C y 1,5 °C para las olas de frío. Es importante destacar que las temperaturas analizadas en ambos casos son las máximas diarias. (Silva *et al.* 2025)
- Considerando el incremento de T°, de 2 °C para la Zona Norte y 5% de aumento de la ET por cada °C, nos daría un aumento de la ET de 10% para la Zona Norte.
- Estimando un aumento de 1,5 °C para la Zona Central y un aumento de la Evapotranspiración del orden del 7% por cada °C, nos daría un incremento de 11% en la Evapotranspiración.
- En la Zona Sur aumento de un 8% por cada °C y aumento de °T de 1, 5 °C implica un incremento en la ET de 12%.

Estos valores son concordantes por lo indicado por la UC, Cambio Global, 2022 y DGA 2022 (Tabla III.6). Aplicados estos porcentajes de aumento de la ET a la demanda actual nos da los resultados del efecto del cambio climático en la demanda agrícola al año 2050.

Escenario 2. Demanda agrícola futura considerando el efecto del cambio climático en la evapotranspiración y en un aumento de la eficiencia de riego.

De acuerdo con lo indicado por la DGA (2017), se prevé un incremento en la utilización, por parte de los agricultores, de sistemas de riego tecnificados como una respuesta a la escasez de agua. Se estima que para el año 2040-2050, el aumento de estos sistemas implicará que el promedio de la eficiencia de riego aumentará desde el 65% al 76%.

Aplicando este aumento de la eficiencia de riego al Escenario 1, nos da la estimación de la Demanda Agrícola para el Escenario 2, es decir el impacto en la demanda por efecto de un aumento en la ET sumado a un incremento en dicha eficiencia.

Los resultados se presentan en la [Tabla III.7](#).

Tabla III.7. Demanda agrícola actual y futura en Escenario 2. Efecto de la evapotranspiración y la eficiencia de riego

Región	Demanda agrícola actual Hm ³ /año	Demanda agrícola futura año 2050 Hm ³ /año
Arica y Parinacota	73,00	75,28
Tarapacá	17,09	17,63
Antofagasta	46,23	47,67
Atacama	140,22	144,60
Coquimbo	462,09	442,58
Valparaíso	672,34	699,66
Metropolitana	1.269,82	1.321,41
O'Higgins	1.723,42	1.793,44
Maule	2.822,60	2.937,27
Biobío y Ñuble	475,98	495,32
Araucanía	172,48	181,11
Los Ríos	5,46	5,74
Los lagos	2,61	2,74
Aysén	0,73	0,77
Total	7.886,17	8.165,22

En conclusión, de la [Tabla III.7](#) se deduce que el cambio climático tiene un fuerte impacto en la demanda de agua agrícola producto del efecto que causa en el aumento de la Evapotranspiración. De acuerdo con esta estimación habría un 10,4% de aumento de la demanda.

Por otro lado, al enfrentar este aumento de la demanda con el incremento de la eficiencia de la aplicación del agua de riego, se produce una disminución, pero insuficiente para compensar el desbalance oferta-demanda de recursos hídricos.

ANEXO IV

Antecedentes sobre usos mineros e industriales

TAXONOMÍA DE ACTIVIDADES ECONÓMICAS: UNA POLÍTICA DE ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO

La preparación de una Taxonomía es una forma de abordar las consecuencias del cambio climático sobre los procesos productivos y orientar los recursos hacia áreas prioritarias. Entre los países y jurisdicciones que han abordado el desarrollo de taxonomías de actividades económicas sostenibles se encuentra la Unión Europea, México, Colombia, Panamá, China y la Asociación de Naciones de Asia Sud Oriental.

Las taxonomías buscan alinear las inversiones hacia actividades medioambientalmente sostenibles, buscando determinar de manera objetiva y creíble qué actividades, proyectos e inversiones se considera que satisfacen criterios de sostenibilidad ambiental.

Chile ha desarrollado la primera versión de taxonomía la que se puede consultar en el documento: Anteproyecto de Sistema de Clasificación o Taxonomía de Actividades Económicas Medioambientalmente Sostenibles (T-MAS), Ministerio de Hacienda, diciembre 2024^[1].

En la materia específica relacionada con los recursos hídricos la taxonomía considera, para la evaluación de vulnerabilidades y riesgos climáticos, aspectos tales como las precipitaciones de lluvia, nieve y la frecuencia de sequías.

Enfoque para la adaptación

Para evaluar una actividad en el contexto de una taxonomía se emplean criterios que permiten definir el grado de adaptación de la actividad al cambio climático. A su vez, estos criterios orientan a la actividad sobre qué es lo que se espera en términos de adaptación.

Los criterios para la adaptación reconocen que para una actividad las situaciones son específicas para el contexto y ubicación en que se desarrolla y que, para determinar si

contribuye a la adaptación y a la resiliencia del sistema climático, se requiere de un enfoque basado en un proceso de evaluación.

Para demostrar que una actividad contribuye a una reducción sustancial de los efectos negativos del cambio climático se ha propuesto un proceso de dos pasos:

- Evaluar los efectos negativos esperados del cambio climático en la actividad económica basándose en pruebas sólidas y aprovechando la información climática adecuada.
- Demostrar cómo la actividad económica abordará los efectos negativos identificados del cambio climático o evitará un aumento o desplazamiento de estos efectos negativos.

La valoración de la contribución de una actividad variará en función de su alcance (activo, corporativo, sector o mercado), así como de la escala espacial y temporal. Además, el enfoque propuesto reconoce que una actividad de adaptación puede dirigirse a una entidad (por ejemplo, una empresa o una ciudad) y/o a un mercado, sector o región.

La adaptación a nivel de actividad tiene como objetivo fortalecer un activo o actividad económica para resistir los riesgos climáticos identificados a lo largo de su vida útil, como por ejemplo: considerar el aumento del nivel del mar en el diseño de un puerto.

Por otra parte, la adaptación a nivel de sistemas tiene como objetivo reducir la vulnerabilidad y aumentar la resiliencia de un sistema o sistemas más amplios, como una comunidad, un ecosistema o una ciudad.

La naturaleza específica del contexto de la adaptación implica que no es posible producir una lista independiente y exhaustiva de actividades que podrían considerarse como contribuyentes a la adaptación en todas las circunstancias. En lugar de una lista de actividades de adaptación, en el desarrollo de las taxonomías se ha utilizado un conjunto de principios rectores y criterios de selección para evaluar la contribución potencial de una actividad económica a la adaptación al cambio climático y al aumento de la resiliencia climática. Para ayudar a las actividades se han desarrollado marcos indicativos para la clasificación de los peligros relacionados con el clima, lo que permite que las actividades los consideren en sus análisis para incorporar la mitigación y la adaptación al cambio climático.

Conclusión

Las taxonomías son instrumentos económicos que evolucionan, recogiendo las experiencias y recomendaciones que surgen con su aplicación. Por lo tanto, es esperable que la Taxonomía de Chile (T-MAS) irá recogiendo en los próximos años las singularidades de las actividades económicas del país, particularmente en aspectos relacionados con la adaptación y los recursos hídricos.

Destaca en el enfoque desarrollado en el marco del anteproyecto T-MAS, que provee la flexibilidad necesaria para abordar el cambio climático y el efecto sobre las actividades económicas según las condiciones particulares de localización, tamaño y ámbito de influencia.

Propuestas

De acuerdo con las recomendaciones de la Unión Europea en su taxonomía, para una mejor aplicación sería conveniente desarrollar estudios y guías de orientación, incluyendo temas como:

- Establecer la forma de emplear la información climática.
- Definir cuáles son los contenidos mínimos de un análisis de riesgo y vulnerabilidad climática.
- Definir qué elementos hay que considerar para tomar decisiones que afectan a la actividad en condiciones de incertidumbre respecto a la evolución esperada del cambio climático a nivel local.
- Establecer cómo desarrollar un plan de adaptación para una actividad.
- Desarrollar indicadores para verificar los resultados de las medidas y planes de adaptación aplicados.

ANEXO V

Antecedentes técnicos y normativos sobre inundaciones

V.1. DEFINICIONES RELEVANTES

En lo relacionado a los riesgos de origen hidrometeorológico, y teniendo en cuenta los fenómenos asociados con el exceso de precipitaciones y flujos de agua, se consideran las siguientes definiciones de algunos de los términos más relevantes de este capítulo (Highland, L. M., & Bobrowsky, P., 2008; UNDRR, 2020; IPCC, 2022):

- **Amenaza.** Fenómeno o condición peligrosa que puede causar la pérdida de vidas, lesiones u otros impactos en la salud, así como daños y pérdidas a la propiedad, infraestructura, medios de vida, prestación de servicios y recursos ambientales. Desde el punto de vista hidrometeorológico, en una amenaza, el fenómeno está relacionado con el clima o el agua, con el potencial de causar impactos negativos sobre los sistemas socioambientales.
- **Vulnerabilidad.** Condiciones determinadas por factores físicos, sociales, económicos y ambientales que aumentan la susceptibilidad de un sistema socioambiental al impacto de amenazas. En el contexto hidroclimático, se refiere al grado en que este sistema es susceptible a los impactos adversos una amenaza hidroclimática como resultado principalmente de factores físicos (e.gr., infraestructura inadecuada, suelos poco permeables o degradados) y socioeconómicos (e.gr., pobreza, mala cultura del riesgo).
- **Exposición.** Presencia de personas, medios de sustento, especies o ecosistemas, funciones, servicios, infraestructura y recursos económicos, sociales o culturales en lugares que podrían verse afectados negativamente por una amenaza, particularmente de carácter hidrometeorológico en nuestro caso.
- **Riesgo.** Impactos adversos en sistemas socioambientales producto de la interacción entre amenazas, exposición y vulnerabilidad. Así, el riesgo hidrometeorológico no se debe solo a la amenaza (lluvia intensa), sino a la combinación de esta con la exposición

(e.gr., zonas urbanizadas en áreas inundables) y vulnerabilidad (infraestructura deficiente, planificación inadecuada). El riesgo se cuantifica según las consecuencias adversas en función de estas tres dimensiones. En condiciones cambiantes (e.gr., cambio climático, aumento de la población, crecimiento urbano, cambios de uso de suelo, cambios en las condiciones socioeconómicas de la comunidad), el riesgo puede variar.

- **Aluvión.** Flujo rápido de una mezcla de agua, sedimentos y material sólido generalmente desencadenado por precipitaciones intensas o deshielos rápidos. Es un evento altamente destructivo por su gran energía y volumen sólido transportado.
- **Crecida.** Aumento temporal, y típicamente rápido, del caudal en un cauce, producido por precipitaciones intensas, fusión de nieve o liberación violenta de agua almacenada, que puede provocar el desbordamiento del cauce natural.
- **Inundación.** Acumulación o flujo excesivo de agua en áreas normalmente secas, causado por crecidas de ríos u otros procesos hidrometeorológicos o geofísicos.

V.2. Tipos de inundaciones propuestas por Rojas *et al.* (2014)

a) **Inundaciones fluviales detonadas por precipitación.** La precipitación es el mecanismo que comúnmente desencadena crecidas fluviales en Chile, siendo el factor detonante del 68% de los eventos ocurridos durante el siglo XX (Rojas *et al.*, 2014). Las inundaciones por precipitaciones se han registrado en todo el país, y su magnitud se relaciona directamente con el tamaño de la cuenca y la cantidad de lluvia (Peña y Klohn, 1990). Los eventos de precipitación intensa pueden ser producidos por sistemas frontales, usualmente intensificados por la Oscilación del Sur de El Niño (ENSO) tanto en condiciones cálidas como frías, o por tormentas convectivas, según la región climática y la época del año. Un tipo particular de inundación relacionada con la precipitación ocurre en cuencas montañosas de Chile central, cuando las lluvias coinciden con temperaturas cálidas (Vicuña *et al.*, 2013; Castro *et al.*, 2019). En estos casos, la isoterma 0 °C es elevada, aumentando el área y el volumen de contribución pluvial de la cuenca, lo que lleva a inundaciones significativas (Carrasco *et al.*, 2005; Garreaud, 2013; Rojas *et al.*, 2014). Para el caso particular de la cuenca del Río Maipo, Garreaud (2013) define los eventos de precipitación como cálidos si la temperatura media del aire durante la lluvia supera los 10.5 °C, en el pluviómetro de Quinta Normal (33,4°S, 70,7°W, 535 m.s.n.m.). Un ejemplo dramático de una inundación por precipitación asociada a un aluvión ocurrió en Santiago el 3 de mayo de 1993, donde una lluvia moderada con condiciones extremadamente cálidas desencadenó flujos de detritos y deslizamientos de tierra masivos a lo largo de las estribaciones andinas. Otros eventos significativos originados por precipitaciones extremas son los reportados en las regiones semiáridas del país, como los identificados por Soto *et al.* (2017), o los eventos de 2023 en Chile centro-sur (DOH, 2025).

b) Inundaciones detonadas por procesos nivo-glaciares y vaciamiento repentino de lagos glaciares (GLOF).

Las inundaciones más relevantes relacionadas con procesos nivo-glaciares son generadas por el repentino vaciamiento de lagos glaciares (GLOF, por sus siglas en inglés) o de lagos represados por hielo (IDLOF, por sus siglas en inglés). En estos casos se libera repentinamente un volumen de agua retenido por un glaciar o una morrena terminal (Iribarren Anacona *et al.*, 2015; Peña y Klohn, 1990; Wilson *et al.*, 2018). Estos eventos se concentran en las cercanías de los Campos de Hielo en el sur de Chile, pero se dan en otras regiones (Rojas *et al.*, 2014). Uno de los eventos GLOF/IDLOF más violentos en Chile ocurrió en el río Manflas en 1985, donde un lago subglacial, formado bajo el glaciar Río Seco de los Tronquitos (cuenca del río Copiapó), se vació por una de sus paredes (Iribarren Anacona *et al.*, 2018; Peña y Escobar, 1987). La violenta inundación tuvo un caudal pico estimado de 11,000 m³/s al pie del glaciar y un tiempo de base del hidrograma de solo 15 minutos (Peña y Escobar, 1987). Otro caso de este tipo de inundación ocurrió en el valle del río Colonia en la Patagonia entre 2008 y 2009, con una secuencia inesperada de 5 eventos GLOF que drenaron el lago Cachet 2 e inundaron parte de los valles de los ríos Colonia y Baker (Dussaillant *et al.*, 2010; Jacquet *et al.*, 2017). Estas inundaciones tienen un impacto significativo en las planicies aluviales de los ríos, particularmente en la cobertura vegetal (Bastianon *et al.*, 2012), y podrían ocurrir con más frecuencia en el futuro debido a los impactos del cambio climático en la dinámica glaciar (Dussaillant *et al.*, 2010). Este historial, y otros eventos levantados por el Instituto de Ingenieros (2020), evidencian el riesgo que representan los GLOF e IDLOF para la población y los bienes. Entre 1970 y 2020 se han documentado al menos 16 eventos de este tipo, no detonados por actividad volcánica, entre el norte chico y Patagonia (Instituto de Ingenieros, 2020) afectando incluso zonas distantes del origen del evento. Su carácter sorpresivo y la escasa consideración en decisiones de planificación territorial convierten estos fenómenos en amenazas con un potencial de alto riesgo.

c) Inundaciones detonadas por acciones humanas / gestión del territorio / infraestructura.

Las inundaciones relacionadas con la intervención humana se producen por la ruptura, mala gestión o el colapso repentino de infraestructuras hidráulicas y fluviales (Rojas *et al.*, 2014). Estos eventos se han experimentado típicamente en las regiones donde se concentra la mayor parte de la infraestructura hidráulica (e.gr., Maule y Biobío). El desbordamiento recurrente del embalse Tutuven en la región del Maule es un ejemplo de estas inundaciones (Urrutia de Hazbún y Lanza, 1993). Otro ejemplo es el fallo de los depósitos de relaves mineros, como los que ocurrieron después del terremoto de La Ligua el 28 de marzo de 1965 (Malgrange *et al.*, 1981), donde murieron 200 personas (Harper *et al.*, 1992). Un ejemplo más reciente de inundaciones causadas por intervención antropogénica es la del río Mapocho el 16 de abril de 2017, cuando una modificación del cauce debido a la construcción de una autopista urbana produjo una gran inundación que afectó el distrito

financiero de Santiago (Yáñez-Morrón *et al.*, 2018). Sin embargo, también se produjeron inundaciones fluviales en muchas otras ubicaciones en el centro de Chile durante este evento.

d) Fenómenos pluviales urbanos. Además de las inundaciones fluviales, varias áreas urbanas chilenas son propensas a otro tipo de situación conocida como inundaciones pluviales o urbanas. En este caso no hay un desbordamiento de ríos, sino un anegamiento dentro de la ciudad, particularmente en áreas bajas y altamente impermeables (CIGIDEN 2016; Falconer *et al.* 2009; Houston *et al.* 2011), producto de factores como la falta de infraestructura de aguas lluvias, el cambio en el uso de suelos naturales por áreas impermeables, y la inadecuada planificación y gestión urbana (Blanc *et al.* 2012; Butler y Davies 2004; MOP 2013; Estellé *et al.* 2012). Las inundaciones urbanas son el tipo de inundación más frecuente en las ciudades chilenas, con varias ocurrencias en los siglos XX y XXI.

V.3. Marco normativo relacionado con la gestión de amenazas hidrometeorológicas

a) Marco normativo de los instrumentos de planificación territorial en Chile para la gestión del riesgo. El marco normativo de los instrumentos de planificación territorial en Chile ha evolucionado durante décadas, reflejando el desarrollo de políticas urbanas y la complejidad creciente de los desafíos territoriales. Su base principal es la Ley General de Urbanismo y Construcciones (LGUC) y su respectiva Ordenanza (OGUC), complementadas por leyes, decretos y circulares. La LGUC, promulgada en 1975 y modificada en diversas ocasiones, establece principios y normas para los actores involucrados en la planificación urbana, definiendo también la jerarquía de los instrumentos desde el nivel nacional al local.

En la cúspide se encuentra la Política Nacional de Desarrollo Urbano, política que tiene un carácter orientador pero que no es vinculante. Le siguen los Planes Regionales de Ordenamiento Territorial (PROT), incorporados mediante la Ley 21.074 de 2018, con un enfoque regional más integral pero aún con dificultades en su implementación. En el ámbito intercomunal, los Planes Reguladores Metropolitanos (PRM) y los Intercomunales (PRI), elaborados por las SEREMI de Vivienda, coordinan el desarrollo de múltiples comunas, definiendo límites urbanos, red vial y normas para infraestructura. A nivel comunal, los Planes Reguladores Comunales (PRC), elaborados por los municipios, regulan el uso de suelo y la vialidad local. Por otra parte, la OGUC especifica contenidos y estudios obligatorios, como los de riesgos y factibilidad de servicios básicos. De hecho, la incorporación de la gestión de riesgos ha ganado importancia. El artículo 2.1.17 de la OGUC, modificado a partir del terremoto y Tsunami de 2010, exige estudios de riesgos en los procesos de planificación, buscando limitar construcciones en zonas peligrosas. Estos estudios deben identificar y

clasificar áreas con riesgos naturales o inducidos por actividades humanas. Finalmente, otro avance reciente es el fortalecimiento de la participación ciudadana, especialmente a través de la Ley N° 21.078 de 2018, que obliga a realizar consultas públicas en etapas tempranas de elaboración o modificación de planes. Aunque valiosa, su implementación aún enfrenta desafíos institucionales y culturales. Si bien la modificación del artículo 2.1.17 de la OGUC representa un avance, su implementación enfrenta desafíos, como la falta de metodologías estandarizadas, la escasez de información, y las capacidades técnicas limitadas que puede haber en muchos municipios. Además, el cambio climático podría significar la exigencia de una constante actualización de los instrumentos, lo cual es difícil de garantizar dado los recursos involucrados. A nivel local, la integración en los PRC es dispar: algunas comunas han logrado avances significativos, pero otras enfrentan limitaciones por falta de recursos o información actualizada.

b) Marco normativo para la prevención y respuesta ante desastres. Recientemente, se ha promulgado la Ley N° 21.364 *Sistema Nacional de Prevención y Respuesta ante Desastres (SINAPRED)*. Esta ley tiene como objetivo principal fortalecer las capacidades del país para prevenir y responder eficazmente a situaciones de emergencia y desastres, garantizando una gestión más eficiente y coordinada en estas circunstancias críticas. Esta ley define al Servicio Nacional de Prevención y Respuesta ante Desastres, SENAPRED, como organismo técnico en cuanto a Gestión de Riesgo de Desastres (GRD) en los planes sectoriales. Si bien formulada previamente por parte de la Oficina Nacional de Emergencia del Ministerio del Interior (ONEMI), la Política Nacional para la Reducción del Riesgo de Desastres (PNRRD) es el instrumento que orienta las acciones y decisiones políticas de SENAPRED, y está compuesta por un conjunto de principios, enfoques transversales, ejes prioritarios y objetivos estratégicos, implementados a través de su respectivo Plan Estratégico Nacional para la Reducción del Riesgo de Desastres (PENRRD, 2020-2030), que recoge brechas detectadas de procesos anteriores y considera las particularidades territoriales y diversidades de las comunidades, por medio de la ejecución de acciones prioritarias emanadas de las directrices instaladas en dicha política. A este plan nacional se agregan los Planes para la Reducción del Riesgo de Desastres, en los niveles regionales y comunales durante las Fases de Mitigación y Preparación, y los Planes de Emergencia y sus Anexos, durante la Fase de Respuesta, a nivel Comunal, Provincial, Regional y Nacional. Todos estos planes forman parte de los Planes para la Gestión del Riesgo de Desastres, instrumentos que abarcan la planificación para la Reducción del Riesgo de Desastres y la respuesta de la emergencia que permiten materializar lo establecido en la política nacional (Ley N° 21.364, Art. 25).

En su artículo 34, la Ley N° 21.364 define los Planes Sectoriales para la Gestión del Riesgo de Desastres, a ser elaborados por los órganos de la administración del Estado identificados en la Política Nacional para la Reducción del Riesgo de Desastre. Estos planes,

que son vinculantes y deben revisarse y actualizarse en un plazo máximo de cinco años, definen metas, objetivos y acciones concretas en coherencia con la Política Nacional. En lo referido a los riesgos hidrometeorológicos, el reglamento de esta ley (Decreto 86 *Reglamento que regula los organismos técnicos para el monitoreo de amenazas; organismos técnicos para el monitoreo sectorial; los instrumentos para la gestión del riesgo de desastres*) divide la asignación del monitoreo de amenazas hidrológicas, y la generación de los correspondientes mapas de amenazas, entre la Dirección General de Aguas (DGA) y la Dirección de Obras Hidráulicas. En particular, se establece que la DGA será el organismo técnico para el monitoreo de la amenaza de inundación por crecida de ríos, lagos, embalses u otros recursos hídricos, y otras propias de su competencia. Por otra parte, se establece que la DOH será el organismo técnico para el monitoreo de la amenaza de inundación o anegamiento relacionada con la alteración de la red primaria del sistema de evacuación y drenaje de aguas lluvia.

c) Marco normativo para la gestión de las aguas lluvias. La Ley N° 19.525 *Regula sistemas de evacuación y drenaje de aguas lluvias*, del año 1997, establece que el Estado debe velar por la existencia de sistemas de evacuación y drenaje de aguas lluvias en ciudades y centros poblados para proteger a personas, viviendas e infraestructura. En particular, el MOP es responsable de la red primaria (planificación, construcción y mantenimiento) y el Ministerio de Vivienda y Urbanismo (MINVU), a través de los SERVIU, de la red secundaria. Adicionalmente, la ley encomienda al MOP la elaboración de Planes Maestros de Aguas Lluvias que definirán las redes primarias y harán un diagnóstico del drenaje junto con proponer y priorizar las soluciones a implementar. Desgraciadamente estos planes no son vinculantes, y actualmente se encuentran desarrollados para localidades en las que vive aproximadamente un 75% de la población nacional, aunque solo la mitad de ellos tiene un decreto oficial, y un 63% tiene 20 o más años de antigüedad. A esto se agrega que muchas de las obras consideradas en los planes aún no se han desarrollado.

d) Marco normativo para la adaptación y mitigación del cambio climático en relación con infraestructura. La Ley Marco de Cambio Climático (Ley N° 21.455, 2022) establece un marco jurídico para la mitigación y adaptación al cambio climático y el cumplimiento de compromisos internacionales. La Ley identifica Planes de Acción Regional y de Acción Comunal de Cambio Climático, a ser elaborados en todas las regiones y comunas del país. Se agregan a estos los Planes Sectoriales de Adaptación, los que deben definir acciones y medidas para adaptar los sectores más vulnerables y aumentar su resiliencia climática. En relación con la adaptación frente a inundaciones, los sectores identificados por la ley son principalmente los de Recursos Hídricos e Infraestructura (ambos planes elaborados por el MOP), y Ciudades (elaborado por el MINVU). Estos planes deben incluir una caracterización del sector y de sus vulnerabilidades específicas, de modo que se dimensione su exposición

y fragilidad frente a fenómenos climáticos, y que se incluya una evaluación de los efectos adversos, considerando riesgos actuales y futuros, así como un plan detallado con medidas de adaptación, plazos de implementación, responsables, y criterios de costo-efectividad. Los planes deben tener un enfoque territorial y deben contemplar acciones relativas a los medios de implementación, integrando recursos, capacidades y coordinación institucional, así como una articulación con planes de gestión del riesgo de desastres.

El Plan de Adaptación y Mitigación al Cambio Climático -sector Infraestructura (MOP, 2025)- es el plan sectorial vigente que más se preocupa de la temática de crecidas e inundaciones. Su objetivo es propiciar el desarrollo de obras públicas resilientes que permitan la adaptación de los territorios y sus comunidades a los impactos del cambio climático, y la reducción de emisiones acorde a los compromisos de Chile en torno a la carbono-neutralidad. Dentro de las 8 líneas estratégicas (LE) consideradas en el plan, destacan dos que son pertinentes a nuestro tema en cuestión: LE-1: *Desarrollo de infraestructura resiliente al cambio climático*, enfocada en la necesidad de diseñar, construir y mantener obras públicas incorporando proyecciones climáticas para resistir los impactos del cambio climático, e innovando con la implementación de estrategias basadas en la naturaleza para su materialización; y LE-2: *Gestión de riesgo climático en obras públicas para contribuir a aumentar la resiliencia de territorios*, enfocada en identificar, evaluar y propiciar acciones preventivas para enfrentar los riesgos de desastres asociados a eventos climáticos en obras públicas. Esto incluye la elaboración de protocolos preventivos, planes de emergencia y reconstrucción post desastre, así como el fortalecimiento de la infraestructura resiliente.

e) Otras normativas relevantes para obras de defensa y regularización de riberas. La Ley N° 11.402 (ley que *Dispone que las Obras de Defensa y Regularización de las Riberas y Cauces de los Ríos, Lagunas y Esteros que se Realicen con Participación Fiscal, Solamente Podrán Ser Ejecutadas y Proyectadas por la Dirección de Obras Sanitarias Del Ministerio de Obras Publicas*), en su Artículo 10, establece claramente que se “prohíbe construir casas para viviendas y con mayor razón formar poblaciones en suelos periódicamente inundables, aun cuando la inundación se presente en períodos de hasta 10 años”. Este artículo es repetido textualmente en el Artículo 97 del Decreto Fuerza de Ley DFL 850, el que refunde, coordina y sistematiza la antigua Ley N° 15.840 Orgánica del Ministerio de Obras Públicas y el DFL N° 206 del mismo Ministerio, sobre construcción y conservación de caminos. Es importante destacar que el texto acá señalado de cierta manera establece un periodo de retorno mínimo de 10 años a considerar en la definición de zonas de prohibición para la instalación de viviendas y urbanizaciones en la zona de inundación de ríos y cauces. Desgraciadamente, la experiencia muestra que estos artículos no se han aplicado sistemáticamente en la gestión de zonas de inundación, y que tampoco son de amplio conocimiento y uso por parte de otras entidades involucradas en ordenamiento territorial.

V.4. Estado del arte en el desarrollo de estudios hidrológicos para estudio de precipitaciones extremas y crecidas en un contexto de cambio climático

El estudio PNUD (2024) entrega recomendaciones metodológicas orientadas a especialistas, consultores, profesionales institucionales y tomadores de decisiones para la incorporación de la variable cambio climático en el diseño de obras hidráulicas. A su vez, ilustra los aspectos metodológicos propuestos en la macrozona Norte de Chile, la cual presenta especiales desafíos dadas las características del área. Lo presentado en este documento reciente refleja el estado de la práctica actual en proyectos orientados al análisis de eventos extremos y el diseño hidrológico para estas condiciones. El enfoque metodológico se conforma de 3 partes:

1. Caracterización meteorológica histórica y futura;
2. Caracterización geomorfológica; y
3. Estimación de caudales de diseño.

La primera componente implica el uso de escenarios futuros en base a modelos de clima global y distintas metodologías de selección de GCM, re-escalamiento y remoción de sesgo, y construcción de series de tiempo continuas (lo que puede implicar desagregación temporal) o eventos característicos meteorológicos en función los modelos hidrológicos a utilizar. Para cada uno de estos pasos existe una variedad de métodos de distinto grado de complejidad. Además, para los procesos de re-escalamiento y remoción de sesgo es fundamental información histórica fiable. En general, este primer paso es el más relevante en términos de diseño metodológico para evaluar riesgos y diseñar en contexto de cambio climático.

La caracterización geomorfológica es clave para una correcta interpretación del efecto hidrológico de un evento meteorológico; sin embargo, el resultado de esta sección no debiese sufrir cambios en función de escenarios de cambio climático. Este paso implica la delimitación y caracterización de cuencas en función de los métodos hidrológicos a usar.

Finalmente, respecto a los caudales de diseño, estos se pueden estimar a partir del análisis de frecuencia de una modelación continua (caso en que consideraciones relevantes como la fracción de precipitación líquida vs. sólida o la fracción de la precipitación líquida que escurre o se infiltra, quedan internamente descritos dada la arquitectura de simulación del modelo hidrológico), o a través de una simulación por eventos, donde se define un evento sintético de precipitación extrema (EPE), y se determina la precipitación efectiva y la ubicación de línea de nieves para obtener el caudal de diseño.

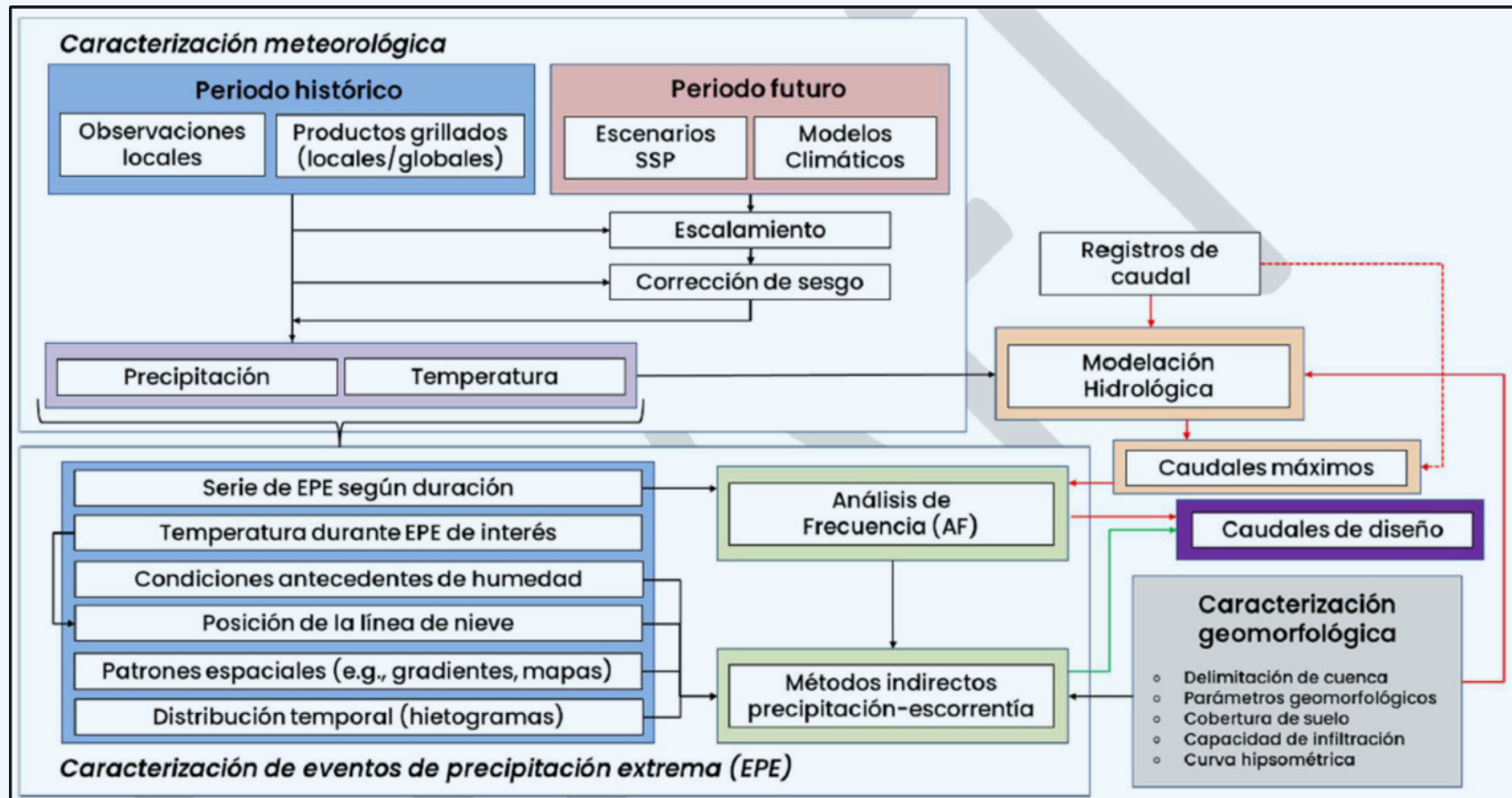


Figura V.1. Esquema general de las decisiones a considerar en el desarrollo de un estudio hidrológico orientado a la estimación de precipitaciones extremas y crecidas en un contexto de cambio climático. Fuente: PNUD, 2024.

Tabla V.1. Tasa de cambio decadal del número de días al año con precipitación que ocurren con elevación de la isoterma 0 °C mayor al percentil 90, y cuya magnitud supera los 15, 30 y 45 mm. Azul: tendencia al alza (5% de significancia); verde: tendencia a la baja; rojo: sin tendencia clara. Fuente: DOH (2025).

Estación	Nombre	Tasa aumento o disminución de ocurrencias por década		
		15 mm	30 mm	45 mm
Cuenca del Río Rapel				
06010015-2	Rancagua (Cachapoal - Dcp)	+0,43	+0,16	+0,08
06012003-K	Coltauco	+0,64	+0,44	+0,12
06013005-1	Popeta	+0,41	+0,17	+0,17
06015003-6	Rengo	+0,3	+0,04	+0,01
06016004-K	San Fernando	+0,61	+0,13	+0,11
06018010-5	Millahue	+0,08	+0,23	+0,09
06019005-4	Pichidegua	+0,53	+0,04	+0,04
06027003-1	La Rufina	+0,86	+0,38	+0,21
06034003-K	Convento Viejo	+0,54	+0,28	+0,15
06036001-4	La Candelaria	+0,56	+0,04	+0,06
06040001-6	Villa Alhué	+0,4	+0,16	+0,2
06042004-1	Barrera Loncha	+0,2	+0,2	+0,14
06044001-8	Cocalán	+0,42	+0,34	+0,02
06055003-4	Litueche	+0,68	+0,24	+0,09
06056003-K	Rapel	+0,62	+0,06	+0,03
Cuenca del Río Mataquito				
07103003-2	Los Queñes	+0,83	+0,6	+0,22
07104005-4	El Manzano	+0,85	+0,62	+0,26
07106007-1	Santa Susana	+0,7	+0,33	+0,2
07116005-K	Potrero Grande	+0,8	+0,24	+0,18
07118003-4	Curicó	+0,34	+0,19	+0,02
07119007-2	Lontué	+0,37	+0,08	+0,07

Estación	Nombre	Tasa aumento o disminución de ocurrencias por década		
		15 mm	30 mm	45 mm
Cuenca del Río Maule				
07320002-4	Armerillo	-0,32	-0,17	-0,3
07331002-4	Digua Embalse	-0,15	-0,19	-0,2
07332003-8	San Manuel en Perquilauquén	-0,08	-0,12	-0,25
07335004-2	Quella	-0,21	-0,12	-0,11
07337002-7	Tutuvén Embalse	-0,18	-0,13	-0,03
07341002-9	Nirivilo	-0,17	-0,25	-0,1
07345001-2	Parral	-0,13	-0,11	+0,01
07350006-0	Bullileo Embalse	+0,11	-0,15	-0,25
07352003-7	Liguay	-0,21	-0,25	-0,16
07355006-8	Hornillo	-0,17	-0,35	-0,37
07355007-6	Ancoa Embalse	-0,28	-0,22	-0,34
07357003-4	Melozal	-0,12	-0,17	-0,07
07358007-2	Linares	+0,09	-0,13	-0,11
07358008-0	Colbún (Maule Sur)	-0,23	-0,27	-0,16
07359005-1	San Javier	-0,12	-0,18	-0,11
07373003-1	El Guindo	+0,11	-0,28	-0,1
07374005-3	Huapi	+0,07	-0,23	-0,1
07378002-0	Talca U.C.	-0,17	-0,06	-0,02
07378003-9	Colorado	+0,2	-0,04	-0,19
07381003-5	Pencahue	-0,31	-0,18	-0,09
Cuenca del Río Itata				
08105004-K	Caracol	+1,17	+0,43	+0,13
08106003-7	San Fabian	+0,78	+0,62	-0,01
08113001-9	Coihueco Embalse	+0,56	+0,12	+0,04
08117002-9	Chillan Viejo	+0,31	-0,06	-0,18
08123004-8	Cholguán	+0,79	+0,28	+0,21

Estación	Nombre	Tasa aumento o disminución de ocurrencias por década		
		15 mm	30 mm	45 mm
08130003-8	Fundo Atacalco	+0,68	+0,16	+0,09
08130004-6	Las Trancas	+0,53	-0,45	-0,1
08130006-2	Diguillín	+0,83	+0,17	+0,03
08132002-0	Pemuco	+0,62	-0,17	-0,08
08133003-4	Chillancito	+0,4	+0,06	-0,12
08135003-5	Nueva Aldea	+0,37	-0,02	-0,03
08141002-K	Coelemu	+0,33	+0,02	-0,08
Cuenca del Río Biobío				
08317001-8	Río Biobío en Rucalhue	+0,15	-0,21	+0,01
08317003-4	Cerro El Padre	+1,56	+0,63	+0,19
08318002-1	Quilaco	+0,18	-0,33	-0,09
08319001-9	Río Biobío en Longitudinal	+0,11	-0,36	-0,1
08319002-7	San Carlos de Purén	+0,12	-0,31	-0,1
08323001-0	Río Duqueco en Cerrillos	+0,1	-0,4	-0,1
08332002-8	Mulchén	+0,18	-0,38	-0,07
08334001-0	Río Biobío en Coihue	+0,11	-0,4	-0,08
08334002-9	Los Ángeles	+0,13	-0,38	-0,08
08364001-4	Las Achiras	+0,11	-0,4	-0,08
08367001-0	Laja	+0,27	+0,01	+0,13
08394001-8	Río Biobío en desembocadura	+0,14	-0,32	-0,1

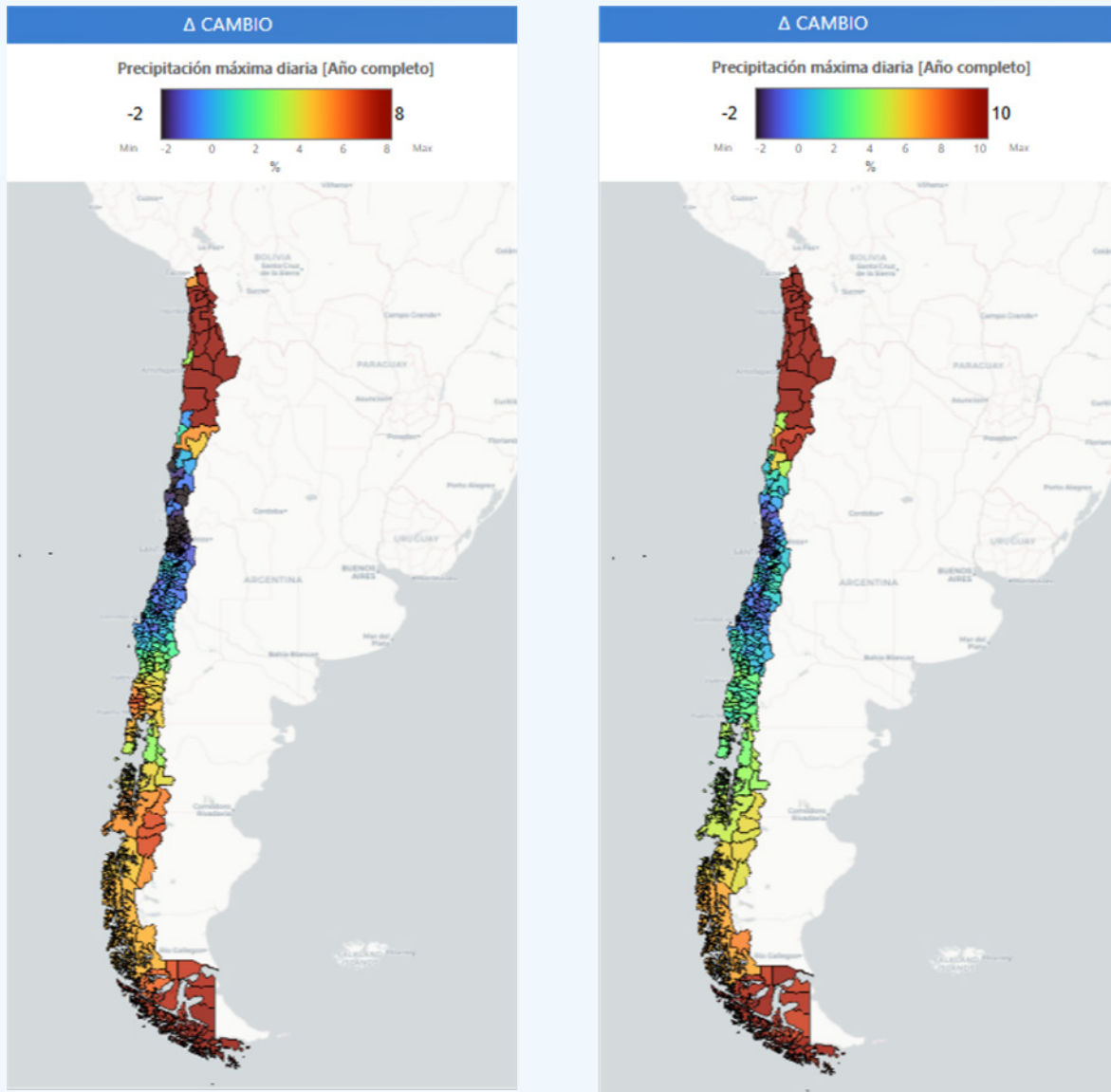


Figura V.2. Variaciones porcentuales proyectadas para la precipitación máxima diaria al periodo 2035-2065, bajo los escenarios SSP2-4.5 (izquierda) y SSP5-8.5 (derecha).

Fuente: ARCLIM (<https://arclim.mma.gob.cl/amenazas/>).

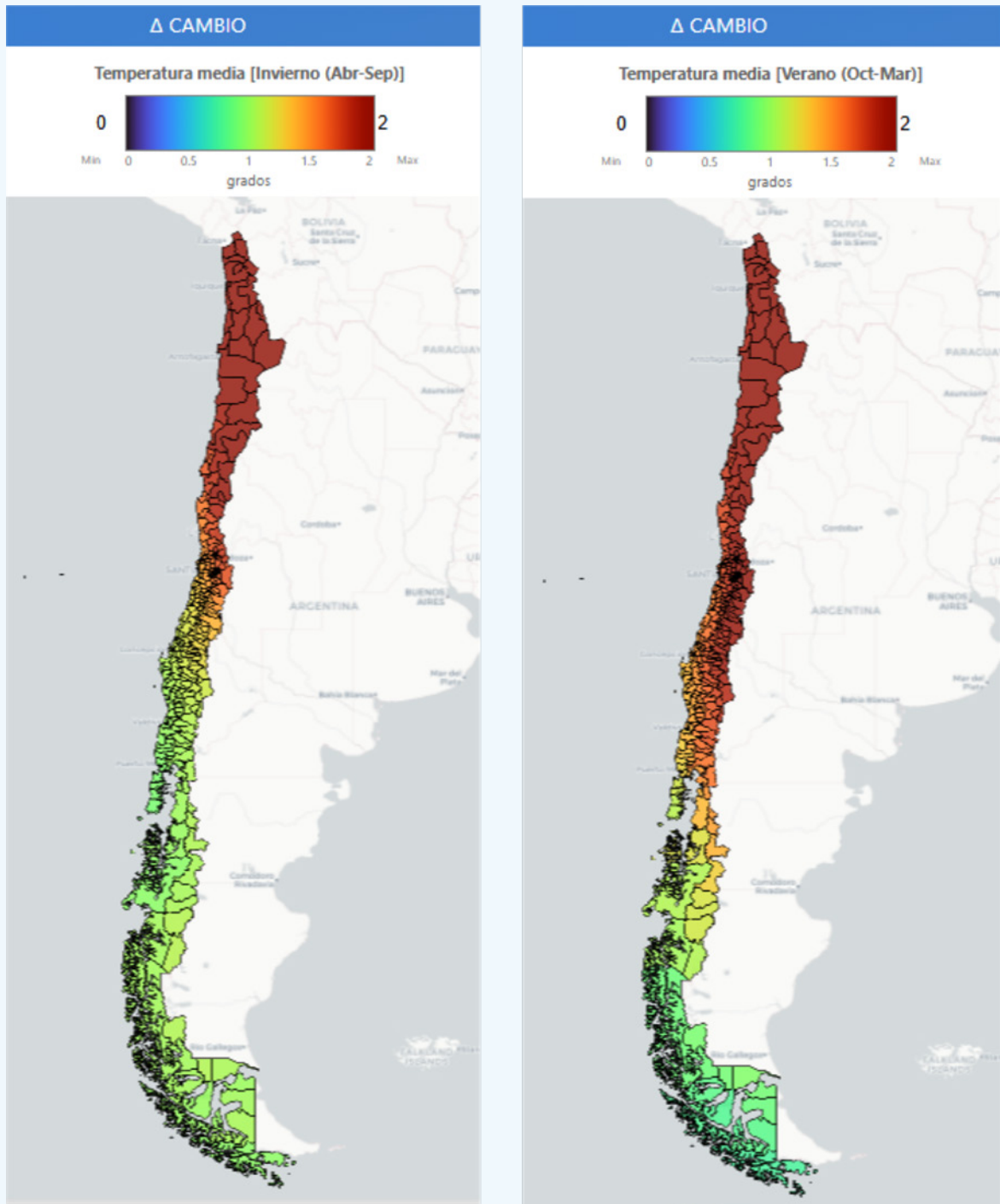


Figura V.3. Variaciones en grados proyectadas para la temperatura media al periodo 2035-2065, bajo el escenario SSP5-8.5 durante los meses de invierno (izquierda) y verano (derecha).

Fuente: ARCLIM (<https://arclim.mma.gob.cl/amenazas/>).

ANEXO VI

Regulación ambiental relativa al cambio climático

VI.1. Regulación específica respecto de cambio climático

Con fecha 13 de junio de 2022, se publicó en el Diario Oficial la Ley N° 21.455 LEY MARCO DE CAMBIO CLIMÁTICO (LMCC).

El Proyecto de LMCC inició su tramitación en el año 2020, como resultado luego de haber implementado, en nuestro país los Planes de Acción Nacional de Cambio Climático, en 2008-2012¹, y 2017-2022² (PANCC I y PANCC II, respectivamente), el Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático, en 2014³, y planes de adaptación sectoriales (ej. sector turismo⁴, sector silvoagropecuario⁵). Adicionalmente se debe considerar que el País se comprometió con una meta de reducción de emisiones de carbono, mediante la firma del Acuerdo de París en el año 2015⁶.

La propuesta de LMCC se fundamenta en la “alta vulnerabilidad” que tendría nuestro país a los efectos del Cambio Climático, según se ha documentado extensamente, y se ha recogido en PANCC I y PANCC II, y se mencionan también en el mensaje con que se dio inicio al Proyecto de Ley.

Los principales objetivos que persigue la LMCC responden, entre otros, a la necesidad de mejorar la gestión asociada al desarrollo de políticas climáticas de largo plazo, a la institucionalidad asociada, y a los instrumentos de gestión del Cambio Climático.

¹ <https://mma.gob.cl/cambio-climatico/plan-de-accion-nacional-de-cambio-climatico-2008-2012-pancc/>

² <https://mma.gob.cl/cambio-climatico/plan-de-accion-nacional-de-cambio-climatico-2017-2022-pancc-ii/>

³ <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/https://mma.gob.cl/wp-content/uploads/2016/02/Plan-Nacional-Adaptacion-Cambio-Climatico-version-final.pdf>

⁴ <http://www.subturismo.gob.cl/documentos/plan-de-adaptacion-al-cambio-climatico-sector-turismo/>

⁵ <https://www.odepa.gob.cl/temas-transversales/plan-de-adaptacion-nacional-al-cambio-climatico-sector-silvoagropecuario>

⁶ <https://unfccc.int/es/process-and-meetings/the-paris-agreement/el-acuerdo-de-paris>

El objetivo del presente análisis es identificar y analizar los nuevos desafíos que plantea la implementación de la LMCC, en el desarrollo y gestión de proyectos. Principalmente, en el marco de la evaluación de proyectos en el SEIA, en tanto se deben incorporar medidas de acción y adaptación que implica la consideración del Cambio Climático (en adelante CC) en los procesos de evaluación ambiental.

Tal como se lee en el primer artículo de la ley, su objetivo es hacer frente a los desafíos que presenta el cambio climático, transitar hacia un desarrollo bajo en emisiones de gases de efecto invernadero y otros forzantes climáticos, hasta alcanzar y mantener la neutralidad de emisiones de gases de efecto invernadero al año 2050, adaptarse al cambio climático, reduciendo la vulnerabilidad y aumentando la resiliencia a los efectos adversos del cambio climático, y dar cumplimiento a los compromisos internacionales asumidos por el Estado de Chile en la materia.

Para el logro de sus objetivos, en primer término, menciona los principios en que se basa la nueva norma, entre los que se destacan: Costo-efectividad⁷, equidad y justicia climática⁸, participación ciudadana⁹, no regresión¹⁰, progresividad, transparencia, y territorialidad, entre otros.

A continuación, se sistematizan los alcances principales del proyecto de Ley LMCC:

VI.2. Institucionalidad

- a. Ministerio del Medio Ambiente. Encargado de la integridad de la política ambiental y su regulación normativa. Coordina la implementación de los instrumentos nacionales de gestión del cambio climático. Elabora, revisa y actualiza los instrumentos de gestión del cambio climático que corresponda (o actúa como contraparte técnica), con la colaboración de las autoridades sectoriales y los organismos colaboradores. Vela por

⁷ Costo-Efectividad: la gestión del cambio climático priorizará aquellas medidas que, siendo eficaces para la mitigación y adaptación, sean las que representen menores costos económicos, ambientales y sociales, considerando los costos indirectos de la inacción para la adaptación.

⁸ Equidad y Justicia Climática: es deber del Estado procurar una justa asignación de cargas, costos y beneficios, resguardando la capacidad de las generaciones futuras de satisfacer sus propias necesidades, con enfoque de género y especial énfasis en sectores, territorios, comunidades y ecosistemas vulnerables al cambio climático. La justicia climática busca el trato justo de todas las personas, así como evitar las discriminaciones que pueden conllevar determinadas políticas y decisiones que pretenden abordar el cambio climático.

⁹ Participación ciudadana: es deber del Estado contar con los mecanismos que permitan asegurar la participación de toda persona o agrupación de personas en la gestión del cambio climático, tanto a nivel nacional, como regional y local.

¹⁰ No regresión: la gestión del cambio climático no podrá ser modificada cuando se comprometan los objetivos de mitigación o adaptación establecidos o cuando ello implicare retroceder en los niveles de protección ambiental alcanzados o establecidos previamente.

la integración y coherencia entre los instrumentos de gestión del cambio climático a nivel nacional, sectorial y regional.

Es la autoridad encargada de materializar la ley, para lo cual se requiere, entre otras acciones, la dictación de reglamentos. La LMCC establece un plazo de un año para la dictación de los reglamentos que refiere (ya sea que dependan del MMA, o de otro Ministerio).

- b. **Autoridades Sectoriales:** Ministerios de Agricultura, de Economía, Fomento y Turismo, de Energía, de Minería, de Obras Públicas, de Salud, de Transportes y Telecomunicaciones, de Defensa Nacional, de Vivienda y Urbanismo.
Son aquellas autoridades que tienen competencia en aquellos sectores que representan las mayores emisiones de gases de efecto invernadero o la mayor vulnerabilidad al cambio climático en el país. Les corresponde la elaboración de los Planes Sectoriales (de Mitigación y Adaptación), como también hacer seguimiento, incorporar criterios de CC en las políticas de su ámbito, entre otras funciones. Igualmente les corresponde presentar “Informes de Incidencia”, cuando propongan alguna norma legal de su ámbito, que pueda afectar los objetivos de los instrumentos que dispone la LMCC.
- c. **Consejo de Ministros para la Sustentabilidad y el Cambio Climático.**
Se refiere al Consejo de Ministros establecido en el art. 71 de la Ley N° 19.300 sobre Bases Generales del Medio Ambiente, en su rol de emitir pronunciamiento fundado sobre la Estrategia Climática de Largo Plazo, la Contribución Determinada a Nivel Nacional y los Planes Sectoriales de Mitigación y Adaptación, así como respecto de la coherencia entre ellos.
- d. **Comité Científico Asesor para el Cambio Climático.** Asesor del Ministerio del Medio Ambiente en los aspectos científicos, entre otras materias, para la elaboración, diseño, implementación y actualización de los instrumentos de gestión del CC.
- e. **Consejo Nacional para la Sustentabilidad y el Cambio Climático.** Se refiere al Consejo de establecido en el art. 76 de la Ley sobre Bases Generales del Medio Ambiente, en su rol de instancia multisectorial que, en virtud de esta ley, se modifica, para emitir opinión sobre los instrumentos de gestión de cambio climático que establece la LMCC. Se indica que las sesiones del Consejo deberán ser dispuestas para conocimiento público.
- f. **Órganos regionales para el cambio climático (SEREMIS de Autoridades Sectoriales + DIRECTEMAR).** Realizarán la gestión del cambio climático a nivel regional, en concordancia con los Planes Sectoriales de Mitigación y/o Adaptación de su sector, en coordinación con los Comités Regionales para el Cambio Climático y los Planes de Acción Regional de Cambio Climático.
- g. **Organismos Colaboradores:** Órganos de la Administración del Estado (todos). En tanto deben considerar la variable CC en la elaboración y evaluación de sus políticas, planes, programas y normas, según las directrices establecidas en la Estrategia Climática de Largo Plazo.

- h. Organismos Colaboradores: Equipo Técnico Interministerial para el Cambio Climático (ETICC). Colaborará con el Ministerio del Medio Ambiente en el diseño, elaboración, implementación, actualización y seguimiento de los instrumentos de gestión del cambio climático. Asimismo, podrá proveer asistencia técnica a otros órganos de la Administración del Estado o servicios públicos con competencia en dicha materia.
- i. Organismos Colaboradores: Comités Regionales para el Cambio Climático (CORECC). Principalmente su función será coordinar la elaboración de los instrumentos para la gestión del cambio climático a nivel regional y comunal. Debe rendir una cuenta pública sobre cambio climático, ante el Consejo Regional, anualmente.
- j. Organismos Colaboradores: Municipalidades. Principalmente colaborarán en la gestión del cambio climático a nivel local.
- k. Organismos Colaboradores: Mesas Territoriales de Acción por el Clima. Las municipalidades, en coordinación con los CORECC, podrán crear mesas territoriales de acción por el clima, en función de las características específicas de cada territorio.
- l. Superintendencia del Medio Ambiente (SMA). Se modifica la Ley orgánica de la SMA, de forma tal, de incorporar las nuevas atribuciones que se indican en la LMCC.
- m. Tribunales Ambientales. Se les concede las siguientes atribuciones: (a) Conocer de las reclamaciones que se interpongan en contra de los decretos supremos que establezcan las normas de emisión de gases de efecto invernadero. Podrán iniciar la acción, cualquier persona que estime que los decretos no se ajustan a la ley; (b) Conocer de las reclamaciones que se interpongan en contra de las resoluciones que se pronuncien sobre la procedencia de un proyecto de reducción o absorción de emisiones de gases de efecto invernadero. En este caso, podrán iniciar la acción las personas naturales o jurídicas directamente afectadas por la resolución del MMA.

VI.3. Nuevos instrumentos de gestión

a) Meta de Mitigación

Consiste en que “a más tardar el año 2050 se deberá alcanzar la neutralidad de emisiones de gases de efecto invernadero. Dicha meta será evaluada cada cinco años por el Ministerio del Medio Ambiente”.

b) Estrategia Climática de Largo Plazo

Se trata de un instrumento reconocido en el Acuerdo de París, conforme al que se definen los lineamientos generales de largo plazo, considerando un horizonte a 30 años para el cumplimiento del objeto de la ley.

La estrategia debe considerar, al menos: presupuesto (nacional y sectorial), criterios de costo — efectividad, lineamientos para el manejo contable de las absorciones de emisiones,

niveles de absorción y almacenamiento de GEI, objetivos, metas e indicadores de mitigación y adaptación. Se deben considerar también las “directrices en materia de evaluación de riesgos y pérdidas y daños asociados al cambio climático, considerando la vulnerabilidad de cada sector específico a los efectos adversos, tanto evitados, no evitados e inevitables, del cambio climático”, entre otros factores.

La elaboración de la estrategia corresponde al MMA, en conjunto con los Ministerios que ha definido la Ley como autoridades sectoriales competentes en materia de CC¹¹.

Se debe tener presente que la LMCC, en una disposición transitoria, señala que la actual Estrategia Climática de Largo Plazo, presentada ante la Convención Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, el 3 de noviembre del año 2021¹², mantendrá su vigencia para todos los efectos legales, y deberá ser actualizada en el año 2030, por lo que, en el momento de entrada en vigencia de la presente LMCC, el país, ya contará con dicha estrategia, en los términos establecidos en la presente ley.

c) Contribución Determinada a Nivel Nacional

Se refiere al instrumento que contiene los compromisos de Chile ante la comunidad internacional para mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero e implementar medidas de adaptación, de conformidad con lo dispuesto por el Acuerdo de París y la Convención Marco de Cambio Climático. La Contribución Determinada a Nivel Nacional (NDC, por sus siglas en inglés) será elaborada, revisada y actualizada por el Ministerio del Medio Ambiente con colaboración de los Ministerios sectoriales. El MMA dictará un reglamento que establecerá el procedimiento de elaboración de la NDC.

d) Planes Sectoriales de Mitigación del Cambio Climático

Estos Planes, “establecerán el conjunto de acciones y medidas para reducir o absorber gases de efecto invernadero, de manera de no sobrepasar el presupuesto sectorial de emisiones asignado a cada autoridad sectorial en la Estrategia Climática de Largo Plazo”. Los Planes Sectoriales que se sometan a aprobación del Consejo de Ministros para la Sustentabilidad, deben considerar un informe financiero detallado de las medidas de mitigación nacional, regional y comunal.

¹¹ El Art. 17 de la LMCC identifica las autoridades sectoriales en materia de CC: “Las autoridades sectoriales en materia de cambio climático son aquellas que tienen competencia en aquellos sectores que representan las mayores emisiones de gases de efecto invernadero o la mayor vulnerabilidad al cambio climático en el país. Esto es, los Ministerios de Agricultura, de Economía, Fomento y Turismo, de Energía, de Minería, de Obras Públicas, de Salud, de Transportes y Telecomunicaciones, de Defensa Nacional, de Vivienda y Urbanismo y del Medio Ambiente.”

¹² ECLP: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://cambioclimatico.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2021/11/ECLP-LIVIANO.pdf>

El MMA dictará un reglamento que establecerá el procedimiento de elaboración y revisión de los Planes. No obstante ello, se dispone que estos Planes deben elaborarse en un plazo de dos años, desde la publicación de la LMCC.

e) Planes Sectoriales de Adaptación al Cambio Climático

“Los Planes Sectoriales de Adaptación establecerán el conjunto de acciones y medidas para lograr adaptar al cambio climático aquellos sectores con mayor vulnerabilidad y aumentar su resiliencia climática, de conformidad con los objetivos y las metas de adaptación definidas en la Estrategia Climática de Largo Plazo”.

La LMCC dispone la elaboración de, al menos, los siguientes Planes Sectoriales:

- Biodiversidad
- Recursos Hídricos
- Infraestructura
- Salud
- Minería
- Energía
- Silvoagropecuario
- Pesca y Acuicultura
- Ciudades
- Turismo
- Zona Costera
- Transportes

El MMA dictará un reglamento que establecerá el procedimiento de elaboración y revisión de los Planes. No obstante ello, se dispone que estos Planes deben elaborarse en un plazo de dos años, desde la publicación de la LMCC. Respecto de los Planes existentes, se indica que se deben actualizar en el plazo de dos años.

f) Reporte de Acción Nacional de Cambio Climático, RANCC

El objetivo de monitorear e informar su estado de avance en el corto plazo, de las políticas, planes, programas, normas, acciones y medidas, sea que estén contempladas en instrumentos de gestión del cambio climático o hayan sido propuestas por otros organismos públicos. La LMCC establece la forma en que se dispondrá la información. El Reporte será elaborado por el MMA, cada dos años y se dará cuenta pública de este.

g) Instrumentos de Gestión a Nivel Regional y Local

Adicionalmente, y de conformidad con el principio de territorialidad, se deben elaborar planes de acción de nivel regional y comunal, así como planes estratégicos de recurso hídrico, por cuenca. Estos planes deberán ajustarse y ser coherentes con las directrices

de la Estrategia Climática de Largo Plazo y de los Planes Sectoriales de Mitigación y Adaptación.

El MMA establecerá el procedimiento para la elaboración, revisión y actualización de los Planes, mediante un reglamento.

- a. **Planes de Acción Regional de Cambio Climático.** Serán aprobados por resolución del Delegado Presidencial Regional respectivo, previo acuerdo favorable del Gobierno Regional. Se dispone un plazo de tres años, para su elaboración.
- b. **Planes de Acción Comunal de Cambio Climático.** Deben ser elaborados por las Municipalidades
- c. **Planes Estratégicos de Recursos Hídricos en Cuencas.** Serán elaborados por el Ministerio de Obras Públicas, en conjunto con el Ministerio del Medio Ambiente; de Agricultura; de Ciencias, Tecnología, Conocimiento e Innovación, de Relaciones Exteriores cuando comprenda cuencas transfronterizas, y de los Comités Regionales para el Cambio Climático (CORECC) respectivos.

h) Otros Instrumentos (Complementarios)

- a. Instrumentos de gestión de riesgos de desastres. Deberán incorporar criterios de adaptación al cambio climático, tanto en su fase de diseño, como en su elaboración, implementación y evaluación.
Instrumentos de ordenamiento y planificación territorial. Se indica que deben incorporar consideraciones ambientales del desarrollo sustentable relativas a la mitigación y adaptación al cambio climático. Adicionalmente, estos deben ser compatibles con los instrumentos de gestión de riesgos de desastres.
- b. Protección de la capa de ozono y gestión del cambio climático. Los instrumentos de gestión del cambio climático deberán considerar especialmente medidas que contribuyan al control de los gases de efecto invernadero previstas en la ley N° 20.096.
- c. Evaluación Ambiental Estratégica. La EAE, regulada en la actual Ley N° 19.300, incorporada mediante la Ley N° 20.417, deberá considerar, en la etapa de diseño, "criterios de desarrollo sustentable, objetivos ambientales y efectos ambientales derivados de los factores críticos de decisión, los que incluirán la mitigación y adaptación al cambio climático, según corresponda".
- d. Programa de Regulación Ambiental (nuevo Instrumento de Gestión Ambiental de la Ley N° 19.300). "El Ministerio del Medio Ambiente establecerá un programa de regulación ambiental que contenga los criterios de sustentabilidad y las prioridades programáticas en materia de políticas, planes y programas para la elaboración y revisión de los instrumentos de gestión ambiental y de gestión del cambio climático, en el ámbito de sus competencias".
- e. Revisión de Normas de Calidad Ambiental. Se acorta el plazo para revisión de las normas de calidad ambiental, de cinco a cuatro años.

- f. Derecho de Petición de Dictación de Norma de Calidad Ambiental. Se dispone que toda persona (o agrupación de personas), tendrá derecho a solicitar la dictación de estas normas, respecto de contaminantes que no se encuentran regulados mediante instrumentos de gestión ambiental. A dicha solicitud, el MMA debe dar respuesta fundada.
- g. Derecho de Petición de Dictación de Norma de Emisión. Se dispone que toda persona (o agrupación de personas), tendrá derecho a solicitar la dictación de estas normas, respecto de fuentes que no se encuentren reguladas mediante instrumentos de gestión ambiental. A dicha solicitud, el MMA debe dar respuesta fundada.
- h. Elaboración de planes de Prevención o de Descontaminación Ambiental. Se indica que su proceso de elaboración no podrá exceder de 4 años.
- i. Ministerio de Desarrollo Social y Familia. Se agrega, dentro de sus atribuciones, “evaluar las iniciativas de inversión que solicitan financiamiento del Estado, para determinar su rentabilidad social, y velar por la eficacia y eficiencia del uso de los fondos públicos y la disminución de los efectos adversos del cambio climático, de manera que respondan a las estrategias y políticas de crecimiento y desarrollo económico y social que se determinen para el país”.

VI.4. Normas de emisión de GEI, y certificados de reducción de emisiones

a) Normas de Emisión de Gases Efecto Invernadero

“El Ministerio del Medio Ambiente (MMA) elaborará normas que establecerán la cantidad máxima de un gas de efecto invernadero y/o un forzante climático de vida corta que podrá emitir un establecimiento, fuente emisora o agrupación de éstas, en función de un estándar de emisiones de referencia por tecnología, sector y/o actividad, con el objeto de cumplir los objetivos de la Estrategia Climática de Largo Plazo y la Contribución Determinada a Nivel Nacional”. Esto es, se podrá dictar una norma de emisión para un tipo de establecimiento particular.

La SMA tendrá competencias para la fiscalización de estas normas de emisión.

b) Certificados de Reducción de Emisiones

Se reconoce su uso para acreditar el cumplimiento de las normas de emisiones de gases efecto invernadero.

Se establecen condiciones para el reconocimiento de la reducción de emisiones:

- Deben ser obtenidas mediante la implementación de proyectos en Chile.
- Las reducciones o absorciones deben ser adicionales, medibles, verificables, permanentes.
- Deben tener beneficios ambientales y sociales.

- Deben cumplir con la Contribución Determinada a Nivel Nacional.
- En el caso de forzantes climáticos de vida corta que sean contaminantes locales, sólo podrán utilizarse certificados provenientes de proyectos de reducción o absorción de emisiones ejecutados en la zona declarada como saturada o latente en que se generen las emisiones sujetas a límites de emisión. En el caso de no haberse realizado dicha declaración, sólo podrán utilizarse certificados provenientes de proyectos ejecutados en la misma comuna en que se generen dichas emisiones o en las comunas adyacentes a ésta.
- Se establecerá por reglamento (MMA) la cantidad máxima de certificados que será permitido utilizar, en un determinado periodo de tiempo.

Se disponen los lineamientos generales para el procedimiento de reconocimiento de reducción de emisiones, procedimiento que estará a cargo del MMA. El MMA deberá dictar un reglamento para determinar criterios y requisitos.

Las reducciones o absorciones ya aprobadas para un proyecto deberán ser verificadas por un auditor externo (previamente reconocido por la SMA). El MMA debe dictar el reglamento mediante el cual los auditores externos deberán realizar el procedimiento de verificación.

VI.5. Sistemas de información

a) Sistema Nacional de Acceso a la Información sobre Cambio Climático y Participación Ciudadana (Art. 27)

Se indica que se tratará de un único Sistema Nacional de Acceso a la Información y Participación Ciudadana sobre Cambio Climático que será administrado y coordinado por el Ministerio del Medio Ambiente. Este sistema incluirá los subsistemas de información mencionados en los Párrafos II y III del presente Título, como también aquellos instrumentos y sistemas de información que existan o puedan existir en la materia.

- a. Sistema Nacional de Inventarios de Gases de Efecto Invernadero (Art. 28).
- b. Sistema Nacional de Prospectiva de Gases de Efecto Invernadero (Art. 29).
- c. Sistema de Certificación de Gases de Efecto de Invernadero y Uso del Agua. (Art. 30).
- d. Plataforma de Adaptación Climática (Art. 31)
- e. Repositorio Científico de Cambio Climático (Art. 32).
- f. Registro público de emisores de Gases Efecto Invernadero (Art. 15).
- g. Registro público de proyectos de reducción o absorción aprobados (Art. 15).

b) RETC

Se trata del actual Registro de Emisión y Transferencia de Contaminantes (RETC), que para efectos de la nueva LMCC, se indica que los “establecimientos que estén obligados a declarar (en el RETC) deberán reportar, anualmente, las emisiones de gases de efecto invernadero y forzantes climáticos de vida corta que generen”. Se requiere la dictación de un reglamento (modificación del actual), el que especificará el alcance de las fuentes y emisiones que serán reportadas.

VI.6. Participación ciudadana

Se debe tener presente que el acceso a la información y la participación ciudadana en materia de cambio climático es un aspecto fundamental de la nueva normativa. En consideración con lo anterior, la LMCC dispone que dicho acceso a información y participación debe considerarse respecto de todo el ámbito normado por ella; esto es:

- a. Respecto de los instrumentos de gestión: “derecho a participar, (...) en la elaboración, revisión y actualización de los instrumentos de gestión del cambio climático (...)”
- b. Respecto de la institucionalidad: los órganos del Estado deben facilitar la participación.
- c. Sistema Nacional de Acceso a la Información y Participación Ciudadana sobre Cambio Climático, ya señalado anteriormente.

VI.7. MECANISMOS Y LINEAMIENTOS FINANCIEROS**a) Estrategia Financiera de Cambio Climático**

La implementación de la LMCC considera una estrategia financiera de CC que deberá elaborar el Ministerio de Hacienda. Su rol es orientar la contribución del sector público y privado hacia la consolidación de un desarrollo neutro en emisiones de gases de efecto invernadero y resiliente al clima, considerando los lineamientos, objetivos y metas incorporados en la Estrategia Climática de Largo Plazo y en la Contribución Determinada a Nivel Nacional.

Entre otros, se indica el siguiente contenido mínimo para la estrategia financiera: debe considerar mecanismos para promover inversiones que tengan por fin el desarrollo neutro en emisiones de gases de efecto invernadero y resiliente al clima; acciones de fomento y desarrollo de capacidades en materia de financiamiento climático en los sectores público y privado, y acciones de fomento para la gestión de los riesgos asociados al cambio climático en el sector financiero.

b) Fondo de Protección Ambiental

Se trata del mismo fondo establecido en la Ley N° 19.300 (Ley sobre Bases Generales del Medio Ambiente), al que se le incorpora el objetivo de “financiar proyectos y acciones concretas de mitigación y adaptación, que contribuyan a enfrentar las causas y los efectos adversos del cambio climático, considerando el principio de territorialidad”. Además, al Fondo se le hacen aplicables los beneficios tributarios del art. 37, del DL 1.939.

c) Mercado de Valores

Se modifica la Ley N° 18.045, sobre Mercado de Valores, respecto de la información continua y reservada, indicando que se deberá informar, a lo menos, aquella referida a los impactos ambientales y de cambio climático de las entidades inscritas, incluyendo la identificación, evaluación y gestión de los riesgos relacionados con esos factores, junto a las correspondientes métricas. La Comisión para el Mercado Financiero (CMF) debe reglamentar el contenido de la información a comunicar.

Similar modificación se introduce respecto de los reglamentos internos de las entidades que administran fondos de terceros (Ley N° 20.712), y de las Administradoras de Fondos de Pensiones.

d) Otros Instrumentos Económicos

Se refiere en general a “aquellos mecanismos de carácter fiscal, financiero o de mercado que permiten internalizar los costos ambientales, sociales y económicos asociados a la emisión de gases de efecto invernadero o forzantes climáticos de vida corta, así como los beneficios de la reducción de dichas emisiones, o la disminución de riesgos que contribuyan a la adaptación al cambio climático”.

VI.8. Modificaciones al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA)

La LMCC introduce modificaciones al SEIA, regulado a través de la Ley N° 19.300 (sobre Bases Generales del Medio Ambiente); a saber:

- a. Variable de cambio climático¹³: “Los proyectos o actividades que se sometan a evaluación de impacto ambiental (...) considerarán la variable de cambio climático en los componentes del medio ambiente que sean pertinentes”. Se indica que ello será

¹³ Esta disposición entra en vigencia, una vez modificado el reglamento del SEIA, cuestión que ocurrió con la publicación, con fecha 01 de febrero de 2024, del D.S. N° 30, de 2023, del Ministerio del Medio Ambiente.

“conforme lo disponga el reglamento respectivo”, por lo que para la incorporación de la variable CC en la evaluación de Proyectos, se debe considerar la forma en que se aborde en una próxima modificación al Reglamento del SEIA.

- b. Relación con Planes Sectoriales de Mitigación y Adaptación¹⁴. Los proyectos o actividades para evaluar en el SEIA, deberán describir la forma en que se relacionarían con estos Planes.
- c. Relación con los Instrumentos de Gestión de CC Regionales y Locales¹⁵. Los proyectos o actividades para evaluar en el SEIA deberán describir la forma en que se relacionarían con estos Instrumentos. Adicionalmente, el SEA deberá requerir el informe del Gobierno Regional y del Municipio correspondiente.
- d. 25 Quinquies — Revisión de RCA¹⁶. Se señala que la variable del cambio climático deberá ser considerada para efectos de lo dispuesto en el artículo 25 quinquies de la ley N° 19.300. Para estos efectos, el procedimiento administrativo de revisión podrá ser iniciado de oficio, a petición del titular, o a solicitud de la SMA.
- e. Concepto de Desarrollo Sustentable. Se integra a este concepto la consideración de las variables de cambio climático.
- f. Estudios de Impacto Ambiental¹⁷. Se indica que dentro del contenido del EIA, se debe considerar respecto de la predicción y evaluación del impacto ambiental del proyecto o actividad, para las eventuales situaciones de riesgo, “los efectos adversos del cambio climático sobre los elementos del medio ambiente, cuando corresponda”.

Específicamente, el Artículo 40 de la LMCC dispone lo siguiente:

“Artículo 40.- Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental. Los proyectos o actividades que se sometán a evaluación de impacto ambiental de acuerdo a la ley considerarán la variable de cambio climático en los componentes del medio ambiente que sean pertinentes, conforme lo disponga el reglamento respectivo.

¹⁴ Esta disposición entra en vigencia, una vez modificado el reglamento del SEIA, cuestión que ocurrió con la publicación, con fecha 01 de febrero de 2024, del D.S. N° 30, de 2023, del Ministerio del Medio Ambiente.

¹⁵ Esta disposición entra en vigencia, una vez modificado el reglamento del SEIA, cuestión que ocurrió con la publicación, con fecha 01 de febrero de 2024, del D.S. N° 30, de 2023, del Ministerio del Medio Ambiente.

¹⁶ Esta disposición entra en vigencia, una vez modificado el reglamento del SEIA, cuestión que ocurrió con la publicación, con fecha 01 de febrero de 2024, del D.S. N° 30, de 2023, del Ministerio del Medio Ambiente.

¹⁷ Esta disposición entra en vigencia, una vez modificado el reglamento del SEIA, cuestión que ocurrió con la publicación, con fecha 01 de febrero de 2024, del D.S. N° 30, de 2023, del Ministerio del Medio Ambiente.

Los proyectos o actividades señalados en el inciso anterior deberán describir la forma en que se relacionarían con los planes sectoriales de mitigación y adaptación, así como con los instrumentos de gestión del cambio climático regionales y locales. Respecto de estos últimos, siempre se requerirá el informe del Gobierno Regional y del Municipio correspondiente, con el objeto de que éstos señalen si el proyecto o actividad se relaciona con los instrumentos indicados.

Asimismo, la variable del cambio climático deberá ser considerada para efectos de lo dispuesto en el artículo 25 quinquies de la ley N° 19.300. Para efectos de lo dispuesto en este inciso, el procedimiento administrativo de revisión podrá ser iniciado de oficio, a petición del titular, o a solicitud de la Superintendencia del Medio Ambiente”.

REFERENCIAS

REFERENCIAS CAPÍTULO 2 / ANEXO I

- DGA (2022). “Homologación del cálculo hidrológico para la estimación de la oferta natural de agua histórica y futura en Chile”. SIT N° 524. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación, Santiago, Chile. Elaborado por: Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.
- Gutiérrez, J.M., R.G. Jones, G.T. Narisma, L.M. Alves, M. Amjad, I.V. Gorodetskaya, M. Grose, N.A.B. Klutse, S. Krakovska, J. Li, D. Martínez-Castro, L.O. Mearns, S.H. Mernild, T. Ngo-Duc, B. van den Hurk, and J.-H. Yoon, 2021: Atlas. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1927–2058, doi: 10.1017/9781009157896.021.
- IPCC (2001a) Cambio climático 2001: Mitigación. Parte de la contribución del Grupo de Trabajo III al Tercer Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. [chrome-extension://efaidnbmninnibpcajpcglclefindmkaj/https://archive.ipcc.ch/ipccreports/tar/vol4/spanish/pdf/wg3sum.pdf](https://archive.ipcc.ch/ipccreports/tar/vol4/spanish/pdf/wg3sum.pdf)
- IPCC (2001b) Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Houghton, J.T., Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P.J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell and C.A. Johnson (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 881pp. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/07/WG1_TAR_FM.pdf
- IPCC (2013) Resumen para responsables de políticas. En: “Cambio Climático 2013: Bases físicas. Contribución del Grupo de trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático” [Stocker, T. F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex y P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, NY, Estados Unidos de América. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/WG1AR5_SPM_brochure_es.pdf
- IPCC (2014a) AR5 Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2/>
- IPCC (2014b) CAMBIO CLIMÁTICO 2014 Mitigación del cambio climático. Resumen para responsables de políticas y Resumen técnico. [/https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/WGIIIAR5_SPM_TS_Volume_es-1.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/WGIIIAR5_SPM_TS_Volume_es-1.pdf)
- IPCC (2018) Global Warming of 1.5 °C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5 °C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D.

- Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.)). IPCC (2019a) El Océano y la criósfera en un clima cambiante. Resumen para responsables de políticas. ISBN 978-92-9169-355-9
- IPCC (2019b) El cambio Climático y la Tierra. Resumen para responsables de políticas. ISBN 978-92-9169-354-2
- IPCC, 2021: Resumen para responsables de políticas. En: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J. B. R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu y B. Zhou (editores)]. Cambridge University Press.
- IPCC (2023). Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2023: Synthesis Report. A Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 36 pages.
- MMA (2021) Cuarta Comunicación Nacional de Chile ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático. Ministerio del Medio Ambiente, Gobierno de Chile. ISBN: 978-956-7204-89-2de
- Moss Richard, Jae A. Edmonds, Kathy A. Hibbard, Martin R. Manning, Steven K. Rose, Detlef P. van Vuuren, Timothy R. Carter, Seita Emori, Mikiko Kainuma, Tom Kram, Gerald A. Meehl, John F. B. Mitchell, Nebojsa Nakicenovic, Keywan Riahi, Steven J. Smith, Ronald J. Stouffer, Allison M. Thomson, John P. Weyant & Thomas J. Wilbanks (2010) The Next Generation of Scenarios for Climate Change Research and Assessment. Vol 463j11 February 2010 jdoi:10.1038/nature08823 https://www.researchgate.net/publication/41422439_The_Next_Generation_of_Scenarios_for_Climate_Change_Research_and_Assessment.
- UNESCO (2018) El Atlas de Glaciares y Aguas Andinos: el impacto del retroceso de los glaciares sobre los recursos hídricos. ISBN 978-92-3-300103-9. Online, Open Access.

REFERENCIAS CAPÍTULO 3 / ANEXO II

- AWWA Manual; M36: Water Audits and Leak Detection, First Edition, 1990.
- AWWA Manual; M46: Reverse Osmosis and Nanofiltration, Second Edition, 2007.
- AWWA Manual; M53: Microfiltration and Ultrafiltration Membranes for Drinking Water, 2005.
- AWWA Manual; M61: Desalination of Seawater, First Edition, 2011.
- Anwur Alenezi, Yusef Alabaiadly: Emerging technologies in water desalination; A review and future outlook. *Energy Nexus*, Volume 17, March 2025, 10073.
- Camp, Dresser & McKee Inc.: Guidelines for Water Reuse for the U.S./ EPA/625/R-092/004, September 1992.

- Cornel Sava, Dana-Adriana Iluțiu-Varvara, Roxana Mare, Marius Daniel Roman, Simona Rada, Elena Maria Pică, Lorentz Jäntschi: Physico-chemical characterization and possible uses of sludge processed from an urban sewage treatment from an urban sewage treatment plant, *Heliyon*, Volume 10, Issue 8, 2024, e29576, ISSN 2405-8440, <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e29576>.
- Dieter Schrenk, Margherita Bignami, Laurent Bodin, James Kevin Chipman, Jesús del Mazo: Risk to human health related to the presence of perfluoroalkyl substances in food. EFSA Panel on Contaminants in the Food Chain (EFSA CONTAM Panel), First published: 17 September 2020. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2020.6223>.
- Gretchen Sneegas; Lucas Seghezze; Christian Brannstrom; Wendy Jepson; Gabriel Eckstein. Do not put all your eggs in one basket: social perspectives on desalination and water recycling in Israel. *Water Policy* (2022) 24 (11): 1772-1795. IWA Publishing. <https://iwaponline.com>.
- Hidalgo T. Fernando: Revisión del Estado Del Arte en Desalinización de Aguas. Para Comisión Cambio Climático y el Agua, Instituto de Ingenieros de Chile. Diciembre 2023. No publicado.
- INE. Estimaciones y proyecciones de la población de Chile, 1992-2050 al 30 de junio en base al Censo 2017. Instituto Nacional De Estadísticas. Diciembre / 2018.
- Jennifer Weidhaas, McKinley Olsen, Joan E. McLean, Niel Allen, Leila Amadi, Kwame Duodu and Ryan Dupont: Microbial and chemical risk from reclaimed water use for residential irrigation. *Journal of Water Reuse and Desalination*, jwrdd2022014. 2022014. July 30,2022. IWA Publishing. <https://iwaponline.com>.
- Ley 21.639. Modifica Normas para el desarrollo de proyectos de infraestructura hídrica y desalación, con el fin de destinar agua al cumplimiento de la función de subsistencia de riego. Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. 27-dic-2023.
- Mercedes Serraller: Las 765 desaladoras en España sólo funcionan al 16% de su capacidad. / (<https://www.vozpopuli.com/redacción /mercedes-serraller>) Publicado 15/05/2023.
- Müller V, Kindness A, Feldmann J. Fluorine mass balance analysis of PFAS in communal waters at a wastewater plant from Austria. *Water Res.* 2023 Oct 1; 244:120501. Doi: Epub 2023 Aug 18. PMID: 37647770.
- Rachel Becker: California approves rules that turn sewage into drinking water. December 19, 2023. CalMatters.
- Simone A. Williams, Sharon B. Megdal, Adriana A. Zuniga-Teran, David M. Quanrud and Gary Christopherson: Equity Assessment of Groundwater Vulnerability and Risk in Drinking Water. Supplies in Arid Regions. *Water* 2024, 16(23), 3520. <https://www.researchgate.net/publication/386582668>.
- SISS: <https://www.siss.gob.cl/Informes de gestión del sector sanitario - 2022-2023-2024>.
- Toranosuke Horikawa, Mhiro Masuda, Minho Oh, Masatoshi Kondo: Liquid metal technology for collection of metal resources from seawater desalination brine and polluted groundwater. TH, 0009-0002-7674-6979; MO,0000-0003-0635-163X; MK,0000-0002-9493-1994.

- Yoshimitsu Itoh *et al.* The future of desalination? | The University of Tokyo. A fast, efficient, selective membrane for purifying saltwater (2022, May 12). u-tokyo.ac.jp. Yoshimitsu Itoh <https://orcid.org/0000-0002-8356-7605>.
- Yitian Gao, Hongwei Fang, Ke Ni & Yixuan Feng Mayo 2022: Water clusters and density fluctuations in liquid water based on extended hierarchical clustering methods. [www.nature.com/scientificreports](https://doi.org/10.1038/s-41598-022-11947-6). <https://doi.org/10.1038/s-41598-022-11947-6>.
- Yoshimitsu Itoh <https://orcid.org/0000-0002-8356-7605> *et al.*: Ultrafast water permeation through nanochannels with a densely fluorinated interior. *Science* 12-05-2022 Vol 376, Issue 6594 pp. 738-743 DOI: 10.1126/science.abd0966.

REFERENCIAS CAPÍTULO 4 / ANEXO III

- Azrak M., Şaylan L. (2024): Analysing the impact of climate change on evapotranspiration in a climate-sensitive region: Example of Central Anatolia (Türkiye). *Soil & Water Res.*, 19: 64–76.
- Banco Central de Chile, 2023. Cuentas Nacionales de Chile 2018-2022.
- Banco Mundial, 2011. Chile. Diagnóstico de la Gestión de los Recursos Hídricos. Documento del Departamento de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible. Región para América Latina y el Caribe
- Barcena, A., J. Samaniego, W. Peres and J. Alatorre (2019), “La emergencia del cambio climático en América Latina y el Caribe,” CEPAL
- Burke, M., Hsiang, S. y Miguel, E. 2015. Global Non-linear Effect of Temperature on Economic Production. *Nature* 527, 235-239
- Centro de Cambio Global UC (CCG-UC), 2022. Escenarios climáticos para Chile: Evidencia desde el Sexto Informe del IPCC. Preparado por Sebastián Vicuña, David Morales-Moraga, Francisco Meza, Jorge Gironás, Luis Cifuentes, Pablo Marquet, Diego González, Rosario Chubretovic, J. Pablo Herane, Oscar Melo.
- CEPAL, 2011. Agricultura y cambio climático. Instituciones, políticas e innovación. Serie seminarios y conferencias N°65.
- CIREN, 1983. V Censo Nacional Agropecuario. 1975-1976 INE. Chile.
- DGA, 2007. Estimación de demandas de agua y proyecciones futuras.
- DGA, 2017 a. Estimación de la Demanda Actual, Proyecciones Futuras y Caracterización de la Calidad de los Recursos Hídricos en Chile. SIT 419. Realizado por: Unión temporal de proveedores, Hídrica Consultores SpA y Aquaterra Ingenieros LTD
- DGA 2017 b. Actualización del Balance Hídrico Nacional. Realizado por la Universidad de Chile y la Pontificia Universidad Católica de Chile.
- DGA, 2019. Aplicación de la Metodología de Actualización del Balance Hídrico Nacional en las Cuencas de la Macrozona Sur y parte de la Macrozona Austral. Elaborado por Universidad de Chile. Jefe de Proyecto: Ximena Vargas.

- DGA (2022). Homologación del cálculo hidrológico para la estimación de la oferta natural de agua histórica y futura en Chile. SIT N° 524. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación, Santiago, Chile. Elaborado por: Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.
- DGOP 2012. Análisis de Inversión en Infraestructura y Gestión Hídrica. Plan de inversión en iniciativas Hídricas 2020-2050. Elaborado por Orphanópoulos D. y RODHOS Asesorías y Proyectos SpA.
- González, R. and J. Velasco (2008), Evaluation of the impact of climatic change on the economic value of land in agricultural systems in Chile, *Chilean Journal of Agricultural Research*, 68(1), 56-68.
- Hernández, K. y Madeira, C. 2021. The impact of climate change on economic output in Chile: past and future. Banco Central de Chile. Documentos de Trabajo N°933.
- Hernandez K, Madeira C (2022) The impact of climate change on economic output across industries in Chile. *PLoS ONE* 17(4): e0266811. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0266811>
- INE 1997. VI Censo nacional Agropecuario 1997 Chile
- INE 2008. VII Censo Nacional Agropecuario y Forestal 2007. Chile
- INE 2022. VII Censo Nacional Agropecuario y Forestal 2021 Chile. Resultados Final
- IPCC, 2007: Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Equipo de redacción principal: Pachauri, R.K. y Reisinger, A. (directores de la publicación)]. IPCC, Ginebra, Suiza, 104 págs.
- IPCC 2022. AR6. Climate Change 2022. Mitigation of Climate Change. Summary for Policymakers.
- Islam A., Ahuja R., García L.A., Ma I., Saseendram A.S. 2012. Modeling the effect of elevated CO₂ and climate change on Reference Evapotranspiration in the semi-arid Central Great Plains. *American Society of Agriculture and Biological Engineers*. Vol 55 (6) ISSN 2151-003
- Kahn, M., Mohaddes, K., Ng, R., Hashem Pesaran, M., Raissi, M. y Yang, J. 2021. Long-Term Macroeconomic Effects of Climate Change: A Cross-Country Analysis. *Energy Economics* 104, 105624. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2021.105624>
- Kalkuhl, M. y Wenz, L. 2020. The Impact of Climate Conditions on Economic Production. Evidence from a Global Panel of Regions. *Journal of Environmental Economics and Management* 103, 102360. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jeem.2020.102360>.
- Kim, CG 2012. The impact of climate change on the agricultural sector: Implications of the agro-industry for low carbon, green growth strategy and roadmap for the East Asia Region. Korea Rural Economic Institute. <https://hdl.handle.net/20.500.12870/4032>.
- Madeira, C. 2022. Una revisión del impacto económico del cambio climático en Chile versus otros países: pérdida del PIB, productividad laboral, agricultura, costos en salud y políticas fiscales. *Estudios Públicos*. 168 (dic. 2022), 7-36. DOI:<https://doi.org/10.38178/07183089/0906220211>.

- Monterroso-Rivas A.I., Gomez-Diaz J.A. 2021. Impacto de la Evapotranspiración Potencial y período de crecimiento en México. Departamento de Suelos. Universidad Autónoma de Chapingo. Terra latinoamericana. Volumen 39 e774
- Miroslava J., Pásztorová M., Minaric P., Skalova J. 2015. Impact of the climate change on evapotranspiration in the Poiplie área. Slovak University of Technology in Bratislava. Acta Sci. Pol. Formatio Circumiec 14(1). ISSN 1644-0765.
- ODEPA-CIREN 2025 Catastro Frutícola ODEPA-CIREN años 1999 a 2004. Chile
- ODEPA 2017 a. El cambio climático y los recursos hídricos de Chile. Reflexiones y desafíos al 2030. Elaborado por Fernando Santibáñez.
- ODEPA 2017 b. Estudio de la adaptación a la restricción de los recursos hídricos en Chile.
- OECD (2015), "The Economic Consequences of Climate Change," OECD, Paris.
- Peña H (2016). Recursos Hídricos. En: Infraestructura Crítica para el Desarrollo. Bases para un Chile Sostenible 2016—2025. Cámara Chilena de la Construcción.
- Roson, R. y Sartori, M. 2016. Estimation of Climate Change Damage Functions for 140 Regions in the GTAP 9 Database. Journal of Global Economic Analysis 1(2), 78-115.
- Salazar, C. 2003. Situación de los recursos hídricos en Chile. Con el apoyo de la Fundación Nippon. Centro del Tercer Mundo para el Manejo del Agua, A. C., México.
- Santibáñez F. 2008. Análisis de la vulnerabilidad silvoagropecuaria en Chile frente a escenarios de cambio climático. Centro Agrimed. Universidad de Chile.
- Santibáñez F., Santibáñez P., Caroca C., González P. Huiza F., Melillan C. 2014 Atlas del cambio climático de las regiones áridas y semiáridas de Chile. Universidad de Chile.
- Santibáñez F. 2015. Impacto del cambio climático y variabilidad climática en producción alimentaria y agricultura. Proceso de Pensamiento Estratégico a nivel regional, FAO, Oficina Regional para América Latina. Santiago de Chile.
- Santibáñez F. 2016. El cambio climático y los Recursos Hídricos de Chile. ODEPA
- Silva C., Vargas X., Muñoz E. 2025. Análisis de eventos extremos de temperatura en base a resultados de "Homologación del cálculo hidrológico para la estimación de la oferta natural del agua histórica y futura de Chile". Universidad de Chile.
- Steiner A., E. Abeliuk, J.C. Barros, A. Di-Génova, A. Fischer, C. Moraga, R. Verschae, y A. Palacios. 2025. Convergencia Biodigital. Comisión Convergencia Biológica Digital. Instituto de Ingenieros de Chile.
- Vergara, W., Rios, A., Galindo, L., Gutman, P., Isabell, P., Suding, P. y Samaniego, J. 2013. The Climate and Development Challenge for Latin America and the Caribbean: Options for Climate-Resilient, Low-Carbon Development. Washington, DC: Inter-American Development Bank
- Villalba, R., A. Lara, J.A. Boninsegna, M. Masiokas, S. Delgado, J. Aravena, F.A. Roig, A. Schmelter, A. Wolodarsky, and A. Ripalta. 2003. Large-Scale Temperature Changes Across the Southern Andes: 20th-Century Variations in the Context of the Past 400 Years. Climatic Change, 59, 177-232. doi: 10.1023/A:1024452701153

Zhang, D., Liu, X. & Hong, H. 2013. Assessing the effect of climate change on reference evapotranspiration in China. *Stoch Environ Res Risk Assess* 27, 1871–1881. <https://doi.org/10.1007/s00477-013-0723-0>

REFERENCIAS CAPÍTULO 5 / ANEXO IV

- Agencia de Sustentabilidad y Cambio Climático (2024). “Informe de Impacto en Desarrollo Sostenible, Adaptación y Gases de Efecto Invernadero”.
- Carvallo S., (2024). “Acuerdos de Producción Limpia para un consumo (y producción) más sustentable”. Agencia de Sustentabilidad y Cambio Climático. CORFO
- Cochilco (2022). “Proyección de Demanda de Agua en la Minería del Cobre. Período 2022 2033”.
- DGA (2017). “Estimación de la Demanda Actual, Proyecciones Futuras y Caracterización de la Calidad de los Recursos Hídricos”.
- Leyton A. (2017). “Evaluación de los Acuerdos de Producción Limpia como Política Pública”. Memoria para optar al título de ingeniera civil química. FCFM. U. de Chile.
- Diagua Consultores (2019). “Desarrollo de un Modelo Regulatorio-Institucional-Financiero que Viabilice el Reúso de las Aguas Residuales en Chile” CORFO.
- Ministerio de Hacienda (2024). Anteproyecto Sistema de Clasificación o Taxonomía de Actividades Económicas Medioambientalmente Sostenibles de Chile (T-MAS).
- Ministerio de Minería (2021). “Minería 2050. Política Nacional Minera”.
- Sonami (2021). “Informe Consumo de Agua en Minería 2019 – 2020”.
- Peña H., Luraschi M. y S. Valenzuela (2004). “Agua, Desarrollo y Políticas Públicas. Estrategias para la Inserción del Agua en el Desarrollo Sostenible”. GWP/CEPAL; <https://www.hacienda.cl/areas-de-trabajo/finanzas-internacionales/finanzas-sostenibles/taxonomia-para-actividades-economicas-medioambientalmente-sostenibles>

REFERENCIAS CAPÍTULO 7 / ANEXO V

a) Referencias Capítulo 7

- Boisier, J.P. (2023). CR2MET: A high-resolution precipitation and temperature dataset for the period 1960-2021 in continental Chile. (v2.5) [Data set]. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7529682>
- Chadwick, C., Gironás, J., Vicuña, S., Meza, F., & McPhee, J. (2018). Using a Statistical preanalysis approach as an ensemble technique for the unbiased mapping of GCM changes to local stations. *Journal of Hydrometeorology*, 19(9), 1447-1465.
- Contreras, M. T., Gironás, J., & Escauriza, C. (2020). Forecasting flood hazards in real time: a surrogate model for hydrometeorological events in an Andean watershed. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 20(12), 3261-3277.
- CR2 (2015). *Las particulares condiciones que provocaron el desastre en el norte del país*. Disponible en La Tercera, 27 de marzo, 2015.

- De la Fuente, A., Meruane, V., & Meruane, C. (2019). Hydrological early warning system based on a deep learning runoff model coupled with a meteorological forecast. *Water*, 11(9), 1808.
- Demaria, E. M. C., Maurer, E. P., Thrasher, B., Vicuña, S., & Meza, F. J. (2013). Climate change impacts on an alpine watershed in Chile: Do new model projections change the story? *Journal of Hydrology*, 502, 128-138.
- Di Castri, F., & Hayek, E. (1976). *Bioclimatología de Chile*. Santiago, Universidad Católica de Chile.
- Dirección General de Aguas (DGA). (1987). *Precipitaciones máximas en 1, 2 y 3 días*. Ministerio de Obras Públicas.
- Dirección General de Aguas (DGA). (1995). *Manual de Cálculo de Crecidas y Caudales Mínimos en Cuencas sin Información Fluviométrica*". Ayala, Cabrera y Asociados Ingenieros Consultores Ltda.
- Dirección de Obras Hidráulicas (DOH) (2025) *Estudio de caracterización de los eventos de precipitaciones y crecidas de ríos ocurridos en junio y agosto de 2023 en la zona central de Chile*. Estudio elaborado por DICTUC para la Dirección de Obras Hidráulicas, Ministerio de Obras Públicas.
- Escobar y Vidal, F. (1992). Experiencia Sobre la determinación de la línea de nieves en cuencas de Chile Central, *Revista de la Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica*,
- Meza, F. J., Wilks, D. S., Gurovich, L., & Bambach, N. (2012). Impacts of climate change on irrigated agriculture in the Maipo Basin, Chile: reliability of water rights and changes in the demand for irrigation. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 138(5), 421-430.
- Ministerio de Obras Públicas (MOP) (2024). *Manual de Carreteras*. Dirección de Vialidad, Ministerio de Obras Públicas, Chile.
- Ministerio de Obras Públicas (MOP) (2013). *Manual de Drenaje Urbano*. Dirección de Obras Hidráulicas, Ministerio de Obras Públicas, Chile.
- Peña, H., & Klohn, W. (1990). Hidrología de desastres en Chile; crecidas catastróficas recientes de origen no meteorológico (Hydrology of disasters in Chile; recent catastrophic floods of non meteorological origin). *Revista de la Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica*, 5(1), 21-38.
- Peña H. y Vidal, F. (1993). Estimación Estadística de la Línea de Nieves durante los Eventos de Precipitación entre las latitudes 28 y 38 grados Sur. XI Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica.
- Pinto, F. (2019). Cambio climático en Chile: Del desafío global a la oportunidad local. *Análisis N°7/2019, Instituto Igualdad*.
- PNUD (2023). *¿Cómo elaborar un Plan de Acción Comunal de Cambio Climático? Guía metodológica para su formulación paso a paso*. Santiago de Chile. Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo.
- Rojas, O., Mardones, M., Arumí, J. L., & Aguayo, M. (2014). Una revisión de inundaciones fluviales en Chile, período 1574-2012: causas, recurrencia y efectos geográficos (A review of fluvial floods in Chile, period 1574-2012: causes, recurrency and geographic effects). *Revista de Geografía Norte Grande*, (57), 177-192.
- Toledo, X., & Zapater, E. (1991). *Geografía General y Regional de Chile*. Santiago, Editorial Universitaria.
- Vicuña, S., Garreaud, R. D., & McPhee, J. (2011). Climate change impacts on the hydrology of a snowmelt driven basin in semiarid Chile. *Climatic Change*, 105(3-4), 469-488.

- Vicuña, S., McPhee, J., & Garreaud, R. D. (2012). Agriculture vulnerability to climate change in a snowmelt-driven basin in semiarid Chile. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 138(5), 431-441.
- Vicuña, S., Gironás, J., Meza, F. J., Cruzat, M. L., Jelinek, M., Bustos, E., Poblete, D., & Bambach, N. (2013). Exploring possible connections between hydrological extreme events and climate change in central south Chile. *Hydrological Sciences Journal*, 58(8), 1598-1619.
- Wilcox, A. C., Escauriaza, C., Agredano, R., Mignot, E., Zuazo, V., Otárola, S., Castro, L., Gironás, J., Cienfuegos, R., & Mao, L. (2016). An integrated analysis of the March 2015 Atacama floods. *Geophysical Research Letters*, 43(15), 8035-8043.

b) Referencias Anexo V

- Bastianon, E., Bertoldi, W. and Dussaillant, A. (2012) *Glacial-lake outburst flood effects on Colonia River morphology, Chilean Patagonia. River Flow 2012*. CRC Press / Taylor & Francis, London, UK, pp. 573-579. ISBN 978-0-415-62129-8.
- Blanc, J., Hall, J. W., Roche, N., Dawson, R. J., Cesses, Y., Burton, A., & Kilsby, C. G. (2012). Enhanced efficiency of pluvial flood risk estimation in urban areas using spatial–temporal rainfall simulations. *Journal of Flood Risk Management*, 5(2), 143-152.
- Butler, D., & Davies, J. W. (2004). *Urban Drainage*. London, Spon Press.
- Carrasco, J. F., Casassa, G., & Quintana, J. (2005). Changes of the 0 °C isotherm and the equilibrium line altitude in central Chile during the last quarter of the 20th century. *Hydrological Sciences Journal*, 50(6), 933-948.
- Castro, L., Gironás, J., Escauriaza, C., Barría, P. & Oberli, C. (2019). Meteorological characterization of floods in a mountainous poorly gauged catchment using principal component analysis. *Journal of Hydrologic Engineering*, 24(11) 05019027.
- Centro de Investigación para la Gestión Integrada de Riesgos de Desastres (CIGIDEN) (2016). Riesgo de origen hidrometeorológico en la ciudad de Santiago. Santiago, Chile. <http://www.santiagoresiliente.cl>.
- Dussaillant, A., Benito, G., Buytaert, W., Carling, P., Meier, C., & Espinoza, F. (2010). Repeated glacial-lake outburst floods in Patagonia: an increasing hazard? *Natural Hazards*, 54(2), 469-481.
- Estellé, L., Gironás, J., & Fernández, B. (2012). Fundamentos del drenaje urbano e inundaciones. XII Jornadas Francisco Javier Domínguez. Valparaíso.
- Falconer, R. H., Cobby, D., Smyth, P., Astle, G., Dent, J., & Golding, B. (2009). Pluvial flooding: new approaches in flood warning, mapping and risk management. *Journal of Flood Risk Management*, 2(3), 198-208. Vol. 7, N° 2.
- Garreaud, R. (2013). Warm winter storms in Central Chile. *Journal of Hydrometeorology*, 14(5), 1515-1534.
- Harper, T.G. McLeod, H. N., Davies, M. P (1992). Seismic Assessment of Tailings Dams. *Civil Engineering*, 62(12), 64.

- Houston, D., Werrity, A., Bassett, D., Geddes, A., Hoolachan, A., & McMillan, M. (2011). *Pluvial (rain-related) flooding in urban areas: the invisible hazard*. Joseph Rowntree Foundation. York. <http://eprints.gla.ac.uk/162145/7/162145.pdf>
- Instituto de Ingenieros (2020). *Los glaciares: ¿qué queremos proteger?* Comisión Glaciares, Instituto de Ingenieros de Chile.
- IPCC (2022). *Sixth Assessment Report — Working Group II: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Iribarren-Anacona, P., Mackintosh, A., & Norton, K. P. (2015). Hazardous processes and events from glacier and permafrost areas: lessons from the Chilean and Argentinean Andes. *Earth Surface Processes and Landforms*, 40(1), 2-21.
- Iribarren Anacona, P., Norton, K., Mackintosh, A., Escobar, F., Allen, S., Mazzorana, B., & Schaefer, M. (2018). Dynamics of an outburst flood originating from a small and high-altitude glacier in the Arid Andes of Chile. *Natural Hazards*, 94(1), 93-119.
- Jacquet, J., McCoy, S. W., McGrath, D., Nimick, D. A., Fahey, M., O'kuinghttons, J., Friesen, B. A., & Leidich, J. (2017). Hydrologic and geomorphic changes resulting from episodic glacial lake outburst floods: Rio Colonia, Patagonia, Chile. *Geophysical Research Letters*, 44(2), 854-864.
- Malgrange, M., Deschamps, A., & Madariaga, R. (1981). Thrust and extensional faulting under the Chilean coast: 1965, 1971 Aconcagua earthquakes. *Geophysical Journal International*, 66(2), 313-331.
- Ministerio de Obras Públicas (2025). *Plan de Adaptación y Mitigación al Cambio Climático — sector Infraestructura*.
- Peña, H., & Escobar, F. (1987). Análisis del Aluvión de Mayo de 1985 del río Manflas: cuenca del río Copiapó (Analysis of the May 1985 Manflas river Flood: Copiapó river basin). Dirección General de Aguas. Santiago, Chile. <http://bibliotecadigital.ciren.cl/bitstream/handle/123456789/2672/DGA045.pdf>
- PNUD. (2024). *Recomendaciones metodológicas para la incorporación del cambio climático en el diseño de obras hidráulicas en la zona norte de Chile*.
- Soto, M. V., Sarricolea, P., Sepúlveda, S. A., Rodolfi, G., Cabello, M., & Maerker, M. (2017). Assessment of hydro-geomorphological hazard potentials in the Chilean semiarid coastal range and its impacts on La Serena city, Coquimbo Region. *Natural Hazards*, 88(1), 431-452.
- United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNDRR) (2020). *Hazard definition and classification review*. Technical report.
- Urrutia de Hazbún, R., & Lanza, C. (1993). *Catástrofes en Chile 1541— 1992*. Santiago, Chile, Editorial La Noria.
- Wilson, R., Glasser, N. F., Reynolds, J. M., Harrison, S., Anacona, P. I., Schaefer, M., & Shannon, S. (2018). Glacial lakes of the Central and Patagonian Andes. *Global and Planetary Change*, 162, 275-291.
- Yáñez-Morróni, G., Gironás, J., Caneo, M., Delgado, R., & Garreaud, R. (2018). Using the weather research and forecasting (WRF) model for precipitation forecasting in an Andean region with complex topography. *Atmosphere*, 9(8), 304.

REFERENCIAS CAPÍTULO 8 / ANEXO VI

Ley N° 21.455 Ley Marco de Cambio Climático, publicada en el Diario Oficial con fecha 13 de junio de 2022.

Ley N° 19.300 y sus modificaciones, Ley sobre Bases Generales del Medio Ambiente.

Ley N° 21.435 Reforma al Código de Aguas, publicada en el Diario Oficial con fecha 06 de abril de 2022.

Ministerio del Medio Ambiente; Plan de Acción Nacional de Cambio Climático 2017-2022 (PANCC). MINAGRI; "Cambio climático: Chile sumará 14 años consecutivos de sequía y proyectan aumento en olas de calor"; noviembre 2022.

Centro de Estudios Públicos, CEP; "Conservación efectiva de la biodiversidad: 30 medidas urgentes para 2030"; Informe de la Comisión Conservación, Institucionalidad y Filantropía; julio de 2023.

Marquet P. A., A. Altamirano, M. T. K. Arroyo, M. Fernández, S. Gelcich, K. Górski, E. Habit, A. Lara, A. Maass, A. Pauchard, P. Pliscoff, H. Samaniego y C. Smith-Ramírez (editores); Biodiversidad y cambio climático en Chile: Evidencia científica para la toma de decisiones. Informe de la mesa de Biodiversidad. Santiago: Comité Científico COP25; Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación (2019).

<https://mma.gob.cl/cambio-climatico/plan-de-accion-nacional-de-cambio-climatico-2008-2012-pancc/>

<https://mma.gob.cl/cambio-climatico/plan-de-accion-nacional-de-cambio-climatico-2017-2022-pancc-ii/>

<chrome-extension://efaidnbnmnnibpcajpcglclefindmkaj/https://mma.gob.cl/wp-content/uploads/2016/02/Plan-Nacional-Adaptacion-Cambio-Climatico-version-final.pdf>

<http://www.subturismo.gob.cl/documentos/plan-de-adaptacion-al-cambio-climatico-sector-turismo/>

<https://www.odepa.gob.cl/temas-transversales/plan-de-adaptacion-nacional-al-cambio-climatico-sector-silvoagropecuario>

<https://unfccc.int/es/process-and-meetings/the-paris-agreement/el-acuerdo-de-paris>

INSTITUTO DE INGENIEROS DE CHILE

Empresas Socias

ANGLO AMERICAN CHILE LTDA.

ANTOFAGASTA MINERALS S.A.

ASOCIACIÓN DE CANALISTAS SOCIEDAD DEL CANAL DE MAIPO

BESALCO S.A.

CÍA. DE PETRÓLEOS DE CHILE COPEC S.A.

CyD INGENIERÍA LTDA.

EMPRESA CONSTRUCTORA BELFI S.A.

EMPRESA CONSTRUCTORA GUZMÁN Y LARRAÍN SpA

EMPRESA CONSTRUCTORA PRECON S.A.

EMPRESA NACIONAL DE TELECOMUNICACIONES S.A.

EMPRESAS CMPC S.A.

ENAEX S.A.

INGENIERÍA Y CONSTRUCCIÓN SIGDO KOPPERS S.A.

SOCIEDAD QUÍMICA Y MINERA DE CHILE S.A.

Empresas de Ingeniería Colaboradoras

ACTIC CONSULTORES LTDA.

ARCADIS CHILE S.A.

IEC INGENIERÍA S.A.

JRI INGENIERÍA S.A.

LEN Y ASOCIADOS INGENIEROS CONSULTORES LTDA.

SYNEX CONSULTORES LTDA.



INSTITUTO DE INGENIEROS
C H I L E



Nuestros canales digitales:

Sitio web: www.iing.cl

Linkedin: <https://www.linkedin.com/company/64274333/admin/>

E-mail: iing@iing.cl · secretaria@institutodeingenierosdechile.cl

Nuestros teléfonos:

(+56) 22696 8647 · (+56) 93736 0656