



CRHIAM

CENTRO DE RECURSOS HÍDRICOS PARA LA AGRICULTURA Y LA MINERÍA

ANID/FONDAP/15130015

ANID/FONDAP/1523A0001

SOSTENIBILIDAD HÍDRICA EN LA PRODUCCIÓN DE ALIMENTOS

DESAFÍOS Y OPORTUNIDADES DE LA AGRICULTURA EN CHILE

Francisco J. Fernández / Diego Rivera / Roberto D. Ponce
Nélyda Campos-Requena / Alex Godoy Faúndez



Universidad de Concepción

SERIE COMUNICACIONAL CRHIAM

Versión impresa ISSN 0718-6460

Versión en línea ISSN 0719-3009

Directora:

Gladys Vidal Sáez

Comité editorial:

Sujey Hormazábal Méndez

María Belén Bascur Ruiz

Serie:

Sostenibilidad hídrica en la producción de alimentos.

Desafíos y oportunidades de la agricultura en Chile.

Francisco J. Fernández, Diego Rivera, Roberto D. Ponce,

Nélyda Campos-Requena y Alex Godoy Faúndez.

Diciembre 2023.

Agradecimientos:

Centro de Recursos Hídricos
para la Agricultura y la Minería
(CRHIAM)

ANID/FONDAP/15130015

ANID/FONDAP/1523A0001

Victoria 1295, Barrio Universitario,
Concepción, Chile
Teléfono +56-41-2661570

www.crhiam.cl



Universidad de Concepción

SOSTENIBILIDAD HÍDRICA EN LA PRODUCCIÓN DE ALIMENTOS

DESAFÍOS Y OPORTUNIDADES DE LA AGRICULTURA EN CHILE

Francisco J. Fernández / Diego Rivera / Roberto D. Ponce
Nélyda Campos-Requena / Alex Godoy Faúndez



SERIE COMUNICACIONAL CRHIAM

PRESENTACIÓN

El Centro de Recursos Hídricos para la Agricultura y la Minería -Centro Fondap CRHIAM- está trabajando en el tema de "Seguridad Hídrica", entendida como la "capacidad de una población para resguardar el acceso sostenible a cantidades adecuadas de agua de calidad aceptable para el sustento, bienestar y desarrollo socioeconómico sostenibles; para asegurar la protección contra la contaminación transmitida por el agua y los desastres relacionados con ella, y para preservar los ecosistemas, en un clima de paz y estabilidad política" (ONU- Agua, 2013).

La "Serie Comunicacional CRHIAM" tiene como objetivo potenciar temas desde una mirada interdisciplinaria, con la finalidad de difundirlos a los tomadores de decisiones públicos, privados y a la comunidad general. Estos textos surgen como un espacio de colaboración colectiva entre diversos investigadores ligados al CRHIAM como un medio para informar y transmitir las evidencias de la investigación relacionada a la gestión del recurso hídrico.

Con palabras sencillas, esta serie busca ser un relato entendible por todos y todas, en el que se exponen los estudios, conocimientos y experiencias más recientes para aportar a la seguridad hídrica de los ecosistemas, comunidades y sectores productivos. Agradecemos el esfuerzo realizado por nuestras y nuestros investigadores, quienes han trabajado de forma mancomunada y han puesto al servicio de la comunidad sus investigaciones para aportar de forma activa en la búsqueda de soluciones para contribuir a la generación de una política hídrica acorde a las necesidades del país.

Dra. Gladys Vidal
Directora de CRHIAM

DATOS DE INVESTIGADORES



Francisco J. Fernández

Doctor en Economía Agraria,
Universidad Politécnica de Madrid, España.
Escuela de Negocios, Facultad de Economía y Gobierno,
Universidad San Sebastián.
Facultad de Ingeniería, Universidad del Desarrollo.
Colaborador CRHIAM.



Diego Rivera

Ingeniero Civil.
Doctor en Ingeniería Agrícola, Universidad de Concepción.
Profesor Titular Facultad de Ingeniería, Universidad del Desarrollo.
Investigador Centro de Investigación en Sustentabilidad
y Gestión Estratégica de Recursos,
Facultad de Ingeniería, Universidad del Desarrollo.
Investigador Principal CRHIAM.



Roberto D. Ponce

Ingeniero Comercial.
PhD in Science and Management of Climate Change,
Ca'Foscari University, Venice, Italy.
Profesor Asociado, Facultad de Economía y Negocios,
Universidad del Desarrollo.
Center of Applied Ecology and Sustainability (CAPES), Chile.
Investigador Asociado CRHIAM.



Nélyda Campos-Requena

Ingeniera Comercial.
Doctora en Economía de Negocios, Universidad del Desarrollo.
Doctor of Philosophy, Macquarie University, Australia.
School of Economics and Management,
Universidad del Desarrollo.
Investigadora Adjunta CRHIAM.



Alex Godoy Faúndez

Biólogo en Bioprocesos.
Doctor en Ciencias de la Ingeniería,
mención Ingeniería Química y Bioprocesos,
Pontificia Universidad Católica de Chile.
Profesor Asociado, Facultad de Ingeniería,
Universidad del Desarrollo.
Centro de Investigación en Sustentabilidad y Gestión Estratégica
de Recursos, Facultad de Ingeniería, Universidad del Desarrollo.

RESUMEN

En Chile, la agricultura es el principal consumidor de agua, siendo la agricultura de riego un subsector que aporta una porción significativa del PIB agrícola y de las exportaciones del sector. Sin embargo, esta industria enfrenta desafíos en la gestión del agua, especialmente con la expansión de áreas irrigadas que no se ha traducido en ahorro del recurso. Esta serie comunicacional aborda la intersección entre la gestión del agua y la sostenibilidad hídrica en la producción agrícola en Chile. Se subraya la relevancia del riego en la agricultura, que permite una producción resiliente y aumentada, así como en las externalidades en el ambiente, especialmente en el aumento sostenido de la demanda de agua y en la presión sobre los ecosistemas acuáticos y terrestres. A lo largo de los años, ha habido una evolución en las políticas y normativas que regulan el riego, con una reciente inclinación hacia la sostenibilidad hídrica, reflejada en modificaciones al Código de Aguas y la Ley N° 18.450. En este contexto se discute el impacto del cambio climático en la disponibilidad hídrica, la necesidad de aumentar la eficiencia en el uso del agua desde una perspectiva económica y la gestión integrada del agua para mitigar conflictos y promover una agricultura sostenible y resiliente.

INTRODUCCIÓN

La agricultura representa el principal uso del agua a nivel mundial, siendo la agricultura irrigada la responsable de cerca del 40% de las tierras dedicadas a la producción agrícola. Durante la última parte del siglo XX, se ha observado una rápida expansión de las áreas irrigadas, alcanzando una superficie global de alrededor de 3.640.000 km² (Meier *et al.*, 2018).

Los sistemas de cultivo de riego contribuyen a una producción resiliente, al tiempo que aumentan su productividad agrícola. La expansión del riego ha sido una medida eficaz de adaptación agrícola en respuesta al cambio climático, especialmente en zonas áridas y semiáridas de alto estrés hídrico (Rosa *et al.*, 2020). De hecho, el uso del riego permite un suministro confiable de agua y también puede aliviar el estrés térmico de los cultivos, especialmente para las regiones productoras de alimentos que se verán afectadas por el cambio climático (Zaveri & B. Lobell, 2019). Además, proporciona mayores rendimientos que la agricultura de secano.

Si bien, el riego ha significado un eficaz instrumento de desarrollo agrícola a nivel global, en gran medida, su implementación se ha caracterizado por una visión pragmática focalizada en el uso eficiente del recurso y en el aumento de la productividad. Esta visión, ha derivado en diversas externalidades sobre el medioambiente y los ecosistemas que recientemente se han comenzado a tomar en cuenta: la expansión del riego ha aumentado la presión sobre los recursos mundiales de agua dulce, lo que a menudo ha conducido a la sobreexplotación del recurso (Jägermeyr *et al.*, 2017; Rosa *et al.*, 2019).

Estudios recientes han identificado que grandes volúmenes de agua de riego aplicada tienen impactos biogeofísicos y biogeoquímicos en el sistema terrestre (McDermid *et al.*, 2023). Así mismo, se ha relacionado al riego en la agricultura como factor del agotamiento de las aguas subterráneas (Famiglietti, 2014; Thomas & Famiglietti, 2019), el aumento de la salinidad del suelo (Kniffin *et al.*, 2020) y la lixiviación de nutrientes en los sistemas agrícolas (Pokhrel *et al.*, 2016), entre otros impactos ambientales. Además, la creciente demanda de riego ha desafiado la gestión del agua a lo largo del siglo XX, impulsando en parte una mayor construcción de embalses y desvíos de agua que también tienen impactos hidrológicos aguas abajo (Vanderkelen *et al.*, 2021).

En Chile, las tendencias son similares a las observadas a escalas globales. El sector agrícola es el principal consumidor de agua en el país, pues utiliza cerca del 82% del total de agua disponible con fines consuntivos (DGA, 2016). De acuerdo con el VIII Censo Nacional Agropecuario y Forestal del año agrícola 2020-2021, esta proporción ha permitido el riego de 902.158 hectáreas en la actualidad, lo que representa más de un 40% del total de tierras cultivadas (sin considerar terrenos productivos no trabajados) (INE, 2022). Así también, el aumento de la superficie bajo riego está acompañado del aumento en la eficiencia promedio del riego desde un promedio de 48,6% en 1997 a 56,9% en 2007 (Martin & Saavedra, 2018), principalmente debido a la disminución en el área con riego gravitacional y un aumento en el área con sistemas más eficientes como riego por aspersión y microriego (INE, 2007).

El riego ha tenido una función esencial en la competitividad del sector agrícola, tanto porque aumenta la cantidad producida como también porque reduce la exposición al riesgo a períodos secos. Las superficies irrigadas actualmente aportan entre el 60 y el 65% del PIB agrícola del país y aporta más del 80% de las exportaciones agrícolas (Donoso, 2021). Sin embargo, los aumentos en la eficiencia del riego no han generado ahorros ni reducciones en el consumo de agua por parte de los agricultores ya que estos aumentaron su superficie regada (Donoso, 2021; Jordan *et al.*, 2023). En este sentido, la expansión del regadío ha conllevado a la disminución de los caudales ecológicos en Chile (Scott *et al.*, 2014), de la conectividad ecológica y de los hábitats naturales. Así también, en ubicaciones concretas, provoca competencia por el recurso hídrico entre diferentes usuarios, como ha sido el caso de Petorca o la Ligua (Budds, 2020; Duran-Llacer *et al.*, 2020). Por lo tanto, la modernización del riego debe continuar por un nuevo camino, a través de políticas integradas que aborden los desafíos ambientales y sociales, sin que estas hagan inviable la actividad agrícola.



EVOLUCIÓN Y PERSPECTIVAS DEL RIEGO EN CHILE

Según datos del Atlas del Agua, Chile posee 1.251 ríos en 101 cuencas hidrográficas abarcando 756.102 km² de territorio (aguas superficiales y subterráneas). Adicionalmente existen 12.784 cuerpos de agua, entre lagos y lagunas, además de 24.114 glaciares.

Las cuencas en Chile presentan características y realidades heterogéneas de norte a sur. Por ejemplo, las cuencas de la zona Norte y Centro Norte presentan un mayor grado de sobreexplotación (Alvarez-Garretón *et al.*, 2023; FCH, 2019) y a menudo son más dependientes de recursos subterráneos. Donoso (2021) indica que el uso de aguas subterráneas ha aumentado a un ritmo exponencial en las últimas décadas y, en la actualidad, muchos acuíferos importantes se encuentran bajo una presión considerable, ya que las extracciones, predominantemente para uso agrícola, superan la recarga. Por ejemplo, Rinaudo & Donoso (2018) estimaron que el volumen extraído aumentó un 76% en el acuífero de Copiapó debido a aumentos en la eficiencia del riego que se tradujeron en un aumento del área irrigada y transferencias de Derechos de Agua a usuarios más intensivos.

La gestión sostenible de los recursos hídricos emerge, entonces, como una necesidad imperante para garantizar la continuidad y expansión de la actividad agrícola, sin menoscabo de los ecosistemas acuáticos y terrestres. Las prácticas agrícolas, como las mayores consumidoras de agua, desempeñan un papel crucial en la configuración de una gestión hídrica responsable.

En este contexto, es decisivo conocer la evolución que ha tenido la superficie irrigada en el país y entender cómo esta evolución se relaciona con los cambios estructurales que, dado diversos factores, muestra el sector. La Tabla 1, presenta la evolución de la superficie irrigada en Chile a partir de los resultados de los Censos agropecuarios de 1976, 1997, 2007 y 2021 (INE, 2007, 2022).

Tabla 1.
Evolución de superficie agrícola y superficie irrigada intercensal.

	1975-1976	1996-1997	2006-2007	2021-2022
Suelos cultivo	3.300.803	2.297.249		
Praderas mejoradas	1.312.163	1.010.048		
Total superficie agrícola	4.612.966	3.307.297	3.201.479	2.933.311
Terrenos no trabajados	1.282.686	442.934	353.036	920.000
Superficie irrigada	1.070.000	1.060.000	1.108.559	902.158
% sup irrigada*	32,12	37,01	38,92	44,81

Elaboración propia basada en INE (2007, 2021);

*El porcentaje de superficie irrigada se calculó en base a la siguiente ecuación:

$$\text{Superficie} = \frac{\text{Superficie irrigada}}{\text{Total superficie agrícola} - \text{Terrenos no trabajados}} * 100$$

La Tabla 1 muestra que la superficie regada en Chile ha tendido a mantenerse entre los períodos intercensales en el rango de 1.000.000 de hectáreas. Esta ha evolucionado desde 1.070.000 ha en 1976 a 902.158 ha de regadío en el último período censal. Si bien, se aprecia una disminución de la superficie irrigada de un -18,6% entre los últimos dos censos (2006-2007; 2021-2022), se observa también un aumento en la proporción de superficie irrigada desde un 32% en el período 1975 – 1976 a cerca de un 45% en el período 2021-2022 (Figura 1).

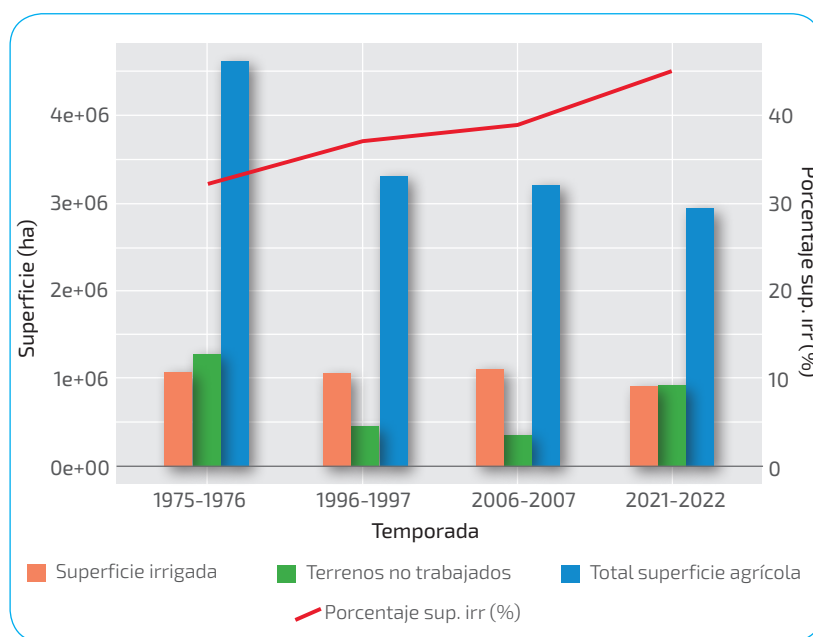


Figura 1.

Evolución de Superficie Agrícola total (barra azul), Superficie irrigada (barra roja), Terrenos no trabajados (barra verde) y Participación de la superficie irrigada respecto a la superficie agrícola total (línea roja).

Fuente: Elaboración propia.

Esta aparente contradicción en la tendencia puede ser explicada mediante la consideración de diversos factores que han impactado el sector silvoagropecuario en los últimos 15 años. En primera instancia, los datos evidencian que, simultáneamente a la disminución en la superficie irrigada, la superficie agrícola también ha experimentado una reducción del -8.4% entre los dos últimos períodos censales (INE, 2022). Este dato explica el incremento proporcional de la superficie irrigada en relación con la superficie agrícola total. Adicionalmente, la Figura 1 ilustra un notable incremento de terrenos no trabajados en el último censo agropecuario. Esta tendencia puede ser atribuida, en gran medida, a las estrategias adoptadas por los agricultores en períodos de escasez hídrica, quienes en un contexto de restricción hídrica, asignan el recurso disponible a cultivos de mayor valor, optando por no utilizar la totalidad de su superficie como una medida adaptativa frente al cambio climático (Fernández *et al.*, 2023).

A causa de la sequía que ha afectado especialmente a las zonas norte y centro del país, las superficies irrigadas por sistemas tradicionales han visto una reducción en su extensión, lo cual se correlaciona con la disminución de superficie dedicada a tipos de cultivos que comúnmente son sostenidos por estos sistemas de riego (INE, 2022; Jordan *et al.*, 2021).

El período en análisis muestra un cambio importante en la evolución de la eficiencia del riego en los últimos 15 años. En un análisis preliminar de los datos del último censo de 2021, la eficiencia podría haber aumentado a cerca de un 64% considerando la disminución de los sistemas de riego de baja eficiencia como surcos y tendido durante los años de sequía, como también de las continuas mejoras impulsadas por políticas de fomento a la inversión privada en obras de riego. Estas mejoras en los sistemas de riego han disminuído el volúmen de agua usado por hectárea (aumentando la eficiencia del riego), disminuyendo el total de agua neta utilizada. En gran parte, este desarrollo del área irrigada como el aumento en el uso eficiente ha sido gracias al marco institucional para el riego, destacándose la Ley N° 18.450 por su buena evaluación en términos económicos y de eficiencia (DIPRES, 2006; Jordan *et al.*, 2023; Martin & Saavedra, 2018).

EVOLUCIÓN DEL MARCO NORMATIVO Y EL ENFOQUE HACIA LA SOSTENIBILIDAD HÍDRICA EN CHILE

El desarrollo del riego se basa en: Código de Aguas de 1981; Ley de Bases Generales del Medio Ambiente (Ley Nº 19.300) y su Reglamento; DFL Nº 1.123, sobre ejecución de obras de riego por el Estado; EL D.S. MOP 900 (Ley de Concesiones) y La Ley Nº 18.450, para el fomento a la inversión privada en obras de riego y drenaje (Donoso, 2021).

Recientemente varios de estos instrumentos normativos han sufrido modificaciones que apoyan una transformación hacia la sostenibilidad hídrica. Entre estas, se destacan las modificaciones sufridas en los últimos años, tanto del Código de Aguas como también de la Ley Nº 18.450 de Fomento a la Inversión Privada en Obras Menores de Riego y Drenaje. La Tabla 2, presenta un resumen de algunas de las recientes modificaciones que ambas normas regulatorias han sufrido en busca de la sostenibilidad hídrica.

Tabla 2.
Reformas de sostenibilidad hídrica en el Código de Aguas y la Ley Nº 18.450.

Normas Regulatorias	Características Generales	Reformas relacionadas a Sostenibilidad Hídrica
Código de Aguas 1981	Establece el marco legal para la gestión y utilización de los recursos hídricos en el país. El Código introdujo una estructura de derechos de aprovechamiento de aguas, que permite la propiedad privada y la transacción en un mercado de aguas. Según esta normativa, en los inicios del Código, el agua se considera un bien económico y el Estado tiene el rol de administrador del recurso, otorgando derechos de uso a los particulares.	Varias reformas se han desarrollado en los últimos años para abordar temas relacionados a la conservación del recurso y el acceso equitativo al agua. En 2005, la Ley Nº 20.017, modifica el Código de Aguas incorporando la protección de caudales mínimos y estableciendo que estos no superen el 20% del caudal medio anual. En el año 2022, la Ley Nº 21.435, reforma el Código de Aguas adicionando un mayor enfoque en la preservación ecosistémica, específicamente, protegiendo y fortaleciendo la función que cumple el agua dulce en los ecosistemas terrestres. Adicionalmente, se prohibió la constitución de nuevos derechos en glaciares, áreas declaradas bajo protección oficial de la biodiversidad y humedales urbanos, para proteger la función ecosistémica del recurso hídrico. Así mismo, se introdujeron disposiciones para contribuir a un uso sustentable de las aguas.

Ley N° 18.450	Vigente desde 1985, tiene por objetivo el fomento directo a la inversión privada en proyectos de riego y drenaje tanto para obras comunitarias, como para obras individuales. Se propone además que agricultores y Organizaciones de Usuarios de Agua (OUA), con énfasis en los pequeños y medianos agricultores, aumenten su superficie regada y/o mejoren la seguridad y eficiencia del riego.	En septiembre de 2023, fue publicada la Ley N° 21.597 que modifica y prorroga la vigencia de la Ley N° 18.450. Entre sus modificaciones la nueva ley incorpora varios artículos relacionados con la dimensión medioambiental. Entre estos, se resalta que las bonificaciones buscan promover la seguridad hídrica, eficiencia en el uso del agua, expansión de áreas de riego, seguridad alimentaria, mejoramiento de sistemas de riego, adaptación al cambio climático, desarrollo rural sostenible, y conservación ecosistémica. Además, se enfatiza que se bonificarán proyectos que incorporen objetivos ambientales, como el uso eficiente y ahorro del agua, reutilización de aguas residuales, conservación de la biodiversidad, suelo y agua, y proyectos basados en la naturaleza. Así mismo, se permite el establecimiento de medidas especiales durante situaciones excepcionales de escasez hídrica, requiriendo validación ante la Comisión Nacional de Riego.
---------------------------------	---	--

El Código de Aguas de Chile, promulgado en 1981 e implementado a través de una serie de leyes y decretos complementarios, establece el marco legal para la gestión y utilización de los recursos hídricos en el país. Específicamente, establece la asignación de agua a través de derechos de uso de agua, que definen la cantidad de agua que los particulares pueden utilizar y el momento en que pueden utilizarla. Diversas modificaciones se han realizado al Código de Aguas durante los últimos años, tanto a artículos específicos (CNC, 2006; 2009, 2011, 2018) como también modificaciones al texto principal (en 2005 y 2022). Desde la enmienda del Código de Aguas de 2005, los derechos de agua pueden asignarse sólo después de que se haya asegurado un flujo ecológico estipulado. Mientras que después de la enmienda de 2022, la autoridad puede limitar el ejercicio de nuevos derechos de agua para la preservación del ecosistema, sostenibilidad de acuíferos y, para promover un equilibrio entre eficiencia y seguridad hídrica. Adicionalmente, en áreas de biodiversidad protegida (por ejemplo, santuarios naturales) la DGA puede requerir protección de caudales ecológicos para los derechos ya asignados.

Por otra parte, la Ley N° 18.450 vigente desde 1985, consiste en un incentivo a la inversión privada en proyectos de riego y drenaje tanto para infraestructura comunitaria (canales de distribución de agua y drenaje) como para inversiones a nivel agrícola en tecnologías de riego. El objetivo de esta ley es que los agricultores y OÜAs, con énfasis en los pequeños y medianos agricultores, incrementen su superficie irrigada y mejoren la eficiencia del riego. Se trata de una herramienta para promover la inversión privada en obras de riego y drenaje en función de la demanda y cuya operación sólo genera desembolso fiscal una vez ejecutadas las obras. Su propósito es aumentar las superficies irrigadas, mejorar el manejo inadecuado del riego, promover la eficiencia del riego y reducir los problemas de drenaje.

La Ley 18.450 ha contribuido a un aumento significativo de la superficie recién irrigada del país, así como de la superficie con sistemas de riego eficientes. En la última década la implementación se ha dirigido a pequeños y medianos productores, cumpliendo con el objetivo del Ministerio de Agricultura de priorizar estos sectores a través de políticas públicas sectoriales.

En septiembre de 2023, fue publicada la Ley N° 21.597 que modifica y prorroga la vigencia de la Ley N° 18.450. Entre las modificaciones, la nueva ley del riego N° 18.450 incorpora varios artículos relacionados con la sostenibilidad hídrica para la producción alimentaria. La versión actual es la primera que explicita como su objetivo principal *“contribuir a la seguridad hídrica, a la eficiencia en el uso del agua, a la incorporación de nuevas zonas de riego, a la seguridad y soberanía alimentaria, al mejoramiento continuo de los sistemas de riego, a la adaptación al cambio climático, al desarrollo rural y territorial sostenible y equitativo y a la conservación ecosistémica”*, incorporando explícitamente elementos de conservación, adaptación y sostenibilidad.

DESAFÍOS Y OPORTUNIDADES

La sostenibilidad hídrica en la producción de alimentos es un elemento clave para garantizar la seguridad alimentaria y la resiliencia de la agricultura ante escenarios adversos. En este sentido, es crucial el análisis de los desafíos y oportunidades que enfrentará el sector agrícola nacional en relación con la gestión y uso del agua. Este análisis permite no solo entender las dinámicas y presiones sobre los recursos hídricos, sino también vislumbrar las oportunidades que pueden ser capitalizadas para transitar hacia una agricultu-

ra más sostenible y resiliente. En el siguiente apartado, se desglosarán tres desafíos primordiales que se entrecruzan con la sostenibilidad hídrica en la producción agrícola: 1) El cambio climático y su impacto en la disponibilidad de agua; 2) El uso eficiente del agua en la agricultura desde una perspectiva económica; y 3) La gestión integrada y los conflictos por el uso del agua entre sectores y comunidades.

CAMBIO CLIMÁTICO Y SU IMPACTO EN LA DISPONIBILIDAD DE AGUA

El cambio climático redefinirá las condiciones de disponibilidad hídrica en las diferentes regiones del país, lo que afectará de diferentes formas la producción alimentaria en Chile (Fernández *et al.*, 2023). La intensificación de fenómenos extremos y la alteración en los patrones de precipitación, cambiarán no solo características biofísicas de las cuencas sino también el comportamiento de los usuarios de agua. En este contexto, es importante reconsiderar prácticas cuyo foco se centran en la eficiencia hídrica dentro de un marco más amplio que implica la conservación de los ecosistemas, sus servicios y por ende la sostenibilidad del recurso.

Sumado a las probables disminuciones de las precipitaciones, el incremento demográfico ampliará la brecha entre la oferta y demanda de agua, lo que plantea un desafío creciente para la gestión hídrica en el ámbito agrícola. Este desequilibrio, resalta la necesidad de revisar y adaptar los esquemas de asignación y uso del agua en el sector silvoagropecuario, en favor de garantizar una producción alimentaria sostenible y resiliente (Barría *et al.*, 2021).

Una de las consecuencias que se espera traiga el cambio climático a nuestro país, es un probable desplazamiento o intensificación del uso actual de la tierra hacia el sur de las zonas tradicionalmente agrícolas, lo que implica una reevaluación de las áreas agrícolas tradicionales y la adaptación de las prácticas de cultivo (Cristini, 2023). La vulnerabilidad del sector silvoagropecuario ante estas alteraciones demanda estrategias de adaptación con visiones amplias más allá de la eficiencia. Las regiones de más al sur del país, que no han sufrido los niveles de restricción experimentado por las regiones del centro y centronorte, deben comenzar a prepararse ante escenarios futuros probablemente más calurosos y de menores precipitaciones y mayor cantidad de días secos. Ante estos escenarios, las estrategias de adaptación deben basarse en el análisis de los errores y aciertos cometidos años atrás

ante contextos de restricción hídrica, buscando la eficiencia, sin perder el foco en la sostenibilidad del recurso.

El escenario de cambio climático refuerza la importancia de transitar hacia una gestión hídrica sostenible en la agricultura. La adecuada asignación y uso eficiente del agua, junto con la adaptación (especies, variedades, manejo y fechas de siembra, entre otras) a las nuevas condiciones climáticas, se posicionan como pilares para alcanzar una producción de alimentos sostenible, resiliente y acorde a los desafíos futuros.

EFICIENCIA DEL USO DE AGUA EN LA AGRICULTURA DESDE LA PERSPECTIVA ECONÓMICA

La eficiencia del uso de agua (EUA) puede tener varias interpretaciones. En términos físicos, EUA se define como la relación entre la cantidad de agua utilizada por un cultivo y la cantidad de agua aplicada o como la relación entre el rendimiento del cultivo y la cantidad de agua aplicada para el cultivo (Abd El-Wahed & Ali, 2013). Sin embargo, la EUA también puede definirse desde una perspectiva económica como el retorno económico por unidad de agua utilizada para la producción de cultivos (Azad *et al.*, 2015). Desde esta segunda perspectiva, se ha destacado la necesidad de aumentar la productividad del agua en la agricultura como uno de los factores más importantes para lograr una mayor productividad y sostenibilidad agrícola.

Estudios que han medido la eficiencia en el uso del agua (EUA) desde una perspectiva económica han determinado que hoy en día existe, en promedio, una baja eficiencia del uso del agua. Molinos-Senante *et al.* (2016) indicaron que la puntuación EUA promedio para los agricultores de la Cuenca del Limarí estaba cerca de 0,450, a pesar de que en términos físicos la eficiencia del riego promedio de la cuenca alcanzaba cerca de un 69%.

El estudio de Molino-Senante *et al.* (2016) muestra el potencial de mejorar la eficiencia en el uso del agua en la agricultura de regadío, manteniendo al mismo tiempo las ganancias en la cuenca del Limarí. En este sentido, es fundamental llevar a cabo estudios similares en otras cuencas del país que permitan identificar, a nivel de explotación, aquellas con mayor espacio de mejora, teniendo a su vez, puntos realistas de referencia. Los resultados de estudios como este, permiten generar información con el potencial de ser

transferido y entendido por los mismos agricultores, ya que es posible proporcionar objetivos realistas y puntos de referencia relevantes que ayudarán a los agricultores a implementar mejores prácticas desde la perspectiva del riego.

Finalmente, la información generada por este tipo de estudios y la diferencia de las puntuaciones de eficiencia en el uso del agua entre agricultores, entrega información clave para los tomadores de decisiones. La información detallada de este tipo de estudios puede ayudar a focalizar y mejorar el diseño de políticas para mejorar la eficiencia en el uso del agua, así como para garantizar el riego sostenible.

GESTIÓN INTEGRADA Y CONFLICTOS POR EL USO DEL AGUA

La gestión integral del agua y los conflictos emergentes en torno a su uso representan desafíos cruciales en el camino hacia la sostenibilidad hídrica en la producción de alimentos en Chile. Los conflictos por el agua en el país generalmente surgen debido a los impactos sobre la calidad o disponibilidad del recurso hídrico para los usuarios y el medio ambiente. Dichos conflictos se manifiestan tanto en la calidad del agua que recibe la agricultura, como en los efectos que la agricultura tiene sobre la calidad del agua. Adicionalmente, la disponibilidad de agua, especialmente en regiones propensas a la escasez, también es fuente de disputas (Rivera *et al.*, 2016). Estos conflictos, agravados por las proyecciones de cambio climático y una mayor frecuencia de sequías, tienen el potencial de repercutir en los mercados internacionales, enfatizando la urgencia de una gestión sostenible e integrada del agua.

En este contexto, es imperativo mejorar la coordinación entre instituciones públicas y privadas para una gestión sostenible del recurso hídrico, con una visión integrada de los aspectos sociales y biofísicos. Alcanzar objetivos comunes y mejorar los flujos de información entre instituciones públicas y privadas (Engler *et al.*, 2021), además de fortalecer redes para mitigar conflictos en períodos de baja disponibilidad de agua, son estrategias clave (Finger & Borer, 2013).

En este sentido, la correcta utilización de datos e información sobre el uso del agua, apoyada por la digitalización, constituye la base para un modelo económico sostenible a largo plazo. Además, es crucial mejorar la organiza-

ción y transparencia de datos en la gestión del agua entre todos los participantes en la cadena agroalimentaria y las administraciones públicas (Costumero *et al.*, 2017).

Es vital capacitar y educar a las organizaciones de usuarios de agua respecto a los objetivos de sostenibilidad y su relación con los servicios ecosistémicos, especialmente aquellos proporcionados por ecosistemas ligados al agua (como ríos o humedales) o agro-ecosistemas. Las recientes modificaciones al marco normativo en torno al riego, incluyendo la reforma al Código de Aguas que integra la preservación ecosistémica, y la modificación a la Ley N° 18.450, para el fomento a la inversión privada en obras de riego y drenaje, son pasos iniciales hacia esta dirección, y reflejan una orientación positiva hacia la integración de la sostenibilidad en la gestión del agua en la agricultura chilena.



CONCLUSIÓN

En la presente serie comunicacional, se ha presentado la evolución, el estado actual y las perspectivas futuras del riego en la agricultura chilena, enmarcado en un contexto global y nacional. En este contexto, el riego juega un rol clave en la seguridad alimentaria y la resiliencia agrícola, especialmente en zonas áridas y semiáridas, demostrando ser una respuesta efectiva a los desafíos impuestos por el cambio climático. Sin embargo, su expansión y manejo no está exento de desafíos y externalidades, planteando una serie de interrogantes sobre la sostenibilidad de su implementación a largo plazo, especialmente en escenarios de recursos hídricos cada vez más escasos.

La realidad chilena muestra una tendencia de sobreexplotación y competencia por el recurso hídrico, que se agrava con el cambio climático y el crecimiento demográfico. Por esto, se hace necesario transitar hacia una gestión hídrica sostenible, que no solo permita mantener y potenciar la productividad agrícola, sino también preservar los ecosistemas y garantizar la equidad en el acceso y uso del agua. En este sentido, las modificaciones recientes al marco normativo, como la reforma al Código de Aguas y la Ley N° 18.450, son pasos hacia una gestión hídrica más sostenible y equitativa.

El análisis realizado en este estudio ha permitido identificar tres desafíos cruciales que se entrecruzan con la sostenibilidad hídrica en la producción agrícola: el cambio climático y su impacto en la disponibilidad de agua, la eficiencia en el uso del agua desde una perspectiva económica, y la gestión integrada de los recursos hídricos. El cambio climático, y sus probables consecuencias, obliga a una reevaluación de las prácticas agrícolas y de riego, enfatizando la necesidad de adaptación y mejora en la eficiencia del uso del agua.

Desde una perspectiva económica, se subraya la importancia de maximizar la productividad del agua, equilibrando las ganancias económicas con la sostenibilidad del recurso. La eficiencia en el uso del agua emerge como una métrica multidimensional que requiere ser analizada y optimizada a lo largo de diversas cuencas y sistemas agrícolas del país, proporcionando así información valiosa para los agricultores y los diseñadores de políticas.

Por otro lado, la gestión integrada y la resolución de conflictos por el uso del agua entre diferentes actores y sectores, se presenta como un pilar fundamental para alcanzar una sostenibilidad hídrica en la producción de alimentos. Es indispensable mejorar la coordinación entre instituciones, fortalecer las redes de comunicación y colaboración, y fomentar la educación y capacitación en temas de sostenibilidad hídrica y conservación ecosistémica.

En resumen, la modernización del riego, la gestión sostenible del agua y la adaptación al cambio climático, no son solo desafíos técnicos o tecnológicos, sino también desafíos normativos, institucionales y culturales que requieren una visión integrada y de largo plazo. Este análisis contribuye a una comprensión más profunda de la complejidad y las múltiples aristas que envuelven la gestión del agua en la agricultura chilena, sentando bases para futuras investigaciones y acciones estratégicas que nos lleven hacia un futuro agrícola más sostenible y equitativo en Chile.

REFERENCIAS

- Abd EL-Wahed, M. H., & Ali, E. A. 2013. Effect of irrigation systems, amounts of irrigation water and mulching on corn yield, water use efficiency and net profit. *Agricultural Water Management*, 120, 64-71 pp. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2012.06.017>
- Alvarez-Garreton, C., Boisier, J. P., Garreaud, R., González, J., Rondanelli, R., Gayó, E., & Zambrano-Bigiarini, M. 2023. *The unsustainable use of groundwater conceals a "Day Zero"*. <https://hess.copernicus.org/pre-prints/hess-2023-245/>
- Azad, M. A., S, Ancev, T., & Hernández-sancho, F. 2015. Efficient Water Use for Sustainable Irrigation Industry. *Water Resources Management*, 29(5), 1683-1696 pp. <https://doi.org/10.1007/s11269-014-0904-8>
- Barría, P., Chadwick, C., Ocampo-Melgar, A., Galleguillos, M., Garreaud, R., Díaz-Vasconcellos, R., Poblete, D., Rubio-Álvarez, E., & Poblete-Caballero, D. 2021. Water management or megadrought: What caused the Chilean Aculeo Lake drying? *Regional Environmental Change*, 21(1), 1-15 pp. <https://doi.org/10.1007/S10113-021-01750-W/FIGURES/6>
- Budds, J. 2020. Securing the market: Water security and the internal contradictions of Chile's Water Code. *Geoforum*, 113, 165-175 pp. <https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2018.09.027>
- Costumero, R., Sánchez, J., García-Pedrero, Á., Rivera, D., Lillo, M., Gonzalo-Martín, C., & Menasalvas, E. 2017. Geography of legal water disputes in Chile. *Journal of Maps*, 13(1), 7-13 pp. <https://doi.org/10.1080/17445647.2016.1252803>
- Cristini, M. 2023. *El sector agropecuario extensivo en América Latina: Oportunidades y desafíos del cambio climático y la protección de la biodiversidad* [workingPaper]. CAF. Disponible en: <https://scioteca.caf.com/handle/123456789/2035>
- DGA. 2016. *Atlas del Agua*. Disponible en: <https://dga.mop.gob.cl/DGA-Documentos/Atlas2016parte1-17marzo2016b.pdf>
- DIPRES. 2006. *Informe final de evaluación programa de bonificación por inversiones de riego y drenaje Ley N° 18.450*. Disponible en: http://bibliotecadigital.dipres.gob.cl/bitstream/handle/11626/17083/Bonificaci%C3%B3n%20Inversiones%20Riego%20y%20Drenaje_Inf_Final.pdf

- Donoso, G. 2021. Management of Water Resources in Agriculture in Chile and its Challenges. *International Journal of Agriculture and Natural Resources*, 48(3), 171-185 pp. <https://doi.org/10.7764/ijanr.v48i3.2328>
- Duran-Llacer, I., Munizaga, J., Arumí, J. L., Ruybal, C., Aguayo, M., Sáez-Carrillo, K., Arriagada, L., & Rojas, O. 2020. Lessons to Be Learned: Groundwater Depletion in Chile's Ligua and Petorca Watersheds through an Interdisciplinary Approach. *Water*, 12(9), Article 9. <https://doi.org/10.3390/w12092446>
- Engler, A., Melo, O., Rodríguez, F., Peñafiel, B., & Jara-Rojas, R. 2021. Governing Water Resource Allocation: Water User Association Characteristics and the Role of the State. *Water*, 13(17), 2436. <https://doi.org/10.3390/w13172436>
- Famiglietti, J. S. 2014. The global groundwater crisis. *Nature Climate Change*, 4. <https://doi.org/10.1038/nclimate2425>
- FCH. 2019. *Radiografía del Agua. Brecha y Riesgo Hídrico en Chile*. 144 pp.
- Fernández, F. J., Vásquez-Lavín, F., Ponce, R. D., Garreaud, R., Hernández, F., Link, O., Zambrano, F., & Hanemann, M. 2023. The economics impacts of long-run droughts: Challenges, gaps, and way forward. *Journal of Environmental Management*, 344, 118726. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118726>
- Finger, R., & Borer, A. 2013. Cooperative Management of a Traditional Irrigation System in the Swiss Alps. *Social Sciences*, 2(1), 1-19 pp. <https://doi.org/10.3390/socsci2010001>
- INE. 2007. *Cambios Estructurales en la Agricultura Chilena—Análisis Intercensal 1976—1997—2007*. 72 pp. Disponible en: https://www.ine.cl/docs/default-source/censo-agropecuario/publicaciones-y-anuarios/2007/cambios-estructurales-en-la-agricultura-chilena---analisis-intercensal-1976-1997-2007.pdf?sfvrsn=9dfd0a74_7
- INE. 2022. Resultados preliminares VIII Censo Agropecuario y Forestal 2021. Disponible en: <https://bibliotecadigital.odepa.gob.cl/bitstream/handle/20.500.12650/71339/resultadosPreliminaresCAF2021.pdf>
- Jägermeyr, J., Pastor, A., Biemans, H., & Gerten, D. 2017. Reconciling irrigated food production with environmental flows for Sustainable Development Goals implementation. *Nature Communications*, 8(1), Article 1. <https://doi.org/10.1038/ncomms15900>

- Jordan, C., Donoso, G., & Speelman, S. 2021. Measuring the effect of improved irrigation technologies on irrigated agriculture. A study case in Central Chile. *Agricultural Water Management*, 257, 107160. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107160>
- Jordan, C., Donoso, G., & Speelman, S. 2023. Irrigation subsidy policy in Chile: Lessons from the allocation, uneven distribution and water resources implications. *International Journal of Water Resources Development*, 39(1), 133-154 pp. <https://doi.org/10.1080/07900627.2021.1965964>
- Kniffin, M., Bradbury, K. R., Fienen, M., & Genskow, K. 2020. Groundwater Model Simulations of Stakeholder-Identified Scenarios in a High-Conflict Irrigated Area. *Groundwater*. <https://doi.org/10.1111/gwat.12989>
- Martin, F., & Saavedra, F. 2018. Irrigated Agriculture. En G. Donoso (Ed.), *Water Policy in Chile Springer*, 165-178 pp. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-76702-4>
- McDermid, S., Nocco, M., Lawston-Parker, P., Keune, J., Pokhrel, Y., Jain, M., Jägermeyr, J., Brocca, L., Massari, C., Jones, A. D., Vahmani, P., Thiery, W., Yao, Y., Bell, A., Chen, L., Dorigo, W., Hanasaki, N., Jasechko, S., Lo, M.-H., Yokohata, T. 2023. Irrigation in the Earth system. *Nature Reviews Earth & Environment*, 4(7), Article 7. <https://doi.org/10.1038/s43017-023-00438-5>
- Meier, J., Zabel, F., & Mauser, W. 2018. A global approach to estimate irrigated areas – a comparison between different data and statistics. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(2), 1119-1133 pp. <https://doi.org/10.5194/hess-22-1119-2018>
- Molinos-Senante, M., Donoso, G., & Sala-Garrido, R. 2016. Are participants in markets for water rights more efficient in the use of water than non-participants? A case study for Limarí Valley (Chile). *Environmental Science and Pollution Research*, 23(11), 10665-10678 pp. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-6187-2>
- Pokhrel, Y. N., Hanasaki, N., Wada, Y., & Kim, H. 2016. *Recent progresses in incorporating human land–water management into global land surface models toward their integration into Earth system models*. <https://doi.org/10.1002/wat2.1150>
- Rinaudo, J. D., & Donoso, G. 2018. State, market or community failure? Untangling the determinants of groundwater depletion in Copiapó (Chile). <https://doi.org/10.1080/07900627.2017.1417116>, 35(2), 283-304.

- Rivera, D., Godoy-Faúndez, A., Lillo, M., Alvez, A., Delgado, V., Gonzalo-Martín, C., Menasalvas, E., Costumero, R., & García-Pedrero, Á. 2016. Legal disputes as a proxy for regional conflicts over water rights in Chile. *Journal of Hydrology*, 535, 36–45 pp. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.01.057>
- Rosa, L., Chiarelli, D. D., Sangiorgio, M., Beltran-Peña, A. A., Rulli, M. C., D'Odorico, P., & Fung, I. 2020. Potential for sustainable irrigation expansion in a 3 °C warmer climate. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117(47), 29526–29534. <https://doi.org/10.1073/pnas.2017796117>
- Rosa, L., Chiarelli, D. D., Tu, C., Rulli, M. C., & D'Odorico, P. 2019. Global unsustainable virtual water flows in agricultural trade. *Environmental Research Letters*, 14(11), 114001. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab4bfc>
- Scott, C. A., Vicuña, S., Blanco-Gutiérrez, I., Meza, F., & Varela-Ortega, C. 2014. Irrigation efficiency and water-policy implications for river basin resilience. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18, 1339–1348. <https://doi.org/10.5194/hess-18-1339-2014>
- Thomas, B., F., & Famiglietti, J. S. 2019. *Identifying Climate-Induced Groundwater Depletion in GRACE Observations | Scientific Reports*. <https://www.nature.com/articles/s41598-019-40155-y>
- Vanderkelen, I., van Lipzig, N. P. M., Sacks, W. J., Lawrence, D. M., Clark, M. P., Mizukami, N., Pokhrel, Y., & Thiery, W. 2021. Simulating the Impact of Global Reservoir Expansion on the Present-Day Climate. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 126(16), e2020JD034485. <https://doi.org/10.1029/2020JD034485>
- Zaveri, E., & B. Lobell, D. 2019. The role of irrigation in changing wheat yields and heat sensitivity in India. *Nature Communications*, 10(1), Article 1. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-12183-9>



CRHIAM

CENTRO DE RECURSOS HÍDRICOS PARA LA AGRICULTURA Y LA MINERÍA

ANID/FONDAP/15130015

ANID/FONDAP/1523A0001

SOSTENIBILIDAD HÍDRICA EN LA PRODUCCIÓN DE ALIMENTOS

DESAFÍOS Y OPORTUNIDADES DE LA AGRICULTURA EN CHILE



Universidad de Concepción



UNIVERSIDAD
DE LA FRONTERA



Universidad del Desarrollo
Universidad de Excelencia



Serie Comunicacional CRHIAM