

Informe  
Proyecto  
ARCLIM

# Agri- cultura



**ARCLIM**  
Atlas de Riesgo Climático  
Chile



## Equipo realizador:

### Francisco Meza

Centro de Cambio Global,  
Pontificia Universidad Católica de Chile.

### David Morales

Centro de Cambio Global,  
Pontificia Universidad Católica de Chile.

### Diego González

Centro de Cambio Global,  
Pontificia Universidad Católica de Chile.

### Katherine Duarte

Centro de Cambio Global,  
Pontificia Universidad Católica de Chile.

### Valentina Jara

Centro de Cambio Global,  
Pontificia Universidad Católica de Chile.

### Patricio Sandaña

Universidad Austral de Chile.

Santiago, Chile - 2020



### Este informe debe citarse de la siguiente manera:

Meza, F.; Morales, D.; González, D.; Duarte, K.; Jara, V. & Saldaña, P., 2020. Informe Proyecto ARClím: Agricultura. Centro de Cambio Global UC coordinado por Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia y Centro de Cambio Global UC para el Ministerio del Medio Ambiente a través de La Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ). Santiago, Chile.

## Preparado para:



ARClím es un proyecto del Ministerio del Medio Ambiente del Gobierno de Chile apoyado por el Programa Mundial de Evaluación y Gestión de Riesgos para la Adaptación al Cambio Climático (Pérdidas y Daños) por encargo del Ministerio Federal de Cooperación Económica y Desarrollo (BMZ).

## Coordinado por:



Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR2)  
ANID/FONDAP/15110009



Centro Interdisciplinario de Cambio Global UC  
de la Pontificia Universidad Católica de Chile

## Desarrollado por:



Universidad Austral de Chile

Informe  
Proyecto  
ARCLIM

# Agri- cultura

**ARCLIM**  
Atlas de Riesgo Climático  
Chile



# ÍNDICE DE CONTENIDOS

Pág.

**1 1. Resumen Ejecutivo**

**4 2. Introducción**

**7 3. Metodología**

7 3.1 Metodología general utilizada para estimación de Riesgo en sistemas agrícolas.

8 3.2 Amenaza, modelo de simulación de cultivo.

8 3.2.1 Suelo.

9 3.2.2 Clima.

10 3.2.3 Manejo agronómico.

10 3.3 Sensibilidad.

11 3.4 Capacidad adaptativa.

13 3.5 Subsistema cultivos anuales.

14 3.5.1 Cadena de impacto.

14 3.5.2 Metodología específica para los cultivos de papa, maíz, trigo y frijol.

15 3.6 Subsistema praderas.

16 3.6.1 Cadena de impacto del cultivo de praderas.

Pág.

16 3.6.2 Cadena de impacto de la capacidad de carga animal de las praderas.

17 3.6.3 Metodología específica del cultivo de praderas.

19 3.6.4 Metodología específica de la capacidad de carga animal.

19 3.7 Subsistema frutales/viña.

19 3.7.1 Cadena de impacto.

19 3.7.2 Metodología específica para cultivos de almendros, nogales, manzanos y cerezos, y vid viñícola.

**22 4. Resultados**

22 4.1 Sensibilidad.

22 4.2 Capacidad adaptativa.

23 4.3 Amenazas subsistema cultivos anuales.

23 4.3.1 Amenaza.

30 4.3.2 Exposición.

33 4.3.3 Riesgo.

36 4.3.4 Oportunidad.

**Pág.**

36	4.4 Subsistema praderas.
36	4.4.1 Amenaza.
38	4.4.2 Exposición.
38	4.4.3 Riesgo.
40	4.4.4 Oportunidad.
41	4.5 Subsistema frutales/viña.
41	4.5.1 Amenaza.
44	4.5.2 Exposición.
46	4.5.3 Riesgo.
48	4.5.4 Oportunidad.
<b>51</b>	<b>5. Conclusiones</b>
<b>55</b>	<b>6. Referencias</b>

# ÍNDICE DE FIGURAS

Pág.		Pág.	
9	<b>Figura 1.</b> Ejemplo de clases de suelo según aptitud agrícola para la Región de Valparaíso.	34	<b>Figura 19.</b> Índice de Riesgo, cultivo de trigo con riego.
23	<b>Figura 2.</b> Índice de Sensibilidad para el territorio continental.	35	<b>Figura 20.</b> Índice de Riesgo, cultivo de papa en seco.
23	<b>Figura 3.</b> Índice de Capacidad adaptativa para el territorio continental.	35	<b>Figura 21.</b> Índice de Riesgo, cultivo de papa con riego.
24	<b>Figura 4.</b> Amenaza, delta del rendimiento (kg MS/ha/año) entre los períodos Futuro (2035 - 2064) y Presente (1980 -2009) para el cultivo de maíz.	36	<b>Figura 22.</b> Índice de Oportunidad, cultivo de frijol.
25	<b>Figura 5.</b> Amenaza, delta del rendimiento (kg MS/ha/año) entre los períodos Futuro (2035 - 2064) y Presente (1980 -2009) para el cultivo de frijol.	36	<b>Figura 23.</b> Amenaza, delta de biomasa de praderas (kg MS/ha/año) entre los períodos Futuro (2035 - 2064) y Presente (1980 - 2009).
26	<b>Figura 6.</b> Amenaza, delta del rendimiento (kg MS/ha/año) entre los períodos Futuro (2035 - 2064) y Presente (1980 -2009) para el cultivo de trigo en seco.	37	<b>Figura 24.</b> Amenaza, diferencia de capacidad de carga de bovinos lecheros (UA/ha/año) entre los períodos Futuro (2035 - 2064) y Presente (1980 - 2009).
27	<b>Figura 7.</b> Amenaza, delta del rendimiento (kg MS/ha/año) entre los períodos Futuro (2035 - 2064) y Presente (1980 -2009) para el cultivo de trigo bajo sistema de riego.	37	<b>Figura 25.</b> Amenaza, diferencia de capacidad de carga de bovinos de carne (UA/ha/año) entre los períodos Futuro (2035 - 2064) y Presente (1980 - 2009).
28	<b>Figura 8.</b> Amenaza, delta del rendimiento (kg MS/ha/año) entre los períodos Futuro (2035 - 2064) y Presente (1980 -2009) para el cultivo de papa en seco.	38	<b>Figura 26.</b> Amenaza, diferencia de capacidad de carga de ovinos (UA/ha/año) entre los períodos Futuro (2035 - 2064) y Presente (1980 - 2009).
29	<b>Figura 9.</b> Amenaza, delta del rendimiento (kg MS/ha/año) entre los períodos Futuro (2035 - 2064) y Presente (1980 -2009) para el cultivo de papa bajo sistema de riego.	38	<b>Figura 27.</b> Exposición. Superficie en hectáreas de praderas por comuna, en la Región de La Araucanía.
30	<b>Figura 10.</b> Exposición, superficie (hectáreas) de cultivo de maíz por comuna.	39	<b>Figura 28.</b> Índice de Riesgo, praderas y capacidad de carga (bovinos de leche, carne y ovinos), regiones del Biobío a Los Lagos.
30	<b>Figura 11.</b> Exposición, superficie (hectáreas) de cultivo de frijol por comuna.	40	<b>Figura 29.</b> Índice de Oportunidad, praderas, regiones del Biobío a Los Lagos.
31	<b>Figura 12.</b> Exposición, superficie (hectáreas) de cultivo de trigo en seco por comuna.	40	<b>Figura 30.</b> Índice de Oportunidad, capacidad de carga (bovinos de leche y carne), regiones del Biobío a Los Lagos.
31	<b>Figura 13.</b> Exposición, superficie (hectáreas) de cultivo de trigo con riego por comuna.	41	<b>Figura 31.</b> Índice de Oportunidad, capacidad de carga (ovinos), regiones del Biobío a Los Lagos.
32	<b>Figura 14.</b> Exposición, superficie (hectáreas) de cultivo de papa en seco por comuna.	42	<b>Figura 32.</b> Amenaza, reducción de producción entre los dos períodos simulados (1980-2009 y 2035-2064) en cultivos de almendras (kg/ha/año).
32	<b>Figura 15.</b> Exposición, superficie (hectáreas) de cultivo de papa con riego por comuna.	42	<b>Figura 33.</b> Amenaza, reducción de producción entre los dos períodos simulados (1980-2009 y 2035-2064) en cultivos de nueces (kg/ha/año).
33	<b>Figura 16.</b> Índice de Riesgo, cultivo de maíz.	43	<b>Figura 34.</b> Amenaza, reducción de producción entre los dos períodos simulados (1980-2009 y 2035-2064) en cultivos de manzana roja (kg/ha/año).
33	<b>Figura 17.</b> Índice de Riesgo, cultivo de frijol.	43	<b>Figura 35.</b> Amenaza, reducción de producción entre los dos períodos simulados (1980 - 2009 y 2035 - 2064) en cultivos de cereza (kg/ha/año).
34	<b>Figura 18.</b> Índice de Riesgo, cultivo de trigo en seco.		

**Pág.**

- 44** **Figura 36.** Exposición, superficie (hectáreas) de cultivo de almendras por comuna.
- 44** **Figura 37.** Exposición, superficie (hectáreas) de cultivo de nueces por comuna.
- 45** **Figura 38.** Exposición, superficie (hectáreas) de cultivo de manzana roja por comuna.
- 45** **Figura 39.** Exposición, superficie (hectáreas) de cultivo de cereza por comuna.
- 46** **Figura 40.** Índice de Riesgo, cultivo de almendras.
- 46** **Figura 41.** Índice de Riesgo, cultivo de nueces.
- 47** **Figura 42.** Índice de Riesgo, cultivo de manzana roja.
- 47** **Figura 43.** Índice de Riesgo, cultivo de cereza.
- 48** **Figura 44.** Índice de Oportunidad, cultivo de almendras.
- 48** **Figura 45.** Índice de Oportunidad, cultivo de nueces.
- 49** **Figura 46.** Índice de Oportunidad, cultivo de manzana roja.
- 49** **Figura 47.** Índice de Oportunidad, cultivo de cereza.

## ÍNDICE DE TABLAS

**Pág.**

- 9** **Tabla 1.** Índices climáticos de los modelos generales de circulación (GCM).
- 10** **Tabla 2.** Variables de manejo agronómico empleadas en la simulación de los diferentes cultivos.
- 29** **Tabla 3.** Estadística descriptiva para el subsistema Cultivos anuales.





# 1

# RESUMEN EJECUTIVO

A consecuencia del cambio climático, se esperan modificaciones importantes en el comportamiento de las variables climáticas, tales como incrementos en la temperatura, aumento de la variabilidad y mayor frecuencia de eventos extremos y cambios en los regímenes de precipitación. Estos efectos posicionan a la agricultura en un escenario de vulnerabilidad, pudiendo afectar negativamente su productividad. Otros impactos potenciales del cambio climático sobre el sector agrícola corresponden a la aridización y al desplazamiento de las actuales zonas agroclimáticas hacia el sur.

Este trabajo tiene por objetivo aplicar un marco metodológico de cadenas de impacto para determinar el **Riesgo** de distintos sistemas productivos característicos del sector agrícola chileno frente al cambio climático. Las cadenas de impacto abarcan la identificación de las Amenazas derivadas del cambio climático, la Exposición y la Sensibilidad para diversos cultivos. Para esto, se utilizan modelos matemáticos y agronómicos, que permiten determinar la variación de productividad de cultivos anuales (maíz, frijol, papa y trigo), praderas y sistemas de producción animal (praderas, bovinos de leche, bovinos de carne y ovinos) y frutales (vid vinífera, manzano, nogal, almendro y cerezo).

En este proyecto se utilizó el modelo CropSyst (Stöckle *et al.* 2003) para cultivos anuales y praderas, y una versión adaptada del modelo simple (Zhao *et al.*, 2019) para frutales. Estos modelos integran información del cultivo, características edáficas, manejos agronómicos (CropSyst) y de información meteorológica (CropSyst y modelo simple). A través de ello, es posible cuantificar la **Amenaza** del cambio climático mediante la diferencia de rendimiento entre el escenario Futuro y el escenario Presente.

El índice de **Sensibilidad** se construyó para estimar el grado de vulnerabilidad frente al cambio climático de cada comuna. Este índice contempla siete parámetros: presencia de pequeñas y medianas explotaciones (PYMEX), población urbana y rural, diversidad de cultivo, presencia de embalses, usuarios y funcionarios INDAP, presencia de infraestructura y cultivos manejados bajo riego y en seco.

La **Exposición** se definió como la superficie (en hectáreas) del cultivo a analizar en cada comuna. En el caso de cultivos anuales, el área de estudio abarca desde la Región de Coquimbo a la de Los Lagos (excluyendo la provincia de Palena), para los suelos con aptitud agrícola. En el caso

de las praderas, el área de estudio comprende entre las regiones del Biobío y de Los Lagos, en suelos con aptitud agrícola y ganadera. En el análisis de frutales, el área de estudio se extiende desde la Región de Atacama a la Región de Aysén del General Carlos Ibáñez del Campo, en suelos con aptitud agrícola. En todos los casos de estudio, se excluyeron las Áreas Silvestres Protegidas del Estado. De acuerdo a los resultados, para los cultivos anuales se estima que todos los cultivos presentarán bajas en sus rendimientos. En general, cuando el cultivo se encuentra bajo riego, el mayor Riesgo se presenta en comunas costeras y del centro-norte del país; mientras que, si se cultiva

en seco, el mayor Riesgo se registra en la zona sur, en el sector cordillerano. Con respecto a los resultados en pradera y en capacidad de carga animal, no se presenta Riesgo significativo en la productividad asociado al cambio climático. Al contrario, se estima que la productividad aumente marginalmente en las regiones estudiadas. En cuanto a los resultados en frutales, la tendencia muestra que las zonas con mayor Riesgo se ubican en la zona costera y la depresión intermedia, entre las regiones de Coquimbo y del Biobío. Las zonas precordilleranas y las áreas agrícolas desde la Región de La Araucanía hacia el sur muestran aumento en el rendimiento.







# 2

## INTRO- DUCCIÓN

El aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero, debido —principalmente— a las actividades humanas (Ortiz, 2012), producirá un cambio en el clima, alterando las variables atmosféricas a nivel mundial. Se esperan impactos importantes, como incrementos en las temperaturas extremas y cambios en los regímenes de precipitación, que pueden aumentar la frecuencia de eventos extremos, desde la escasez de agua en localidades como Chile central, a inundaciones en otras partes del planeta. Los efectos del cambio climático sitúan a la agricultura en un escenario de vulnerabilidad, ya que —según Nelson et al. (2009)—, el aumento de las temperaturas y cambios en el régimen hidrológico pueden reducir la productividad y aumentar la proliferación de malezas y plagas.

Estudios previos sugieren que los efectos del cambio climático serán heterogéneos entre países, así como en el interior de estos, por lo que el impacto real dependerá de las condiciones locales y de su capacidad de adaptación al nuevo escenario (López y Hernández, 2016; Mendelsohn y Dinnar, 1999).

Si bien algunos cultivos pueden beneficiarse en diferentes regiones, en general, se espera que los efectos del cambio

climático en la agricultura sean negativos (Nelson et al., 2009). Según Bascope (2013), estudios a nivel nacional sugieren que hacia el 2050 el país será más caluroso, con menos precipitaciones, más propenso a eventos de tormenta y con mayor frecuencia de días nublados. También, se espera que el paisaje natural se vea modificado en respuesta a la menor disponibilidad hídrica y al avance de las zonas áridas.

Según la Tercera Comunicación Nacional de Chile ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (MMA, 2016), el sector silvoagropecuario nacional es uno de los más vulnerables frente al cambio climático.

Las alteraciones esperadas en temperatura y precipitación, y en la ocurrencia de eventos hidrometeorológicos extremos, impactarán la productividad de los cultivos, especialmente, debido a la aridización y al desplazamiento de las actuales zonas agroclimáticas hacia el sur. Esto, como “consecuencia de la declinación pluviométrica que continuará durante todo el siglo XXI”, según reporta el MMA (2016), citando a AGRIMED (2008).



Este mismo informe muestra los impactos proyectados en la productividad agrícola para determinados cultivos, sobre la base de escenarios denominados Trayectorias de Concentración Representativas (RCP, por su nombre en inglés); principalmente, el análisis de las variaciones en el rendimiento para el cultivo de maíz hacia el año 2050, según estimaciones basadas en el escenario RCP 8.5<sup>1</sup>. Los resultados indican que el cultivo podría expandirse al sur, hacia latitudes más altas, debido al aumento de temperatura. No así, al norte de la actual área productiva, en donde se prevé una disminución del potencial productivo. Otro aspecto que se modificará, como medida de adaptación ante estos escenarios futuros, es la fecha siembra, que se adelantaría a meses de invierno en la zona centro norte del país (MMA, 2016).

Entre los sectores agrícolas más afectados por el cambio climático y la escasez hídrica, se cuenta al vitivinícola, debido a que el área apta para su crecimiento disminuirá en 47% hacia el 2050. A la vez, se observa que algunas áreas, que actualmente son consideradas no aptas para la vid, como zonas cordilleranas y del sur de Chile, muestra-

rían un cambio en su potencial productivo, generando un incremento equivalente al 22% de la superficie actual de cultivo. Las nuevas condiciones climáticas, sin embargo, repercutirán en la composición química del producto, afectando negativamente las características organolépticas de la uva, la fecha de maduración, la vulnerabilidad a plagas, a enfermedades y a malezas, así como sus necesidades de riego (MMA, 2016).

El objetivo de este informe es describir los avances que se han realizado en estimar el Riesgo del sector agrícola chileno frente al cambio climático, mostrando la metodología utilizada y los resultados obtenidos por el grupo de trabajo (*Working Package* de Agricultura) al analizar un escenario de cambio climático para un período de 30 años a partir de 2035 (período centrado en el año 2050). Para este análisis, seguimos el marco de cadenas de impacto, que incluye la identificación de las Amenazas, la descripción de la Exposición y la estimación de la vulnerabilidad (o Sensibilidad), y utilizamos modelos matemáticos y agronómicos que permiten determinar la variación de la productividad en cultivos anuales, frutales y praderas.

<sup>1</sup> El escenario RCP8.5 proyecta altas concentraciones de CO<sub>2</sub>, con aumento de temperatura que llega hasta los 2 °C.



1029

H

1023



# 3 METODO- LOGÍA

Este trabajo se centra en estimar los Riesgos asociados al Cambio Climático de los sistemas agrícolas de Chile priorizados para este estudio. El **Riesgo** es estimado a partir de la información sobre cambios en el rendimiento potencial de sistemas agrícolas como resultado de alteraciones de largo plazo en las características de las variables meteorológicas. Este estudio se acotará al territorio comprendido entre la Región de Coquimbo y la Región de Los Lagos (excluyendo a la Provincia de Palena), área que concentra los cultivos priorizados para este estudio y de la cual, se dispone de una base de datos sólida y espacialmente continua de características climáticas, de suelo y de manejo agronómico. Para los sistemas agronómicos de Isla de Pascua, Arica, Copiapó, Chile Chico y Punta Arenas, se realizarán evaluaciones de los principales indicadores agroclimáticos, estimando cambios en la aptitud productiva debido al cambio climático.

En particular, este informe aborda los cambios esperados en la productividad como consecuencia de sequías. Para eso, se trabajan dos tipos de agricultura de forma independiente: **a)** la agricultura de secano, que depende únicamente de las precipitaciones y en la cual, en este

informe, se verifican cambios productivos de algunos subsistemas (trigo y papa, entre las regiones de La Araucanía y de los Lagos); y **b)** la agricultura de riego, que requiere modelar escenarios de cambio climático que integren las alteraciones en los regímenes de precipitaciones y la disponibilidad de caudales en función de derechos de aprovechamiento y de respuesta de la hidrología.

## 3.1 METODOLOGÍA GENERAL UTILIZADA PARA ESTIMACIÓN DE RIESGO EN SISTEMAS AGRÍCOLAS

---

Un modelo, generalmente matemático, es una herramienta que busca representar lo más fielmente posible a un sistema o a una realidad. Por eso, aunque tengan limitaciones, un modelo de simulación de cultivo se elabora para facilitar la comprensión del sistema agroecológico y el estudio de su comportamiento, al tratarse de esquemas teóricos (Jara, 2019). A partir de los resultados de los



modelos de predicción se pueden evaluar estrategias, alternativas de gestión y tomar decisiones de manejo de los cultivos simulados, como también es posible estimar los efectos del cambio climático sobre el sistema real (Jara, 2019, citando a IICA, 2015 y Hernández *et al.*, 2011).

Los modelos agroclimáticos requieren diferentes datos de entrada, como información sobre las características de los suelos, que permita simular la condición inicial, y sobre el manejo del cultivo, incluyendo riego, fechas de plantación y uso de fertilizantes; pero también datos diarios del clima, tanto presentes —para la verificación del modelo—, como datos simulados futuros, que permitan extrapolar el comportamiento frente al cambio climático (Jara, 2019).

Para la estimación del Riesgo climático del *Working Package (WP)* de Agricultura, se definió una cadena de impacto que se compone de cuatro elementos básicos que deben evaluarse: Exposición, Sensibilidad, Amenaza y capacidad adaptativa (tomadas de GIZ, 2017). Cada uno será detallado en la sección correspondiente a cada subsistema agrícola priorizado para este estudio. La metodología relacionada a la cadena de impacto se encuentra en la sección 2 (marco metodológico), en los puntos 3.2, 3.3 y 3.4.

## 3.2 AMENAZA

En este proyecto se utilizó el modelo CropSyst para definir la Amenaza de los subsistemas anuales y praderas y el modelo simple para el cultivo de frutales. CropSyst es un modelo desarrollado para analizar integralmente el efecto del clima, del suelo y del manejo sobre el rendimiento de los sistemas de cultivo (Stöckle *et al.*, 2003). Se requieren cuatro archivos de entrada para iniciar el modelo: valores meteorológicos, edáficos<sup>2</sup>, agronómicos (manejo tecnológico) y del cultivo (parámetros que describen su fenología y productividad primaria) (IICA, 2015).

En el estudio realizado por Jara (2019) se señala que CropSyst es capaz de simular “la humedad disponible en el suelo, la disponibilidad de nitrógeno, el crecimiento y desarrollo fenológico del cultivo, los rendimientos, residuos de producción y descomposición, erosión hídrica del suelo, salinidad y trayectoria de pesticidas”. En términos simplificados, el modelo CropSyst es capaz de reproducir el desarrollo del follaje en respuesta a la acumulación termal y, en función de esta, calcular la cantidad de radiación solar que es interceptada. Esta energía acumulada es transformada en biomasa, mediante factores de eficiencia de conversión de radiación y de uso de agua. Para la construcción de los mapas de Riesgo climático de los cultivos anuales y frutales, los resultados se enfocan en el rendimiento; para las praderas, los resultados se centran en la biomasa total acumulada durante la temporada de crecimiento, la cual es multiplicada por el índice de cosecha (Jara, 2019, citando a Klein *et al.*, 2013).

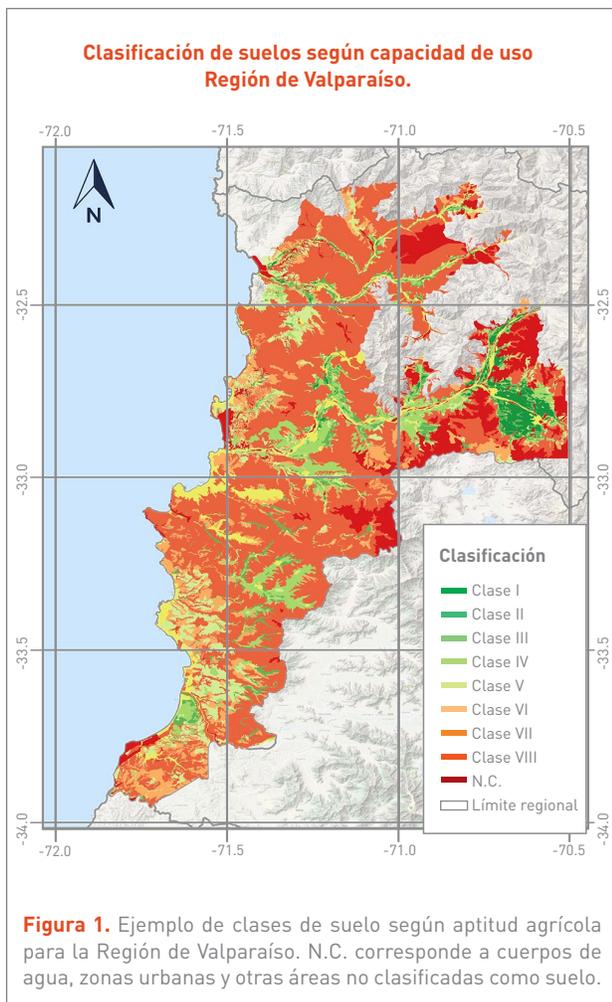
### 3.2.1 SUELO

Para alimentar los modelos de cultivos anuales y praderas en CropSyst se recolectó información sobre propiedades fisicoquímicas y morfológicas de las principales series de suelos presentes en el territorio chileno continental. Esta información fue extraída de los mapas cartográficos del Centro Tecnológico de Suelos y Cultivos de la Universidad de Talca<sup>3</sup>, estudios agrológicos (CIREN) e información de suelos volcánicos (Tosso, 1985), y separada según clase de suelo: clases de aptitud agronómica (I a IV) en el caso de los cultivos anuales y clases de la I a la VII para las praderas perennes (**Figura 1**). Debido a la existencia de información incompleta, se utilizaron sistemas de funciones de pedotransferencia disponibles en forma de calculadoras web para determinar, a partir de la distribución porcentual de limo, arena y arcilla, parámetros como punto de marchitez permanente, capacidad de campo y densidad aparente<sup>4</sup>.

<sup>2</sup> Relativo al perfil de suelo, especialmente en lo que respecta a las propiedades físicas de capacidad de retención de agua.

<sup>3</sup> Disponibles en su página web <http://www.ctsyc.cl/>

<sup>4</sup> Disponibles en <http://www.dynsystem.com/netstorm/soilwater.html> y <https://resources.hwb.wales.gov.uk/VTC/env-sci/module2/soils/soilwatr.htm>



Fuente: CC by 4.0 CIREN <sup>5</sup>.

### 3.2.2 CLIMA

La información climática que alimenta los modelos de cultivos anuales de CropSyst y los modelos utilizados para el cálculo del impacto en el rendimiento de cultivos frutales fue proporcionada por la empresa Meteodata, en el formato de archivo de datos delimitado por comas (CSV, por su nombre en inglés). Los datos entregados corresponden a series de tiempo de variables meteorológicas desde seis modelos generales de circulación (GCM, por su nombre en inglés), a una resolución de 0.05° (aproximadamente 5 km). Las variables meteorológicas consideradas se presentan en la **Tabla 1**.

Los GCM utilizados son: ACCESS1-3, CanESM2, CSIRO-Mk3-6-0, INMCM4, IPSL-CM5A-MR y IPSL-CM5B-LR. Se trabajó con dos series de tiempo, que representan 30 años de variables climáticas simuladas, denominadas “Presente” y “Futuro”, que corresponden a los períodos de 1980 a 2009 y de 2035 a 2064, respectivamente. Para el caso de los datos futuros, se consideró un escenario de emisión RCP8.5 (Meteodata, 2019).

Variable	Nombre	Función de agregación diaria	Unidad	Altura
Tx	Temperatura máxima	Máximo	°C	2 m
Tn	Temperatura mínima	Mínimo	°C	2 m
PP	Precipitación total (lluvia+nieve)	Suma	mm	Surface
SR	Radiación solar entrante	Media	MJ/m2/día	Surface
HRx	Humedad relativa máxima	Máximo	%	2 m
HRn	Humedad relativa mínima	Mínimo	%	2 m
U	Velocidad del viento	Mean	m/s	2 m

**Tabla 1.** Índices climáticos de los modelos generales de circulación (GCM).

Fuente: Meteodata, 2019.

<sup>5</sup> Capas disponibles en <https://www.ciren.cl/descarga-de-capas/>



### 3.2.3 MANEJO AGRONÓMICO

Para alimentar cada modelo de cultivo, se utilizaron datos de manejo agronómico característicos de cada especie, como la adecuada fertilización para proveer de nutrientes, las fechas de siembra, las de cortes (en el caso de praderas) y las de cosecha, propios de la localidad, los cuales

se resumen en la **Tabla 2**. En el caso de los cultivos de riego, se simuló su comportamiento en un escenario que no contemplara restricciones hídricas; con una aplicación de lámina de riego de 50 a 60 mm semanales, desde siembra a cosecha, de modo de simular el comportamiento del cultivo en niveles cercanos a su capacidad productiva potencial.

Cultivo	Riego/Secano	Fecha de Siembra	Cortes
Praderas	Secano	31 marzo (La Araucanía) 19 mayo (Los Ríos) 19 marzo (Los Lagos)	91% biomasa/año
Maíz	Riego	15-oct	-
Papa	Secano	15-oct	-
	Riego	15-oct	-
Trigo	Secano	15 Julio (Coquimbo al Biobío)	-
		15 agosto (Biobío a Los Lagos)	-
	Riego	15 Julio (Coquimbo al Biobío)	-
		15 agosto (Biobío a Los Lagos)	-
Frejol	Riego	20 de octubre	-

**Tabla 2.** Variables de manejo agronómico empleadas en la simulación de los diferentes cultivos.

Fuente: Elaboración propia.

## 3.3 SENSIBILIDAD

El índice de Sensibilidad se construyó para todas las cadenas de impacto que se priorizaron en este estudio y está en función de siete parámetros: presencia de las pequeñas y medianas explotaciones (PYMEX), población urbana-rural (IRU), diversidad de cultivos, número de embalses, cantidad de usuarios y funcionarios INDAP, disponibilidad de infraestructura y proporción de superficie de cultivos entre riego-secano. Los índices utilizados se describen a continuación.

**Índice PYMEX:** Índice que va de 0 a 1 y representa el número de explotaciones de menor tamaño. Los datos se encuentran a nivel regional; para obtener el dato a nivel comunal se calculó una proporción en base a la superficie que ocupa cada comuna dentro de la región (Tejo, 2009). Valores cercanos al 0 corresponden a comunas con menor número de productores PYMEX, mientras que valores cercanos al 1 corresponden a las comunas con mayor número de productores PYMEX.

**Índice IRU:** Representa a la proporción de la población rural con respecto a la población urbana. Los valores van de

0 a 1, en donde 0 corresponde a una comuna sin población rural y 1 corresponde a una comuna sin población urbana (INE, 2017), definido en la **Ecuación 1**.

$$IRU = \frac{Población_{rural}}{Población_{urbana}}$$

**Ecuación 1**

**Índice Diversificación:** Índice que va de 0 a 1 y representa la diversidad de cultivos que hay por comuna. Se consideraron frutales, hortalizas, cereales, leguminosas, tubérculos y cultivos industriales. Valores cercanos al 0 indican una comuna muy diversa, mientras que valores cercanos a 1 indican poca diversidad de cultivos (INE, 2007b).

**Índice Embalses:** Índice que va de 0 a 1 y representa el número de embalses por comuna. Se consideraron los embalses cuyo uso incluyera: agua potable, generación energía y riego. Valores cercanos al 0 indican que la comuna posee mayor número de embalses, mientras que valores cercanos a 1 corresponden a las comunas con menor número de embalses (DGA, 2016).

**Índice INDAP:** Índice que va de 0 a 1 y representa la proporción entre el número usuarios INDAP y el número de funcionarios INDAP, a nivel regional. Valores cercanos al 0 indican que en la región el número de usuarios por funcionario es menor, mientras que valores cercanos al 1 indican que existe un alto número de usuarios por funcionario (INDAP, 2019).

**Índice Infraestructura:** Índice que va de 0 a 1 y representa el número de infraestructuras totales por comuna. Dentro del cálculo se consideró bodegas, cámaras de frío, invernaderos, establos, galpones, gallineros, pabellones, pozos, salas de ordeña, silos, terneras, tranques, oficinas y otros. Valores cercanos al 0 indican que existe un mayor número de infraestructuras totales, mientras que valores cercanos al 1 indican un menor número de infraestructuras (ODEPA, 2007).

**Índice Balance riego-secano:** Representa la proporción de superficie cultivada en secano respecto de la superficie cultivada con riego. Los valores cercanos a 0 indican que la superficie cultivada es mayormente con riego, mientras que valores cercanos al 1 indican que la superficie cultivada es mayormente en secano.

Finalmente, se define como Sensibilidad a la media aritmética de todos los índices mencionados, como se muestra en la **Ecuación 2**.

$$S = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

**Ecuación 2**

Donde  $S$ , corresponde a la Sensibilidad y  $x_i$  corresponde a los índices definidos previamente: PYMEX, IRU, Diversificación, Embalses, INDAP, Infraestructura y Balance riego-secano.

### 3.4 CAPACIDAD ADAPTATIVA

Se define como la capacidad de los sistemas agrícolas de adaptarse, aprovechar las oportunidades o hacer frente a los cambios en el clima, en base a sus recursos naturales y a las condiciones económicas, sociales, culturales y de políticas públicas (IPCC, 2014; Wall y Smit, 2005).

La capacidad de adaptación variará entre una agricultura industrial, intensiva y de gran escala, y una agricultura pequeña, baja en insumos y en capital. Por eso, las estrategias que se implementen deben ser acorde al tipo de agricultura a la cual esté dirigida (AGRIMED, 2017).

En este estudio, la capacidad adaptativa se construye en función de ocho parámetros: acceso a internet, nivel de escolaridad, número de maquinaria, número de pozos, caminos urbanos y pavimentados, suelo cultivable,



número de instituciones/sedes que imparten formación técnico-profesional agrícola y proporción de trabajadores agrícolas permanentes/temporales. Los parámetros indicados se detallan a continuación.

**Índice Acceso a internet:** Índice que va de 0 a 1 y representa la cantidad de hogares por comuna que cuentan con acceso a internet. Los valores cercanos al 0 indican que la comuna cuenta con pocos hogares con acceso a internet, mientras que valores cercanos a 1 indican que la comuna cuenta con mayor número de hogares con acceso a internet (Subsecretaría de Telecomunicaciones, 2020).

**Índice Escolaridad:** Índice que va de 0 a 1 y representa la proporción entre habitantes sin estudios y la población total, a nivel comunal. Valores cercanos a 0 indican que la comuna cuenta con una alta proporción de población sin estudios, mientras que valores cercanos a 1 indica que existe una baja proporción de población sin estudios (INE, 2017).

**Índice Maquinaria:** Índice que va de 0 a 1 y representa el número de maquinaria agrícola presente por comuna. Valores cercanos a 0 indican que la comuna cuenta con menor cantidad de maquinaria, mientras que valores cercanos al 1 indican que la comuna tiene mayor número de maquinaria disponible (INE, 2007b).

**Índice Pozos:** Índice que va de 0 a 1 y representa el número de pozos a nivel comunal. Valores cercanos al 0 indican que la comuna cuenta con pocos pozos, mientras que valores cercanos a 1 indican que la comuna cuenta con mayor número de pozos<sup>6</sup>.

**Índice Caminos urbanos y pavimentados:** Índice que va de 0 a 1 y representa el nivel y calidad de conexión vial a nivel comunal, usando como indicador la longitud de los caminos que se encuentran catalogados como urbanos y pavimentados. Valores cercanos a 0 indican que la comuna cuenta con menor longitud de caminos, mientras que valores cercanos a 1 indican que la comuna cuenta con mayor longitud de caminos<sup>7</sup>.

**Índice Suelo cultivable:** Índice que va de 0 a 1 y representa la proporción entre el suelo con aptitud agronómica (clases de I a IV, de acuerdo a CIREN) y la superficie comunal. Valores cercanos a 0 indican una baja proporción de suelo cultivable, mientras que valores cercanos a 1 indican una alta proporción de suelo cultivable.

**Índice Instituciones/Sedes agrícolas:** Índice que va de 0 a 1 y representa el número de Instituciones/Sedes que imparten formación técnica-profesional en el área agrícola, por región. Valores cercanos al 0 indican que hay un bajo número de Instituciones/Sedes, mientras que valores cercanos a 1 indican un alto número de Instituciones/Sedes de formación en el área agrícola a nivel regional.

**Índice Trabajadores permanentes/temporales:** Índice que va de 0 a 1 y representa la proporción entre trabajadores agrícolas permanentes respecto de los trabajadores agrícolas temporales. Valores cercanos al 0 indican una baja proporción de trabajadores agrícolas permanentes, mientras que valores cercanos a 1 indican una alta proporción de trabajadores agrícolas permanentes (INE, 2007b).

Finalmente, se define como Capacidad Adaptativa a la media aritmética de todos los índices mencionados, como se muestra en la **Ecuación 3**.

$$CA = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

**Ecuación 3**

Donde  $CA$ , corresponde a la Capacidad adaptativa y  $x_i$  corresponde a los índices definidos previamente: Acceso a internet, Escolaridad, Maquinaria, Pozos, Caminos urbanos y pavimentados, Suelo cultivable, Instituciones/Sedes agrícolas y Trabajadores permanentes/temporales.

<sup>6</sup> Consultado el 28 de agosto de 2020. Recuperado de <https://dga.mop.gob.cl/estudiospublicaciones/mapoteca/Paginas/default.aspx#ocho>

<sup>7</sup> Consultado el 28 de agosto de 2020. Recuperado de <https://dga.mop.gob.cl/estudiospublicaciones/mapoteca/Paginas/default.aspx#ocho>

### 3.5 SUBSISTEMA CULTIVOS ANUALES

Según el censo agropecuario del año 2007 (INE, 2007b), cereales, leguminosas y tubérculos alcanzaban las 550.303 hectáreas (ha) plantadas, de un total de 2.045.061 hectáreas de suelo de cultivos a nivel país.

Se han seleccionado cuatro cultivos, que serán modelados para estimar los impactos del cambio climático y determinar su Riesgo. Del grupo de los cereales, se analizaron los cultivos de trigo y de maíz, que suman el 60,8% de la superficie cultivada con cereales<sup>8</sup>. Del grupo de leguminosas y tubérculos, se analizaron los cultivos de frijol y de papa, que representan el 95,2% de la superficie cultivada con leguminosas y tubérculos<sup>9</sup>. En este estudio no se consideraron los cultivos que se encuentran dentro la categoría Cultivos industriales.

La producción de papa está destinada, mayoritariamente, al mercado interno, siendo un importante alimento en la dieta de los chilenos, con un consumo promedio por habitante de 50 kg. al año (INIA, Remehue, 2015). Es el cuarto cultivo más importante en cuanto a la cantidad de superficie cultivada (50.000 ha aproximadamente) y es manejado, principalmente, por el pequeño agricultor (Inostroza et al., 2017). Según datos de la temporada 2018/19, las regiones de Los Lagos y de La Araucanía fueron las principales productoras a nivel nacional (380.000 y 260.000 toneladas, respectivamente). Los mayores rendimientos fueron obtenidos en las regiones de Los Lagos y de Los Ríos (43,7 ton/ha y 42,5 ton/ha, respectivamente) (ODEPA, 2020).

El maíz se produce, principalmente, entre las regiones de Coquimbo y de La Araucanía, pero la zona comprendida entre la Región de O'Higgins y la Región del Biobío concentra más del 90% de la producción total del país (951.070 toneladas en el período 2018 - 2019). La Región de O'Higgins es la mayor productora, con 409.157 toneladas (ODEPA,

2020b). La producción nacional de maíz es consumida, mayoritariamente, por el mercado interno, pero alcanza para abastecer sólo el 28% de la demanda país; el resto del consumo chileno de maíz se importa de países como Argentina, Estados Unidos y Paraguay.

El trigo se cultiva, actualmente, entre las regiones de Coquimbo y de La Araucanía, con las regiones del Maule, de Ñuble y del Biobío concentran cerca del 60% de la producción total del país, que en el período 2018 - 2019 llegó a 1.399,2 miles de toneladas (ODEPA, 2020b). Cabe destacar que la Región de Coquimbo, para el período 2017-2018, produjo muy pocas toneladas al año, con un rendimiento de quintales por hectárea muy inferior a las otras regiones productoras. En la actualidad, la producción de trigo está destinada, principalmente, para consumo interno. En los últimos años, se ha registrado una baja en la producción total de trigo, que ha debido compensarse con el aumento de las importaciones, principalmente, de Argentina, Canadá y Estados Unidos (García y Fernández, 2017; ODEPA, 2020b).

El frijol es una de las leguminosas tradicionales más importantes a nivel nacional. Se cultiva entre las regiones de Coquimbo y de La Araucanía, y su superficie de cultivo varió entre las 10.000 y las 14.000 hectáreas anuales durante la última década. Las regiones del Maule y del Biobío son las principales productoras de esta leguminosa: 2.419 y 1.684 hectáreas, respectivamente, para la temporada 2019 - 2020, de un total de 7.184 hectáreas cultivadas entre las regiones de Valparaíso y La Araucanía. Los mayores rendimientos durante la temporada 2017 - 2018 se presentaron entre las regiones de O'Higgins y de La Araucanía, variando —en promedio— entre 14,3 a 16,3 kg MS/ha<sup>10</sup>.

A continuación, se presenta la cadena de impactos seleccionada para este subsector y la metodología específica para el cálculo del Riesgo.

8 Consultado el 29 de abril de 2020. Recuperado de <https://www.odepa.gob.cl/estadisticas-del-sector/estadisticas-productivas>

9 Consultado el 29 de abril de 2020. Recuperado de <https://www.odepa.gob.cl/estadisticas-del-sector/estadisticas-productivas>

10 Consultado el 29 de abril de 2020. Recuperado de <https://www.odepa.gob.cl/estadisticas-del-sector/estadisticas-productivas>



### 3.5.1 CADENA DE IMPACTO

**Unidad territorial:** Área agrícola comprendida entre las regiones de Coquimbo y de Los Lagos, intersectada con suelos con aptitud agrícola, excluyendo las Áreas Silvestres Protegidas del Estado. La resolución mínima espacial es de 5 kilómetros.

**Amenaza:** Variación en el rendimiento de los cultivos anuales como consecuencia del cambio climático. Cambio en la capacidad productiva (rendimiento).

**Sensibilidad:** Índice que se define en función del promedio de ruralidad, superficie cultivada en secano, diversidad de cultivos, presencia de embalses, pequeñas y medianas explotaciones (PYMEX), presencia de infraestructura y, número de usuarios y funcionarios INDAP.

**Exposición:** Comuna. Superficie del cultivo por comuna.

**Capacidad adaptativa:** Índice que se construye en función del promedio de ocho parámetros: acceso a internet, nivel de escolaridad, número de maquinaria, número de pozos, caminos urbanos y pavimentados, suelo cultivable, número de instituciones/sedes que imparten formación técnico-profesional agrícola por región y proporción de trabajadores agrícolas permanentes/temporales.

**Riesgo:** Índice de 0 a 1 que representa el Riesgo frente al cambio climático en la producción de cultivos anuales, en función de las condiciones de Exposición, Amenaza y Sensibilidad, existentes.

### 3.5.2 METODOLOGÍA ESPECÍFICA PARA LOS CULTIVOS DE PAPA, MAÍZ, TRIGO Y FREJOL

El área de estudio abarca desde la Región de Coquimbo hasta la región de Los Lagos, limitándose a aquellas zonas en donde la información de suelo se encuentra completa y que la clase textural otorgada por CIREN corresponde de la categoría I a la categoría IV.

Los puntos simulados en CropSyst corresponden a los datos climáticos de Meteodata (temperatura, precipitaciones, radiación solar, velocidad del viento y humedad relativa), en una resolución espacial de 5 kilómetros aproximadamente (0.05°), a los que se sumó la información del suelo.

En el caso de los cultivos de papa y de trigo, se consideraron dos tipos de manejo: con riego y en secano (García-Gutiérrez *et al.*, 2018). En maíz y frijol se usó un solo tipo de manejo, que considera riego (Dávila, 2018). CropSyst permite simular el efecto del enriquecimiento de dióxido de carbono atmosférico sobre la fotosíntesis. Para ello, se debe ingresar la concentración de CO<sub>2</sub> a modelar en el escenario futuro; para el caso de los cultivos anuales se utilizó una concentración de CO<sub>2</sub> de 540 ppm.

De los resultados de CropSyst se extrajo la media de los rendimientos para ambos períodos (1980 - 2009 y 2035 - 2064), los cuales fueron interpolados usando una combinación por peso de diferentes modelos de interpolación (*Inverse Distance Weighting, Natural Neighbor, Kriging y Trend*) en la plataforma ArcMap 10 (Esri, 2016). Estos pesos fueron estimados en función de una correlación lineal, utilizando los puntos de interpolación como puntos de validación y, posteriormente, se agregaron en función de cuán significativa sea su estimación, con el objetivo de mejorar la estabilidad y la precisión de algoritmos de interpolación. Una vez obtenidas las interpolaciones, se promediaron los resultados de los seis modelos GCM y sólo se consideraron aquellos rendimientos que fueran mayores a 5.000 kg MS/ha/año para el maíz, 3.000 kg MS/ha/año para el trigo, 6.000 kg MS/ha/año para la papa y 1.500 kg MS/ha/año para el frijol, que corresponden a rendimientos económicamente viables para un sistema de explotación de nivel de tecnología medio. Para la generación de la Amenaza, se calculó la tasa de cambio (delta) del rendimiento futuro del cultivo respecto del rendimiento presente (**Ecuación 4**), para el promedio de los seis GCM.

$$A = I_f - I_p$$

**Ecuación 4**



En donde  $A$  = Amenaza (delta de rendimiento, medido en kg MS/ha/año),  $I_f$  = Rendimiento interpolado para el período Futuro (2035 - 2064),  $I_p$  = Rendimiento interpolado para el período Presente (1980 - 2009), ambos medidos en kg MS/ha/año.

Debido a la falta de información oficial actualizada de superficie por cultivo anual a nivel comunal, para el cálculo de la Exposición se utilizaron los datos regionales de ODEPA<sup>11</sup> (año agrícola 2017/18, 2018/19, 2019/20) y se realizó una estimación proporcional: se asignó la correspondiente superficie a cada comuna, en función de la proporción que representó la superficie comunal observada respecto de la regional para cada cultivo en el censo agropecuario del año 2007<sup>12</sup>. Para este análisis, se consideraron sólo aquellas comunas que presentan sobre cinco hectáreas de los cultivos seleccionados.

Para obtener los valores de Amenaza a nivel comunal, se calculó una media zonal de los resultados especializados obtenidos a partir de los modelos de simulación. En este sentido, resultados de Amenaza negativos implican que existe un Riesgo para la comuna por efectos del cambio climático, ya que la tendencia es hacia la reducción de rendimientos; resultados de Amenaza positivos se consideran como una oportunidad para la comuna, ya que indica que aumentará su rendimiento dado los efectos del cambio climático.

Riesgo y Oportunidad se definieron como la multiplicación de la Amenaza, la Exposición y la Sensibilidad, por comuna, como se muestra en la **Ecuación 5** y en la **Ecuación 6**.

$$R = S \times E \times A \quad \text{si } A \in ] - \infty, 0 ]$$

**Ecuación 5**

$$O = S \times E \times A \quad \text{si } A \in [ 0, \infty [$$

**Ecuación 6**

Donde  $R$  es el Riesgo,  $O$  es la Oportunidad,  $E$  es la Exposición,  $A$  es la Amenaza y  $S$  es la Sensibilidad.

Para que el Riesgo y la Oportunidad sean llevado al intervalo  $[0, 1]$  se debe usar la fórmula de normalización de la **Ecuación 7**.

$$R'_i = \frac{R_x}{R_{Min}}$$

$$O'_i = \frac{O_x}{O_{Max}}$$

**Ecuación 7**

Siendo  $R'_i$  = el Riesgo normalizado para el cultivo  $i$ ,  $O'_i$  = la Oportunidad normalizada para el cultivo  $i$ ,  $i$  = el cultivo bajo análisis (frijol, maíz, trigo en seco, trigo bajo riego, papa en seco y papa bajo riego),  $R_x$  y  $O_x$  = el valor  $X$  obtenido para la comuna de la **Ecuación 5** y de la **Ecuación 6**, respectivamente,  $R_{Min}$  y  $O_{Max}$  = los resultados mínimos y máximos de todas las comunas analizadas, respectivamente.

### 3.6 SUBSISTEMA PRADERAS

Según Jara (2019, citando a Teuber et al., 2007), “la pradera es el recurso más utilizado en los sistemas de producción animal del sur de Chile, principalmente, entre las regiones de La Araucanía y de los Lagos”.

Según cifras entregadas por el Instituto Nacional de Estadísticas en el Censo Agropecuario 2007 (INE, 2007a), la superficie total de praderas naturales en el país es de 10.795.165 hectáreas y, de estas, el 8,94% (965.483 ha) se encuentra entre las regiones de La Araucanía y de Los Lagos. Mientras, la superficie de praderas mejoradas en

11 Consultado el 24 de junio de 2020. Recuperado de <https://www.odepa.gob.cl/estadisticas-del-sector/estadisticas-productivas>

12 Consultado el 24 de junio de 2020. Recuperado de <https://www.ine.cl/estadisticas/economia/agricultura-agroindustria-y-pesca/censos-agropecuarios>



Chile es de 1.055.354 hectáreas y el 48,44% se ubica entre las regiones de La Araucanía y de Los Lagos (511.231 ha). En estas regiones se concentran, mayoritariamente, los sistemas de producción de leche y carne bovina (Jara, 2019 citando a Demanet, 2013): el 57% de los 1,4 millones de cabezas de ganado bovino que hay en Chile (INE, 2007a) y el 90% de la producción de leche si se incluye la Región del Biobío (Teuber, 2009).

A continuación, se presenta la cadena de impactos seleccionada para este subsector y la metodología específica para el cálculo del Riesgo.

### 3.6.1 CADENA DE IMPACTO DEL CULTIVO PRADERAS

**Unidad territorial:** Corresponde al área comprendida entre las regiones del Biobío y de Los Lagos, intersectada con suelos con aptitudes agrícola y ganadera. La resolución espacial mínima es de 5 kilómetros.

**Amenaza:** Variación en el rendimiento de praderas. Cambio en su capacidad productiva (rendimiento) como consecuencia del cambio climático.

**Sensibilidad:** Índice que se define en función del promedio de ruralidad, superficie cultivada en secano, diversidad de cultivos, presencia de embalses, pequeñas y medianas explotaciones (PYMEX), presencia de infraestructura y, número de usuarios y funcionarios INDAP.

**Exposición:** Comuna. Superficie de praderas por comuna.

**Capacidad adaptativa:** Índice que se construye en función del promedio de ocho parámetros: acceso a internet, nivel de escolaridad, número de maquinaria, número de pozos, caminos urbanos y pavimentados, suelo cultivable, número de instituciones/sedes que imparten formación técnico-profesional agrícola por región y proporción de trabajadores agrícolas permanentes/temporales.

**Riesgo:** Índice de 0 a 1 que representa el Riesgo frente al cambio climático en la producción de praderas, en función

de las condiciones de Exposición, Amenaza y Sensibilidad, existentes.

**Metodología Específica:** Modelo CropSyst, calibrado para rendimiento en materia seca de praderas permanentes.

### 3.6.2 CADENA DE IMPACTO DE CAPACIDAD DE CARGA ANIMAL DE LAS PRADERAS

**Unidad territorial:** Resolución de 5 kilómetros, desde las regiones del Biobío a de Los Lagos, intersectada con suelos con aptitudes agrícola y ganadera.

**Amenaza:** Variación de la capacidad sustentadora animal (bovinos de leche, bovinos de carne y ovinos) de la pradera. Cambio en la capacidad de carga animal del período Futuro respecto del Presente como consecuencia del cambio climático.

**Sensibilidad:** Índice que se define en función del promedio de la ruralidad, superficie cultivada en secano, diversidad de cultivos, presencia de embalses, pequeñas y medianas explotaciones (PYMEX), presencia de infraestructura y número de usuarios y funcionarios INDAP.

**Exposición:** Comuna. Superficie de praderas por comuna.

**Capacidad adaptativa:** Índice que se construye en función del promedio de ocho parámetros: acceso a internet, nivel de escolaridad, número de maquinaria, número de pozos, caminos urbanos y pavimentados, suelo cultivable, número de instituciones/sedes que imparten formación técnico-profesional agrícola por región y proporción de trabajadores agrícolas permanentes/temporales.

**Riesgo:** Índice de 0 a 1 que representa el Riesgo frente al cambio climático de la capacidad sustentadora animal de la pradera, en función de las condiciones de Exposición, Amenaza y Sensibilidad, existentes.

**Metodología Específica:** Los resultados de rendimiento obtenidos a partir del modelo CropSyst, calibrado para rendimiento en materia seca de praderas permanentes

es usado como información de entrada para alimentar el modelo simple de carga animal de Castellaro et al. (2010).

### 3.6.3 METODOLOGÍA ESPECÍFICA DEL CULTIVO DE PRADERAS

Se simula el rendimiento de las praderas compuestas por *Lolium perenne* y *Trifolium repens*, ya que se considera la principal pradera permanente sembrada en el sur de Chile (Romero, 2005). Se simula su rendimiento entre las regiones del Biobío y de Los Lagos, usando CropSyst (Stockle et al., 2011). El área territorial de simulación se limita a zonas donde la información edáfica (de cada serie de suelo) se encuentra completa y se acota el uso de clases de suelo a las categorías entre I y VII según el Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN).

La información climática utilizada para la simulación corresponde a la otorgada por Meteodata, donde se utilizaron los puntos de la grilla climática a 5 kilómetros de resolución que intersectan con el área territorial acotada. El Presente se simula con 400 ppm de  $CO_2$ , mientras que el escenario Futuro se simula con 540 ppm de  $CO_2$ .

Respecto de los manejos agrícolas, se simulan praderas de secano (sin riego). Se considera una fertilización de 90 Kg de N, parcializado en dos épocas (abril y agosto), y se configuraron cortes de la biomasa aérea una vez al año (el 16 de abril), donde se remueve el 91% de la biomasa para uso beneficioso y el 9% permanece como tejido vegetal vivo (más detalles en Jara, 2019).

De los resultados de CropSyst se extrajo la media, la mediana y la varianza de la biomasa anual (kg Materia Seca/hectárea/año). Estos indicadores fueron interpolados, usando una combinación por peso relativo de diferentes modelos de interpolación (*Inverse Distance Weighting*, *Spline*, *Kriging* y *Trend*) en el programa ArcGIS (ESRI, 2016); se realizaron 17 interpolaciones diferentes por cada resultado. De las interpolaciones realizadas, se seleccionaron cuatro. Para esto, primero se realiza un análisis de residuo y se eligen las cuatro interpolaciones de menor residuo respecto de los puntos de interpolación. Luego, para es-

timar el peso relativo se realizó un análisis de correlación lineal, para obtener más tarde el coeficiente de determinación ( $R^2$ ), el cual es usado para calcular el peso relativo de cada interpolación respecto de los puntos originales usados para interpolar. Una vez obtenidas las interpolaciones para los períodos Presente y Futuro, por cada modelo climático (GCM), se procedió a calcular el promedio de los resultados de todos los modelos climáticos para el período Presente y para el período Futuro.

Para obtener la Exposición de las praderas por comuna, se extrajo la superficie total de explotaciones agropecuarias (INE, 2007b) para las comunas de las regiones del Biobío, de La Araucanía, de Los Ríos y de Los Lagos. Se consideró la superficie de producción animal potencial como la equivalente al área de praderas naturales y mejoradas.

Para identificar la Amenaza, se calculó la tasa de cambio (delta) del rendimiento de las praderas en Futuro respecto de la producción Presente (**Ecuación 4**), para el promedio de los seis GCM. Luego, se realizó una estadística zonal (media) de los resultados, utilizando como unidad territorial las comunas en donde se simuló el rendimiento de las praderas. Así se obtuvo la diferencia productiva promedio por comuna. Resultados de Amenaza negativos implican que existe un Riesgo en la comuna por efectos del cambio climático; resultados de Amenaza positivos muestran una oportunidad para la comuna, indicando un aumento en el rendimiento por efectos del cambio climático.

El cálculo del Riesgo y de Oportunidad se realizaron de la misma forma que para los cultivos anuales, es decir, se multiplicó la Amenaza media de la comuna con la Exposición y la Sensibilidad, como se muestra en la **Ecuación 5** y en la **Ecuación 6**. Posteriormente, tanto Riesgo como Oportunidad fueron llevados a intervalos entre [0,1], usando la fórmula de normalización de la **Ecuación 7**.

### 3.6.4 METODOLOGÍA ESPECÍFICA DE LA CAPACIDAD DE CARGA ANIMAL

Para la creación de un modelo simple de carga animal para bovinos de carne, bovinos de leche y ovinos se recu-



re a la fórmula de potencial de capacidad de pastoreo de Castellaro et al. (2010). Esta se define según la **Ecuación 8**:

$$GC = \frac{Yr}{REQUEO} * FUA * FP$$

**Ecuación 8**

Donde *Yr* es la producción de biomasa de la pradera (kg MS/ha/año), *REQUEO* es el requerimiento de materia seca de una unidad animal (kg MS/UA/año), *FUA* es el factor de uso de la pradera y *FP* es el factor de la pendiente, de acuerdo a lo siguiente:

**1) En el caso de bovinos, de carne o leche, se asume un factor de pendiente de:**

- FP = 1 para zonas con pendiente menor a 11%.
- FP = 0.8 para zonas con pendiente entre 11% y 20%.
- FP = 0.6 para zonas con pendiente entre 21% y 30%.
- FP = 0.4 para zonas con pendiente entre 31% y 40%.
- FP = 0.2 para zonas con pendiente entre 41% y 50%.
- FP = 0 para pendientes iguales o superiores a 51%.

**2) En el caso de ovinos, se asume un factor de pendiente de:**

- FP = 1 para zonas con pendiente menor a 11%.
- FP = 0.9 para zonas con pendiente entre 11% y 20 %.
- FP = 0.75 para zonas con pendiente entre 21% y 30%.
- FP = 0.6 para zonas con pendiente entre 31% y 40%.
- FP = 0.5 para zonas con pendiente entre 41% y 50%.
- FP = 0.4 para pendientes entre 51% y 60%.
- FP = 0.2 para pendientes entre 61% y 70%.
- FP = 0 para pendientes iguales o superiores a 71%.

**3) El factor de uso de la pradera permite incorporar pérdidas debido al pisoteo y a cambios de digestibilidad a lo largo del tiempo. La eficiencia de utilización anual puede alcanzar valores de entre 60% y 90%. En este caso, se utilizó un valor de 75% (FUA = 0.75).**

**4) El consumo de una unidad animal es:**

- Bovino lechero: 4% de peso vivo de una vaca adulta. Peso de 500 Kg.

- Bovino de carne: 3% de peso vivo de un novillo. Peso de 350 Kg.
  - Ovino en lactancia: 4% del peso vivo. Peso de 60 Kg.
- En función de lo anterior, los valores de *REQUEO* son:
- Bovinos de leche: 7.300 kg MS/UA/año.
  - Bovinos de carne: 3.840 kg MS/UA/año.
  - Ovinos: 880 kg ME/UA/año.

Considerando entonces el potencial de capacidad de pastoreo descrito, se procedió a calcular la capacidad de carga en función del rendimiento de las praderas consideradas entre las regiones del Biobío y de Los Lagos.

Utilizando ArcGIS (ESRI, 2016), se calculó el *FP* para bovinos, de leche y de carne, y el *FP* para ovinos: se usó un raster de pendientes para todo Chile y se reclasificó las pendientes del raster según las categorías descritas con anterioridad.

Finalmente, para obtener la capacidad de carga animal, con la herramienta “Calculadora Raster” de ArcGIS se calculó la fórmula de potencial de capacidad de pastoreo de Castellaro et al. (2010) para bovinos de leche, bovinos de carne y ovinos. Se utilizaron las interpolaciones del promedio de biomasa de la pradera (kg MS/ha/año) para los períodos Presente y Futuro como representación de *Yr*, se usaron los archivos raster de *FP* generados por especie, además de los valores de *RAQUEO* y *FUA* descritos anteriormente (**Ecuación 8**).

Se realizaron cálculos de la cadena de impacto para la capacidad de carga de bovinos de leche, bovinos de carne y ovinos. Para esto, se utilizó la misma Exposición descrita para las praderas. En el caso de la Amenaza, se calculó el cambio (delta) de las unidades animales/hectárea/año entre los períodos Presente y Futuro, siguiendo la (**Ecuación 4**), y se realizó una estadística zonal (media) de los resultados, utilizando como unidad territorial a las comunas en donde se simuló el rendimiento de las praderas.

El cálculo del Riesgo y de Oportunidad se realizó de la misma forma que en el caso de cultivos anuales y praderas, es decir, se multiplicó la Amenaza media de la comuna con la Exposición y la Sensibilidad, tal como se muestra en la **Ecuación 5** y en la **Ecuación 6**. Posteriormente, tanto

el Riesgo como la Oportunidad fueron llevados a intervalos entre [0,1], usando la fórmula de normalización de la **Ecuación 7**.

## 3.7 SUBSISTEMA: FRUTALES/VIÑA

Se identificaron cinco grandes grupos de frutales que fueron modelados para estimar los impactos del cambio climático y determinar, posteriormente, su Riesgo. Los sistemas frutícolas son: vid vinífera, manzano, nogal, almendro y cerezo.

A continuación, se presenta la cadena de impactos seleccionada para este subsector y la metodología específica para el cálculo del Riesgo.

### 3.7.1 CADENA DE IMPACTO

**Unidad territorial:** Resolución de 5 kilómetros desde Atacama a Aysén, intersectada con suelos con aptitud agrícola, eliminando las Áreas Silvestres Protegidas del Estado.

**Amenaza:** Variación en el rendimiento de cultivos frutales. Cambio en la capacidad productiva de los cultivos como consecuencia del cambio climático.

**Sensibilidad:** Índice que se define en función del promedio de ruralidad, superficie cultivada en secano, diversidad de cultivos, presencia de embalses, pequeñas y medianas explotaciones (PYMEX), presencia de infraestructura y, número de usuarios y funcionarios INDAP.

**Exposición:** Comuna. Superficie de frutales por comuna.

**Capacidad adaptativa:** Índice que se construye a partir del promedio de ocho parámetros: acceso a internet, nivel de escolaridad, número de maquinaria, número de pozos, caminos urbanos y pavimentados, suelo cultivable, número de instituciones/sedes que imparten formación técnico-profesional agrícola por región y proporción de trabajadores agrícolas permanentes/temporales.

**Riesgo:** Índice de 0 a 1 que representa el Riesgo frente al cambio climático en la producción de cultivos frutales, en función de las condiciones de Exposición, Amenaza y Sensibilidad, existentes.

**Metodología Específica:** Se desarrolla un modelo simple de rendimiento de frutales, que estima la variación de la aptitud o idoneidad productiva, y el modelo fenológico, que determina el momento en que ocurren etapas más sensibles. El resultado final es la determinación del rendimiento de los cultivos en kg/ha/año.

### 3.7.2 METODOLOGÍA ESPECÍFICA PARA CULTIVOS DE ALMENDROS, NOGALES, MANZANOS, CEREZOS Y VID VINÍCOLA

Para determinar los efectos del cambio climático sobre los cultivos frutales se recurrió al modelo simple, que corresponde a un modelo simplificado de simulación de cultivos (Zhao et al., 2019). Este modelo estima la fenología de los cultivos frutales y la capacidad de interceptar radiación y transformarla en rendimiento productivo. El manejo agronómico y las prácticas de raleo y poda, que regulan la carga para buscar calibre y desarrollar atributos de calidad, no están incorporados en el modelo. En este sentido, el modelo estima un potencial máximo de captura de energía solar que podría dar sustento a una carga frutal potencial, si es que todos los manejos agronómicos se dan en forma óptima.

El área de estudio se definió entre las regiones de Atacama y de Aysén. Para los modelos fenológicos de cada una de las especies, se limitó el análisis a las comunas que tienen una cantidad mayor a dos hectáreas del cultivo frutal objetivo, en función de la necesidad de incluir a los pequeños productores en el estudio.

La información de las hectáreas de cultivo por comuna (Exposición) fue obtenida del catastro frutícola de las distintas regiones, creado por la Oficina de Estudios y Políticas Agrarias y el Centro de Investigación de Recursos Naturales (ODEPA-CIREN, 2017, 2017a, 2018, 2018a, 2019, 2019a, 2019b, 2019c, 2019d). Los resultados del modelo fueron procesados para todo el territorio del área de estudio. Con



el fin de eliminar las áreas que no tienen aptitud agrícola, se utilizó la capa de Zhao *et al.* (2014)<sup>13</sup>, seleccionando las coberturas de suelo catalogadas por Zhao et al. como cultivos (arrozales, invernaderos, otros cultivos, huertos y barbechos), praderas anuales, praderas perennes y plantación de matorrales.

Los modelos de cultivos frutales entregan como resultado la cantidad de rendimiento anual, al cual se le calcula la media de los 30 años de los períodos Presente y Futuro. La información climática utilizada fue entregada por Meteodata (2019) y los modelos fueron programados utilizando Python 3.7 (Python Software Foundation, 2020).

Para cada cultivo de frutal se utilizan variables fenológicas específicas: fecha de inicio y término de la fase fenológica, unidades de frío totales estimadas con un método simple de interpolación horaria por debajo de 7°C-día de crecimiento (GDH) y grados-día acumulados (GDA).

Los resultados son interpolados utilizando la misma metodología presentada en el subsistema de cultivos anuales, lo mismo para el cálculo de Amenaza, Sensibilidad y Riesgo, utilizando la **Ecuación 4**, la **Ecuación 5**, la **Ecuación 6** y la **Ecuación 7**.

13 Disponible en [http://www.gep.uchile.cl/Landcover\\_CHILE.html](http://www.gep.uchile.cl/Landcover_CHILE.html)



H

1023





# 4

# RESULTADOS

## 4.1 SENSIBILIDAD

---

Los resultados de Sensibilidad fueron utilizados en todas las cadenas de impacto. En la **Figura 2** se presenta el índice de Sensibilidad, como resultado promediar diversos factores: índice de ruralidad, índice de balance riego-secano, índice de diversificación, índice de embalses, índice de pequeñas y medianas explotaciones, índice INDAP e índice de infraestructura. Los valores van de la categoría Bajo a la categoría Alto.

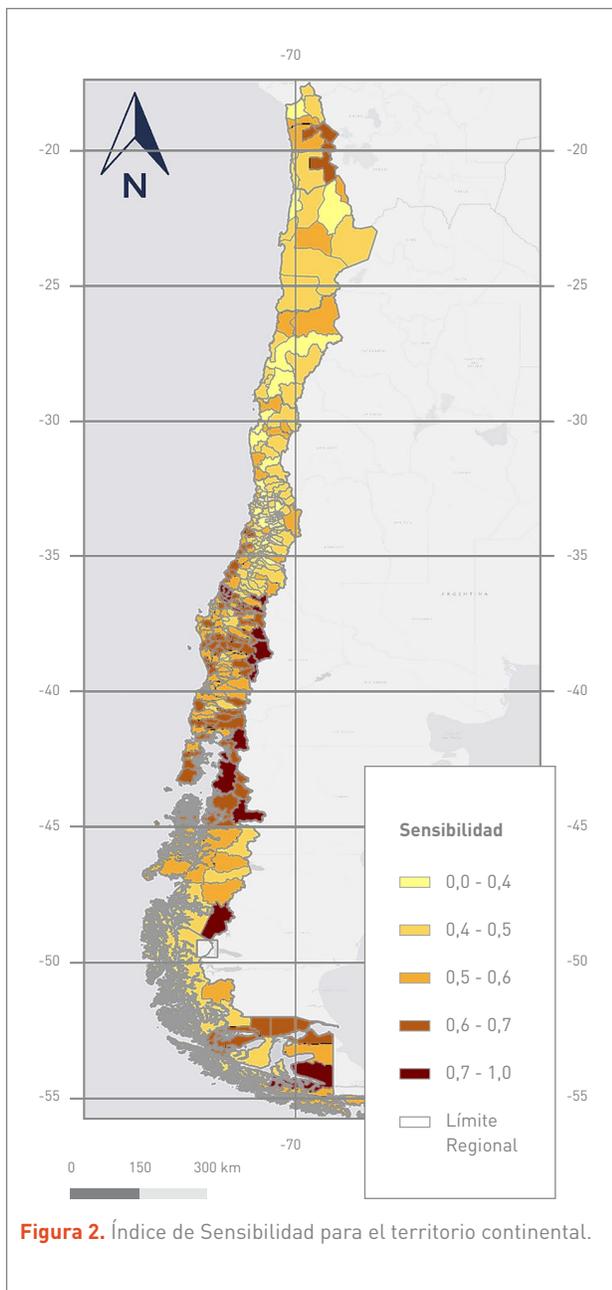
A nivel nacional, las comunas que presentaron un mayor índice de Sensibilidad son Chaitén (Región de Los Lagos), San Fabián (Región de Ñuble), Lonquimay (Región de La Araucanía) y Treguaco (Región de Ñuble); mientras, las que presentaron un menor índice son Melipilla (Región Metropolitana), Colina (Región Metropolitana) y Casablanca (Región de Valparaíso).

## 4.2 CAPACIDAD ADAPTATIVA

---

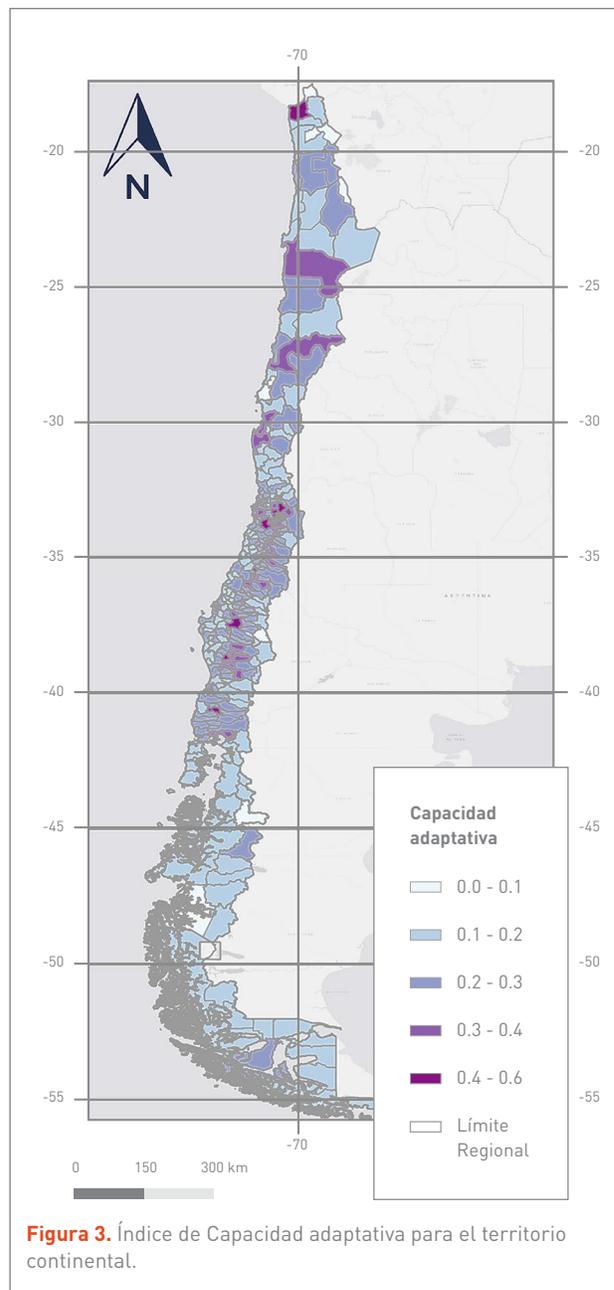
En la **Figura 3** se presenta el índice de Capacidad adaptativa, como resultado de promediar diversos factores: acceso a internet, nivel de escolaridad, número de maquinaria, número de pozos, caminos urbanos y pavimentados, suelo cultivable, número de instituciones/sedes que imparten formación técnico-profesional agrícola por región y proporción de trabajadores agrícolas permanentes/temporales.

A nivel nacional, las comunas que presentan un mayor índice de capacidad adaptativa son Maipú (Región Metropolitana), Melipilla (Región Metropolitana), Puente Alto (Región Metropolitana) y Los Ángeles (Región del Biobío); mientras, las que presentaron un menor índice son General Lagos (Región de Arica y Parinacota), Camiña (Región de Tarapacá), Alto Biobío (Región del Biobío) y Colchane (Región de Tarapacá).



**Figura 2.** Índice de Sensibilidad para el territorio continental.

Fuente: Elaboración propia.



**Figura 3.** Índice de Capacidad adaptativa para el territorio continental.

Fuente: Elaboración propia.

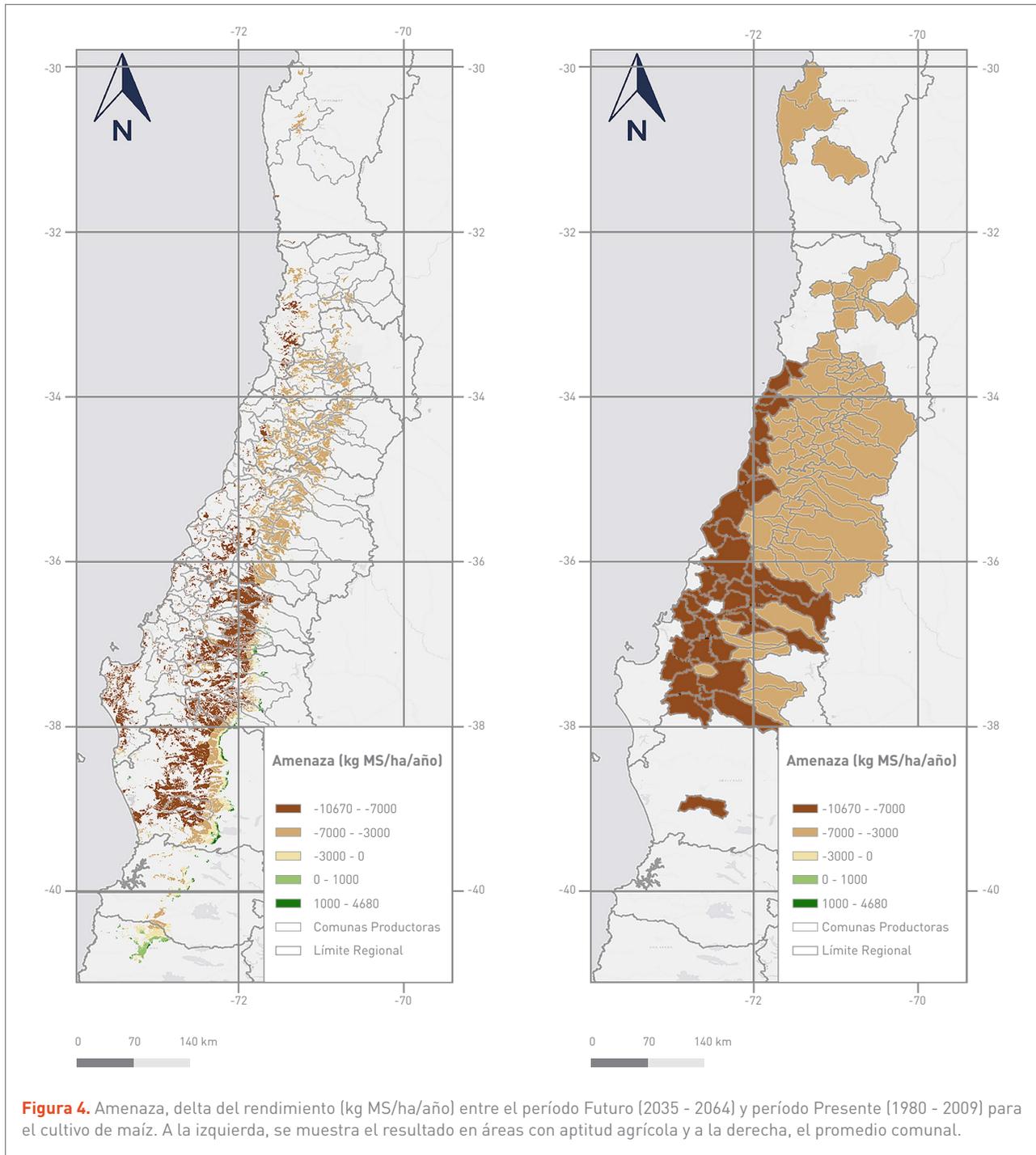
## 4.3 AMENAZAS SUBSISTEMA CULTIVOS ANUALES

### 4.3.1 AMENAZA

En la **Figura 4**, en la **Figura 5**, en la **Figura 6**, en la **Figura 7**, en la **Figura 8** y en la **Figura 9** se muestra la Amenaza (en kilogramos de MS/hectárea/año) para los cultivos de

maíz, frijol, trigo en secano y bajo riego, papa en secano y bajo riego, respectivamente. Resultados negativos indican pérdida en los rendimientos simulados en el período Futuro respecto del período Presente. Los resultados positivos indican aumento en los rendimientos por efectos del cambio climático.

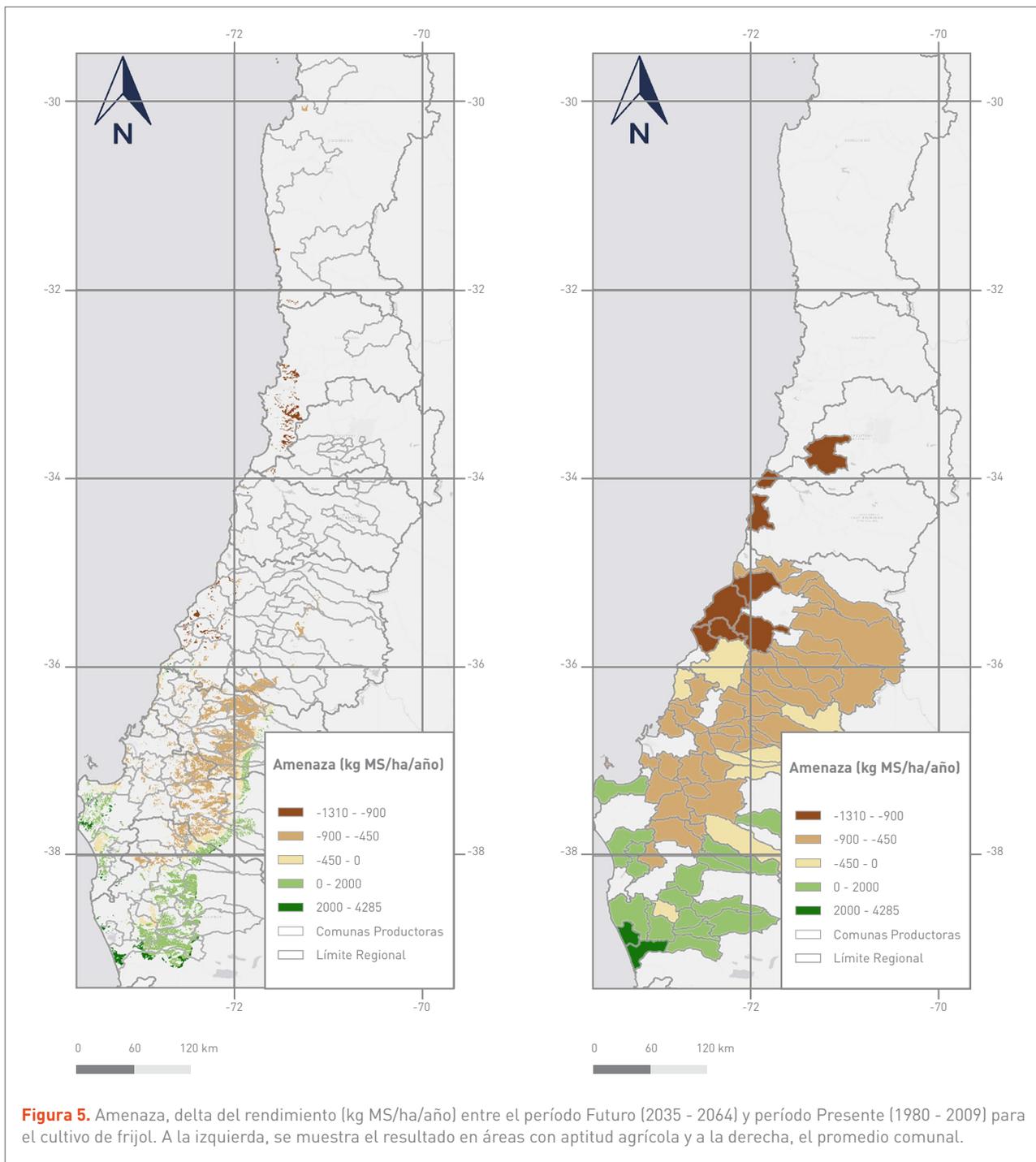
En el caso del cultivo de maíz, las comunas que se ven mayormente amenazadas son Tomé (Región del Biobío), Constitución (Región del Maule) y Licantén (Región del



Fuente: Elaboración propia.

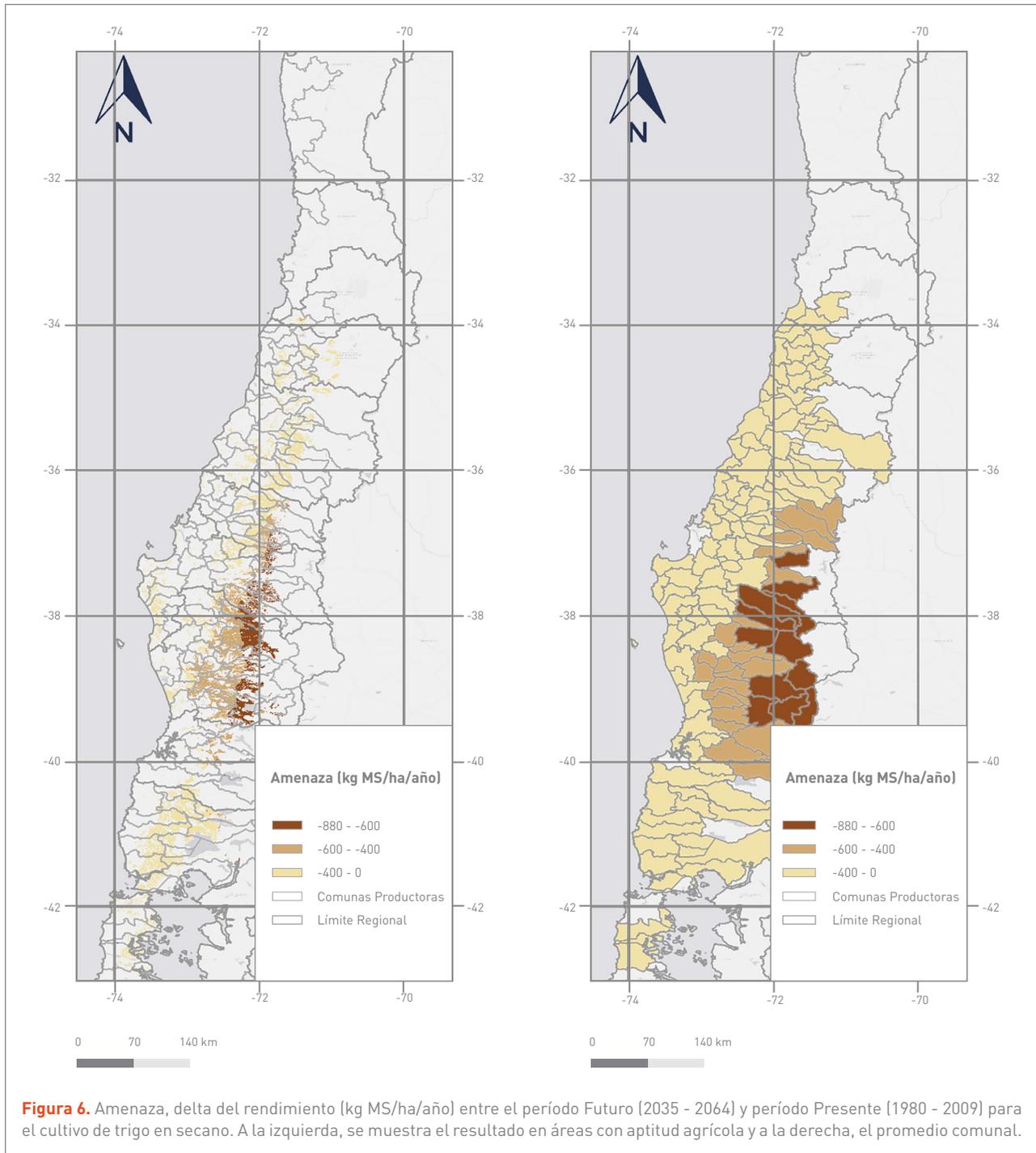
Maule), con una Amenaza promedio de -8.759, -8.656 y -8.548 kg MS/ha/año, respectivamente. Cabe destacar que existen sectores, por ejemplo, dentro de las comunas Villarrica (Región de La Araucanía), Osorno (Región de Los Lagos) y Río Negro (Región de Los Lagos), donde este cultivo presenta resultados positivos.

Para el cultivo de frijol, las comunas que se ven mayormente amenazadas son Constitución (Región del Maule), Melipilla (Región Metropolitana) y Chanco (Región del Maule), con una Amenaza promedio de -1.115, -1.028 y -1.020 kg MS/ha/año, respectivamente. Por el contrario,



las comunas que se ven mayormente beneficiadas son Saavedra (Región de La Araucanía), Teodoro Schmidt (Región de La Araucanía) y Carahue (Región de La Araucanía), con valores promedio comunal de 3.345, 2.690 y 1.806 kg MS/ha/año, respectivamente.

Para el caso del cultivo de trigo en seco, las comunas que se ven mayormente amenazadas son Quilaco (Región del Biobío), Curacautín (Región de La Araucanía) y Santa Bárbara (Región del Biobío), con una Amenaza promedio de -780, -762 y -745 kg MS/ha/año, respectivamente.

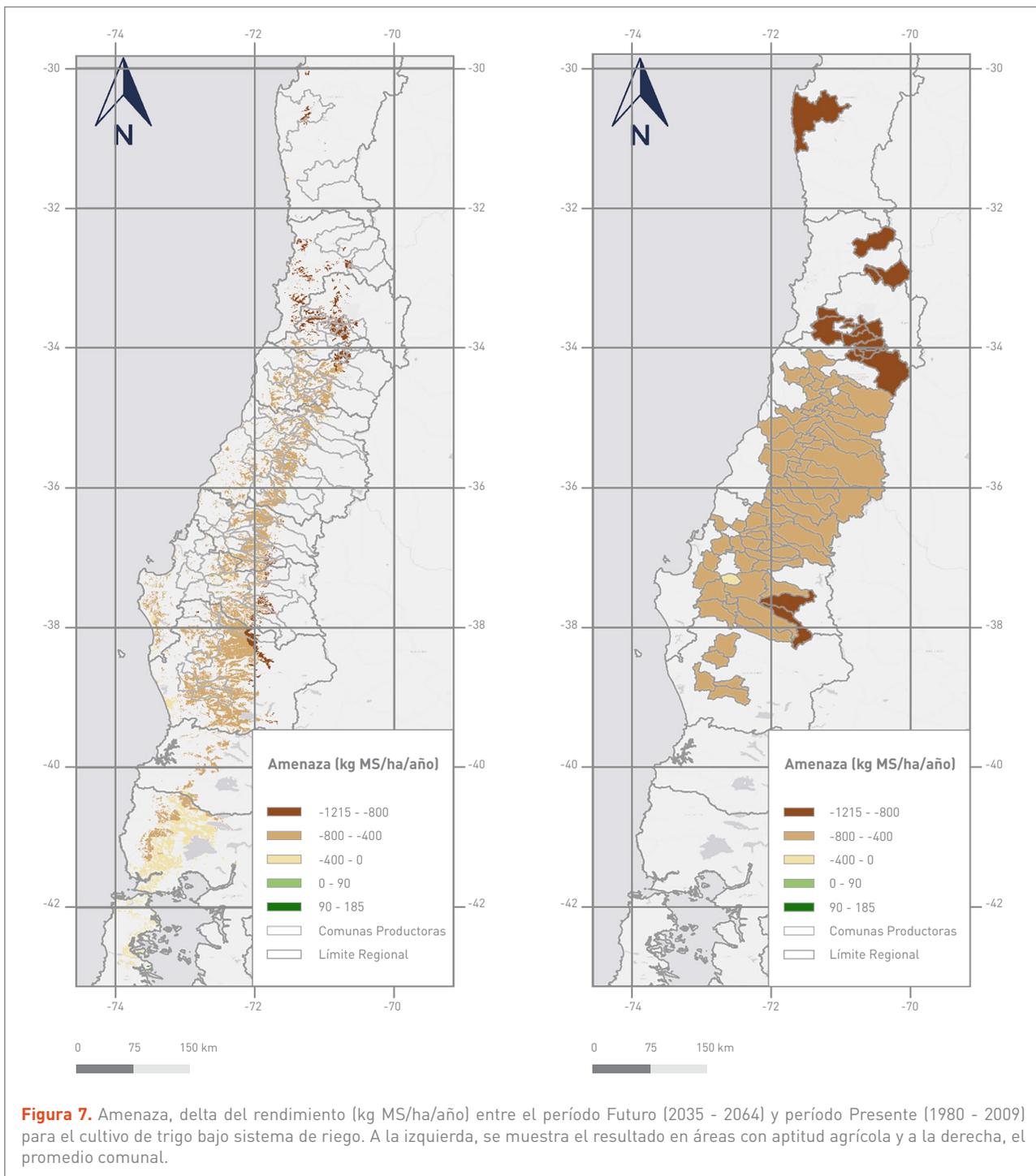


Fuente: Elaboración propia.

Para el caso del cultivo de trigo bajo riego, las comunas que se ven mayormente amenazadas son Putaendo (Región de Valparaíso), Los Andes (Región de Valparaíso) y Calle Larga (Región de Valparaíso), con una Amenaza promedio a nivel comunal de -1.208, -1.156 y -1.147 kg MS/ha/año, respectivamente. Cabe destacar que en la comuna

de Queilén (Región de Los Lagos), existen sectores donde presenta un aumento de los rendimientos por efectos del cambio climático, del orden de 150 kg MS/ha/año.

Para el caso del cultivo de papa en seco, las comunas que se ven mayormente amenazadas son Pucón (Región de La Arau-

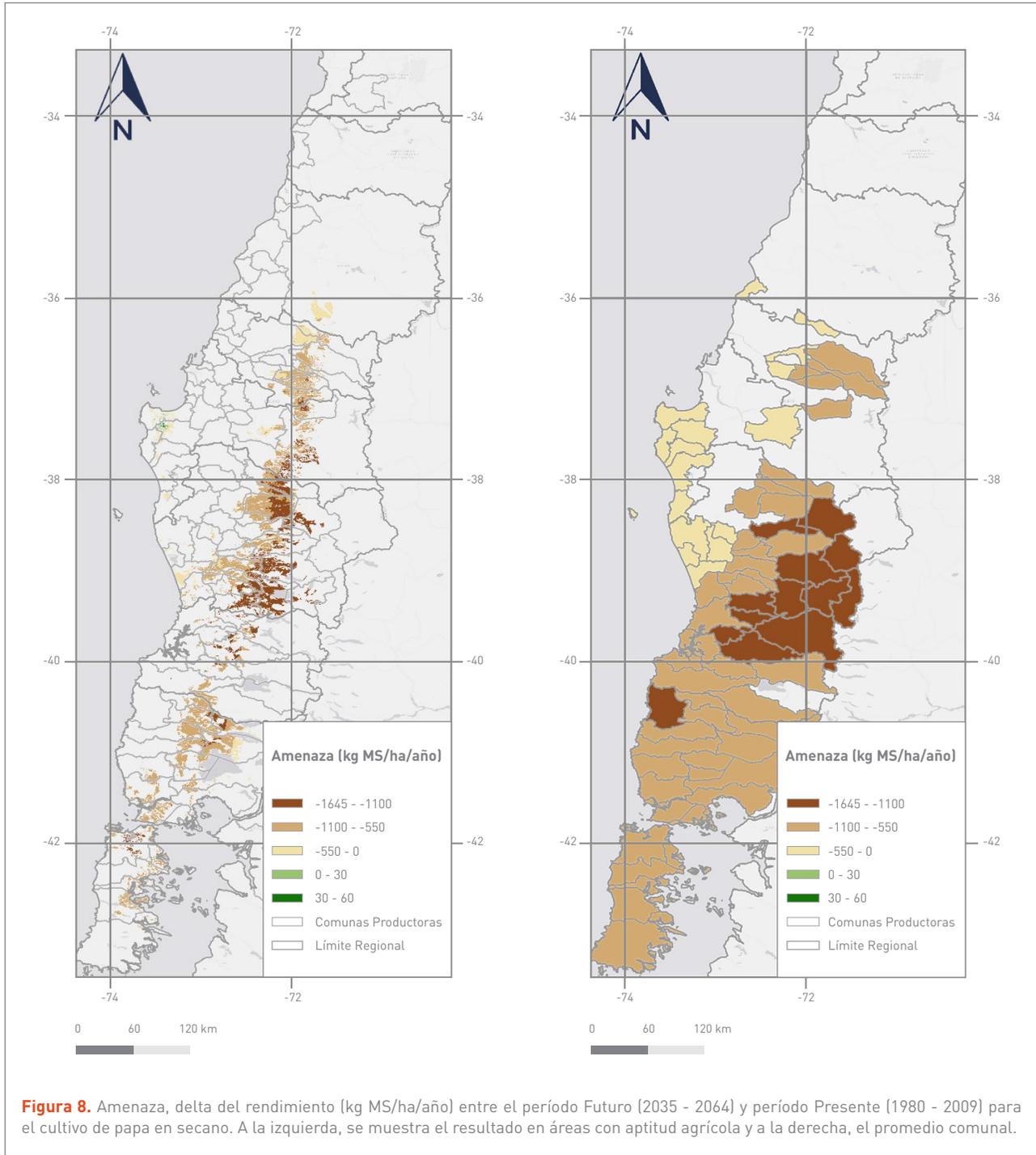


Fuente: Elaboración propia.

caña), Villarrica (Región de La Araucanía) y Curarrehue (Región de La Araucanía), con una Amenaza promedio a nivel comunal de -1.364, -1.363 y -1.344 kg MS/ha/año, respectivamente.

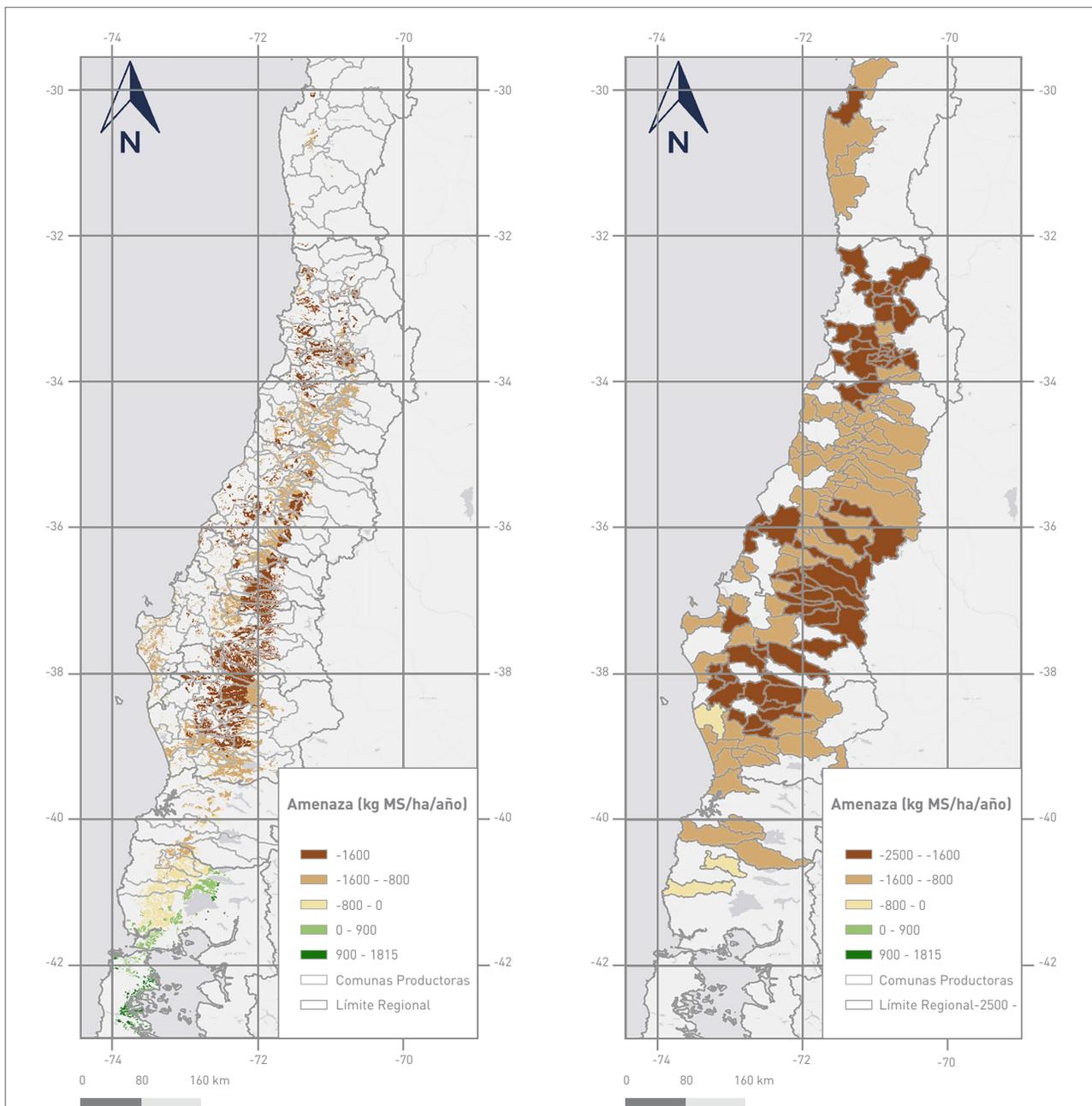
Para el caso del cultivo de papa bajo riego, las comunas que se ven mayormente amenazadas son Santa Bárbara

(Región del Biobío), Tucapel (Región del Biobío) y Putaendo (Región de Valparaíso), con una Amenaza promedio de -2.064, -2.008 y -1.986 kg MS/ha/año, respectivamente. Cabe destacar que en la Provincia de Chiloé existen comunas donde este cultivo presenta aumento en los rendimientos por efectos del cambio climático.



En la **Tabla 3** se puede ver la estadística descriptiva del cambio de rendimiento entre los dos períodos simulados (Futuro respecto de Presente) para los cultivos de maíz, de frijol, de trigo en seco, de trigo bajo riego, de papa en

seco y de papa bajo riego. En esta, se verifica que todos los cultivos de maíz, frijol y papa bajo riego son los que presentan mayor variabilidad.



**Figura 9.** Amenaza, delta del rendimiento (kg MS/ha/año) entre el período Futuro (2035 - 2064) y período Presente (1980 - 2009) para el cultivo de papa bajo sistema de riego. A la izquierda, se muestra el resultado en áreas con aptitud agrícola y a la derecha, el promedio comunal. Fuente: Elaboración propia.

Cultivo	Mínimo	Máximo	Promedio	Desviación estándar
Maíz	-10.667,6	4.676,5	-6.460,4	2.159,3
Frijol	-1.311,7	4.283,5	12,8	1.001,6
Trigo seco	-877,21	-65,6	-396,5	170,5
Trigo riego	-1.214,3	184,5	-583,5	183,8
Papa seco	-1.644,5	58,8	-920,3	298,1
Papa riego	-2.494,4	1.813	-1.302	706,9

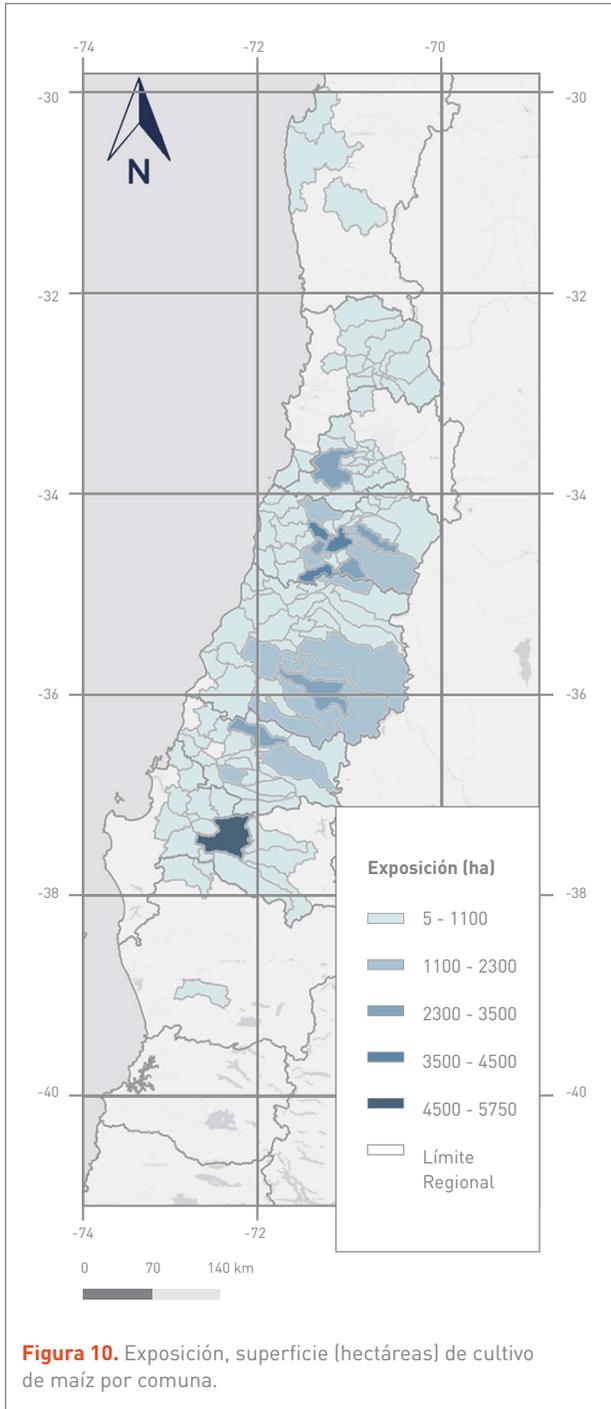
**Tabla 3.** Estadística descriptiva para el subsistema Cultivos anuales.



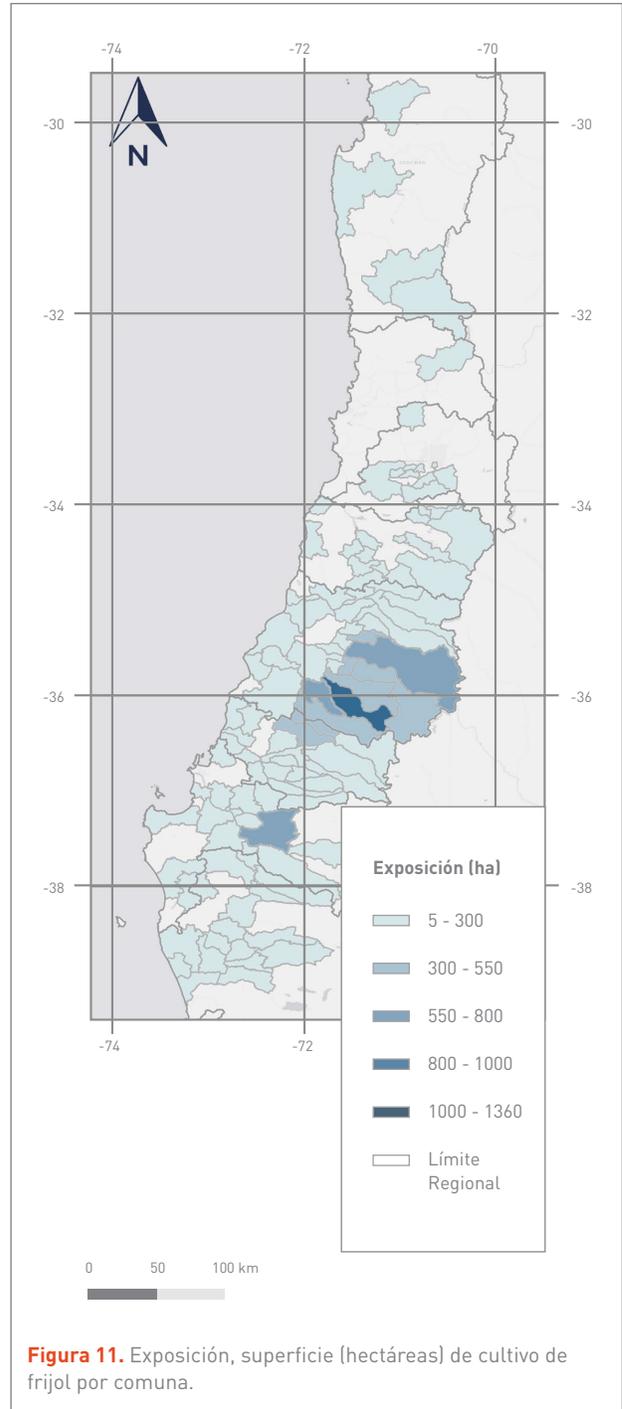
### 4.3.2 EXPOSICIÓN

En la **Figura 10**, en la **Figura 11**, en la **Figura 12**, en la **Figura 13**, en la **Figura 14** y en la **Figura 15** se muestran la Exposición (superficie del cultivo a nivel comunal) de los cultivos de maíz, frijol, trigo en seco, trigo con riego,

papa en seco y papa con riego, respectivamente. Las comunas que presentan mayor superficie cultivada de maíz son Los Ángeles (Región del Biobío), Chépica (Región del Libertador Bernardo O'Higgins) y Pichidegua (Región del Libertador Bernardo O'Higgins), con 5.740, 4.244 y 4.207 hectáreas, respectivamente.



Fuente: Elaboración propia.



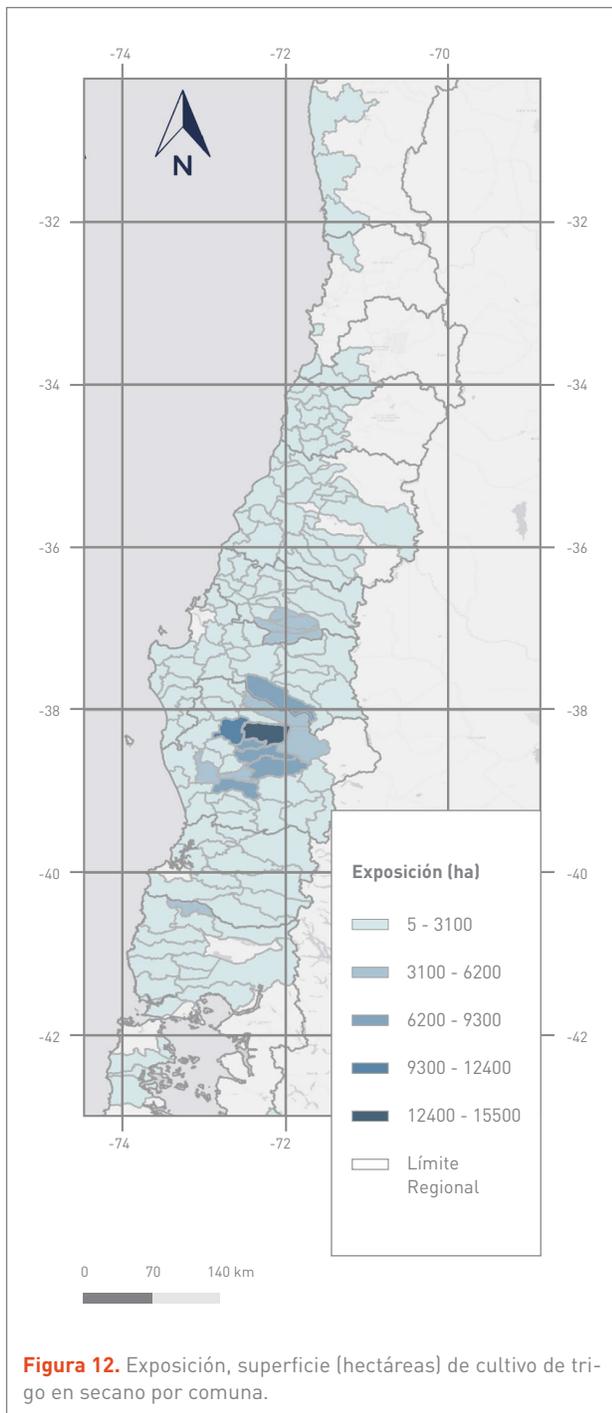
Fuente: Elaboración propia.

Para el caso del frijol, las comunas con mayor superficie son Longaví (Región del Maule), Los Ángeles (Región del Biobío) y San Clemente (Región del Maule), con 1.358, 709 y 708 hectáreas, respectivamente.

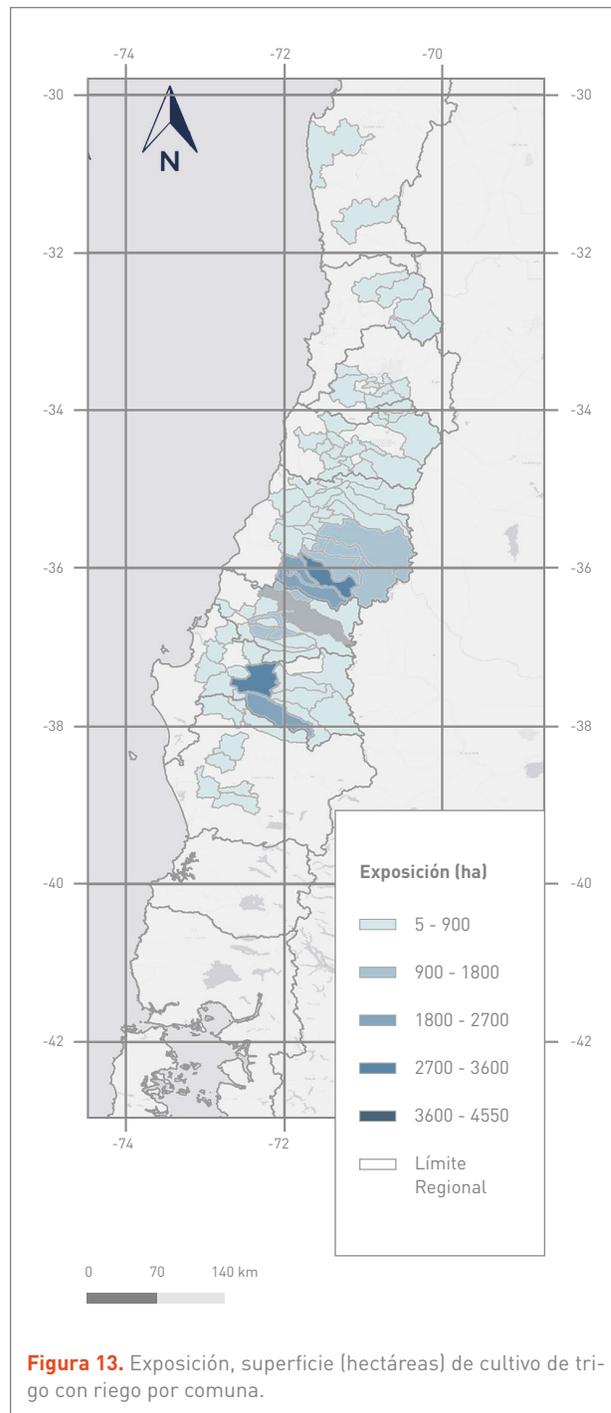
Para el cultivo de trigo en seco, las comunas con mayor superficie son Victoria (Región de La Araucanía), Traiguén

(Región de La Araucanía) y Lautaro (Región de La Araucanía), con 15.488, 11.336 y 7.920 hectáreas, respectivamente.

Para el cultivo de trigo con riego, las comunas con mayor superficie son Coihueco (Región del Ñuble), San Carlos (Región del Ñuble) y Los Ángeles (Región del Biobío),



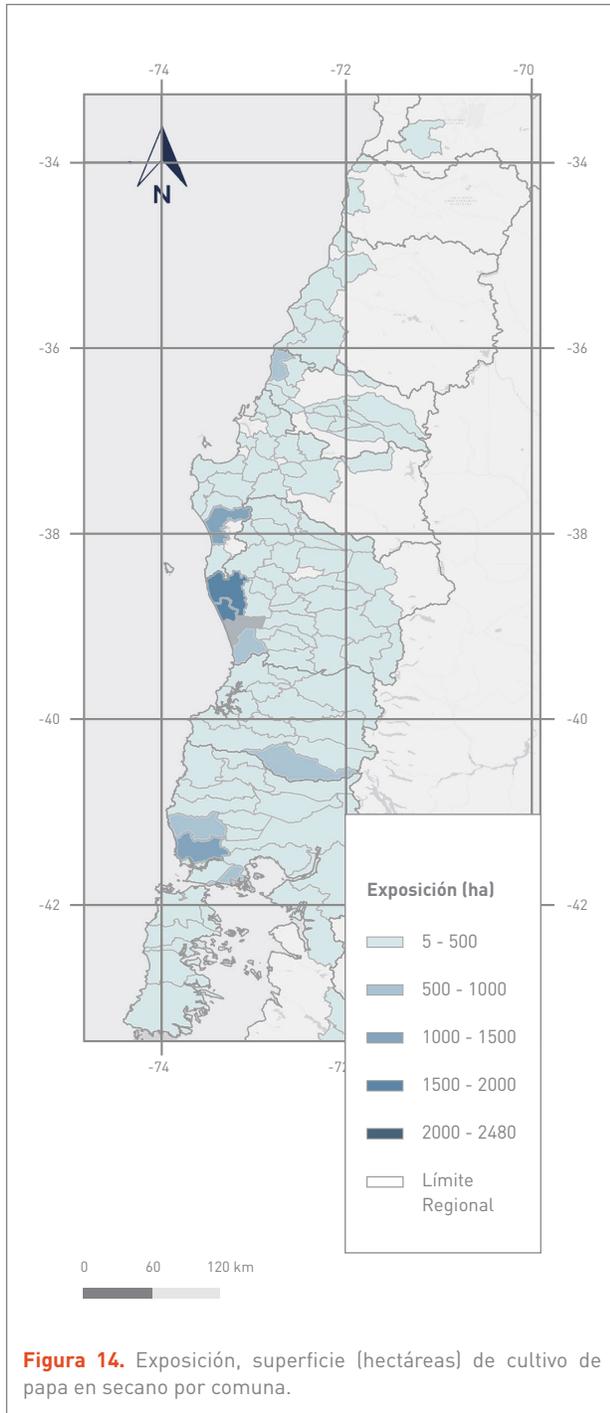
Fuente: Elaboración propia.



Fuente: Elaboración propia.

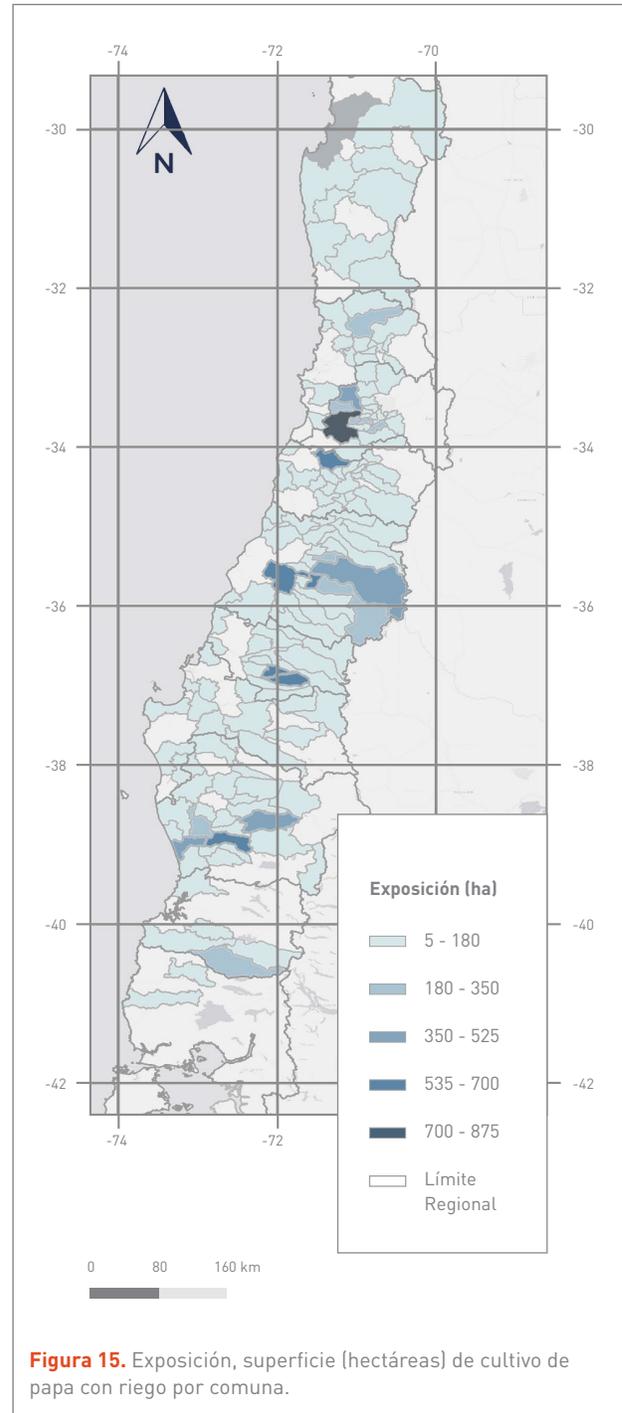


con 4.544, 3.702 y 3.430 hectáreas, respectivamente. Para el cultivo de papa en seco, las comunas con mayor superficie son Teodoro Schmidt (Región de La Araucanía), Carahue (Región de La Araucanía) y Saavedra (Región de La Araucanía), con 2.477, 1.754 y 1.596 hectáreas, respectivamente.



Fuente: Elaboración propia.

Para el cultivo de papa con riego, las comunas con mayor superficie son Coquimbo (Región de Coquimbo), La Serena (Región de Coquimbo) y Melipilla (Región Metropolitana), con 871, 750 y 738 hectáreas, respectivamente.

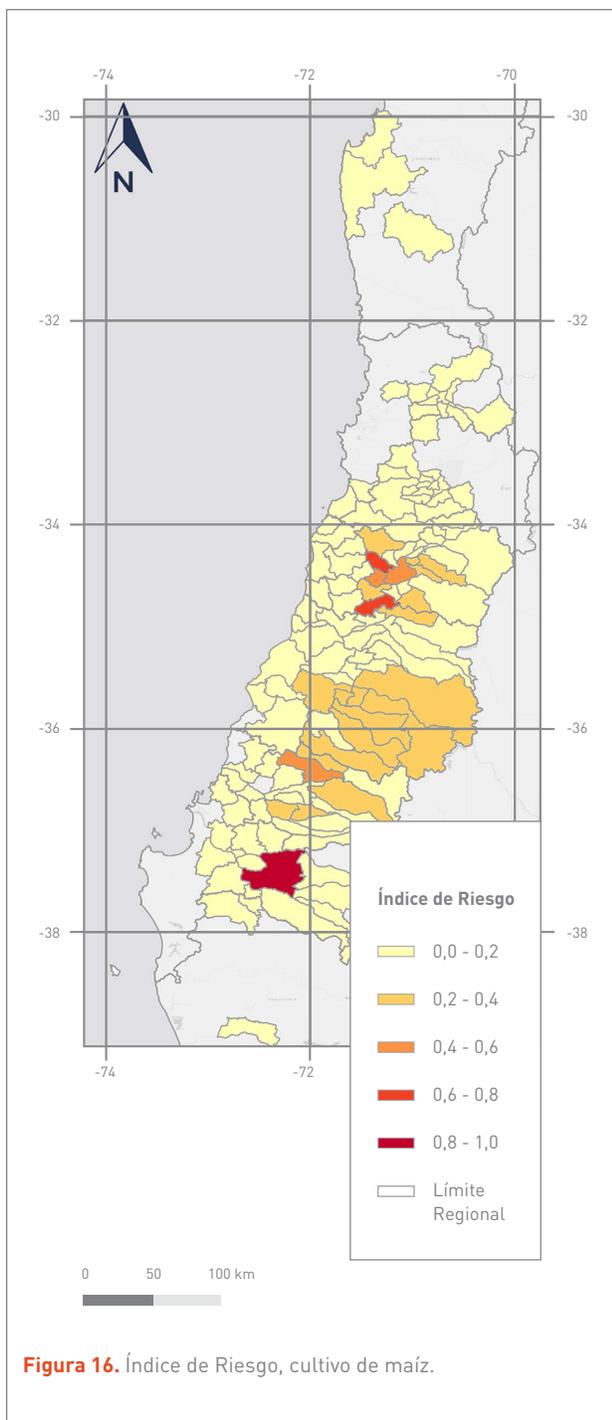


Fuente: Elaboración propia.

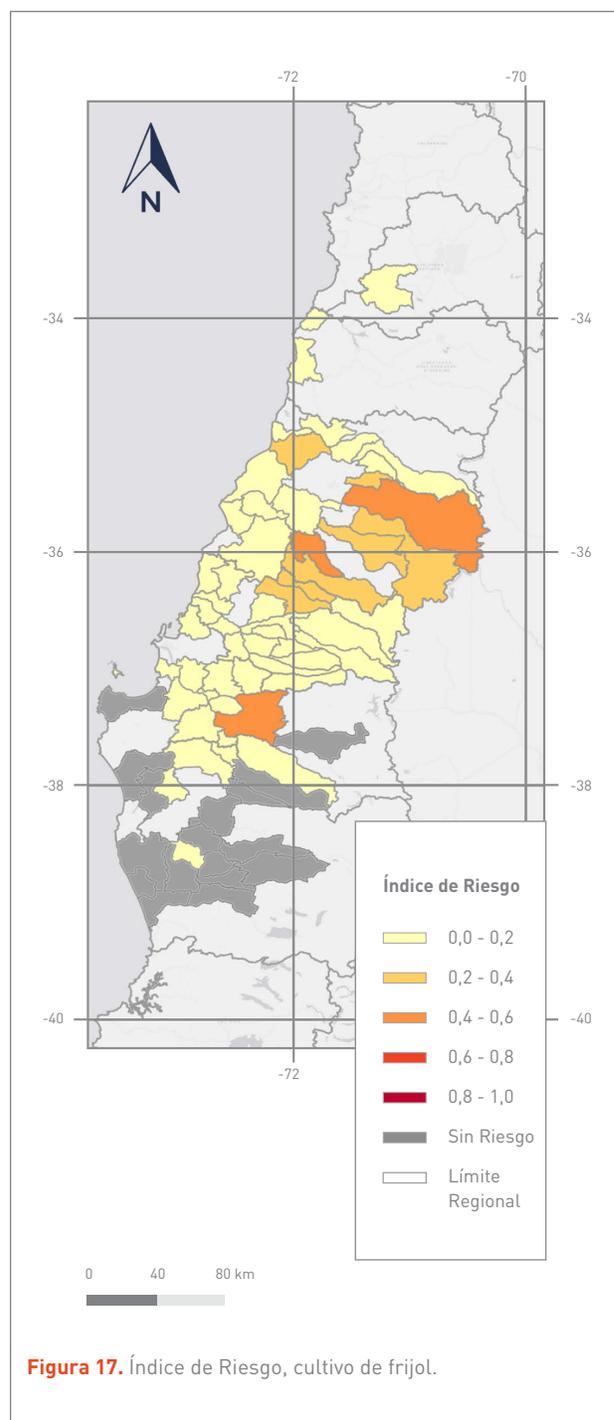
### 4.3.3 RIESGO

En la **Figura 16**, en la **Figura 17**, en la **Figura 18**, en la **Figura 19**, en la **Figura 20** y en la **Figura 21** se muestran los índices de Riesgo obtenidos para los cultivos de maíz, frijol, trigo en seco, trigo con riego, papa en seco y papa con riego.

De los resultados obtenidos del subsistema cultivos anuales, se puede concluir que todos los cultivos analizados (maíz, frijol, trigo y papa) presentarán algún nivel de Riesgo en los rendimientos asociado al cambio climático. En el caso del maíz, se estima que las comunas con mayor Riesgo serán Los Ángeles (Región del Biobío), Pichidegua (Región del Libertador Bernardo O'Higgins) y Chépica (Re-



Fuente: Elaboración propia.

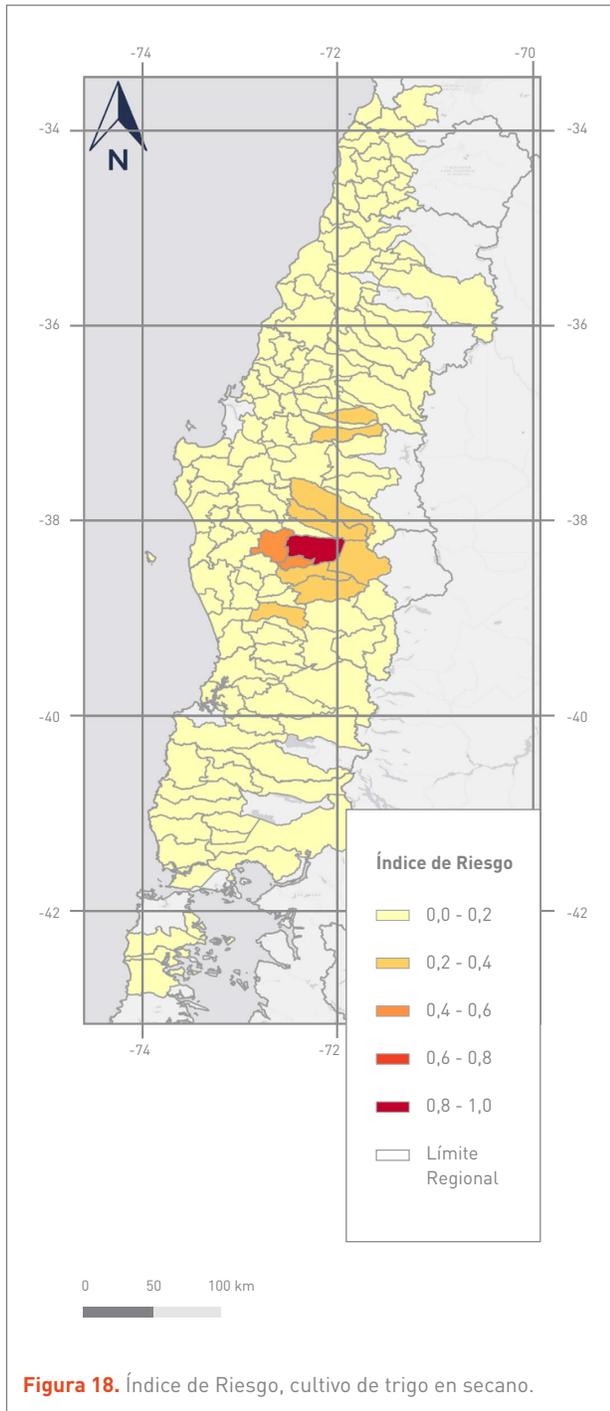


Fuente: Elaboración propia.

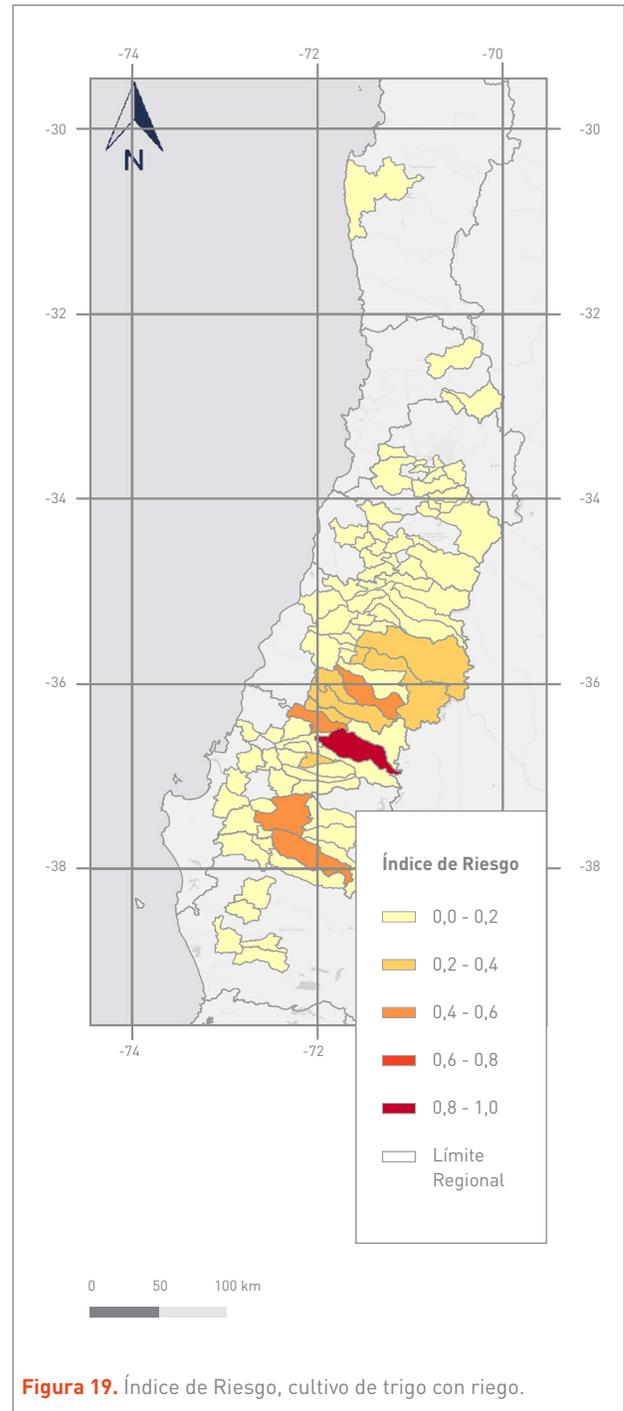


gión del Libertador Bernardo O'Higgins). Para el cultivo de frijol, las comunas que -se estima- tendrán mayor Riesgo son Longaví (Región del Maule), San Clemente (Región del Maule) y Retiro (Región del Maule). Respecto del cultivo de trigo en seco, las comunas con mayor Riesgo serían Victoria, Traiguén y Perquenco (todas de la Región de La

Araucanía). Mientras que, para trigo con riego, las comunas con mayor Riesgo serían Coihueco (Región del Ñuble), Longaví (Región del Maule) y San Carlos (Región del Ñuble). En cuanto al cultivo de papa en seco, se estima que las comunas con mayor Riesgo serán Los Muermos (Región de Los Lagos), Teodoro Schmidt (Región de La

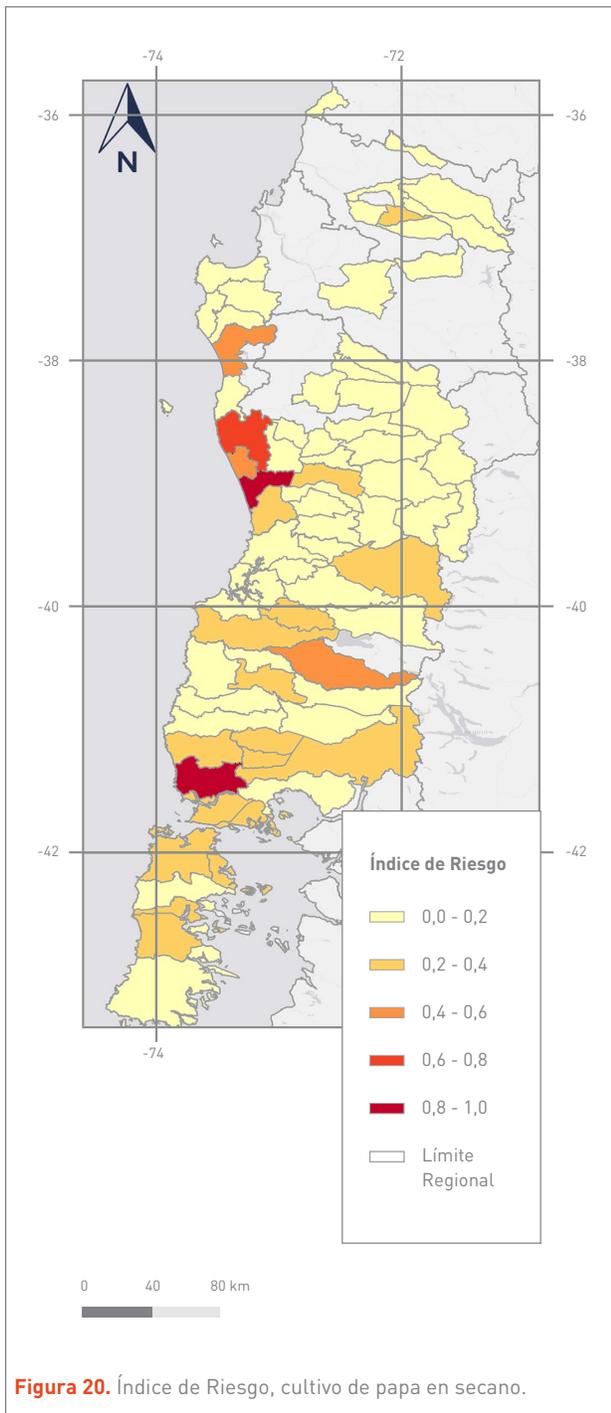


Fuente: Elaboración propia.

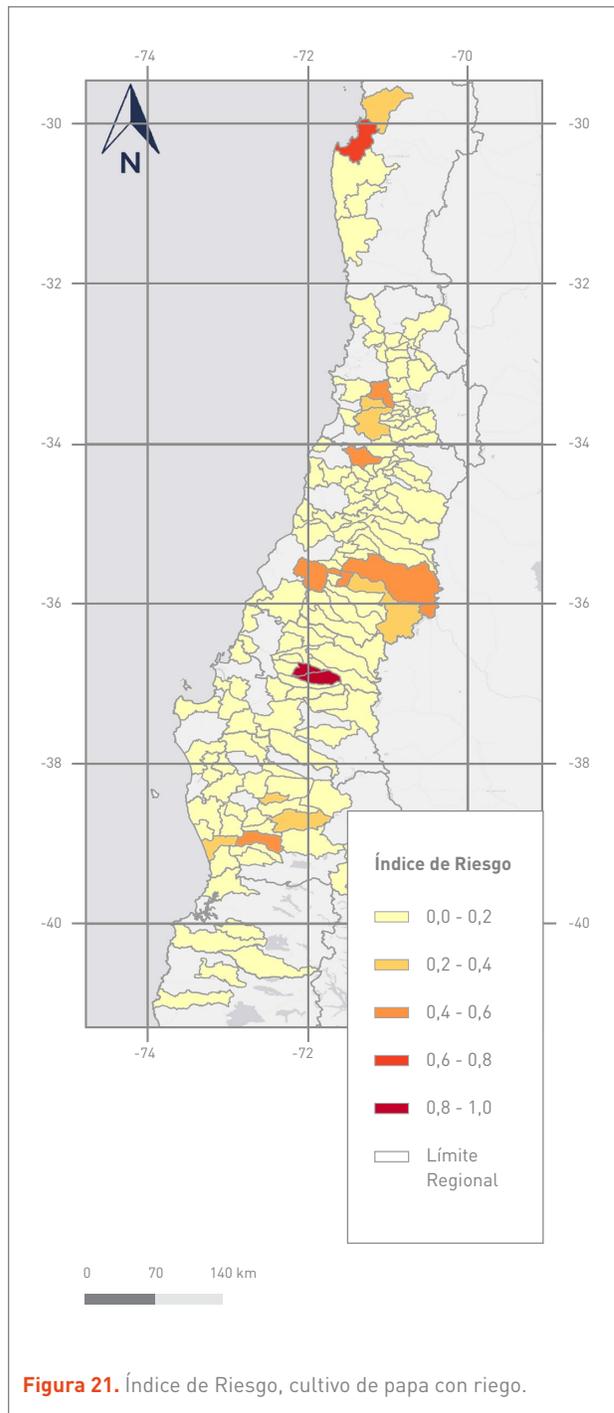


Fuente: Elaboración propia.

Araucanía) y Carahue (Región de La Araucanía). Y en el cultivo de papa con Riesgo, se estima que las comunas con mayor Riesgo serán El Carmen (Región del Ñuble), San Ignacio (Región del Ñuble) y Coquimbo (Región de Coquimbo).



Fuente: Elaboración propia.

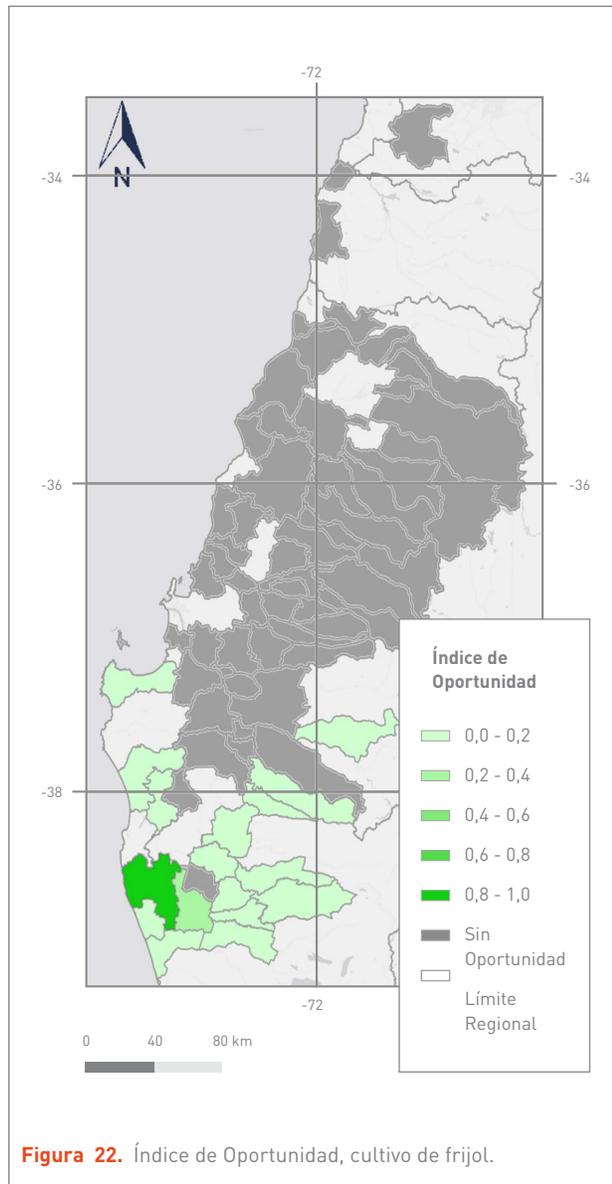


Fuente: Elaboración propia.



### 4.3.4 OPORTUNIDAD

En el caso de los cultivos anuales, el cultivo de frijol es el único que entregó valores positivos en el índice de Oportunidad, a nivel comunal de rendimiento, resultado que se muestra en la **Figura 22**. En esta gráfica, se observan las comunas que podrían presentar aumento en el rendimiento promedio asociado al cambio climático. Las que mayormente se beneficiarían son Carahue (Región de La Araucanía), Nueva Imperial (Región de La Araucanía) y Padre de Las Casas (Región de La Araucanía).



**Figura 22.** Índice de Oportunidad, cultivo de frijol.

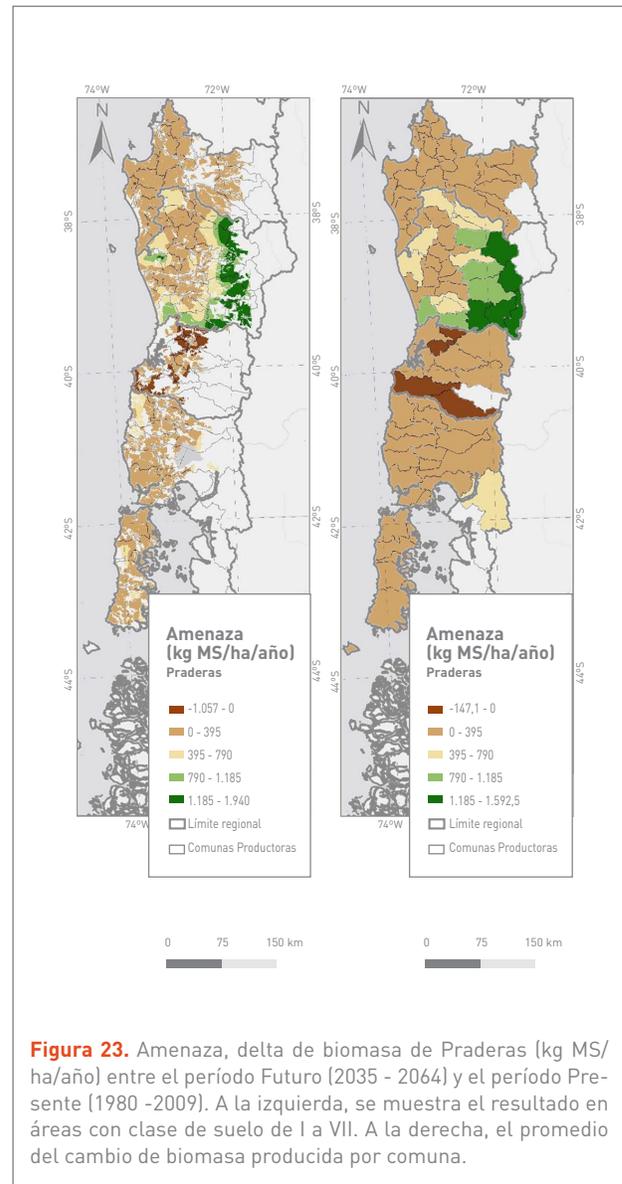
Fuente: Elaboración propia.

## 4.4 SUBSISTEMA PRADERAS

### 4.4.1 AMENAZA

Las siguientes figuras muestran el resultado de Amenaza a causa del cambio climático en el subsistema Praderas y en su capacidad sustentadora animal.

En el mapa de la **Figura 23** se muestra la Amenaza (en kgMS/ha/año) de las praderas en la Región del Biobío, de La Arau-

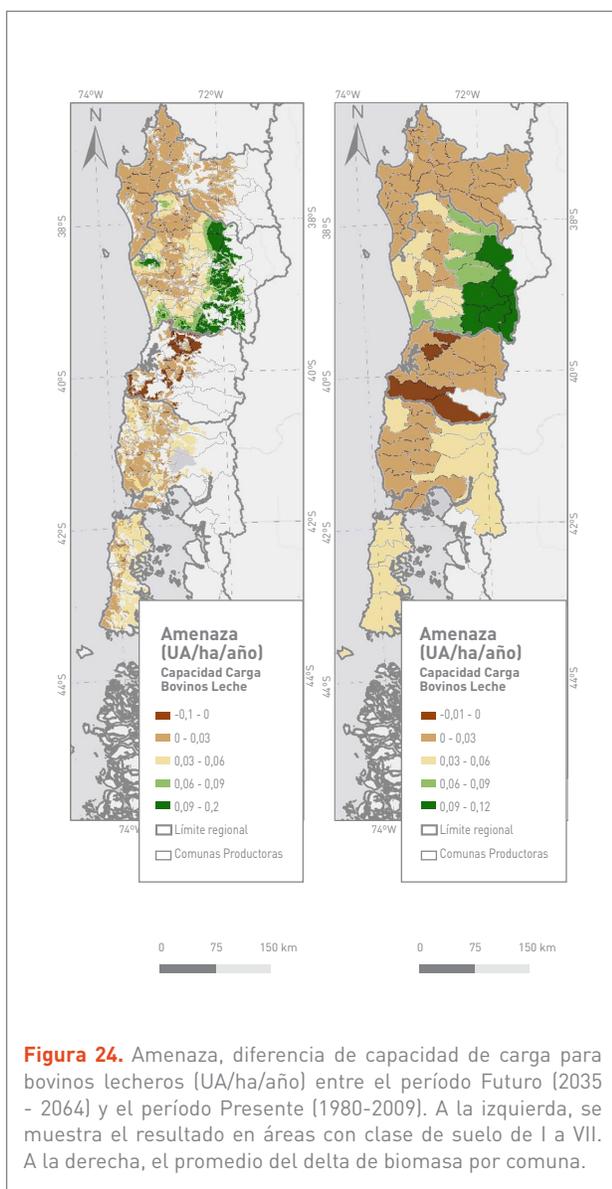


**Figura 23.** Amenaza, delta de biomasa de Praderas (kg MS/ha/año) entre el período Futuro (2035 - 2064) y el período Presente (1980 - 2009). A la izquierda, se muestra el resultado en áreas con clase de suelo de I a VII. A la derecha, el promedio del cambio de biomasa producida por comuna.

Fuente: Elaboración propia.

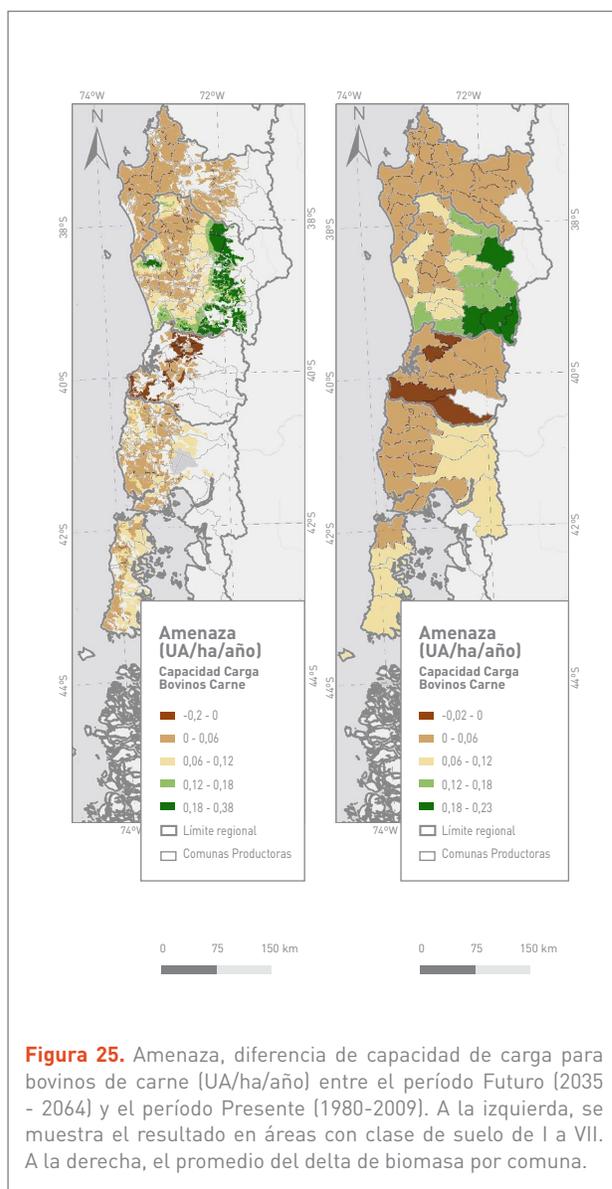
caña, de Los Ríos y de Los Lagos. Resultados negativos indican pérdida de biomasa; por el contrario, resultados positivos indican aumento en la biomasa por efectos del cambio climático.

Los mapas de la **Figura 24**, de la **Figura 25** y de la **Figura 26** muestran la Amenaza en la capacidad de carga para bovinos de leche, bovinos de carne y ovinos, respectivamente (unidad animal/ha/año). Resultados negativos indican una disminución de la capacidad sustentadora animal de las praderas; por el contrario, resultados positivos indican un aumento en la capacidad de carga por efectos del cambio climático.



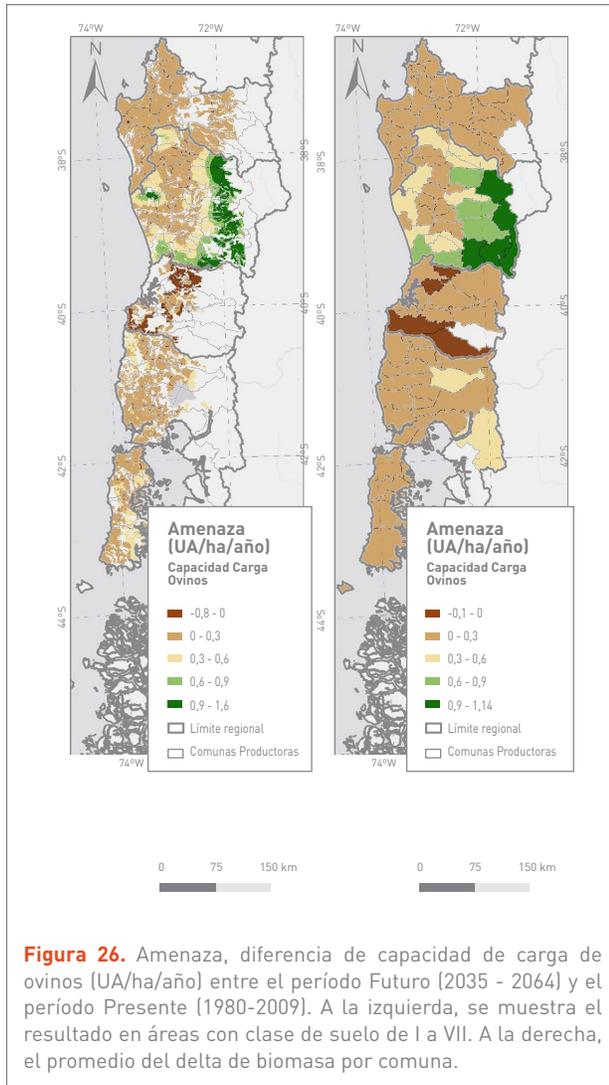
**Figura 24.** Amenaza, diferencia de capacidad de carga para bovinos lecheros (UA/ha/año) entre el período Futuro (2035 - 2064) y el período Presente (1980-2009). A la izquierda, se muestra el resultado en áreas con clase de suelo de I a VII. A la derecha, el promedio del delta de biomasa por comuna.

Fuente: Elaboración propia.



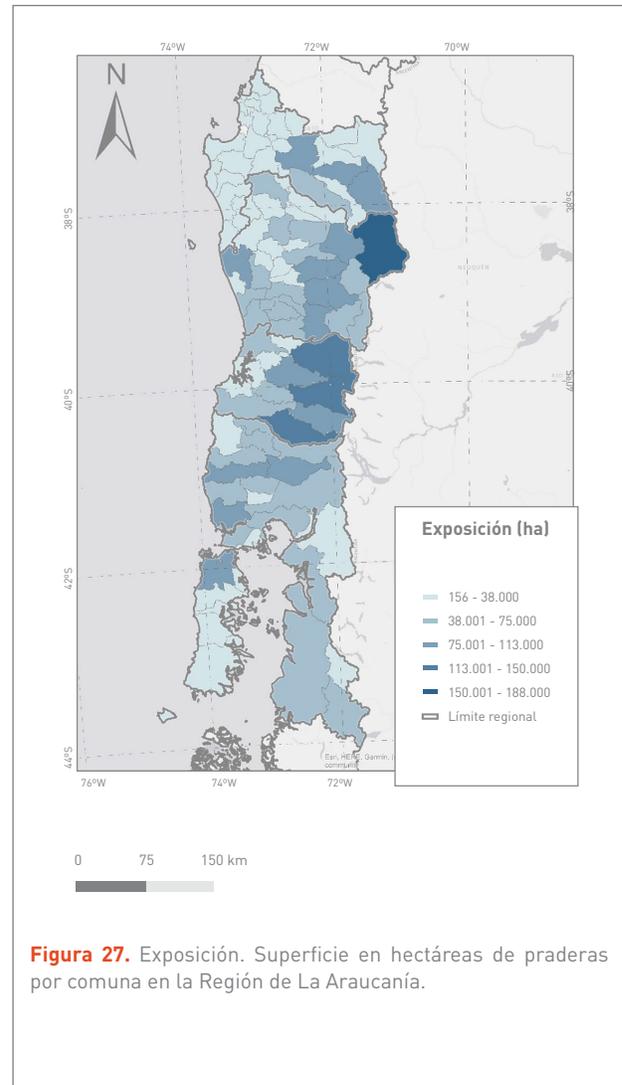
**Figura 25.** Amenaza, diferencia de capacidad de carga para bovinos de carne (UA/ha/año) entre el período Futuro (2035 - 2064) y el período Presente (1980-2009). A la izquierda, se muestra el resultado en áreas con clase de suelo de I a VII. A la derecha, el promedio del delta de biomasa por comuna.

Fuente: Elaboración propia.



**Figura 26.** Amenaza, diferencia de capacidad de carga de ovinos (UA/ha/año) entre el período Futuro (2035 - 2064) y el período Presente (1980-2009). A la izquierda, se muestra el resultado en áreas con clase de suelo de I a VII. A la derecha, el promedio del delta de biomasa por comuna.

Fuente: Elaboración propia.



**Figura 27.** Exposición. Superficie en hectáreas de praderas por comuna en la Región de La Araucanía.

Fuente: Elaboración propia.

#### 4.4.2 EXPOSICIÓN

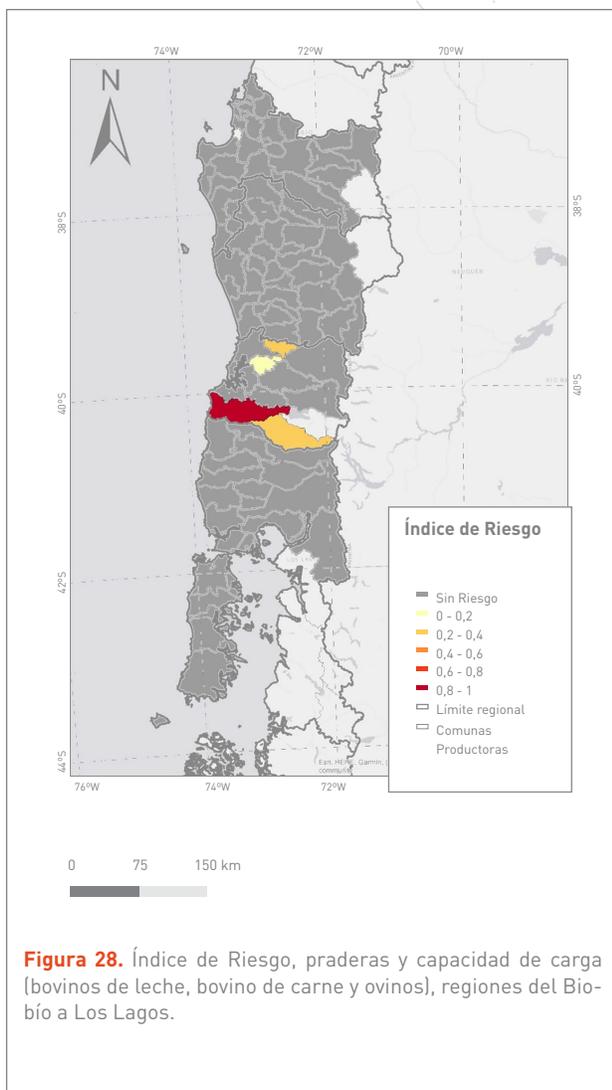
En la **Figura 27** se muestra la Exposición (superficie de explotaciones agropecuarias a nivel comunal) de las praderas en las regiones del Biobío, La Araucanía, Los Ríos y Los Lagos.

Las comunas de mayor Exposición, representadas en color azul oscuro, corresponden a las comunas de Lonquimay (Región de La Araucanía), con cerca de 188.000 hectáreas; Panguipulli (Región de Los Ríos), con 148.175 hectáreas; Futrono (Región de Los Ríos), con 132.082 hectáreas; y Río Bueno (Región de Los Ríos), con 135.700 hectáreas.

#### 4.4.3 RIESGO

En la **Figura 28** se muestra el resultado de Riesgo para las praderas y para la capacidad de carga animal (bovinos de leche, bovinos de carne y ovinos) por efecto del cambio climático. Este índice fue calculado como el producto de la Amenaza, la Sensibilidad y la Exposición de cada comuna, reflejando valores negativos.

El mapa de la **Figura 28** es la representación del resultado de Riesgo, tanto para las praderas como para la capacidad de carga. Pese a que los resultados y unidades de medida son diferentes en los aspectos de Amenaza y Sensibilidad, las



**Figura 28.** Índice de Riesgo, praderas y capacidad de carga (bovinos de leche, bovino de carne y ovinos), regiones del Biobío a Los Lagos.

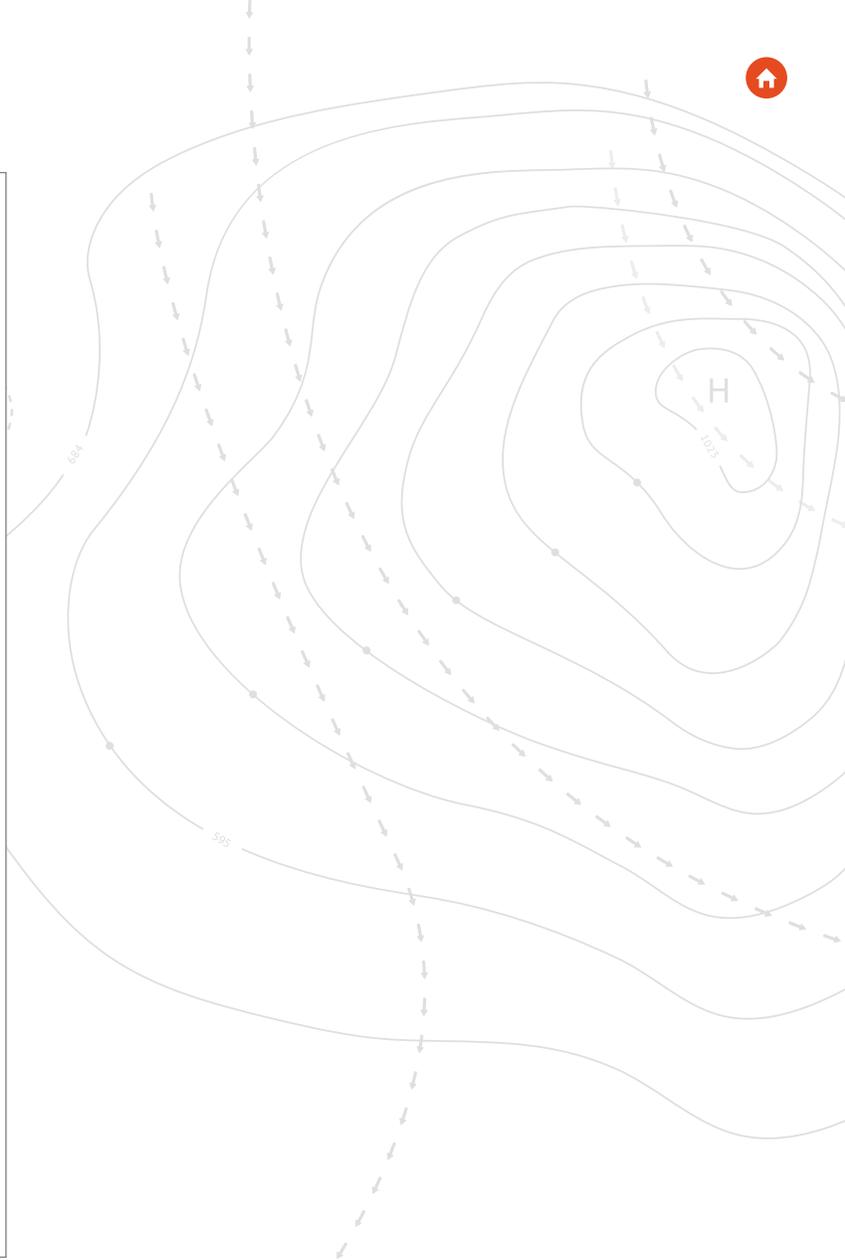
Fuente: Elaboración propia.

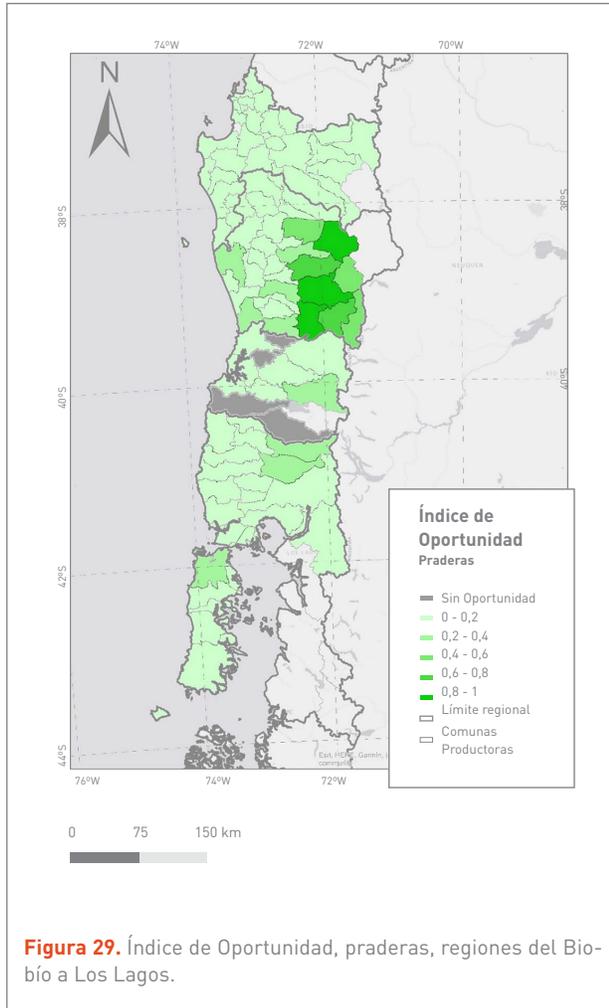
comunas que muestran Riesgo asociado al cambio climático son las mismas en todos los casos; y, dado que el índice de Riesgo es adimensional, al hacer la clasificación de rangos de este índice, la visualización del mapa fue la misma para el subsistema praderas y para la capacidad de carga bovina lechera, bovina de carne y ovina.

Según los resultados, sólo existe Riesgo asociado al cambio climático en cuatro comunas de la Región de Los Ríos: La Unión, Río Bueno, Lanco y Valdivia (ordenadas de mayor a menor Riesgo). Pese al Riesgo observado, los resultados de los índices de Amenaza —que estima la variación en el rendimiento entre los escenarios Presente y Futuro— en estas

comunas fue marginal: nunca supera a los 1.057 kg. MS/ha/año de disminución en el rendimiento; por lo que no se pronostica una baja significativa en el rendimiento del subsistema Praderas en estas regiones del sur de Chile.

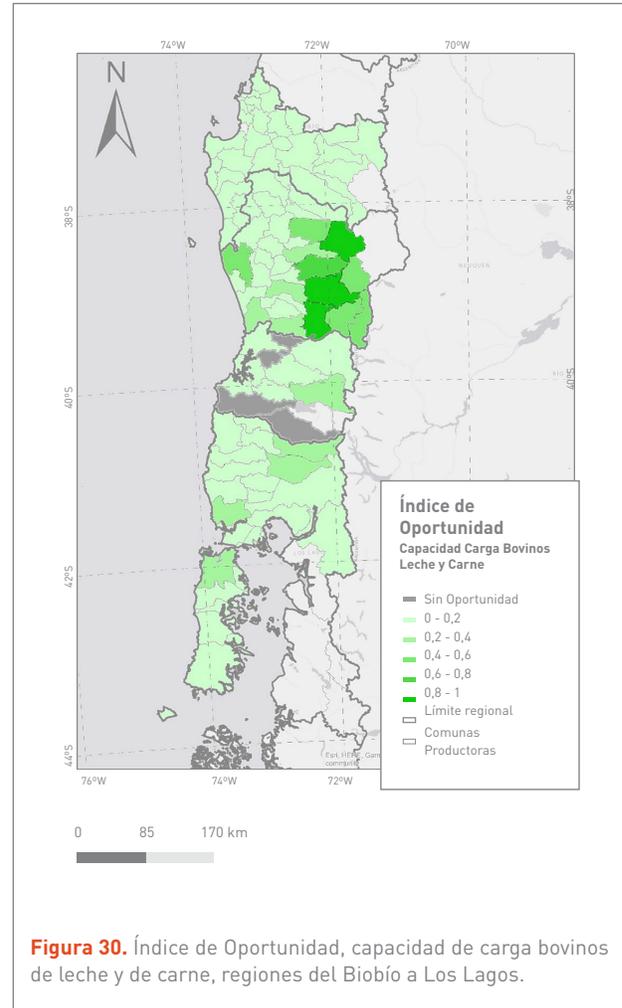
Las comunas que reflejan un Riesgo productivo del subsistema Praderas presentan también un Riesgo asociado a la capacidad de carga animal.





**Figura 29.** Índice de Oportunidad, praderas, regiones del Biobío a Los Lagos.

Fuente: Elaboración propia.



**Figura 30.** Índice de Oportunidad, capacidad de carga bovinos de leche y de carne, regiones del Biobío a Los Lagos.

Fuente: Elaboración propia.

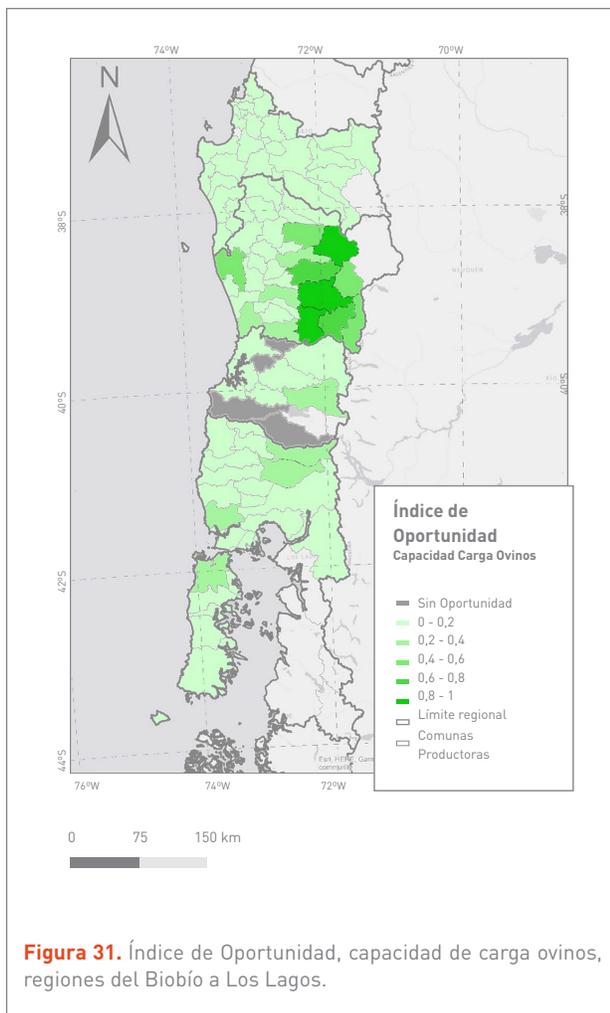
#### 4.4.4 OPORTUNIDAD

En la **Figura 29** se muestra el resultado de índice Oportunidad para las praderas como consecuencia del cambio climático. En la **Figura 30** se muestra el índice de Oportunidad de la capacidad de carga de bovinos de leche y de bovinos de carne; y en **Figura 31** se muestra el índice de Oportunidad para la capacidad de carga de ovinos. Este índice fue calculado a partir de la multiplicación de los indicadores de Amenaza, de Sensibilidad y de Exposición para cada comuna.

Los resultados indican que la mayoría de las comunas entre las regiones del Biobío y de Los Lagos (exceptuando cuatro comunas en Los Ríos) presenta una oportunidad productiva para las praderas (**Figura 29**) como consecuencia del cambio climático, lo que refleja oportunidades

en la capacidad de carga animal. Se presentan mayores oportunidades hacia el sector precordillerano de la Región de La Araucanía, específicamente, en las comunas de Villarrica, Curacautín y Cunco, comunas que registraron un delta de rendimiento (período Futuro – período Presente) de entre 1.185 y 1.592 kg MS/ha/año.

El índice de Oportunidad en bovinos de leche y en bovinos de carne (**Figura 30**) es el mismo, aunque registran resultados distintos en el índice de Amenaza. Esto se traduce en que la visualización del índice de Oportunidad sea la misma en ambos casos y se representen en el mismo mapa.



## 4.5 SUBSISTEMA: FRUTALES/VIÑA

### 4.5.1 AMENAZA

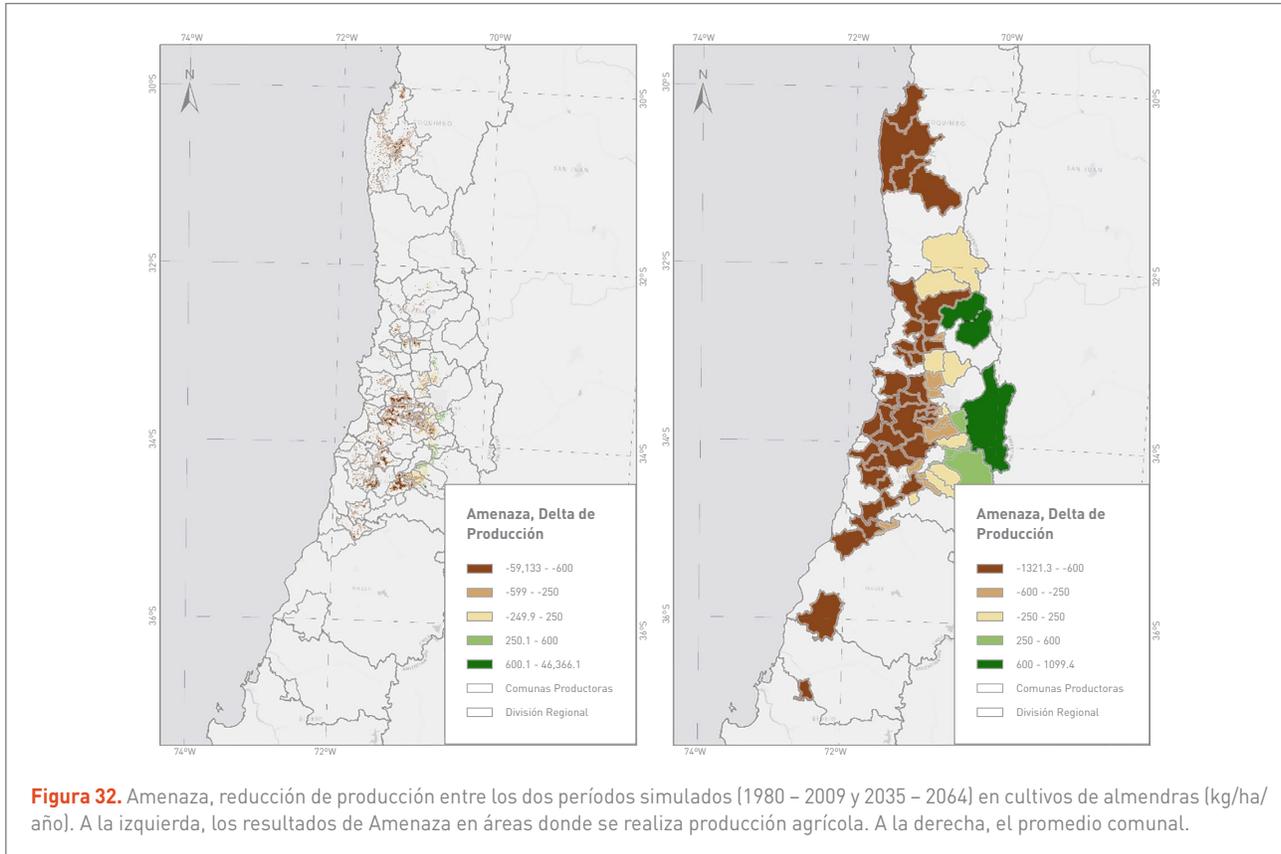
En la **Figura 32**, en la **Figura 33**, en la **Figura 34** y en la **Figura 35** se muestran los resultados para el índice Amenaza (reducción del rendimiento potencial, expresado en kilogramos/hectárea/año) de los cultivos de almendras, nueces, manzana roja y cereza. Resultados negativos indican pérdida en el rendimiento; resultados positivos significan aumento en el rendimiento por efectos del cambio climático.

En el caso del cultivo de almendras, las comunas mayormente amenazadas corresponden a Curepto (Región del Maule), a Litueche (Región del Libertador General Bernardo O'Higgins), a Hualañé (Región del Maule), a Lolol (Región del Libertador General Bernardo O'Higgins) y a La Estrella (Región del Libertador General Bernardo O'Higgins), con una Amenaza promedio de -1.321,3, -1.312, -1.264,1, -1.243,9 y -1.212,3 kg/ha/año, respectivamente. Cabe destacar que existen sectores, por ejemplo, dentro de las comunas San José de Maipo (Región Metropolitana de Santiago), San Esteban (Región de Valparaíso) y Putaendo (Región de Valparaíso), donde este cultivo presenta resultados positivos.

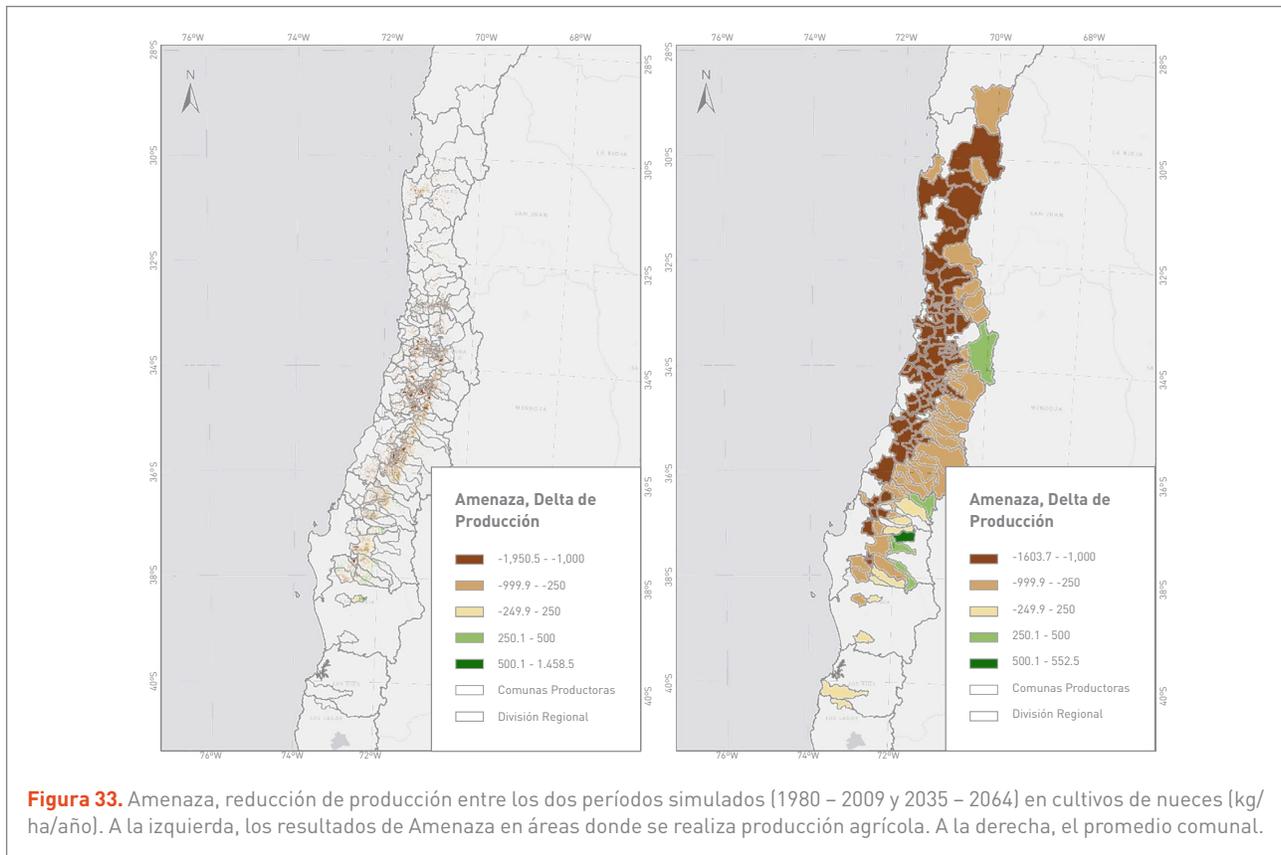
Las comunas mayormente amenazadas en el cultivo de nueces son Catemu (Región de Valparaíso), Hijuelas (Región de Valparaíso) y El Monte (Región Metropolitana de Santiago), con una Amenaza promedio de -1.603,7, -1.542,3 y -1.536,9 kg/ha/año, respectivamente. Cabe destacar que existen sectores, por ejemplo, dentro de las comunas de Tucapel (Región del Biobío), de Quilaco (Región del Biobío) y de San Fabián (Región del Ñuble), donde este cultivo presenta resultados positivos.

Para cultivo de manzana roja, las comunas coloreadas de café oscuro registran un índice de Amenaza con valores que superan los -15.000 kg/ha/año. La comuna de Los Ángeles (Región del Biobío) muestra el rendimiento más bajo en el escenario Futuro (-22.438 kg/ha/año). Sólo una comuna presenta resultados positivos: Chile Chico (Región de Aysén del General Carlos Ibáñez del Campo), con 8.344,1 kg/ha/año.

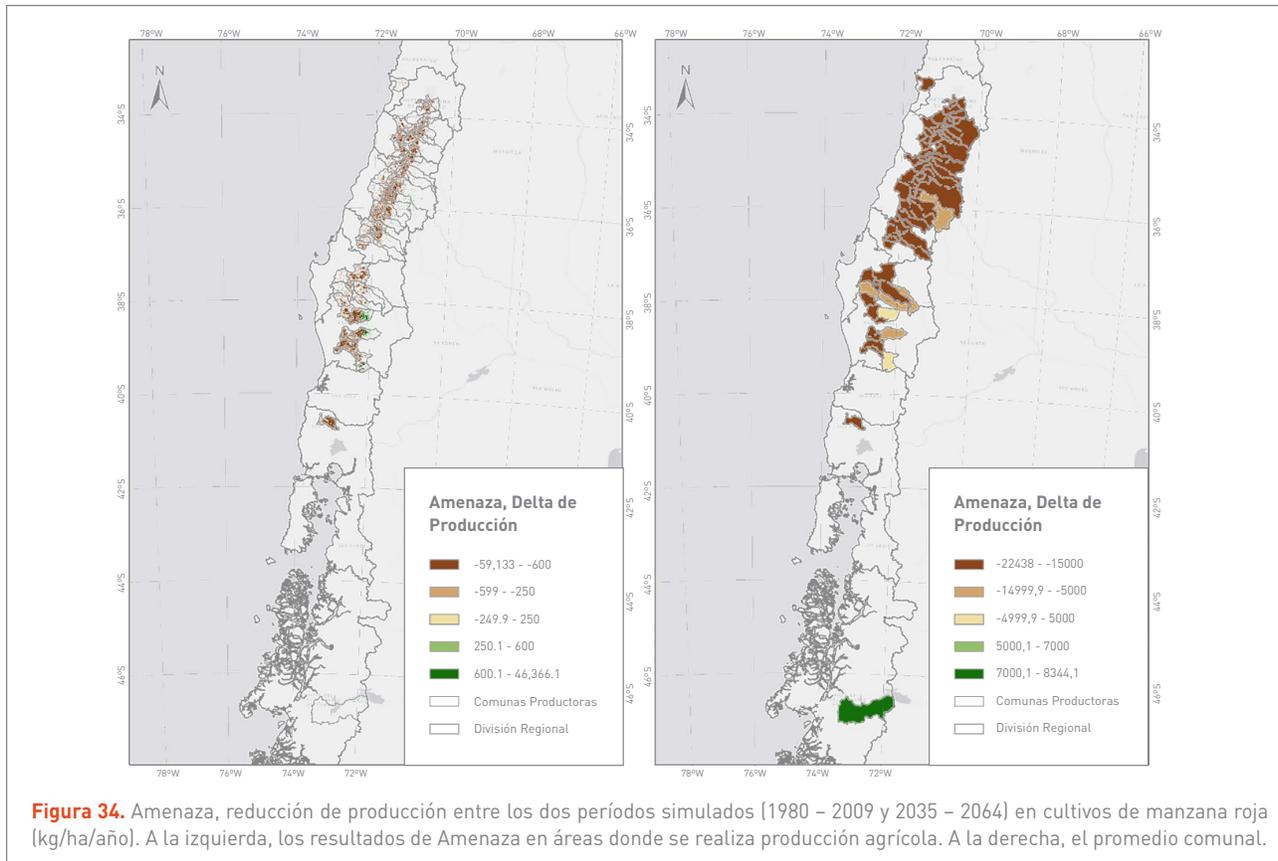
Al igual que para el cultivo de manzana, el cultivo de cerezas muestra deltas de rendimientos muy bajos en un gran número de comunas. Las tres comunas con rendimientos más bajos son La Cruz, Calera y Nogales (todas de la Región de Valparaíso), mientras que los resultados positivos de rendimiento más altos se registran en las comunas de Vilcún (Región de La Araucanía), de Lautaro (Región de La Araucanía) y de Tucapel (Región del Biobío).



Fuente: Elaboración propia.

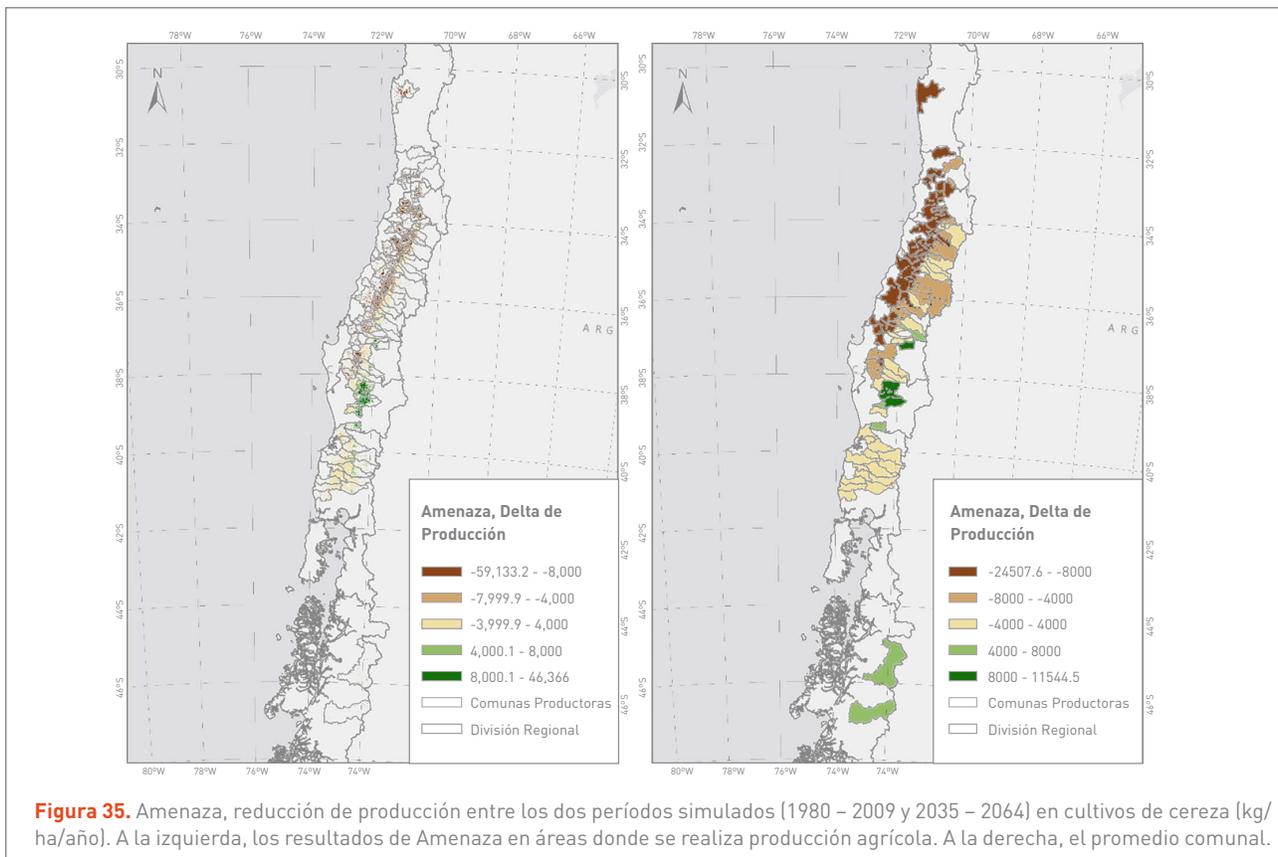


Fuente: Elaboración propia.



**Figura 34.** Amenaza, reducción de producción entre los dos períodos simulados (1980 – 2009 y 2035 – 2064) en cultivos de manzana roja (kg/ha/año). A la izquierda, los resultados de Amenaza en áreas donde se realiza producción agrícola. A la derecha, el promedio comunal.

Fuente: Elaboración propia.



**Figura 35.** Amenaza, reducción de producción entre los dos períodos simulados (1980 – 2009 y 2035 – 2064) en cultivos de cereza (kg/ha/año). A la izquierda, los resultados de Amenaza en áreas donde se realiza producción agrícola. A la derecha, el promedio comunal.

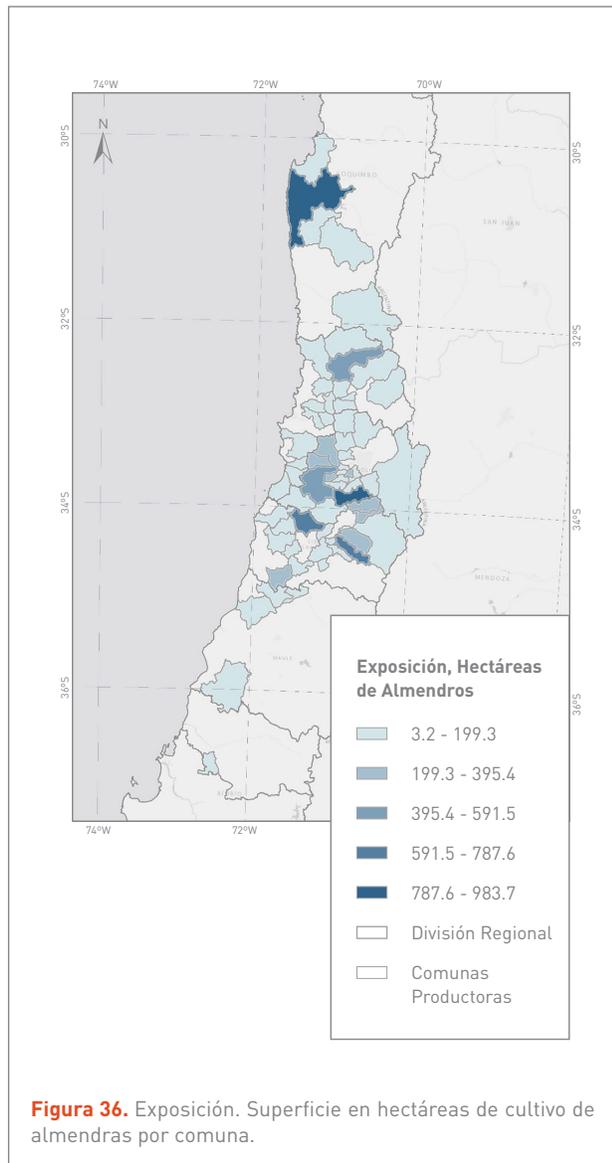
Fuente: Elaboración propia.



## 4.5.2 EXPOSICIÓN

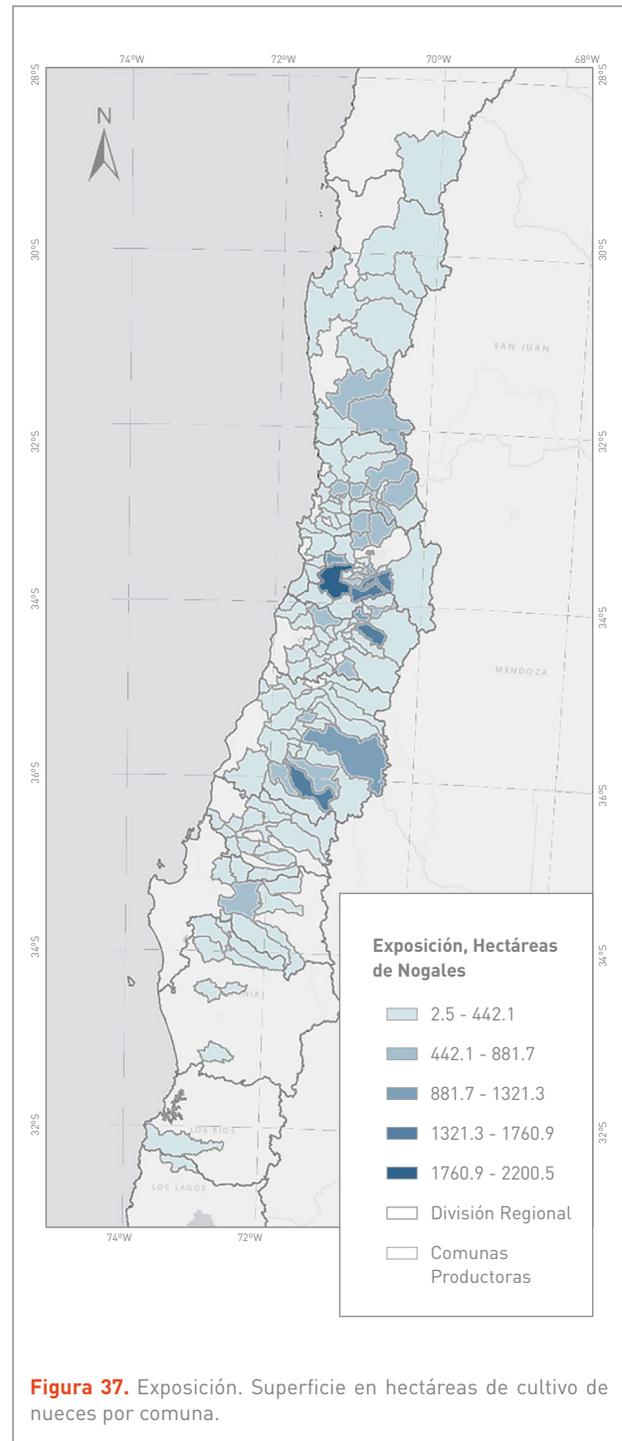
En la **Figura 36**, en la **Figura 37**, en la **Figura 38** y en la **Figura 39** se muestran los resultados para el índice de Exposición de los cultivos de almendras, nueces, manzana roja y cereza.

Las comunas con mayor superficie cultivada de almendros son Paine (Región Metropolitana de Santiago), Ovalle (Región de Coquimbo), Las Cabras (Región del Libertador Bernardo O'Higgins) y Rengo (Región del Libertador Bernardo O'Higgins), con 983,7, 969,1, 636,6 y 604,5 hectáreas, respectivamente.



Fuente: Elaboración propia.

Las comunas de Melipilla (Región Metropolitana de Santiago), de Requínoa (Región del Libertador General Bernardo O'Higgins), de Longaví (Región del Maule) y de Pirque (Región Metropolitana de Santiago) tienen las mayores cantidades de hectáreas de cultivo de nueces, con 2.200,5, 1.723,8, 1.597,2 y 1.562,9 ha, respectivamente.

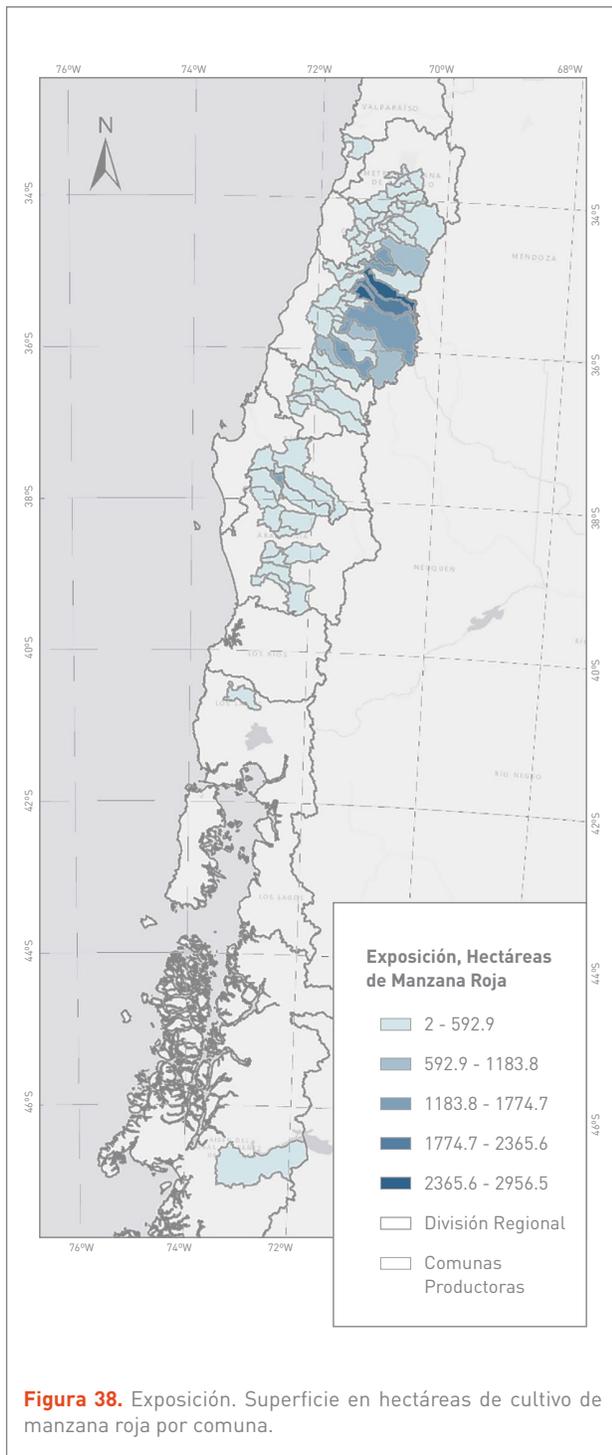


Fuente: Elaboración propia.

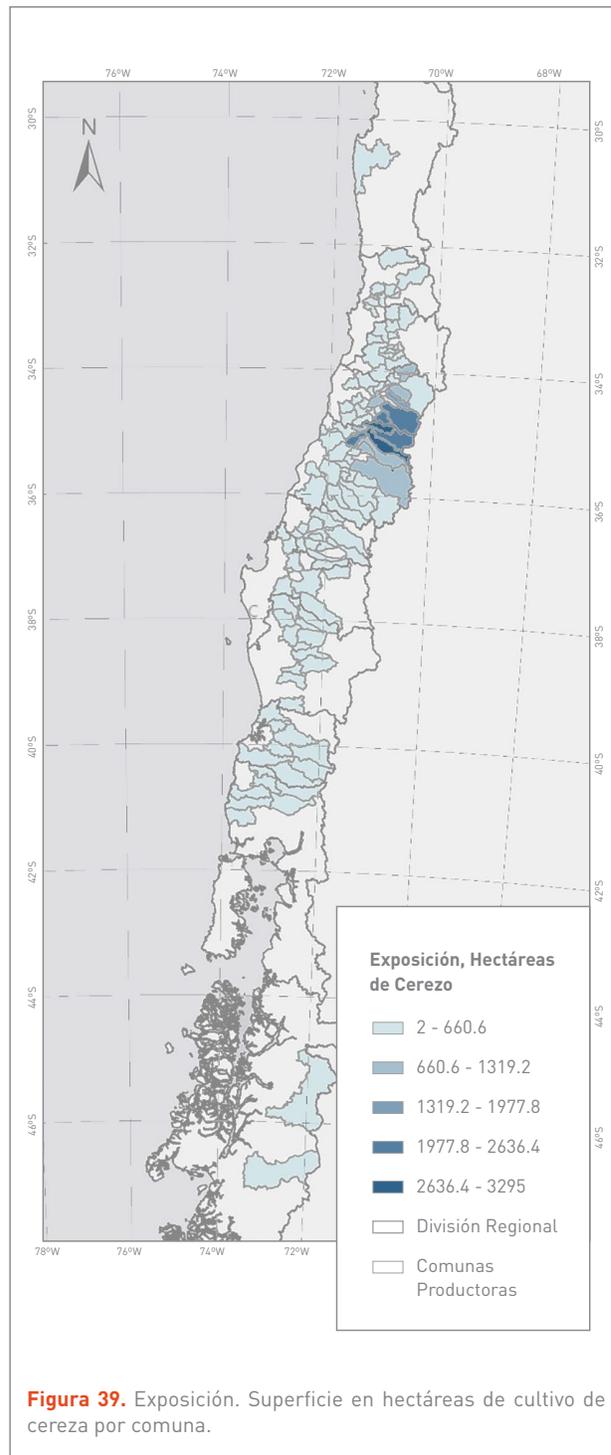


Las comunas de la Región del Maule tienen las mayores áreas de cultivo de manzana roja, siendo Curicó (2.956,5 ha), Río Claro (2.377,1 ha) y Molina (1.974,4 ha), las tres primeras.

Las comunas de Teno, de Curicó, de Sagrada Familia y de Romeral, también pertenecientes a la Región del Maule, tienen las mayores áreas de cultivo de cereza, con 3.295, 3.137,3, 2.507,7 y 2.360 hectáreas, respectivamente.



Fuente: Elaboración propia.

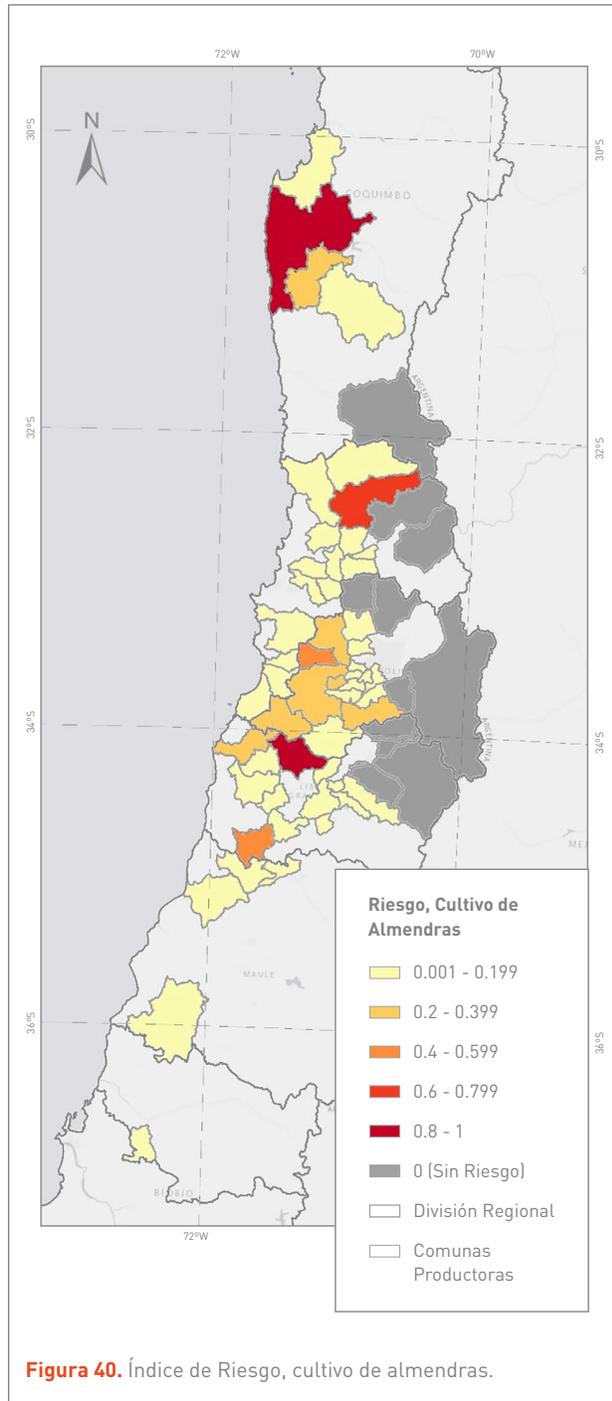


Fuente: Elaboración propia.



### 4.5.3 RIESGO

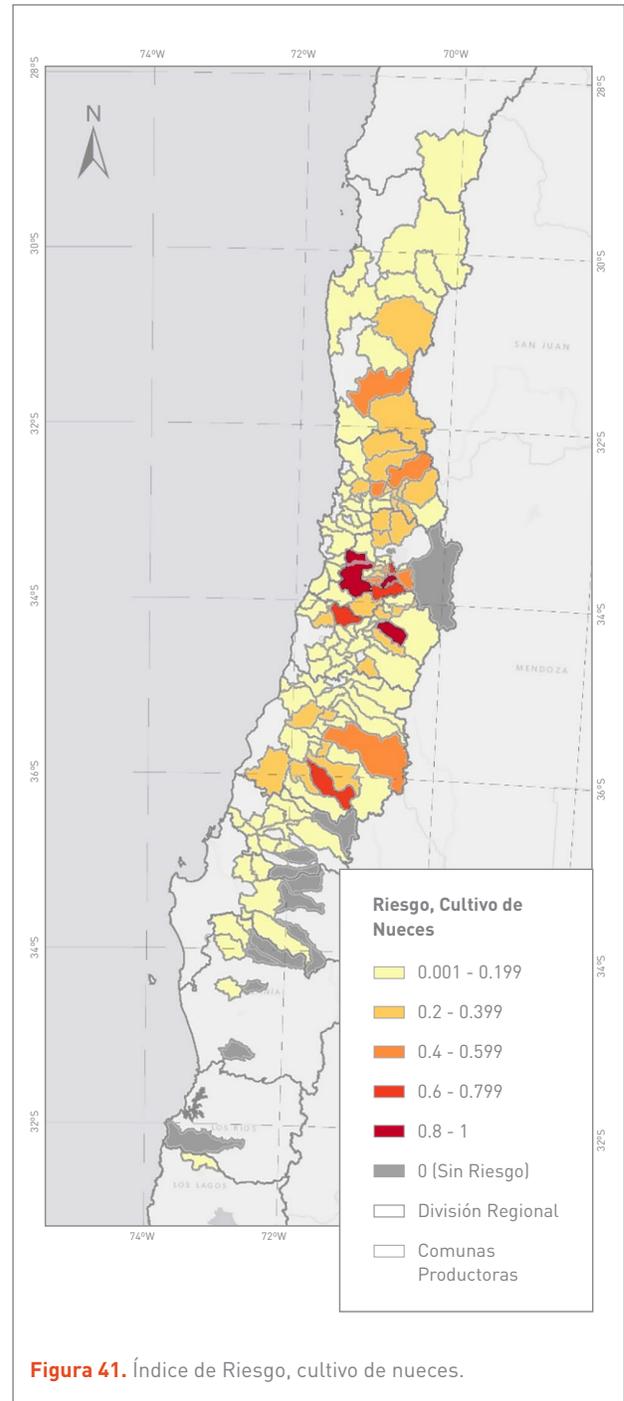
En la **Figura 40**, en la **Figura 41**, en la **Figura 42** y en la **Figura 43** se muestran los resultados para el índice de Riesgo en los cultivos de almendras, nueces, manzana roja y cereza. Este índice fue calculado a partir de la multiplicación de los índices de Amenaza, Sensibilidad y Exposición de cada comuna.



Fuente: Elaboración propia.

Las comunas que más Riesgo muestran para el cultivo de almendras son Las Cabras (Región del Libertador General Bernardo O'Higgins) y Ovalle (Región de Coquimbo), siendo ambas grandes productoras, con más de 600 ha del cultivo.

En el escenario Futuro, las comunas de la Región Metropolitana y las de la Región del Libertador General



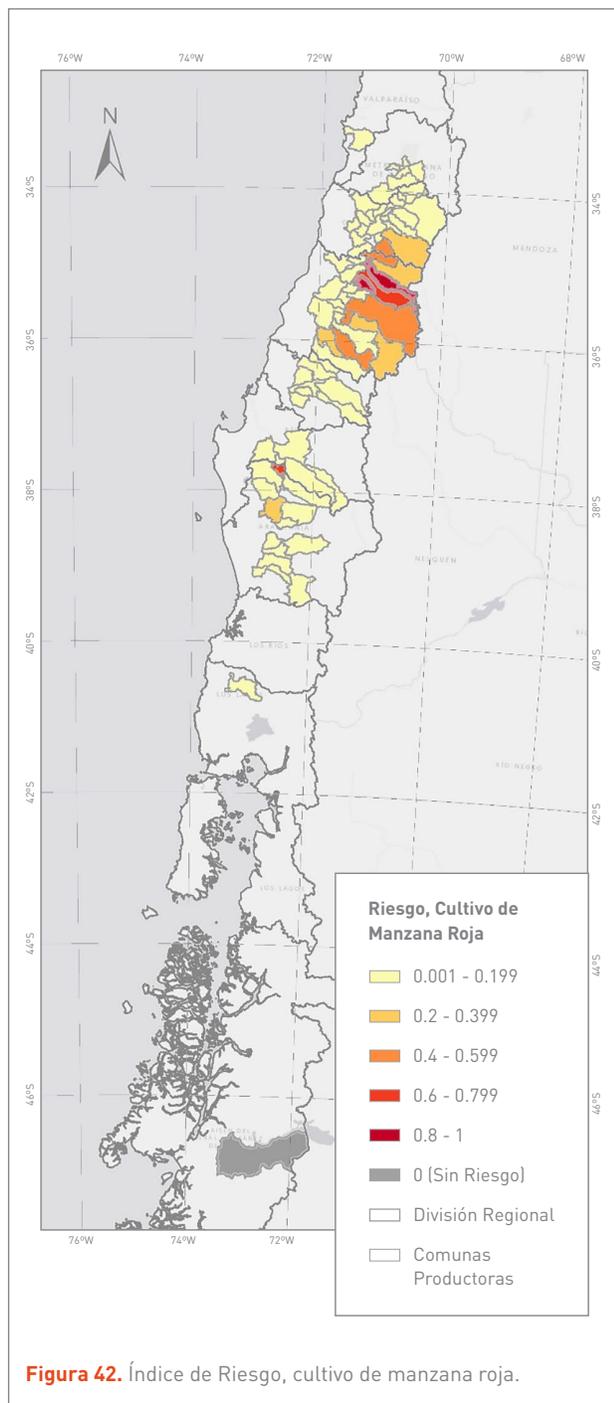
Fuente: Elaboración propia.

Bernardo O'Higgins son las que más Riesgo registran para el cultivo de nueces, liderando este listado: Melipilla, Requínoa, María Pinto y Buin, todas comunas con más de 1.000 hectáreas de este cultivo.

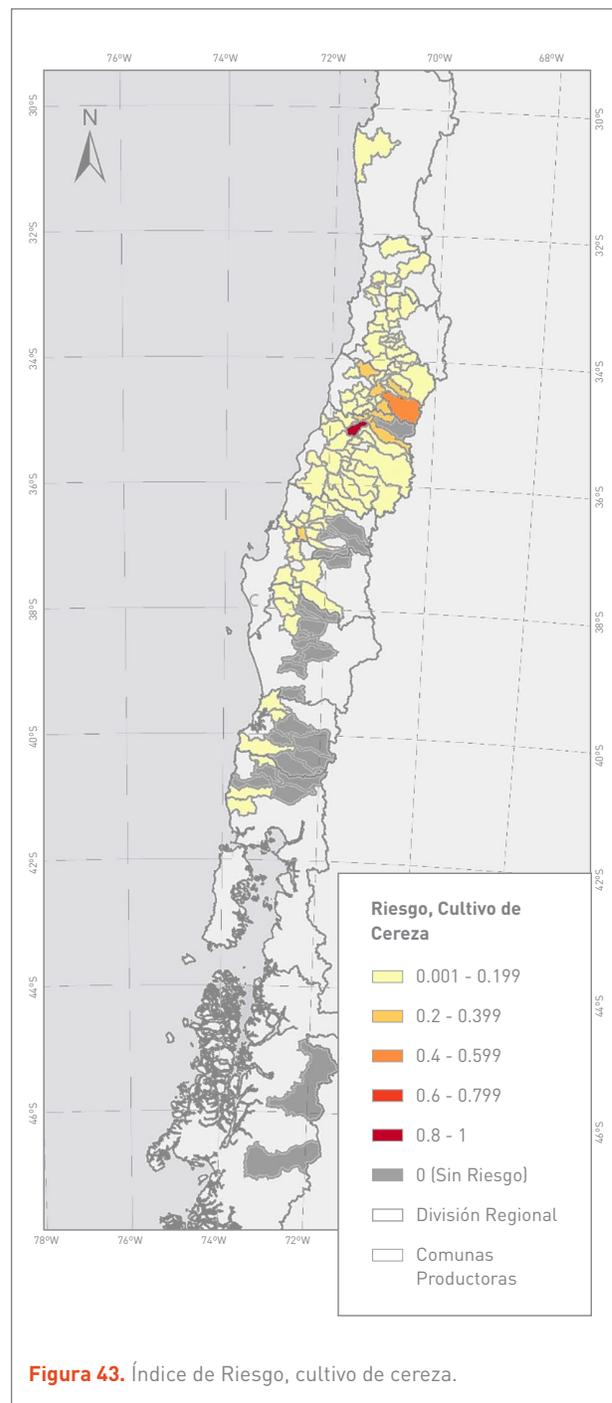
Las dos comunas con más Riesgo en el cultivo de manzana roja pertenecen a la Región del Maule, siendo Río Claro

y Curicó, las con mayor cantidad de hectáreas plantadas del país para este cultivo.

Para el cultivo de cereza, la única comuna que muestra un Riesgo más alto es Sagrada Familia, de la Región del Maule y la tercera comuna con mayor cantidad de hectáreas plantada para este cultivo.



Fuente: Elaboración propia.



Fuente: Elaboración propia.

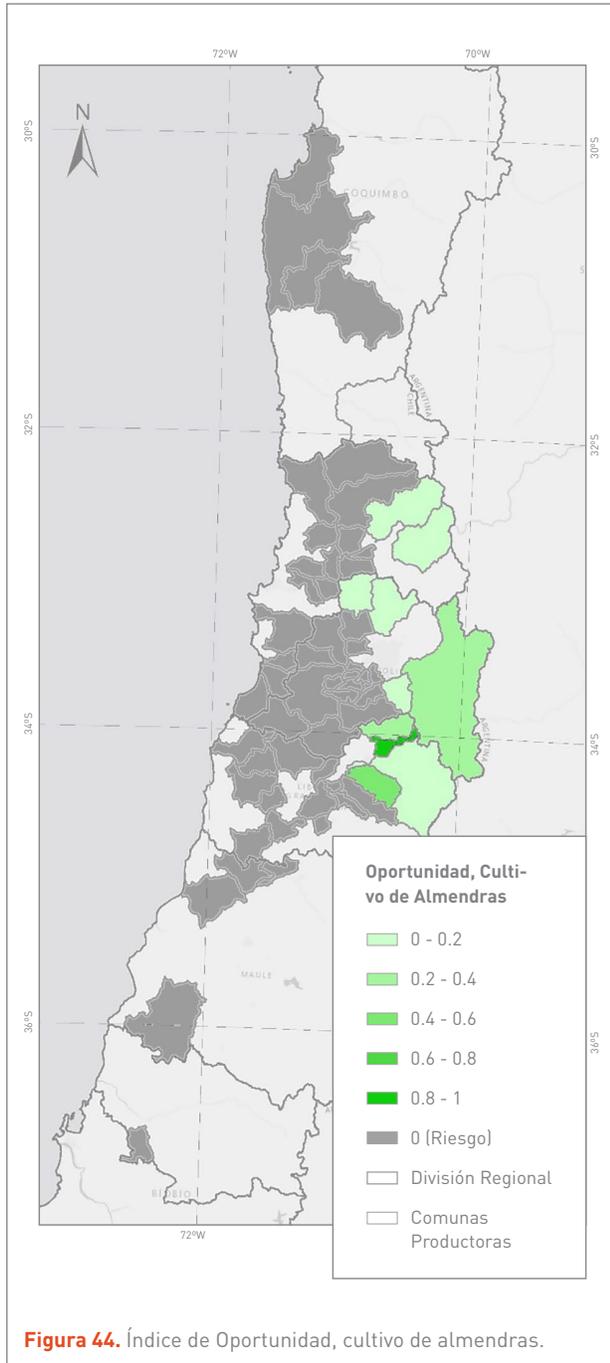


#### 4.5.4 OPORTUNIDAD

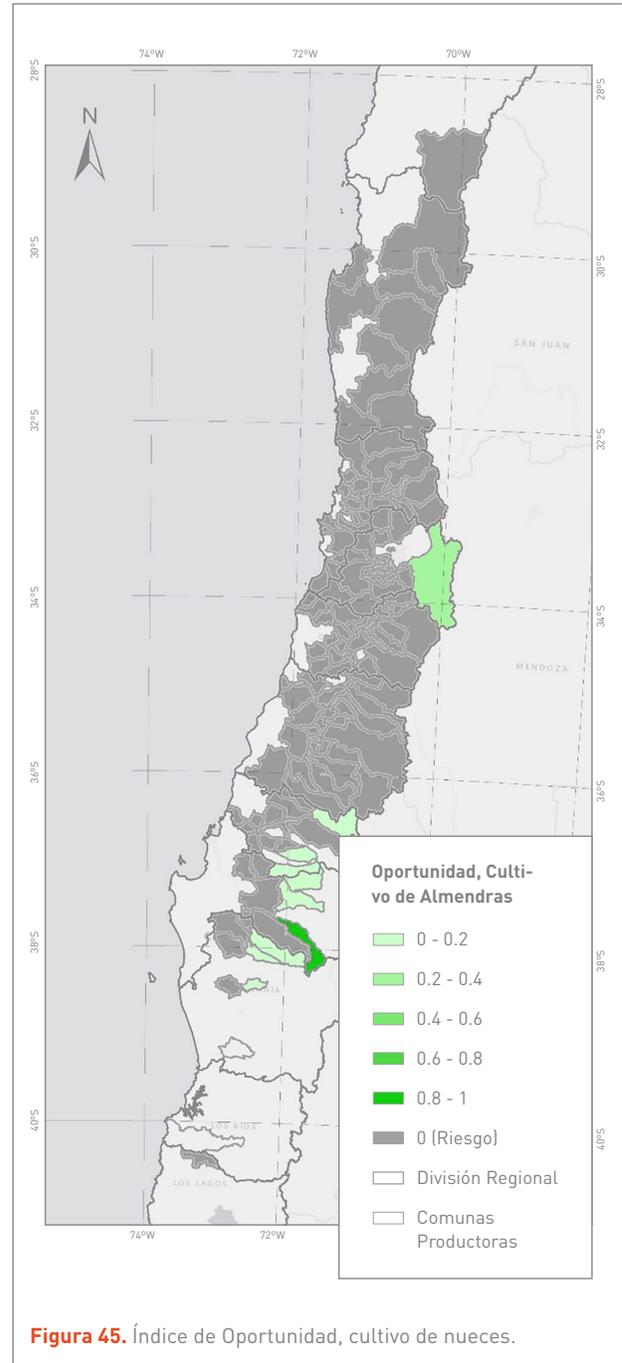
En la **Figura 44**, en la **Figura 45**, en la **Figura 46** y en la **Figura 47** se muestran el índice de Oportunidad de los cultivos de almendras, nueces, manzana roja y cereza. Este índice fue calculado a partir de la multiplicación de los índices de Amenaza, Sensibilidad y Exposición de cada comuna.

La comuna de Codegua, mediano productor de almendras, con 365,1 ha plantadas, es la que muestra el mayor índice de Oportunidad.

La comuna de Quilaco, de la Región del Biobío registra el mayor índice de Oportunidad para el cultivo de nueces, con 359,5 ha plantadas.



Fuente: Elaboración propia.

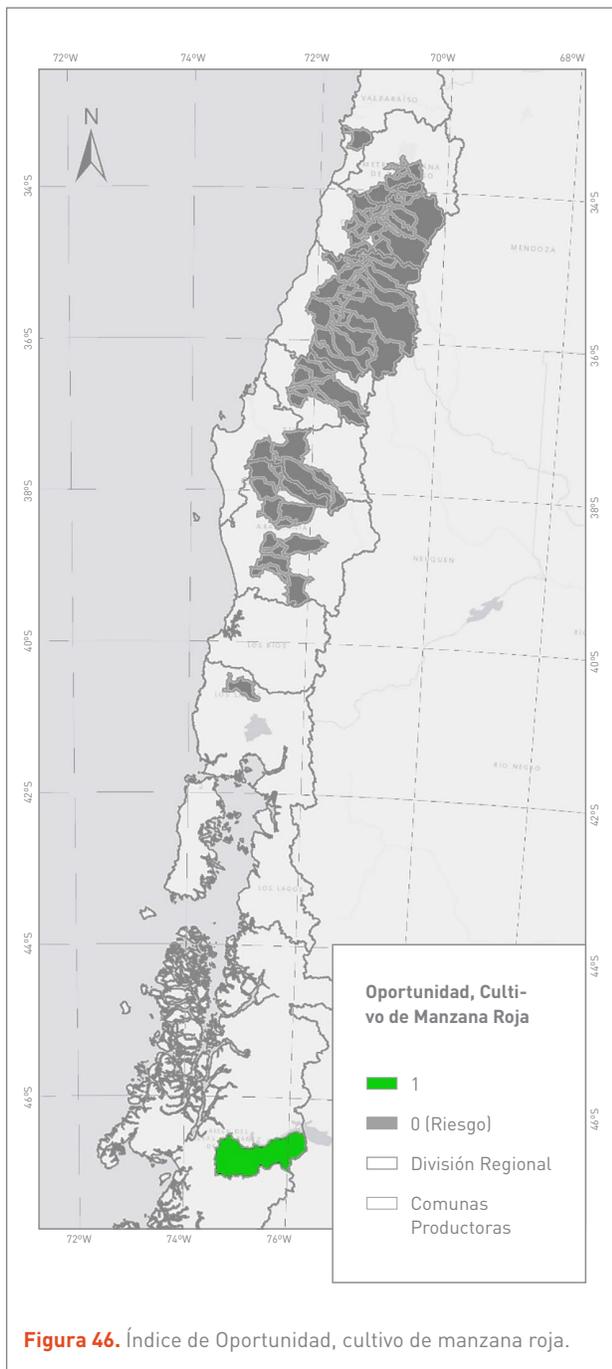


Fuente: Elaboración propia.

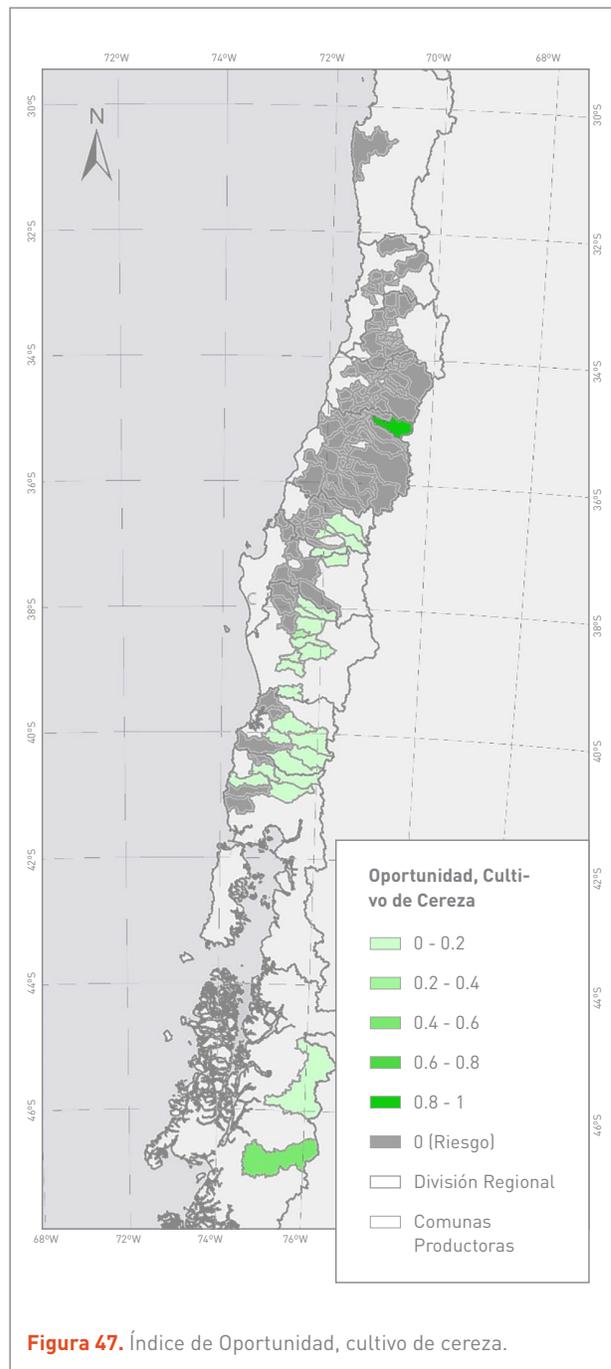


La única comuna que muestra Oportunidad para el cultivo de manzana es Chile Chico, en la Región de Aysén, siendo esta comuna un micro productor, con 2,3 ha plantadas.

Para el cultivo de Cerezas, la comuna que presenta la mayor oportunidad es Romeral, de la Región del Maule. A la vez, esta comuna la cuarta con mayor cantidad de hectáreas plantadas del país (2.360 ha).



Fuente: Elaboración propia.



Fuente: Elaboración propia.



1029

H

1020

1012

1004

# 5

## CONCLU- SIONES

Los modelos matemáticos y agronómicos utilizados permiten estimar la variación del rendimiento en cultivos anuales y frutales, como también en praderas permanentes del sur del país.

Los resultados obtenidos del subsistema Cultivos anuales indican que todos los cultivos analizados (maíz, frijol, trigo y papa) presentarán caídas en sus rendimientos en el escenario Futuro. En promedio, la mayor caída se proyecta en el cultivo de maíz, mientras que el cultivo de frijol muestra un aumento marginal en el rendimiento. En el caso del cultivo de papa, en la Región de Los Lagos, se proyecta aumento en los rendimientos cuando el cultivo se realiza bajo algún sistema de riego asociado. En general, se observa que cuando el cultivo está bajo un régimen hídrico, las mayores amenazas y Riesgos ocurren hacia las zonas costeras y de centro-norte del país; mientras que, si se cultiva en secano, las comunas con mayor Amenaza y Riesgo son las que se encuentran hacia el sector precordillerano.

Respecto de los resultados del subsistema Praderas, entre las regiones del Biobío y de Los Lagos, no se observa un Riesgo en la productividad asociada al cambio climático (exceptuando cuatro comunas de la Región de Los Ríos).

Por el contrario, se prevé un aumento de la productividad en estas regiones, considerándose al cambio climático como un fenómeno que favorecerá el crecimiento de las praderas en el futuro. En la Región de La Araucanía se esperan mayores aumentos de biomasa para la zona precordillerana de Los Andes, donde el índice de Oportunidad varía entre 0,8 y 1. En el resto de las regiones, se presenta un índice de Oportunidad que varía entre 0 - 0,2 y entre 0 - 0,4, de manera homogénea en el territorio.

En otras palabras, pese a que exista un Riesgo productivo en ciertas comunas de la Región de Los Ríos, no se pronostica una disminución significativa del rendimiento ni un Riesgo mayor en la productividad del subsistema Praderas en estas regiones del sur de Chile.

Respecto a la capacidad sustentadora animal, se observa que las mismas comunas con Riesgo en la cadena de impacto de praderas permanentes son las que presentan Riesgo para la capacidad de carga animal. De forma similar sucede con las comunas que registran oportunidad productiva en praderas; ahí también se proyecta un aumento en la capacidad de carga animal en el escenario Futuro.



En cuanto a los índices de Amenaza y Riesgo en el sub-sistema Frutales, se observa una tendencia de las zonas costeras y de depresión intermedia, desde la Región de Coquimbo y la Región del Biobío (e incluyendo la depresión intermedia de la Región de La Araucanía), a concentrar los mayores índices de Riesgo como consecuencia del cambio climático. Mientras, las zonas precordilleranas muestran aumento en el rendimiento.

Para los cultivos presentes en la Región de Coquimbo (almendras, nueces y cerezas), la comuna más afectada es Ovalle, que -además- tiene la mayor cantidad de hectáreas de cultivos de almendras según el catastro frutícola. Junto al de la comuna de Las Cabras (Región del Libertador General Bernardo O'Higgins), el índice de Riesgo de cultivo de almendras para Ovalle es uno de los más altos a nivel país. En el caso de nueces, cultivo del que Ovalle posee una importante cantidad de hectáreas, el índice de Riesgo es mucho menor.

La comuna de Sagrada Familia, en la Región del Maule, es la que posee más hectáreas de cereza según el catastro frutícola, pero también, la que marca el mayor Riesgo frente al cambio climático para este cultivo. No ocurre lo mismo con la manzana roja, de la cual esta comuna también posee una importante cantidad de hectáreas plantadas, pero que muestra un Riesgo muy bajo para ese cultivo, de 0,16.

En la Región Metropolitana, la comuna de Melipilla es la que registra el mayor índice de Riesgo y también, es la comuna con mayor número de hectáreas de producción de nueces y con una importante cantidad de hectáreas cultivadas de cerezos y de almendros. Otras comunas de esta región que se ven afectadas en el escenario Futuro de cambio climático son Buin, María Pinto, San Bernardo y Paine.

Las comunas productoras de manzana roja de la Región del Maule concentran los mayores indicadores de Riesgo: Río Blanco, Curicó y Molina muestran los índices de Riesgo más altos y se encuentran entre las comunas que más producen este cultivo. En la Región de O'Higgins, la comuna con altos índices de Riesgo es Las Cabras; mientras que, en la Región de La Araucanía, son las comunas de Renaico y Malleco, y en la Región de Valparaíso es Cabildo (entre 0,6 y 0,8).

Las comunas con mayor cantidad de hectáreas de cultivos de frutales son las que muestran los mayores indicadores de Riesgo. Se excluye Romeral, la única comuna que muestra un alto índice de Oportunidad en el cultivo de manzana roja. Al indagar en las zonas de la comuna con mayor potencial, se observa que las áreas de cultivos ubicadas en la precordillera marcan el mayor rendimiento en el escenario Futuro, lo cual sigue el patrón observado en todos los rendimientos de las zonas centro y centro-sur del país.

De las 45 comunas que muestran resultados positivos en el índice de Oportunidad para el escenario Futuro, 31 se pueden considerar pequeños, debido a que son comunas micro productoras, con menos de 250 hectáreas plantadas de los cultivos analizados, cada una.

## ASPECTOS POR DESARROLLAR

Se abordarán distintos aspectos que han sido identificados dentro de los talleres realizados con el sector agricultura:

- Crear un modelo de productividad agrícola para Isla de Pascua. No es posible realizar el análisis para todo el territorio insular, ya que no están disponibles los datos climáticos para el Archipiélago Juan Fernández.
- Los resultados de Amenaza, Exposición y Riesgo de los cultivos de vid vinífera.

## ASPECTOS NO ABORDADOS

En el curso de este proyecto, no fue posible incluir en los modelos de simulación de cultivos los efectos causados por elementos como:

- Eventos extremos climáticos, como olas de calor, sequías, heladas e inundaciones.
- El cambio de uso de suelo y deforestación por la presión del sector agrícola/ganadero.
- Factores culturales en las proyecciones.
- Efectos de sequías hidrológicas mediante la integración con WP de Hidrología.

En el caso de los eventos extremos, dentro de los modelos de rendimiento utilizados no existe una herramienta que permita comprobar su efecto en los cultivos; incluir esta variable implicaba modificar los modelos de CropSyst y el modelo simple de rendimiento de frutales, lo que se escapa del enfoque de este WP.

No se poseen datos de hectáreas de cultivo que permanecen como tales o de tierras convertidas a cultivo y tampoco existen datos cartográficos que nos permita definir estas áreas; por lo que, considerar el cambio de uso de suelo quedó descartado dentro del enfoque del WP de Agricultura. Se espera en el futuro contar con esta información, sus proyecciones al 2050 y mapas cartográficos que permitan incluir esta información en futuros proyectos.

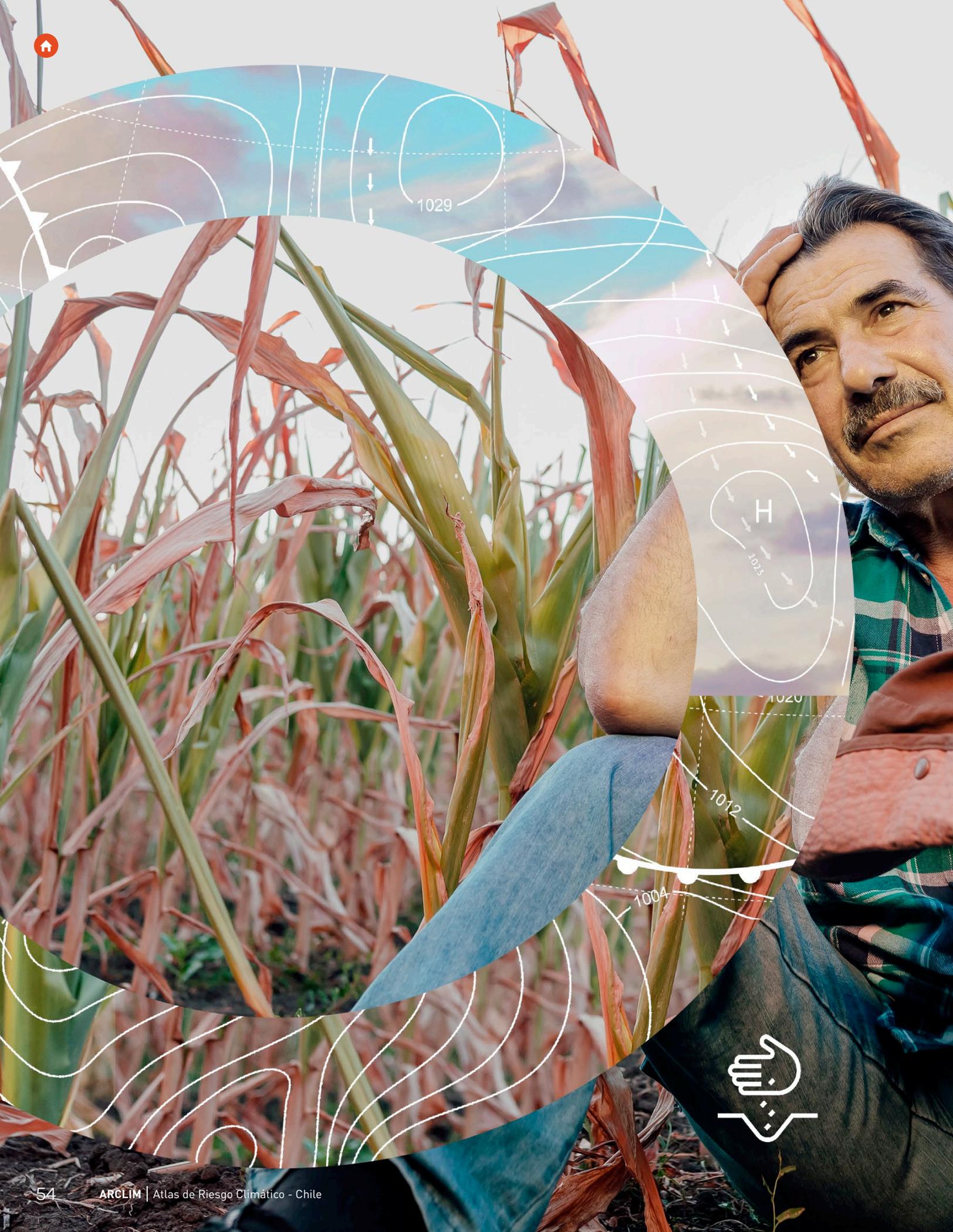
Se intentó realizar distintos indicadores que reflejaran el estado del arte de la Agricultura en el país, los cuales fueron incluidos en el índice de Sensibilidad. Sin embargo, el factor cultural es un ámbito que no se pudo abordar por falta de información y por la antigüedad de los datos contenidos en el censo agronómico. Se espera que la información levantada en el futuro censo permita reflejar el componente cultural de mejor forma para incluirlo en futuras investigaciones.

Ya que los modelos de rendimiento agronómico fueron programados y corridos al inicio del proyecto, no fue posible utilizar los resultados de WP de Hidrología; sus resultados estuvieron disponibles después del desarrollo y la obtención de resultados del WP de Agricultura.

El cruce de los riesgos para obtener un mapa generalizado, que incluya todos los subsistemas, no se realizará. Esto, porque se considera que los datos presentados en función de cada cultivo y de sus tipos de manejo entregan una respuesta más real y atingente a la situación futura del país; y, aunque tengan metodologías similares, no existe información que permita ponderar los pesos de los cultivos, de modo de no sobreestimar/subestimar el Riesgo o las oportunidades en un mapa consolidado.

Se espera que los datos nombrados anteriormente y los de otros WP sean de considerados en futuras investigaciones, de modo de mejorar los modelos de rendimiento y producción agronómica utilizados por este WP. Además, se espera que los próximos análisis, con datos actualizados del próximo censo agronómico, sea posible incluir diferentes aspectos que no pudieron ser abordados en esta investigación.







# 6

## REFERENCIAS

Castellaro, G., Morales, L., Ahumada, M., y Barozzi, A. (2010). *Simulation of dry matter productivity and water dynamics in a Chilean Patagonian range*. Chil. J. Agric. Res., 70 pp. 417-427

Catrileo, A. (2015). *Decisiones de Manejo en Producción de Carne Bovina*. Boletín INIA 316. 116 pp. ISSN 0717-4829

Centro de Agricultura y Medioambiente (AGRIMED). (2008). *Análisis de la vulnerabilidad del sector agropecuario, recursos hídricos y edáficos de Chile, frente a escenarios de cambio climático*. Universidad de Chile, CONAMA, Santiago. 126 pp.

Centro de Investigación de Recursos Naturales (CIREN). (1995). *Descripciones de suelos, materiales y símbolos. Estudio Agrológico de los Valles de Choapa, Illapel y Limarí: IV región*. Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN), Publicación 105.

Centro de Investigación de Recursos Naturales (CIREN). (1996a). *Descripciones de suelos, materiales y símbolos.*

*Estudio Agrológico de la VI Región*. Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN), Publicación 114.

Centro de Investigación de Recursos Naturales (CIREN). (1996b). *Descripciones de suelos, materiales y símbolos. Estudio Agrológico de la Región Metropolitana*. Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN), Publicación 115.

Centro de Investigación de Recursos Naturales (CIREN). (1997). *Descripciones de suelos, materiales y símbolos. Estudio Agrológico de la VII Región*. Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN), Publicación 117.

Centro de Investigación de Recursos Naturales (CIREN). (1999). *Descripciones de suelos, materiales y símbolos. Estudio Agrológico de la VIII Región*. Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN), Publicación 121.

Centro de Investigación de Recursos Naturales (CIREN). (2002). *Descripciones de suelos, materiales y símbolos. Estudio Agrológico de la IX Región*. Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN), Publicación 122.



- Centro de Investigación de Recursos Naturales (CIREN). (2003). *Descripciones de suelos, materiales y símbolos. Estudio Agrológico de la X Región*. Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN), Publicación 123.
- Centro de Investigación de Recursos Naturales (CIREN). (2005a). *Descripciones de suelos, materiales y símbolos. Estudio Agrológico de la IV Región*. Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN), Publicación 129.
- Centro de Investigación de Recursos Naturales (CIREN). (2005b). *Descripciones de suelos, materiales y símbolos. Estudio Agrológico de la XI Región*. Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN), Publicación 130.
- Centro de Investigación de Recursos Naturales (CIREN). (2009). *Descripciones de suelos, materiales y símbolos. Estudio Agrológico de la V Región*. Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN), Publicación 116.
- Dávila, W. (2018). *Análisis de los efectos del cambio climático sobre el cultivo de maíz en Chile*. Tesis de maestría, Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago.
- Esri. (2016). ArcGIS (Versión 10.5) [software].
- FAO. (1990). *Evaporación del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*. Estudio FAO Riesgo y Drenaje. 56.
- García-Gutiérrez, V., Meza, F., Sandaña, P., Lizana, C. *Comparing the performance of SUBSTOR and CropSyst models in five potato varieties under different model calibration strategies*. Poster presented at: 7TH AgMIP Global Workshop, April 24-26, 2018 at the Inter-American Institute for Cooperation on Agriculture (IICA) in San Jose, Costa Rica.
- García, A. y Fernández, G. (2017). *Antecedentes para la comercialización de trigo esta temporada 2017/18* (con datos a diciembre de 2017). ODEPA. Recuperado de <https://www.odepa.gob.cl/wp-content/uploads/2018/02/trigo2018a.pdf>
- Centro Regional Remehue, del Instituto de Investigación Agropecuaria (INIA - Remehue) [INIA]. (2015). INIA REMEHUE - *Producción de papa* [Archivo de video]. Recuperado de: <https://www.youtube.com/watch?v=5wO5CVwPOU4>.
- Dirección General de Aguas (DGA). (2016). *Inventario. Embalses al año 2016*. Mapoteca digital. Recuperado de <https://dga.mop.gob.cl/estudiospublicaciones/mapoteca/Paginas/default.aspx>
- Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA). (2015). *Modelos de simulación y herramientas de modelaje: elementos conceptuales y sistematización de herramientas para apoyar el análisis de impactos de la variabilidad y el cambio climático sobre las actividades agrícolas*. San José, Costa Rica. Recuperado de: <http://repositorio.iica.int/bitstream/11324/3045/1/BVE17068957e.pdf>
- Ingeniería y Geofísica Ltda. (METEODATA). (2019). *DOWNS-CALED CLIMATE DATA*. Departamento de Geofísica, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile. Recuperado de <http://ernc2.dgf.uchile.cl/arclim/data/clima/>
- Inostroza, J., Méndez, P., Espinoza, N., Acuña, I., Navarro, P., Cisternas, E., y Larraín, P. (2017). *Manual del cultivo de papa en Chile*. Editorial del Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA). Santiago, Chile. Boletín INIA N° 10 ISSN 0717 - 4829. Recuperado de <https://www.inia.cl/wp-content/uploads/ManualesdeProduccion/10%20Manual%20Papa.pdf>
- Instituto de Desarrollo Agropecuario (INDAP). (2019). *INDAP en cifras 2019* [a diciembre de 2019]. Recuperado de <https://www.indap.gob.cl/biblioteca/documentos-indap>
- Instituto Nacional de Estadística (INE). (2007a). *Cambios estructurales en la agricultura chilena*. Recuperado de [http://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](http://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)



- Instituto Nacional de Estadísticas (INE). (2007b). *Estadísticas. Agricultura, agroindustria y pesca. Censo Agropecuario*. Recuperado de <https://www.ine.cl/estadisticas/economia/agricultura-agroindustria-y-pesca/censos-agropecuarios>
- Instituto Nacional de Estadística (INE). (2017). *Cuadros Estadísticos. Censo de Población y Vivienda*. Recuperado de <https://www.ine.cl/estadisticas/sociales/censos-de-poblacion-y-vivienda/poblacion-y-vivienda>
- Jara, V. (2019). *Estimación del impacto del cambio climático en la productividad de las praderas permanentes en el sur de Chile*. Tesis de pregrado, Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile.
- López, A. y Hernández, D. (2016). *Cambio climático y agricultura: una revisión de la literatura con énfasis en América Latina*. El trimestre económico, 83(332), 459-496. Recuperado de <https://dx.doi.org/10.20430/ete.v83i332.231>
- Mendelsohn, R. y Dinnar, A. (1999). *Climate Change, Agriculture, and Developing Countries: Does Adaptation Matter*. The World Bank Research Observer 14(2), 277-293.
- Ministerio de Medio Ambiente (MMA). (2016). *Tercera Comunicación Nacional de Chile ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático*. Santiago, Chile.
- NATIONAL RESEARCH COUNCIL. (1984). *Nutrient Requirements of Beef Cattle, Sixth Rev.* Ed. Washington, D.C. National Academy Press.
- Nelson, G. C., Rosegrant, M.W., Koo, J., Robertson, R., Sulser, T., Zhu, T., Ringler, C., Msangi, S., Palazzo, A., Batka, M., Magalhaes, M., Valmonte-Santos, R., Ewing, M. y Lee, D. (2009). *Climate change: Impact on agriculture and costs of adaptation*. Food Policy Report 21. Washington, D.C. International Food Policy Research Institute (IFPRI).
- GIZ (2017). *Risk Supplement to the Vulnerability Sourcebook*. Recuperado de [https://www.adaptationcommunity.net/wp-content/uploads/2017/10/GIZ-2017\\_Risk-Supplement-to-the-Vulnerability-Sourcebook.pdf](https://www.adaptationcommunity.net/wp-content/uploads/2017/10/GIZ-2017_Risk-Supplement-to-the-Vulnerability-Sourcebook.pdf)
- Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (ODEPA). (2007). *Censo Agropecuario 2007 Infraestructura Chile Continental*. Recuperado de [http://ide.minagri.gob.cl/geoweb/wp-content/uploads/DESCARGAS/CAPAS/AGRICULTURA\\_GANADERIA/CENSO\\_AGROPECUARIO/cc\\_infra.rar](http://ide.minagri.gob.cl/geoweb/wp-content/uploads/DESCARGAS/CAPAS/AGRICULTURA_GANADERIA/CENSO_AGROPECUARIO/cc_infra.rar)
- Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (ODEPA). (2020). *Boletín de la Papa*. Recuperado de [https://bibliotecadigital.odepa.gob.cl/bitstream/handle/20.500.12650/69984/Boletin-papa\\_abril\\_2020.pdf](https://bibliotecadigital.odepa.gob.cl/bitstream/handle/20.500.12650/69984/Boletin-papa_abril_2020.pdf)
- Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (ODEPA). 2020b, *Boletín de Cereales*. Recuperado de [https://bibliotecadigital.odepa.gob.cl/bitstream/handle/20.500.12650/69920/Boletin\\_cereales-febrero-2020.pdf](https://bibliotecadigital.odepa.gob.cl/bitstream/handle/20.500.12650/69920/Boletin_cereales-febrero-2020.pdf)
- Oficina de Estudios y Políticas Agrarias y Centro de Investigación de Recursos Naturales (ODEPA-CIREN). (2017). *Catastro Frutícola, Región de Valparaíso. Principales Resultados*. Santiago, Chile.
- Oficina de Estudios y Políticas Agrarias y Centro de Investigación de Recursos Naturales (ODEPA-CIREN). (2017a). *Catastro Frutícola, Región Metropolitana. Principales Resultados*. Santiago, Chile.
- Oficina de Estudios y Políticas Agrarias y Centro de Investigación de Recursos Naturales (ODEPA-CIREN). (2018). *Catastro Frutícola, Región de Coquimbo. Principales Resultados*. Santiago, Chile.
- Oficina de Estudios y Políticas Agrarias y Centro de Investigación de Recursos Naturales (ODEPA-CIREN). (2018a). *Catastro Frutícola, Región de O'Higgins. Principales Resultados*. Santiago, Chile.
- Oficina de Estudios y Políticas Agrarias y Centro de Investigación de Recursos Naturales (ODEPA-CIREN). (2019). *Catastro Frutícola, Región del Maule. Principales Resultados*. Santiago, Chile.



- Oficina de Estudios y Políticas Agrarias y Centro de Investigación de Recursos Naturales (ODEPA-CIREN). (2019a). *Catastro Frutícola, Región del Bio-Bio. Principales Resultados*. Santiago, Chile.
- Oficina de Estudios y Políticas Agrarias y Centro de Investigación de Recursos Naturales (ODEPA-CIREN). (2019b). *Catastro Frutícola, Región de La Araucanía. Principales Resultados*. Santiago, Chile.
- Oficina de Estudios y Políticas Agrarias y Centro de Investigación de Recursos Naturales (ODEPA-CIREN). (2019c). *Catastro Frutícola, Región de los Ríos. Principales Resultados*. Santiago, Chile.
- Oficina de Estudios y Políticas Agrarias y Centro de Investigación de Recursos Naturales (ODEPA-CIREN). (2019d). *Catastro Frutícola, Región de los Lagos. Principales Resultados*. Santiago, Chile.
- Ortiz, R. (2012). *El cambio climático y la producción agrícola. Unidad de salvaguardias ambientales (VPS/ESG). Notas técnicas ESG-TN-383*. Banco Interamericano de Desarrollo (BID), Washington (2012).
- Python Software Foundation. (2020). *The Python Language Reference*. Recuperado de: <https://docs.python.org/3.7/reference/>
- Romero, O. (2005). *Pradera permanente en la zona sur. Trébol blanco: clave en los sistemas pastoriles*. Revista Tierra Adentro, 21-23. Recuperado de: <http://biblioteca.inia.cl/medios/biblioteca/ta/NR32959.pdf>
- Subsecretaría de Telecomunicaciones. (2020). *Internet. Series conexiones internet fija*. Recuperado de <https://www.subtel.gob.cl/estudios-y-estadisticas/internet/>
- Stöckle, C., Nelson, R. and Kemanian, A. (2011). *CropSyst (Version 4.14.10) [software]*. Obtenido de: <http://modeling.bsye.wsu.edu/rnelson/registration/cropsyst.htm>
- Tejo, P. (2009). *Las pequeñas y medianas explotaciones. VII Censo Agropecuario y Forestal 2006-2007*. Santiago, Chile.
- Teuber N. (2009). *Praderas permanentes en las zonas lecheras de Chile. Curvas de crecimiento, distribución y producción*. Consorcio Lechero S.A, INIA. Osorno. 62p. Recuperado de: <http://www.consorciolechero.cl/chile/documentos/biblioteca/Praderas-Permanentes-en-las-zonas-lecheras-de-Chile.pdf>
- Zhao, Y.; Feng, D., Yua, L., Wang, X., Chen, Y., Hernández, H.J., Galleguillos, M., Estados, C., Biging, G., Radke, J. & Gong, P. (2016). *Detailed dynamic land cover mapping of Chile: accuracy improvement by integrating multi-seasonal land cover data*. Remote Sensing of Environment 183, 170-185.
- Zhao Chuang, B. L., Liujun Xiao, Gerrit Hoogenboom, Kenneth J. Boote, Belay T. Kassie, Willingthon Pavan, Yan Zhu, S. A. (2019). *A SIMPLE crop model*. European Journal of Agronomy, 104(1161-0301), 97-106.

