

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
ESCUELA DE PREGRADO

MEMORIA DE TÍTULO

**DETERMINACIÓN DE LA VULNERABILIDAD DEL SECTOR FRUTÍCOLA AL
CAMBIO CLIMÁTICO EN LAS COMUNAS DE LA REGIÓN DE COQUIMBO**

EDISON MATÍAS ARO GÓMEZ

Santiago, Chile
2020

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
ESCUELA DE PREGRADO

MEMORIA DE TÍTULO

**DETERMINACIÓN DE LA VULNERABILIDAD DEL SECTOR FRUTÍCOLA AL
CAMBIO CLIMÁTICO EN LAS COMUNAS DE LA REGIÓN DE COQUIMBO**

**DETERMINATION OF THE VULNERABILITY OF THE FRUIT SECTOR TO
CLIMATE CHANGE IN THE COMMUNES OF THE COQUIMBO REGION**

EDISON MATÍAS ARO GÓMEZ

Santiago, Chile
2020

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
ESCUELA DE PREGRADO

**DETERMINACIÓN DE LA VULNERABILIDAD DEL SECTOR FRUTÍCOLA AL
CAMBIO CLIMÁTICO EN LAS COMUNAS DE LA REGIÓN DE COQUIMBO**

Memoria para optar al Título Profesional de:
Ingeniero en Recursos Naturales Renovables

EDISON MATÍAS ARO GÓMEZ

Profesor Guía

Sr. Manuel Paneque C.
Bioquímico, D.

Calificaciones

7,0

Profesores Evaluadores

Sr. Juan Manuel Uribe M.
Ingeniero Agrónomo.

Juan Manuel Uribe Meneses
Firmado digitalmente por Juan Manuel Uribe Meneses
Fecha: 2020.05.13 23:23:14 -04'00'

7,0

Sr. Osvaldo Salazar G.
Ingeniero Agrónomo, M.S. Ph. D.

7,0

Colaborador

Sr. Jorge Soto W.
Ingeniero en Recursos Naturales Renovables, M.Sc.

Santiago, Chile
2020

“Lo que puede el sentimiento no lo ha podido el saber, ni el más claro proceder ni el más ancho pensamiento”

Violeta Parra

AGRADECIMIENTOS

A mi mamá Leonor y mi papá Jorge que han sido el pilar fundamental en mi formación, tanto profesional como personal. Gracias por su amor incondicional, por la compañía, los consejos, los sacrificios y todo lo que ha conllevado esta aventura.

A mis hermanos Romina, Rossana y Jorge por ser un ejemplo para mí, por su amor, por caminar juntos y ser felices con las alegrías del otro.

A mis cuñados Juan Pablo y Constanza por la ayuda y el cariño de siempre.

A mis sobrinos Tamara y Duban por las risas, el apoyo, por subirme el ánimo y las conversaciones sinceras. A mi sobrina Victoria, que llegó a mi vida el año que ingresé a la universidad y que me ha regalado las más lindas alegrías y sin saberlo ha sido un apoyo fundamental en mi proceso.

A mi pareja, Jorge, por ser el mejor compañero que la vida me ha dado, por el amor, por acompañarnos, por crecer juntos y por la ilusión de seguir cumpliendo sueños.

A mi profesor guía, Manuel Paneque, por confiar en mi conocimiento, por la preocupación, disposición y por todas las herramientas que me ha entregado para sacar adelante este proyecto. A mis compañeros de Bionostra, Jorge Soto, Carolina Caroca, Donna Cortés, Daniela Araya y Celián Román por la ayuda brindada en esta investigación, por los consejos y por todo el conocimiento que me entregaron.

A mis amigos Constanza, Javiera, Camila Zambrano, Camila Matamala, Roberto, Sebastián, Camila Canales, Natalia, María Paz, Camila Muñoz, Matías, Catalina, Daniela, Anita, Paloma y Kathy por encontrarnos, acompañarnos y por los innumerables momentos que hemos vivido juntos.

Al Ballet folclórico Antumapu por darme la oportunidad de bailar, por ser mi vía de escape en los momentos de estrés, por las lindas experiencias y personas que he conocido. Gracias por compartir junto a mi ese amor tan puro por la danza.

A la vida, gracias.

ÍNDICE

ÍNDICE DE ACRÓNIMOS	11
RESUMEN	12
ABSTRACT	13
INTRODUCCIÓN	14
Objetivo general.....	16
MATERIALES Y MÉTODOS.....	17
Área de Estudio.....	17
Determinación del Índice de vulnerabilidad del sector frutícola al cambio climático	18
Indicadores para el componente Exposición	19
1. Área cultivada	19
2. Índice Estandarizado de Precipitación (SPI)	19
3. Probabilidad de heladas	20
Indicadores para el componente Sensibilidad	21
1. Aptitud térmica (2046-2065)	21
2. Aptitud hídrica (2046 – 2065).....	23
3. Indicador de ruralidad.....	24
4. Superficie erosionada	24
5. Estado de los cuerpos de agua superficial y subterránea.....	25
6. Estimación potencial de sequía (2046 - 2065).....	25
Indicadores para el componente Capacidad Adaptativa	26
1. Pertenencia a la Red Chilena de Municipalidades ante el cambio climático (REDMUNICC).....	26
2. Existencia de infraestructura para riego	27
3. Eficiencia en sistemas de riego	27
4. Necesidades Básicas Insatisfechas (NBI).....	28
Tratamiento de datos	29
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	30
Componente Exposición	30

1. Área cultivada	30
2. Índice Estandarizado de Precipitación (SPI)	31
3. Probabilidad de Heladas	33
Vulnerabilidad final del componente exposición	35
Componente de Sensibilidad	37
1. Aptitud térmica (2046-2065)	37
2. Aptitud hídrica (2046 – 2065)	43
3. Indicador de Ruralidad	47
4. Superficie Erosionada	48
5. Estado de los Cuerpos de Agua Superficial y Subterránea	50
6. Proyección potencial de sequía (2046 – 2065)	51
Vulnerabilidad del componente Sensibilidad.....	53
Componente Capacidad Adaptativa.....	55
1. Pertenencia a la REDMUNICC	55
2. Existencia de infraestructura para riego	56
3. Eficiencia de sistemas de riego	57
4. Necesidades Básicas Insatisfechas (NBI).....	58
Vulnerabilidad del componente Capacidad Adaptativa.....	60
Determinación del Índice de vulnerabilidad del sector frutícola al cambio climático	62
CONCLUSIÓN	65
BIBLIOGRAFÍA	66
APÉNDICES	75

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Localización del área de estudio, Región de Coquimbo, Chile.....	17
Figura 2. Vulnerabilidad al cambio climático del componente exposición en las comunas de la Región de Coquimbo, Chile.....	36
Figura 3. Mapa de aptitud térmica para los cultivos de mandarino, nogal, olivo, palto y vid de mesa en un período actual y período 2046 – 2065 escenario RCP8.5 en las comunas de la Región de Coquimbo, Chile. A: período actual, B: Período 2046 – 2065 escenario RCP8.5	41
Figura 4. Mapa de aptitud hídrica para los cultivos de mandarino, nogal, olivo, palto y vid de mesa en un período actual y período 2046 – 2065 escenario RCP8.5 en las comunas de la Región de Coquimbo, Chile. A: período actual, B: Período 2046 – 2065 escenario RCP8.5	45
Figura 5. Vulnerabilidad al cambio climático del componente sensibilidad en las comunas de la Región de Coquimbo, Chile.	54
Figura 6. Vulnerabilidad al cambio climático del componente capacidad adaptativa en las comunas de la Región de Coquimbo, Chile.	61
Figura 7. Vulnerabilidad final al cambio climático en las comunas de la Región de Coquimbo, Chile.	64

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Indicadores utilizados para la determinación del índice de vulnerabilidad del sector frutícola al cambio climático en las comunas de la región de Coquimbo, Chile.	18
Cuadro 2. Categorías del Índice Estandarizado de Precipitación (SPI) para años secos (Martínez <i>et al.</i> , 2012).	20
Cuadro 3. Valor final asignado en el indicador de Estado del cuerpo de agua superficial y subterránea para las comunas de la Región de Coquimbo	25
Cuadro 4. Valor del Coeficiente de eficiencia de riego para el indicador Eficiencia en sistemas de riego	27
Cuadro 5. Nivel de vulnerabilidad para el Índice de vulnerabilidad del sector frutícola al cambio climático para las comunas de la región de Coquimbo (Monterroso <i>et al.</i> , 2012).	29
Cuadro 6. Superficie (ha) cultivada con mandarina, nogal, olivo, palto y vid de mesa en la región de Coquimbo y valor final del indicador Área Cultivada.	30
Cuadro 7. Número de años en categorías de sequía para el período 1990 - 2017 y valor final del índice estandarizado de precipitación (SPI) en las comunas de la Región de Coquimbo, Chile.	32
Cuadro 8. Número días con heladas anuales y valor final del indicador de probabilidad de heladas en las comunas de la Región de Coquimbo, Chile.	34
Cuadro 9. Superficie en hectáreas en las categorías de restricción para el cultivo de nogal y palto al período 2046 – 2065 escenario RCP8.5 y valor final del indicador de aptitud térmica en las comunas de la Región de Coquimbo, Chile.	42
Cuadro 10. Superficie en hectáreas en las categorías de restricción para el cultivo de nogal y palto al período 2046 – 2065 escenario RCP8.5 y valor final del indicador de aptitud hídrica en las comunas de la Región de Coquimbo, Chile.	46
Cuadro 11. Población total urbana, población total rural y valor final del indicador de ruralidad en las comunas de la región de Coquimbo, Chile.	47
Cuadro 12. Superficie comunal erosionada (ha) y valor final del indicador de superficie erosionada en las comunas de la región de Coquimbo, Chile.	49
Cuadro 13. Valor final del indicador estado de los cuerpos de agua superficial y acuíferos en las comunas de la Región de Coquimbo, Chile.	50
Cuadro 14. Número de años en categorías de sequía escenario RCP8.5 período 2046 – 2065 y valor final del indicador proyección potencial de sequía.	52
Cuadro 15. Valor para el indicador Existencia de infraestructura para riego en las comunas de la región de Coquimbo.	56
Cuadro 16. Valor final del indicador de eficiencia de sistemas de riego en las comunas de la Región de Coquimbo, Chile.	58

Cuadro 17. Valor final de los indicadores simples para Necesidades Básicas Insatisfechas y el valor final del indicador NBI en las comunas de la Región de Coquimbo, Chile. ..	59
Cuadro 18. Valor final por componente (exposición, sensibilidad y capacidad adaptativa) y vulnerabilidad del sector frutícola al cambio climático en las comunas de la Región de Coquimbo, Chile.	63

ÍNDICE DE ACRÓNIMOS

AC	: Área cultivada
CA	: Capacidad adaptativa
CDK	: Alianza Clima y Desarrollo
DEM	: Modelo Digital de Elevación
DG	: Días-Grado anuales
ET₀	: Evapotranspiración de referencia
ET_c	: Evapotranspiración de cultivo
EX	: Exposición
ha	: Hectáreas
HF	: Horas de frío anuales
IPCC	: Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (Intergovernmental Panel on Climate Change)
K_c	: Coeficiente de cultivo
NBI	: Necesidades Básicas Insatisfechas
PLH	: Período Libre de Heladas
RCP	: Trayectorias de Concentración Representativas (Representative Concentration Pathways)
REDMUNICC	: Red Chilena de Municipios ante el Cambio Climático
SE	: Sensibilidad
SPI	: Índice Estandariza de Precipitación (Standardized Precipitation
T	: Temperatura
TmaxE	: Temperatura máxima de Enero

RESUMEN

El cambio climático es un fenómeno complejo que está determinando el desarrollo frutícola de la región de Coquimbo, donde los períodos de extrema sequía y aumentos de temperatura han repercutido el rubro frutícola. Este panorama resulta aún más inquietante, ya que al año 2050 se prevé un aumento en las temperaturas máximas y una disminución de precipitación con porcentajes cercanos al 50% de déficit respecto al período de tiempo actual. Dicho esto, surgió la necesidad de obtener información comunal, para identificar donde es más necesario aplicar los esfuerzos para establecer medidas de mitigación y adaptación.

En este contexto, se propuso un índice comunal de vulnerabilidad del sector frutícola al cambio climático que permitió cuantificar y analizar la vulnerabilidad en las 15 comunas de la región de Coquimbo. La vulnerabilidad del sector frutícola se determinó promediando 13 indicadores seleccionados para los componentes de exposición (3), sensibilidad (6) y capacidad adaptativa (4), lo que permitió obtener resultados de vulnerabilidad final y por componente. Adicionalmente, se realizó un indicador de aptitud térmica y uno de aptitud hídrica comunal en función de las variables temperatura máxima, días grado, período libre de heladas, horas frío y requerimiento de riego para un período 2046 y 2065 escenario RCP8.5, para los cultivos priorizados en este estudio: mandarino, nogal, olivo, palto y vid de mesa.

A nivel de cultivo, los resultados arrojaron que el cultivo de nogal es el más sensible a la falta de frío proyectada para la región y cultivo de palto es el más sensible a las heladas tardías y al déficit de precipitación. A nivel comunal, las comunas de Paihuano y La Higuera presentaron nivel “alto” de vulnerabilidad, debido principalmente a la exposición por heladas, la sensibilidad por déficit de precipitación y la adaptación de infraestructura y sistemas de riego. Por el contrario, la comuna de La Serena obtuvo nivel medio de vulnerabilidad debido a la baja incidencia de heladas, diversidad de su fruticultura y tecnificación en sus sistemas de riego.

Palabras clave: cambio climático, vulnerabilidad, Coquimbo.

ABSTRACT

The climate change is a complex phenomenon, which is determining the fruit growth in Coquimbo region, where the periods of extreme drought and the increase of the temperature have affected the fruit market. This scene is even more disturbing, due it is expect that in 2050 the maximum temperatures increase and the rainfall decrease with percentage near to the 50% of deficiency according to nowadays. Therefore, appear the necessity of obtain communal information to identify where is more necessary to put on the efforts to stablish mitigation measures and adjustment.

In this context, was suggested a communal rate of vulnerability of the fruit market to the climate change that allows quantifying and analyzing the vulnerability in the fifteen locations of the Coquimbo region. The fruit market vulnerability was determined by averaging thirteen selected indicators for the components of exposure (3), sensitivity (6) and adaptive capacity (4), which allows to obtaining a result of final vulnerability and by constituent. Furthermore, it was perform an indicator of thermal ability and one of local hydrological ability according of the variable maximum temperature, grade days, free freeze periods, cold hours and watering request for the period 2046 and 2065 scenario RCP8,5 to the prioritize farming in this study: mandarin, walnut, olive and avocado trees and table grape.

At crop level, the results were that the walnut crop is more sensitive to the cold scarcity and the avocado crop is more sensitive to the late freeze and to the rain deficiency. At local level, the Paihuano and La Higuera location exhibited “high” level of vulnerability, mainly due to the exposure to the freeze, to the sensibility for the rain deficiency and to the facility changes and watering system. On the contrary, the La Serena location obtain a medium level of vulnerability due to the low influence of freeze, to the fruit crop diversity and to the modern watering system.

Key words: climate change, vulnerability, Coquimbo.

INTRODUCCIÓN

La fruticultura es un sector de gran dinamismo en Chile, en términos de producción, exportaciones y generación de empleos (CONICYT, 2007). La industria frutícola nacional realiza un aporte del 38% al PIB silvoagropecuario-silvícola nacional (ODEPA, 2017), el cual, alcanzó un valor de 4.581 MM\$ al año 2018 (ODEPA, 2019). La superficie chilena dedicada a las plantaciones frutícolas alcanza las 342.671 hectáreas y se distribuyen principalmente entre las regiones del Libertador General Bernardo O'Higgins, del Maule, Metropolitana, Valparaíso y de Coquimbo (ODEPA y CIREN, 2019).

La Región de Coquimbo posee un total de 27.177 (8% de la superficie frutícola nacional) hectáreas cultivadas con frutales y emplea a un total de 47.693 personas que trabajan principalmente en predios agrícolas (ODEPA, 2019b). Las especies frutícolas con mayor cantidad de hectáreas plantadas dentro de la región corresponden a vid de mesa (*Vitis vinifera*) y palto (*Persea americana*), con 8.159 y 3.983 hectáreas, respectivamente. La producción frutícola tiene como fin principal la exportación y el mercado interno (ODEPA y CIREN, 2018), al año 2019, los productos más exportados fueron uva de mesa, paltas y cerezas, los cuales tienen como principal destino Estados Unidos, Japón y Europa (Pizarro *et al.*, 2019; Yáñez y Cohen, 2019). La mayor producción frutícola regional se lleva a cabo en las comunas de Ovalle, Monte Patria y Vicuña.

Los cultivos de mandarina (*Citrus reticulata*), nogal (*Juglans regia*), olivo (*Olea europaea*), palto (*Persea americana*) y vid de mesa (*Vitis vinifera*), son los más representativos de la fruticultura regional, juntos alcanzan las 22.331 hectáreas cultivadas, equivalentes al 82% de los cultivos frutícolas de la región. De las 22.331 hectáreas cultivadas con mandarina, nogal, olivo, palto y vid de mesa, el 53% (11.824 ha) se destina a la exportación, el 26% a la agroindustria (5.743 ha) y el 19% (4.336 ha) al mercado interno.

La apropiada producción de los cultivos frutícolas depende de las condiciones climáticas, siendo en consecuencia el cambio climático un factor de incertidumbre sobre el rubro frutícola de la región (Cifuentes y Meza, 2008). El cambio climático es un fenómeno complejo que plantea el desafío de transformar la fruticultura de manera que el recurso hídrico y edáfico sean usados de manera sostenible en condiciones de aumento de temperatura y disminución de precipitaciones (IPCC, 2012; IPCC, 2014; FAO, 2018).

Desde el año 2010 a 2018, la región de Coquimbo ha presentado una de las sequías más extremas de las últimas décadas, con su máxima intensidad en 2013, alcanzando un déficit de precipitaciones del 60%, lo que provocó una reducción del agua embalsada al 8,3% (123.753.000 m³) de su capacidad regional (1.491.000.000 m³; CR2, 2015). Por otro lado, se proyecta, por efectos del cambio climático, un incremento de la temperatura media anual

entre los 2°C y 4°C al año 2050 y una disminución de precipitaciones en torno a un 40% para la región (MINAGRI, 2010; ONU, 2012).

La actividad frutícola de la Región de Coquimbo es vulnerable a los efectos del cambio climático por la poca diversidad de sus cultivos, el aumento de los suelos erosionados, los períodos secos y la escasez hídrica (Santibáñez *et al.*, 2008; CIREN, 2013; Santibáñez *et al.*, 2014). En el aspecto socio-cultural se proyecta una mayor vulnerabilidad al cambio climático en aquellas zonas donde predomina la agricultura tradicional y una población con bajo índice de desarrollo humano (MINAGRI, 2010).

La vulnerabilidad al cambio climático de un sistema está representada por la medida en que está expuesto y cuán sensible es a los efectos del cambio climático y es inversamente proporcional a su capacidad de adaptarse a estos efectos. Sin embargo, no existe forma única de calcularla (IPCC, 2007; IPCC, 2012; IPCC, 2014). Las metodologías para la evaluación de la vulnerabilidad ante el cambio climático generalmente son presentadas a través de estudios de caso y su principal aporte es que permiten, a través del uso de indicadores, cuantificar la vulnerabilidad en un área determinada (Teutsch, 2006).

Monterroso *et al.* (2012), llevaron a cabo un estudio de vulnerabilidad agrícola aplicado al sector agrícola de México, a través de un índice de vulnerabilidad que incluyó 60 indicadores. Por su parte, la Alianza Clima y Desarrollo (CDKN, 2013), evaluaron la vulnerabilidad agrícola de la Cuenca Alta del río Cauca en Colombia con un total de 15 indicadores repartidos en los componentes de vulnerabilidad propuestos por el IPCC. Además, se modeló el rendimiento de los cultivos de café, caña de azúcar, papa, frijol, cacao y plátano.

En Chile, Santibáñez *et al.*, (2008) determinaron la vulnerabilidad a partir del promedio de indicadores para los componentes sistemas de producción, sistema social y sistema económico. Posteriormente, en el año 2014 estimaron la vulnerabilidad agrícola a partir del promedio del índice de vulnerabilidad hídrica, índice de fragmentación de la tenencia de la tierra, índice de ruralidad, índice de intensidad de uso de capital y tecnología e índice de desarrollo humano. Sin embargo, no se ha realizado un índice específico para el sector frutícola.

Este trabajo de investigación busca determinar el nivel de vulnerabilidad del sector frutícola ante el cambio climático a nivel comunal en la Región de Coquimbo, tomando como datos los cultivos mandarina (*Citrus reticulata*), nogal (*Juglans regia*), olivo (*Olea europaea*), palto (*Persea americana*) y vid de mesa (*Vitis vinifera*). Esto a través de la identificación de las variables que condicionan el desarrollo óptimo de sus cultivos y las que otorgan la capacidad de anticiparse a los problemas que provoca el cambio climático.

Objetivo general

Determinar la vulnerabilidad del sector frutícola al cambio climático en las comunas de la Región de Coquimbo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de Estudio

La Región de Coquimbo se encuentra ubicada en la zona semiárida de Chile y en términos administrativos está dividida en 15 comunas: Coquimbo, La Higuera, Vicuña, Pailuano, La Serena, Andacollo, Río Hurtado, Punitaqui, Ovalle, Monte Patria, Combarbalá, Salamanca, Canela, Illapel y Los Vilos (Figura 1).

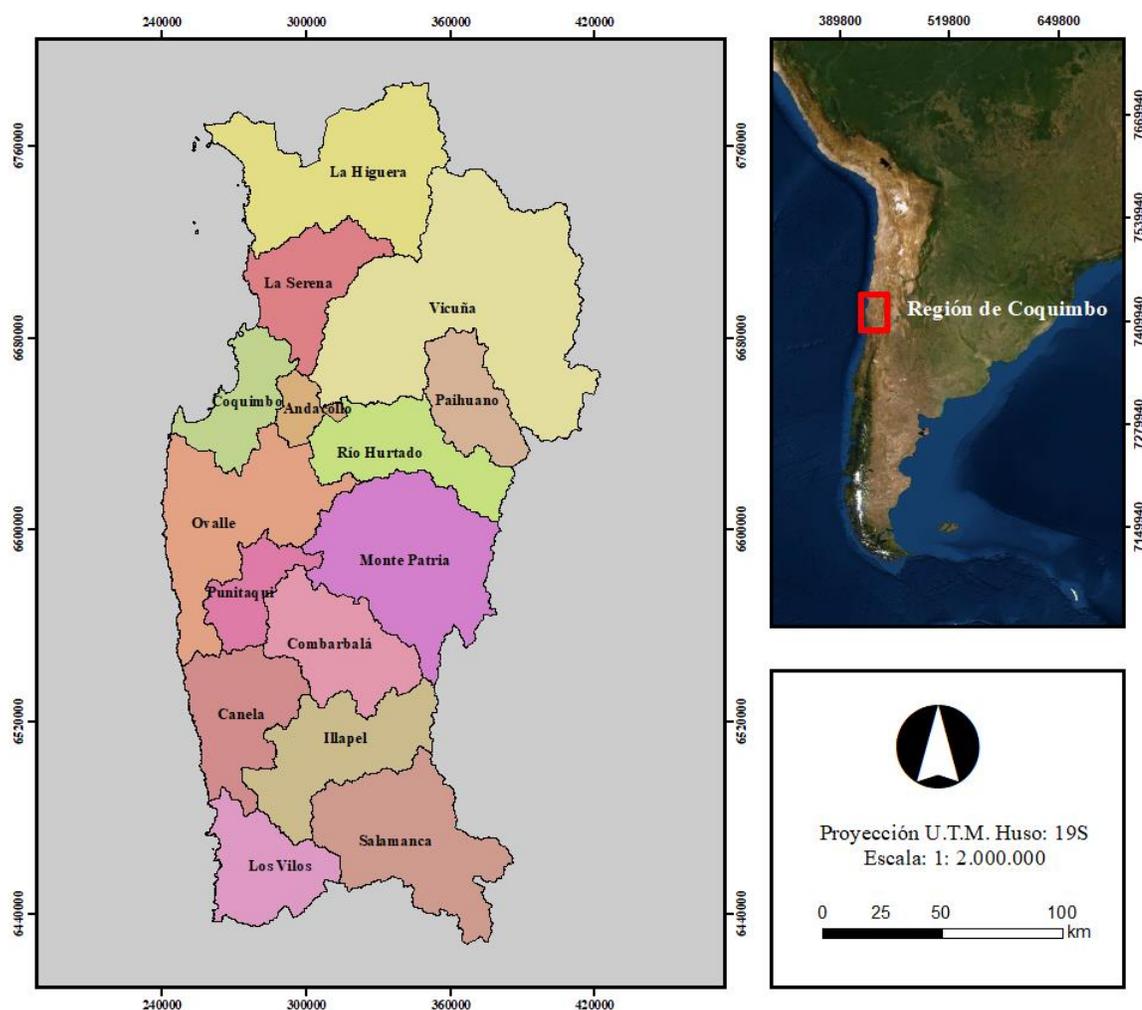


Figura 1. Localización del área de estudio, Región de Coquimbo, Chile.

Determinación del Índice de vulnerabilidad del sector frutícola al cambio climático

Se construyó un índice de vulnerabilidad de los principales productos frutícolas de la Región de Coquimbo al cambio climático, para lo cual se utilizó el concepto de vulnerabilidad al cambio climático propuesto por el IPCC: es la “*propensión o predisposición a ser afectado negativamente*”. La vulnerabilidad es multidimensional y para su análisis se consideraron los componentes exposición, sensibilidad, y capacidad adaptativa (IPCC, 2012; IPCC, 2014):

- a. Exposición: corresponde al sistema productivo que podría verse afectado negativamente por los efectos del cambio climático (IPCC, 2014).
- b. Sensibilidad: es el grado en que el sistema es potencialmente modificado o afectado por un disturbio, interno, externo o un grupo de ellos (IPCC, 2014).
- c. Capacidad adaptativa: se trata de la capacidad de moderar o evitar los daños y/o aprovechar las oportunidades beneficiosas para anticiparse a los factores que impulsan el cambio climático (Monterroso *et al.*, 2012).

Se calcularon un total de 12 indicadores, según los conceptos exposición (3), sensibilidad (6) y capacidad adaptativa (4) (Cuadro 1).

Cuadro 1. Indicadores utilizados para la determinación del índice de vulnerabilidad del sector frutícola al cambio climático en las comunas de la región de Coquimbo, Chile.

<i>Componente de vulnerabilidad</i>	<i>Indicador</i>
Exposición	Área cultivada
	Índice Estandarizado de Precipitación (SPI)
	Índice de probabilidad de heladas
	Aptitud térmica (2046-2065)
Sensibilidad	Aptitud hídrica (2046 – 2065)
	Índice de ruralidad
	Proporción de superficie erosionada
	Estado de los cuerpos de agua superficial y subterránea
	Proyección potencial de sequía (2046-2065)
Capacidad adaptativa	Pertenencia a la Red Chilena de Municipalidades ante el cambio climático
	Existencia de infraestructura para riego
	Eficiencia de los sistemas de riego
	Necesidades Básicas Insatisfechas

Indicadores para el componente Exposición

1. Área cultivada

Este indicador cuantifica la relación entre la superficie total cultivada con mandarino, nogal, olivo, palto y vid de mesa, en función de la superficie frutícola total de la comuna. Se basa en que, a mayor área cultivada con algunos de los cultivos seleccionados, mayor es la exposición de la comuna al cambio climático. Esto porque hay menor diversidad y, por tanto, limita el sistema productivo a un número acotado de respuestas frente al cambio climático o porque las condiciones climáticas de la comuna han propiciado la producción de otros cultivos frutícolas (CDKN,2013). Se utilizó como base de datos el Catastro frutícola para la región de Coquimbo de ODEPA y CIREN (2018) (Ecuación 1; CDKN, 2013).

$$AC = Stc / Stf$$

Ecuación 1: Área Cultivada (AC)

Donde:

Stc: Superficie total cultivada con mandarino, nogal, olivo, palto y vid de mesa (ha)

Stf: Superficie total cultivada con frutales (ha)

2. Índice Estandarizado de Precipitación (SPI)

Para el cálculo del SPI, se utilizaron series históricas de un total de 15 estaciones meteorológicas pertenecientes a la Dirección General de Aguas (DGA, 2018), Dirección Meteorológica de Chile (DMC, 2018), del Centro de Estudios Avanzados en Zonas Áridas (CEAZA, 2018), de la Red Agrometeorológica del Instituto de Investigaciones Agropecuarias de Chile (INIA, 2018), y del Explorador Climático Centro de Ciencias del Clima y la Resiliencia (CR2, 2018; Araya, 2018). Para el cálculo se consideraron 27 años de estudio, porque para el período (1990 – 2017) presentaban menor error en sus datos. Además, el SPI es una metodología flexible que permite el cálculo histórico o con series cortas de tiempo como mensuales, semestrales y/o anuales (Mckee *et al.*, 1993). Los datos interpolaron mediante una interpolación simple que utilizó como covariables el modelo digital de elevación (DEM) y latitud para obtener la distribución de las precipitaciones acumuladas anuales.

Se calculó para cada uno de los años (1990-2017) de la serie, la desviación simple, definida como la diferencia entre precipitación acumulada para cada año y la media total de la serie histórica. De esta forma, se obtuvieron valores positivos y negativos en las desviaciones

simples. Los valores negativos del SPI se clasificaron en categorías de sequía a partir del valor de las desviaciones simples, para definir años moderadamente secos a extremadamente secos (cuadro 2; Martínez *et al.*, 2012)

Cuadro 2. Categorías del Índice Estandarizado de Precipitación (SPI) para años secos (Martínez *et al.*, 2012).

<i>Desviación simple (mm)</i>	<i>Descripción</i>
Entre 0 y -50	Moderadamente seco
Entre -50 y -100	Seco
Entre -100 y -150	Muy seco
Menor que -150	Extremadamente seco

Finalmente, el SPI representó el número de desviaciones simples en que cada dato de precipitación se desvió del promedio histórico y cuantificó las condiciones de déficit de precipitación (Ecuación 2; Martínez *et al.*, 2012)

$$SPI = ns/N$$

Ecuación 2: Índice Estandarizado de Precipitación (SPI)

Donde:

ns : Número de años en categorías de sequía

N : Número total de años de la serie histórica de datos

3. Probabilidad de heladas

Se utilizó el período libre de heladas de Uribe *et al.* (2012), a partir del cual se obtuvo un promedio simple de los días libres de heladas para cada una de las comunas de la Región de Coquimbo. Se optó por no utilizar un método establecido para estimar las heladas, ya que el foco de este estudio no está centrado en estimar la magnitud de las heladas, sino más bien, en qué tan expuesta es una comuna, a sufrir heladas anuales, además, se transformó en un método sencillo y fácil replicación con datos de fácil acceso. Para obtener, el número de días con heladas en el período de un año, se utilizó la ecuación 3.

$$Nh = 365 - N_{lh}$$

Ecuación 3: Número de días con heladas anuales (N_h)

Donde:

N_{lh} : Número de días anuales libres de heladas

Finalmente, el valor de la probabilidad de heladas para cada una de las comunas de la Región de Coquimbo quedó determinado mediante la ecuación 4.

$$P_h = N_h/365$$

Ecuación 4: Probabilidad de heladas (P_h)

Indicadores para el componente Sensibilidad

1. Aptitud térmica (2046-2065)

Se determinó la aptitud térmica futura para el escenario más pesimista RCP8.5 y para el período 2046 – 2065 para los cultivos de mandarina, nogal, olivo, palto y vid de mesa. Los datos proyectados para el escenario RCP8.5 período 2046 – 2065 se obtuvieron de Araya *et al.* (2020). El modelo térmico consideró 4 variables: Temperatura máxima de enero (TmaxE), Período Libre de Heladas (PLH), Días-Grado anuales (DG) y Horas de Frío anuales (HF). Para el modelo se realizaron las cartografías de estas 4 variables térmicas.

- a. TmaxE: Los frutales requieren un rango de temperaturas óptimas para su desarrollo vegetativo y productivo, el cuál varía dependiendo del frutal (CIREN, 1989). Para dar cuenta de los requerimientos de temperatura, se utilizó la TmaxE (CIREN, 2017), la cual se realizó mediante una interpolación simple para las series históricas de TmaxE para un período 2046 – 2065 escenario RCP8.5.
- b. Período libre de heladas: Las heladas son eventos climáticos de gran preocupación en la actividad frutícola debido al potencial de pérdidas socio-económicas que estas generan (Bascopé, 2013). Para dar cuenta de las heladas se representó el número de días al año en los cuales la probabilidad de heladas es menor al 50% o temperatura mínima del aire está sobre los 0°C escenario RCP8.5 período 2046 – 2065 (Ecuación 5; de Uribe *et al.*, 2012).

$$PLH = 365 - PCH$$

Ecuación 5: Período Libre de Heladas (PLH)

Donde:

PCH : Fecha de la última helada – Fecha de la primera helada (expresado en días julianos)

- c. DG: La acumulación de DG cumple un rol fundamental en el desarrollo de los cultivos y dependiendo de la velocidad con que se acumulen, los eventos fenológicos se adelantan o atrasan (Ibacache, 2008). Para su cálculo se consideró una temperatura umbral equivalente a 10°C (Ecuación 6; de Uribe *et al.*, 2012).

$$DG = [\sum(T^{\circ} - tu)] * n$$

Ecuación 6: Días-Grado anuales (DG)

Donde:

T° : Temperatura media del período (°C)

tu : Temperatura umbral (°C)

n : Número de días del período

- d. Horas de Frío Anual: Las HF corresponden a la disponibilidad de frío y representan la acumulación de horas con temperaturas iguales o inferiores a los 7°C (CIREN, 1989; Medina *et al.*, 2019). Su importancia radica en la necesidad de los frutales para acumular cierta cantidad de HF y acelerar la etapa de floración (Elías y Caltellvi, 1996), los cultivos mandarina y palto no requieren HF para su crecimiento. Para efectos de este estudio representaron la suma de frío en el período con menores temperaturas de un año, entre el 1 de mayo y el 30 de septiembre (Uribe *et al.*, 2012) (Ecuación 7; Gómez y Morales, s.f).

$$654,95 - (34,44 * T^{\circ})$$

Ecuación 7: Horas de Frío anuales (HF)

Donde:

T° : Temperatura media mensual (°C)

Mediante una revisión bibliográfica se establecieron parámetros de crecimiento óptimo para las variables térmicas en los cultivos. Posteriormente, se realizaron mapas de aptitud térmica para un período actual y escenario RCP8.5 período 2046 – 2065 para cada uno de los 5 cultivos priorizados (mandarina, nogal, olivo, palto y vid de mesa). Finalmente, se realizó una cartografía que representó el valor final por comuna obtenido por el promedio simple ponderado por los 5 cultivos priorizados en el estudio. La ponderación por cultivo se obtuvo a partir de un peso asignado a las distintas categorías de restricción: sin restricción (0,00), restricción leve (0,25), restricción moderada (0,50) y restricción alta (1,00).

2. Aptitud hídrica (2046 – 2065)

El indicador de aptitud hídrica estimó el requerimiento de riego para los cultivos mandarino, nogal, olivo, palto y vid de mesa, a partir de las variables evapotranspiración de cultivo y precipitación. El valor final por comuna se obtuvo a partir de una escala relativa para comparar entre los 5 cultivos priorizados cuál requiere mayor cantidad de riego y fue representado a partir de cartografías separadas por cultivo (Ecuación 8; Brouwer y Heibloem, 1986).

$$RH = ETc - Pp$$

Ecuación 8: Requerimiento de riego (RH)

Donde:

ETc : Evapotranspiración del cultivo

Pp : Precipitación

Para ello, se determinó la evapotranspiración del cultivo en función de la evapotranspiración de referencia y coeficiente de cultivo; mientras que la precipitación a partir de series históricas de precipitación (período actual) y datos proyectados de precipitación acumulada anual (período 2046 – 2065).

- a. Evapotranspiración del cultivo: La evapotranspiración de cultivo representó la cantidad de agua que el cultivo debería tener a su disposición de forma artificial para lograr su completo desarrollo (Martínez y Tejero, 2004). Para obtener la evapotranspiración de cultivo, se estimó la evapotranspiración de referencia calculada para los 12 meses del año (Ecuación 9; Hargreaves y Samani, 1982). Luego, se ponderó la evapotranspiración de referencia mensual por el coeficiente de cultivo mensual publicado (Ecuación 10; Allen *et al.*, 1998). El valor final de la evapotranspiración de cultivo se obtuvo mediante la suma de los 12 meses.

$$ET_0 = 0,0023 * (T_m + 17,8)(T_x - T_n)^{0,5} R_a$$

Ecuación 9: Evapotranspiración de referencia (ET_0)

Donde:

T_m : Temperatura media mensual

T_x : Temperatura máxima mensual

T_n : Temperatura mínima mensual

R_a : Radiación extraterrestre mensual

$$ET_c = ET_0 * K_c$$

Ecuación 10: Evapotranspiración del cultivo (ET_c)

Donde:

ET_0 : Evapotranspiración de referencia

K_c : Coeficiente del cultivo

- b. Precipitación: Se realizó una distribución de la precipitación acumulada anual para el período 2046 – 2065 escenario RCP8.5 mediante una interpolación simple que consideró como covariables el DEM y latitud.

3. Indicador de ruralidad

Se determinó la relación entre la cantidad de población rural con respecto a la población total comunal. En aquellas comunas donde toda la población es rural el valor del indicador es 1; mientras que en una comuna con población total urbana el valor del indicador es 0. Se basó en el hecho de que la población rural se asocia a baja diversificación frutícola. Para obtener el valor de este indicador se utilizó la base de datos "Población total por sexo y área urbana-rural, según grupos de edad" de los resultados definitivos del Censo 2017 (Ecuación 11; de Santibáñez *et al.*, 2008).

$$RU = PRUR/PTOT$$

Ecuación 11: Índice de Ruralidad (RU)

Donde:

$PRUR$: Población rural comunal

$PTOT$: Población total comunal

4. Superficie erosionada

El indicador expresó que, a mayor erosión del suelo, los cultivos frutícolas son más vulnerables ante cambio climático (CDKN, 2013). Para calcularlo, se utilizaron los datos de CIREN (2013), el cuál presentó los datos en las categorías: "Erosión Baja o Nula", "Erosión Moderada", "Erosión Severa", "Erosión Muy Severa". Para el cálculo específico del

indicador de Superficie erosionada se consideró como superficie erosionada a las 3 últimas categorías respecto de la superficie total regional (Ecuación 12).

$$SE = ST_{er}/ST$$

Ecuación 12: Superficie erosionada (*SE*)

Donde:

ST_{er} : Superficie total erosionada

ST : Superficie total comunal

5. Estado de los cuerpos de agua superficial y subterránea

Este indicador dio cuenta del estado actual de los acuíferos y los cuerpos de agua superficial de la Región de Coquimbo, considerando que éstos cobran mucha relevancia para el desarrollo de la actividad agrícola (Budds, 2012). Para su cálculo se utilizaron los datos entregados por la Dirección General de Aguas (DGA, 2019) respecto a la condición de los cuerpos de agua superficial y los acuíferos.

La asignación del valor es discreta y se asignó en función de la peor condición observada. Dicho esto, se entregaron solamente 3 valores: el valor 1 representó una mayor condición de vulnerabilidad; 0,50 condición media de vulnerabilidad y valor 0 es menos vulnerable (Cuadro 3).

Cuadro 3. Valor final asignado en el indicador de Estado del cuerpo de agua superficial y subterránea para las comunas de la Región de Coquimbo

<i>Estado del acuífero y/o cuerpo de agua superficial</i>	<i>Valor</i>
Agotado	1,00
Prohibición de extracción	1,00
Restricción de extracción	0,50
Sin prohibición ni restricción	0,00

6. Estimación potencial de sequía (2046 - 2065)

Para el cálculo de este indicador, se utilizaron los datos de precipitaciones acumuladas anuales al período 2046 – 2065 escenario RCP8.5. Se utilizó la misma metodología que para el SPI, con la diferencia, de que, en este indicador, la desviación simple se obtuvo a partir de

la media comunal de un escenario actual (1998-2017) y la media anual comunal para el período 2046 – 2065.

Indicadores para el componente Capacidad Adaptativa

Como la capacidad adaptativa es inversamente proporcional a los componentes exposición y sensibilidad, para determinar el valor final de la capacidad adaptativa se aplicó la ecuación 13.

$$1 - (\bar{X} CA)$$

Ecuación 13: Valor final del componente Capacidad Adaptativa

Donde:

$\bar{X} CA$: Promedio de los indicadores del componente capacidad adaptativa

1. Pertenencia a la Red Chilena de Municipalidades ante el cambio climático (REDMUNICC)

La Red Chilena de Municipios ante el Cambio Climático (REDMUNICC) nació en 2014 como una comunidad de apoyo y colaboración técnica abierta a todos los municipios de Chile que quisieran tomar el compromiso explícito de planificar y gestionar su territorio, considerando el cambio climático como el escenario que está determinando los desafíos del siglo XXI (REDMUNICC, 2019). Para gestionar el territorio instauró 9 áreas temáticas de trabajo: agua, energía, ecosistemas, salud, gestión de residuos, transporte y movilidad, cultura e identidad, infraestructura crítica y gestión del riesgo de desastres.

Para el cálculo del indicador, se entregaron valores dicotómicos, es decir, obtendrá 1 si a finales del año 2019 el municipio no formó parte de la Red Chilena de Municipalidades ante el cambio climático y si no ha llevado a cabo medidas de adaptación y mitigación al cambio climático. Por el contrario, se asignó valor 0 si el municipio estuvo incluido dentro de la red y si llevó a cabo medidas de mitigación al cambio climático. Esto dado que el pertenecer a la REDMUNICC se consideró como un efecto positivo en la adaptación al cambio climático, ya que permite a los municipios establecer medidas concretas para hacer frente a los efectos del cambio climático.

2. Existencia de infraestructura para riego

Con las demandas actuales de agua, en el mejor de los casos, los embalses disponen de una capacidad para atenuar la sequía en un par de años consecutivos, y, por ende, mitigar los efectos del cambio climático (Santibáñez, 2016). Para el cálculo de este indicador se otorgaron valores discretos, es decir, valor 1 si la comuna no contó con embalse dentro de la comuna o si no tuvo un embalse aguas arriba que pueda ser utilizado para riego en más de una comuna y valor 0 en caso contrario.

3. Eficiencia en sistemas de riego

El indicador cuantificó la eficiencia de riego para el total de superficies regadas en cada una de las comunas de la región. Para su cálculo se utilizó la base de datos del Catastro frutícola para la región de Coquimbo (ODEPA y CIREN, 2018). Además, se ponderó por un coeficiente de eficiencia riego, dependiendo del método de riego utilizado, el cual se obtuvo a partir de una escala continua, donde riegos más tecnificados se acercaron al valor 0 (Cuadro 4). De esta forma se consideró como comunas más vulnerables a aquellas que presentaron una mayor cantidad de hectáreas regadas con tipos de riego menos tecnificados, debido a que son menos eficientes con el uso de agua (Antúnez *et al.*, 2010), obteniendo un valor cercano a 1 en el indicador de eficiencia en sistemas de riego (Ecuación 14).

Cuadro 4. Valor del Coeficiente de eficiencia de riego para el indicador Eficiencia en sistemas de riego

<i>Método de riego</i>	<i>Coficiente de Eficiencia de Riego (Kn)</i>
Tendido	1
Surcos	0,83
Californiano	0,66
Aspersión	0,49
Micorjet	0,32
Microaspersión	0,15
Goteo	0

$$[\sum(Kr * STn)]/ST$$

Ecuación 14: Eficiencia en sistemas de riego

Donde:

Kr: Coeficiente de eficiencia de riego

STn: Superficie total por cada tipo de riego

ST: Superficie total comunal

4. Necesidades Básicas Insatisfechas (NBI)

Este indicador se determinó a partir de los datos de la encuesta CASEN (2017) y se utilizaron las variables analfabetismo, saneamiento, hacinamiento, calidad de la vivienda y educación infantil (Ecuación 15; de Feres y Mancero, 2001), para verificar si las viviendas y/o personas cubren sus necesidades, en caso contrario, se clasifican como vulnerables, obteniendo valores cercanos a 1.

- a. Analfabetismo: Razón entre el número de personas que no sabe leer, no sabe escribir y no sabe leer ni escribir, respecto al total de personas en la comuna.
- b. Saneamiento: Consideró sistemas de eliminación de excretas y disponibilidad de agua en la vivienda. En el sistema de eliminación de excretas, consideró la proporción entre las viviendas que presentaron sistema conectado a fosa séptica, letrina sanitaria conectada a pozo negro, cajón sobre pozo negro, cajón sobre acequia o canal, cajón conectado a otro sistema, baño químico dentro del sitio y que no poseen sistema de eliminación de excretas, respecto al número total de viviendas. Para el sistema de agua, se consideró la proporción entre las viviendas que presentan sistema de agua fuera de la vivienda y aquellas que no presentan sistema (lo acarrear), respecto al total de viviendas.
- c. Hacinamiento: Se determinó como la razón entre el número de personas residentes en la vivienda y el número de dormitorios de esta. Se consideró como hacinamiento a aquellas viviendas que la razón fuera superior a 2,5.
- d. Calidad de la Vivienda: Evaluó la calidad de la vivienda en función de los materiales utilizados en la construcción de muros, techos y pisos. Los materiales que se consideraron más vulnerables fueron los siguientes: muros (tabique sin forro, adobe, barro, quincha, pirca o materiales de desecho), techos (paja, coirón, totora, caña, materiales de desecho o que no presentan cubierta).
- e. Educación Infantil: Cuantificó el número de niños en edad escolar que no asisten a la escuela con respecto al total de niños en edad escolar.

$$(AA + SA + HC + CV + EI)/5$$

Ecuación 15: Necesidades Básicas Insatisfechas (NBI)

Donde:

AA: Analfabetismo

SA: Saneamiento

HC: Hacinamiento

CV: Calidad de la vivienda

EI: Educación infantil

Tratamiento de datos

El valor de cada componente del índice de vulnerabilidad: exposición, sensibilidad y capacidad adaptativa se obtuvo a partir del promedio simple del total de sus indicadores y varió de forma continua entre 0 y 1. El valor final de vulnerabilidad arrojó valores entre -1 y 2, considerando que el valor de capacidad adaptativa se resta. Por ello y para una mejor interpretación de los valores en una escala entre 0 y 1, se aplicó una corrección matemática (Ecuación 16; de Monterroso *et al.*, 2012).

$$\left(\frac{EX + SE - CA}{3}\right) + \frac{1}{3}$$

Ecuación 16: Vulnerabilidad Final

Donde:

EX: Valor del componente exposición

SE: Valor del componente sensibilidad

CA: Valor del componente capacidad adaptativa

Para cada comuna se obtuvieron valores entre 0 y 1, donde valores cercanos a 0 se asocia a condiciones de baja exposición, sensibilidad y alta capacidad adaptativa, (CDKN, 2013); mientras que valores cercanos a 1 se relaciona a condiciones de alta exposición y sensibilidad, pero con baja capacidad adaptativa, por ende, más vulnerables al cambio climático. Finalmente, la vulnerabilidad fue categorizada mediante una escala cualitativa de cinco niveles (Cuadro 5; Monterroso *et al.*, 2014).

Cuadro 5. Nivel de vulnerabilidad para el Índice de vulnerabilidad del sector frutícola al cambio climático para las comunas de la región de Coquimbo (Monterroso *et al.*, 2012)

<i>Valor</i>	<i>Nivel de vulnerabilidad</i>
0,00 – 0,20	Muy Bajo
0,00 – 0,20	Muy Bajo
0,21 - 0,40	Bajo
0,41 – 0,60	Medio
0,61 – 0,80	Alto
0,81 – 1,00	Muy Alto

Para la Región de Coquimbo, se realizaron cartografías que incluyeron el nivel de vulnerabilidad comunal para los componentes exposición, sensibilidad y capacidad adaptativa, como también, para la vulnerabilidad final del sector frutícola siguiendo lo propuesto por CDKN (2013) y Monterroso *et al.* (2012).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Componente Exposición

1. Área cultivada

El indicador de área cultivada mostró que las comunas de Paihuano y Río Hurtado obtuvieron los valores más altos, debido a una menor diversificación de sus cultivos frutícolas (Cuadro 6).

Cuadro 6. Superficie (ha) cultivada con mandarina, nogal, olivo, palto y vid de mesa en la región de Coquimbo y valor final del indicador Área Cultivada.

<i>Comuna</i>	<i>Mandarino</i>	<i>Nogal</i>	<i>Olivo</i>	<i>Palto</i>	<i>Vid de mesa</i>	<i>Sumatoria cultivos priorizados</i>	<i>Superficie (ha) total cultivada con frutales</i>	<i>Valor indicador</i>
Canela	0,00	0,00	4,13	79,81	0,00	83,94	109,18	0,77
Illapel	84,36	754,63	0,10	964,43	0,00	1803,52	1914,06	0,94
Los Vilos	15,65	35,11	133,46	195,98	0,00	380,2	454,81	0,84
Salamanca	119,08	586,82	0,00	382,71	53,00	1141,61	1495,46	0,76
Andacollo	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Coquimbo	88,53	3,26	741,77	0,93	0,00	834,49	1907,85	0,44
La Higuera	0,20	0,00	66,78	0,00	0,00	66,98	74,57	0,90
La Serena	116,35	0,90	0,00	8,80	0,00	126,05	555,62	0,23
Paihuano	25,29	13,40	0,00	57,85	675,88	772,42	778,42	0,99
Vicuña	574,63	70,04	0,00	294,19	1952,88	2891,74	3227,58	0,90
Combarbalá	255,22	69,18	8,28	60,92	454,19	847,79	904,41	0,94
Monte Patria	1269,39	369,66	0,76	267,49	3437,54	5344,84	5568,56	0,96
Punitaqui	95,75	0,00	7,37	68,27	223,37	394,76	582,99	0,68
Ovalle	1122,35	436,85	2941,92	1514,49	1310,06	7325,67	9276,67	0,79
Río Hurtado	17,00	160,71	0,00	87,32	52,05	317,08	327,57	0,97

Caso contrario, fue la comuna de Ovalle, que a pesar de tener la mayor superficie frutícola de la región con 9.276,67 hectáreas y ser la segunda comuna del país con mayor superficie plantada con frutales, solo superada por la comuna de Melipilla, presentó una mayor diversidad en sus cultivos frutícolas, lo que le permitió obtener valor 0,79 en el indicador de área cultivada (Cuadro 6). El desarrollo frutícola de la comuna de Ovalle se debe, entre otras cosas, a la existencia de embalses, la tecnificación en los sistemas de riego, el mejoramiento de la red vial y portuaria, la inversión privada en *packing*, la inversión en cultivos de mayor

rentabilidad y, no menos importante, las condiciones climáticas óptimas para el desarrollo de olivo, vid de mesa, mandarino, almendro, nogal, limonero y naranjo.

De igual modo, las comunas de La Serena y Coquimbo obtuvieron los valores más bajos en el indicador de área cultivada, con valores 0,23 y 0,44 respectivamente, esto porque su producción frutícola se encuentra diversificada. En la comuna de La Serena las especies mandarino (20,94%) y palto (1,58%) alcanzan solo el 22,69% de sus cultivos frutícolas, mientras que los cultivos de limonero (30,24%), chirimoyo (17,85%), naranjo (12,98%) y papayo (12,22%) se destacan entre los más cultivados. Por su parte, en la comuna de Coquimbo las especies olivo (38,88%), mandarino (4,64%), nogal (0,17%) y palto (0,05%) ocupan el 43,74% de los cultivos frutícolas de la comuna, mientras que, junto con el olivo, los cultivos de limonero (40,94%), chirimoyo (6,94%) y naranjo (5,37%) son los de mayor producción comunal (Cuadro 6)

En tanto, la comuna de Andacollo presentó un índice de área cultivada 0, dado que no se registró actividad frutícola. No obstante, en el año 2011 contó con 7,01 hectáreas plantadas con cultivos frutícolas (ODEPA y CIREN, 2011). Por ello, de igual forma, se realizará el análisis de la comuna de Andacollo, para determinar la vulnerabilidad y prevenir las debilidades de la comuna ante posibles efectos del cambio climático.

2. Índice Estandarizado de Precipitación (SPI)

En la Región de Coquimbo, desde el año 2010, se ha observado un déficit de precipitación que ha superado a cualquier otro evento conocido en los registros pluviométricos (Núñez y Verbiest, 2018). De acuerdo con los datos entregados por el SPI en la región, se registraron al menos 15 de 28 años estudiados con valores de SPI que dan cuenta de déficit de precipitaciones. Las comunas que presentaron el valor más alto del SPI fueron las comunas de Canela (SPI 0,68) y Vicuña (SPI 0,68), con 19 de 28 años con déficit de precipitación. Por el contrario, las comunas de Illapel (SPI 0,64) y Salamanca (SPI 0,54) obtuvieron el valor más bajo en el SPI, con 15 años de déficit (Cuadro 7).

Galleguillos *et al.* (2017) demostraron que las cuencas de la región obtuvieron las categorías de “moderadamente seco” y “seco” más altos del país. Los años en categoría “moderadamente seco” y “seco” fueron registrados mayoritariamente en la zona costera de la región, lo que coincidió con los resultados del SPI obtenidos en esta investigación, donde se observó que las comunas de Canela, Coquimbo, La Higuera, La Serena y Ovalle tienen al menos 17 años entre las categorías de “moderadamente seco” y “seco” (Cuadro 8). Dada la gravedad de la sequía, el 29 de junio del año 2019 se tramitó un decreto que declaró a todas las comunas de la Región de Coquimbo en zona de escasez hídrica (DGA, 2019).

Cuadro 7. Número de años en categorías de sequía para el período 1990 - 2017 y valor final del índice estandarizado de precipitación (SPI) en las comunas de la Región de Coquimbo, Chile.

<i>Comuna</i>	<i>Moderadamente seco</i>	<i>Seco</i>	<i>Muy Seco</i>	<i>Extremadamente seco</i>	<i>Cantidad de años con déficit de precipitación</i>	<i>Valor indicador</i>
Canela	7	10	1	1	19	0,68
Illapel	5	5	4	1	15	0,54
Los Vilos	4	8	3	1	16	0,57
Salamanca	4	6	4	1	15	0,54
Andacollo	8	8	0	0	16	0,57
Coquimbo	9	8	0	0	17	0,61
La Higuera	17	1	0	0	18	0,64
La Serena	10	7	0	0	17	0,61
Paihuano	10	7	1	0	18	0,64
Vicuña	13	6	0	0	19	0,68
Combarbalá	6	6	4	1	17	0,61
Monte Patria	4	6	7	0	17	0,61
Punitaqui	7	6	5	0	18	0,64
Ovalle	8	9	1	0	18	0,64
Río Hurtado	5	9	3	0	17	0,61

Producto de la escasez de agua, la agricultura registró pérdidas económicas por la disminución en el rendimiento de los cultivos y la necesidad de comprar en el mercado los productos que cultivaban destinados a autoconsumo, al año 2015, el 45% de los cultivos de la Provincia del Choapa estaba sin riego (Corzo y Meza, 2010; Núñez y Vierbest, 2018). Esto explicaría, que la Provincia del Choapa presentara la mayor disminución frutícola de la Región de Coquimbo, con un déficit del 8,85%, respecto al año 2015. Las comunas más afectadas fueron Salamanca (-10,58%), Illapel (-9,31%) y Los Vilos (-3,45%). Por su parte, las provincias del Elqui y Limarí disminuyeron su superficie frutícola en un 1,33 y 0,74, respectivamente, respecto al año 2015.

A pesar del déficit hídrico, hubo algunos frutales de hoja caduca que aumentaron su superficie en la Región de Coquimbo (Lobos *et al.*, 2017), como el caso del cultivo de nogal con un aumento del 1,40% y cultivo de olivo con un aumento del 4,97% en su superficie regional, respecto al año 2015. Por el contrario, el cultivo de vid de mesa presentó una disminución del 6,45%, pasando de 8.721,59 hectáreas cultivadas en 2015 a 8.158,97 hectáreas en 2018, lo que pudo deberse a los daños producidos por falta de agua, como también, daño por heladas tardías en los meses de primavera.

Según Tapia (2019, citado por Red Agrícola, 2019) a pesar del déficit hídrico en la Región de Coquimbo, la superficie de frutales de hoja perenne aumentó. Al año 2015 había un total 7.653,86 hectáreas cultivadas con mandarino y palto, en el 2018, el valor ascendió a 7.766,99 hectáreas, lo que se tradujo en un aumento del 1,48%. Esto se debió a un efecto de sustitución de paltos por cítricos, debido a que el cultivo de palto es uno de los frutales que requiere más agua para su producción (Red agrícola, 2019).

La superficie cultivada de palto disminuyó en un 20,71% y el mandarino aumentó en un 43,85%, respecto al año 2015. En este sentido, se destacan las comunas de Ovalle (+54,73%) y Monte Patria (+44,16%) que aumentaron su superficie cultivada con mandarino en 397,00 y 388,85 hectáreas, respectivamente. Además, es importante destacar que la región sostiene el 49% de las plantaciones de mandarino a nivel nacional.

Finalmente, se observó que la condición de sequía, a pesar de ser uno de los factores determinantes en el desarrollo de la fruticultura, no significó su fin, sino más bien, abrió la posibilidad a las comunas para buscar medidas de adaptación y probar alternativas en las que el agua no sea una limitante. En esa línea, los embalses y sistemas de riego cumplen un rol fundamental en la mitigación de la sequía, por lo que las grandes obras de ingeniería deberán diseñarse de modo diferente, con la finalidad de considerar escenarios climáticos y sociales cambiantes en un territorio altamente urbanizado (CR2, 2015).

3. Probabilidad de Heladas

Las comunas de Ovalle y La Serena obtuvieron los valores más bajos en el indicador de probabilidad de heladas, debido a que presentaron como máximo 33 días con heladas anuales (Cuadro 9). Ambas comunas poseen un período de temperaturas favorables a la actividad frutícola durante los 12 meses de un año (Santibáñez *et al.*, 2017). Por ello, en estas comunas fue posible observar el predominio de cultivos frutícolas más sensibles a las heladas invernales, como el mandarino (116,35 ha) en La Serena, y olivo (2.941,92 ha) y palto (1.514,49 ha) en Ovalle (Martínez *et al.*, 2008).

Por el contrario, en comunas cordilleranas se registró mayor probabilidad de heladas, obteniendo los valores más altos del indicador en las comunas de Paihuano y Salamanca, con sobre 280 días con heladas anuales (Cuadro 8). En estas comunas la actividad frutícola se lleva a cabo en sus valles, no obstante, son más propensas a sufrir daño por riesgo de heladas, lo cual encarece los costos de funcionamiento y las vuelve más vulnerables. Esto explicaría la ausencia de plantaciones con el cultivo de olivo, ya que las heladas invernales representan el principal factor térmico que limita su producción (Picornell y Melero, 2013); así como la presencia de las plantaciones de vid de mesa en Paihuano y nogal en Salamanca, cultivos que presentan sensibilidad media a heladas invernales, sin embargo, el nogal es más sensible a

heladas otoñales y la vid de mesa a heladas primaverales (Torres *et al.*, 2017; Rodríguez *et al.*, 2018).

Cuadro 8. Número días con heladas anuales y valor final del indicador de probabilidad de heladas en las comunas de la Región de Coquimbo, Chile.

<i>Comuna</i>	<i>Días con Heladas</i>	<i>Valor indicador</i>
Canela	61	0,17
Illapel	199	0,54
Los Vilos	47	0,13
Salamanca	280	0,77
Andacollo	37	0,10
Coquimbo	0	0,00
La Higuera	99	0,27
La Serena	33	0,09
Paihuano	282	0,77
Vicuña	255	0,70
Combarbalá	186	0,51
Monte Patria	236	0,65
Punitaqui	55	0,15
Ovalle	15	0,04
Río Hurtado	197	0,54

Las heladas se observaron particularmente durante los meses de invierno, entre mayo y agosto, con su máxima probabilidad de ocurrencia durante el mes de julio. (Currihuinca, 2010). No obstante, el comportamiento territorial es desigual, existiendo una mayor probabilidad de ocurrencia en los valles productivos sobre los 2.000 msnm, ya que bajo dicha altitud existió un promedio que no supera los 35 días con heladas (Apéndice 2).

Bajo los 2.000 msnm, el indicador de probabilidad de heladas mostró que las comunas costeras de la región, en general, presentaron la mayor cantidad de días libres de heladas, esto porque la costa es beneficiada por el efecto regulador térmico del mar (Uribe *et al.*, 2012).

A pesar de que la frecuencia de heladas en la región es baja y existe una marcada estacionalidad, ocurren eventos de heladas tardías las cuales son dañinas para los frutales, especialmente para el cultivo vid de mesa, que es el más susceptibles a sufrir daño por heladas primaverales (Martínez *et al.*, 2008).

CIREN (2013) mostró que en la Región de Coquimbo los productos de palto, mandarina y vid de mesa fueron los más afectados por las heladas invernales y primaverales, se perdieron un total de 3.202, 3.601 y 17.269 toneladas, respectivamente, equivalentes a una pérdida de 21.506 MUS\$. En septiembre del 2016 se produjo la pérdida de 548 hectáreas en la región, principalmente de vid de mesa y damascos, daños que se concentraron principalmente en las provincias de Limarí y Choapa (Guajardo, 2016).

Vulnerabilidad final del componente exposición

Las comunas costeras de la Región de Coquimbo presentaron niveles bajo o medio de vulnerabilidad al cambio climático, esto puede deberse a una mayor diversificación de sus frutales y/o baja ocurrencia de heladas, aunque existe un alto déficit hídrico (Figura 2).

Así mismo, las comunas cordilleranas presentaron nivel alto de vulnerabilidad, debido a una baja diversificación en sus cultivos, alta incidencia de heladas y/o alto déficit hídrico (Figura 2).

Finalmente, cabe señalar, que ninguna comuna de la región, presentó una categoría Muy Baja, lo cual se pudo deber principalmente a que, a pesar de que la incidencia de heladas en la Región de Coquimbo es baja, se presentaron niveles altos de déficit hídrico y poca diversidad de sus cultivos frutícolas en la mayoría de las comunas de la región, lo que las hace más propensas a sufrir efectos negativos por cambio climático.

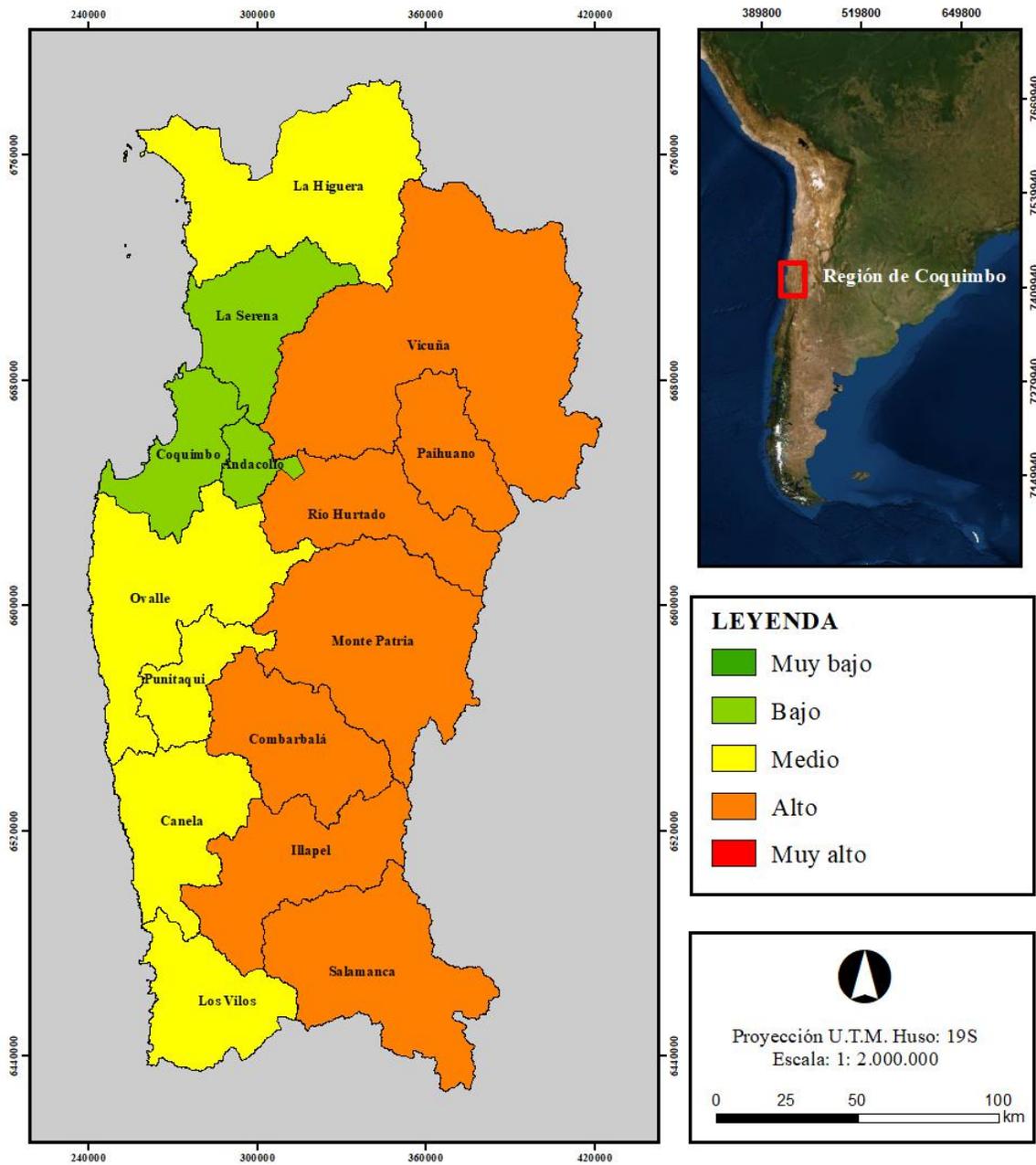


Figura 2. Vulnerabilidad al cambio climático del componente exposición en las comunas de la Región de Coquimbo, Chile.

Componente de Sensibilidad

1. Aptitud térmica (2046-2065)

a. Temperatura máxima de enero (TmaxE):

En la costa de la Región de Coquimbo la TmaxE es superior a los 22°C y aumenta gradualmente hacia el interior, donde se registraron temperaturas entre los 26 y 28°C. Las temperaturas máximas se concentraron en los valles transversales de las comunas de Monte Patria y Vicuña donde alcanzaron valores de hasta 32°C (Apéndice 3). La TmaxE de la zona interior y valles transversales ha resultado beneficiosa para los cultivos de mandarino, nogal, olivo, palto y vid de mesa que requieren temperaturas óptimas sobre los 25°C para su crecimiento (CIREN, 1989).

En cambio, para el período 2046 – 2065 se registró un descenso de la TmaxE en las zonas costeras y valles transversales, y un incremento de hasta 1,50°C en las zonas cordilleranas sobre los 2.000 msnm (Apéndice 3).

b. Días-grado anuales (DG):

En la costa de la Región de Coquimbo se acumularon entre 800 y 1.500 DG al año. En la zona interior, se registró un aumento de entre 300 y 500 DG respecto de la costa (AGRIMED, 2014), alcanzando valores superiores a los 1.600 DG, e incluso a valores sobre los 2.000 DG en las comunas de Monte Patria y Vicuña (Santibáñez *et al.*, 2017). Para la zona cordillerana, se observaron acumulaciones menores a 200 DG desde los 2.000 msnm (Apéndice 4).

En la proyección realizada para los DG en el período 2046 – 2065, se estimó una acumulación superior a los 1.400 DG en la costa. En la zona de valles, se observó un aumento gradual, alcanzando valores máximos de hasta 2.500 DG en las comunas de Vicuña y Monte Patria. En la zona cordillerana sobre los 2.000 msnm, comienza un descenso de los DG, llegando a los 0 DG en las partes más altas de la región (Apéndice 4).

El aumento de los DG en la Región de Coquimbo en el período 2046 – 2065 respecto al período actual, no tendría un efecto negativo sobre los cultivos frutícolas, ya que, el principal efecto radica en un acortamiento de las fases fenológicas de los cultivos, traduciéndose en un adelantamiento en el período de cosecha (Giraldo, 2017). Sin embargo, existe el riesgo de pérdidas por heladas tardías en primavera, variable que el modelo no consideró.

c. Horas de frío anuales (HF):

Las HF fueron entre 600 y 800 en la zona costera e interior de la región. Considerando que, en los valles transversales las temperaturas invernales son superiores a los 7°C, en las comunas de Monte Patria y Vicuña se acumularon solamente entre 400 y 600 HF. Por el contrario, en zonas cordilleranas se alcanzan temperaturas invernales inferiores a los 7°C, lo que genera una acumulación superior a las 2.000 HF sobre los 2.000 msnm (Apéndice 5).

Para el período 2046 – 2065 las HF se reducirían en la Region de Coquimbo en la mayoría de las comunas se alcanzarían valores entre las 200 y 400 HF. En la cordillera, sobre los 2000 msnm se espera la mayor reducción de HF sobre los 500 HF (Apéndice 5).

Dentro de las variables térmicas, se observó que las HF acumuladas son el factor más restrictivo para la producción óptima de los cultivos frutícolas en la región. La gran reducción de HF entre un escenario actual y escenario RCP8.5 período 2046 - 2065 resulta un problema para los cultivos de nogal, olivo y vid de mesa, ya que entrarían tardíamente en receso y/o tendrían problemas en sus próximas etapas fenológicas, dando como resultado una menor calidad en sus frutos (CEAZA, 2016). Para los cultivos de mandarino y palto no generaría impacto negativo, ya que no requieren del parámetro HF para su crecimiento (CIREN, 1989).

d. Período Libre de Heladas (PLH):

La costa de la región se caracterizó por la nula o baja incidencia de heladas, con 335 a 365 días del año libres de heladas. En los valles se observó una disminución del PLH con hasta 125 días libres de heladas. Sobre los 2000 msnm, se observaron que existen solo 35 días al año libres de heladas, porque las temperaturas máximas con dificultad superaron los 0°C (Apéndice 6).

El PLH en el período 2046 – 2065 mostró una tendencia al aumento en zonas interiores y precordilleranas. Sobre los 2.000 msnm el número de heladas va disminuyendo, lo que puede dar cuenta del calentamiento que se espera para las zonas de altura, y que afectaría a las reservas de nieve (Santibañez *et al.*, 2014). La disminución en la cantidad de heladas anuales proyectada puede resultar beneficioso para obtener un crecimiento óptimo para los cultivos de mandarino, nogal, olivo, palto y vid de mesa.

Finalmente, realizar una modelación de variables climáticas resulta complejo considerando que las bases de datos, en general, presentan falencias tecnológicas, principalmente con la ubicación de las estaciones meteorológicas, las cuales se concentran en zonas bajo los 1.500 msnm y en los valles transversales, existiendo áreas no cubiertas en zonas cordilleranas. Además, se presentan errores en los datos generados por estas estaciones, los cuales se deben

a fallan tecnológicas como la no actualización de los sensores, el manejo de estos y la relocalización de las estaciones (Morales *et al.*, 2006). A pesar de las debilidades, el modelamiento de las variables térmicas mostró resultados óptimos.

Indicador de aptitud térmica

En el indicador de aptitud térmica, las comunas de Andacollo, Punitaqui y Ovalle presentaron los mayores niveles de vulnerabilidad, mientras que Los Vilos, Paihuano y Salamanca, los menores. Las comunas y cultivos que presentaron una mayor cantidad de hectáreas en categoría de “restricción alta” no significa que el cultivo no pueda crecer en esa zona, sino que, no existen las condiciones térmicas necesarias para el crecimiento óptimo del cultivo, sin embargo, si se toman las medidas de mitigación y adaptación óptimas, el cultivo podría crecer con menos limitantes. (Figura 3; Cuadro 9).

Es importante enfocar el análisis del indicador a nivel de cultivo, siendo el cultivo de nogal el más vulnerable y el cultivo de palto el menos vulnerable. Para el caso del cultivo de nogal, la proyección de aptitud térmica indicó que, en prácticamente todo el territorio agrícola regional presentará una “restricción alta” a excepción de pequeñas zonas en los valles transversales de las comunas cordilleranas. Las comunas costeras más vulnerables para el cultivo del nogal fueron Coquimbo, Ovalle y Canela, así como las comunas interiores de Punitaqui y Andacollo, alcanzando en ambos valores superiores al 95% de superficie con restricción alta (Figura 3; cuadro 9).

Lo anterior, es particularmente complejo para la comuna de Ovalle, puesto que es la tercera comuna dentro de la región con mayor superficie de nogal, con 436,85 ha (Cuadro 7; ODEPA y CIREN, 2018). Surge el desafío a los agricultores de la comuna de Ovalle para planificar sus cultivos caducos con restricciones de HF, o decidir la conveniencia o no de la aplicación de los reguladores para salida de dormancia, lo que implicaría un aumento en los costos de producción (CEAZA, 2016).

La restricción alta para el cultivo del nogal se debió principalmente a la influencia de la variable HF, ya que, en la costa y zona interior de la región se proyectó una acumulación que no sobrepasa las 400 HF, lo que no es suficiente para el desarrollo óptimo del cultivo, el cual requiere una acumulación superior a las 400 HF (CIREN, 2011). La falta de frío le impedirá finalizar el proceso de vernalización, afectando el crecimiento del cultivo de nogal (CIREN, 2017).

Por el contrario, el cultivo de palto es el que presentó mejor aptitud térmica al período 2046 – 2065, lo que se tradujo en el de menor vulnerabilidad. La buena respuesta que podría tener el cultivo de palto a los cambios térmicos proyectados en la región se debe principalmente a

la baja incidencia de heladas y las altas temperaturas (Figura 3; Salvo *et al.*, 2017). El factor térmico más restrictivo para el cultivo de palto son las heladas invernales (Martínez *et al.*, 2008; Ferreyra *et al.*, 2011). Melo *et al.* (2010) modeló la variación en el rendimiento del cultivo de palto para los escenarios A240, B240, A270 y B270; y a partir de ello, se demostró que el cultivo de palto fue el único frutal que incrementaría su superficie total explotada, en caso de contar con suficiente agua para su producción.

El indicador de aptitud térmica, con las variables seleccionadas, demostró que podría existir una aceleración de la fenología en el cultivo de palto y mandarino, reducción del tiempo de desarrollo y aumento de la precocidad de la madurez (Bascopé 2013). Sin embargo, el modelo no contempló variables que pudiesen demostrar problemas por la incidencia de plagas y enfermedades dado el aumento de las temperaturas, lo que genera aún más incertidumbre. Algunos estudios demostraron, que bajo condiciones de sequía las plagas que más se ven favorecidas son aquellas denominadas invasoras en cultivos frutícolas (Hamada y Ghini, 2011). Los insectos pertenecientes al orden *Hemiptera* y *Thysanoptera* (chinches y trips), son los más beneficiados por estas condiciones, ya que el aumento en la temperatura favorece la tasa reproductiva de estos insectos (Vásquez, 2011).

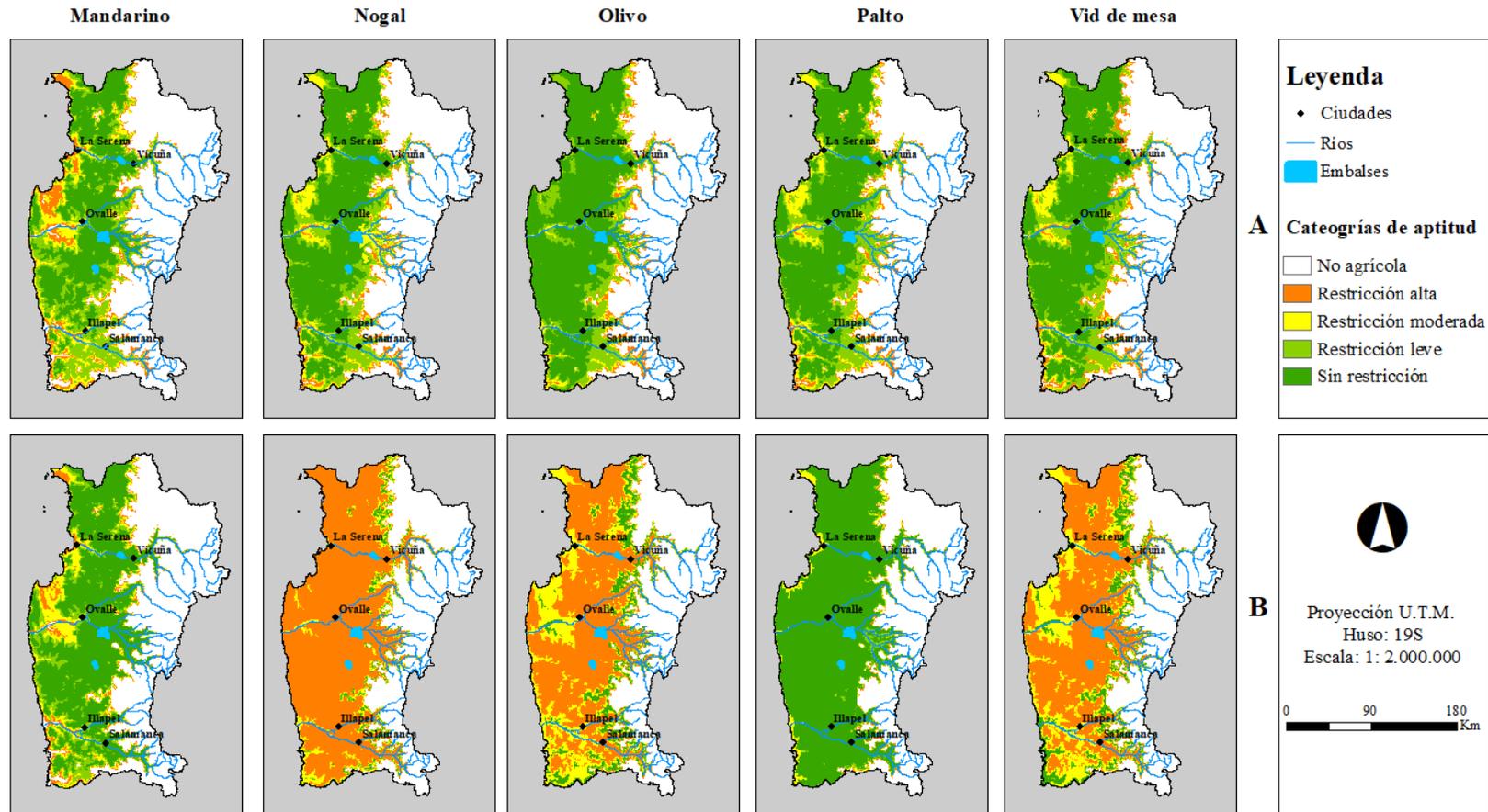


Figura 3. Mapa de aptitud térmica para los cultivos de mandarino, nogal, olivo, palto y vid de mesa en un período actual y período 2046 – 2065 escenario RCP8.5 en las comunas de la Región de Coquimbo, Chile. A: período actual, B: Período 2046 – 2065 escenario RCP8.5

Cuadro 9. Superficie en hectáreas en las categorías de restricción para el cultivo de nogal y palto al período 2046 – 2065 escenario RCP8.5 y valor final del indicador de aptitud térmica en las comunas de la Región de Coquimbo, Chile.

<i>Comunas</i>	<i>Nogal</i>					<i>Palto</i>					<i>ATC</i>	<i>Valor indicador</i>
	<i>NA</i>	<i>RA</i>	<i>RM</i>	<i>RL</i>	<i>SR</i>	<i>NA</i>	<i>RA</i>	<i>RM</i>	<i>RL</i>	<i>SR</i>		
Canela	0,00	201.037,89	15.027,70	432,63	1.213,10	0,00	44,18	11.212,42	432,63	206.022,09	217.711,33	0,55
Illapel	74.017,83	157.532,27	19.022,35	3.783,01	7.153,94	74.090,99	2.947,84	3.357,92	4.952,31	176.160,34	187.418,42	0,50
Los Vilos	1.818,08	126.485,88	45.218,60	3.457,52	6.243,50	1.818,08	1.000,62	20.202,52	2.586,00	157.616,53	181.40,66	0,45
Salamanca	173.880,73	119.084,49	23.879,74	11.469,67	11.605,24	174.389,90	13.204,10	7.258,85	18.460,25	126.606,78	165.529,98	0,48
Andacollo	0,00	51.301,81	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	51.301,81	51.301,81	0,59
Coquimbo	0,00	135.660,81	4.944,31	0,00	0,00	0,00	0,00	23.312,39	0,00	117.292,71	140.605,09	0,57
La Higuera	91.958,68	261.718,36	27.837,87	12.480,23	14.649,52	91.958,68	8.597,06	25.002,31	12.480,24	270.606,66	316.686,27	0,53
La Serena	1.265,59	173.798,75	9.636,85	1.262,11	3.652,69	1.265,59	479,90	9.642,62	1.262,14	176.965,72	188.350,38	0,55
Paihuano	124.321,23	15.544,46	4.486,93	3.133,08	1.928,52	124.321,22	3.188,25	1.294,61	4.096,96	16.513,18	25.093,00	0,47
Vicuña	518.189,15	182.085,11	30.533,99	11.014,33	12.528,84	518.337,76	9.452,29	8.686,13	13.466,25	204.409,00	236.013,67	0,50
Combarbalá	57.102,92	148.455,23	12.183,50	4.993,11	7.002,98	57.176,23	4.034,74	2.431,87	6.093,87	160.001,02	172.561,51	0,53
Monte Patria	194.875,42	184.493,06	20.545,82	10.009,31	8.399,77	194.875,46	10.204,23	6.480,93	42.927,66	163.835,10	223.447,92	0,54
Punitaqui	0,00	108.997,99	161,90	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	109.159,89	109.159,89	0,58
Ovalle	0,00	335.042,55	15.489,41	0,00	50,25	0,00	0,00	6.479,59	0,00	344.102,71	350.582,31	0,56
Río Hurtado	100.000,17	91.894,91	15.332,87	6.030,04	6.783,79	100.000,17	2.722,78	2.933,91	6.622,18	107.762,75	120.041,61	0,49

NA: No agrícola; RA: Restricción alta; RM: Restricción moderada; RL: Restricción leve; SR: Sin restricción; ATC: Área total comunal en superficie agrícola.

2. Aptitud hídrica (2046 – 2065)

El indicador de aptitud hídrica para el período 2046 – 2065 escenario RCP8.5 mostró que las comunas de Monte Patria, Paihuano, Río Hurtado y Vicuña tienen los mayores requerimientos de riego para los cultivos de mandarino, nogal, olivo, palto y vid de mesa, mientras que Los Vilos, Coquimbo, Canela y Ovalle presentaron el menor requerimiento de agua para riego (Cuadro 10).

A nivel de cultivo, el palto, es el que requiere mayor cantidad de agua para riego, por ende, es el más vulnerable. Caso contrario, el cultivo de olivo, quien presentó menor requerimiento de agua para riego (Figura 4). En el cultivo de palto, la proyección de la aptitud hídrica para el período 2046 – 2065 determinó que, desde la zona de interior hasta los valles transversales, existirá un requerimiento de riego superior a los $8.000 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, esto porque la evapotranspiración potencial alcanza sus valores máximos en esa zona y la precipitación es baja (Apéndice 7; Apéndice 8). Las comunas que requieren mayor cantidad de agua para riego en el cultivo de palto son Monte Patria, Combarbalá y Vicuña, mientras que Los Vilos y Coquimbo, menos.

Lobos (2017) determinó que el cultivo de palto es el más sensible a la falta de agua y que la escasez de precipitaciones ocurrida desde el año 2010 en la Región de Coquimbo hizo que disminuyera la superficie regional plantada con palto. El cultivo de palto en la región disminuyó en un 20,71% respecto al año 2015, pasó de 5.023,39 en 2015 a 3.983,19 hectáreas cultivadas en 2018. Las comunas más afectadas fueron las comunas de Ovalle (-27,58%) y Salamanca (-160,58%) con una disminución de 576,72 y 160,58 hectáreas, respectivamente. Esto resulta preocupante especialmente para la comuna de Ovalle que en la actualidad concentra el 38,02% de las plantaciones de palto a nivel regional.

El alto requerimiento de agua en palto se debe a que es un árbol perenne, por ende, consume agua durante todo el año. El tamaño de la fruta en el palto tiene una significativa importancia económica y es principalmente afectado por rendimiento (Adato, 1988; Michelakis et al., 1993). La falta de agua afecta el rendimiento, por ende, el tamaño del fruto, quitándole valor en el mercado (Cowan *et al.*, 1997)

Perry (2015) realizó una zonificación para el cultivo de palto al año 2050 y proyectó un aumento en los rendimientos de palto solamente en zonas con disponibilidad hídrica, llegando a aumentar en un 44% la producción potencial respecto a la línea base, en el caso del sector alto de Los Vilos y un 41% en el sector costero. Lo anterior, se complementa con los resultados obtenidos desde este indicador, donde se observó que las comunas costeras, en general, requieren menos agua para el cultivo del palto (Cuadro 10). Sin embargo, el proceso descrito anteriormente se ve fuertemente afectado al incorporar un escenario de escasez hídrica, disminuyendo en un 47% los rendimientos en todos los escenarios, lo que se acerca

más a la realidad proyectada para la Región de Coquimbo, donde se espera que la escasez de agua sea el factor más limitante para el desarrollo óptimo de los cultivos.

Caso contrario, es el cultivo de olivo, el cuál según los datos proyectados por el indicador de aptitud hídrica es el que requiere menos agua para riego. El olivo es una especie resistente al estrés hídrico (Cadahia, 2005). Características como hojas pequeñas, ceras cuticulares, estomas presentes sólo en el envés de la hoja y cubiertas de tricomas, le ofrecen al cultivo, un buen control de la pérdida de agua por transpiración y le ha permitido aumentar su superficie plantada aun en condiciones de déficit hídrico (Cadahia, 2005; Hidalgo *et al.*, 2007; Lavini *et al.*, 2008). Lo anterior, explica el aumento en un 4,97% en la superficie cultivada con olivo en la Región de Coquimbo, a pesar de la condición de sequía que atravesó la región desde el año 2010.

De acuerdo a los datos entregados por el indicador de aptitud hídrica arrojó que las comunas de Los Vilos, Canela, Coquimbo y Ovalle son las que requieren menor cantidad de agua para la producción de olivo dentro de la Región de Coquimbo. La comuna de Los Vilos (+1,05%) aumentó en 1,39 hectáreas su producción de olivo al año 2018, Canela (+100%) en 4,13 hectáreas, Coquimbo (+0,46%) en 4,63 hectáreas y Ovalle (+6,29%) en 174,17 hectáreas. En este sentido, se destacan las comunas de Ovalles y Coquimbo que actualmente poseen el 94,34% de la producción de olivo a nivel regional, el que se destina a la agroindustria para la producción de aceite de oliva (Paleo, 2018).

Finalmente, si bien la falta de agua limita la producción de cultivos con alto requerimiento hídrico, como el palto, también abre la posibilidad a la Región de Coquimbo para diversificar su actividad frutícola, con cultivos que requieran menos agua, como el caso del olivo. En este sentido, se espera que la región propicie el cultivo de olivo para permitir su entrada a distintos mercados internacionales.

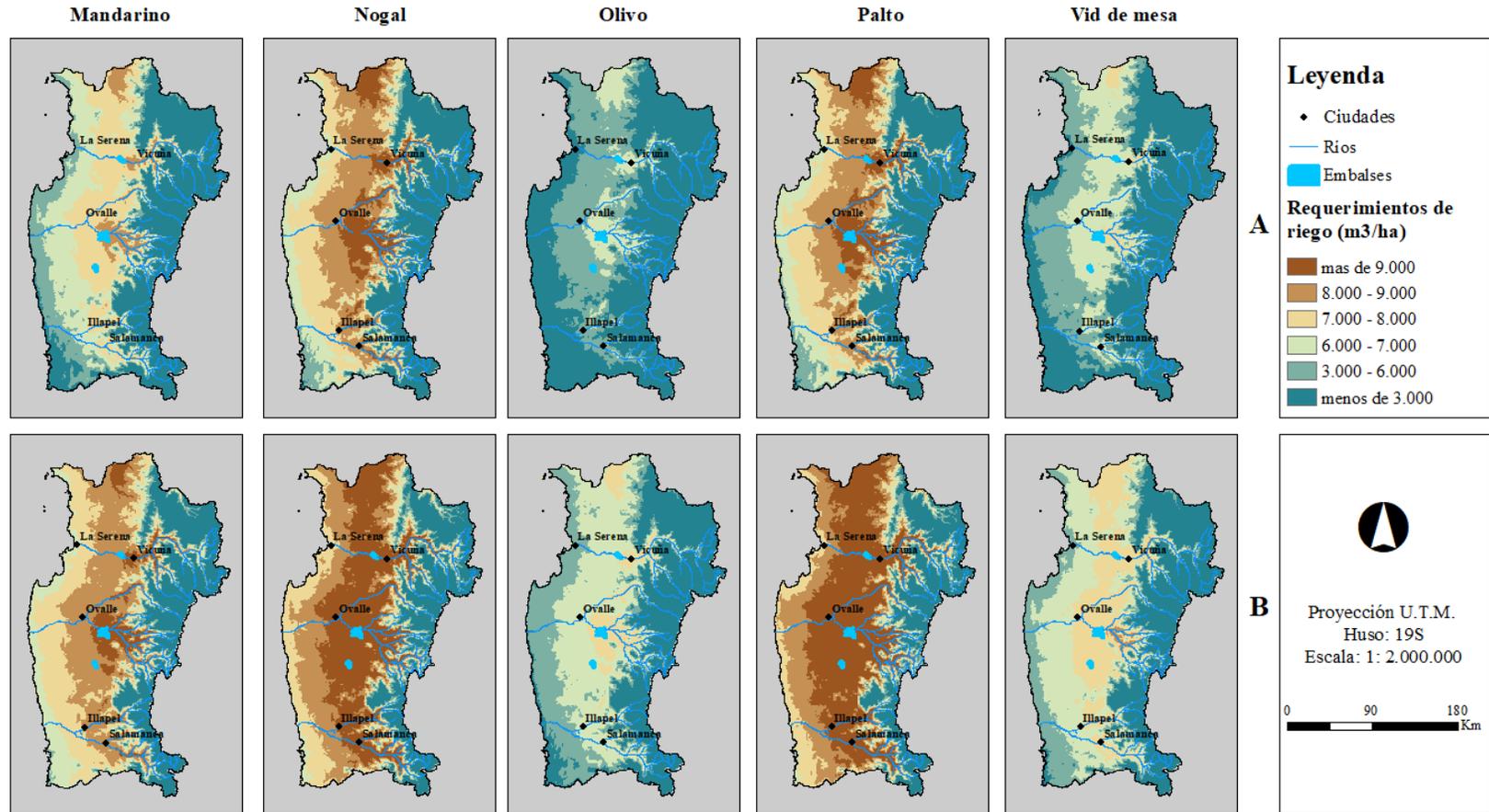


Figura 4. Mapa de aptitud hídrica para los cultivos de mandarino, nogal, olivo, palto y vid de mesa en un período actual y período 2046 – 2065 escenario RCP8.5 en las comunas de la Región de Coquimbo, Chile. A: período actual, B: Período 2046 – 2065 escenario RCP8.5

Cuadro 10. Superficie en hectáreas en las categorías de restricción para el cultivo de nogal y palto al período 2046 – 2065 escenario RCP8.5 y valor final del indicador de aptitud hídrica en las comunas de la Región de Coquimbo, Chile.

Comunas	Palto					Olivo					ATC	Valor indicador
	NA	RA	RM	RL	SR	NA	RA	RM	RL	SR		
Canela	0,00	164.676,31	35.397,28	17.667,65	0,00	0,00	0,00	0,00	68.690,66	149.050,58	217.711,33	0,47
Illapel	2.420,75	182.902,56	1.949,04	146,08	0,00	2.420,75	0,00	0,00	128.042,52	56.955,10	187.418,42	0,63
Los Vilos	562,01	78.241,64	51.919,70	50.604,56	72,75	562,01	0,00	0,00	6.552,35	174.286,50	181.400,66	0,31
Salamanca	10.036,47	148.367,60	5.486,35	1.639,57	0,00	10.036,47	0,00	0,00	107.646,41	47.847,19	165.529,98	0,62
Andacollo	0,00	51.301,81	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	50.085,56	1.216,24	51.301,81	0,68
Coquimbo	48,37	90.520,94	36.196,65	13.839,12	0,00	48,37	0,00	0,00	30.613,22	109.943,49	140.605,09	0,40
La Higuera	12.724,04	285.058,92	17.124,88	1.778,42	0,00	12.724,04	0,00	0,00	234.165,90	69.796,09	316.686,27	0,62
La Serena	568,52	172.432,98	11.334,59	4.014,29	0,00	568,52	0,00	0,00	137.504,86	50.277,00	18.8350,38	0,60
Paihuano	6.861,63	18.231,37	0,00	0,00	0,00	6.861,63	0,00	1.020,90	16.077,59	1.132,86	25.093,00	0,71
Vicuña	22.159,30	213.631,37	223,01	0,00	0,00	22.159,30	0,00	4.551,82	199.334,58	9.967,96	236.013,67	0,70
Combarbalá	6.517,24	165.824,12	220,15	0,00	0,00	6.517,24	0,00	0,00	156.452,64	9.591,63	172.561,51	0,69
Monte Patria	36.066,13	187.381,79	0,00	0,00	0,00	36.066,13	0,00	24.388,87	158.143,12	4.849,76	223.447,92	0,75
Punitaqui	0,00	109.012,70	147,18	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	80.281,95	28.877,94	109.159,89	0,63
Ovalle	0,00	295.057,13	42.116,96	14.512,61	0,00	0,00	0,00	0,00	165.958,50	185.728,15	350.582,31	0,53
Río Hurtado	7.009,96	113.031,65	0,00	0,00	0,00	7.009,96	0,00	0,00	108.356,34	4.675,28	120.041,61	0,69

NA: No agrícola (sobre 2.000 msnm); RA: Restricción alta (sobre 8.000 m³ha⁻¹); RM: Restricción moderada (7.500 – 8.000 m³ha⁻¹); RL: Restricción leve (7.000 – 7.500 m³ha⁻¹); SR: Sin restricción (0 – 7.000 m³ha⁻¹); ATC: Área total comunal en superficie agrícola.

3. Indicador de Ruralidad

En 2002, un total de 132.288 personas vivía en áreas rurales lo que equivale a un 21,90% de la población total de la región. Al 2018, si bien la población rural se incrementó a 142.470 personas, la proporción frente a la población urbana descendió a un 18,81% (INE, 2019).

Al desagregar los datos a nivel comunal, se observó que las comunas de Paihuano y Río Hurtado fueron totalmente rurales, por ende, obtuvieron valor 1 en el indicador de ruralidad (Cuadro 11). Las comunas rurales de la Región de Coquimbo se caracterizan por tener una actividad económica agrícola basada en la explotación de pequeños huertos familiares y la preponderancia de empleo relacionado a la fruticultura (Castillo y Varas, 2013). En las comunas de Paihuano y Río Hurtado predominan en número las explotaciones frutícolas pequeñas, con un total de 347 (359,03 ha) y 99 (131,17 ha) explotaciones menores a 5 hectáreas, respectivamente.

Cuadro 11. Población total urbana, población total rural y valor final del indicador de ruralidad en las comunas de la región de Coquimbo, Chile.

<i>Comuna</i>	<i>Población Urbana</i>	<i>Población Rural</i>	<i>Población Total</i>	<i>Valor indicador</i>
Canela	1.960	7.133	9.093	0,78
Illapel	21.052	9.796	30.848	0,32
Los Vilos	17.094	4.288	21.382	0,20
Salamanca	16.803	12.544	29.347	0,43
Andacollo	10.008	1.036	11.044	0,09
Coquimbo	214.550	13.180	227.730	0,06
La Higuera	1.293	2.948	4.241	0,70
La Serena	200.640	20.414	221.054	0,09
Paihuano	0	4.497	4.497	1,00
Vicuña	16.993	10.778	27.771	0,39
Combarbalá	5.998	7.324	13.322	0,55
Monte Patria	15.338	15.413	30.751	0,50
Ovalle	87.539	23.733	111.272	0,21
Punitaqui	5.848	5.108	10.956	0,47
Río Hurtado	0	4.278	4.278	1,00

En estas comunas los agricultores han aprovechado su cercanía al Río Claro en Paihuano y al Río Hurtado en Río Hurtado, para la producción principalmente de frutales. Al hacer la relación entre el indicador de área cultivada y el indicador de ruralidad, se observó que las comunas de Paihuano y Río Hurtado presentaron los valores más altos del indicador de área cultivada, con valores de 0,99 y 0,97, respectivamente, lo que dio cuenta de la poca diversidad de su fruticultura y la alta dependencia económica respecto a los cultivos de

mandarino, nogal, palto y vid de mesa, los cuales se destinan principalmente al mercado interno (cuadros 6 y 11).

Por el contrario, las comunas de la región con valor 0 en el indicador de ruralidad, fueron las comunas de La Serena, Coquimbo y Andacollo, pertenecientes a la provincia de Elqui, las cuales son totalmente urbanas (Cuadro 11; INE, 2018). El alto grado de urbanismo en la provincia de Elqui, se debe a que la distribución de la población urbana en el territorio se concentra principalmente en torno a la capital regional de La Serena y al puerto de Coquimbo, mientras que la población rural aumenta en zonas cordilleranas.

Se observó que las comunas de La Serena y Coquimbo obtuvieron los valores más bajos del indicador de área cultivada, con valores de 0,23 y 0,44, respectivamente, lo que dio cuenta de la alta diversidad de su fruticultura y la baja dependencia económica que tiene la fruticultura en estas comunas, respecto a los cultivos priorizados en el estudio (Cuadro 6; Cuadro 11).

La población ubicada en focos urbanos tiene la posibilidad de ampliar sus actividades económicas a otros rubros agrícolas, como también, minería, turismo, construcción y pesca. Lo que podría explicar la ausencia de producción frutícola en la comuna de Andacollo, donde actualmente predomina la producción silvícola, ganadería, pesca y minería (BCN, 2017).

Finalmente, si bien en las comunas rurales ha aumentado la cobertura de servicios, infraestructura, conectividad y acceso a tecnologías que les ha permitido desarrollar fruticultura (Pezo, 2007), aún existe, el desafío de realizar inversiones y mejoras en infraestructura para riego, además, de fortalecer instituciones que proporcionen nuevas oportunidades económicas para expandir y diversificar su fruticultura comunal (OCDE, 2016).

4. Superficie Erosionada

El indicador de superficie erosionada mostró que todas las comunas de la Región de Coquimbo obtuvieran altos niveles de erosión, ya que, la región posee la mayor cantidad de suelos erosionados del país, con un 83,32% de la superficie regional erosionada. Además, posee la mayor superficie con riesgo de desertificación grave del país, equivalente a 2.243.834 hectáreas (Cuadro 12; CIREN, 2013; CONAF, 2016).

En general, las comunas costeras de la Región de Coquimbo, a excepción de las comunas de Ovalle y Coquimbo, presentaron mayor cantidad de erosión dentro de la región que las comunas de interior y cordilleranas. Si bien, las causas de la erosión son variadas, se cree que el desarrollo creciente de nuevas actividades industriales, turísticas y minería en los espacios

costeros elevan la presión en los suelos, aumentando los niveles de erosión (Cuadro 12; Castro y Morales, 2016).

Cuadro 12. Superficie comunal erosionada (ha) y valor final del indicador de superficie erosionada en las comunas de la región de Coquimbo, Chile.

<i>Comuna</i>	<i>Superficie con erosión (ha)</i>	<i>Superficie total (ha)</i>	<i>Valor indicador</i>
Canela	205.691	219.481	0,94
Illapel	226.892	262.924	0,86
Los Vilos	171.699	185.944	0,92
Salamanca	264.568	344.947	0,77
Andacollo	47.854	51.544	0,93
Coquimbo	115.592	142.509	0,81
La Higuera	392.296	414.673	0,95
La Serena	172.260	190.176	0,91
Paihuano	100.855	149.552	0,67
Vicuña	581.316	759.678	0,77
Combarbalá	208.519	229.679	0,91
Monte Patria	336.351	420.779	0,8
Ovalle	292.725	355.206	0,82
Punitaqui	101.561	108.897	0,93
Río Hurtado	186.386	220.514	0,85

Las comunas costeras de La Higuera y Canela obtuvieron los valores más altos en el indicador de área erosionada, con un 0,95 y 0,94 respectivamente, implicando que casi el 100% de su superficie regional posee algún grado de erosión (Cuadro 12). La Higuera evidenció una situación compleja, con 185.738 hectáreas en categoría de “erosión muy severa” y 112.605 hectáreas en categoría de “erosión severa”, lo que equivale al 76,05% de la superficie comunal erosionada. Por su parte, Canela presentó 12.554 hectáreas en categoría de “erosión muy severa” y 69.326 hectáreas en categoría de “erosión severa”, equivalentes al 39,81% de la superficie comunal erosionada (CIREN, 2013).

Por el contrario, se observó que las comunas de Illapel, Salamanca, Coquimbo, Paihuano, Vicuña, Combarbalá, Monte Patria y Ovalle, presentaron los menores valores en el indicador de erosión y la mayor cantidad de hectáreas plantadas con frutales (Cuadro 7; Cuadro 12). La relación entre la agricultura y la erosión recae en que las malas prácticas intensivas de manejo, la utilización excesiva de tecnologías inadecuadas y los riegos poco tecnificados aumentan los niveles de erosión (CIREN, 2013). En el caso de las comunas mencionadas, se observó que el uso de riego tecnificado y al acceso a tecnologías que fomentan su producción frutícola les ha ayudado a disminuir la erosión, sin embargo, en casos de escasez de agua se corre el riesgo de aumentar más rápido el riesgo de desertificación.

Finalmente, en este estudio se analizó de forma muy general la erosión en la región, sin embargo, se cree que dadas las condiciones geomorfológicas y la alta variabilidad topográfica de la Región de Coquimbo, surge la necesidad de realizar análisis locales que implican adaptar y complejizar el análisis, considerando otros factores como el tipo de suelo, la consolidación de los materiales superficiales y el tipo de manejo del suelo que permitan tener una mirada más detallada del fenómeno de erosión (Meza y Castro, 2013).

5. Estado de los Cuerpos de Agua Superficial y Subterránea

El indicador de estado de los cuerpos de agua superficial y subterránea mostró que en la Región de Coquimbo 12 comunas presentaron valor 1, ya que poseen al menos un cuerpo de agua superficial en categoría de “agotado”. En tanto, las comunas de Los Vilos, Coquimbo y la Higuera obtuvieron valor 0,5 en el indicador, dado que presentaron solo acuíferos en categoría de “restricción” (Cuadro 13; Apéndice 11).

Cuadro 13. Valor final del indicador estado de los cuerpos de agua superficial y acuíferos en las comunas de la Región de Coquimbo, Chile.

<i>Comuna</i>	<i>Valor indicador</i>
Canela	1,00
Illapel	1,00
Los Vilos	0,50
Salamanca	1,00
Andacollo	1,00
Coquimbo	0,50
La Higuera	0,50
La Serena	1,00
Paiguano	1,00
Vicuña	1,00
Combarbalá	1,00
Monte Patria	1,00
Ovalle	1,00
Punitaqui	1,00
Río Hurtado	1,00

En la región de Coquimbo las 3 cuencas principales han sido declaradas agotadas: la cuenca del Río Elqui y sus afluentes (9.825 km²), del Río Grande, Río Limarí y sus afluentes (11.696 km²) y del Río Choapa y sus afluentes (7.653 km²), abarcando un área de 29.174 km² en total, correspondiendo al 71,89% del área total de la región y 32,62% del área nacional con

declaración de agotamiento (DGA, 2016; DGA, 2019b). Debido a que los derechos de aprovechamiento de aguas superficiales se encuentran agotados, se ha incrementado la demanda por derechos de aprovechamiento del agua subterránea (Arumí y Oyarzún, 2016).

En los cuerpos de aguas subterráneas con declaración de área de restricción para la extracción, según el Atlas del Agua realizado por DGA (2016), entre los años 1997 al 2015, para la Región de Coquimbo se han dictado 31 declaraciones de áreas de restricción para la extracción (DGA, 2019b).

La situación se agrava debido a que los acuíferos aun disminuido su recarga en más de un 80%, eso significa, que las extracciones son mayores que la recarga. Además, a pesar de que la Región de Coquimbo ha contado con años lluviosos, las precipitaciones se transforman en un gran aporte de agua para embalses, pero no son suficientes para recargar los acuíferos (DGA, 2019b).

Miranda (2018) planteó que en zonas de suelos erosionados disminuiría la recarga de acuíferos, lo que puede agravarse con menores precipitación. Esto podría explicar, entre otros factores, que los altos niveles de erosión, la disminución de las precipitaciones y la presión de las actividades productivas sobre los acuíferos influyan fuertemente en su agotamiento.

6. Proyección potencial de sequía (2046 – 2065)

Se observó mediante el SPI que actualmente la Región de Coquimbo atraviesa por un marcado déficit hídrico y se espera que los impactos del cambio climático se hagan aún más intensos al año 2050, disminuyendo las precipitaciones e intensificando los eventos climáticos extremos (Aldunce *et al.*, 2014). En los resultados del indicador de estimación potencial período 2046 – 2065 se mostró que todas las comunas de la región de Coquimbo incrementarán sus años con déficit de precipitación respecto al período actual. Las comunas más afectadas por períodos “secos” son las comunas costeras de Coquimbo, La Higuera, La Serena y Ovalle y la comuna interior de Andacollo. Por su parte, las comunas costeras de Monte Patria y Punitaqui se espera que atreviesen períodos “muy secos”. Todas estas comunas obtuvieron valor 1 en el indicador, volviéndolas más vulnerables al cambio climático (Cuadro 14).

Cuadro 14. Número de años en categorías de sequía escenario RCP8.5 período 2046 – 2065 y valor final del indicador proyección potencial de sequía.

<i>Comuna</i>	<i>Moderadamente seco</i>	<i>Seco</i>	<i>Muy Seco</i>	<i>Extremadamente seco</i>	<i>Cantidad de años con sequía</i>	<i>Valor indicador</i>
Canela	3	5	10	1	19	0,95
Illapel	2	6	6	6	20	1,00
Los Vilos	2	4	6	7	19	0,95
Salamanca	2	7	5	5	19	0,95
Andacollo	5	15	0	0	20	1,00
Coquimbo	5	15	0	0	20	1,00
La Higuera	6	14	0	0	20	1,00
La Serena	5	15	0	0	20	1,00
Paihuano	4	13	2	0	19	0,95
Vicuña	3	17	0	0	20	1,00
Combarbalá	2	5	7	6	20	1,00
Monte Patria	2	3	9	6	20	1,00
Punitaqui	3	5	12	0	20	1,00
Ovalle	3	7	10	0	20	1,00
Río Hurtado	3	9	8	0	20	1,00

Se espera que las comunas de la Región de Coquimbo planifiquen sus cultivos con falta de precipitación y que además diversifiquen su fruticultura con especies y variedades que requieran baja cantidad de agua para su producción. Especialmente, las comunas de Ovalle, Monte Patria, Vicuña, Illapel, Salamanca y Coquimbo que sostienen el 86,06% de la fruticultura regional y se proyecta una disminución superior al 50% de precipitación respecto a la línea base.

ONU (2012) determinó, en la región de Coquimbo, que para un escenario A2 de cambio climático en el período 2040 – 2069 una disminución de entre 30% y 40%. Ponce (2019) estimó una disminución de precipitaciones del 25% al año 2050 y Araya (2018) planteó una disminución de entre un 40% y 100% desde la zona norte a la zona sur, bajo el escenario RCP8.5 para el período 2081-2100.

Todos los estudios apuntan a una disminución de la precipitación para estaciones futuras, sin embargo, hoy en día existe poca concordancia entre los porcentajes de variación de precipitación entre los autores. Esto puede deberse a las diferentes metodologías utilizadas para estimar precipitaciones en escenarios futuros, a la representatividad de la red de estaciones que se utilizan para el estudio, que en muchas ocasiones son escasas, y a que se utilizan distintos escenarios de cambio climático para el modelamiento de los datos (Lefort, 2014).

Vulnerabilidad del componente Sensibilidad

En general todas las comunas de la Región de Coquimbo presentaron altos niveles de erosión, cuerpos de agua superficial en categoría de agotado, cuerpos superficiales con restricción de extracción y porcentajes superiores a 40% con déficit de precipitación respecto a la línea base, lo que aumentó la vulnerabilidad del componente sensibilidad.

Las comunas costeras de Coquimbo y Los Vilos presentaron restricción leve en la aptitud térmica e hídrica para los cultivos priorizados en el estudio, bajos niveles de ruralidad y ningún cuerpo de agua en categoría de “agotado”, por ende, fueron menos sensibles a los efectos adversos del Cambio Climático, con nivel “Medio” de vulnerabilidad (Figura 5).

Por el contrario, la comuna cordillerana de Río Hurtado presentó restricción alta en la aptitud térmica e hídrica y población 100% rural, por ende, fue la comuna más sensible a los efectos adversos del cambio climático, con nivel “Muy alto” de vulnerabilidad (Figura 5).

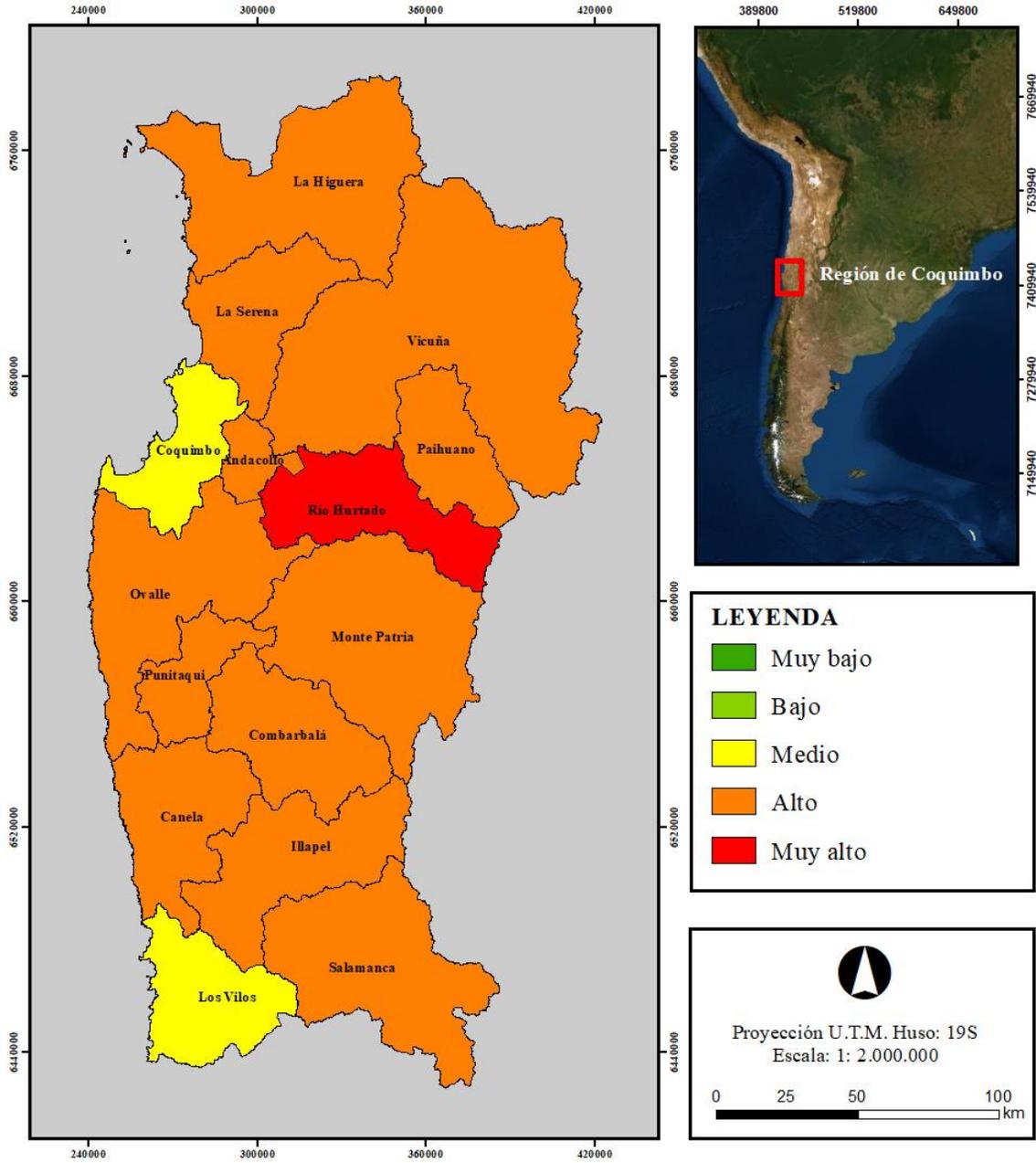


Figura 5. Vulnerabilidad al cambio climático del componente sensibilidad en las comunas de la Región de Coquimbo, Chile.

Componente Capacidad Adaptativa

1. Pertenencia a la REDMUNICC

Los resultados del indicador mostraron que todas las comunas, a excepción de Río Hurtado, obtuvieron valor 1, esto porque no forman parte de la REDMUNICC. Al año 2019, 59 municipios eran miembros de la REDMUNICC, y sólo Río Hurtado y Salamanca en la región de Coquimbo. La comuna de Salamanca a pesar de ser miembro de la red desde febrero del año 2018 no cuenta con medidas de mitigación y adaptación al cambio climático a la fecha, por ende, se optó por asignarle valor 1 en este indicador.

De acuerdo con la información presentada por REDMUNICC (2019), la comuna de Río Hurtado ha abordado 4 de las 9 áreas temáticas de la red, con diferentes acciones climáticas desarrolladas. En agua, se llevó a cabo la ‘oficina del agua’ relacionada con temas de eficiencia hídrica y agua potable rural, proyectos de riego con financiamiento INDAP y entrega de agua potable por medio de camión aljibe en sectores de secano. En energía, se encuentra el uso de sistemas de energías renovables no convencionales para impulsión de agua en sistemas de riego. En ecosistemas, se entregan especies nativas (carbonillo) para reforestación de diversas zonas de la comuna y se capacita a los pequeños agricultores y campesinos en técnicas de buenas prácticas agrícolas, para que sean implementadas en sus predios. Por último, en salud, se destaca el control y mitigación de vectores de enfermedades. Además, cuenta con reglamentos y ordenanzas sobre ruidos molestos y planes o estrategias sobre desarrollo comunal, ordenamiento territorial, transporte e infraestructura (REDMUNICC, 2018).

Se estima que las acciones que ha llevado a cabo el municipio de Río Hurtado aparte de mitigar los efectos del cambio climático potencian la actividad frutícola de la comuna, ya que aumentó en un 3,18% su superficie frutícola respecto al año 2015. Esto debido principalmente a los proyectos de riego, el uso de energías renovables no convencionales para riego y las capacitaciones a pequeños agricultores en técnicas para las buenas prácticas agrícolas.

Investigaciones ligadas al rubro de la agricultura, en Colombia (CDKN, 2013) y México (Monterroso *et al.*, 2012) también han utilizado indicadores que daban cuenta del fortalecimiento de la institucionalidad ambiental local, pero éstos, son basados principalmente en ingresos. Sin embargo, para efectos de este estudio se optó por no utilizar ingresos debido a que es un dato inexistente y pudiese no ser representativo de la capacidad adaptativa de un municipio. Por ello, el indicador REDMUNICC dio cuenta de acciones concretas que poseen los municipios para mitigar los efectos del cambio climático. Se espera,

que, en trabajos futuros, se incluyan indicadores que den cuenta de la pertenencia a otras instituciones y/o organizaciones orientadas a la mitigación del cambio climático.

2. Existencia de infraestructura para riego

Los resultados del indicador existencia de infraestructura para riego mostraron que las comunas de Coquimbo, Andacollo, La Higuera, Paihuano y Punitaqui no presentaron obras de riego en su superficie comunal, ni aguas arriba de sus cuencas, por ende, se les asignó un nivel de vulnerabilidad “muy alto”.

Las comunas Canela, Andacollo, La Higuera y Punitaqui se encontraron entre las comunas con menos hectáreas plantadas con frutales (Cuadro 7, ODEPA y CIREN, 2018), y coincidió con que las comunas presentaran valor 1 en el indicador existencia de infraestructura para riego (Cuadro 15). Sin embargo, el desarrollo de obras de infiltración, tecnificación del riego y sistemas de conducción y distribución entubados y/o cementados para evitar pérdidas les ayuda de igual forma a llevar a cabo actividad frutícola comunal (Wainer y Jimenez, 2017).

Cuadro 15. Valor para el indicador Existencia de infraestructura para riego en las comunas de la región de Coquimbo

<i>Comuna</i>	<i>Valor indicador</i>
Canela	0,00
Illapel	1,00
Los Vilos	1,00
Salamanca	1,00
Andacollo	1,00
Coquimbo	0,00
La Higuera	0,00
La Serena	0,00
Paihuano	0,00
Vicuña	0,00
Combarbalá	0,00
Monte Patria	0,00
Ovalle	0,00
Punitaqui	1,00
Río Hurtado	0,00

Los embalses surgen como un modo de abastecer y dar satisfacción a las demandas de agua, en un sistema económico-social que necesita el agua como factor determinante de producción y sostenimiento de la actividad humana (Adler, 2006). La Región de Coquimbo cuenta con los mayores volúmenes de embalses en el país (CChC, 2018). Los embalses más importantes

de la región, para la cuenca del río Elqui, son los embalses de La Laguna (40 Hm³) y Puclaro (200 Hm³); la cuenca del río Limarí, con el embalse Cogotí (150 Hm³), La Paloma (750 Hm³) y Recoleta (100 Hm³); y en el río Choapa, con el embalse Corrales (50Hm³). Estos embalses permiten abastecer un aproximado de 110.000 hectáreas de regadío (CChC, 2018).

En el caso de Ovalle se observó que es la comuna que presenta la mayor seguridad de riego, por presentar 6 embalses para riego, además coincide con ser la comuna de la región con mayor superficie plantada con frutales (Cuadro 7; ODEPA y CIREN, 2018). La principal obra de riego en la comuna es el embalse Recoleta (CChC, 2018), que se ubica a 15 km aguas arriba de la localidad de Ovalle, en la cuenca del río Hurtado (CChC, 2018). Los embalses de Ovalle han beneficiado a la zona, aportando diferencias significativas al desarrollo agrícola de este territorio, especialmente en cuanto a seguridad de riego, a pesar de la condición de sequía, lo que ha permitido la producción de mandarino, nogal y palto, cultivos que presentan la mayor demanda hídrica para riego (Figura 4).

La comuna Monte Patria es la segunda comuna de la región con mayor superficie dedicada a cultivos frutales y presentó la mayor cantidad de hectáreas en los cultivos mandarino y vid de mesa (Cuadro 7, ODEPA y CIREN, 2018). En Monte Patria se encuentra ubicado el embalse La Paloma, el que corresponde al embalse de riego más grande de Chile y el segundo más grande en Sudamérica y le ha permitido a Monte Patria poseer un desarrollo de cultivos rentables y exigentes, gracias a la buena disponibilidad de agua y seguridad de riego existente en la comuna (PAC consultores, 2012).

3. Eficiencia de sistemas de riego

La región de Coquimbo presentó un 98% de su superficie regada con alta tecnificación del riego (riego por goteo, por aspersión y microaspersión) para los cultivos de mandarino, nogal, olivo, palto y vid de mesa. Las comunas de Coquimbo, La Serena, Paihuano, Vicuña, Ovalle, Monte Patria y Combarbalá obtuvieron prácticamente el 100% de su superficie regada para los cultivos priorizados en el estudio, con riego por goteo (el más eficiente), lo que les otorgó valores cercanos a 0 en el indicador. El hecho de contar con sistemas de riegos tecnificados, a pesar de la condición de sequía, les entrega a las comunas la capacidad de hacer un uso eficiente del agua, como también, disminuir los niveles de erosión del suelo (Cuadro 16).

Por el contrario, las comunas de Salamanca y La Higuera obtuvieron valores 0,19 y 0,27 respectivamente, ya que solo una fracción de su superficie total no es regada por sistemas eficientes (Cuadro 16). Desde el punto de vista del indicador, se observó que las comunas tienen buenos sistemas de riego y que han tomado las medidas necesarias para el desarrollo de la fruticultura.

Cuadro 16. Valor final del indicador de eficiencia de sistemas de riego en las comunas de la Región de Coquimbo, Chile.

<i>Comuna</i>	<i>Valor indicador</i>
Canela	0,09
Illapel	0,06
Los Vilos	0,11
Salamanca	0,19
Andacollo	0,00
Coquimbo	0,00
La Higuera	0,27
La Serena	0,00
Paihuano	0,00
Vicuña	0,00
Combarbalá	0,02
Monte Patria	0,01
Ovalle	0,01
Punitaqui	0,02
Río Hurtado	0,01

Santibáñez *et al.*, (2008) afirmaron que los rubros más tecnificados, son menos vulnerables, ya que están asociados a una población con mayor capital, a pequeños propietarios agrícolas y con existencia de infraestructura de riego. En este sentido se destaca la comuna de Río Hurtado, que, a pesar de ser una comuna rural, tiene prácticamente el 100% de su superficie regada con sistemas tecnificados. El alto porcentaje de riego tecnificado puede deberse, entre otras cosas, a los proyectos de riego con financiamiento INDAP y la capacitación a los pequeños agricultores (que predominan en la comuna) y campesinos en técnicas de buenas prácticas agrícolas.

4. Necesidades Básicas Insatisfechas (NBI)

A partir de los resultados obtenidos por el NBI, se observó que en general, existe un buen cubrimiento de las necesidades básicas para las comunas de la Región de Coquimbo. Las comunas urbanas de Coquimbo y La Serena obtuvieron los valores más bajos en el NBI, dado que al menos el 98% de su población cuenta con sus necesidades básicas cubiertas. Por el contrario, las comunas con predominio de población rural de Punitaqui, Canela, Salamanca, La Higuera y Monte Patria presentaron los valores más altos en el NBI (Cuadro 17).

De los resultados, se desprende que el saneamiento en las viviendas de la Región de Coquimbo fue el factor que hizo aumentar la vulnerabilidad de las necesidades básicas. Por ejemplo, en la comuna de Punitaqui el 23,60% de sus viviendas no posee un sistema de

disponibilidad de agua adecuado: el 13,48% de las comunas posee llave fuera de la vivienda y el 10,12% de las viviendas no tienen sistema de agua. Además, el 28,09% de las viviendas no poseen un sistema de eliminación de excretas adecuado (Cuadro 17)

Cuadro 17. Valor final de los indicadores simples para Necesidades Básicas Insatisfechas y el valor final del indicador NBI en las comunas de la Región de Coquimbo, Chile.

<i>Comuna</i>	<i>AA</i>	<i>SA</i>	<i>HC</i>	<i>CV</i>	<i>EI</i>	<i>Valor indicador</i>	
Canela	0,07	0,22	0,22	0,03	0,08	0,03	0,11
Illapel	0,06	0,03	0,05	0,06	0,06	0,01	0,05
Los Vilos	0,06	0,02	0,05	0,01	0,03	0,04	0,04
Salamanca	0,07	0,12	0,25	0,07	0,07	0,00	0,10
Andacollo	0,04	0,11	0,23	0,01	0,14	0,04	0,10
Coquimbo	0,02	0,02	0,03	0,04	0,02	0,02	0,02
La Higuera	0,09	0,04	0,18	0,11	0,05	0,05	0,09
La Serena	0,03	0,01	0,02	0,04	0,02	0,01	0,02
Paihuano	0,01	0,14	0,03	0,14	0,10	0,00	0,07
Vicuña	0,03	0,19	0,15	0,05	0,09	0,05	0,09
Combarbalá	0,07	0,11	0,09	0,03	0,09	0,02	0,07
Monte Patria	0,07	0,11	0,19	0,07	0,08	0,00	0,09
Ovalle	0,04	0,09	0,08	0,04	0,03	0,03	0,05
Punitaqui	0,09	0,24	0,28	0,10	0,09	0,01	0,14
Rio Hurtado	0,07	0,14	0,11	0,05	0,13	0,00	0,08

AA: Analfabetismo; SA: Saneamiento; HC: Hacinamiento; CV: Calidad de la vivienda; EI: Educación infantil.

Por su parte, en la comuna de Canela el 21,59% de sus viviendas no posee un sistema de disponibilidad de agua adecuado: el 14,77% de las comunas posee llave fuera de la vivienda y el 6,28% de las viviendas no tienen sistema de agua, lo acarrear. Además, el 21,59% de las viviendas no poseen un sistema de eliminación de excretas adecuado (CASEN, 2017).

A partir del aumento de los eventos meteorológicos extremos producto del cambio climático, se espera que tanto el deterioro como escasez del agua para consumo humano, aumentaría los brotes de enfermedades, en especialmente en condiciones de saneamiento deficientes (Hijar *et al.*, 2016). Por ende, surge la necesidad a los gobiernos comunales de Punitaqui y Canela, de mejorar los servicios básicos de saneamiento de las viviendas, con el fin de mitigar los efectos adversos que el cambio climático puede ocasionarle a sus habitantes y agricultores.

Vulnerabilidad del componente Capacidad Adaptativa

En general todas las comunas de la región de Coquimbo presentaron necesidades básicas satisfechas, altos niveles de tecnificación en los sistemas de riego (a excepción de La Higuera) y la baja participación a la red chilena de municipalidades ante el cambio climático (a excepción de Río Hurtado). El indicador que marcó la diferencia entre los niveles “bajo” y “medio” de vulnerabilidad fue el indicador de existencia de obras de riego. Dicho esto, las comunas La Higuera, Coquimbo, Andacollo, Paihuano y Punitaqui, que no presentaron embalses en su comuna ni aguas arriba (a excepción de Río Hurtado) obtuvieron nivel “medio” de vulnerabilidad (Figura 6).

Por el contrario, las comunas La Serena, Ovalle, Canela, Los Vilos, Vicuña, Monte Patria, Combarbalá, Illapel, Río Hurtado y Salamanca que presentan embalses en su comuna y/o aguas arriba obtuvieron nivel “bajo” de vulnerabilidad para el componente de capacidad adaptativa (Figura 6).

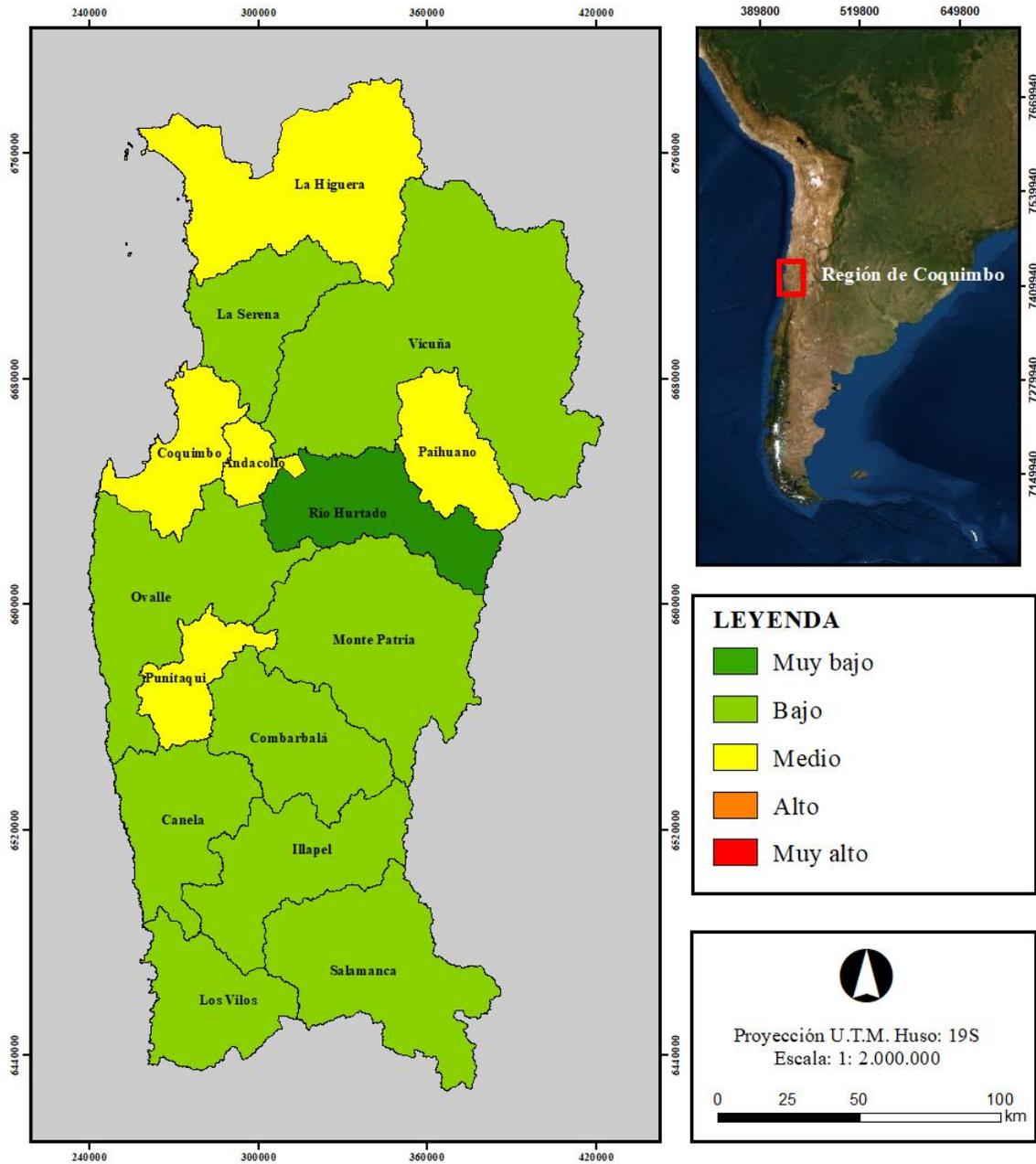


Figura 6. Vulnerabilidad al cambio climático del componente capacidad adaptativa en las comunas de la Región de Coquimbo, Chile.

Determinación del Índice de vulnerabilidad del sector frutícola al cambio climático

En consecuencia, de todos los factores evaluados, se observó que la comuna costera de La Serena presentó la menor vulnerabilidad de la región con nivel “medio” de vulnerabilidad del sector frutícola frente al cambio climático, con valor 0,42 en el índice de vulnerabilidad. Esto dado que posee alta diversificación de sus cultivos frutícolas, baja o nula presencia de heladas y alta tecnificación en sus sistemas de riego. Por su parte, las comunas de Coquimbo, Andacollo, Ovalle, Punitaqui, Canela, Los Vilos, Vicuña, Monte Patria, Río Hurtado y Combarbalá, Monte Patria e Illapel presentaron nivel “medio” de vulnerabilidad. Finalmente, solo las comunas cordilleranas de Paihuano y La Higuera presentaron nivel “alto” en el índice de vulnerabilidad, con valores 0,71 y 0,64, respectivamente en el índice de vulnerabilidad del sector frutícola al cambio climático (Cuadro 18; Figura 7).

Dentro del componente exposición, se observó que un aspecto determinante en la vulnerabilidad del sector frutícola fue el indicador de área cultivada, el cual dejó en evidencia la poca diversidad de los cultivos frutícolas y la alta dependencia económica de la fruticultura en las comunas de Río Hurtado e Illapel.

Para el componente sensibilidad, la ruralidad es un aspecto determinante en el aumento de la vulnerabilidad. Coincidentemente las comunas rurales de Río Hurtado y Paihuano presentan la mayor sensibilidad al cambio climático. A lo anterior, se suman los altos niveles de erosión comunal, agotamiento de cuerpos de agua superficial y un déficit hídrico que va en aumento. En este aspecto, se espera que los gobiernos locales apliquen sus esfuerzos para brindar una sustentabilidad ambiental, económica y social a la fruticultura que se realiza en esas comunas, considerando el cambio climático en la toma de decisiones. Se hace necesaria la creación y/o fortalecimiento de políticas regionales, como también, fondos y programas orientados al uso de energías renovables en la producción y asesoría técnica a pequeños agricultores.

En la capacidad adaptativa, a partir de los resultados de esta investigación, cada comuna podrá detectar sus principales vulnerabilidades frente al cambio climático y tomar acciones correctivas que incrementen su capacidad de adaptación. En esa línea, el apoyo que puede dar la REDMUNCC está asociado a establecer medidas que propicien la inversión en infraestructura de agua potable rural, una mejora en la fiscalización y seguimiento de las extracciones del recurso hídrico, mejoras y aumento del revestimiento de canales de regadío y fortalecimiento de la gobernanza. Sin embargo, las medidas de adaptación propuestas en esta investigación tienen que ser bastante flexibles y estar dispuestas a cambios inesperados, que no fueron integrados en el índice. Por esta razón, los resultados y las recomendaciones asociadas tienen que ser consideradas como un posible camino hacia la disminución de la vulnerabilidad, pero no el único.

Finalmente, el índice de vulnerabilidad dio cuenta de la multidimensionalidad y complejidad de la vulnerabilidad, ya que, su aplicación proporcionó una mirada general de los componentes que determinan la vulnerabilidad (exposición, sensibilidad y capacidad adaptativa), como también, información específica a través de indicadores, lo que permitió establecer la condición y la participación de cada uno de ellos en la vulnerabilidad de las comunas de la región de Coquimbo. Además, se transformó en una herramienta que permite adelantarse a los efectos adversos del cambio climático y pretende ser un aporte a los tomadores de decisiones para priorizar las acciones que reduzcan la vulnerabilidad en los sistemas frutícolas y en los grupos humanos que en ellos habitan y/o dependen de ellos para su subsistencia.

Cuadro 18. Valor final por componente (exposición, sensibilidad y capacidad adaptativa) y vulnerabilidad del sector frutícola al cambio climático en las comunas de la Región de Coquimbo, Chile.

<i>Comuna</i>	<i>Promedio</i>			<i>VU</i>
	<i>EX</i>	<i>SE</i>	<i>CA</i>	
Canela	0,54	0,78	0,70	0,54
Illapel	0,67	0,72	0,72	0,56
Los Vilos	0,51	0,55	0,71	0,45
Salamanca	0,69	0,71	0,68	0,57
Andacollo	0,22	0,72	0,48	0,49
Coquimbo	0,35	0,56	0,49	0,47
La Higuera	0,60	0,72	0,41	0,64
La Serena	0,31	0,69	0,74	0,42
Paihuano	0,80	0,80	0,48	0,71
Vicuña	0,76	0,73	0,73	0,59
Combarbalá	0,68	0,78	0,73	0,58
Monte Patria	0,74	0,76	0,73	0,59
Ovalle	0,49	0,69	0,74	0,48
Punitaqui	0,49	0,77	0,46	0,60
Rio Hurtado	0,71	0,84	0,98	0,52

EX: Exposición; SE: Sensibilidad; CA: Capacidad Adaptativa; VU: Vulnerabilidad del sector frutícola al cambio climático.

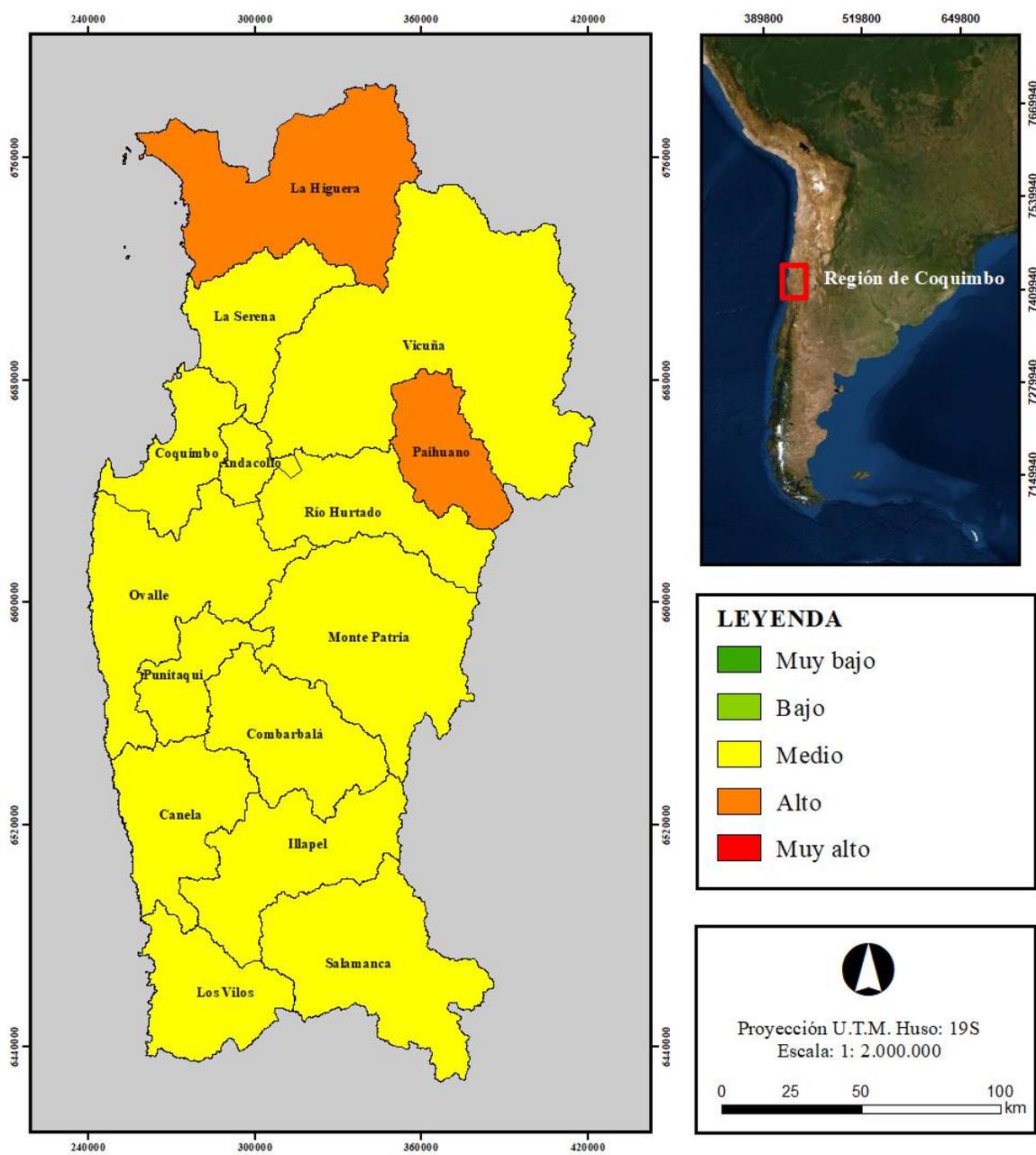


Figura 7. Vulnerabilidad final al cambio climático en las comunas de la Región de Coquimbo, Chile.

CONCLUSIÓN

Los resultados indicaron que, las comunas cordilleranas y del interior, se presentaron, en general, más expuestas y sensibles al cambio climático, debido a la baja diversificación de sus cultivos frutícolas, la mayor susceptibilidad a sufrir pérdidas por heladas y el alto déficit de precipitación y/o predominio de población rural. Por el contrario, las comunas costeras de la región presentaron una menor vulnerabilidad debido a que presentaron, en términos generales, baja incidencia de heladas, menores requerimientos de agua para riego y/o baja o nula población rural.

La comuna cordillerana de Paihuano presentó la mayor vulnerabilidad del sector frutícola al cambio climático de la Región de Coquimbo, con valor índice de 0,71. Su principal factor de exposición fue la alta probabilidad de heladas y el marcado déficit de precipitación. La sensibilidad también fue alta, debido al agotamiento de cuerpos de agua superficial, el déficit hídrico proyectado para el período 2046 – 2065 bajo el escenario RCP8.5, así como los altos grados de erosión. Mientras, la adaptación, fue media, debido a que, no pertenece a la REDMUNICC.

La comuna costera de La Serena, que presentó la menor vulnerabilidad del sector frutícola al cambio climático de la Región de Coquimbo, con valor índice de 0,42. El componente exposición fue bajo, debido a la escasa probabilidad de heladas y la alta diversificación de su actividad frutícola; no obstante, si se encontró expuesta a déficit hídrico. La sensibilidad fue media por la ausencia de población rural, pero si fue sensible a la erosión y al déficit de precipitación proyectado para el período 2046 – 2065 bajo el escenario RCP8.5. En términos de adaptación, destacó el uso de riego tecnificado, sin embargo, no contó con embalses para riego y tampoco está suscrita a la REDMUNICC.

La mayor vulnerabilidad se encontró ligada, al componente sensibilidad, debido a que la región proyecta disminución de precipitación y aumento de la temperatura. No obstante, la mayor ventaja a nivel regional tiene relación con la eficiencia en los sistemas de riego, dado que la Región de Coquimbo cuenta con altos niveles de riego tecnificado para frutales. El desafío de las comunas a nivel regional será mejorar la infraestructura para riego, diversificar la actividad frutícola, la suscripción a la REDMUNICC y la asesoría a pequeños agricultores, reduciendo así el nivel de vulnerabilidad del sector frutícola.

BIBLIOGRAFÍA

- Adato, I. 1988. Influence of daily intermittent drip irrigation on avocado (cv. Fuerte) fruit yield and trunk growth. *Journal of Horticultural Science* 63(4):675-685
- Adler, F. 2006. Los Embalses y los Recursos Hídricos Superficiales. *Revista de Ciencias exactas e Ingeniería* (27): 1-12.
- Aldunce, P.; R. Beilin; J. Handmer y S. Howden. 2014. Framing disaster resilience: The implications of the diverse conceptualisations of ‘bouncing back. *Disaster Prevention and Management* 23(3): 252 – 270.
- Allen, R.; L. Pereira; D. Raes y M. Smith. 1998. Crop evapotranspiration: Guidelines computing crop water requirements. Irrigation and Drainage Paper. FAO. Roma, Italia. 300p.
- Antúnez, A.; D. Mora y S. Felmer. 2010 ene-feb. Eficiencia por sistemas de riego por goteo en el secano. INIA *Tierra Adentro*: 40–43.
- Araya, D. 2018. Aplicación de un método de downscaling estadístico para la generación de escenarios climáticos locales sobre Chile. Memoria Ingeniera en Recursos Naturales Renovables. Santiago, Chile: Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile. 93h.
- Araya, D.; A. Casanueva; C. Román; J.M Uribe y M. Paneque. 2020. Climate change projections of temperature and precipitation in Chile based on statistical downscaling. *Climate Dynamics*.
- Arumí, J. y R., Oyarzún. 2016. Las aguas subterráneas en Chile. *Boletín Geológico y Minero* 117(1): 37-45.
- Bacospé, A. 2013. Cambio climático impacto en la agricultura: heladas y sequía. ODEPA, Ministerio de Agricultura, Gobierno de Chile. Santiago, Chile. 36p.
- BCN (Biblioteca del Congreso Nacional de Chile). 2017. Reportes Estadísticos comunales 2017: Andacollo. [en línea]. Santiago, Chile. Recuperado en: <<http://reportescomunales.bcn.cl/2017/index.php/Andacollo/Econom%C3%ADa>>. Consultado el: 30 de abril de 2020.

Brouwer, C. y M., Heibloem. 1986. Irrigation Water Management: Irrigation Water Needs. (3t), FAO. Roma.

Budds, J. 2012, sep. La demanda, evaluación y asignación del agua en el contexto de escasez: un análisis del ciclo hidrosocial del valle del río La Ligua, Chile. *Revista de Geografía Norte Grande* 52: 167-184.

Cadahia, C. 2005. Cultivos hortícolas, frutales y ornamentales. Mundi-Prensa. 681 p.

CASEN. 2017. [en línea]. Santiago, Chile. Recuperado en: <<http://observatorio.ministeriodesarrollosocial.gob.cl/casenmultidimensional/casen/basedatos.php>>. Consultado el: 1 de mayo de 2019.

Castillo S. y C. Varas. 2013. El trabajo por cuenta propia en la ruralidad de la Región de Coquimbo. *Revista Universitaria Ruta* (1)15: 1-27.

Castro, C. y E. Morales. 2016, jul. La zona costera. Medio natural y ordenación integrada. *Revista de Geografía Norte Grande* 35.

CChC (Cámara Chilena de la Construcción). 2018. Infraestructura crítica para el desarrollo 2018 – 2027. Santiago, Chile. 635p.

CDKN (Alianza, Clima y Desarrollo & Agricultura, Vulnerabilidad y Adaptación). 2013, ago. Análisis interinstitucional y multisectorial de Vulnerabilidad y Adaptación al Cambio Climático para el sector agrícola de la Cuenca del Río Cauca impactando políticas de adaptación. Colombia. 85 p.

CEAZA (Centro de Estudios Avanzados en Zonas Áridas). 2016, jul. Región de Coquimbo. (Bol. Tec), CEAZA MET, Coquimbo, Chile. 19p.

CEAZA (Centro de Estudios Avanzados en Zonas Áridas). Red de estaciones. [en línea]. Santiago, Chile. Recuperado en: <http://www.ceazamet.cl/index.php?pag=mod_estacion&pag2=mod_estacion_descargas&e_cod=PC&p_cod=ceazamet>. Consultado el: 3 de septiembre de 2019.

Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN). 2013, nov. Informe Avance Emergencia Heladas 2013.

Cifuentes, L. y F. Meza. 2008. Cambio climático: consecuencias y desafíos para Chile. Pontificia Universidad Católica de Chile, Centro Interdisciplinario de Cambio Global (CICGUC). Santiago, Chile. 22 p.

CIREN (Centro de Información de Recursos Naturales). 1989. Frutales menores y de hoja persistente. (Pub. 84), CORFO, Ministerio de Agricultura, Gobierno de Chile. Santiago, Chile. 65p.

CIREN (Centro de Información de Recursos Naturales). 2011. Antecedentes de producción frutícola y vitícola de la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins. (Pub. 137), Innova CORFO, Ministerio de Agricultura, Gobierno de Chile. Santiago, Chile. 61p.

CIREN (Centro de Información de Recursos Naturales). 2013. Estado actual de los suelos de la Región de Coquimbo: Uso y Degradación. (Pub. 176). Coquimbo, Chile. 80 p.

CIREN (Centro de Información de Recursos Naturales). 2017. Antecedentes técnicos y económicos para la producción de Olivo en la Región del Maule. (Pub. 173), MINAGRI, Gobierno de Chile. Santiago, Chile. 49p.

CONAF (Corporación Nacional Forestal). 2016, dic. National strategy on climate change and vegetation resources. (Inf. 5). Santiago, Chile. 41p.

CONICYT (Comisión Nacional de Investigación Científica y Tecnológica). 2007, jun. El sector frutícola en Chile: Capacidades de investigación y áreas de desarrollo científico-tecnológico. Gobierno de Chile. 16 p.

Corzo, S. y L. Meza. 2010. Gestión del riesgo de sequía y otros eventos climáticos extremos en Chile. (Inf. Coquimbo), FAO. Santiago, Chile. 140p.

Cowan, A.; S. Moore-Gordon.; I. Berling y B. Wolstenholme. 1997. Metabolic control of avocado fruit growth. *Plant Physiol* 114: 511-518.

CR2 (Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia). 2015. La megasequía 2010-2015: Una lección para el futuro. Universidad de Chile, Universidad de Concepción, Universidad Austral. 28 p.

CR2 (Centro de Ciencias del Clima y la Resiliencia). Explorador climático. [en línea]. Santiago, Chile. Recuperado en: <<http://explorador.cr2.cl/>>. Consultado el: 3 de septiembre de 2019.

Currihuinca, J. 2010. Las heladas desde Copiapó a Puerto Montt: sus efectos en los cultivos y métodos de protección. Dirección Meteorológica de Chile. Santiago, Chile. 220p.

Decreto N° 150. Declaración de escasez a la Región de Coquimbo. Santiago: DGA, 2019. 3p.

DGA (Dirección General de Aguas). 2019b. Restricciones a los Derechos de Agua. MOP, Gobierno de Chile. Santiago, Chile.

DGA (Dirección General de Aguas). 2018. Selección de estaciones y parámetros. [en línea]. Santiago, Chile. Recuperado en: <<http://www.dga.cl/Paginas/estaciones.aspx>>. Consultado el: 3 de septiembre de 2019.

Dirección General de Aguas (DGA). 2016. El agua, un bien escaso. (cap. 3, pp. 90 – 103). En: Atlas del agua – Chile 2016.

DMC (Dirección Meteorológica de Chile). Servicios climáticos. [en línea]. Santiago, Chile. Recuperado en: <<https://climatologia.meteochile.gob.cl/application/productos/recienteEma/330121#descarga>>. Consultado el: 3 de septiembre de 2019.

Elias, Francisco, & F. Castellvi. 1996. Agrometeorología. Edic. Mundi-Prensa y Minist. de Agricultura Pesca y Alimentación. España, 517 pp.

FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). 2018, nov. Retos del Cambio Climático para la Agricultura en América Latina y el Caribe. Cambio Climático, Agricultura y Seguridad Alimentaria. 71 p.

Feres, J.C y X. Mencero. 2001. Enfoques para la medición de pobreza: breve revisión de la literatura. (Inf. 4), CEPAL, ONU. Santiago, Chile. 46p.

Ferreya, R.; G. Seliés; P. Gil y R. Ruiz. 2011. Asfixia radicular en huertos de palto: manejo del riego y suelo. (Bol. 231), INIA, CORFO, Gobierno de Chile. La Cruz, Chile. 54p.

Galleguillos, M.; M. Zambrano; C. Puelma y A. Jopia. 2017. Evaluación espacio-temporal del déficit hídrico para las cuencas de Chile a partir de información satelital. Iniciativa Escenarios Hídricos 2030. Santiago, Chile.

Giraldo, C. 2017. Escenarios de la viticultura chilena generados por los cambios en la aptitud productiva, como consecuencia del cambio climático para mediados del siglo XXI. Memoria Magíster en Gestión y Planificación Ambiental. Santiago, Chile: Facultad de Ciencias Forestales, Universidad de Chile. 215h.

Gómez, J.C. y Morales L. Algunas consideraciones sobre el concepto de Horas-frío y sus métodos de cálculo. 25 p.

Guajardo, D. 2016, may. Heladas tardías provocan la quema de 548 hectáreas de cultivos en la región. *Diario el día*.

Hamada, E. y R. Ghini. 2011. Impactos del cambio climático en plagas y enfermedades de las plantas en Brasil. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 2: 195-205p.

Hargreaves, G.H. y Z.A. Samani. 1982. Estimating potential evapotranspiration. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering. Proceedings of ASCE* 108: 223-230.

Hidalgo, J.; V. Vega y J.C. Hidalgo. 2007. Riego de Olívar en Andalucía: situación actual de la investigación y transparencia. *Agricultura*: 376-382.

Hijar, G.; C. Bonilla; C. Munayco; G. Gutierrez y W. Ramos. 2016, jun. Fenómeno del niño y desastres naturales: intervenciones en la salud pública para la preparación y respuesta. *Revista peruana de medicina experimental y salud pública* 33(2): 305-320.

Ibacache, A. 2008 sep-oct. Cómo influye la temperatura en la época de cosecha en vides. INIA *Tierra Adentro*: 8-10.

INE (Instituto Nacional de Estadísticas). 2018, jun. Síntesis de resultados Censo 2017. 26 p.

INE (Instituto Nacional de Estadísticas). 2019, ago. Censo de población y vivienda 2017. (Inf. Coquimbo), INE Coquimbo. 30p.

INIA (Instituto de Investigaciones Agropecuarias). Red Agrometeorológica Nacional del Instituto de Investigación Agropecuaria. [en línea]. Santiago, Chile. Recuperado en: <<http://agromet.inia.cl/estaciones.php>>. Consultado el: 3 de septiembre de 2019.

IPCC (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático). 2007. Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.

IPCC (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático). 2014. Cambio climático 2014: Informe de síntesis. IPCC. Ginebra, Suiza. 157 p.

IPCC (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático). 2012. Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change. 582 p.

Lavini, A.; R. D'andria; M. Patumi; G. Morelli; R. Tognetti y L. Sebastiani. 2008. Water management of olive trees (*Olea europaea* L.) in a hilly environment of Central-South Italy.

Lefort, I. 2014. Propuesta de un índice para generar información válida y oportuna sobre la ocurrencia de heladas en la Región de Coquimbo. Memoria Ingeniera en Recursos Naturales Renovables. Santiago, Chile: Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile. 62h.

Loaiza C. W.; Y. Carvajal y O. L. Baquero. 2015. Índice estandarizado de precipitación (SPI) para la caracterización de sequías meteorológicas en la cuenca del río Dagua-Colombia. *Estudios Geográficos* 76: 557-578

Lobos, G.; A. Veas; C. Balbotín; V. Muñoz; N. Franck y A. Portilla. 2017. Manejo hídrico en frutales bajo condiciones edafoclimáticas de Limarí y Choapa (Bol. 355), INIA, CORFO, Gobierno de Chile. La Serena, Chile. 58p.

Martínez, A. and M. Tejero. 2004. A wind-based qualitative calibration of the Hargreaves ET0 estimation equation in semiarid regions. *Agricultural Water Management* 64: 251–264.

Martínez, B.; A. Ibacache y L. Rojas. 2008. Daño por heladas en frutales. *Tierra Adentro* 78: 32-35.

Martínez, P.; S. Díaz y C. Prieto. 2012. Estudiando la sequía: una experiencia para el aula de informática. *Enseñanza en ciencias de la tierra* 20(3): 270-279.

McKee, T; N. Doesken y J. Kleist. 1993. The relationship of drought frequency and duration to time scales. Preprints, Eighth Conf. on Applied Climatology. Anaheim, CA, Amer. Meteor. Soc., 179-184.

Medina, G.; J. Graeda; J. Ruiz; J. Casas; V. Rodríguez y C. De la Mora. 2019 ago-sep. Disminución de las horas frío como efecto del cambio climático en México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 10(6): 1325-1337.

Melo, O.; W. Foster; J. Cancino; H. Gilabert; G. Donoso; E. Katz y C. Rodríguez. 2010. Estimación del impacto socioeconómico del cambio climático en el sector silvoagropecuario de Chile. Universidad Católica de Chile, ODEPA. 146.

Meza, M. y C. Castro. 2013, dic. Susceptibilidad erosiva asociada al proceso de reconversión agrícola productiva, cuenca semiárida de Quillota. V Región de Valparaíso, Chile. *Idesia* 31(4).

Michelakis, N.; E. Vougioucalou y G. Clapaki. 1993. Water use, wetted soil volume, root distribution and yield of avocado under drip irrigation. *Agricultural Water Management* 24: 119–131.

MINAGRI (Ministerio de Agricultura). 2010. Cambio Climático y el Sector Silvoagropecuario Chileno. (cap. 3, pp. 73-98). En su: El Cambio Climático en el Sector Silvoagropecuario de Chile. Santiago, Chile. 123 p.

Miranda, F. 2018. Erosión de suelos y crisis hídrica: las sombras del manejo agroexportador de palto. TERRAM. Santiago, Chile. 77p.

Monterroso, A.I.; A. C. Conde; C. Gay; J.D. Gómez y J. López. 2012. Indicadores de vulnerabilidad y cambio climático en la agricultura de México. Publicaciones de la Asociación Española de Climatología. Serie A. 8 p.

Morales, L.; F. Canessa; C. Mattar; R. Orrego y F. Matus. 2006. Characterization and edaphic and climatic zonification in the region of Coquimbo, Chile. *Revista Chilena Ciencia del Suelo y nutrición Vegetal* 6(3): 52-74.

Núñez, J. y K. Verbiest. 2018. Atlas de sequía de América Latina y el Caribe. UNESCO, CAZALAC. 204p.

OCDE (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos). 2016. Estudios de Política Rural de la OCDE – Chile. 202 p.

ODEPA (Oficina De Estudios y Políticas Agrarias) y Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN). 2019, jul. Catastro Frutícola: Principales resultados Región de Arica y Parinacota. 27 p.

ODEPA (Oficina De Estudios y Políticas Agrarias). 2017. Panorama de la Agricultura Chilena. Ministerio de Agricultura, Gobierno de Chile. 141 p.

ODEPA (Oficina De Estudios y Políticas Agrarias). 2019. [en línea]. Santiago, Chile. Recuperado en: <<https://www.odepa.gob.cl/wp-content/uploads/2019/09/Ficha-Nacional-2019.xls>>

ODEPA (Oficina De Estudios y Políticas Agrarias). 2019b, mar. Región de Coquimbo: Información Regional 2019. Santiago, Chile. 15 p.

Oficina De Estudios y Políticas Agrarias (ODEPA) y Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN). 2011, jul. Catastro Frutícola: Principales resultados Región de Coquimbo. 39 p.

Oficina De Estudios y Políticas Agrarias (ODEPA) y Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN). 2015, jul. Catastro Frutícola: Principales resultados Región de Coquimbo. 43 p.

Oficina De Estudios y Políticas Agrarias (ODEPA) y Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN). 2018, jul. Catastro Frutícola: Principales resultados Región de Coquimbo. 35 p.

ONU (Organización de las Naciones Unidas). 2012. La economía del cambio climático en Chile. Comisión Económica para América Latina y el Caribe, Gobierno de Chile. Santiago, Chile. 363 p.

PAC Consultores. 2012. Ilustre Municipalidad de Monte Patria. Santiago, Chile. 137 p.

Paleo, D. 2018, oct. Producción de aceite de oliva sigue al alza en la región. *Diario el día*.

Perry, P. 2015. Efectos del cambio climático en los cultivos de palto, olivo y uva pisquera insertos dentro de un sistema de agricultura familiar campesina en la provincia del Choapa. Memoria Ingeniera en Recursos Naturales Renovables. Santiago, Chile: Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile. 77h.

Pezo, L. 2017, sep. Construcción del Desarrollo Rural en Chile: Apuntes para abordar el tema desde una perspectiva de sociedad civil. *Revista Mad* 17: 90-112.

Picornell, M. y J.M. Melero. 2013, dic. Historia del cultivo de olivo y el aceite; su expresión en la biblia. *Revista de la Facultad de Educación de Albacete* 28: 155-181.

Pizarro, J.; F. Alfaro; R. Muñoz; J. Barriga; L. Letelier y C. Tirado. 2019, may. Distribución espacial de artrópodos en agroecosistemas de la cuenca del río Limarí (Región de Coquimbo, Chile). *Revista de Geografía Norte Grande* 72.

Ponce, R. 2019. Crisis hídrica: incentivos y gobernanza. Universidad del Desarrollo. 10 p.

REDMUNICC (Red Chilena de Municipios ante el Cambio Climático). 2018. Red Chilena de Municipios ante el Cambio Climático. [en línea]. Santiago, Chile. Recuperado en: <<https://actionlac.net/redmunicc/>> Consultado el: 3 de junio de 2019.

Red Agrícola. 2019, dic. Santiago de Chile, (108). 80 p.

Rodríguez, A.; B. Piccini y A. Muñoz. 2018, abr. Tolerancia a las heladas por superenfriamiento en cultivares de nogal (*Juglans regia*) y almendro (*Prunus amygdalus*). *Revista de investigaciones agropecuarias (RIA)* 44(1).

Salvo, J.; A. Torres; N. Olivares; J. Riquelme; L. Leris; F. Rodríguez y P. Abarca. 2017. Manual del cultivo del palto. (Bol. 13), INIA, INDAP, Gobierno de Chile. Santiago, Chile. 117p.

Santibáñez, F.; P. Santibáñez y L. Solís. 2008, dic. Análisis de Vulnerabilidad del Sector Silvoagropecuario, Recursos Hídricos y Edáficos de Chile frente a escenarios de Cambio Climático. (Cap. 4), AGRIMED, Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile. Santiago, Chile. 92p.

Santibáñez, F.; P. Santibáñez; C. Caroca y P. González. 2017. Atlas agroclimático de Chile: estado actual y tendencias del clima. (2t.), AGRIMED, Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile. Santiago, Chile. 178 p.

Santibáñez, F.; P. Santibáñez; C. Caroca; P. Morales; P. González; N. Gajardo; P. Perry y C. Melillán. 2014. Atlas del cambio climático en las zonas de régimen árido y semi-árido. AGRIMED, Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile. Santiago, Chile. 136p.

Teutsch, C. 2006. Metodologías para la evaluación de la vulnerabilidad poblacional a los desastres de variabilidad y Cambio Climático. Memoria Ingeniero en Recursos Naturales Renovables. Santiago, Chile: Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile. 79h.

Torres, E.; S. Rivera; V. Mueña; F. Corradini; P. Sepúlveda y P. Abarca. 2017. Manual del cultivo de uva de mesa (Bol. 18), INIA, CORFO, Gobierno de Chile. La Cruz, Chile. 151p.

Uribe, J.M.; R. Cabrera; A. de la Fuente y M. Paneque. 2012. Atlas Bioclimático de Chile. Universidad de Chile, Ministerio de Bienes Nacionales. Santiago, Chile. 229 p.

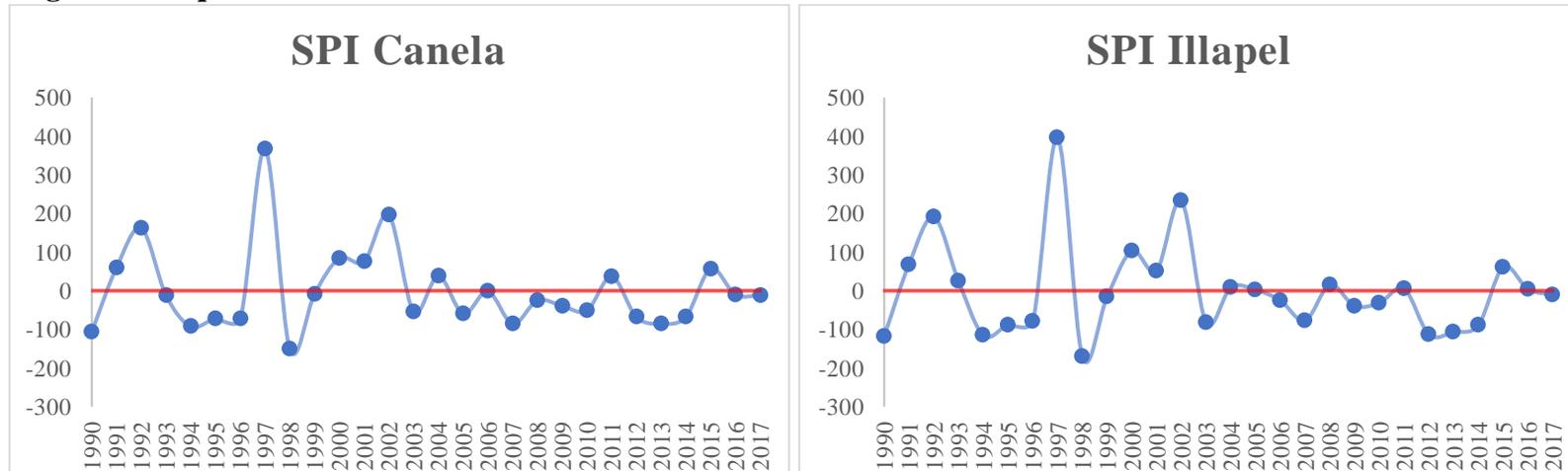
Vásquez, L. 2011. Cambio climático, incidencia de plagas y prácticas agroecológicas resilientes. Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas (INCA). La Habana. 242p.

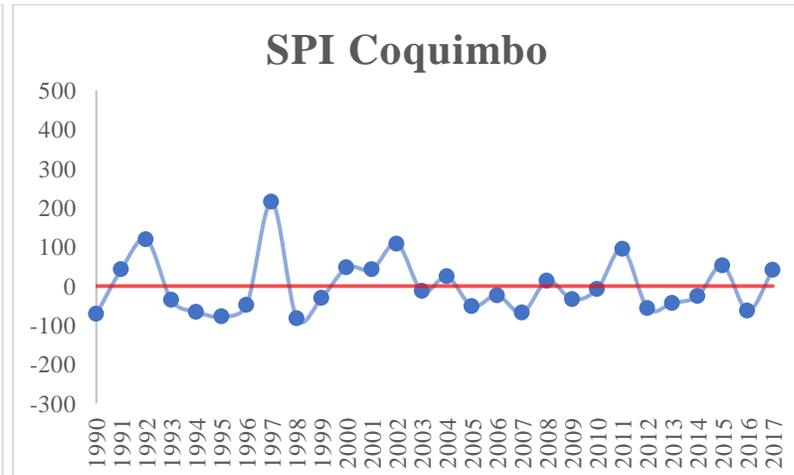
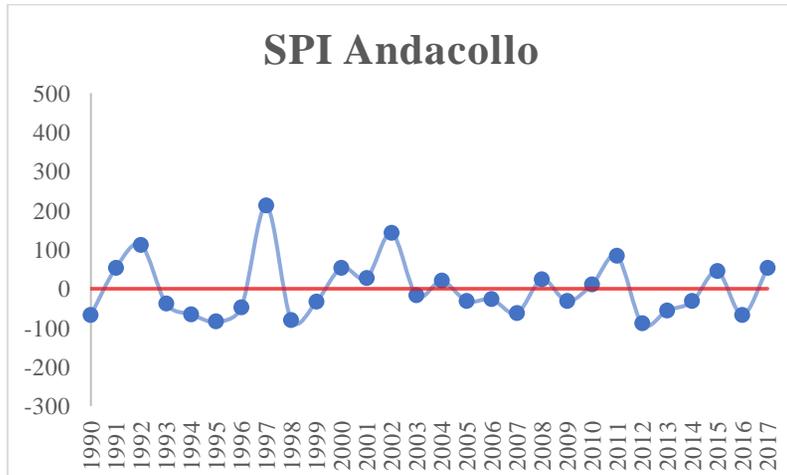
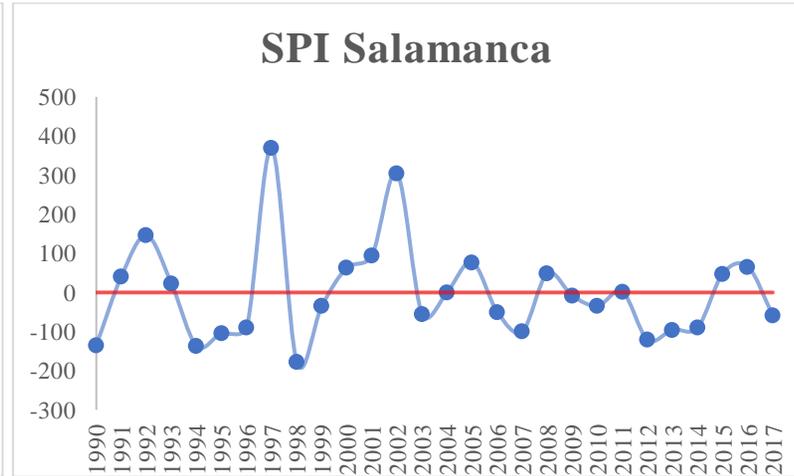
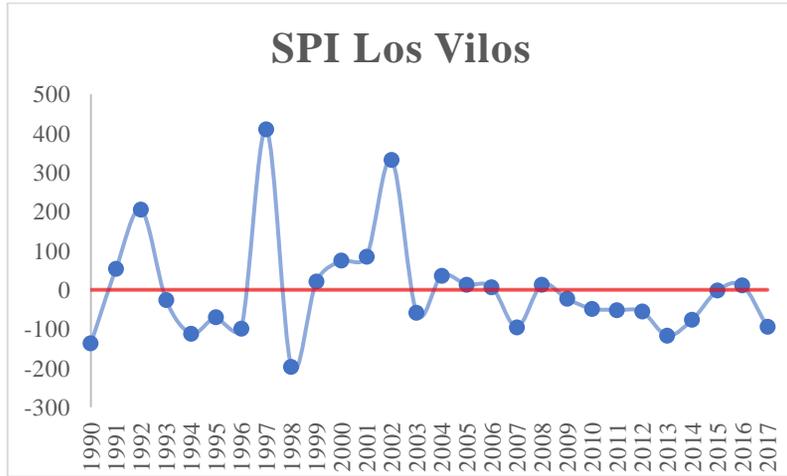
Wainer, J. y S. Jiménez. 2017, mar. Realidad del Agua en Chile: ¿Escasez o falta de infraestructura? (Inf. 263), Libertad y desarrollo. 21p.

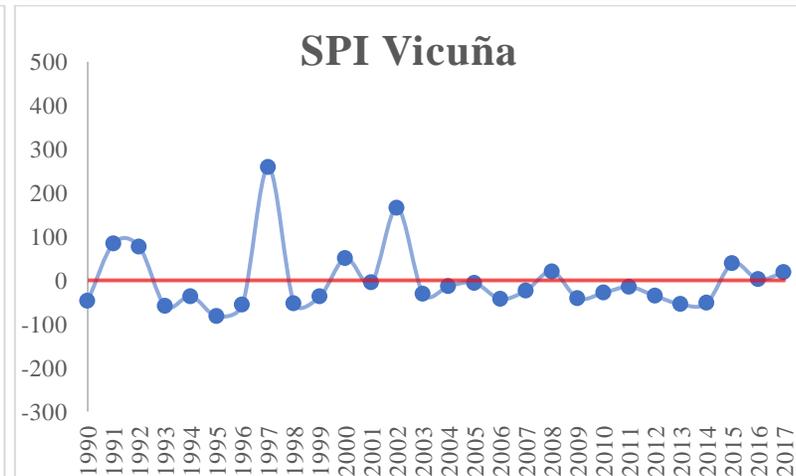
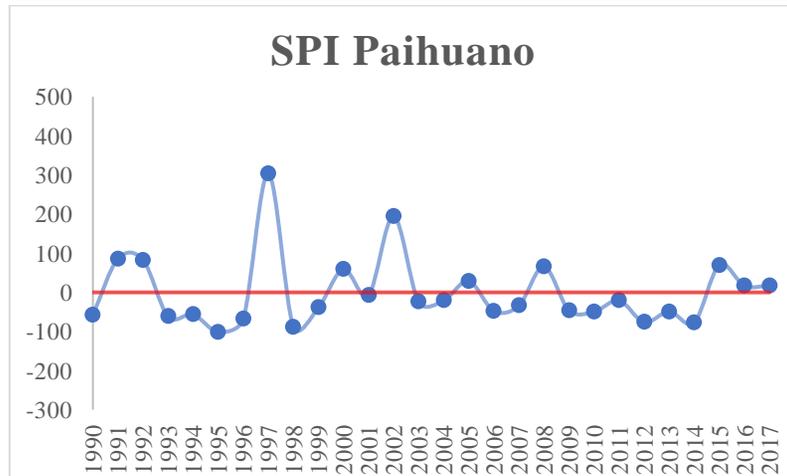
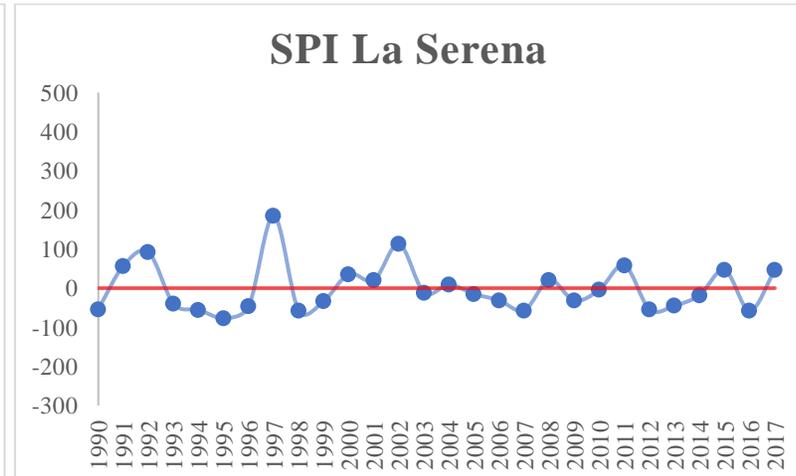
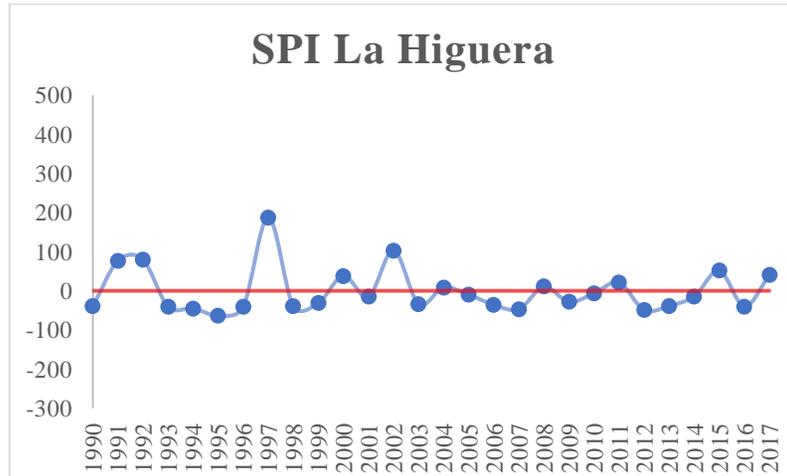
Yáñez, L. y D. Cohen. 2019. Boletín nacional y regional de exportaciones silvoagropecuarias. ODEPA, Ministerio de Agricultura, Gobierno de Chile. Santiago, Chile. 27p.

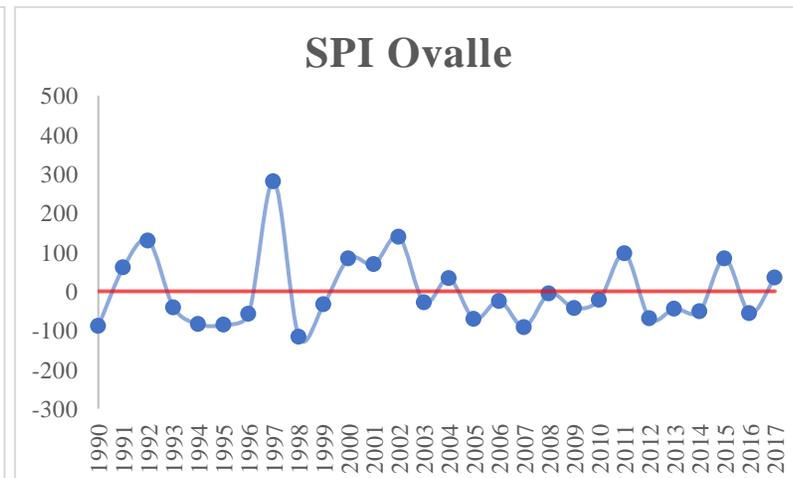
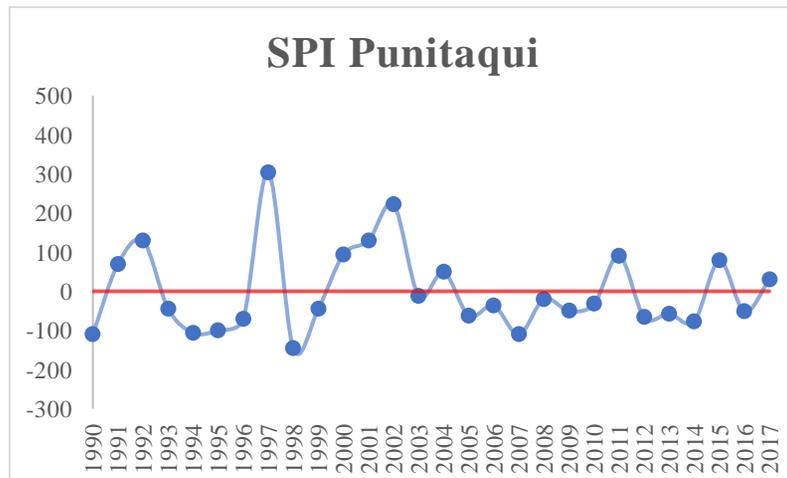
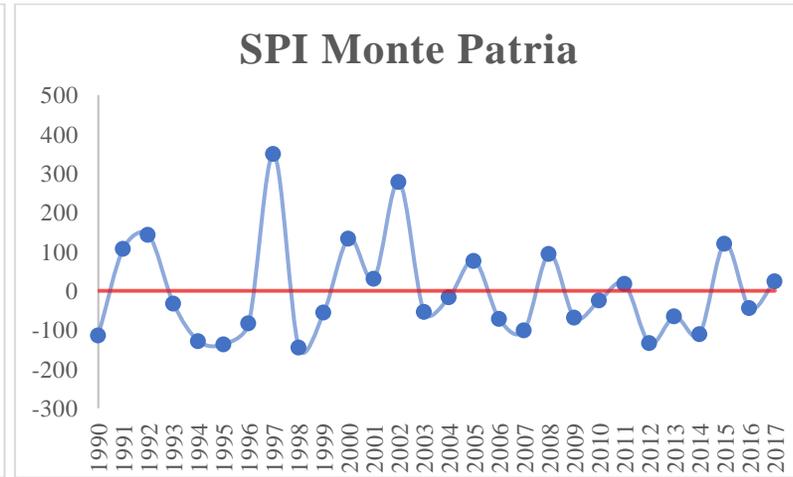
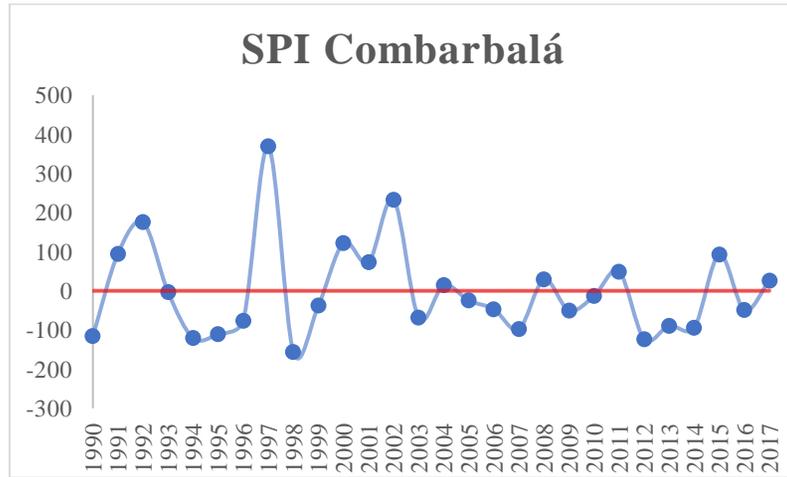
APÉNDICES

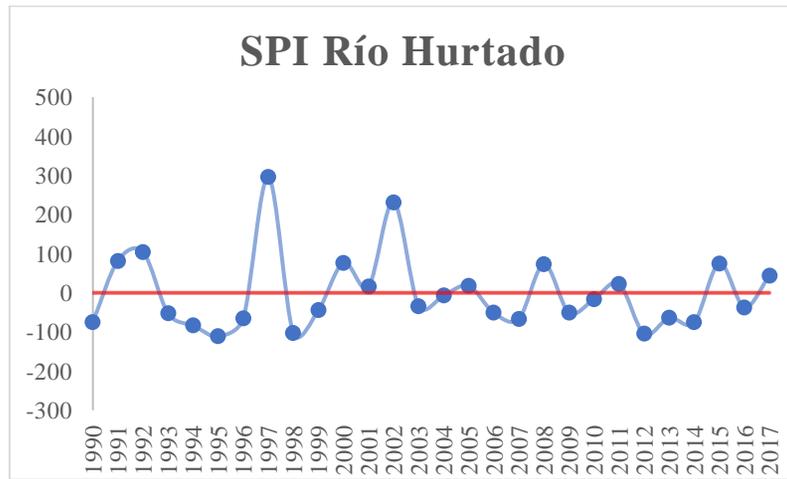
Apéndice 1. Distribución del promedio de las precipitaciones históricas en el período 1990 – 2017 para las comunas de la Región de Coquimbo.



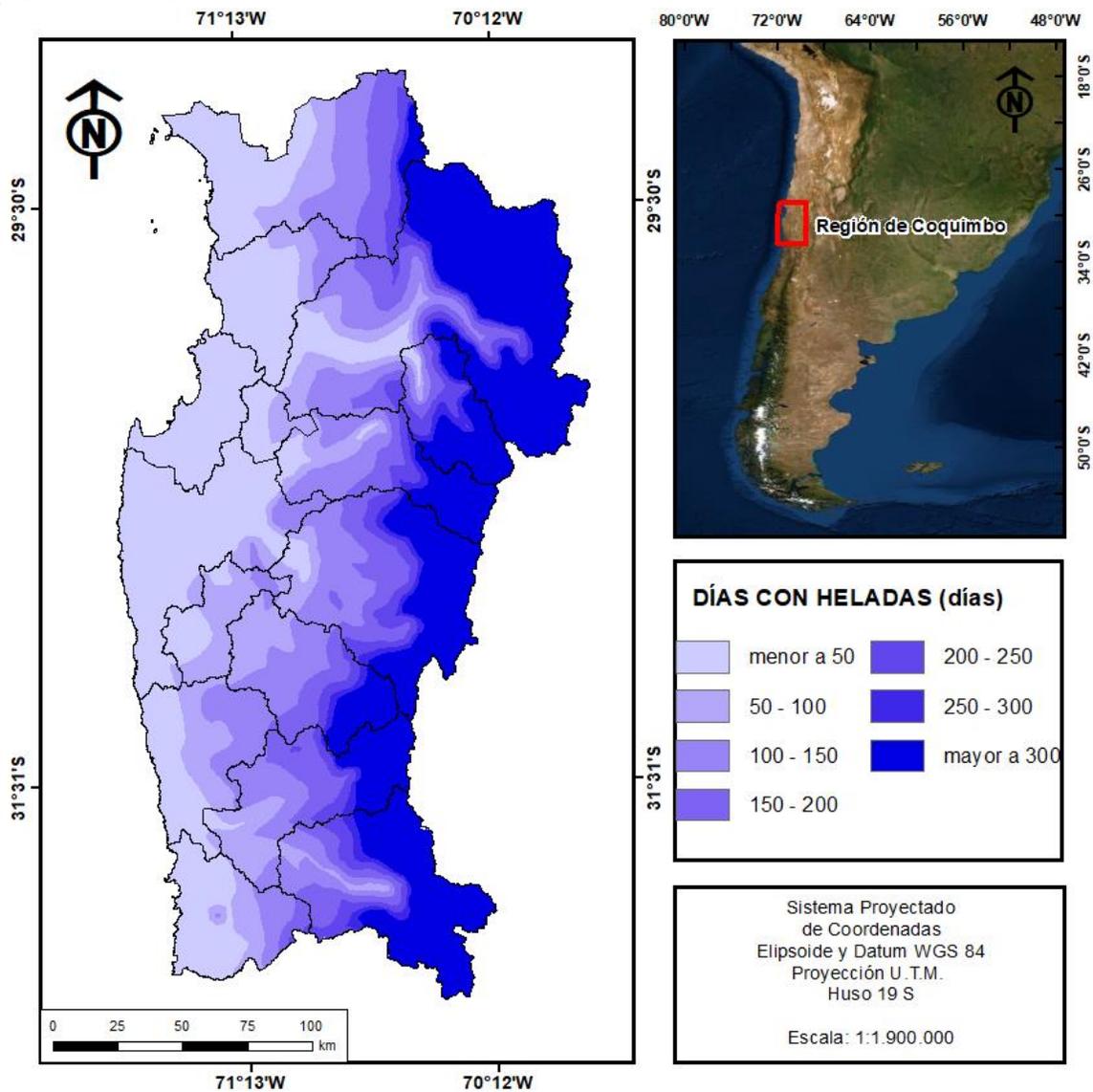




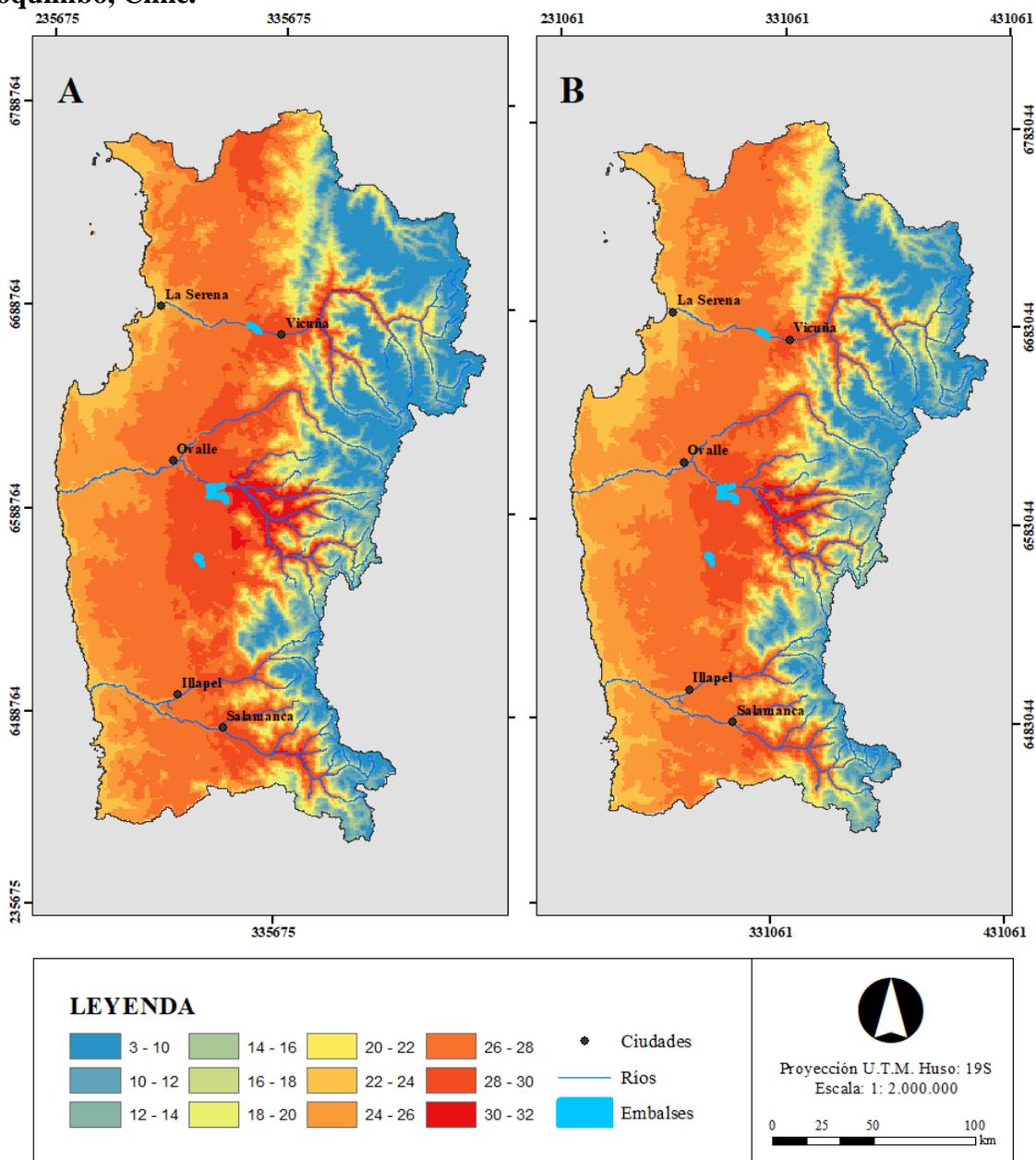




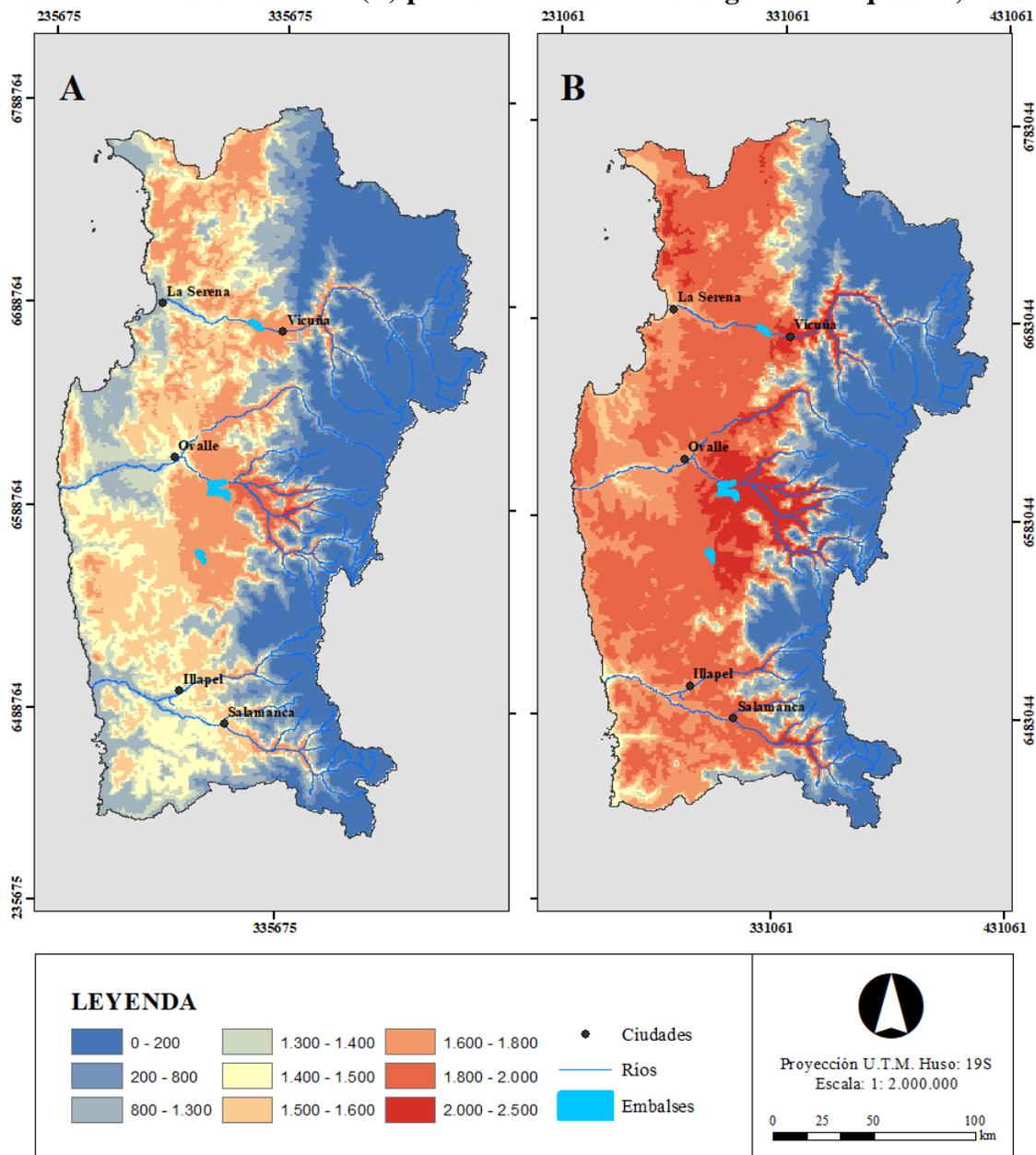
Apéndice 2. Distribución de los días con heladas anuales en la región de Coquimbo para período actual.



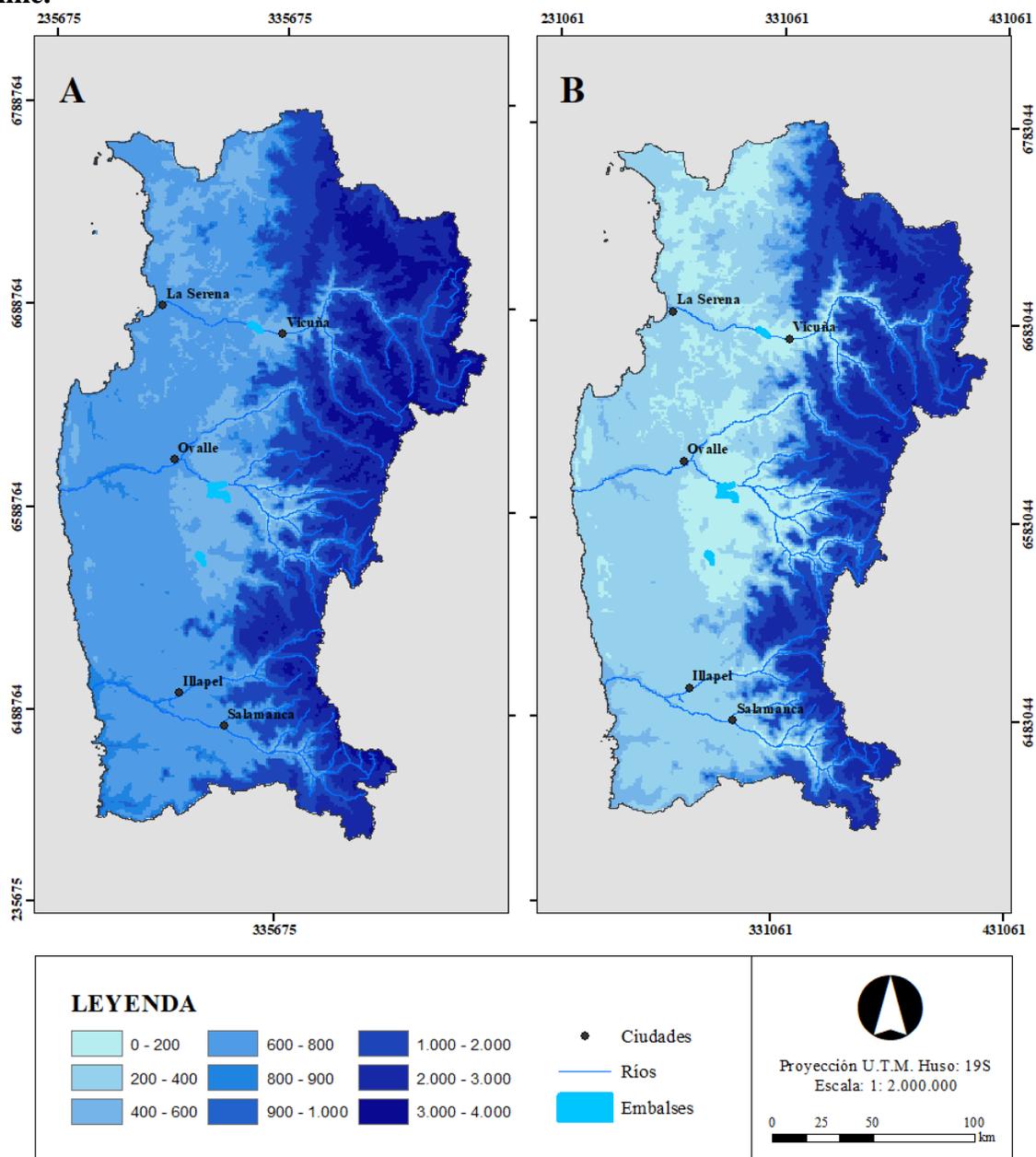
Apéndice 3. Distribución de la Temperatura máxima de enero en el período actual (A) y período 2046 – 2065 escenario RCP8.5 (B) para las comunas de la región de Coquimbo, Chile.



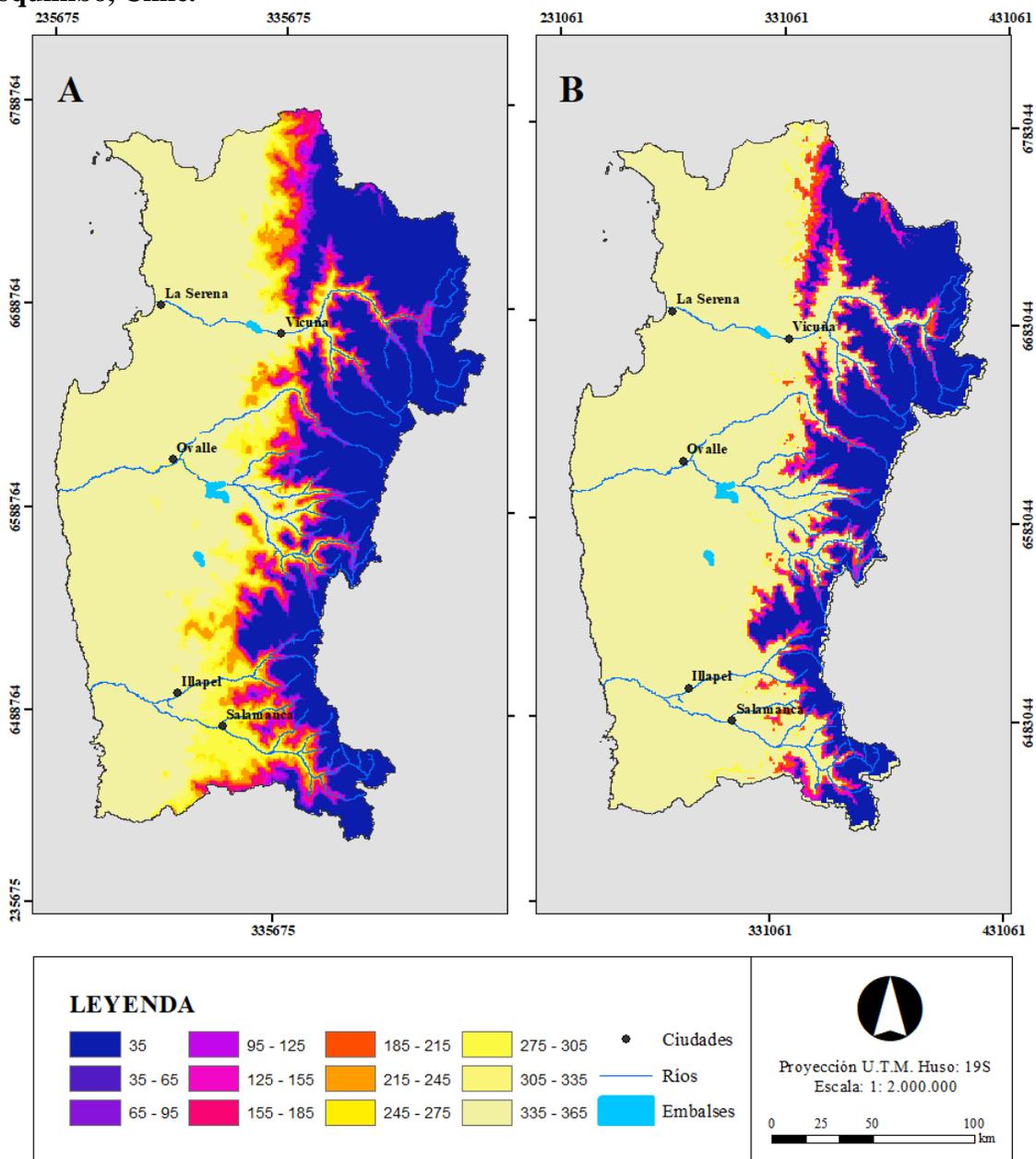
Apéndice 4. Distribución de los Días-grado anuales para el período actual (A) y período 2046 – 2065 escenario RCP8.5 (B) para las comunas de la región de Coquimbo, Chile.



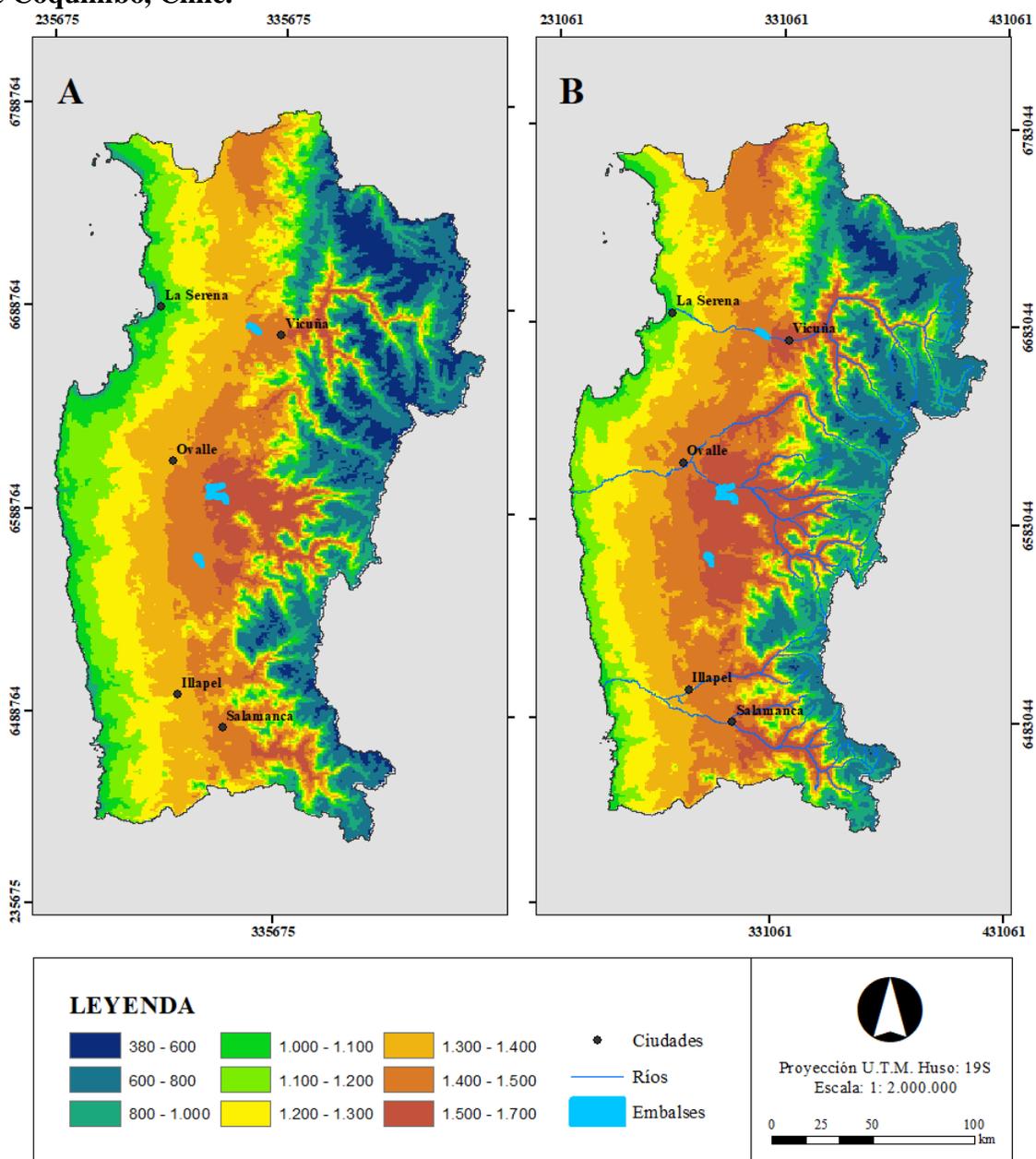
Apéndice 5. Distribución de las Horas de frío anuales para el período actual (A) y período 2046 – 2065 escenario RCP8.5 (B) para las comunas de la región de Coquimbo, Chile.



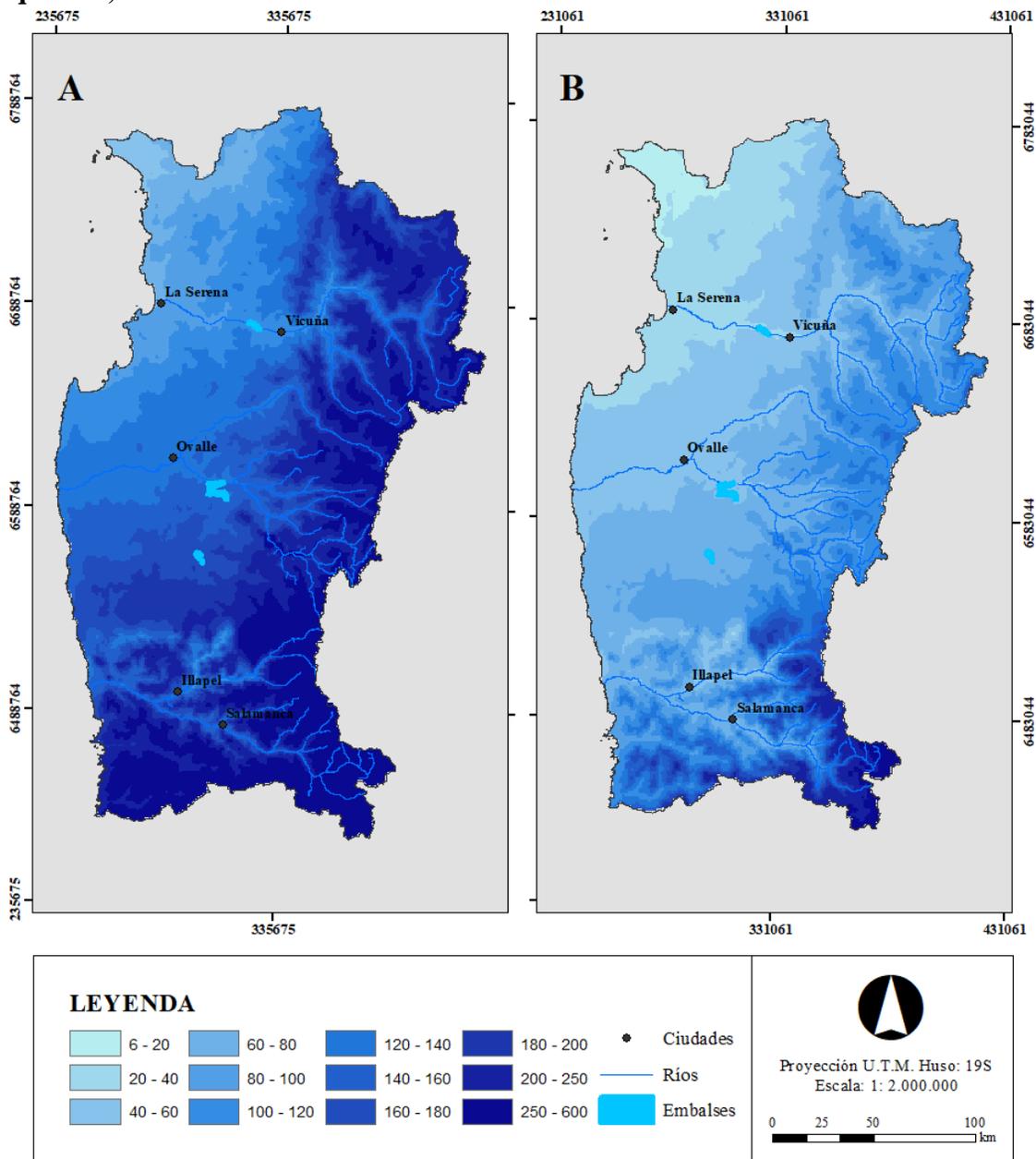
Apéndice 6. Distribución del Período libre de heladas anuales para el período actual (A) y período 2046 – 2065 escenario RCP8.5 (B) para las comunas de la región de Coquimbo, Chile.



Apéndice 7. Distribución de la evapotranspiración de referencia anual para el período actual (A) y período 2046 – 2065 escenario RCP8.5 (B) para las comunas de la región de Coquimbo, Chile.



Apéndice 8. Distribución de la precipitación acumulada anual para el período actual (A) y período 2046 – 2065 escenario RCP8.5 (B) para las comunas de la región de Coquimbo, Chile.



Apéndice 9. Variación porcentual de la cantidad de hectáreas plantadas con cultivos frutícolas entre los años 2015 – 2018 en las comunas de la Región de Coquimbo, Chile.

<i>Comuna</i>	<i>Superficie frutícola (ha)</i>		<i>% 2015-2018</i>
	<i>2015</i>	<i>2018</i>	
Andacollo	0	0	0,00%
Canela	105,42	109,18	3,57%
Combarbalá	905,77	904,41	-0,15%
Coquimbo	1.807,9	1.907,85	5,53%
Illapel	2.110,58	1.914,06	-9,31%
La Higuera	69,12	74,57	7,88%
La Serena	695,15	555,62	-20,07%
Los Vilos	471,07	454,81	-3,45%
Monte Patria	5.638,07	5.568,56	-1,23%
Ovalle	9.305,32	9.276,67	-0,31%
Paihuano	872,15	778,42	-10,75%
Punitaqui	618,01	582,99	-5,67%
Río Hurtado	317,46	327,57	3,18%
Salamanca	1.672,41	1.495,46	-10,58%
Vicuña	3.187,66	3.227,58	1,25%
Total	27.776,09	27.177,75	-2,15%

Apéndice 12. Variación porcentual de la precipitación media anual entre período actual y período 2046 – 2065 escenario RCP8.5 en las comunas de la Región de Coquimbo, Chile.

<i>Comuna</i>	<i>1998 - 2017</i>	<i>2046 - 2065</i>	<i>% variación</i>
Canela	154,58	73,04	-52,75%
Illapel	183,82	83,67	-54,48%
Los Vilos	204,13	104,63	-48,74%
Salamanca	209,74	112,75	-46,24%
Andacollo	98,55	34,98	-64,50%
Coquimbo	99,28	32,58	-67,18%
La Higuera	61,84	16,20	-73,80%
La Serena	80,50	23,51	-70,80%
Paihuano	121,62	58,46	-51,93%
Vicuña	90,29	35,31	-60,89%
Combarbalá	176,84	74,02	-58,14%
Monte Patria	192,35	77,10	-59,92%
Ovalle	126,10	41,47	-67,11%
Punitaqui	156,22	55,11	-64,72%
Río Hurtado	136,61	60,42	-55,77%

Apéndice 11. Estado de los cuerpos de agua superficial y agua subterránea en la Región de Coquimbo, Chile.

<i>Comuna</i>	<i>Cuerpos de agua superficial agotados</i>	<i>Cuerpos de agua subterránea con zonas de prohibición</i>	<i>Cuerpos de agua subterránea con áreas de restricción</i>
Canela	Río Choapa y sus afluentes		Canela Choapa Bajo
Illapel	Río Choapa y sus afluentes		Choapa Bajo Illapel Aguas Arriba Embalse Culimo Pangalillo Los Condores
Los Vilos			Guangali El Ajial Los Maquis Quilamari Chalinga
Salamanca	Río Choapa y sus afluentes		Choapa Alto Lagunillas Higuerilla
Andacollo	Río Elqui y sus afluentes		Peñuelas
Coquimbo			Culebrón Lagunillas Los Choros Altos
La Higuera			Punta Colorada Tres cruces Serena Norte Santa Gracia
La Serena	Río Elqui y sus afluentes		Elqui Bajo Peñuelas
Paiguano	Río Elqui y sus afluentes	Acuífero Elqui Sector Claro	
Vicuña	Río Elqui y sus afluentes	Acuífero Elqui Sector Turbio	Elqui Medio Elqui Alto Quebrada Grande
Combarbalá	Río Grande y Río Limarí y sus afluentes		Río Pama Combarbalá Cogoti
Monte Patria	Río Grande y Río Limarí y sus afluentes		Chañaral Alto Guatulame
Ovalle	Río Grande y Río Limarí y sus afluentes		El Ingenio
Punitaqui	Río Grande y Río Limarí y sus afluentes		
Río Hurtado	Río Grande y Río Limarí y sus afluentes		

Apéndice 12. Cantidad de hectáreas regadas para los cultivos de mandarino, nogal, olivo, palto y vid de mesa por tipo de riego en las comunas de la Región de Coquimbo, Chile.

<i>Comuna</i>	<i>Aspersión</i>	<i>Bordes</i>	<i>Curva de nivel</i>	<i>Goteo</i>	<i>Microaspersión</i>	<i>Surco</i>	<i>Tazas</i>	<i>Tendido</i>	<i>Total</i>	<i>Valor indicador</i>
Canela	0,00	0,00	0,00	57,26	21,40	5,28	0,00	0,00	83,94	0,09
Illapel	0,00	0,00	0,00	1.532,89	183,76	67,37	0,80	18,70	1.803,52	0,06
Los Vilos	0,00	0,00	0,00	216,26	142,53	0,00	0,00	21,41	380,20	0,11
Salamanca	0,00	0,00	0,00	576,58	377,20	187,83	0,00	0,00	1.141,61	0,19
Andacollo	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Coquimbo	0,00	0,00	0,00	834,49	0,00	0,00	0,00	0,00	834,49	0,00
La Higuera	0,00	0,00	0,00	32,10	16,34	1,69	5,51	11,34	66,98	0,27
La Serena	0,00	0,00	0,00	126,05	0,00	0,00	0,00	0,00	126,05	0,00
Paihuano	0,00	0,00	0,00	772,42	0,00	0,00	0,00	0,00	772,42	0,00
Vicuña	0,00	0,00	0,00	2.883,22	0,00	8,52	0,00	0,00	2.891,74	0,00
Combarbalá	0,00	0,00	0,00	828,76	1,12	6,74	0,00	11,17	847,79	0,02
Monte Patria	0,00	0,00	0,96	5.281,23	0,20	62,45	0,00	0,00	5.344,84	0,01
Ovalle	0,00	0,00	0,00	7.079,80	182,43	55,68	7,76	0,00	7.325,67	0,01
Punitaqui	0,00	0,00	0,00	331,65	63,11	0,00	0,00	0,00	394,76	0,02
Río Hurtado	0,00	0,00	0,00	307,78	5,68	3,62	0,00	0,00	317,08	0,01