



UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS

ESCUELA DE POSTGRADO

DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE RIESGO CLIMÁTICO LOCAL PARA EL SECTOR VITÍCOLA EN CHILE

Actividad Formativa Equivalente a Tesis para optar al Título Profesional de Ingeniera Agrónoma
y al Grado de Magíster en Gestión Territorial de Recursos Naturales

KATHERINE SILVIA CUEVAS ZÁRATE

Guía de AFE
Dr. Manuel Paneque

Profesores/as Consejeros/as
Dra. Roxana Bórquez
Dr. Ezio Costa

Evaluadora Externa
Patricia Flores

SANTIAGO - CHILE
2025

**UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS ESCUELA
DE POSTGRADO**

**DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE RIESGO CLIMÁTICO LOCAL PARA EL
SECTOR VITÍCOLA EN CHILE**

AFE presentada como parte de los requisitos para optar al Título Profesional de Ingeniera Agrónoma y al Grado de Magíster en Gestión Territorial de Recursos Naturales.

KATHERINE SILVIA CUEVAS ZÁRATE

	Calificaciones
GUIA DE AFE	
Manuel Paneque Bioquímico, Ph.D.	7,0
PROFESORES/AS CONSEJEROS/AS	
Roxana Bórquez Ingeniera Recursos Naturales, MS, Ph.D.	6,0
Ezio Costa Abogado, MS, Ph.D.	7,0

Santiago, Chile
2025

AGRADECIMIENTOS

A mi mamá, Silvia, y a mi papá, José, por ser raíz y refugio; por enseñarme que el amor incondicional, la dedicación y la fe en una misma son fuerzas que mueven montañas. Gracias por cada gesto, cada palabra, cada enseñanza y cada abrazo que sostuvo mis días.

A mi hermana, María José, y a mi hermano, Eduardo, por ser luz en los momentos de duda, por sus consejos sinceros y por impulsarme siempre a atreverme. A mi cuñada, Vania, y a mi cuñado, Nacho, por el cariño y apoyo permanente.

A mi sobrina Sofía y a mi sobrino Javier, porque en sus risas encontré la paz que necesitaba, y en su ternura, el sentido más profundo de este camino.

A mis amigas y amigos de la vida, por caminar a mi lado sin condiciones, por ser abrigo y alegría, por recordarme que no hay batalla que no se pueda enfrentar con amor y compañía. A mis compañeros y compañeras de universidad, y a los amigos y amigas que allí encontré, gracias por los aprendizajes compartidos, las risas, las luchas y los momentos que hicieron de este recorrido uno más humano. Me llevo lo mejor de cada uno y una.

Al equipo de Agreorecursos, por ser familia y hogar en medio del vértigo académico. Gracias por ser ese lugar donde se respira respeto, confianza, compromiso y pasión por el fútbol. ¡Aguante la verde, siempre!

Gracias por todo, querido Antumapu.

A mi profesor guía, Manuel Paneque, por su acompañamiento constante, su mirada atenta y sus valiosas orientaciones, que hicieron posible este trabajo. A todo el equipo de Bionostra, en especial a Jorge y Donna, por compartir su saber con generosidad, por su paciencia y por ser parte activa de esta etapa tan importante.

A mí, por no rendirme, por insistir. Por abrazar el miedo y las dificultades, por seguir adelante aun cuando el camino se hizo cuesta arriba. Porque aprender a confiar en mí fue, quizás, el mayor logro de todos.

Y a la vida, simplemente gracias. Por lo dulce y lo duro, por cada encuentro y cada aprendizaje. Por dejarme soñar y enseñarme que los sueños, con esfuerzo, también florecen.

A mi familia

ÍNDICE DE CONTENIDO

RESUMEN	1
ABSTRACT	2
INTRODUCCIÓN	3
PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN	6
OBJETIVO GENERAL	6
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	6
1. CAPÍTULO 1. CARACTERIZACIÓN DEL SECTOR VITÍCOLA CHILENO ENTRE LAS REGIONES DE ATACAMA Y BIOBÍO	7
1.1. INTRODUCCIÓN	8
1.2. MATERIALES Y MÉTODOS	9
1.2.1. Área de estudio	9
1.2.2. Estrategia de búsqueda	10
1.2.3. Selección y recopilación información	10
1.3. RESULTADOS	11
1.3.1. Caracterización del sector vitícola entre las Regiones de Atacama y Biobío	11
1.4. DISCUSIÓN	17
1.4.1. Caracterización del sector vitícola entre las Regiones de Atacama y Biobío	17
1.5. CONCLUSIONES	17
1.6. LITERATURACITADA	19
1.7. ANEXOS	22
2. CAPÍTULO 2. EVALUACIÓN DEL ÍNDICE DE RIESGO CLIMÁTICO LOCAL PARA EL SECTOR VITÍCOLA EN REGIONES SEMI-ÁRIDAS Y MEDITERRÁNEAS DE CHILE (https://doi.org/10.3390/agriculture15121322)	27
2.1. INTRODUCTION	28
2.2. MATERIALS AND METHODS	30
2.2.1. Study area	30
2.2. Components of the LCRI for the viticulture sector	31
2.2.1. Exposure	33
2.2.2. Sensitivity	33
2.2.3. Adaptative capacity	35
2.2.4. Response Capacity.....	36
2.3. Evaluation of the LCRI for the viticulture sector	37
2.3. RESULTS	37
2.3.1. Exposure	37

2.3.2. Sensitivity	38
2.3.3. Adaptative Capacity	39
2.3.4. Response Capacity.....	40
2.3.5. LCRI for the viticulture sector.....	40
2.4. DISCUSSION.....	42
2.4.1. Exposure	42
2.4.2. Sensitivity	43
2.4.3. Adaptative and response capacity.....	43
2.4.4. LCRI for the Viticulture Sector	44
2.5. CONCLUSIONS.....	45
2.6. REFERENCES	46
2.7. SUPPLEMENTARY MATERIALS	52
3. CONCLUSIONES	68
4. LITERATURA CITADA.....	69

ÍNDICE DE CUADROS

CAPÍTULO 1

Cuadro 1. Categorías de la caracterización comunal del sector vitícola en Chile entre las regiones de Atacama y Biobío.	11
---	----

CAPÍTULO 2

Table 1. The calculation method and scale of values for exposure component indicators.....	33
Table 2. The calculation methods and scale of values for sensitivity component indicators.	34
Table 3. The calculation methods and scales of values for adaptive capacity component indicators.	35
Table 4. The calculation methods and scales of values for response capacity component indicators.	36
Table 5. The categories of LCRI for the viticulture sector due to climate change in Chile.	37
Table 6. The regional averages of exposure, sensitivity, adaptive capacity, response capacity, and LCRI for the viticulture sector in Chile in the current (2017–2024) and future (2046–2065) periods.	42

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO 1

Figura 1. Área de estudio. Regiones entre Atacama y Biobío, Chile.....	9
Figura 2. Porcentaje de la superficie total de vides (viníferas, pisqueras y de mesa) cultivadas por región.	11
Figura 3. Exportaciones de vinos total en volumen (Millones de litros) y valor total (Millones de USD) a nivel nacional. Evolución entre el período 2002 a 2022. Fuente: Boletín del vino 2023. Publicación de la Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (ODEPA); (Valenzuela, 2023).....	13
Figura 4. Porcentaje de superficie total de vides viníferas, según tipo de Cepaje, entre las regiones de Atacama y Biobío.	13
Figura 5. Porcentaje de superficie total de vides viníferas, según tipo de Cepaje, por región.	14
Figura 6. Porcentaje de superficie total de vides regadas, según tecnología de riego, entre las regiones de Atacama y Biobío.....	14
Figura 7. Trabajadores agrícolas permanentes por región y a nivel nacional, año agrícola de referencia 2020/2021.	15
Figura 8. Trabajadores agrícolas temporales por región y a nivel nacional, año agrícola de referencia 2020/2021.	15
Figura 9. Aportes del Producto Interno Bruto (PIB) Silvoagropecuario (SAP) año 2022, por región y a nivel nacional.	16
Figura 10. Institucionalidad agrícola. Cantidad de usuarios y/o usuarias INDAP durante el año 2022, por región y a nivel nacional.	16

CAPÍTULO 2

Figure 1. The study area, where 99.90% of Chile’s viticulture is concentrated, encompasses the Atacama and Biobío regions and is characterized by the dominant climate of the country.....	31
Figure 2. Procedural diagram for obtaining the LCRI for the current (2017–2024) and future (2046–2065) periods in the viticulture sector.....	32
Figure 3. The exposure component for viticulture in the current (a) and future (b) periods between the Atacama and Biobío regions in Chile.....	38
Figure 4. The sensitivity component for viticulture in the current (a) and future (b) periods, between the Atacama and Biobío regions of Chile.....	39
Figure 5. Adaptative capacity (a) and response capacity (b) components for viticulture, between the Atacama and Biobío regions of Chile.....	40
Figure 6. The LCRI for viticulture in the current (a) and future (b) periods, between the Atacama and Biobío regions of Chile.....	41

ÍNDICE DE ANEXOS

CAPÍTULO 1

Anexo 1.1. Superficie total en hectáreas (ha) de vides (viníferas, pisqueras y de mesa) por región y a nivel nacional.....	22
Anexo 1.2. Regiones Vitícolas, mediante el Decreto N°464, de 1994 y Decreto 56, de 2017 (modificación), donde se establece la zonificación vitícola oficial en Chile.....	23
Anexo 1.3. Superficie de vides de vinificación según tipo de Cepaje por región y a nivel nacional.....	26

RESUMEN

El cambio climático representa una amenaza social, ambiental y económica para los territorios agrícolas de Chile. Los modelos pesimistas proyectan aumentos de temperatura de hasta 4°C y la disminución de hasta el 60,0% de las precipitaciones para el período futuro (2046–2065), lo que provocará diversos efectos en el sector vitícola. Estos riesgos climáticos emergentes deben ser abordados preventivamente a través del desarrollo e implementación de estrategias de mitigación y/o adaptación. Para ello, es fundamental disponer de información a nivel comunal, con el propósito de identificar y priorizar territorios según su vulnerabilidad y capacidades de resiliencia local.

El presente estudio tuvo como propósito desarrollar un Índice de Riesgo Climático Local (IRCL) orientado al sector vitícola chileno. El índice se fundamenta en el marco conceptual del cuarto informe de evaluación (AR4) del IPCC, lo que permite una evaluación integral de la vulnerabilidad climática, facilita la identificación de brechas estructurales en términos de sensibilidad y capacidad adaptativa a escala local. El IRCL incorpora los componentes exposición, sensibilidad, capacidad adaptativa y capacidad de respuesta, operacionalizados mediante once indicadores específicos. Esta metodología permitió calcular un valor agregado del índice, y desagregar los resultados por componente, proporcionando una herramienta útil para la toma de decisiones en materia de adaptación al cambio climático en territorios vitícolas.

El IRCL considera un conjunto de datos disponibles sobre los probables impactos de los eventos climáticos extremos y los datos socioeconómicos asociados, y permiten calcular el nivel de vulnerabilidad y resiliencia local al riesgo climático. El sector vitícola chileno debe interpretar el IRCL como una advertencia para estar preparados frente a eventos climáticos más frecuentes y o más severos en el período futuro, así como de establecer herramientas de apoyo para la planificación eficiente en la adaptación del sector vitícola del país, bajo el contexto de cambio climático.

Se determinó el IRCL en el período climático actual (2017–2024) y futuro (2046–2065) bajo el escenario de cambio climático RCP8.5, para un total de 165 comunas productoras de vides, ubicadas entre las regiones de Atacama y Biobío. Los resultados de esta investigación indican que, bajo las proyecciones de cambio climático, 122 comunas presentan niveles de riesgo climático “Medio” a “Alto”, mientras que 43 comunas presentan niveles “Bajo”. Las comunas vitícolas de la región del Maule se posicionan como las mejor preparadas para enfrentar escenarios climáticos adversos, en contraste con las comunas vitícolas de la región de Coquimbo, que muestran la mayor vulnerabilidad climática.

Palabras claves: Vulnerabilidad, Resiliencia, Cambio climático, Vides, Viticultura.

ABSTRACT

Climate change represents a social, environmental and economic threat to Chile's agricultural territories. Pessimistic models project temperature increases of up to 4.0°C and a decrease of up to 60.0% of precipitation for the future period (2046-2065), which will have diverse effects on the viticulture sector. These emerging climate risks must be addressed preventively through the development and implementation of mitigation and/or adaptation strategies. To this end, it is essential to have information at the communal level in order to identify and prioritize territories according to their vulnerability and local resilience capacities.

The purpose of this study was to develop a Local Climate Risk Index (LCRI) for the Chilean viticulture sector. The index is based on the conceptual framework of the IPCC's Fourth Assessment Report (AR4), which allows for a comprehensive assessment of climate vulnerability and facilitates the identification of structural gaps in terms of sensitivity and adaptive capacity at the local level. The LCRI incorporates the components of exposure, sensitivity, adaptive capacity, and response capacity, operationalized through eleven specific indicators. This methodology made it possible to calculate an aggregate value for the index and disaggregate the results by component, providing a useful tool for decision-making on climate change adaptation in viticultural regions.

The LCRI considers a set of available data on the likely impacts of extreme weather events and associated socioeconomic data, and allows for the calculation of the level of local vulnerability and resilience to climate risk. The Chilean viticulture sector should interpret the LCRI as a warning to be prepared for more frequent and/or more severe climate events in the future, as well as to establish support tools for efficient planning in the adaptation of the country's viticulture sector in the context of climate change.

The LCRI was determined for the current climate period (2017–2024) and the future climate period (2046–2065) under the RCP8.5 climate change scenario for a total of 165 grape-producing municipalities located between the Atacama and Biobío regions. The results of this research indicate that, under climate change projections, 122 municipalities present “Medium” to ‘High’ levels of climate risk, while 43 municipalities present “Low” levels. The viticultural municipalities of the Maule region are positioned as the best prepared to face adverse climate scenarios, in contrast to the viticultural municipalities of the Coquimbo region, which show the greatest climate vulnerability.

Key words: Vulnerability, Resilience, Climate change, Vines, Viticulture.

INTRODUCCIÓN

En Chile, el sector vitícola es esencial para el desarrollo agrícola y económico del país, destacándose como un importante exportador de uvas y vinos (Salazar y Reyes, 2020). Entre 1990 y 2023, la superficie plantada con vides viníferas aumentó de 65.202 a 124.436 ha, mientras que las vides pisqueras crecieron de 6.506 a 9.232 ha (ODEPA, 2024a). En contraste, las vides de mesa disminuyeron de 48.218 a 39.931 ha (ODEPA, 2024a). Destacando la superficie de vides para vinificación, como la más cultivada a nivel nacional (Salazar y Reyes, 2020; SAG, 2023), seguidas por las dedicada a la uva de mesa y uva pisquera (ODEPA, 2024a). En conjunto, representan el 13,3% de la superficie agrícola del país¹ (ODEPA, 2019).

La producción de la vid o uva (*Vitis vinifera* L.) representa el 0,5% del producto interno bruto (PIB) nacional y el 16,5% de las exportaciones agropecuarias. Asimismo, emplea a más de 100.000 personas en diversas etapas del proceso productivo, desde el cultivo hasta la comercialización (Vinos de Chile, 2023); convirtiendo a Chile en el primer exportador de vinos de América y el cuarto a nivel mundial (Vinos de Chile, 2022). Además, a nivel mundial Chile provee el 4,0% de la uva de mesa, situándolo como el sexto mayor productor y primer exportador (De la Fuente, 2021).

Uno de los principales retos actuales y futuros que enfrenta la producción agrícola y la viticultura, en particular, son los efectos del cambio climático (CC) descritos y proyectados extensivamente por el del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC; IPCC, 2001; Compés y Sotés, 2018). Entre los principales efectos del CC, se encuentra el aumento sostenido de la temperatura media global y la alta variabilidad en los patrones de precipitación, lo cual modifica los regímenes climáticos tradicionales (Allan *et al.*, 2020; IPCC, 2021; Rodrigues *et al.*, 2025). En Chile, se han registrado incrementos de 0,15 °C por década entre 1961 y 2023, acompañados por reducciones del 4,0% en las precipitaciones en el mismo período (DMC, 2024). Los viñedos están particularmente expuestos a eventos climáticos extremos, como sequías prolongadas, heladas primaverales y olas de calor, los cuales inciden negativamente en el desarrollo fenológico de la vid, modificando la brotación, floración y maduración de las bayas (Zurita-Silva *et al.*, 2020).

Los estudios, bajo el escenario de CC RCP8,5, proyectan incrementos en la temperatura media de entre 1,9-3,0 °C para el período 2046–2060, así como disminuciones de entre 60,0 y 100,0% en las lluvias invernales en la zona norte del Chile, mientras que en la zona centro-sur la reducción de las precipitaciones podría superar el 40,0% hacia finales del siglo (Araya-Osses *et al.*, 2020; IPCC, 2021). Ensayos en variedades de Cabernet Sauvignon y Syrah en los Valles centrales de Maipo y Cauquenes, han demostrado que un incremento promedio de 2°C en la temperatura ambiental genera cambios en la composición química de las uvas (Salazar y Reyes, 2020), incluyendo reducciones del crecimiento de los brotes, disminución del rendimiento y alteraciones en los niveles de alcohol y pH (Reyes y Salazar, 2021).

Los cambios en la maduración y el tiempo de cosecha son algunos de los efectos que ya se pueden observar en algunos viñedos (Salazar y Reyes, 2020). Además, el CC afecta las necesidades de riego y aumenta la presión por nuevas plagas, enfermedades y malezas, favoreciendo su establecimiento y dispersión (Acuña *et al.*, 2020).

¹ Excluyendo forrajeras y barbecho.

En Chile, las zonas vitícolas muestran importantes diferencias agroclimáticas (Haddad *et al.*, 2020; Bopp *et al.*, 2022). Las regiones al norte, como Atacama y Coquimbo, enfrentan un aumento en la aridez y una reducción de las precipitaciones (Zavala, 2024), mientras que en las regiones del centro-sur, como Maule y Biobío, el CC está afectando la disponibilidad hídrica y la fenología de la vid (Jorqueta-Fontena y Orrego-Verdugo, 2010), lo que requiere estrategias diferenciadas de manejo. Los efectos del CC impactan especialmente a los pequeños agricultores, quienes enfrentan limitaciones de recursos para adaptarse a condiciones adversas, como la sequía y el estrés térmico (Salazar, 2020), particularmente en las zonas del secano interior y costero (Reyes, 2020).

El factor climático es determinante en la distribución de las variedades de vid a nivel nacional (Reyes, 2020). El clima y los distintos factores ambientales como precipitaciones y temperatura influyen directamente sobre la planta, y no puede ser controlado por el viticultor (Ruiz-García *et al.*, 2018; Reyes, 2020). De las variables climáticas, la temperatura del aire es determinante en el ciclo de crecimiento de la vid; puesto que influye en el desarrollo de estados fenológicos como brotación, floración, envero, y otros (Zurita-Silva *et al.*, 2020). Dado que los efectos de la temperatura sobre el viñedo serán reconocidos en el corto plazo, es prioritario adaptar la viticultura a las nuevas condiciones climáticas (Salazar y Reyes, 2020).

El riesgo climático es entendido como el potencial de impactos desfavorables sobre personas, sistemas naturales y sectores económicos debido a la ocurrencia de condiciones climáticas adversas (Bili y Garreaud, 2020). Su magnitud depende de la probabilidad e intensidad de las amenazas, la exposición de la población o sistemas afectados, además de su vulnerabilidad intrínseca, incluyendo su capacidad de respuesta y adaptación (CR2, 2018).

La gestión del riesgo climático se convierte en una herramienta clave para el desarrollo sustentable del sector vitícola (van Leeuwen *et al.*, 2024). El riesgo climático puede evaluarse mediante el desarrollo de índices que permiten cuantificarlo indirectamente a través de la estimación de indicadores que dan cuenta de las condiciones climáticas y socioeconómicas del territorio (Castañeda *et al.*, 2019). Sin embargo, no existe una única forma de cálculo, ya que generalmente se presentan a partir de estudios de caso individuales y dependen del enfoque adoptado (MMA, 2020), así como de la información disponible.

Montalba *et al.* (2013) utilizaron el Índice de Riesgo Holístico (IRH) para medir la resiliencia socioecológica en comunidades campesinas e indígenas del secano interior en la región de La Araucanía. Este índice incluyó 12 indicadores distribuidos en los componentes de vulnerabilidad, capacidad de respuesta y amenaza, considerando factores como la intensidad y frecuencia de la sequía, el contexto agroecológico y las capacidades socio-productivas del sistema para enfrentar la escasez hídrica o sequía. El CR2 (2018), mediante un marco para la evaluación de la vulnerabilidad climática de Chile propuso una metodología basada en la revisión de literatura, ofreciendo consideraciones y recomendaciones generales para los distintos sectores y ámbitos territoriales frente al CC. El Ministerio de Medio Ambiente (2020) elaboró un proyecto para la evaluación del riesgo al CC siguiendo la guía del quinto informe de evaluación (AR5) del IPCC (IPCC, 2014), combinando componentes de exposición, sensibilidad y amenaza para generar mapas de riesgo climático en Chile.

El CC acentúa la vulnerabilidad de los territorios agrícolas y hace necesario aumentar la resiliencia a través de mecanismos de respuesta y de adaptación (Rojas, 2016). Los factores que determinan

la vulnerabilidad del sector agrícola guardan relación con aspectos de los distintos tipos de capital: financiero, humano, tecnológico, natural y social (CEPAL-FAO-IICA, 2017). La resiliencia es el término opuesto de la vulnerabilidad, un sistema resiliente es menos sensible a las necesidades climáticas y tiene capacidad de adaptarse y recuperarse ante perturbaciones (IPCC, 2001; Boer *et al.*, 2015). La resiliencia del sistema vitícola puede fortalecerse mediante la adopción de prácticas de manejo específicas, como la modificación en la fecha de poda y cosecha, la implementación de sistemas de riego por goteo y el uso de portainjertos resistentes a la sequía (Zurita-Silva *et al.*, 2020).

Estoque *et al.* (2022), analizó 464 estudios que evaluaron vulnerabilidad climática, entre 2017 y 2020, y concluyeron que el 43 % de ellos utilizó el marco conceptual del cuarto informe de evaluación (AR4) del IPCC, un 3 % adoptó el marco conceptual del AR5 del IPCC, y el 52 % aplicó marcos alternativos. El bajo nivel de adopción del AR5 se debe en parte a la dificultad de operacionalizar sus conceptos y a la ausencia de una guía práctica clara, especialmente para su aplicación a nivel local (Tangney, 2019; Estoque *et al.*, 2022).

Los índices de vulnerabilidad y resiliencia son herramientas de evaluación y adaptación que permiten identificar las debilidades estructurales de los territorios agrícolas y orientar la implementación de políticas públicas que fomenten la sostenibilidad y competitividad del sector agrícola (CR2, 2018). Hasta el momento, las evaluaciones del riesgo climático se han limitado a aproximaciones conceptuales, y las estimaciones numéricas asociadas a índices se han concentrado principalmente en la evaluación individual de los subcomponentes del riesgo climático, la vulnerabilidad y resiliencia (CR2, 2018; FAO-UNDP, 2021). Esta fragmentación dificulta la interpretación de los resultados para los tomadores de decisiones ya que los distintos índices no siempre convergen. En este sentido, la integración de estos indicadores en una metodología unificada facilitaría su comprensión e implementación.

El desarrollo de metodologías y estudios que se focalicen en el rol y las estrategias de respuesta y adaptación de la agricultura es fundamental frente al CC. Se requiere la integración de las capacidades naturales del medio, el conocimiento de las personas y la implementación de políticas públicas, acordes a las nuevas necesidades climáticas (IPCC, 2014).

Esta investigación se fundamentó en el marco conceptual del AR4 del IPCC (IPCC, 2007), además se utilizó la aproximación conceptual del CR2 (2018) y una adaptación numérica de Montalba *et al.* (2013). El análisis local del riesgo climático, a escala comunal, permite identificar diferencias microclimáticas de cordillera a costa, y patrones locales de vulnerabilidad, que facilitan la implementación de políticas específicas de adaptación. Estudios similares en España han demostrado que las respuestas adaptativas pueden ser más efectivas cuando se diseñan a escala local (Resco, 2015; Olcina y Vera-Rebolledo, 2016).

Este estudio desarrolló un Índice de Riesgo Climático Local (IRCL) que permite identificar la vulnerabilidad local y orientar la implementación de medidas de adaptación a nivel territorial. Este índice entrega el contexto territorial asociado al sector vitícola, bajo el escenario de CC RCP8.5. Los resultados de este índice proporcionan información para mejorar la resiliencia del sector vitícola, como una herramienta útil para los productores e instituciones ligadas al sector vitícola.

PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

¿Cómo varía el riesgo climático en las comunas productoras del sector vitícola chileno, entre las regiones de Atacama y Biobío, bajo escenarios futuros de cambio climático, y qué territorios presentan mayor exposición, sensibilidad, capacidad adaptativa y capacidad de respuesta?

OBJETIVO GENERAL

Desarrollar un Índice de Riesgo Climático Local para el sector vitícola en Chile.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Caracterizar el sector vitícola a escala comunal entre las regiones de Atacama y Biobío.
2. Evaluar indicadores de exposición, sensibilidad, capacidad adaptativa y capacidad de respuesta del sector vitícola chileno al cambio climático, a escala comunal, entre las regiones de Atacama y Biobío.

1. CAPÍTULO 1.

**CARACTERIZACIÓN DEL SECTOR VITÍCOLA CHILENO ENTRE LAS REGIONES
DE ATACAMA Y BIOBÍO**

1.1. INTRODUCCIÓN

La producción vitícola en Chile constituye un componente estratégico del sector silvoagropecuario, concentrándose principalmente entre las regiones de Atacama y Biobío. Actualmente, Chile es el cuarto mayor exportador mundial de vinos y el mayor exportador de uvas de mesa en términos de volumen (OIV, 2018).

La distribución geográfica de los viñedos en Chile se concentra en los valles transversales del centro-norte del país y la depresión intermedia (Rojas, 2019), en zonas de clima semi-árido, principalmente mediterráneo y, en algunos casos, templado (Sarricolea *et al.*, 2017; Verdugo-Vásquez *et al.*, 2023). Sin embargo, el cambio climático (CC) ha impulsado la expansión de la frontera vitícola hacia el sur del país, en respuesta a los nuevos requerimientos térmicos necesarios para el desarrollo de la vid (Arribillaga, 2020). Este escenario dinámico presenta tanto desafíos como oportunidades para la industria vitícola chilena. Las plantaciones de viñedos se están trasladando a las zonas del sur (Verdugo-Vásquez *et al.*, 2023). Este fenómeno se asocia al aumento de las temperaturas medias, a la disminución de las precipitaciones y a la mayor frecuencia de eventos extremos, factores que alteran los balances hídricos y modifican la aptitud de las zonas tradicionales para la producción vitícola (Salazar y Reyes, 2020).

En este contexto, la presente investigación tuvo como objetivo caracterizar el sector vitícola chileno, identificando las principales regiones donde se concentra la producción de vides a nivel nacional y analizando el aporte de cada una de ellas. Asimismo, buscó identificar vulnerabilidades locales específicas y orientar la implementación de medidas de adaptación a nivel territorial. Los resultados proporcionaron información clave para entender la importancia estratégica del sector a nivel país, y conocer las características propias que distinguen a las diversas regiones productoras. Analizar estos factores resulta fundamental para comprender el estado actual de la actividad vitícola y anticipar los desafíos que enfrentará ante los efectos del cambio climático y la transformación territorial que ya se vislumbra en el sector.

1.2. MATERIALES Y MÉTODOS

1.2.1. Área de estudio

El presente estudio se desarrolló en las comunas productoras de vides comprendidas entre las regiones de Atacama y Biobío, ubicadas entre las latitudes 26°00' S a 38°29' S; (Figura 1).

La superficie total del área de estudio comprende 180.994 ha de vides, entre viníferas, pisqueras y de mesa, donde se concentra el 99,9% de la superficie total nacional (CIREN, 2022a; SAG, 2023; Yáñez, 2024).



Figura 1. Área de estudio. Regiones entre Atacama y Biobío, Chile.

1.2.2. Estrategia de búsqueda

Se realizó un análisis descriptivo del sector vitícola a través de una revisión bibliográfica entre los años 2017–2024, que incluyó documentos generados por diferentes organismos del Estado de Chile relacionados con el territorio agrícola, su ruralidad, la vulnerabilidad y resiliencia, como el Ministerio de Agricultura (MINAGRI), Ministerio de Medio Ambiente (MMA), Ministerio de Obras Públicas (MOP), Instituto de Desarrollo Agropecuario (INDAP), Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (ODEPA), Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN), Servicio Agrícola Ganadero (SAG), Instituto Nacional de Estadística (INE), Comisión Nacional de Riego (CNR) y Dirección General de Aguas (DGA); (Cuadro 1). También se emplearon artículos científicos, documentos oficiales y manuales generados por organismos internacionales como la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), el Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA) y la Organización Internacional de la Viña y el Vino (OIV).

1.2.3. Selección y recopilación información

La metodología consideró una revisión pormenorizada, donde se seleccionó bibliografía pertinente y se ahondó en diferentes bases de datos para llevar a cabo el análisis a partir de la información reunida. La caracterización del sector vitícola se realizó a nivel comunal, entre las regiones de Atacama y Biobío, mediante una categorización de los parámetros: Superficie de producción; Cepaje cultivado; Tecnologías de riego; Trabajadores agrícolas; Exportación, PIB Silvoagropecuario; Institucionalidad agrícola; (Cuadro 1). Los parámetros se evaluaron mediante una comparación cuantitativa entre las comunas productoras de vides, utilizando los datos disponibles. En los casos donde no fue posible obtener datos a escala comunal, se emplearon datos a escala regional, considerando el peso de la actividad por comuna y/o región en relación con el total nacional.

Categoría	Descripción	Fuente de datos
Superficie producción comunal	Comparación (%) de superficie destinada exclusivamente a la producción de vides presente en las comunas/regiones productoras.	Servicio Agrícola Ganadero (SAG, 2023); Centro de información de Recursos Naturales (CIREN, 2022a).
Cepaje cultivado	Comparación (%) de producción de vides por cepaje blancos y tintos en las comunas/regiones productoras.	Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (ODEPA, 2024a; Valenzuela, 2024); Servicio Agrícola Ganadero (SAG, 2023).
Tecnologías de riego	Comparación (%) de superficie/parcelas de vides regadas con sistema de tecnificado en las comunas/regiones productoras.	Instituto Nacional de Estadísticas (INE, 2022a).
Trabajadores agrícolas	Comparación (%) de trabajadores agrícolas en las comunas/regiones productoras de vides.	Instituto Nacional de Estadísticas (INE, 2022b); Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (Yáñez, 2024; Contreras, 2024);

Exportación	Exportación vitícola (de vinos y/o uva de mesa) a escala regional/nacional.	Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (Buzzetti, 2023; Valenzuela, 2023).
Producto Interno Bruto (PIB) Silvoagropecuario	Comparación (%) de la contribución (%) que realizan las comunas/regiones productoras de vides al total del PIB Silvoagropecuario.	Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (ODEPA, 2024b).
Institucionalidad agrícola	Comparación (%) de presencia de INDAP en las comunas/regiones productoras de vides. *Su participación se evaluará en función del número de usuarios INDAP presentes en la región.	Instituto de Desarrollo Agropecuario (INDAP, 2022a).

Cuadro 1. Categorías de la caracterización comunal del sector vitícola en Chile entre las regiones de Atacama y Biobío.

1.3. RESULTADOS

1.3.1. Caracterización del sector vitícola entre las Regiones de Atacama y Biobío

El sector vitícola se caracterizó porque la superficie de producción de vides se concentró principalmente entre las Regiones de Atacama y Biobío, cubriendo 180.994,5 ha de las 181.163,7 ha de vides catastradas a nivel nacional, equivalente al 99,9% del total (SAG, 2023; CIREN, 2022a). La región con mayor superficie cultivada es la del Libertador Bernardo O’Higgins (en adelante O’Higgins) con 54.151 ha, seguida por el Maule con 52.675 ha, las que en su conjunto concentran el 59,0% de la producción de vides (viníferas, pisqueras y de mesa). Seguidas por las regiones de Coquimbo (10,5%); Valparaíso (10,1%); Metropolitana (9,5%); Ñuble (5,7%); Atacama (3,6%) y Biobío (1,5%); (Figura 2; Anexo 1.1).

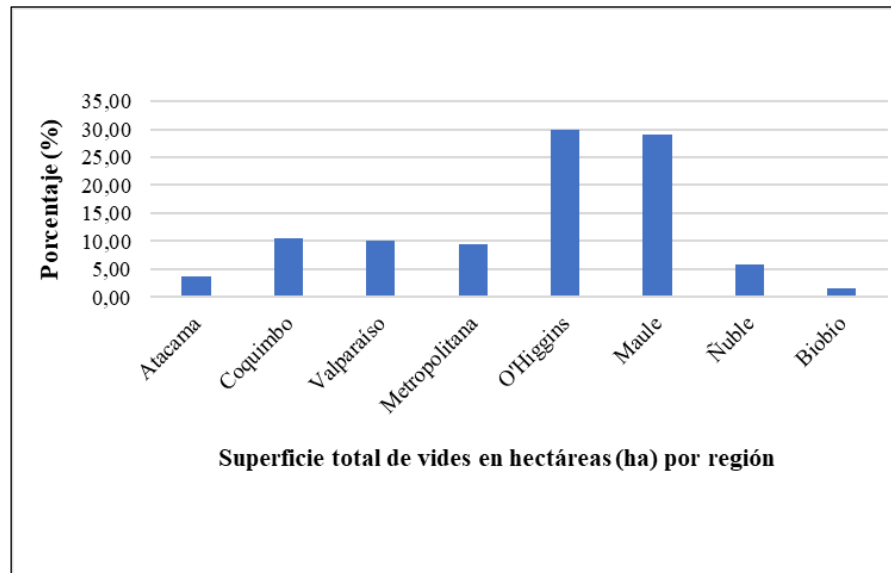


Figura 2. Porcentaje de la superficie total de vides (viníferas, pisqueras y de mesa) cultivadas por región.

A propósito, es que Chile se organiza en Regiones Vitícolas según geografía y clima, por medio del Decreto de Ley N°464. Estas regiones están definidas oficialmente por ley. El decreto divide el territorio vitícola chileno en seis Regiones Vitícolas: Atacama, Coquimbo, Aconcagua, Valle Central, Sur y Austral, esta última incorporada posteriormente como región emergente; (Anexo 1.2).

Los resultados de la caracterización evidenciaron las comunas que presentaron mayor superficie de vides, para caso de las regiones más norte analizadas, en la Región Vitícola de Atacama (Valles del Copiapó y Huasco) destacó Tierra Amarilla con 4.915,3 ha. Mientras que en la Región Vitícola de Coquimbo, en el Valle del Elqui, fue la comuna de Elqui quien presentó la mayor superficie de producción. En el Valle del Limarí, fueron las comunas de Ovalle y Monte Patria, con 7.311,0 ha y 4.253,7 ha, respectivamente. En el Valle del Choapa, Salamanca presentó la superficie cultivada de vides más extensa con 1.696,8 ha.

Avanzando hacia el sur, a la altura de la región de Valparaíso, se puede distinguir entre el Valle Vitícola de Aconcagua que las comunas de San Felipe (2.227,1 ha), San Esteban (1.935,1 ha) y Calle Larga (1.106,9 ha) fueron las que presentaron mayor superficie de producción. Mientras que en el Valle de Casablanca, la comuna homónima presenta una superficie de 4.864,7 ha de vides. En el caso del Valle de San Antonio, la comuna que recibe el mismo nombre fue quien presentó mayor superficie con 1.524,1 ha. En la región Vitícola del Valle Central, dentro del Valle del Maipo las comunas que presentaron mayor superficie fueron Buin (3.138,1 ha), Paine (2.526,8 ha), Isla de Maipo (2.156,9 ha), Melipilla (1.432,3 ha). En el Valle de Colchagua fueron las comunas de Peralillo (4.842,5 ha), Marchihue (4.609,1 ha), Palmilla (3.996,7 ha), Santa Cruz (3.996,1 ha), Nancagua (3.293, 0 ha), San Fernando (2.909,1 ha), Lolol (2.397,2 ha) y Placilla (2.135,9 ha). Mientras que en el Valle del Cachapoal fueron las comunas de San Vicente (4.235,1 ha), Las Cabras (2.597,7 ha) y Requínoa (2.463,4 ha). En el caso del Valle de Curicó, las comunas de Molina (4.752,3 ha), Penciahue (4.565,3 ha), Sagrada Familia (3.105,6 ha), Curicó (3.070,6 ha). Para el caso del Valle del Maule, fueron las comunas de San Javier (8.843,9 ha), Cauquenes (7.955,9 ha), Villa Alegre (3.060,1 ha), San Clemente (2.767,0 ha), Río Claro (2.387,9 ha) y Talca (2.133,1 ha) quienes presentaron mayor superficie productiva.

Finalmente, en cuanto a la Región Vitícola del Sur, se distingue en el Valle del Itata, las comunas con mayor superficie cultivada: Coelemu (1.623,8 ha), Portezuelo (1.574,4 ha), Quillón (1.284,9 ha), Ránquil (1.222,8 ha) y Florida (362,7 ha). Mientras que en el Valle del Biobío fueron las comunas de Mulchén (846,9 ha), Negrete (440,1 ha) y Yumbel (421,8 ha).

Por otra parte, la exportación de vinos desde Chile durante el año 2022 alcanzó un volumen total de 829,6 millones de litros, por un monto de 1.897,8 millones de dólares (Buzzetti, 2023; Valenzuela, 2023). Si bien se observa una fluctuación en las exportaciones durante la última década, la tendencia general ha sido al alza (Figura 3). Mientras tanto, la exportación de uva de mesa alcanzó las 605.209 toneladas, equivalentes a USD 876 millones FOB, posicionándose como la segunda especie frutal más exportada durante 2022 (Pefaur, 2022).

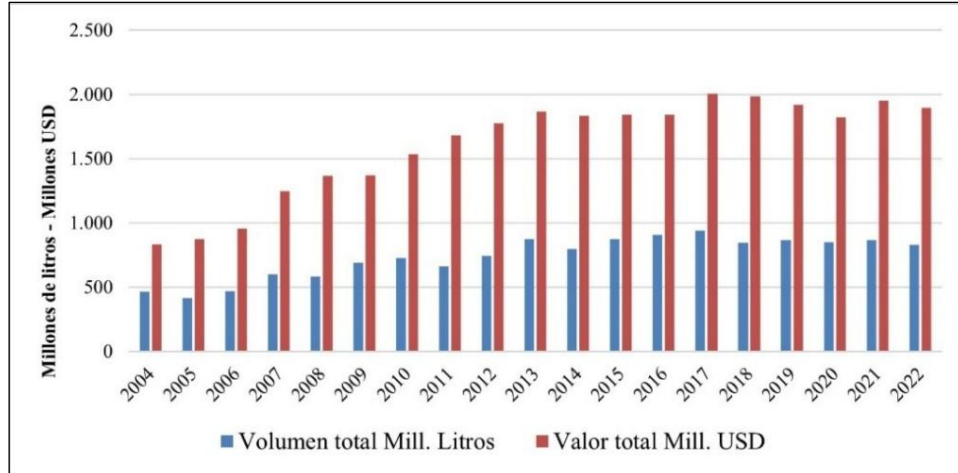


Figura 3. Exportaciones de vinos total en volumen (Millones de litros) y valor total (Millones de USD) a nivel nacional. Evolución entre el período 2002 a 2022. **Fuente:** Boletín del vino 2023. Publicación de la Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (ODEPA); (Valenzuela, 2023).

Respecto al tipo de Cepaje cultivado, las vides de vinificación de Cepajes Tintos alcanzan 95.000,6 ha, mientras que los Cepajes Blancos ascienden a 34.015,9 ha a nivel nacional (Figura 4; Anexo 1.3). El 99,9% se concentra del total entre Atacama y Biobío. Para el caso de las cepas Blancas la principal región que destaca con las mayores superficies cultivadas es Maule, representando el 40,8% del total, seguida por O'Higgins (17,4%), la R. de Valparaíso (15,9%) y R. de Ñuble (12,5%), Coquimbo (5,5%), Metropolitana (3,9%) y Biobío (3,8%). Para el caso de las cepas Tintas las principales regiones productoras se concentran en el Valle Central, en Maule (40,7%), O'Higgins (37,4%), Metropolitana (9,5%), Ñuble (6,5%), Valparaíso (3,1%), Biobío (1,5%) y Coquimbo (1,2%), respectivamente; (Figura 5; Anexo 1.3).

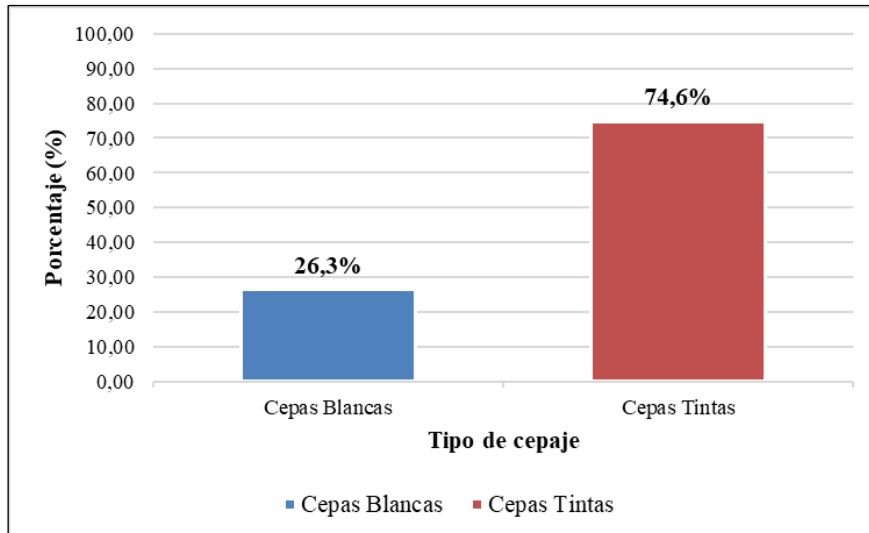


Figura 4. Porcentaje de superficie total de vides viníferas, según tipo de Cepaje, entre las regiones de Atacama y Biobío.

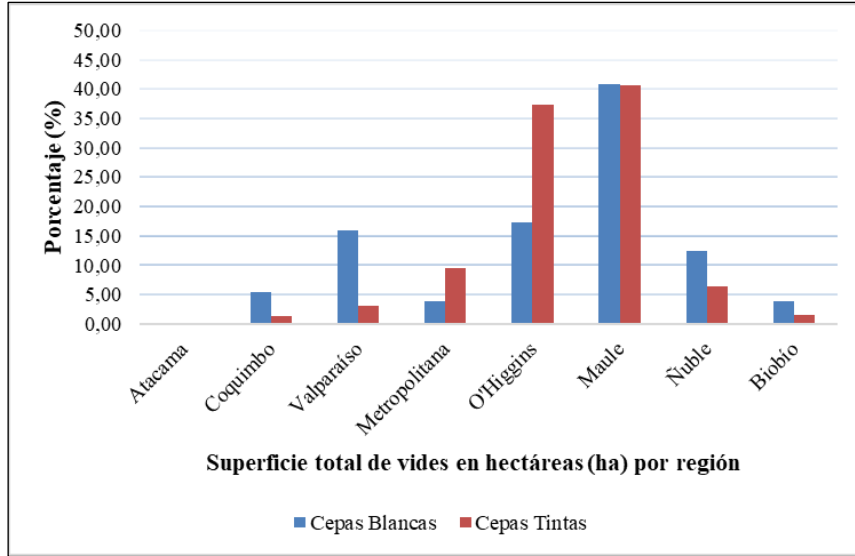


Figura 5. Porcentaje de superficie total de vides viníferas, según tipo de Cepaje, por región.

En relación con la implementación de tecnologías de riego, la superficie regada entre las comunas productoras de vides, entre las regiones de Atacama y Biobío, fue de 87.907,1 ha (INE, 2022a). De ellas, 73.741,7 ha presentan un riego tecnificado de tipo microriego: goteo o cinta, microaspersión o microjet, representa el 84,6%, sin embargo, destaca el riego por goteo el cual se posiciona como el método más utilizado con 73.297,1 ha. En contraste, las otras 14.165,5 ha muestran sistemas de riegos por tendido, surco o bien, otro sistema de riego tradicional, correspondiente al 16,4% restante de superficie regada (ODEPA, 2024b); (Figura 6).

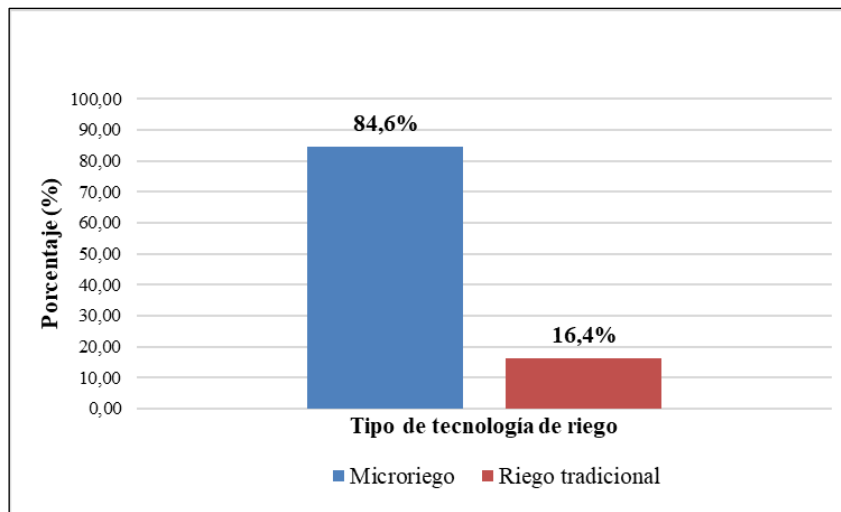


Figura 6. Porcentaje de superficie total de vides regadas, según tecnología de riego, entre las regiones de Atacama y Biobío.

Por otra parte, los trabajadores agrícolas, entre Atacama y Biobío, contratados de manera permanente en el año agrícola 2020-2021 (INE, 2022b), fue de 99.384 de un total de 131.319 a nivel nacional. El mayor número de trabajadores se encontró en las región de O'Higgins (17,4%), seguido por las regiones de Maule (16,7%), Valparaíso (13,2%), Metropolitana (11,4%),

Coquimbo (6,9%), Ñuble (5,2%), Biobío (3,6%) y Atacama (1,3%); (Figura 7). Así mismo, los trabajadores agrícolas contratados de forma temporal alcanzaron un número de 1.624.259 de 1.904.726, siendo la región del Maule la que presentó un mayor número de trabajadores agrícolas con 390.856 personas participantes (24,1% del total), en segundo lugar siguió O'Higgins (21,3%), seguida por las regiones del Biobío (16,1%), Valparaíso (15,1%), Metropolitana (9,8%), Ñuble (6,5%), Coquimbo (4,6%) y Atacama (2,5%); (Figura 8).

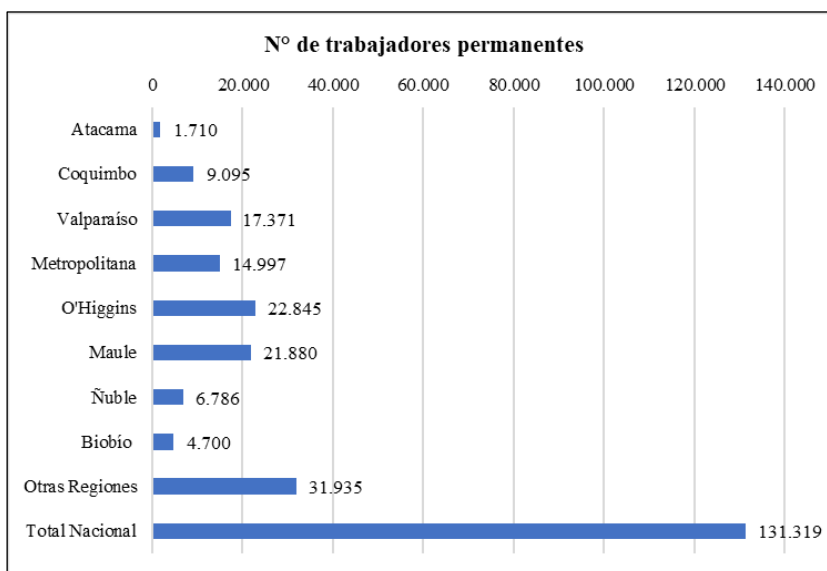


Figura 7. Trabajadores agrícolas permanentes por región y a nivel nacional, año agrícola de referencia 2020/2021.

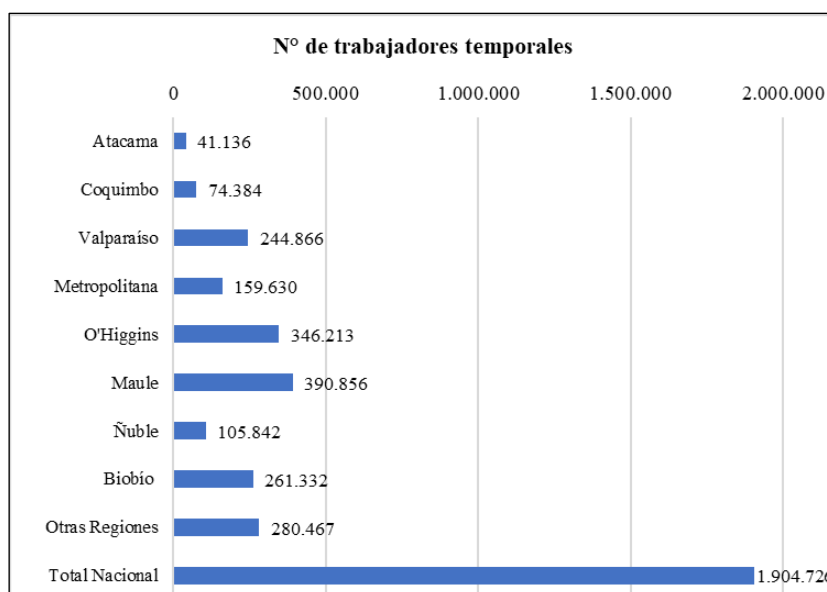


Figura 8. Trabajadores agrícolas temporales por región y a nivel nacional, año agrícola de referencia 2020/2021.

En términos económicos, el aporte del Producto Interno Bruto Silvoagropecuario (PIB SAP) durante el año 2022 fue de 5.095 Miles de Millones de pesos entre las regiones de Atacama y

Biobío (ODEPA, 2024b), donde la mayor participación fue obtenida por O'Higgins, Maule, Metropolitana y Valparaíso, con 21,8%, 19,5%, 11,6% y 9,8%, respectivamente; (Figura 9).

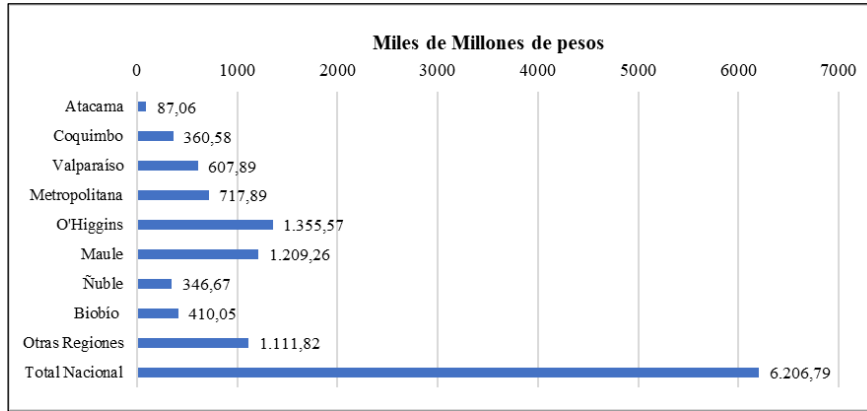


Figura 9. Aportes del Producto Interno Bruto (PIB) Silvoagropecuario (SAP) año 2022, por región y a nivel nacional.

Con respecto a la institucionalidad agrícola, a nivel nacional está encabezada por el Ministerio de Agricultura (MINAGRI). Dentro de las instituciones del MINAGRI, el Instituto de Desarrollo Agropecuario (INDAP) es una de las más importantes, puesto que trabaja directamente con los agricultores y es la encargada de “desarrollar y gestionar una diversidad de programas de financiamiento, asesorías y capacitación, dirigidos a los pequeños productores agrícolas, campesinos y sus familias” (INDAP, 2022a; INDAP, 2023b). INDAP a nivel país cuenta con 16 Direcciones Regionales, 114 agencias de área y 22 oficinas de área. En el año 2022 contó con una dotación autorizada de 1.597 funcionarios de planta y 75 funcionarios en calidad de suplencia o reemplazo, entre ellos profesionales, técnicos, administrativos, auxiliares, directivos y expertos (INDAP, 2022b). El total a nivel nacional de usuarios/as de INDAP para el año 2022 fue de 171.552; mientras que los usuarios/as entre las regiones de Atacama y Biobío fue de un total de 84.149, los que se distribuyeron de mayor a menor participación, en las regiones de Maule, Biobío, O'Higgins, Ñuble, Coquimbo, Valparaíso y Atacama; (INDAP, 2022a); (Figura 10).

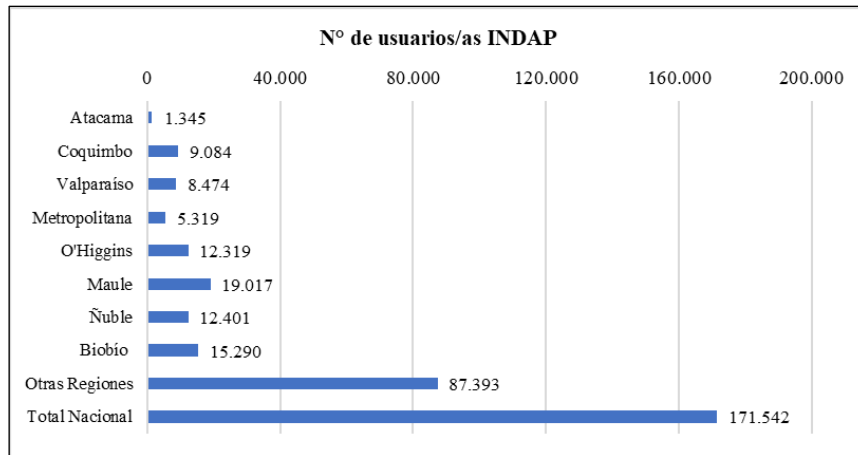


Figura 10. Institucionalidad agrícola. Cantidad de usuarios y/o usuarias INDAP durante el año 2022, por región y a nivel nacional.

1.4. DISCUSIÓN

1.4.1. Caracterización del sector vitícola entre las Regiones de Atacama y Biobío

La producción vitícola en Chile se concentra en las regiones del centro-sur, especialmente en la Región Vitícola del Valle Central (regiones entre Valparaíso y Maule), debido a condiciones agroclimáticas favorables para el desarrollo de la vid (Rojas, 2019). Estudios previos han señalado que estas regiones presentan condiciones óptimas de temperatura, horas de frío y acumulación térmica, factores determinantes para el desarrollo fenológico de las vides y la calidad enológica de los vinos (Babilonia *et al.*, 2019). Las regiones de O'Higgins y Maule destacan con sus superficies de vides destinadas a la vinificación; en conjunto concentran el 78,0% de la superficie de cepas tintas, reflejando una especialización productiva hacia vinos tintos de alta calidad, en línea con las tendencias globales de consumo y producción (SAG, 2023). El sector vitivinícola es clave para el PIB silvoagropecuario, concentrándose en las regiones de O'Higgins, Maule y Metropolitana, y generando el 45,4% del empleo agrícola en O'Higgins y Maule (INE, 2022b). Sin embargo, la alta dependencia de mano de obra temporal subraya la necesidad de fortalecer políticas laborales de formalización y estabilidad laboral para asegurar la continuidad productiva y la seguridad social de los trabajadores (CPC, 2024). Asimismo, potenciar el trabajo agrícola local con el fin de enfrentarse a desafíos como lo es la expansión hacia nuevas regiones.

En cuanto al uso de riego tecnificado responde a la creciente escasez hídrica y al estrés térmico en las zonas vitícolas chilenas (Engler *et al.*, 2017). Bajo el escenario de cambio climático, es crucial fortalecer el uso de riego tecnificado y expandir las fronteras vitícolas hacia nuevas regiones. El rol de las instituciones estatales será clave para apoyar la adaptación y/o transformación de los espacios productivos a las nuevas demandas, en contexto de CC (Antúnez *et al.*, 2009), y donde es primordial tener como eje central la sostenibilidad de la producción y el bienestar de las comunidades en los distintos territorios.

Por otro lado, entre las limitaciones encontradas para llevar adelante la caracterización del sector vitícola, destaca la falta de datos en algunos parámetros que no fue posible obtener a escala comunal; sin embargo, la mayoría de la información se logró recopilar a nivel regional.

1.5. CONCLUSIONES

La caracterización del sector vitícola entre las regiones de Atacama y Biobío evidencia la centralidad de este sector en la matriz productiva silvoagropecuaria nacional. La alta concentración de superficie en las regiones de O'Higgins y Maule, que juntas representan más de la mitad de la producción de vides a nivel país, refleja una especialización territorial impulsada por condiciones agroclimáticas favorables y una tradición histórica consolidada. La distribución de los cepajes, con un predominio de variedades tintas, responde tanto a las exigencias de los mercados internacionales como a la búsqueda de productos de alto valor enológico. Al mismo tiempo, el avance del riego tecnificado en estas regiones da cuenta de los esfuerzos del sector por adaptarse a escenarios de creciente escasez hídrica, aunque aún persiste una proporción de superficie regada mediante métodos tradicionales, lo que indica espacios de mejora.

En el ámbito laboral, la fuerte dependencia de trabajadores agrícolas temporales, especialmente en Maule y O'Higgins, regiones agrícolas, revela tanto la importancia de la viticultura como motor de empleo como también una vulnerabilidad estructural en términos de estabilidad laboral y condiciones de trabajo, que debe ser abordada en el contexto de desafíos futuros. Por otra parte, el dinamismo exportador de vinos y uvas de mesa confirma la relevancia económica del rubro, mientras que el papel de instituciones como INDAP resulta clave para fortalecer la inclusión de pequeños productores en las cadenas de valor vitivinícolas.

Frente al cambio climático, los resultados de esta caracterización destacan la necesidad de estrategias de adaptación que consideren tanto la gestión sostenible de los recursos hídricos como la expansión y diversificación de las zonas vitícolas. El fortalecimiento de la institucionalidad, la innovación tecnológica y la resiliencia socioeconómica del rubro serán factores determinantes para asegurar la sostenibilidad de la viticultura chilena en el mediano y largo plazo.

1.6. LITERATURA CITADA

- Antúnez, A., Felmer, S., Mora, D. (2009). Eficiencia de riego en sistemas localizados. *En*: Antúnez, A., y Ferlmer, S. Nudo Tecnológico de Riego en el Secano: Región de O'Higgins: Fase II. (pp. 73-90). Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA). Boletín INIA N°190. Litueche, Chile. Recuperado de: <https://bibliotecadigital.ciren.cl/server/api/core/bitstreams/031c74be-9729-4dcb-b2d8-c24006f9de45/content>
- Arribillaga, D. (2020). Investigación y desarrollo en vides: Vitivinicultura en la zona más austral del mundo. *En*: García, M., Barba, P., y Sellés, G. (eds.). Investigación y desarrollo en vides. p. 56. Santiago, Chile. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA). Recuperado de: <https://biblioteca.inia.cl/server/api/core/bitstreams/a8dcd53f-348b-408a-8a76-14fc0483e346/content>
- Babilonia, R., Sánchez, R., y Páez, D. (2019). Factores condicionantes para la localización óptima de la agroindustria vitivinícola en Valle del Maule, Chile. *RIVAR* 6(18):1-13. DOI:10.35588/rivar.v6i18.4155
- Buzzetti, C. (2023). Boletín del Vino: producción, precios y comercio exterior 2020 – 2021 –2022. Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (ODEPA). Santiago, Chile. Recuperado de: <https://bibliotecadigital.odepa.gob.cl/bitstream/handle/20.500.12650/72051/BVino012023.pdf>
- CIREN (Centro de Información de Recursos Naturales). (2020a). Catastro Frutícola: Principales resultados Región de Valparaíso/2020. Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (ODEPA). Recuperado de: <https://bibliotecadigital.ciren.cl/handle/20.500.13082/31687>
- CIREN (Centro de Información de Recursos Naturales). (2020b). Catastro Frutícola: Principales resultados Región Metropolitana/2020. Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (ODEPA). Recuperado de: <https://bibliotecadigital.ciren.cl/handle/20.500.13082/31688>
- CIREN (Centro de Información de Recursos Naturales). (2021a). Catastro Frutícola: Principales resultados Región de Atacama/Septiembre 2021. Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (ODEPA). Recuperado de: <https://bibliotecadigital.ciren.cl/handle/20.500.13082/33266>
- CIREN (Centro de Información de Recursos Naturales). (2021b). Catastro Frutícola: Principales resultados Región de Coquimbo/Septiembre 2021. Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (ODEPA). Recuperado de: <https://bibliotecadigital.ciren.cl/handle/20.500.13082/33269>
- CIREN (Centro de Información de Recursos Naturales). (2021c). Catastro Frutícola: Principales resultados Región de O'Higgins/Septiembre 2021. Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (ODEPA). Recuperado de: <https://bibliotecadigital.ciren.cl/handle/20.500.13082/31688>
- CIREN (Centro de Información de Recursos Naturales). (2022a). Catastro Frutícola 2022: Principales resultados Región del Maule/Septiembre 2022. Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (ODEPA). Recuperado de: <https://bibliotecadigital.ciren.cl/items/b5c24701-6e14-4516-bc29-e76989b01da1>
- CIREN (Centro de Información de Recursos Naturales). (2022b). Catastro Frutícola 2022: Principales resultados Región de Ñuble/Septiembre 2022. Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (ODEPA). Recuperado de: <https://bibliotecadigital.ciren.cl/items/89fcf553-0e89-49b7-85cd-e27385531678>
- CIREN (Centro de Información de Recursos Naturales). (2022c). Catastro Frutícola 2022: Principales resultados Región de Biobío/Septiembre 2022. Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (ODEPA). Recuperado de: <https://bibliotecadigital.ciren.cl/items/1a60774d-c080-49a3-9009-9f917360d19f>

- Contreras, P. (2024). Boletín Bimestral de Empleo. Oficina de Estudios y Políticas Agropecuarias (ODEPA). Ministerio de Agricultura, Gobierno de Chile. Recuperado de: <https://bibliotecadigital.odepa.gob.cl/bitstream/handle/20.500.12650/73393/BEmpleo062024.pdf>
- CPC (Confederación de la Producción y del Comercio). (2024). Informalidad Laboral: Propuestas para un Futuro Mejor: por un trabajo formal y un país desarrollado. Recuperado de: <https://www.cpc.cl/wp-content/uploads/2024/04/Propuestas-Mesa-de-Formalidad-Laboral-2024.pdf>
- Decreto N° 464, de 14 de diciembre de 1994, Establece Zonificación Vitícola y fija normas para su utilización. *Diario Oficial de la República de Chile*, de 26 de mayo de 1995. Ministerio de Agricultura. <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=13601>
- Decreto N° 56, de 28 de diciembre de 2017, que modifica el Decreto N° 464, de 1994, del Ministerio de Agricultura, que Establece zonificación vitícola y fija normas para su utilización. *Diario Oficial de la República de Chile*, de 25 de mayo de 2018. Ministerio de Agricultura. <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1118954>
- Engler, A., Bopp, C., y Jara-Rojas, R. (2017). Tecnologías de riego en la producción de vid vinífera en Chile: aspectos técnicos, económicos y sociales. Universidad de Talca. Talca, Chile. <https://hdl.handle.net/20.500.14001/62401>
- INDAP (Instituto de Desarrollo Agropecuario). (2022a). INDAP en cifras. Recuperado de: <https://www.indap.gob.cl/biblioteca/indap-en-cifras-2022>
- INDAP (Instituto de Desarrollo Agropecuario). (2022b). Acceso a la información relevante. Ministerio de Agricultura, Gobierno de Chile.
- INDAP (Instituto de Desarrollo Agropecuario). (2023a). Instrumentos Financieros INDAP para la AFC. Presentación en la Jornada de Capacitación de la Asociación Chilena de Municipalidades (ACHM), La Serena, Chile. Recuperado de: <https://www.achm.cl/wp-content/uploads/2023/08/2.-Instrumentos-de-Asistencia-Financiera-INDAP.-ACHM-2023.pdf>
- INDAP (Instituto de Desarrollo Agropecuario). (2023b). Estrategia INDAP 2023 –2030: Por una Agricultura Familiar Campesina e Indígena más sostenible, inclusiva y resiliente. Ministerio de Agricultura. Gobierno de Chile. Recuperado de: https://www.indap.gob.cl/sites/default/files/2023-08/libro-estrategia-2023-2030vff.pdf?utm_source
- INE (Instituto Nacional de Estadísticas). (2022a). VIII Censo Agropecuario y Forestal año agrícola 2020-2021: Cuadros Estadísticos: Superficie Principal sistema riego. Instituto Nacional de Estadísticas (INE). Santiago, Chile. Instituto Nacional de Estadísticas (INE). Santiago, Chile.
- INE (Instituto Nacional de Estadísticas). (2022b). VIII Censo Agropecuario y Forestal, año agrícola 2020 – 2021: Cuadros Estadísticos: Trabajo agrícola. Instituto Nacional de Estadísticas (INE). Santiago, Chile.
- ODEPA (Oficina de Estudios y Políticas Agrarias). (2024a). Superficie y producción de vides para vinificación, de mesa y pisqueras. Recuperado de: <https://bibliotecadigital.odepa.gob.cl/handle/20.500.12650/73265>
- ODEPA (Oficina de Estudios y Políticas Agrarias). (2024b). Estadísticas Silvoagropecuarias. Santiago, Chile. ODEPA. Recuperado de: https://bibliotecadigital.odepa.gob.cl/bitstream/handle/20.500.12650/73247/Estadisticas_Silvoagropecuarias2024.pdf
- OIV (Organización Internacional de la Viña y el Vino). (2018). Informe estadístico de la OIV sobre la vitivinicultura mundial. Organización Internacional de la Viña y el Vino. París, Francia.

- Pefaur, J. (2022). Boletín de la fruta: Diciembre 2022. Recuperado de: <https://www.odepa.gob.cl/publicaciones/boletines/boletin-de-fruta-diciembre-2022>
- Rojas, G. (2019). La Geografía del vino chileno. Vinífera (eds.) Recuperado de: [https://vinifera.cl/documentos/LA GEOGRAFIA DEL VINO CHILENO VINIFERA 2019.pdf](https://vinifera.cl/documentos/LA_GEOGRAFIA_DEL_VINO_CHILENO_VINIFERA_2019.pdf)
- SAG (Servicio Agrícola Ganadero). (2023). Catastro Vitícola Nacional 2022. Ministerio de Agricultura. Gobierno de Chile. Santiago, Chile. <https://www.sag.gob.cl/content/catastro-viticola-nacional-2022>
- Salazar, C., y Reyes, M. (2020). Efectos del cambio climático en la vitivinicultura y alternativas para asegurar la sustentabilidad y calidad del viñedo en el Valle Central. Tierra Adentro N°112. En: Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA) (eds.). Preparando la agricultura para el Cambio Climático. p. 39-41. Ministerio de Agricultura. Gobierno de Chile. <https://hdl.handle.net/20.500.14001/5468>
- Sarricolea, P., Herrera-Ossandon, M., y Meseguer-Ruiz, O. (2017). Climatic regionalisation of continental Chile. *Journal of Maps*, 13(2):66–73. DOI:[10.1080/17445647.2016.1259592](https://doi.org/10.1080/17445647.2016.1259592)
- Valenzuela, A. (2023). Boletín del vino: producción, precios y comercio exterior, abril 2023. Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (ODEPA). Santiago, Chile. Recuperado de: <https://www.odepa.gob.cl/publicaciones/boletines/boletin-del-vino-abril-2023>
- Valenzuela, A. (2024). Boletín del Vino: producción, precios y comercio exterior: Avance a mayo 2024. Oficina de Estudios y Políticas Agropecuarias (ODEPA). Santiago, Chile. Recuperado de: <https://www.odepa.gob.cl/publicaciones/boletines/boletin-del-vino-junio-2024>
- Verdugo-Vásquez, N., Orrego, R., Gutiérrez-Gamboa, G., Reyes, M., Zurita Silva, A., Balbontín, C., y Salazar-Parra, C. (2023). Climate trends and variability in the Chilean viticultural production zones during 1985-2015. *OENO One*, 57(1): 345-362. DOI:[10.20870/oeno-one.2023.57.1.7151](https://doi.org/10.20870/oeno-one.2023.57.1.7151)
- Yáñez, L. (2024). Ficha nacional: Actualización agosto 2024. Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (ODEPA). Recuperado de: <https://bibliotecadigital.odepa.gob.cl/handle/20.500.12650/69897>

1.7. ANEXOS

Anexo 1.1. Superficie total en hectáreas (ha) de vides (viníferas, pisqueras y de mesa) por región y a nivel nacional.

Regiones administrativas	Vides Pisqueras	Vides Viníferas	Total Vides Pisqueras + Viníferas	Vides de Mesa	Superficie Total de Vides (Pisqueras+Viníferas+ De mesa)	%
Arica		15,00	15,00	0,50	15,50	0,01
Tarapacá		3,95	3,95		3,95	0,00
Antofagasta		4,97	4,97		4,97	0,00
Atacama	558,70	55,49	614,19	5.986,83	6.601,02	3,64
Coquimbo	8.563,55	3.057,05	11.620,60	7.320,66	18.941,26	10,46
Valparaíso		8.379,61	8.379,61	9.969,77	18.349,38	10,13
Metropolitana		10.349,74	10.349,74	6.847,52	17.197,26	9,49
O'Higgins		41.414,88	41.414,88	12.736,14	54.151,02	29,89
Maule		52.511,54	52.511,54	163,49	52.675,03	29,08
Ñuble		10.395,94	10.395,94		10.395,94	5,74
Biobío		2.683,54	2.683,54		2.683,54	1,48
La Araucanía		104,15	104,15		104,15	0,06
Los Ríos		18,90	18,90		18,90	0,01
Los Lagos		19,30	19,30		19,30	0,01
Aysén		2,48	2,48		2,48	0,00
Total entre Atacama y Biobío			137.970,04	43.024,41	180.994,45	99,91
Total Nacional	9.122,25	129.016,54	138.138,79	43.024,91	181.163,70	100,00

Fuente: Elaboración propia a partir de la información recopilada del Catastro Vitícola Nacional 2022 (SAG, 2023) y Catastros Frutícolas Regionales 2020, 2021 y 2022 (CIREN, 2020a; CIREN 2020b; CIREN 2021a; CIREN, 2021b; CIREN, 2022a; CIREN, 2022b; CIREN, 2022c).

Anexo 1.2. Regiones Vitícolas, mediante el Decreto N°464, de 1994 y Decreto 56, de 2017 (modificación), donde se establece la zonificación vitícola oficial en Chile.

Región administrativa	Regiones Vitícolas	Valles o Subregión	Provincia	Zona	Comuna/Área
Atacama	Región Vitícola de Atacama	Valle de Copiapó			Copiapó.
		Valle de Huasco			Huasco.
Coquimbo	Región Vitícola de Coquimbo	Valle del Elqui			La Serena, Vicuña, Paiguano.
		Valle del Limarí			Ovalle, Monte Patria, Punitaqui, Río Hurtado.
		Valle del Choapa			Salamanca, Illapel.
Valparaíso	Región Vitícola de Aconcagua	Valle del Aconcagua	San Felipe de Aconcagua		Panquehue, Quillota, Hijuelas, Catemu, Llay-Llay, San Felipe, Santa María, Calle Larga, San Esteban.
			Los Andes		
			Quillota		
		Valle de Casablanca	Casablanca		Casablanca.

(Continúa)

(Continuación Anexo 1.2.)

Región administrativa	Regiones Vitícolas	Valles o Subregión	Provincia	Zona	Comuna/Área
Valparaíso	Región Vitícola de Aconcagua	Valle de San Antonio	San Antonio	Valle de Leyda	Definido por las comunas de San Antonio y Santo Domingo, Área de Lo Abarca, cuyo límite es la comuna de Cartagena, y las Áreas de Cartagena y Algarrobo (definidos por los límites de las comunas de mismo nombre)
			Marga Marga (comuna de Quilpué) Petorca (comuna de Zapallar)		Área del Valle del Marga-Marga: límite definido por la comuna de Quilpué y, el Área de Zapallar, cuyo límite está definido por la comuna de Zapallar.
Metropolitana	Región Vitícola del Valle Central	Valle Del Maipo	Todas las Provincias de la R.M		Peñalolén, La Florida, Pirque, Puente Alto, Buin, Isla de Maipo, Talagante, Melipilla, Alhué, María Pinto, Colina, Calera de Tango, Til Til, Lampa.
O'Higgins		Valle del Rapel	Cachapoal	Valle del Cachapoal	Rancagua, Graneros, Mostazal, Codegua, Olivar; Requínoa; Rengo, Malloa y Quinta de Tilcoco; Peumo, Pichidegua, Las Cabras y San Vicente; Machalí, Coltauco.
			Colchagua	Valle de Colchagua	San Fernando, Chimbarongo, Nancagua, Placilla, Santa Cruz, Chépica, Palmilla, Peralillo, Lolol, Marchigüe, Litueche, La Estrella, Paredones, Pumanque.
Cardenal Caro					

(Continúa)

(Continuación Anexo 1.2.)

Región administrativa	Regiones Vitícolas	Valles o Subregión	Provincia	Zona	Comuna/Área
Maule	Región Vitícola del Valle Central	Valle de Curicó	Curicó (Incluye la Provincia de Talca por la comuna de Río Claro)	Valle de Teno	Teno, Romeral, Rauco, Hualañé, Vichuquén, Licantén.
				Valle de Lontué	Curicó, Molina, Sagrada Familia, Río Claro.
		Valle del Maule	Talca (todas las comunas a excepción de Río Claro, Linares y Cauquenes)	Valle del Claro	Talca, San Clemente, Pencahue, Maule, Pelarco, San Rafael, Empedrado, Curepto.
			Talca, excepto Linares	Valle de Loncomilla	San Javier, Villa Alegre, Retiro, Parral, Linares, Yervas Buenas, Colbún, Longaví.
			Cauquenes	Valle del Tutuvén	Cauquenes.
Ñuble	Región Vitícola del Sur	Valle del Itata	Diguillín/Itata/Punilla		Chillán, Bulnes, Chillán Viejos, Ñiquén, Coelemu, Ránquil, Quillón, Portezuelo, Ninhue, Treguaco, Quirihue, San Nicolás, Bulnes y San Carlos.
			Concepción		Florida.
Biobío	Región Vitícola del Sur	Valle del Biobío	Biobío		Yumbel, Laja, Mulchén. Nacimiento, Negrete.
Araucanía		Valle del Malleco	Malleco		Angol, Collipulli, Ercilla, Los Sauces, Lumaco, Purén, Renaico, Traiguén, Victoria.
Araucanía	Región Vitícola Austral	Valle del Cautín	Cautín		Perquenco, Galvarino.
Los Lagos		Valle de Osorno	Osorno/Ranco		Osorno, San Pablo, Purranque, La Unión, Futrono.

Fuente: Ministerio de Agricultura. Decreto° N°464, 1994; Decreto N° 56, 2017.

Anexo 1.3. Superficie de vides de vinificación según tipo de Cepaje por región y a nivel nacional.

Región administrativa	Vides de Vinificación			
	Cepas Blancas	%	Cepas Tintas	%
Arica		0,00	15,00	0,02
Tarapacá	1,90	0,01	2,05	0,00
Antofagasta	1,06	0,00	3,91	0,00
Atacama	23,84	0,07	31,65	0,03
Coquimbo	1.868,92	5,49	1.188,13	1,25
Valparaíso	5.404,79	15,89	2.974,82	3,13
O'Higgins	5.904,00	17,36	35.510,88	37,38
Maule	13.890,21	40,83	38.621,33	40,65
Ñuble	4.252,02	12,50	6.143,92	6,47
Biobío	1.290,10	3,79	1.393,44	1,47
Araucanía	42,89	0,13	61,26	0,06
Los Ríos	13,70	0,04	5,20	0,01
Los Lagos	9,57	0,03	9,73	0,01
Aysén	1,55	0,00	0,93	0,00
Metropolitana	1.311,40	3,86	9.038,34	9,51
Total entre Atacama y Biobío	33945,28	99,79	94902,51	99,87
Total Nacional	34.015,95	100,00	95.000,59	100,00

Fuente: Catastro Vitícola Nacional 2022 (SAG, 2023).

2. CAPÍTULO 2.

**EVALUACIÓN DEL ÍNDICE DE RIESGO CLIMÁTICO LOCAL PARA EL SECTOR
VITÍCOLA EN REGIONES SEMI-ÁRIDAS Y MEDITERRÁNEAS DE CHILE
(<https://doi.org/10.3390/agriculture15121322>)**

Article

Assessing Climate Risk in Viticulture: A Localized Index for Semi-Arid and Mediterranean Regions of Chile

Katherine Cuevas-Zárate ^{1,2}, Donna Cortez ³, Jorge Soto ³ and Manuel Paneque ^{1,*}

¹ Faculty of Agricultural Sciences, University of Chile, Santa Rosa 11315, La Pintana, Santiago 8820808, Chile; katherine.cuevas@ug.uchile.cl (K.C.-Z.);

² Master Program in Territorial Management of Natural Resources, University of Chile, Santa Rosa 11315, La Pintana, Santiago 8820808, Chile

³ Fundación Bionostra Chile Research, Almirante Lynch 1179, San Miguel, Santiago 8920033, Chile; dcortez@bionostra.com (D.C.); jsoto@bionostra.com (J.S.)

* Correspondence: mpaneque@uchile.cl

Abstract: Viticulture contributes significantly to Chile's exports and GDP. However, the development and productivity of grapevines is threatened by climate change. Grapevines are grown in diverse regions; thus, adaptable tools for evaluating climate risk at the local level are required. In this study, a local climate risk index (LCRI) was developed to assess the vulnerability of Chilean viticulture (wine, table, and pisco grapes) in the current (2017–2024) and future (2046–2065) periods. Various components, including exposure, sensitivity, and adaptive and response capacities, were analyzed using different indicators based on municipal-level information. The results for the current period indicated that most municipalities were at medium risk, whereas future projections showed a marked increase in climate risk, principally due to changes in climate suitability. In the current period, the highest LCRI values were observed in semi-arid and mediterranean zones, particularly in the northern regions of Atacama and Coquimbo; in the future period, this situation intensified. In contrast, the lowest values in the current period occurred in the Maule region and further south, where the climate transitions from mediterranean to temperate conditions, and in the future period, valley and mountainous areas presented improvements in the index. Some municipalities showed improvement or stability with local adaptation efforts. The results highlight the urgent need for region-specific adaptation policies that prioritize water management, infrastructure, and increased capacities.

Keywords: vineyard; grapevine; climatic change; vulnerability; indicator; climatic suitability; adaptation



Academic Editor: Jordi Johnson-Maynard

Received: 25 April 2025

Revised: 3 June 2024

Accepted: 17 June 2025

Published: 19 June 2025

Citation: Cuevas-Zárate, K.; Cortez, D.; Soto, J.; Paneque, M. Assessing Climate Risk in Viticulture:

A Localized Index for the Semi-Arid and Mediterranean Regions of Chile.

Agriculture **2025**, *15*, 1322.

<https://doi.org/10.3390/agriculture15121322>

<https://doi.org/10.3390/agriculture15121322>

Copyright: © 2025 by the authors.

Licensee MDPI, Basel, Switzerland.

This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

2.1. Introduction

Grapevines, whether for wine or table consumption, comprise one of the world's largest crops, covering an estimated 7.2 million hectares in 2023 [1]. In Chile, wine grapes (71.68%), table grapes (23.00%), and pisco grapes (5.32%) cover 173,599 hectares [2], accounting for 13.32% of the country's agricultural land [3]. Viticulture plays a crucial role in Chile's agricultural and economic development, contributing 0.50% to the gross domestic product

and 16.50% to agricultural exports [4], positioning Chile as the leading wine exporter in the Americas and the fourth largest worldwide [5]. Chile also supplies 4.00% of the global table grape market, ranking as the world's sixth-largest producer and top exporter [6].

In Chile, viticulture is concentrated in semi-arid, mediterranean, and temperate zones, spanning from the Atacama to Biobío regions [7,8]. Due to anthropogenic climate change, more regions now meet the requirements for grapevine cultivation, and cultivation has been expanding southward [9].

Climatic factors are key to determining the distribution of grapevine varieties at the national level [10]. Different climate and environmental factors, such as rainfall and temperature, directly influence plant characteristics and cannot be controlled by the grape grower [11]. Variations in temperature and water negatively affect the development of grapevines, altering their sprouting, flowering, and ripening [12]. Of the climatic variables, air temperature is the most decisive factor in the growth cycle of the vine because it

influences the development of the phenological stages [12]. Research has indicated that in Chile's mediterranean zone, a 2.00 °C increase could alter the chemical composition of grapes [13], leading to reduced shoot growth, lower yields, and changes in alcohol and pH levels [14]. Climate change also increases irrigation demand and promotes the emergence and spread of new pests, diseases, and weeds [15]. Consequently, climate risk exacerbated by climate change profoundly impacts viticulture activity on a national and potentially global scale, affecting yields, the quality of grapevines and their products [14,16], and viable areas for production [17].

Under the RCP8.5 scenario, anthropogenic climate change is projected to cause a sustained average temperature increase of 1.90–3.00 °C in Chilean vine production areas between 2046 and 2060 and a reduction in winter rainfall of 40–100% [18]. Adapting viticulture to new climatic conditions and climate risk is a priority that will require tools to develop effective and locally targeted public policy [19,20].

Climate risk has the potential for unfavorable impacts on people, natural systems, and economic sectors due to the occurrence of adverse climatic conditions [21]. The magnitude of climate risk depends on the probability and intensity of hazards and the exposure of the affected population or systems, in addition to their intrinsic vulnerability, including their response and adaptation capacity [22].

The management of climate risk is crucial for the sustainable development of the agricultural sector and, in particular, the viticultural sector. Climate risk can be evaluated using indices to indirectly quantify indicators that account for the climatic and socioeconomic conditions of a territory [17,22]. In this context, risk indices—such as climate indices—help summarize territorial information across various components [23]. These components include exposure, which identifies areas potentially affected by climate change; sensitivity, which measures how much the system is influenced—positively or negatively—by climate variability; adaptive capacity, which evaluates the ability of a territory to manage and overcome adverse conditions in the short and medium terms; and response capacity, which refers to a system's ability to resist and remain viable in the face of change, considering both perceptions and capacity for action. To date, climate risk assessments have been limited to conceptual approaches, with numerical estimates focusing primarily on the individual evaluation of subcomponents, such as vulnerability and resilience [22,24,25]. This fragmentation complicates decision-makers' interpretation of results because different indices

often do not align. Integrating these indicators into a unified methodology would facilitate their understanding and application.

Indices have been developed on a global scale. In Colombia, Bohórquez-Piña assessed the climate risk of densely populated urban and rural cities using indicators for hazard, exposure, sensitivity, and adaptive capacity [26]. In addition, authors from the German watch organization developed an annual climate risk index (CRI), which is used in several countries to assess the impact of extreme events based on hydrological, meteorological, and climatological events [27]. Mexican researchers developed a municipal risk index for agriculture using a socioecological framework based on economic and socioeconomic indicators associated with maize production at the national level [28].

In Chile, the Ministry of Environment developed a climate change risk assessment for different productive activities in 2020 that combined exposure, sensitivity, and threat components, generating a territorial application index [29]. Other studies, such as that of Montalba et al. [30], developed a sociological risk index for peasant and indigenous agricultural communities in La Araucanía that included indicators (variables) distributed between vulnerability, response capacity, and threat components. However, this calculation did not consider the adaptive capacity component. Furthermore, the scale used was smaller and limited to the farm level.

This study developed a local climate risk index (LCRI) for the viticulture sector based on local climate data and statistics to identify risks and guide the implementation of adaptation measures at the territorial level from the Atacama to Biobío regions of Chile.

2.2. Materials and Methods

2.2.1. Study area

This study was conducted at the municipality level, which is the smallest state administration unit in Chile, with local information equivalent to that of a county in Chile. The study area encompassed the municipalities involved in viticulture—including wine, table grapes, and pisco—from the Atacama to Biobío regions (Figure 1). The included area accounts for 99.90% of the national grapevine area [31–33].

To the east of the study area, the Andes Mountains dominate, with altitudes ranging from 4500 to 2500 m above sea level, and to the west is the Pacific Ocean [34]. A semi-arid climate prevails between the Atacama and Valparaíso regions, whereas a mediterranean climate prevails between the Metropolitan and Biobío regions. In contrast, a temperate climate is predominant in the Andean region of Biobío [7] (Figure 1).

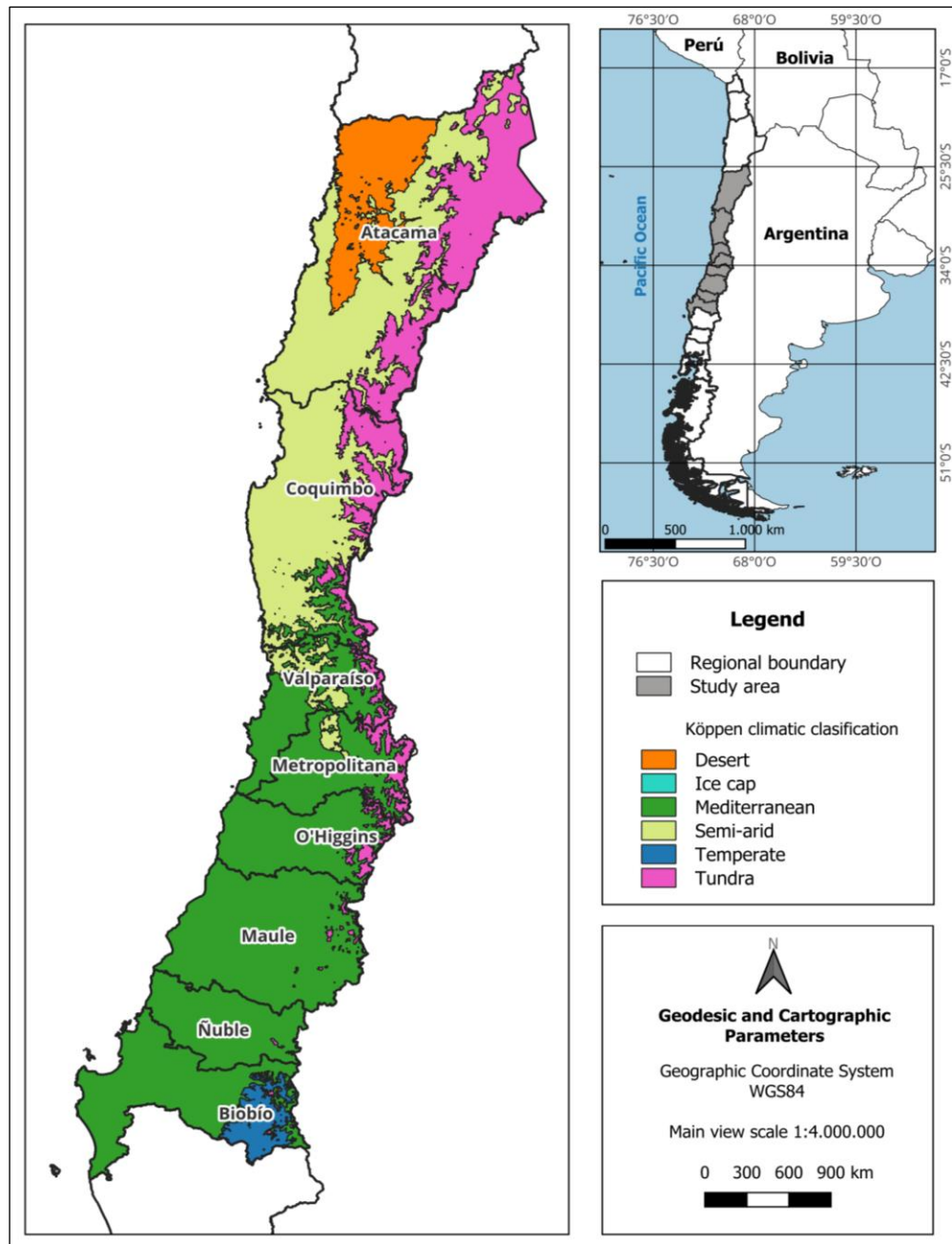


Figure 1. The study area, where 99.90% of Chile’s viticulture is concentrated, encompasses the Atacama and Biobío regions and is characterized by the dominant climate of the country.

2.2. Components of the LCRI for the viticulture sector

The LCRI was developed for the current (2017–2024) and future (2046–2065) periods. The method was applied to the viticulture sector across Chile’s Atacama and Biobío regions based on the available information for calculating the proposed indicators. The LCRI is multidimensional and incorporates exposure, sensitivity, adaptive capacity, and response capacity components [22,23,35]. To reconcile methodological disparities among the climate risk subcomponents, the LCRI was developed using the results of an exhaustive literature review. This review identified the critical components commonly used to estimate climate risk

and selected the most relevant indicators for each subcomponent. The method also considered data availability, quality, and spatial resolution to ensure the index’s local applicability. This integrated framework supports direct spatial comparisons within the study area and helps decision-makers to identify priority zones for climate adaptation and intervention (Figure 2).

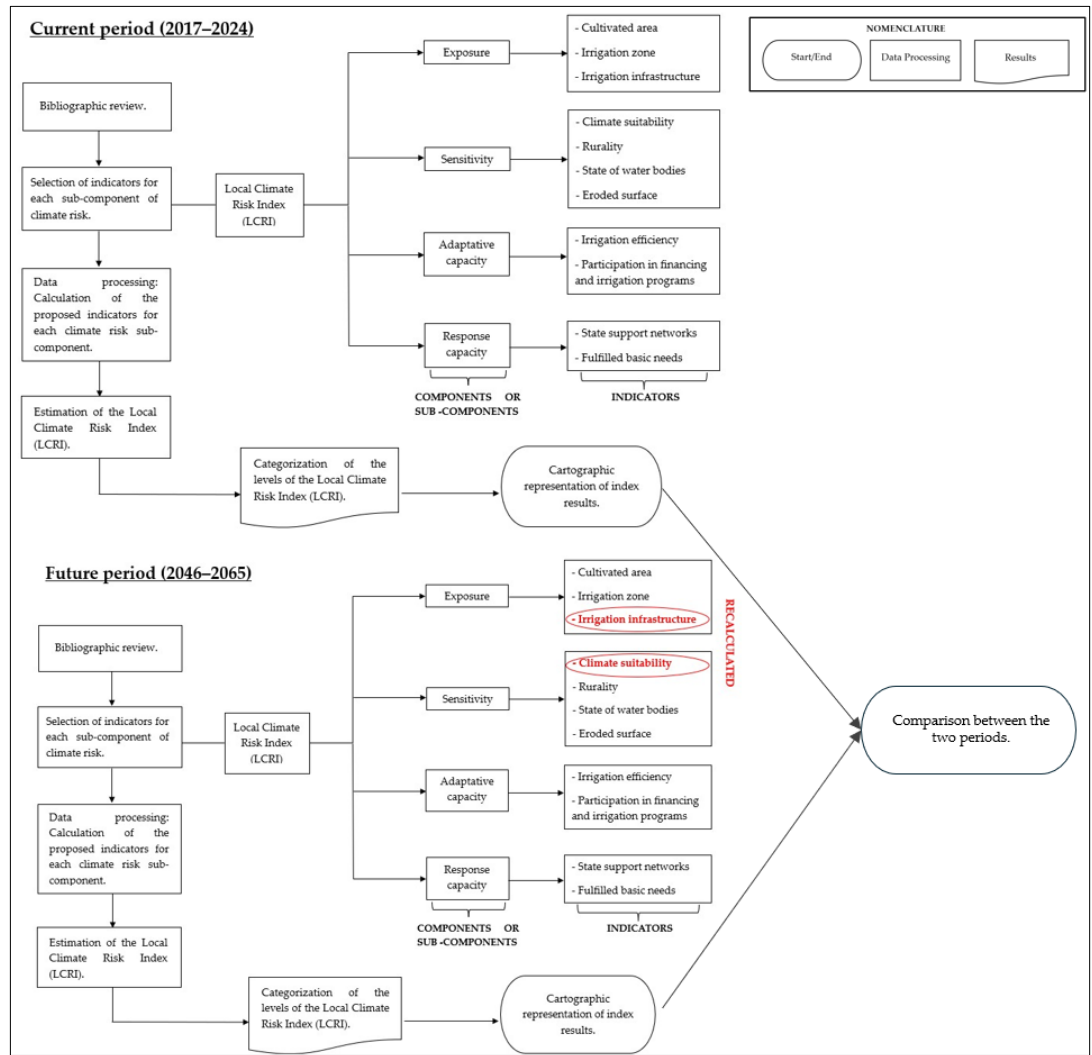


Figure 2. Procedural diagram for obtaining the LCRI for the current (2017–2024) and future (2046–2065) periods in the viticulture sector.

Each component includes a series of indicators, which are detailed below. Each component or subcomponent was calculated as a simple arithmetic mean of its indicators, avoiding subjective weights that could bias the results. This approach prevents any single indicator from disproportionately influencing the overall risk score and promotes transparency and reproducibility. The information used to inform each indicator was sourced from databases, reports/cadasters, newsletters, and other materials generated by state agencies specializing in various sectors. All data were collected at the municipality level and were updated for 2017–2024.

2.2.1. Exposure

The exposure component involves the evaluation of three indicators: cultivated area, irrigation zone, and irrigation infrastructure. For each indicator, values closer to 1.00 indicated higher exposure, and the simple average of these indicators was used to calculate the component's value.

Cultivated Area

This indicator measures the ratio of the area cultivated with grapevines to the total fruit-growing area in the municipality. A large cultivated area increases exposure to climate change due to reduced fruit diversity and climatic conditions that may favor other crops (Table 1) [36,37].

Table 1. The calculation method and scale of values for exposure component indicators.

Indicator	Calculation Expression and Scale of Values
Cultivated area	$CA = \frac{Gta}{Tfm}$ CA: Cultivated area; Gta: Total grapevine area; Tfm: Total fruit-growing area of the municipality.
Irrigation zone	$IR = 1 - \frac{IG}{TG}$ IR: Irrigation zone; IG: Irrigated grapevine area; TG: Total grapevine area (irrigated + rainfed).
Irrigation infrastructure	Scale (dichotomic): 1.00 = No irrigation infrastructure. 0.00 = Irrigation infrastructure.

Irrigation Zone

This indicator classifies grapevine-producing territories based on whether they are irrigated or rainfed. Territories with predominantly rainfed productive areas are more exposed to climate change than irrigated areas (Table 1) [38,39].

Irrigation infrastructure

The presence of off-farm water storage facilities, such as reservoirs located in or upstream of a municipality, ensures water security and aids in drought management (Table 1) [40]. The location of irrigation infrastructure was obtained from the Chilean Geospatial Data Infrastructure (IDE-Chile) and combined with hydrographic network data to determine how the downstream municipalities benefit from the regulation and supply of irrigation water from the reservoirs. The current condition considers existing reservoirs, whereas the future condition considers the construction of new irrigation infrastructure based on information from the National Irrigation Commission, the General Directorate of Water, and/or the Directorate of Hydraulic Works.

2.2.2. Sensitivity

The sensitivity component considered the evaluation of four indicators: climatic suitability, rurality indicator, state of surface and groundwater bodies, and proportion of eroded surface. For each indicator, values closer to 1.00 indicated greater sensitivity, and the simple average of these indicators was used to obtain the component value.

Climatic Suitability

This indicator considers both thermal and water conditions as determining factors for crop suitability [41]. The estimation was performed using the maximum entropy model with Maximum Entropy (MaxEnt) model 3.3.4 (version 3.3.4, AMNH and AT&T-Research, New York, NY, USA), which predicts the potential geographic distribution of a species based on the presence data and environmental variables, primarily temperature and precipitation [42,43]. The thermal model includes four sub-variables: maximum temperature in January [44], frost-free periods [45], degree days [46], and annual chilling hours [47], which are the requirements for the grapevine to achieve its phenological development under optimal conditions. The water model considers water or irrigation requirements [48], crop evapotranspiration [49], and monthly reference evapotranspiration [50,51]. The climate data for the current period were based on variables representative of the study area over the last 30 years. In contrast, projections for the future period (2046–2065) were made using a climate change scenario (RCP8.5), as outlined in the work of Araya et al. [18]. The results were visualized using Quantum Geographic Information Systems (QGIS) software version 3.34.6 (version 3.34.6, OSGeo, Beaverton, OR, USA). The suitability map was classified into four restriction categories based on the obtained minimum and maximum values and divided into equal ranges. A land cover map layer from Chile [52] was also included to exclude restricted areas (Table 2).

Table 2. The calculation methods and scale of values for sensitivity component indicators.

Indicator	Sub Indicator	Calculation Expression and Scale of Values
Climatic suitability	Thermal model	$CS = \frac{\sum RA}{AA}$ CS: Climatic suitability; RA: Restricted area; AA: Total agricultural area. Scale (discrete): 1.00 = Restricted 0.75 = High restriction 0.50 = Moderate restriction 0.25 = Mild restriction 0.00 = No restriction
	Water model	
Rurality	-	$RU = \frac{RP}{TP}$ RU: Rurality; RP: Rural population; TP: Total population (urban + rural).
State of water bodies	-	Scale (discrete): 1.00 = Depleted superficial body 1.00 = Prohibition of extraction from an aquifer 0.50 = Restriction of extraction from an aquifer 0.00 = Without prohibition or restriction.
Eroded surface	-	$ES = \frac{SA}{TA}$ SE: Eroded surface; SA: Soil area presenting some degree of erosion; TA: total agricultural area.

Rurality

The ratio of the rural population to the total municipality population (urban + rural) was determined. The urban population is less vulnerable to climate change than the rural population [38,53].

State of Water Bodies

This indicator provides a municipality-level assessment of the status of surface water bodies (depleted areas) and aquifers (restricted or extraction-prohibited areas) across the Atacama and Biobío regions. IDE-Chile data, including declarations of surface water depletion, restricted areas, and aquifer prohibition zones, were used. The information was then intersected with the municipalities in the study area. The value assignment was discrete (0.00; 0.50; or 1.00) to evaluate the worst observed condition (Table 2). Water resources are vital for agricultural development, irrigation, environmental sustainability, and the economic well-being of farming municipalities, including those focused on viticulture [54].

Eroded Surface

The areas with some degree of soil erosion, considering the following categories: “Light Erosion”, “Moderate Erosion”, “Severe Erosion”, and “Very Severe Erosion”, all of which limit viticulture, were evaluated in relation to the total agricultural area of each municipality (Table 2). High soil erosion rates increase vulnerability to climate change [37,55].

2.2.3. Adaptative capacity

The adaptive capacity component was evaluated based on two indicators: irrigation system efficiency and participation in the financing and irrigation programs of the Agricultural Development Institute (INDAP, acronym in Spanish). For each indicator, values closer to 1.00 indicated higher adaptive capacity, and the component value was obtained by calculating the simple average of these indicators.

Irrigation efficiency

This indicator was quantified for the total grapevine area, weighted by an irrigation efficiency coefficient based on the type of system used, where most technical systems approached 1.00 (Table 3) [56]. Municipalities with a larger proportion of hectares irrigated using advanced irrigation technologies are considered less sensitive to climate risk, as these systems improve water use efficiency [57,58].

Table 3. The calculation methods and scales of values for adaptive capacity component indicators.

Indicator	Calculation Expression and Scale of Values
Irrigation efficiency	$IR = \frac{\sum(Kr * Tn)}{Tg}$ IR: Irrigation efficiency; Kr: Irrigation efficiency coefficient; Tn: Total area by type of irrigation; Tg: Total irrigated grapevine area. Values of irrigation efficiency coefficient (Kr) 0.0 = Flood Irrigation 0.20 = Furrow Irrigation 0.40 = Other Traditional Irrigation Methods 0.60 = Sprinkler Irrigation 0.80 = Microjet or Microsprinkler Irrigation 1.00 = Drip or Tape Irrigation
Participation in financing and irrigation programs	$PFR = \frac{FG}{TF}$ PFR: Participation in INDAP Financing and Irrigation Programs; FG: Farmers dedicated to the cultivation of grapevines participating in the program; AT: Total farmers by program.

Participation in Financing and Irrigation Programs

INDAP implements territorial investment programs that support climate change adaptation through infrastructure and technologies that optimize resource use. At the municipality level, the proportion of grapevine growers who benefit from a support program was determined relative to the total number of farmers in the program [59]. Four support programs for farmers were considered that were focused on adaptation to climate change, such as infrastructure and implements to optimize the use of resources: Development and Investment Program (PDI); Local Development Program (PRODESAL); Credit Program (“Short-term Credit Program for individuals or companies, incentives for the sustainability of agricultural soils”), and the Irrigation Program (“Associative Irrigation”, “Intra-farm Irrigation” and “Minor Irrigation Works”). A simple average was used to obtain the final value for each program type and indicator (Table 3). A higher proportion of grapevine growers participating in financing and irrigation programs indicates greater adaptive capacity, contributing to reduced vulnerability and enhanced resilience to climate change [60,61].

2.2.4. Response Capacity

The response capacity component was evaluated based on two indicators: state support networks and fulfilled basic needs. For each indicator, values closer to 1.00 indicated greater responsiveness, and the component value was obtained by calculating the simple average of these indicators.

State Support Networks

Municipalities with state agencies dedicated to climate change adaptation in the agricultural sector were identified. The municipalities were classified according to the level of support available, with 1.00 indicating those that have an area agency or regional directorate, where there are professionals, technicians, and advisors that provide direct and immediate assistance, whereas 0.00 indicated those that do not have support or territorial coverage (Table 4). The presence of these institutions enhances local capacity to respond to climate challenges through technical assistance, financial aid, and policy implementation [30,62].

Table 4. The calculation methods and scales of values for response capacity component indicators.

Indicator	Calculation Expression and Scale of Values
State support networks	Scale (discrete):
	1.00 = Presence of INDAP agencies
	0.66 = Presence of INDAP offices
	0.33 = Without INDAP agency/office presence, but with territorial coverage
	0.00 = Absence of state support
	$FN = \frac{(LI + SA + HQ + OV + CE)}{5}$
Fulfilled basic needs	FN: Fulfilled basic needs
	LI: Literacy
	SA: Sanitation
	OV: Overcrowding
	HQ: Housing quality
	CE: Level of compulsory education

Fulfilled Basic Needs

The ability of a municipality to meet its basic needs (socioeconomic variables) strengthens its capacity to respond to climate change, reducing overall vulnerability [24,63]. The following were, people and/or homes assessed at the municipality level: literacy rates (LI), access to sanitation (SA), overcrowding (OV), housing quality (HQ), and completion of compulsory education (CE). The indicator was calculated using the simple average of the variables described above (Table 4).

2.3. Evaluation of the LCRI for the viticulture sector

The magnitude of the LCRI depends on the probability and intensity of hazards, the exposure of affected populations or systems, and their intrinsic vulnerability, including response and adaptation capacity [22]. Therefore, the LCRI was calculated by summing the adaptive capacity (AD) and response capacity (RE) components and subtracting the exposure (EX) and sensitivity (SE) components (Figure 2). The final LCRI values were then normalized to a scale ranging from 0.00 to 1.00 for interpretability (Table 5) using the following equation:

$$LCRI = \frac{EX + SE - (AD + RE) + 2}{4} \quad (1)$$

Table 5. The categories of LCRI for the viticulture sector due to climate change in Chile.

Local Climate Risk Level	Values
Very low	0.00–0.20
Low	0.21–0.40
Medium	0.41–0.60
High	0.61–0.80
Very high	0.81–1.00

2.3. Results

2.3.1. Exposure

In the current period, the exposure component was 0.01–1.00 (Table S1). The municipalities involved in viticulture in mountainous areas with tundra climates, ranging from Atacama to O’Higgins, those with semi-arid climates, ranging from the Atacama to Valparaíso regions, and coastal municipalities with mediterranean climates, ranging from the Maule to Biobío regions, exhibited exposure levels classified as “high” (≥ 0.61) or “very high” (≥ 0.81). These municipalities represented 20.00% of all Chilean municipalities involved in viticulture. By contrast, the coastal municipalities with semi-arid climates (Atacama to Valparaíso) and valley municipalities with mediterranean (Metropolitana to Biobío) or temperate (Biobío) climates demonstrated exposure values categorized as “low” (≤ 0.40) or “very low” (≤ 0.20) (Figure 3a).

For the future period, the range of values was expected to remain the same as in the current period, ranging between 0.01 and 1.00, although in some cases a decrease was observed (Table S1). The most important changes were observed in municipalities located in the mountain range zone with tundra (Valparaíso) and mediterranean (Ñuble) climates (Figure 3b). These changes were related to the irrigation infrastructure indicator (Table S1),

reflecting either the planned construction of reservoirs within their municipal boundaries or indirect access to reservoirs located in adjacent watersheds.

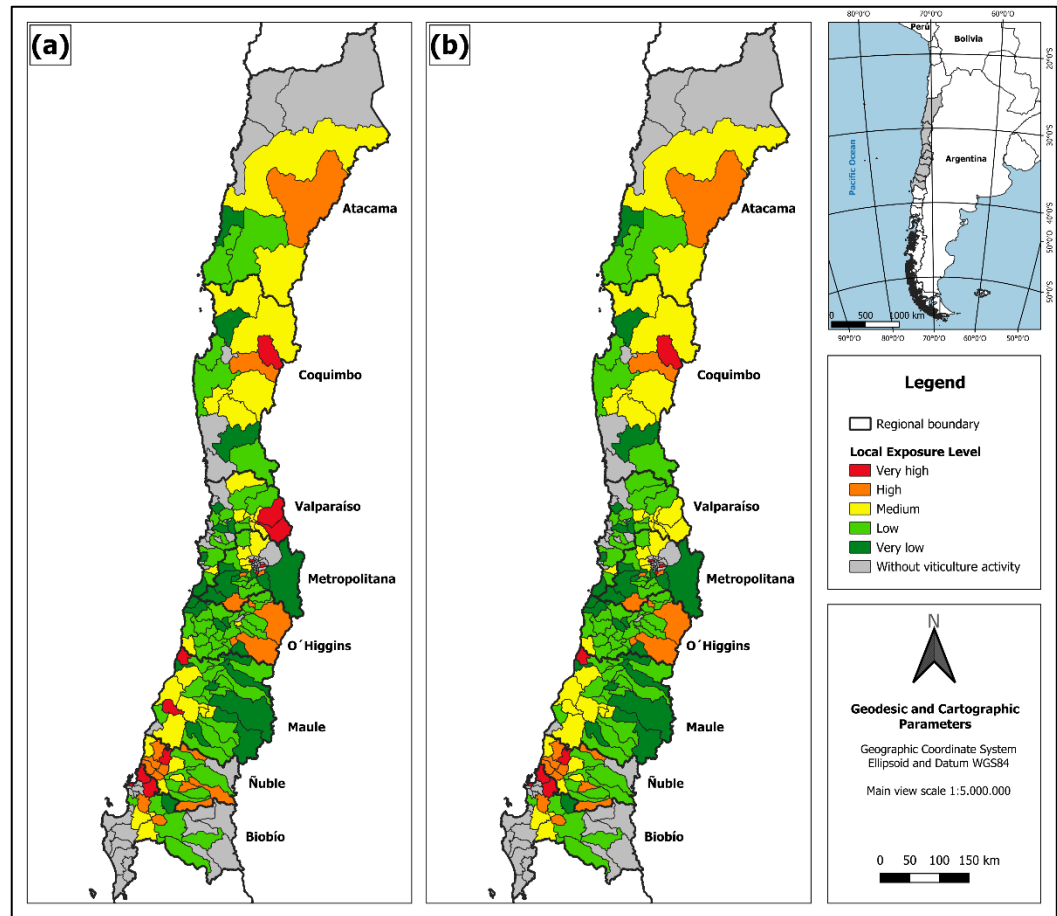


Figure 3. The exposure component for viticulture in the current (a) and future (b) periods between the Atacama and Biobío regions in Chile.

2.3.2. Sensitivity

In the current period, the sensitivity component was 0.12–0.90 (Table S2). A total of 36.97% of the Chilean municipalities with viticulture activity exhibited sensitivity levels categorized as “high” (≥ 0.61) or “very high” (≥ 0.81). These municipalities were mainly concentrated in desert and semi-arid regions (Atacama to Valparaíso), mountainous regions with tundra climates (Atacama to O’Higgins), and mediterranean areas (Metropolitana to O’Higgins). By contrast, coastal municipalities with mediterranean climates, from Maule to Biobío, and temperate climate valleys (Biobío) exhibited sensitivity values classified as “low” (≤ 0.40) and “very low” (≤ 0.20), respectively (Figure 4a).

In the future period, the sensitivity component values were projected to range from 0.09 to 0.94 (Table S2). The most important changes were observed in mountainous areas with semi-arid climates (Atacama to Coquimbo) and coastal areas with semi-arid (Valparaíso) or mediterranean (O’Higgins) climates. In contrast, mountainous municipalities with mediterranean (Maule to Ñuble) or temperate (Biobío) climates showed improvements

(Figure 4b). These changes were mainly due to variations in the climate suitability indicator projected under the climate change scenario RCP8.5 (Table S2).

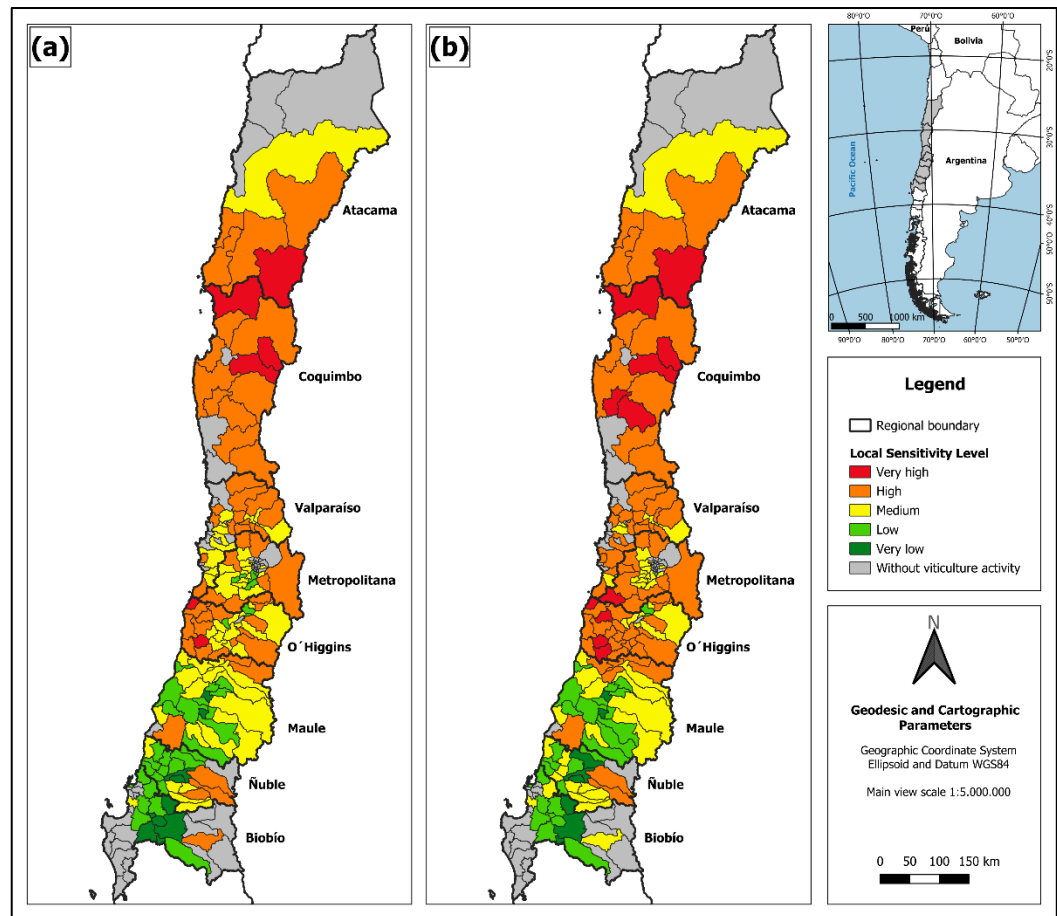


Figure 4. The sensitivity component for viticulture in the current (a) and future (b) periods, between the Atacama and Biobío regions of Chile.

2.3.3. Adaptive Capacity

The adaptive capacity component exhibited values ranging from 0.00 to 0.62 (Table S3), and no evident spatial trend was identified. “High” levels (≥ 0.61) represented 1.21% of the total number of municipalities involved in viticulture. Most municipalities (59.39%) exhibited adaptive capacity levels classified as “medium” (0.41–0.60). These municipalities were predominantly located in coastal and valley areas with semi-arid (Atacama to Metropolitana) or mediterranean (O’Higgins to Biobío) climates. Meanwhile, municipalities with “low” (≤ 0.40) or “very low” (≤ 0.20) adaptive capacity levels were found in mountainous areas with tundra (Atacama to O’Higgins) or mediterranean (Maule to Ñuble) climates, as well as in coastal and valley areas with mediterranean climates (O’Higgins to Ñuble) and some valley areas with temperate climates (Biobío) (Figure 5a).

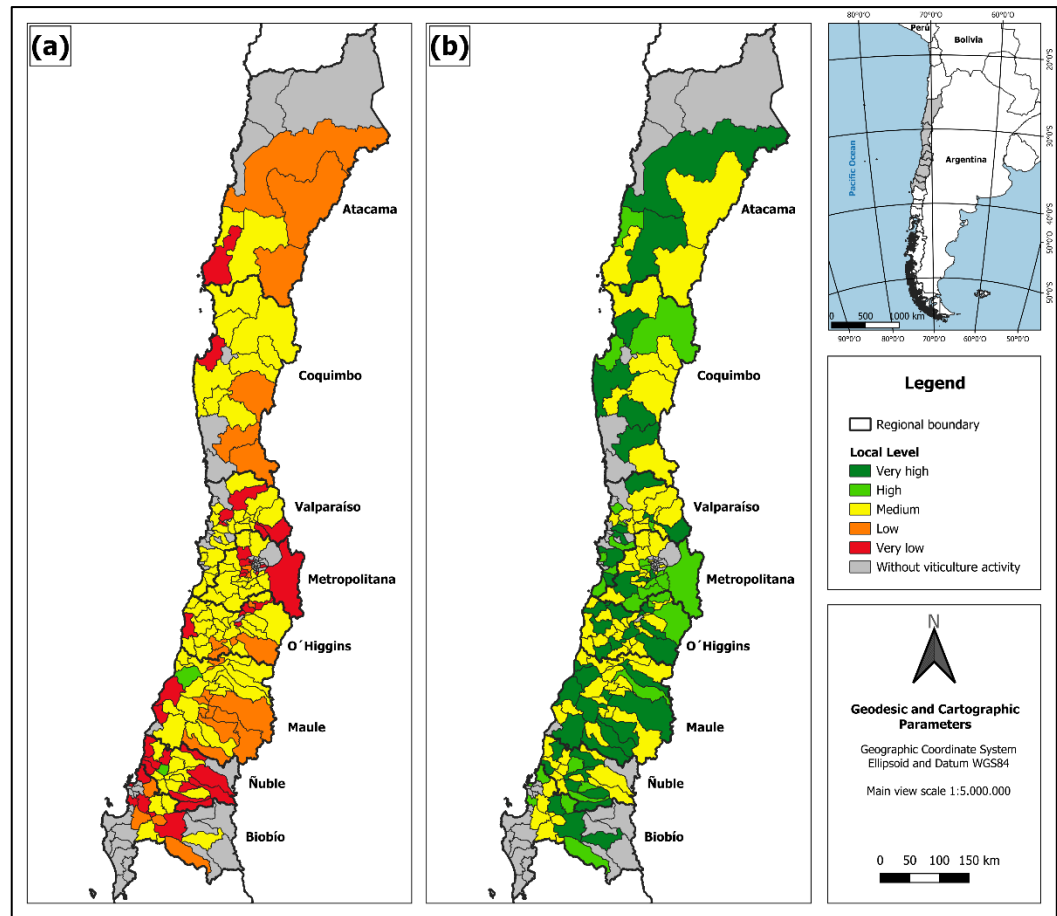


Figure 5. Adaptive capacity (a) and response capacity (b) components for viticulture, between the Atacama and Biobío regions of Chile.

2.3.4. Response Capacity

The response capacity component had values ranging from 0.42 to 0.96 (Table S3). Most municipalities (53.33%) had response capacity levels categorized as “medium” (0.41–0.60). These municipalities were mainly located in mountainous areas with tundra and semi-arid climates (Atacama to Valparaíso) or tundra (Atacama to O’Higgins) climates, as well as in valley and coastal areas with mediterranean climates (Valparaíso to Biobío). Meanwhile, municipalities in the “very high” category (≥ 0.81) represented 28.48% of the municipalities involved in viticulture. They were mainly distributed across coastal zones with desert, semi-arid, or mediterranean climates and valley and mountainous areas with mediterranean (O’Higgins to Biobío) or temperate (Biobío) climates (Figure 5b).

2.3.5. LCRI for the viticulture sector

The LCRI for the viticulture sector in Chile during the current period ranged from 0.24 to 0.76 (Table S4). Most municipalities, regardless of climate type, were in the “medium” category (0.41–0.60), representing 56.36% of the total study area. These municipalities were mainly distributed across mountainous areas with semi-arid (Atacama to Valparaíso) or tundra (Atacama to O’Higgins) climates, as well as mountainous (Valparaíso to Metropolitana) and coastal (O’Higgins to Biobío) areas with mediterranean climates (Figure 6a). In the future period, climate change is expected to increase the risk, especially in regions

with semi-arid and mediterranean climates (Atacama to Maule). By contrast, the municipalities in valley and mountainous areas with a mediterranean climate (Ñuble and Biobío) are expected to present improvements in the index owing to changes in the sensitivity component, particularly in the projected climate suitability indicator (Figure 6b).

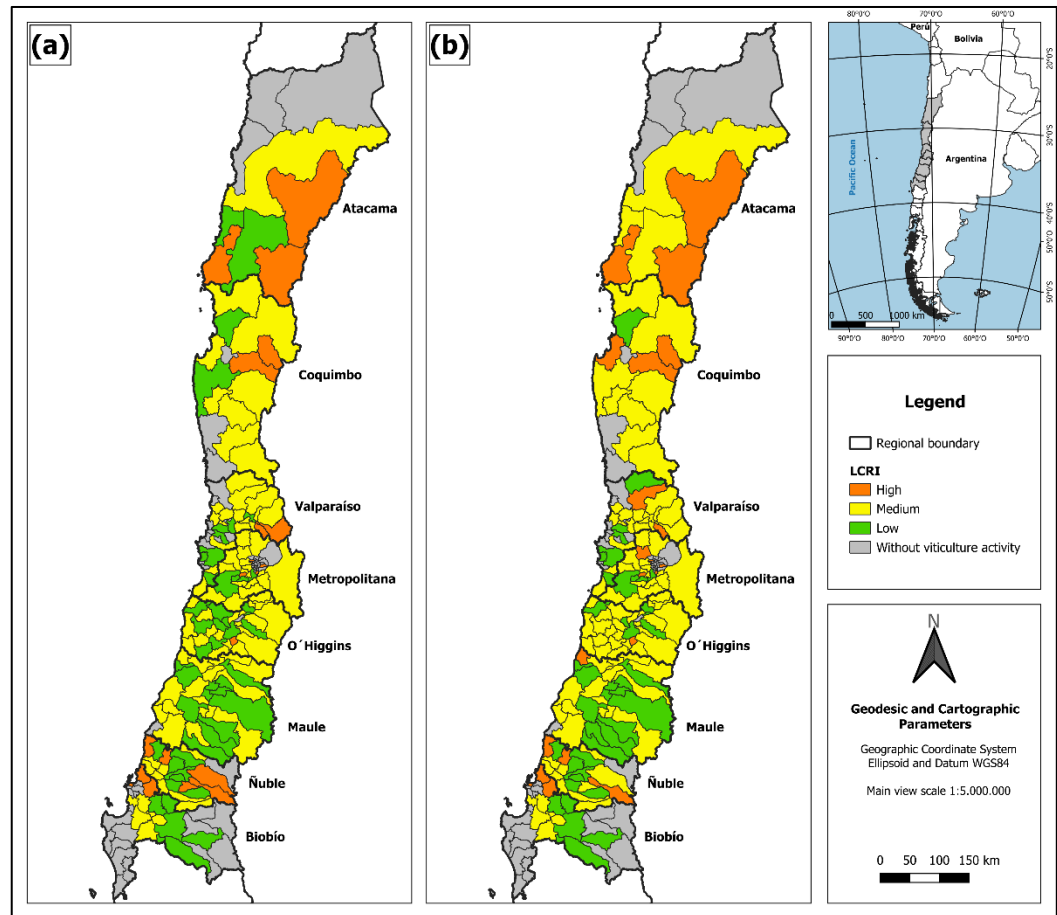


Figure 6. The LCRI for viticulture in the current (a) and future (b) periods, between the Atacama and Biobío regions of Chile.

In regional terms, the LCRI during the current period was higher in regions with semi-arid climates than in regions with mediterranean or temperate climates. This result was primarily due to the higher observed sensitivity, which was not mitigated by the adaptive and responsive capacities of municipalities in these regions. These components were homogeneous at the regional level (Table 6).

Table 6. The regional averages of exposure, sensitivity, adaptive capacity, response capacity, and LCRI for the viticulture sector in Chile in the current (2017–2024) and future (2046–2065) periods.

Current Period (2017–2024)						
Dominant Climate	Region	Exposure	Sensitivity	Adaptive Capacity	Response Capacity	LCRI
Semi-arid	Atacama	0.40	0.69	0.34	0.70	0.51
	Coquimbo	0.45	0.76	0.43	0.71	0.52
	Valparaíso	0.36	0.62	0.41	0.68	0.47
Mediterranean	Metropolitana	0.42	0.50	0.30	0.61	0.50
	O'Higgins	0.35	0.59	0.40	0.70	0.46
	Maule	0.34	0.42	0.40	0.71	0.41
	Ñuble	0.54	0.40	0.28	0.72	0.48
Temperate	Biobío	0.51	0.29	0.24	0.68	0.47
Future period (2046–2065)						
Dominant climate	Region	Exposure	Sensitivity	Adaptive capacity	Response capacity	LCRI
Semi-arid	Atacama	0.40	0.73	0.34	0.70	0.52
	Coquimbo	0.45	0.81	0.43	0.71	0.53
	Valparaíso	0.32	0.66	0.41	0.68	0.47
Mediterranean	Metropolitana	0.42	0.57	0.30	0.61	0.52
	O'Higgins	0.34	0.65	0.40	0.70	0.47
	Maule	0.33	0.44	0.40	0.71	0.42
	Ñuble	0.52	0.40	0.28	0.72	0.48
Temperate	Biobío	0.51	0.30	0.24	0.68	0.47

2.4. Discussion

The findings indicate pronounced spatial and temporal variability in the LCRI for viticulture, with clear distinctions among tundra, desert, semi-arid, mediterranean, and temperate climate areas. Mountainous municipalities in semi-arid regions predominantly exhibited higher climate risk index values than coastal and mountainous municipalities in mediterranean and temperate regions, which generally fall into lower risk categories (Figure 6a,b). These spatial patterns underscore the role of climatic–geographical conditions and the adaptive and response capacities of individual territories in shaping climate risk.

2.4.1. Exposure

Exposure was high in mountainous municipalities with tundra and semi-arid climates in the Coquimbo region and in valley municipalities with mediterranean climates in the Metropolitana region (Tables 6 and S1, Figure 3a,b). In Coquimbo, the high exposure levels were largely driven by the cultivated area indicator, reflecting the predominance of viticulture over other crops. This lack of diversification increases the vulnerability of the production system [64]. In the Metropolitana region, the irrigation infrastructure indicator was a key determinant of exposure in several municipalities, as reservoirs play a critical role in ensuring water security, enhancing water use efficiency, and mitigating the impacts of drought within the socioeconomic system [65,66]. Mediterranean-climate regions, such as Ñuble and Biobío, also exhibited high exposure levels, primarily due to the irrigation zone indicator (Tables 6

and S1, Figure 3a,b), which highlighted the prevalence of inefficient irrigation systems in viticulture practices. Irrigation technologies are essential for reducing yield losses [67], improving water use efficiency, and complementing other adaptation strategies, such as soil moisture conservation techniques and the development of grapevine varieties tolerant to dryland conditions [68].

In contrast, viticulture municipalities in mediterranean-climate regions, such as O'Higgins (coastal and valley areas) and Maule (valley and mountainous areas), exhibited low exposure levels, which are associated with low values for the cultivated area and irrigation infrastructure indicators (Tables 6 and S1, Figure 3a,b). This result reflects the positive effects of fruit crop diversification [69] and the availability of water infrastructure, particularly reservoirs, which play a key role in reducing vulnerability by enhancing water security and buffering the impacts of climatic variability [70].

The difference between current and future exposure was primarily associated with changes in the irrigation infrastructure indicator (Tables 6 and S1, Figure 3a,b). The planned construction of irrigation reservoirs and their distribution capacities were more influential than the other indicators because of their positive impact on water security at the territorial level [71]. These findings align with previous studies that emphasize the critical link between territorial planning, water resource management, and agricultural resilience to climate change [72,73].

2.4.2. Sensitivity

Municipalities located in mountainous areas with tundra and semi-arid climates—such as Atacama, Coquimbo, and Valparaíso regions—exhibited the highest levels of sensitivity (Tables 6 and S2, Figure 4a,b). This pattern is attributable to the vulnerability of mountainous semi-arid zones to late frosts and extreme weather events (e.g., heavy rainfall and snowfall), which increase the risk of landslides and slope instability [74,75].

In the future period, an increase in sensitivity was projected for municipalities with semi-arid and mediterranean climates (Tables 6 and S2, Figure 4a,b), primarily due to the climatic suitability indicator. This reflects a rising risk of heat and water stress in traditional viticulture areas [17], along with a projected shift in optimal production zones toward municipalities in mediterranean and temperate climates, driven by increased temperatures and the accumulation of growing degree days [13]. Such changes could affect multiple phenological stages of grapevines, causing imbalances in ripening, sugar concentration, pH, and oxidative sensitivity, thereby impacting both the crop and its products, particularly wine [76–78].

These findings are consistent with prior studies that identify climate sensitivity as a key factor influencing the long-term sustainability of viticulture under climate change scenarios [79].

2.4.3. Adaptive and response capacity

The adaptive capacity component exhibited lower values than the response capacity component, despite the latter showing greater spatial variability (Tables 6 and S3, Figure 5a).

The irrigation system efficiency indicator was a decisive factor, and a positive correlation was observed between municipalities with large areas of efficient irrigation and high adaptive capacity (Table S3). This finding aligns with studies indicating that technologically advanced farming practices reduce vulnerability [38]. The adoption of drip irrigation not only enhances water use efficiency, but also reduces plant diseases by lowering humidity in the plants and

the surrounding environment, thereby improving crop yield and quality [80–82]. In Chile, significant technological advancements have been linked to investments in water infrastructure and the importance of the wine sector [83]. However, no wine-producing municipalities reached the “very high” category of the adaptive capacity component (Figure 5a), reflecting the structural and socioeconomic factors that shape resilience to climate change. These factors may include limited access to irrigation financing programs, particularly for small producers who face considerable barriers [84].

In contrast, the response capacity component exhibited higher values than the adaptive capacity component (Tables 6 and S3, Figure 5b). All viticulture municipalities analyzed reported a high percentage in the fulfilled basic needs indicator, consistent with previous research emphasizing the role of socioeconomic conditions in climate change adaptation capacity [85]. Nevertheless, the state support networks, such as those provided by INDAP, emerged as a key factor influencing the spatial variability of this component. Municipalities without access to such support recorded the lowest values for this component (Table S3).

2.4.4. LCRI for the Viticulture Sector

The results of the LCRI indicate a challenging outlook for the Chilean viticulture sector, with a projected increase in risk levels, mainly for semi-arid and mediterranean regions, primarily driven by the growing sensitivity of areas suitable for grapevine production (Tables 6 and S4, Figure 6a). This trend aligns with global patterns showing increased vulnerability in traditional wine-producing areas, largely due to reduced water availability and rising extreme temperatures [86]. However, the decrease in climate risk values observed in certain municipalities within mediterranean and temperate climate zones in the southern part of the study area suggests a potential reconfiguration of the areas suitable for viticulture in the future (Tables 6 and S4, Figure 6b). This may present new opportunities for the expansion of grapevine production in regions that were previously less exploited [13,87].

The findings of this study underscore the importance of region-specific adaptation policies, with an emphasis on strengthening water infrastructure and developing climate-resilient technologies [88]. Key factors, such as irrigated areas, the technological advancement of irrigation system efficiency, and the construction of water infrastructure, coupled with financing and training programs, will be critical for the viticulture sector’s adaptation to the impacts of climate change [66,80,81,84,89]. Transformative strategies should also be implemented to strengthen governance, optimize infrastructure, protect ecosystems, and enhance the resilience [90] of the viticulture sector’s resilience to climate change.

The use of a climate risk index enables decision-makers to identify trends, assess risks, and formulate mitigation and adaptation strategies based on local data while allowing ongoing monitoring over time [24,91]. However, this tool has some limitations, such as difficulty in accessing reliable data, as well as inconsistencies in some cases. In some cases, data of interest were segmented across various state agencies, institutions, or services, which led to slight variations in the cadasters and reports compiled by each agency. These discrepancies may have arisen from differences in data collection periods at the time the reports were generated, as well as the varying focus and objectives of each study. Additionally, some indicators, such as irrigation infrastructure and participation in financing and irrigation programs, lacked sufficient data at the municipal level. These indicators were obtained through public information requests to the respective institutions, which resulted in delays in data incorporation.

2.5. Conclusions

This study developed and applied an LCRI to assess the vulnerability of the Chilean viticulture sector to climate change. For the current period (2017–2024), 30.91% of municipalities were classified as having a “low” risk level, 56.36% as “medium,” and 12.73% as “high.” In contrast, for the future period (2046–2065), 63.03% of viticulture municipalities are expected to experience increased climate risk values, particularly in semi-arid and mediterranean regions, due to heightened climate exposure and sensitivity, due to the projected increase in temperatures and decrease in rainfall. In these municipalities, the irrigation zone and irrigation infrastructure indicators within the exposure component were decisive, whereas the climatic suitability indicator played a key role in the sensitivity component. However, 14.55% of municipalities showed an improvement in their climate risk index values, whereas 22.42% showed no change, suggesting that certain local adaptation strategies already implemented may partially mitigate the impacts of climate change. In these municipalities, factors such as water infrastructure (reservoirs) and access to support programs emerged as critical differentiators.

Sensitivity emerged as the most influential component in the climate risk index, primarily linked to the reduction in suitable areas for grapevine cultivation. Due to climate change, a shift in climate suitability is expected toward the southern part of the study area, where mediterranean and temperate climates currently predominate, thus creating new opportunities for the viticulture industry.

These findings highlight the urgent need to strengthen climate change adaptation policies, focusing on efficient water management, the construction of irrigation infrastructure, the implementation of efficient irrigation systems, the promotion of sustainable agricultural practices, and the development of local strategies to enhance adaptive and response capabilities in viticulture municipalities. In this context, the LCRI is presented as a valuable tool to assist decision-makers in assessing risks, planning mitigation and adaptation strategies, and monitoring their effectiveness over time.

Supplementary Materials: The following supporting information can be downloaded at: <https://www.mdpi.com/article/10.3390/agriculture15121322/s1>: Table S1. The exposure component of the current (2017–2024) and future (2046–2065) periods in the viticulture municipalities between the Atacama and Biobío regions in Chile; Table S2. The sensitivity component of the current (2017–2024) and future (2046–2065) periods in the viticulture municipalities between the Atacama and Biobío regions in Chile; Table S3. The adaptive and response capacity components of the viticulture municipalities between the Atacama and Biobío regions in Chile; Table S4. The local climate risk index (LCRI) for the current (2017–2024) and future (2046–2065) periods in the viticulture municipalities between the Atacama and Biobío regions in Chile.

Author Contributions: Conceptualization, K.C-Z., and M.P.; formal analysis, K.C-Z., D.C., J.S., and M.P.; investigation, K.C-Z., J.S., and M.P.; methodology, K.C-Z., D.C., J.S., and M.P.; resources, M.P.; supervision, M.P.; writing—original draft, K.C-Z., and J.S.; writing—review and editing, M.P. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This work was funded by Agroenergía Ingeniería Genética S.A. (Santiago, Chile).

Institutional Review Board Statement: Not applicable.

Data Availability Statement: All data are available in the main text, Supplementary Materials, public databases, or referenced permanent online repositories.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflicts of interest. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analysis, or interpretation of data; in the writing of the manuscript; or in the decision to publish the results.

Abbreviations

The following abbreviations are used in this manuscript:

LCRI	Local Climate Risk Index
AD	Adaptive capacity component
GDP	Gross Domestic Product
RE	Response capacity component
EX	Exposure component
SE	Sensitivity component

2.6. References

1. Agraso-Otero, A.; Cancela, J.J.; Vilanova, M.; Ugarte Andrevia, J.; Rebolledo-Leiva, R.; González-García, S. Assessing the environmental sustainability of organic wine grape production with qualified designation of origin in la Rioja, Spain. *Agriculture* **2025**, *15*, 536. DOI:[10.3390/agriculture15050536](https://doi.org/10.3390/agriculture15050536).
2. Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (ODEPA). Superficie y Producción de Vides Para Vinificación, de Mesa y Pisqueras. Available online: <https://hdl.handle.net/20.500.12650/73265> (accessed on 10 Apr 2025). (In Spanish)
3. Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (ODEPA). *Panorama de la Agricultura Chilena*; ODEPA: Santiago, Chile, 2019; pp. 1–36. (In Spanish)
4. Wines of Chile. *Aporte del Vino a la Economía y Desarrollo de Chile*, 2023. Available online: <https://www.winesofchile.org/winegrowing-regions/> (accessed on 10 Apr 2025). (In Spanish)
5. Wines of Chile – ANIAE. Vendimia 2022: Informe Ejecutivo; Asociación Nacional de Ingenieros Agrónomos Enólogos de Chile (ANIAE); Chile, 2022; pp. 1–23. (In Spanish)
6. De la Fuente, M. *Análisis de Exportaciones de Uva de Mesa Negra Iniagrape-one (Maylen)*; Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIA), Chile, 2021; pp. 4–8. (In Spanish)
7. Sarricolea, P.; Herrera-Ossandon, M.; Meseguer-Ruiz, Ó. Climatic regionalisation of continental Chile. *J. Maps* **2017**, *13*, 66–73. DOI:[10.1080/17445647.2016.1259592](https://doi.org/10.1080/17445647.2016.1259592).
8. Rojas, G. *La Geografía del Vino Chileno*; Vinífera: Chile, 2019; pp. 64–112. (In Spanish)
9. Arribillaga, D. Investigación y desarrollo en vides: Vitivinicultura en la zona más austral del mundo. In *Investigación y Desarrollo en Vides*, García, M., Barba, P., Sellés, G., Eds.; Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIA): Santiago, Chile, 2020; pp. 56. (In Spanish)
10. Reyes, M. Elementos del clima y su influencia en la producción vitivinícola: referencias para el secano. In *Condiciones edafoclimáticas y productos enológicos en el Valle del Itata*; Claret, M., Reyes, M., Ruiz, S., Eds.; Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA): Chillán, Chile, 2020; Boletín N°433, pp. 189–200. (In Spanish)
11. Ruiz-García, L.; Romero, P.; Tornel, M.; Menéndez, C.; Cabello, F.; Martínez-Cutillas, A. La viticultura frente al cambio climático: Adaptación y estrategias de mejora. In *Influencia del cambio climático en la mejora genética de plantas*; Brunton, J., Tornero, O., Terrer, J., García, L., Sánchez, E., Eds.; Murcia, España, 2018; pp. 165–196. (In Spanish)
12. Zurita-Silva, A.; Díaz, I.; Verdugo, N.; Mejía, N. Desafíos de la viticultura en escenario de cambio climático; Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIA). *Rev. Campo Tecnol.* **2020**, *16*, 38–41. (In Spanish)

13. Salazar, C.; Reyes, M. Efectos del cambio climático en la vitivinicultura y alternativas para asegurar la sustentabilidad y calidad del viñedo en el Valle Central. In *Preparando la Agricultura para el Cambio Climático*, Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIA), Ed.; Ministerio de Agricultura; Gobierno de Chile: Santiago, Chile, 2020; Tierra, I. *Adentro* N° 112; pp. 39–41. (In Spanish)
14. Reyes, M.; Salazar, M. *Ciclo de Charlas sobre Viticultura y Cambio Climático 2020–2022: Ensayos en Incremento de Temperatura*; Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIA), Chile, 2021; pp. 1–8. (In Spanish)
15. Acuña, I.; Navarro, P.; Madariaga, M. Plagas agrícolas y cambio climático: Desafíos y manejo. In *Preparando la Agricultura para el Cambio Climático*, Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIA), Ed.; Ministerio de Agricultura; Gobierno de Chile: Santiago, Chile, 2020; Tierra, I. *Adentro*, N° 112; pp. 21–25. (In Spanish)
16. Van Leeuwen, C.; Sgubin, G.; Bois, B.; Ollat, N.; Swingedouw, D.; Zito, S.; Gambetta, G.A. Climate change impacts and adaptations of wine production. *Nat. Rev. Earth Environ.* **2024**, *5*, 258–275. DOI:[10.1038/s43017-024-00521-5](https://doi.org/10.1038/s43017-024-00521-5).
17. Verdugo-Vásquez, N.; Orrego, R.; Gutiérrez-Gamboa, G.; Reyes, M.; Zurita Silva, A.; Balbontín, C.; Salazar-Parra, C. Climate trends and variability in the Chilean viticultural production zones during 1985–2015. *OENO One* **2023**, *57*(1), 345–362. DOI:[10.20870/oeno-one.2023.57.1.7151](https://doi.org/10.20870/oeno-one.2023.57.1.7151).
18. Araya-Osses, D.; Casanueva, A.; Román-Figueroa, C.; Uribe, J.M.; Paneque, M. Climate change projections of temperature and precipitation in Chile based on statistical downscaling. *Clim. Dyn.* **2020**, *54*, 4309–4330. DOI:[10.1007/s00382-020-05231-4](https://doi.org/10.1007/s00382-020-05231-4).
19. Resco, P. *Viticultura y Cambio Climático en España: Vulnerabilidad en las Distintas Regiones y Estrategias de Adaptación Frente al Desarrollo de Nuevas Políticas [Tesis Doctoral]*; Universidad Politécnica de Madrid: Madrid, Spain, 2015.
20. Olcina Cantos, J.; Vera-Rebollo, J.F. Adaptación del sector turístico al cambio climático en España. La importancia de las acciones a escala local y en empresas turísticas. *An. Geogr. Univ. Complut.* **1970**, *36*, 321–349. DOI:[10.5209/AGUC.53588](https://doi.org/10.5209/AGUC.53588). (In Spanish)
21. Billi, M.; Garreaud, R. (2020). Cápsula climática: ¿Qué es el riesgo climático? Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR2) - Universidad de Chile. Santiago, Chile. Available online: <https://leycambioclimatico.cl/capsula-climatica-que-es-el-riesgo-climatico/> (accessed on 23 May 2025). (In Spanish)
22. Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR2). *Marco de Evaluación de la Vulnerabilidad*; Vol. CR2; Chile, 2018; pp. 5–26. (In Spanish)
23. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Impacts, adaptation, and vulnerability. Part A: Global and sectoral aspects. Contribution of working Group II to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *Clim. Change*; Cambridge University Press: Cambridge, UK and New York, NY, USA 2014, 2014, 3–13.
24. Boer, R.; Rakhman, A.; Faqih, A.P.; Situmorang, A.P. *Village vulnerability and climate risk index. Indonesia*; UNDP-SPARC Project: East Nusa Tenggara, Kementerian Lingkungan Hidup and Kehutanan: Jakarta 2015, 1–17.
25. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO)—Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (UNDP). Módulo 8.2: Índices de vulnerabilidad. *FAO-UNDP 2021*, 2–17. (In Spanish)
26. Bohórquez-Piña, P. Climate risk index: The measurement of climate change adaptation in Bogotá. A new methodology for largest urban agglomeration. *Rev. Interdisc. Est. Cienc. Basic. Ing.* **2024**, *11*(2). DOI:[10.5281/zenodo.12809587](https://doi.org/10.5281/zenodo.12809587).
27. Adil, L.; Eckstein, D.; Kuenzel, V.; Schaefer, L. Climate risk index 2025 - Who [suffers](#) most from extreme weather events?. Germanwatch (Ed.). 2025. Available online: <http://www.germanwatch.org/en/93013> (accessed on 22 May 2025).
28. Haro, A.; Mendoza-Ponce, A.; Calderón-Bustamante, O.; Velasco, J. Evaluating risk and possible adaptations to climate change under a socio-ecological system approach. *Front. Clim.* **2021**, *3*, 674693. DOI:[10.3389/fclim.2021.674693](https://doi.org/10.3389/fclim.2021.674693).
29. Ministerio de Medio Ambiente (MMA). Atlas de riesgos climáticos: marco metodológico ARClm; Ministerio de Medio Ambiente, Gobierno de Chile: Santiago, Chile, 2020; pp. 12 (In Spanish)
30. Montalba, R.; Fonseca, F.; García, M.; Vieli, L.; Altieri, M. Determinación de los niveles de riesgo socioecológico ante sequías en sistemas agrícolas campesinos de la Araucanía chilena. Influencia de la diversidad cultural y la agrobiodiversidad [*Papers*]. *PapRevSoc* **2015**, *100*, 607–624. DOI:[10.5565/rev/papers.2168](https://doi.org/10.5565/rev/papers.2168). (In Spanish)
31. Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN). Catastro Frutícola 2022: Principales resultados Región del Maule/Septiembre 2022; Oficina de Estudios y Políticas Agropecuarias (ODEPA), Ministerio de Agricultura; Gobierno de Chile: Chile, 2022; pp. 10–35. (In Spanish)

32. Ganadero, S.A. Informe catastro vitícola nacional 2022; SAG, ministerio de agricultura, gobierno de Chile; SAG, 2023. Available online: <https://www.sag.gob.cl/content/catastro-viticola-nacional-2022> (accessed on 13 Apr 2025). (In Spanish)
33. Yáñez, L. *Ficha Nacional: Actualización Agosto 2024*; Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (ODEPA): Chile, 2024; pp. 3–16. (In Spanish)
34. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). *Diagnóstico Nacional de Montaña: Fortalecimiento de la Gestión Participativa para el Desarrollo Sostenible de los Andes: Informe Chile*; Food and Agriculture Organization: Santiago, Chile, 2012; pp. 11–13 (In Spanish)
35. Montalba, R.; García, M.; Altieri, M.; Fonseca, F.; Vieli, L. Utilización de Índice Holístico de Riesgo (IHR) como medida de resiliencia socioecológica a condiciones de escasez de recursos hídricos: Aplicación en comunidades campesinas e indígenas de la Araucanía, Chile. *Agroecol.* **2013**, *8*, 63–70. (In Spanish)
36. Altieri, M.A.; Nicholls, C.I. The adaptation and mitigation potential of traditional agriculture in a changing climate. *Clim. Change* **2017**, *140*, 33–45. DOI:[10.1007/s10584-013-0909-y](https://doi.org/10.1007/s10584-013-0909-y).
37. Climate and Development Knowledge Network (CDKN). *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*; CDKN: Colombia, 2013; pp. 1–3. (In Spanish)
38. Santibáñez, F.; Santibáñez, P.; Solis, L. Análisis de vulnerabilidad del sector silvoagropecuario, recursos hídricos y edáficos de Chile frente a escenarios de cambio climático; AGRIMED, Facultad de Ciencias Agronómicas; Universidad de Chile: Santiago, Chile, **2008**; pp. 9–30. (In Spanish)
39. García-Hidalgo, Y. Índice de vulnerabilidad del recurso hídrico con fines de riego en la cuenca hidrográfica del Río Naranjo, Cuba. *Rev. Geogr. Am. Cent.* **2017**, *1*, 315–330. DOI:[10.15359/rgac.58-1.13](https://doi.org/10.15359/rgac.58-1.13). (In Spanish)
40. Ehsani, N.; Vörösmarty, C.J.; Fekete, B.M.; Stakhiv, E.Z. Reservoir operations under climate change: Storage capacity options to mitigate risk. *J. Hydrol.* **2017**, *555*, 435–446. DOI:[10.1016/j.jhydrol.2017.09.008](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.09.008).
41. Demissew, W.L.; Zeleke, T.T.; Ture, K.; Mengistu, D.K.; Fufa, M.A. Agroclimatic indicator analysis under climate change conditions to predict the climatic suitability for wheat production in the Upper Blue Nile Basin, Ethiopia. *Agriculture* **2025**, *15*, 525. DOI:[10.3390/agriculture15050525](https://doi.org/10.3390/agriculture15050525).
42. Phillips, S.J.; Anderson, R.P.; Schapire, R.E. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecol. Modell.* **2006**, *190*, 231–259. DOI:[10.1016/j.ecolmodel.2005.03.026](https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2005.03.026).
43. Zhou, Z.; Liu, X.; Liu, R.; Liu, J.; Liu, W.; Yang, Q.; Luo, X.; Wang, R.; Xing, L.; Zhao, H.; et al. Sugarcane distribution simulation and climate change impact analysis in China. *Agriculture* **2025**, *15*, 491. DOI:[10.3390/agriculture15050491](https://doi.org/10.3390/agriculture15050491).
44. Ferrer, M.; Pedocchi, R.; Michelazzo, M.; González-Neves, G.; Carbonneau, A. Delimitación y descripción de regiones vitícolas del Uruguay en base al método de clasificación climática multicriterio utilizando índices bioclimáticos adaptados a las condiciones del cultivo. *Agrociencia* **2007**, *11*, 47–56. DOI:[10.31285/AGRO.11.768](https://doi.org/10.31285/AGRO.11.768). (In Spanish)
45. Uribe, J.; Cabrera, R.; De la Fuente, A.; Paneque, M. Atlas bioclimático de Chile. In *Universidad de Chile, Ministerio de Bienes Nacionales*; Gobierno de Chile: Santiago, Chile, 2012; pp. 10–26. (In Spanish)
46. Reyes, M.; Arribillaga, D. Capítulo 8. Grados días y fenología en vides. In *Descripción y Usos de la Red de Agrometeorología*, Chacón, G., Ed.; Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIA): Santiago, Chile, 2019; Boletín n° 415, pp. 72–79. (In Spanish)
47. Gómez, J.; Morales, L. Algunas consideraciones sobre el concepto de Horas-Frío y sus métodos de cálculo: Alternativa en su estudio; Colegio de Geografía; Ciudad de México: México, 2020; pp. 1–4. (In Spanish)
48. Brouwer, C.; Heibloem, M. Irrigation water management: Irrigation water needs. In *Training Manual*; Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO): Rome, Italy, 1986; pp. 65–70.
49. Martínez-Cob, A.; Tejero-Juste, M. A wind-based qualitative calibration of the Hargreaves ET0 estimation equation in semiarid regions. *Agric. Water Manag.* **2004**, *64*, 251–264. DOI:[10.1016/S0378-3774\(03\)00199-9](https://doi.org/10.1016/S0378-3774(03)00199-9).
50. Hargreaves, G.H.; Samani, Z.A. Estimating potential evapotranspiration. *J. Irrig. and Drain. Div.* **1982**, *108*, 225–230. DOI:[10.1061/JRCEA4.0001390](https://doi.org/10.1061/JRCEA4.0001390).
51. Allen, R.; Pereira, L.; Raes, D.; Smith, M. *Crop Evapotranspiration: Guidelines for computing Crop Water Requirements*; Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO): Rome, Italy, **1998**, Volume 56.

52. Hernández, J.; Galleguillos, M.; Estades, C. *Mapa de Cobertura de Suelos de Chile 2014: Descripción del Producto*; Laboratorio de Geomática y Ecología de Paisaje (GEP), Facultad de Ciencias Forestales y de la Conservación de la Naturaleza, Universidad de Chile: Santiago, Chile, 2016; pp. 1–4. (In Spanish)
53. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). *El Clima Injusto: Medir el Impacto del Cambio Climático en la Población Rural Pobre, las Mujeres y los Jóvenes* [Resumen]; Food and Agriculture Organization: Roma, Italy, 2024 (accessed on 13 Apr 2025). DOI:[10.4060/cc9638es](https://doi.org/10.4060/cc9638es). (In Spanish)
54. Grupo Banco Mundial. Riego resiliente frente al clima; World Bank Group (Grupo Banco Mundial): Washington, DC, USA, 2022. Available online: <https://www.bancomundial.org/es/topic/climate-resilient-irrigation> (accessed on 10 Apr 2025). (In Spanish).
55. Eekhout, J.P.C.; de Vente, J. Global impact of climate change on soil erosion and potential for adaptation through soil conservation. *Earth Sci. Rev.* **2022**, *226*, 103921. DOI:[10.1016/j.earscirev.2022.103921](https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2022.103921).
56. Aro, E. Determinación de la vulnerabilidad del sector frutícola al cambio climático en las comunas de la Región de Coquimbo. Tesis de Título. *Univ. Chile Fac. Cienc. Agronom.* **2020**. (In Spanish)
57. Antúnez, A.; Mora, D.; Felmer, S.; de O'Higgins, R. Eficiencia por sistemas de riego por goteo en el seco. *INIA Tierra Adentro* **2010**, *88*, 40–43. (In Spanish)
58. Otero, A.; García, C. Capítulo 10. Eficiencia en el uso del agua: Estrategias de manejo del agua de riego. In *Aportes Científicos y Tecnológicos del INIA del Uruguay a las Trayectorias Agroecológicas*, Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA), Ed.; INIA: Montevideo, Uruguay, 2024; pp. 197–211. (In Spanish)
59. Córdoba-Vargas, C.; T. León-Sicard. Resiliencia de Sistemas Agrícolas Ecológicos y convencionales frente a la variabilidad climática en Anolaima (Cundinamarca Colombia). *Agroecol.* **2013**, *8*, 21–32. (In Spanish)
60. Graveline, N.; Grémont, M. The role of perceptions, goals and characteristics of wine growers on irrigation adoption in the context of climate change. *Agricul. Water Manag.* **2021**, *250*, 106837. DOI:[10.1016/j.agwat.2021.106837](https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.106837).
61. Naulleau, A.; Gary, C.; Prévot, L.; Hossard, L. Evaluating strategies for adaptation to climate change in grapevine production—A systematic review. *Front. Plant. Sci.* **2020**, *11*, 607859. DOI:[10.3389/fpls.2020.607859](https://doi.org/10.3389/fpls.2020.607859).
62. Peredo Parada, S.; Vela Campoy, M.; Jiménez Gómez, A. Determinación de los niveles de resiliencia/vulnerabilidad en iniciativas de agroecología urbana en el suroeste andaluz. *Idesia* **2016**, *34*, 5–13. DOI:[10.4067/S0718-34292016005000003](https://doi.org/10.4067/S0718-34292016005000003). (In Spanish).
63. Feres, J.C.; Mencero, X., Eds. Enfoques para la medición de pobreza: Breve revisión de la literatura; Serie 4: Estudios estadísticos y prospectivos; Comisión Económica Para América Latina y El Caribe (CEPAL); Organización de Naciones Unidas (ONU): Santiago, Chile, 2001; pp. 9–18. (In Spanish)
64. Del Callejo, I.; Ampuero, R. Capítulo 4. Sistemas productivos y medios de sustento: Vulnerabilidad y estrategias de respuesta frente a la sequía. In *Agua y Medios de Vida: Vulnerabilidad de los Sistemas Hídricos y Sistemas Productivos en el Chaco Cruceño*; Centro AGUA-UMSS; Acción contra el Hambre: Cochabamba; Bolivia, **2013**; pp. 132. (In Spanish)
65. Adler, F. Los embalses y los recursos hídricos superficiales. *Rev. Cienc. Exactas Ing.* **2006**, *27*, 1–12. (In Spanish)
66. Espinoza, M. Embalses como infraestructura de resistencia a la sequía y configuradores de paisaje: Estrategias para su integración y resiliencia en el paisaje del agua: El caso de embalse Puclaro. Tesis de Magíster. *Pontificia Univ. Católica Chile Fac. Arquitectura Diseño Estud. Urb.* **2022**. (In Spanish)
67. Wassmann, R.; Villanueva, J.; Khounthavong, M.; Okumu, B.O.; Vo, T.B.T.; Sander, B.O. Adaptation, mitigation and food security: Multi-criteria ranking system for climate-smart agriculture technologies illustrated for rainfed rice in Laos. *Glob. Food Sec.* **2019**, *23*, 33–40. DOI:[10.1016/j.gfs.2019.02.003](https://doi.org/10.1016/j.gfs.2019.02.003).
68. Organización Internacional del Vino (OIV). Protocolo de la OIV para el uso sostenible del agua en la Viticultura; OIV: Paris, France, 2018. Available online: <https://www.oiv.int/es/node/3132/download/pdf> (accessed on 13 Apr 2025). (In Spanish).
69. Tamburini, G.; Bommarco, R.; Wanger, T.C.; Kremen, C.; van der Heijden, M.G.A.; Liebman, M.; Hallin, S. Agricultural diversification promotes multiple ecosystem services without compromising yield. *Sci. Adv.* **2020**, *6*, eaba1715. DOI:[10.1126/sciadv.aba1715](https://doi.org/10.1126/sciadv.aba1715).
70. Pastén-Valdés, P. Planificación y resiliencia en zonas de riesgo. Estudio de caso comuna de Constitución urbana, VII Región del Maule, post 27F. Tesis de Magíster, Universidad de Chile, Facultad de Arquitectura y Urbanismo, 2016. (In Spanish).

71. Álvarez-Garretón, C.; Boisier, J.P.; Blanco, G.; Billi, M.; Nicolas-Artero, C.; Maillet, A.; Aldunce, P.; Urrutia-Jalabert, R.; Zambrano-Bigiarini, M.; Guevara, G.; et al. Seguridad hídrica en Chile: Caracterización y perspectivas de futuro. *Santiago, Chile; Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia* **2023**, *CR2*, 12–13. (In Spanish)
72. Easton-Vargas, G.; Pérez, S.; Aldunce, P., Eds. Aluviones y resiliencia en Atacama. Construyendo saberes sobre riesgos y desastres; Social-Ediciones, Facultad de Ciencias Sociales; Universidad de Chile: Santiago, Chile, 2018; pp. 16–17. DOI:[10.34720/jr4r-6j31](https://doi.org/10.34720/jr4r-6j31). (In Spanish)
73. Stehr, A.; Álvarez, C.; Álvarez, P.; Arumí, J.L.; Baeza, C.; Barra, R.; Berroeta, C.A.; Castillo, Y.; Chiang, G.; Cotoras, D.; et al. Recursos hídricos en Chile: Impactos y adaptación al cambio climático. Informe de la Mesa Agua; Comité Científico COP25. Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación; Gobierno de Chile: Santiago, Chile, 2019; pp. 36–38. (In Spanish)
74. Reyes, M.; Salazar, C. Heladas en vides. In *Heladas. Factores Atmosféricos, Tendencias y Efectos en Frutales y Vides*, Bravo, R., Muñoz, M., Quintana, J., Eds.; Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIA): Santiago, Chile, 2020; Boletín N° 417; pp. 55–70. (In Spanish)
75. Moreiras, S.M.; Sepúlveda, S.A.; Correas-González, M.; Lauro, C.; Vergara, I.; Jeanneret, P.; Junquera-Torrado, S.; Cuevas, J.G.; Maldonado, A.; Antinao, J.L.; et al. Debris Flows Occurrence in the Semi-arid Central Andes under Climate Change Scenario. *Geosciences* **2021**, *11*, 43. DOI:[10.3390/geosciences11020043](https://doi.org/10.3390/geosciences11020043).
76. Jorqueta-Fontena, E.; Orrego-Verdugo, R. Impacto del calentamiento global en la fenología de una variedad de vid cultivada en el sur de Chile. *Agrociencia* **2010**, *44*, 427–435. (In Spanish)
77. Giraldo, C. Escenarios de la vitivinicultura chilena generados por los cambios en la aptitud productiva, como consecuencia del cambio climático para mediados del Siglo XXI. Tesis de Magíster, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Forestales y de la Conservación de la Naturaleza, 2017. (In Spanish)
78. Faralli, M.; Mallucci, S.; Bignardi, A.; Varner, M.; Bertamini, M. Four decades in the vineyard: The impact of climate change on grapevine phenology and wine quality in northern Italy. *OENO One* **2024**, *58*, 8083. DOI:[10.20870/oeno-one.2024.58.3.8083](https://doi.org/10.20870/oeno-one.2024.58.3.8083).
79. Williamson, J.A.; Petrone, R.M.; Valentini, R.; Macrae, M.L.; Reynolds, A. Assessing the influence of climate controls on grapevine biophysical responses: A review of Ontario viticulture in a changing climate. *Can. J. Plant Sci.* **2024**, *104*, 394–409. DOI:[10.1139/cjps-2023-0161](https://doi.org/10.1139/cjps-2023-0161).
80. Selles, G.; Ferreyra, R.; Contreras, G. *Manejo de Riego por Goteo en Uva de Mesa (Vitis vinifera L.) cv. Thompson Seedless Cultivada en Suelos de Textura Fina*; Comisión Nacional de Riego (CNR): Santiago, Chile, 2002; pp. 180–189. (In Spanish)
81. Shock, C.; Welch, T. *El Riego por Goteo: Una Introducción. Técnicas para la Agricultura Sostenible*, EM 8782-S; Oregon State University, 2013; pp. 1–7. (In Spanish)
82. Xu, W.; Zhong, Z.; Proverbs, D.; Xiong, S.; Zhang, Y. Enhancing the resilience of the management of water resources in the agricultural supply chain. *Water* **2021**, *13*. DOI:[10.3390/w13121619](https://doi.org/10.3390/w13121619).
83. Fundación para la Innovación Agraria (FIA). Resultados y lecciones. En *Programa de Eficiencia Hídrica para la Pequeña Agricultura de la Región de Valparaíso, Serie Experiencias de Innovación para el Emprendimiento Agrario*, N° 159; FIA: Santiago, Chile, 2022; pp. 21–69. (In Spanish)
84. Orteaga, J.; Foster, W.; Valdés, A. Capítulo 5. La Agricultura Familiar en Chile: Cambios recientes y políticas para su contribución al desarrollo nacional. In *Estudio: Desafíos de la Agricultura y Desarrollo Rural en Chile*, Valdés, A., Foster, W., Orteaga, J., Pérez, R., Vargas, G., Eds.; Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (ODEPA), Ministerio de Agricultura; Gobierno de Chile: Santiago, Chile, 2022; pp. 82–87. (In Spanish)
85. Welz, J.; Krellenberg, K. Vulnerabilidad frente al cambio climático en la Región Metropolitana de Santiago de Chile: Posiciones teóricas versus evidencias empíricas. *Eure* **2016**, *42*, 251–272. DOI:[10.4067/S0250-71612016000100011](https://doi.org/10.4067/S0250-71612016000100011). (In Spanish)
86. Zito, S.; Pergaud, J.; Richard, Y.; Castel, T.; Le Roux, R.; García de Cortázar-Atauri, I.; Quenol, H.; Bois, B. Projected impacts of climate change on viticulture over French wine regions using downscaled CMIP6 multi-model data. *OENO One* **2023**, *57*, 419–434. DOI:[10.20870/oeno-one.2023.57.2.7441](https://doi.org/10.20870/oeno-one.2023.57.2.7441).
87. Castillo, N.; Cavazos, T.; Pavía, E.G. Impact of climate change in Mexican winegrape regions. *Int. J. Climatol.* **2023**, *43*, 6621–6642. DOI:[10.1002/joc.8224](https://doi.org/10.1002/joc.8224).

-
88. Prada, J.; Dinis, L.T.; Soriato, E.; Vandelle, E.; Soletkin, O.; Uysal, Ş.; Dihazi, A.; Santos, C.; Santos, J.A. Climate change impact on Mediterranean viticultural regions and site-specific climate risk-reduction strategies. *Mitig. Adapt. Strateg. Glob. Change* **2024**, *29*, 52. DOI:[10.1007/s11027-024-10146-0](https://doi.org/10.1007/s11027-024-10146-0).
89. Engler, A. Capítulo 5. Capital social y adopción de tecnologías de Riego. In *Tecnologías de Riego en la Producción de Vid vinífera en Chile: Aspectos Técnicos, Económicos y Sociales*, Engler, A., Bopp, C., Jara-Rojas, R., Eds.; Universidad de Talca: Talca, Chile, 2017; pp. 48–51. (In Spanish)
90. Rojas, M.; Aldunce, P.; Farías, L.; González, H.; Marquet, P.A.; Muñoz, J.C.; Palma-Behnke, R.; Stehr, A.; Vicuña, S., Eds. Evidencia científica y cambio climático en Chile: Resumen para tomadores de decisiones; Comité Científico COP 25, Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación; Gobierno de Chile: Santiago, Chile, 2019; pp. 11–14. (In Spanish).
91. Aldunce, P.; Vicuña, S. Adaptación al cambio climático en Chile: *Brechas y recomendaciones. Informe de las Mesas Adaptación y Agua*; Comité Científico COP25, Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación, Gobierno de Chile: Santiago, Chile, 2019; pp. 14-16. (In Spanish)

2.7. Supplementary Materials

Table S1. Exposure component for the current (2017–2024) and future (2046–2065) periods in the viticulture municipalities between the Atacama and Biobío regions in Chile.

Region	Municipality	Cultivated area	Irrigation zone	Irrigation infrastructure		Exposure component	
				Current	Future	Current	Future
Atacama	Alto Del Carmen	0.93	0.76	0.00	0.00	0.56	0.56
	Copiapó	0.48	0.75	0.00	0.00	0.41	0.41
	Freirina	0.02	1.00	0.00	0.00	0.34	0.34
	Huasco	0.00	0.25	0.00	0.00	0.08	0.08
	Tierra Amarilla	1.00	1.00	0.00	0.00	0.67	0.67
	Vallenar	0.43	0.62	0.00	0.00	0.35	0.35
Coquimbo	Combarbalá	0.68	0.99	0.00	0.00	0.56	0.56
	Coquimbo	0.03	1.00	0.00	0.00	0.34	0.34
	Illapel	0.10	0.44	0.00	0.00	0.18	0.18
	La Higuera	0.44	0.00	1.00	1.00	0.48	0.48
	La Serena	0.10	0.00	0.00	0.00	0.03	0.03
	Monte Patria	0.59	0.92	0.00	0.00	0.50	0.50
	Ovalle	0.47	0.61	0.00	0.00	0.36	0.36
	Paihuano	0.84	0.63	1.00	1.00	0.82	0.82
	Punitaqui	0.71	0.00	1.00	1.00	0.57	0.57
	Río Hurtado	0.67	0.71	1.00	1.00	0.80	0.80
	Salamanca	0.61	0.39	0.00	0.00	0.33	0.33
	Vicuña	0.66	0.75	0.00	0.00	0.47	0.47
Valparaíso	Algarrobo	0.23	0.00	0.00	0.00	0.08	0.08
	Cabildo	0.00	1.00	0.00	0.00	0.33	0.33
	Calle Larga	0.54	1.00	0.00	0.00	0.51	0.51
	Cartagena	0.91	0.31	0.00	0.00	0.41	0.41
	Casablanca	0.90	0.11	0.00	0.00	0.34	0.34
	Catemu	0.33	1.00	0.00	0.00	0.44	0.44
	Hijuelas	0.08	0.00	0.00	0.00	0.03	0.03
	La Cruz	0.00	1.00	0.00	0.00	0.33	0.33
	Limache	0.02	0.74	0.00	0.00	0.25	0.25
	Llay-Llay	0.15	0.92	0.00	0.00	0.35	0.35
	Los Andes	0.54	1.00	1.00	0.00	0.85	0.51
	Nogales	0.00	1.00	0.00	0.00	0.33	0.33
	Panquehue	0.19	0.71	0.00	0.00	0.30	0.30
	Petorca	0.00	0.78	1.00	0.00	0.59	0.26
	Puchuncaví	0.04	0.00	1.00	1.00	0.35	0.35
	Putendo	0.11	0.98	0.00	0.00	0.36	0.36
	Quillota	0.10	0.02	0.00	0.00	0.04	0.04
	Quilpué	0.23	0.87	0.00	0.00	0.37	0.37
	Rinconada	0.58	0.99	0.00	0.00	0.52	0.52
	San Antonio	0.63	0.05	0.00	0.00	0.22	0.22
	San Esteban	0.63	0.94	1.00	0.00	0.86	0.52
	San Felipe	0.60	0.90	0.00	0.00	0.50	0.50
Santa María	0.64	0.95	0.00	0.00	0.53	0.53	
Santo Domingo	0.11	0.15	0.00	0.00	0.09	0.09	
Zapallar	0.34	0.00	0.00	0.00	0.11	0.11	

Metropolitan	Alhué	0.41	0.42	1.00	1.00	0.61	0.61
	Buín	0.44	0.60	0.00	0.00	0.34	0.34
	Calera de Tango	0.17	0.76	0.00	0.00	0.31	0.31
	Cerro Navia	0.44	1.00	1.00	1.00	0.81	0.81
	Colina	0.48	1.00	0.00	0.00	0.49	0.49
	Curacaví	0.06	0.77	0.00	0.00	0.28	0.28
	El Monte	0.10	0.32	0.00	0.00	0.14	0.14
	Isla De Maipo	0.51	0.25	0.00	0.00	0.25	0.25
	La Pintana	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	Lampa	0.42	1.00	0.00	0.00	0.47	0.47
	Maipú	0.48	0.85	0.00	0.00	0.44	0.44
	María Pinto	0.09	0.46	0.00	0.00	0.19	0.19
	Melipilla	0.11	0.44	0.00	0.00	0.19	0.19
	Padre Hurtado	0.11	0.28	0.00	0.00	0.13	0.13
	Paine	0.33	0.56	0.00	0.00	0.30	0.30
	Peñalolén	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	Peñaflor	0.07	1.00	1.00	1.00	0.69	0.69
	Pirque	0.34	0.12	0.00	0.00	0.15	0.15
	Pudahuel	0.22	1.00	0.00	0.00	0.41	0.41
	Puente Alto	0.98	0.33	1.00	1.00	0.77	0.77
	Renca	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
San Bernardo	0.23	0.36	0.00	0.00	0.19	0.19	
San José De Maipo	0.02	0.04	0.00	0.00	0.02	0.02	
San Pedro	0.15	0.28	0.00	0.00	0.14	0.14	
Talagante	0.21	0.43	0.00	0.00	0.22	0.22	
Tiltil	0.30	0.88	0.00	0.00	0.39	0.39	
O'Higgins	Chépica	0.51	0.29	0.00	0.00	0.27	0.27
	Chimbarongo	0.19	0.18	0.00	0.00	0.12	0.12
	Codegua	0.16	0.80	0.00	0.00	0.32	0.32
	Coltauco	0.23	0.88	0.00	0.00	0.37	0.37
	Doñihue	0.11	0.93	0.00	0.00	0.34	0.34
	Graneros	0.24	0.68	1.00	1.00	0.64	0.64
	La Estrella	0.02	0.93	0.00	0.00	0.32	0.32
	Las Cabras	0.34	0.66	0.00	0.00	0.33	0.33
	Litueche	0.34	0.14	0.00	0.00	0.16	0.16
	Lolol	0.46	0.24	0.00	0.00	0.24	0.24
	Machalí	0.28	0.86	1.00	1.00	0.71	0.71
	Malloa	0.23	0.86	0.00	0.00	0.37	0.37
	Marchigüe	0.86	0.24	0.00	0.00	0.37	0.37
	Mostazal	0.21	0.49	0.00	0.00	0.23	0.23
	Nancagua	0.73	0.43	0.00	0.00	0.39	0.39
	Navidad	0.00	0.02	0.00	0.00	0.01	0.01
	Olivar	0.16	0.67	0.00	0.00	0.28	0.28
	Palmilla	0.65	0.16	0.00	0.00	0.27	0.27
	Paredones	0.94	0.75	0.00	0.00	0.56	0.56
	Peralillo	0.76	0.23	0.00	0.00	0.33	0.33
Peumo	0.30	0.23	0.00	0.00	0.18	0.18	
Pichidegua	0.27	0.17	0.00	0.00	0.14	0.14	
Pichilemu	0.12	1.00	0.00	0.00	0.37	0.37	
Placilla	0.57	0.64	1.00	1.00	0.74	0.74	

	Pumanque	0.79	0.36	0.00	0.00	0.38	0.38
	Quinta De Tilcoco	0.31	0.40	1.00	0.00	0.57	0.24
	Rancagua	0.27	0.60	0.00	0.00	0.29	0.29
	Rengo	0.20	0.58	0.00	0.00	0.26	0.26
	Requínoa	0.27	0.43	0.00	0.00	0.23	0.23
	San Fernando	0.38	0.55	1.00	1.00	0.65	0.65
	San Vicente	0.52	0.58	0.00	0.00	0.37	0.37
	Santa Cruz	0.63	0.36	0.00	0.00	0.33	0.33
Maule	Cauquenes	0.85	0.56	0.00	0.00	0.47	0.47
	Chanco	0.02	0.87	0.00	0.00	0.29	0.29
	Colbún	0.03	0.47	0.00	0.00	0.17	0.17
	Constitución	0.86	0.91	0.00	0.00	0.59	0.59
	Curepto	0.61	0.62	0.00	0.00	0.41	0.41
	Curicó	0.26	0.31	0.00	0.00	0.19	0.19
	Empedrado	0.90	0.63	1.00	0.00	0.84	0.51
	Hualañé	0.51	0.68	0.00	0.00	0.40	0.40
	Licantén	0.60	0.01	0.00	0.00	0.20	0.20
	Linares	0.17	0.62	0.00	0.00	0.26	0.26
	Longaví	0.04	0.82	0.00	0.00	0.29	0.29
	Maule	0.59	0.33	0.00	0.00	0.31	0.31
	Molina	0.48	0.32	0.00	0.00	0.27	0.27
	Parral	0.10	0.88	0.00	0.00	0.33	0.33
	Pelarco	0.04	0.79	0.00	0.00	0.27	0.27
	Pencahue	0.48	0.27	0.00	0.00	0.25	0.25
	Rauco	0.39	0.45	0.00	0.00	0.28	0.28
	Retiro	0.14	0.17	0.00	0.00	0.10	0.10
	Río Claro	0.25	0.38	0.00	0.00	0.21	0.21
	Romeral	0.22	0.67	0.00	0.00	0.30	0.30
	Sagrada Familia	0.32	0.40	0.00	0.00	0.24	0.24
	San Clemente	0.29	0.23	0.00	0.00	0.18	0.18
	San Javier	0.87	0.49	0.00	0.00	0.45	0.45
	San Rafael	0.26	0.19	0.00	0.00	0.15	0.15
	Talca	0.66	0.44	0.00	0.00	0.37	0.37
	Teno	0.13	0.30	0.00	0.00	0.14	0.14
	Vichuquén	0.99	0.87	1.00	1.00	0.95	0.95
	Villa Alegre	0.77	0.50	0.00	0.00	0.42	0.42
	Yerbas Buenas	0.16	0.21	1.00	1.00	0.45	0.45
Ñuble	Bulnes	0.06	0.77	0.00	0.00	0.28	0.28
	Chillán	0.31	0.80	0.00	0.00	0.37	0.37
	Chillan Viejo	0.58	0.84	0.00	0.00	0.47	0.47
	Cobquecura	0.70	1.00	0.00	0.00	0.57	0.57
	Coelemu	0.98	1.00	0.00	0.00	0.66	0.66
	Coihueco	0.00	1.00	0.00	0.00	0.33	0.33
	El Carmen	0.00	0.85	0.00	0.00	0.28	0.28
	Ninhue	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	Ñiquén	0.04	0.88	1.00	1.00	0.64	0.64
	Pemuco	0.01	1.00	0.00	0.00	0.34	0.34
	Pinto	0.00	1.00	1.00	0.00	0.67	0.33
	Portezuelo	0.94	0.95	0.00	0.00	0.63	0.63
	Quillón	0.64	0.99	0.00	0.00	0.55	0.55

	Quirihue	1.00	0.95	0.00	0.00	0.65	0.65
	Ránquil	0.96	1.00	0.00	0.00	0.65	0.65
	San Carlos	0.09	0.86	0.00	0.00	0.32	0.32
	San Ignacio	0.01	1.00	1.00	1.00	0.67	0.67
	San Nicolás	0.35	0.90	0.00	0.00	0.42	0.42
	Trehuaco/Treguaco	1.00	1.00	0.00	0.00	0.67	0.67
	Yungay	0.01	0.90	1.00	1.00	0.64	0.64
Biobío	Cabrero	0.37	0.00	0.00	0.00	0.12	0.12
	Coronel	0.12	1.00	0.00	0.00	0.37	0.37
	Florida	0.93	1.00	1.00	1.00	0.98	0.98
	Hualqui	1.00	0.96	0.00	0.00	0.65	0.65
	Laja	1.00	0.99	0.00	0.00	0.66	0.66
	Los Ángeles	0.03	0.87	0.00	0.00	0.30	0.30
	Mulchén	0.56	0.20	0.00	0.00	0.25	0.25
	Nacimiento	0.62	0.97	0.00	0.00	0.53	0.53
	Negrete	0.51	0.19	0.00	0.00	0.23	0.23
	San Rosendo	0.41	1.00	0.00	0.00	0.47	0.47
	Santa Bárbara	0.01	0.71	0.00	0.00	0.24	0.24
	Santa Juana	0.44	0.97	0.00	0.00	0.47	0.47
	Talcahuano	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	Tomé	0.95	1.00	1.00	1.00	0.98	0.98
	Yumbel	0.49	0.69	0.00	0.00	0.39	0.39

Table S2. Sensitivity component for the current (2017–2024) and future (2046–2065) periods in the viticulture municipalities between the Atacama and Biobío regions in Chile.

Region	Municipality	Climatic suitability		Rurality	State of water bodies	Eroded surface	Sensitivity component	
		Current	Future				Current	Future
Atacama	Alto Del Carmen	0.90	0.93	1.00	1.00	0.54	0.86	0.87
	Copiapó	0.77	0.90	0.02	1.00	0.49	0.57	0.60
	Freirina	0.73	1.00	0.35	1.00	0.74	0.71	0.77
	Huasco	0.75	1.00	0.12	1.00	0.68	0.64	0.70
	Tierra Amarilla	0.87	0.92	0.29	1.00	0.67	0.71	0.72
	Vallenar	0.58	0.86	0.11	1.00	0.87	0.64	0.71
Coquimbo	Combarbalá	0.55	0.89	0.55	1.00	0.91	0.75	0.84
	Coquimbo	0.75	1.00	0.06	1.00	0.81	0.66	0.72
	Illapel	0.69	0.87	0.32	1.00	0.86	0.72	0.76
	La Higuera	0.74	0.94	0.70	1.00	0.95	0.85	0.89
	La Serena	0.72	0.98	0.09	1.00	0.91	0.68	0.75
	Monte Patria	0.65	0.85	0.50	1.00	0.80	0.74	0.79
	Ovalle	0.63	0.99	0.21	1.00	0.82	0.67	0.76
	Paihuano	0.93	0.94	1.00	1.00	0.67	0.90	0.90
	Punitaqui	0.55	0.99	0.47	1.00	0.93	0.74	0.85
	Río Hurtado	0.74	0.93	1.00	1.00	0.85	0.90	0.94
	Salamanca	0.80	0.86	0.43	1.00	0.77	0.75	0.76
	Vicuña	0.86	0.95	0.39	1.00	0.77	0.75	0.78
	Valparaíso	Algarrobo	0.75	0.76	0.21	1.00	0.66	0.66
Cabildo		0.64	0.79	0.37	1.00	0.69	0.68	0.71
Calle Larga		0.76	0.76	0.28	1.00	0.73	0.69	0.69
Cartagena		0.64	0.78	0.08	1.00	0.62	0.59	0.62
Casablanca		0.61	0.78	0.33	1.00	0.46	0.60	0.64
Catemu		0.59	0.75	0.44	1.00	0.70	0.68	0.72
Hijuelas		0.59	0.77	0.35	1.00	0.57	0.63	0.67
La Cruz		0.53	0.76	0.12	1.00	0.35	0.50	0.56
Limache		0.56	0.81	0.15	1.00	0.62	0.58	0.65
Llay-Llay		0.49	0.77	0.27	1.00	0.78	0.63	0.70
Los Andes		0.97	0.96	0.09	1.00	0.35	0.60	0.60
Nogales		0.64	0.77	0.15	1.00	0.58	0.59	0.63
Panquehue		0.39	0.75	0.48	1.00	0.58	0.61	0.70
Petorca		0.73	0.80	0.58	1.00	0.61	0.73	0.75
Puchuncaví		0.68	0.79	0.14	1.00	0.66	0.62	0.65
Putendo		0.86	0.88	0.60	1.00	0.46	0.73	0.73
Quillota		0.57	0.77	0.13	1.00	0.46	0.54	0.59
Quilpué		0.62	0.85	0.01	1.00	0.61	0.56	0.62
Rinconada		0.57	0.75	0.21	1.00	0.70	0.62	0.67
San Antonio		0.70	0.76	0.05	0.50	0.80	0.51	0.53
San Esteban		0.92	0.92	0.40	1.00	0.45	0.69	0.69
San Felipe	0.42	0.74	0.09	1.00	0.44	0.49	0.57	
Santa María	0.56	0.72	0.36	1.00	0.45	0.59	0.63	
Santo Domingo	0.75	0.76	0.43	1.00	0.67	0.71	0.71	
Zapallar	0.63	0.76	0.32	1.00	0.70	0.66	0.70	
Metropolitan	Alhué	0.52	0.75	0.57	1.00	0.70	0.70	0.76
	Buin	0.32	0.73	0.14	1.00	0.13	0.40	0.50

	Calera de Tango	0.30	0.76	0.55	1.00	0.06	0.48	0.59
	Cerro Navia	0.77	0.87	0.00	1.00	0.00	0.44	0.47
	Colina	0.58	0.77	0.19	1.00	0.67	0.61	0.66
	Curacaví	0.44	0.74	0.38	1.00	0.62	0.61	0.69
	El Monte	0.32	0.75	0.16	0.50	0.21	0.30	0.41
	Isla De Maipo	0.33	0.75	0.26	1.00	0.33	0.48	0.58
	La Pintana	0.42	0.63	0.00	0.50	0.00	0.23	0.28
	Lampa	0.43	0.75	0.21	1.00	0.44	0.52	0.60
	Maipú	0.46	0.81	0.01	1.00	0.17	0.41	0.50
	María Pinto	0.44	0.77	0.51	1.00	0.35	0.58	0.66
	Melipilla	0.50	0.75	0.31	1.00	0.41	0.56	0.62
	Padre Hurtado	0.33	0.77	0.12	1.00	0.20	0.41	0.52
	Paine	0.47	0.73	0.36	1.00	0.43	0.56	0.63
	Peñalolén	0.67	0.68	0.00	1.00	0.23	0.47	0.48
	Peñaflor	0.30	0.78	0.08	1.00	0.15	0.38	0.50
	Pirque	0.72	0.75	0.56	1.00	0.45	0.68	0.69
	Pudahuel	0.39	0.73	0.02	1.00	0.28	0.42	0.51
	Puente Alto	0.67	0.69	0.00	1.00	0.09	0.44	0.45
	Renca	0.61	0.80	0.00	1.00	0.12	0.43	0.48
	San Bernardo	0.38	0.74	0.02	1.00	0.08	0.37	0.46
	San José De Maipo	0.99	0.97	0.38	1.00	0.37	0.69	0.68
	San Pedro	0.56	0.75	1.00	1.00	0.54	0.78	0.82
	Talagante	0.25	0.76	0.20	1.00	0.18	0.41	0.53
	Tiltil	0.52	0.79	0.32	1.00	0.63	0.62	0.69
O'Higgins	Chépica	0.38	0.80	0.43	1.00	0.64	0.61	0.72
	Chimbarongo	0.56	0.75	0.42	1.00	0.25	0.56	0.61
	Codegua	0.77	0.78	0.46	1.00	0.46	0.67	0.67
	Coltauco	0.36	0.76	0.43	0.50	0.34	0.41	0.51
	Doñihue	0.48	0.70	0.21	0.50	0.52	0.43	0.48
	Graneros	0.57	0.73	0.11	1.00	0.28	0.49	0.53
	La Estrella	0.46	0.76	0.63	1.00	0.95	0.76	0.83
	Las Cabras	0.44	0.78	0.61	1.00	0.58	0.66	0.74
	Litueche	0.67	0.75	0.46	1.00	0.81	0.74	0.76
	Lolol	0.43	0.84	0.64	1.00	0.85	0.73	0.83
	Machalí	0.96	0.93	0.02	1.00	0.38	0.59	0.58
	Malloa	0.52	0.56	0.59	1.00	0.33	0.61	0.62
	Marchigüe	0.47	0.78	0.55	1.00	0.75	0.69	0.77
	Mostazal	0.82	0.83	0.17	1.00	0.63	0.66	0.66
	Nancagua	0.35	0.77	0.36	1.00	0.33	0.51	0.61
	Navidad	0.75	0.75	1.00	1.00	0.83	0.90	0.90
	Olivar	0.55	0.72	0.32	0.50	0.03	0.35	0.39
	Palmilla	0.16	0.76	0.72	1.00	0.23	0.53	0.68
	Paredones	0.51	0.76	0.70	1.00	0.70	0.73	0.79
	Peralillo	0.32	0.77	0.40	1.00	0.42	0.53	0.65
	Peumo	0.27	0.79	0.16	0.50	0.30	0.31	0.44
	Pichidegua	0.17	0.76	0.53	1.00	0.39	0.52	0.67
	Pichilemu	0.72	0.81	0.21	1.00	0.54	0.62	0.64
	Placilla	0.43	0.76	0.73	1.00	0.38	0.64	0.72
	Pumanque	0.45	0.78	1.00	1.00	0.90	0.84	0.92
	Quinta De Tilcoco	0.28	0.56	0.44	1.00	0.20	0.48	0.55

	Rancagua	0.62	0.77	0.03	0.50	0.30	0.37	0.40
	Rengo	0.70	0.67	0.22	1.00	0.43	0.59	0.58
	Requínoa	0.77	0.74	0.22	1.00	0.59	0.64	0.64
	San Fernando	0.90	0.88	0.14	1.00	0.44	0.62	0.62
	San Vicente	0.30	0.73	0.44	1.00	0.43	0.54	0.65
	Santa Cruz	0.34	0.80	0.40	1.00	0.56	0.57	0.69
Maule	Cauquenes	0.45	0.72	0.18	1.00	0.84	0.62	0.69
	Chanco	0.73	0.75	0.56	0.00	0.65	0.49	0.49
	Colbún	0.94	0.87	0.56	0.00	0.67	0.54	0.53
	Constitución	0.70	0.76	0.19	0.00	0.52	0.35	0.37
	Curepto	0.55	0.77	0.64	0.00	0.75	0.49	0.54
	Curicó	0.80	0.81	0.11	0.50	0.41	0.45	0.46
	Empedrado	0.58	0.75	0.27	0.00	0.60	0.36	0.40
	Hualañé	0.44	0.76	0.41	0.50	0.81	0.54	0.62
	Licantén	0.67	0.75	0.25	0.00	0.60	0.38	0.40
	Linares	0.77	0.59	0.17	0.00	0.37	0.33	0.28
	Longaví	0.71	0.44	0.70	0.00	0.30	0.43	0.36
	Maule	0.28	0.64	0.22	0.00	0.34	0.21	0.30
	Molina	0.83	0.84	0.19	0.50	0.33	0.46	0.46
	Parral	0.63	0.42	0.26	0.00	0.27	0.29	0.24
	Pelarco	0.40	0.42	0.69	0.00	0.23	0.33	0.34
	Pencahue	0.41	0.75	0.58	0.00	0.70	0.42	0.51
	Rauco	0.32	0.75	0.47	0.50	0.72	0.50	0.61
	Retiro	0.36	0.20	0.65	1.00	0.18	0.55	0.51
	Río Claro	0.48	0.57	0.68	0.00	0.10	0.31	0.34
	Romeral	0.91	0.89	0.57	1.00	0.47	0.74	0.73
	Sagrada Familia	0.29	0.75	0.57	0.50	0.60	0.49	0.61
	San Clemente	0.90	0.84	0.50	0.50	0.38	0.57	0.56
	San Javier	0.37	0.65	0.28	0.00	0.66	0.33	0.40
	San Rafael	0.25	0.69	0.46	0.00	0.14	0.21	0.32
Talca	0.33	0.65	0.04	0.00	0.10	0.12	0.20	
Teno	0.55	0.74	0.67	1.00	0.30	0.63	0.68	
Vichuquén	0.61	0.76	0.72	0.00	0.75	0.52	0.56	
Villa Alegre	0.28	0.34	0.40	0.00	0.04	0.18	0.20	
Yerbas Buenas	0.43	0.18	0.66	0.00	0.01	0.27	0.21	
Ñuble	Bulnes	0.25	0.25	0.37	1.00	0.04	0.42	0.42
	Chillán	0.33	0.17	0.09	0.00	0.09	0.13	0.09
	Chillan Viejo	0.23	0.13	0.11	0.00	0.20	0.13	0.11
	Cobquecura	0.75	0.75	0.71	0.00	0.35	0.45	0.45
	Coelemu	0.62	0.76	0.29	0.00	0.51	0.35	0.39
	Coihueco	0.84	0.57	0.66	1.00	0.42	0.73	0.66
	El Carmen	0.73	0.23	0.60	1.00	0.27	0.65	0.53
	Ninhue	0.34	0.73	0.71	0.00	0.52	0.39	0.49
	Ñiquén	0.43	0.20	0.90	0.00	0.06	0.35	0.29
	Pemuco	0.47	0.21	0.51	1.00	0.13	0.53	0.46
	Pinto	0.93	0.75	0.50	1.00	0.52	0.74	0.69
	Portezuelo	0.28	0.73	0.63	0.00	0.43	0.34	0.45
	Quillón	0.22	0.67	0.40	0.00	0.46	0.27	0.38
	Quirihue	0.49	0.75	0.18	0.00	0.53	0.30	0.37
	Ránquil	0.32	0.74	0.72	0.00	0.39	0.36	0.46

	San Carlos	0.38	0.25	0.37	0.00	0.12	0.22	0.19
	San Ignacio	0.51	0.03	0.58	1.00	0.08	0.54	0.42
	San Nicolás	0.25	0.40	0.58	0.00	0.21	0.26	0.30
	Trehuaco/Treguaco	0.55	0.76	0.35	0.00	0.43	0.33	0.38
	Yungay	0.63	0.22	0.25	1.00	0.17	0.51	0.41
Biobío	Cabrero	0.21	0.49	0.25	0.00	0.02	0.12	0.19
	Coronel	0.80	0.78	0.03	1.00	0.29	0.53	0.53
	Florida	0.48	0.75	0.57	0.00	0.50	0.39	0.45
	Hualqui	0.69	0.76	0.14	0.00	0.37	0.30	0.32
	Laja	0.24	0.42	0.28	0.00	0.19	0.18	0.22
	Los Ángeles	0.41	0.07	0.25	0.00	0.04	0.17	0.09
	Mulchén	0.83	0.40	0.18	0.00	0.29	0.33	0.22
	Nacimiento	0.36	0.49	0.12	0.00	0.29	0.19	0.23
	Negrete	0.40	0.03	0.38	0.00	0.04	0.20	0.11
	San Rosendo	0.24	0.70	0.15	0.00	0.34	0.18	0.30
	Santa Bárbara	0.90	0.58	0.42	1.00	0.42	0.68	0.60
	Santa Juana	0.57	0.73	0.30	0.00	0.35	0.30	0.34
	Talcahuano	0.86	0.84	0.01	0.00	0.05	0.23	0.22
	Tomé	0.73	0.75	0.10	0.00	0.36	0.30	0.30
	Yumbel	0.27	0.70	0.40	0.00	0.42	0.27	0.38

Table S3. Adaptative and response capacity components in the viticulture municipalities between the Atacama and Biobío regions in Chile.

Region	Municipality	Irrigation efficiency	Participation in financing and irrigation programs	Adaptative capacity component	State support networks	Fulfilled basic needs	Response capacity component
Atacama	Alto Del Carmen	0.39	0.27	0.33	0.33	0.77	0.55
	Copiapó	0.72	0.00	0.36	1.00	0.90	0.95
	Freirina	0.00	0.00	0.00	0.33	0.79	0.56
	Huasco	1.00	0.01	0.51	0.33	0.89	0.61
	Tierra Amarilla	0.67	0.00	0.34	0.33	0.82	0.58
	Vallenar	0.96	0.00	0.48	1.00	0.89	0.95
Coquimbo	Combarbalá	0.98	0.14	0.56	1.00	0.84	0.92
	Coquimbo	0.00	0.00	0.00	0.33	0.90	0.61
	Illapel	0.70	0.00	0.35	1.00	0.85	0.92
	La Higuera	1.00	0.00	0.50	0.33	0.81	0.57
	La Serena	1.00	0.00	0.50	1.00	0.90	0.95
	Monte Patria	0.69	0.08	0.38	0.33	0.82	0.57
	Ovalle	0.97	0.01	0.49	1.00	0.87	0.93
	Paihuano	0.74	0.15	0.45	0.33	0.84	0.59
	Punitaqui	0.99	0.08	0.54	0.33	0.77	0.55
	Río Hurtado	0.74	0.09	0.42	0.33	0.75	0.54
	Salamanca	0.57	0.14	0.35	0.33	0.82	0.57
	Vicuña	0.96	0.16	0.56	0.66	0.83	0.75
Valparaíso	Algarrobo	1.00	0.00	0.50	0.33	0.90	0.62
	Cabildo	0.00	0.02	0.01	0.33	0.85	0.59
	Calle Larga	0.20	0.00	0.10	0.33	0.87	0.60
	Cartagena	1.00	0.00	0.50	0.33	0.89	0.61
	Casablanca	1.00	0.00	0.50	1.00	0.91	0.96
	Catemu	1.00	0.00	0.50	0.33	0.84	0.59
	Hijuelas	0.99	0.00	0.49	0.33	0.83	0.58
	La Cruz	0.00	0.00	0.00	0.33	0.88	0.61
	Limache	1.00	0.00	0.50	1.00	0.88	0.94
	Llay-Llay	0.91	0.00	0.46	0.33	0.85	0.59
	Los Andes	0.00	0.00	0.00	1.00	0.91	0.96
	Nogales	0.00	0.00	0.00	0.33	0.85	0.59
	Panquehue	1.00	0.00	0.50	0.33	0.87	0.60
	Petorca	1.00	0.00	0.50	1.00	0.89	0.94
	Puchuncaví	1.00	0.00	0.50	0.33	0.86	0.59
	Putendo	1.00	0.00	0.50	0.33	0.83	0.58
	Quillota	1.00	0.00	0.50	1.00	0.91	0.95
	Quilpué	1.00	0.04	0.52	0.33	0.93	0.63
	Rinconada	1.00	0.10	0.55	0.33	0.88	0.61
	San Antonio	1.00	0.00	0.50	1.00	0.88	0.94
San Esteban	0.99	0.20	0.59	0.33	0.88	0.60	
San Felipe	1.00	0.01	0.50	1.00	0.88	0.94	
Santa María	1.00	0.10	0.55	0.33	0.84	0.59	
Santo Domingo	1.00	0.00	0.50	0.33	0.91	0.62	
Zapallar	1.00	0.00	0.50	0.33	0.90	0.62	
Metropolitan	Alhué	1.00	0.00	0.50	0.33	0.88	0.61

	Buin	0.95	0.00	0.48	0.33	0.89	0.61
	Calera de Tango	0.73	0.00	0.36	0.33	0.86	0.59
	Cerro Navia	0.00	0.00	0.00	0.00	0.89	0.45
	Colina	1.00	0.00	0.50	0.33	0.87	0.60
	Curacaví	1.00	0.00	0.50	0.33	0.87	0.60
	El Monte	1.00	0.00	0.50	0.33	0.87	0.60
	Isla De Maipo	0.87	0.00	0.43	0.33	0.86	0.60
	La Pintana	0.00	0.00	0.00	0.33	0.87	0.60
	Lampa	0.00	0.00	0.00	0.33	0.87	0.60
	Maipú	0.58	0.00	0.29	0.33	0.92	0.63
	María Pinto	1.00	0.00	0.50	0.33	0.85	0.59
	Melipilla	0.85	0.00	0.43	1.00	0.88	0.94
	Padre Hurtado	0.00	0.00	0.00	0.33	0.87	0.60
	Paine	0.87	0.00	0.44	0.33	0.89	0.61
	Peñalolén	0.00	0.00	0.00	0.00	0.89	0.45
	Peñaflor	0.00	0.00	0.00	0.00	0.90	0.45
	Pirque	0.97	0.00	0.48	0.33	0.89	0.61
	Pudahuel	0.00	0.00	0.00	0.33	0.91	0.62
	Puente Alto	1.00	0.00	0.50	0.33	0.91	0.62
	Renca	0.00	0.00	0.00	0.00	0.89	0.44
	San Bernardo	0.85	0.00	0.43	1.00	0.89	0.94
	San José De Maipo	0.00	0.00	0.00	0.33	0.88	0.61
	San Pedro	1.00	0.00	0.50	0.00	0.84	0.42
	Talagante	0.85	0.00	0.43	1.00	0.90	0.95
	Tiltil	1.00	0.00	0.50	0.33	0.85	0.59
O'Higgins	Chépica	0.66	0.01	0.33	0.33	0.85	0.59
	Chimbarongo	0.91	0.00	0.46	0.33	0.85	0.59
	Codegua	0.36	0.00	0.18	0.33	0.87	0.60
	Coltauco	0.92	0.00	0.46	0.33	0.85	0.59
	Doñihue	0.18	0.02	0.10	1.00	0.87	0.93
	Graneros	0.73	0.00	0.37	0.33	0.88	0.61
	La Estrella	1.00	0.00	0.50	0.33	0.83	0.58
	Las Cabras	1.00	0.00	0.50	1.00	0.81	0.91
	Litueche	1.00	0.00	0.50	1.00	0.88	0.94
	Lolol	1.00	0.01	0.50	1.00	0.83	0.91
	Machalí	1.00	0.08	0.54	0.33	0.90	0.62
	Malloa	0.98	0.00	0.49	0.33	0.87	0.60
	Marchigüe	1.00	0.01	0.50	1.00	0.88	0.94
	Mostazal	0.93	0.00	0.47	0.33	0.88	0.61
	Nancagua	0.72	0.10	0.41	0.33	0.85	0.59
	Navidad	0.94	0.00	0.47	0.33	0.80	0.57
	Olivar	0.98	0.00	0.49	0.33	0.84	0.58
	Palmilla	0.90	0.02	0.46	0.33	0.85	0.59
	Paredones	0.99	0.03	0.51	0.33	0.78	0.56
	Peralillo	0.97	0.00	0.48	0.33	0.84	0.58
	Peumo	0.95	0.00	0.48	0.33	0.85	0.59
	Pichidegua	0.97	0.00	0.48	0.33	0.83	0.58
	Pichilemu	0.00	0.01	0.00	0.33	0.85	0.59
	Placilla	0.69	0.02	0.35	0.33	0.82	0.57
	Pumanque	1.00	0.00	0.50	0.33	0.85	0.59

	Quinta De Tilcoco	0.29	0.01	0.15	0.33	0.85	0.59
	Rancagua	0.30	0.00	0.15	1.00	0.91	0.96
	Rengo	0.88	0.00	0.44	1.00	0.87	0.94
	Requínoa	0.81	0.00	0.41	0.33	0.85	0.59
	San Fernando	0.74	0.00	0.37	1.00	0.88	0.94
	San Vicente	0.97	0.01	0.49	1.00	0.86	0.93
	Santa Cruz	0.78	0.00	0.39	1.00	0.88	0.94
Maule	Cauquenes	0.98	0.12	0.55	1.00	0.82	0.91
	Chanco	0.17	0.00	0.08	0.33	0.78	0.55
	Colbún	0.66	0.00	0.33	0.33	0.80	0.56
	Constitución	0.39	0.01	0.20	1.00	0.88	0.94
	Curepto	0.99	0.26	0.62	1.00	0.83	0.92
	Curicó	0.73	0.08	0.41	1.00	0.89	0.95
	Empedrado	1.00	0.03	0.51	0.33	0.78	0.56
	Hualañé	0.89	0.01	0.45	0.33	0.84	0.59
	Licantén	1.00	0.00	0.50	1.00	0.85	0.92
	Linares	0.52	0.00	0.26	1.00	0.88	0.94
	Longaví	0.85	0.00	0.42	1.00	0.81	0.90
	Maule	0.60	0.02	0.31	0.33	0.81	0.57
	Molina	0.66	0.26	0.46	0.33	0.89	0.61
	Parral	0.48	0.00	0.24	1.00	0.86	0.93
	Pelarco	0.97	0.00	0.49	0.33	0.79	0.56
	Pencahue	0.95	0.01	0.48	0.33	0.81	0.57
	Rauco	0.78	0.01	0.40	0.33	0.83	0.58
	Retiro	0.84	0.01	0.43	0.33	0.81	0.57
	Río Claro	0.90	0.00	0.45	0.33	0.80	0.57
	Romeral	0.89	0.00	0.45	0.33	0.85	0.59
	Sagrada Familia	0.65	0.28	0.46	0.33	0.84	0.58
	San Clemente	0.71	0.00	0.35	1.00	0.76	0.88
	San Javier	0.77	0.09	0.43	1.00	0.81	0.90
San Rafael	1.00	0.00	0.50	0.33	0.85	0.59	
Talca	0.51	0.00	0.26	1.00	0.91	0.95	
Teno	0.93	0.00	0.47	0.33	0.85	0.59	
Vichuquén	1.00	0.01	0.50	0.33	0.80	0.57	
Villa Alegre	0.46	0.02	0.24	0.33	0.85	0.59	
Yerbas Buenas	0.68	0.00	0.34	0.33	0.84	0.58	
Ñuble	Bulnes	1.00	0.00	0.50	1.00	0.85	0.92
	Chillán	0.99	0.06	0.53	1.00	0.91	0.95
	Chillan Viejo	1.00	0.04	0.52	0.33	0.85	0.59
	Cobquecura	0.00	0.00	0.00	0.33	0.80	0.57
	Coelemu	0.00	0.22	0.11	1.00	0.85	0.92
	Coihueco	0.00	0.00	0.00	0.33	0.83	0.58
	El Carmen	1.00	0.00	0.50	1.00	0.84	0.92
	Ninhue	0.00	0.18	0.09	0.33	0.84	0.59
	Ñiquén	0.00	0.00	0.00	0.33	0.87	0.60
	Pemuco	0.00	0.00	0.00	0.66	0.81	0.74
	Pinto	0.00	0.00	0.00	0.33	0.85	0.59
	Portezuelo	0.99	0.24	0.61	0.33	0.79	0.56
	Quillón	0.93	0.13	0.53	0.33	0.82	0.57
	Quirihue	0.95	0.06	0.51	1.00	0.83	0.91

	Ránquil	1.00	0.16	0.58	0.33	0.87	0.60
	San Carlos	1.00	0.02	0.51	1.00	0.87	0.94
	San Ignacio	0.00	0.00	0.00	0.66	0.82	0.74
	San Nicolás	0.99	0.07	0.53	0.33	0.89	0.61
	Trehuaco/Treguaco	0.00	0.13	0.07	0.33	0.83	0.58
	Yungay	0.00	0.00	0.00	1.00	0.85	0.93
Biobío	Cabrero	1.00	0.00	0.50	0.66	0.88	0.77
	Coronel	0.00	0.00	0.00	0.33	0.89	0.61
	Florida	0.21	0.30	0.25	0.33	0.83	0.58
	Hualqui	0.00	0.02	0.01	0.33	0.86	0.59
	Laja	0.40	0.02	0.21	0.33	0.83	0.58
	Los Ángeles	0.02	0.00	0.01	1.00	0.88	0.94
	Mulchén	0.57	0.00	0.28	0.66	0.84	0.75
	Nacimiento	0.92	0.01	0.46	0.33	0.84	0.58
	Negrete	1.00	0.00	0.50	0.33	0.83	0.58
	San Rosendo	0.00	0.07	0.04	0.33	0.83	0.58
	Santa Bárbara	1.00	0.00	0.50	1.00	0.85	0.93
	Santa Juana	0.37	0.04	0.21	0.33	0.85	0.59
	Talcahuano	0.00	0.00	0.00	0.33	0.91	0.62
	Tomé	0.00	0.19	0.09	0.33	0.91	0.62
	Yumbel	1.00	0.03	0.52	1.00	0.82	0.91

Table S4. Local Climate Risk Index (LCRI) for the current (2017–2024) and future (2046–2065) periods in the viticulture municipalities between the Atacama and Biobío regions in Chile.

Region	Municipalities	MCRI	
		Current	Future
Atacama	Alto Del Carmen	0.64	0.64
	Copiapó	0.42	0.42
	Freirina	0.62	0.64
	Huasco	0.40	0.42
	Tierra Amarilla	0.62	0.62
	Vallenar	0.39	0.41
Coquimbo	Combarbalá	0.46	0.48
	Coquimbo	0.60	0.61
	Illapel	0.41	0.42
	La Higuera	0.56	0.58
	La Serena	0.31	0.33
	Monte Patria	0.57	0.58
	Ovalle	0.40	0.42
	Paihuano	0.67	0.67
	Punitaqui	0.56	0.58
	Río Hurtado	0.68	0.70
	Salamanca	0.54	0.54
	Vicuña	0.48	0.48
	Valparaíso	Algarrobo	0.40
Cabildo		0.60	0.61
Calle Larga		0.63	0.63
Cartagena		0.47	0.48
Casablanca		0.37	0.38
Catemu		0.51	0.52
Hijuelas		0.39	0.41
La Cruz		0.56	0.57
Limache		0.35	0.36
Llay-Llay		0.49	0.50
Los Andes		0.62	0.54
Nogales		0.58	0.59
Panquehue		0.45	0.48
Petorca		0.47	0.39
Puchuncaví		0.47	0.48
Putendo		0.50	0.50
Quillota		0.28	0.29
Quilpué		0.44	0.46
Rinconada		0.50	0.51
San Antonio		0.32	0.33
San Esteban		0.59	0.50
San Felipe	0.39	0.41	
Santa María	0.54	0.51	
Santo Domingo	0.42	0.42	
Zapallar	0.46	0.42	
Metropolitan	Alhué	0.55	0.57
	Buín	0.41	0.44

	Calera de Tango	0.46	0.49
	Cerro Navia	0.70	0.71
	Colina	0.50	0.51
	Curacaví	0.45	0.47
	El Monte	0.34	0.36
	Isla De Maipo	0.43	0.45
	La Pintana	0.66	0.67
	Lampa	0.60	0.62
	Maipú	0.48	0.51
	María Pinto	0.42	0.44
	Melipilla	0.34	0.36
	Padre Hurtado	0.49	0.51
	Paine	0.45	0.47
	Peñalolén	0.76	0.76
	Peñaflor	0.66	0.69
	Pirque	0.44	0.44
	Pudahuel	0.55	0.57
	Puente Alto	0.52	0.52
	Renca	0.75	0.76
	San Bernardo	0.30	0.32
	San José De Maipo	0.52	0.52
	San Pedro	0.50	0.51
	Talagante	0.31	0.34
	Tiltil	0.48	0.50
O'Higgins	Chépica	0.49	0.51
	Chimbarongo	0.41	0.42
	Codegua	0.55	0.55
	Coltauco	0.43	0.46
	Doñihue	0.43	0.45
	Graneros	0.54	0.55
	La Estrella	0.50	0.52
	Las Cabras	0.40	0.42
	Litueche	0.36	0.37
	Lolol	0.39	0.41
	Machalí	0.54	0.53
	Malloa	0.47	0.47
	Marchigüe	0.40	0.42
	Mostazal	0.45	0.46
	Nancagua	0.47	0.50
	Navidad	0.47	0.47
	Olivar	0.39	0.40
	Palmilla	0.44	0.48
	Paredones	0.56	0.57
	Peralillo	0.45	0.48
	Peumo	0.35	0.39
	Pichidegua	0.40	0.44
	Pichilemu	0.60	0.60
	Placilla	0.61	0.63
	Pumanque	0.53	0.55
	Quinta De Tilcoco	0.58	0.51

	Rancagua	0.39	0.40
	Rengo	0.37	0.37
	Requínoa	0.47	0.47
	San Fernando	0.49	0.49
	San Vicente	0.37	0.40
	Santa Cruz	0.39	0.42
Maule	Cauquenes	0.41	0.42
	Chanco	0.54	0.54
	Colbún	0.45	0.45
	Constitución	0.45	0.45
	Curepto	0.34	0.35
	Curicó	0.32	0.32
	Empedrado	0.53	0.46
	Hualañé	0.47	0.49
	Licantén	0.29	0.30
	Linares	0.35	0.34
	Longaví	0.35	0.33
	Maule	0.41	0.43
	Molina	0.42	0.42
	Parral	0.36	0.35
	Pelarco	0.39	0.39
	Pencahue	0.41	0.43
	Rauco	0.45	0.48
	Retiro	0.41	0.40
	Río Claro	0.38	0.38
	Romeral	0.50	0.50
	Sagrada Familia	0.42	0.45
	San Clemente	0.38	0.37
	San Javier	0.36	0.38
	San Rafael	0.32	0.35
	Talca	0.32	0.34
	Teno	0.43	0.44
	Vichuquén	0.60	0.61
	Villa Alegre	0.44	0.45
	Yerbas Buenas	0.45	0.43
Ñuble	Bulnes	0.32	0.32
	Chillán	0.25	0.24
	Chillan Viejo	0.37	0.37
	Cobquecura	0.61	0.61
	Coelemu	0.49	0.50
	Coihueco	0.62	0.60
	El Carmen	0.38	0.35
	Ninhue	0.68	0.70
	Ñiquén	0.60	0.58
	Pemuco	0.53	0.52
	Pinto	0.70	0.61
	Portezuelo	0.45	0.48
	Quillón	0.43	0.46
	Quirihue	0.38	0.40
	Ránquil	0.46	0.48

	San Carlos	0.27	0.27
	San Ignacio	0.62	0.59
	San Nicolás	0.38	0.39
	Trehuaco/Treguaco	0.59	0.60
	Yungay	0.56	0.53
Biobío	Cabrero	0.24	0.26
	Coronel	0.57	0.57
	Florida	0.63	0.65
	Hualqui	0.59	0.59
	Laja	0.51	0.52
	Los Ángeles	0.38	0.36
	Mulchén	0.39	0.36
	Nacimiento	0.42	0.43
	Negrete	0.34	0.32
	San Rosendo	0.51	0.54
	Santa Bárbara	0.37	0.35
	Santa Juana	0.50	0.51
	Talcahuano	0.65	0.65
	Tomé	0.64	0.64
	Yumbel	0.31	0.34

3. CONCLUSIONES

Este estudio desarrolló y aplicó el Índice de Riesgo Climático Local para el sector vitícola en Chile, proporcionando una herramienta integral para evaluar la vulnerabilidad y resiliencia de las comunas productoras de vides en el contexto del cambio climático.

Para el periodo actual (2017–2024), los resultados revelan que el 30,9% de las comunas productoras de vides se encuentran en un nivel de riesgo climático “Bajo”, un 56,4% en “Medio” y un 12,7% en “Alto”. Se identificaron marcadas diferencias territoriales en los niveles de riesgo climático, destacando las comunas de las regiones de Coquimbo y Atacama, respectivamente, seguidas por las de la Región Metropolitana, como las más afectadas. Esta mayor vulnerabilidad se relaciona con una menor diversificación agrícola, una alta susceptibilidad a eventos climáticos adversos como heladas y déficit hídrico, deterioro de los cuerpos de agua y una limitada capacidad de respuesta adaptativa.

En contraste, las comunas de las regiones de Maule y O’Higgins muestran los menores valores riesgos climáticos. En particular, ninguna comuna del Maule alcanzó el nivel el “Alto”, lo que se explica por una menor exposición y sensibilidad, junto con una mayor capacidad adaptativa y de respuesta. Factores como la existencia de infraestructura de riego tecnificada, el acceso a cuerpos de agua superficiales y subterráneos, y una mayor participación en los programas de apoyo gubernamental, especialmente los de INDAP, habrían favorecido su resiliencia frente al cambio climático.

Al analizar la evolución del Índice de Riesgo Climático Local para el período futuro (2046–2065), si bien el patrón de distribución reconocido en el período actual se mantiene. Se observa una tendencia al aumento de los valores de riesgo climático, con un 63,0% de las comunas vitícolas mostrando un incremento. Este aumento refleja la intensificación de la exposición y sensibilidad, en especial debido a la disminución proyectada de la aptitud climática para el cultivo de la vid. No obstante, un 14,6% de las comunas vitícolas presentó una mejora en su nivel de riesgo climático y un 22,4% se mantuvo sin variaciones, lo que sugiere que ciertas estrategias de adaptación local ya implementadas podrían estar mitigando parcialmente los impactos del cambio climático.

El componente más determinante en la vulnerabilidad se encontró ligada, al componente sensibilidad, asociada a la reducción de superficies para el establecimiento de la vid. Se proyecta un desplazamiento de las zonas idóneas para el cultivo de la vid, concentrándose entre las regiones del Maule y el norte de Los Ríos, lo cual representa tanto una amenaza como una oportunidad para el sector, habilitando nuevos territorios para la producción de vides.

En consecuencia, estos hallazgos refuerzan la urgencia de fortalecer las políticas públicas de adaptación climática. Es fundamental impulsar inversiones en infraestructura hídrica, apoyar a los pequeños agricultores para reducir las brechas territoriales y fomentar prácticas agrícolas sostenibles, como el uso eficiente del agua, la diversificación productiva y la adopción de variedades de vid adaptadas a nuevas condiciones agroclimáticas. Solo mediante la mejora de las capacidades adaptativas y de respuesta será posible reducir la vulnerabilidad y fortalecer la resiliencia del sector vitícola ante los desafíos del cambio climático.

4. LITERATURA CITADA

- Acuña, I., Navarro, P., y Madariaga, M. (2020). Plagas agrícolas y cambio climático: desafíos y manejo. *En: Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA). INIA: Preparando la agricultura para el Cambio Climático. Tierra Adentro (112): 21-25.*
<https://hdl.handle.net/20.500.14001/67224>
- Allan, R. P., Barlow, M., Byrne, M. P., Cherchi, A., Douville, H., Fowler, H. J., Gan, T. Y., Pendergrass, A. G., Rosenfeld, D., Swann, A. L. S., Wilcox, L. J., and Zolina, O. (2020). Advances in understanding large-scale responses of the water cycle to climate change. *Annals of the New York Academy of Sciences 1472(1):49-75.* DOI:[10.1111/nyas.14337](https://doi.org/10.1111/nyas.14337)
- Araya-Osses, D., Casanueva, A., Román-Figueroa, C., Uribe, J., y Paneque, M. (2020). Climate change projections of temperature and precipitation in Chile based on statistical downscaling. *Climate Dynamics 54: 4309-4330.* DOI:[10.1007/s00382-020-05231-4](https://doi.org/10.1007/s00382-020-05231-4)
- Billi, M., y Garreaud, R. (2020). Cápsula climática: ¿Qué es el riesgo climático? Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR2) - Universidad de Chile. Santiago, Chile. Recuperado de: <https://leycambioclimatico.cl/capsula-climatica-que-es-el-riesgo-climatico/>
- Boer, R., Rakhman, A., Faqih, A., Perdinan., and Situmorang, A.P. (2015). Village Vulnerability and Climate risk index: East Nusa Tenggara. UNDP (United Nation Development Program) – SPARC (The Scheme for Promotion of Academic and Research Collaboration) Project. Kementerian Lingkungan Hidup and Kehutanan. Jakarta, Indonesia.
- Bopp, C., Jara-Rojas, R., Engler, A., and Araya-Alman, M. (2022). How are vineyards management strategies and climate-related conditions affecting economic performance? A case study of Chilean wine grape growers. *Wine Economics and Policy 11(2):61-73.* DOI:[10.36253/wep-12739](https://doi.org/10.36253/wep-12739)
- Castañeda, A., Calderón, A., Emmanouloudis, D., y Schismenos, S. (2019). Mitigación de la vulnerabilidad, medida por el Índice de Riesgo Climático en la Región Centroamericana (desafíos y oportunidades). p. 96-107. *En: Salguero, O., Navidad, F., Galdámez, C., Argüello, C., y Orellana, S. (eds.). La Integración Centroamericana y la Globalización Mundial.*
- CEPAL-FAO-IICA (Comisión Económica para América Latina y el Caribe-Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura- Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura). (2017). *Perspectivas de la agricultura y del desarrollo rural en las Américas: una mirada hacia América Latina y el Caribe 2017-2018.* CEPAL, FAO, IICA. San José, Costa Rica.
- Compés, R., y Sotés, V. (2018). El sector vitivinícola frente al desafío del cambio climático: Estrategias públicas y privadas de mitigación y adaptación en el Mediterráneo. *Caja Rural Cajamar (Eds.). Recuperado de: https://publicacionescajamar.es/wp-content/uploads/2023/03/el-sector-vitivinicola-frente-al.pdf*
- CR2 (Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia). (2018). *Marco de evaluación de la vulnerabilidad.* Ministerio del Medio Ambiente (MMA) - Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas (FCFM) de la Universidad de Chile. Santiago, Chile.
- De la Fuente, M. (2021). *Análisis de las exportaciones de uva de mesa negra Inigrape-one (Maylen).* Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA). Serie Evaluación de Impacto: Resumen Ejecutivo N°08. Santiago, Chile. Recuperado de: <https://hdl.handle.net/20.500.14001/68071>
- DMC (Dirección Meteorológica de Chile). (2024). *Reporte anual de la Evolución del clima en Chile: 2023.* Oficina de Cambio Climático de la Sección de Climatología. Dirección General

- de Aeronáutica Civil. Santiago, Chile. Recuperado de: <https://climatologia.meteochile.gob.cl/application/publicaciones/documentoPdf/reporteEvolucionClima/reporteEvolucionClima2023.pdf>
- Estoque, R. C., Ishtiaque, A., Parajuli, J., Athukorala, D., Rabby, Y. W., and Ooba, M. (2022). Has the IPCC's revised vulnerability concept been well adopted?. *Ambio* 52(2):376–389. DOI:[10.1007/s13280-022-01806-z](https://doi.org/10.1007/s13280-022-01806-z)
- FAO-UNDP (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura - Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo). (2021). Módulo 8.2: Índices de Vulnerabilidad.
- Haddad, E., Aroca, P., Jano, P., Rocha, A., and Pimenta, B. (2020) A Bad Year? Climate Variability and the Wine Industry in Chile. *Wine Economics and Policy* 9(2):23-35. DOI:[10.36253/web-7665](https://doi.org/10.36253/web-7665)
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). (2007). *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Parry, M. L., Canziani, O. F., Palutikof, J. P., van der Linden, P. J., and Hanson, C. E. (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, UK. <https://www.ipcc.ch/report/ar4/wg2/>
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). (2014). *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Field, C.B., Barros, V.R., Dokken, D.J., Mach, K.J., Mastrandrea, M.D., Bilir, T.E., Chatterjee, M., Ebi, K.L., Estrada, Y.O., Genova, R.C., Girma, B., Kissel, E.S., Levy, A.N., MacCracken, S., Mastrandrea, P.R., and White, L.L. (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA. <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2/>
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S.L., Péan, C., Berger, S., Caud, N., Chen, Y., Goldfarb, L., Gomis, M.I., Huang, M., Leitzell, K., Lonnoy, E., Matthews, J.B.R., Maycock, T.K., Waterfield, T., Yelekçi, O., Yu, R., and Zhou, B. (eds.). Cambridge University Press. Geneva, Switzerland. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). (2001). *Climate Change 2001: Synthesis Report. A Contribution of Working Groups I, II and III to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Watson, R. T., and Core Writing Team (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA. <https://www.ipcc.ch/report/ar3/syr/>
- Jorqueta-Fontena, E., y Orrego-Verdugo, R. (2010). Impacto del calentamiento global en la fenología de una variedad de vid cultivada en el Sur de Chile. *Agrociencia* 44(4):427-435.
- MMA (Ministerio de Medio Ambiente). (2020). *Atlas de Riesgos Climáticos: Marco Metodológico ARClím.* Santiago Chile: Ministerio de Medio Ambiente. Gobierno de Chile. p. 12.
- Montalba, R., García, M., Altieri, M., Fonseca, F., y Vieli, L. (2013). Utilización de Índice Holístico de Riesgo (IHR) como medida de resiliencia socioecológica a condiciones de escasez de Recursos Hídricos. Aplicación en comunidades campesinas e indígenas de La Araucanía, Chile. *Agroecología*, 8(1): 63-70. <https://revistas.um.es/agroecologia/article/view/182991>
- ODEPA (Oficina de Estudios y Políticas Agrarias). (2019). *Panorama de la agricultura chilena 2019.* Recuperado de:

- <https://bibliotecadigital.odepa.gob.cl/bitstream/handle/20.500.12650/70246/PanoramaDeLaAgriculturaChilena2019.pdf>
- ODEPA (Oficina de Estudios y Políticas Agrarias). (2024a). Superficie y producción de vides para vinificación, de mesa y pisqueras. Recuperado de: <https://bibliotecadigital.odepa.gob.cl/handle/20.500.12650/73265>
- Olcina, J., y Vera-Rebollo, J. (2016). Adaptación del sector turístico al cambio climático en España. La importancia de las acciones a escala local y en empresas turísticas. *Anales de Geografía de la Universidad Complutense*. 36(2): 321-349. DOI:[10.5209/AGUC.53588](https://doi.org/10.5209/AGUC.53588)
- Resco, P. (2015). *Viticultura y Cambio Climático en España: Vulnerabilidad en las distintas regiones y estrategias de adaptación frente al desarrollo de nuevas políticas* [Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid]. Departamento de Economía y Ciencias Sociales Agrarias.
- Reyes, M. (2020). Capítulo 8: Elementos del clima y su influencia en la producción vitivinícola: referencias para el secano. p. 189-200. *En*: Claret, M., Reyes, M., y Ruiz, S. (eds.). *Condiciones edafoclimáticas y productos enológicos en el Valle del Itata*. Chillán, Chile. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA). Boletín N° 433.
- Reyes, M., y Salazar, M. (2021). Ciclo de charlas sobre viticultura y cambio climático 2020-2022: Ensayos en incremento de temperatura. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA). Recuperado de: <https://biblioteca.inia.cl/server/api/core/bitstreams/8658d222-2a55-42ff-a949-e63ec4d0ef3a/content>
- Rodrigues, A., Albuquerque-Sardinha, R., y Pita, G. (2025). Fundamentals of global carbon budgets and climate change. p. 303-351. *In*: *Fundamental Principles of Environmental Physics*. Springer Nature. Cham, Switzerland. DOI:[10.1007/978-3-031-84841-4_8](https://doi.org/10.1007/978-3-031-84841-4_8)
- Rojas, M. (2016). *Escenarios climáticos y la vulnerabilidad de Chile*. Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR2). Santiago, Chile.
- Ruiz-García, L., Romero, P., Tornel, M., Menéndez, C., Cabello, F., y Martínez-Cutillas, A. (2018). Capítulo V: La viticultura frente al cambio climático: Adaptación y Estrategias de mejora. *En*: Brunton, J., Tornero, O., Terrer, J., García, L., y Sánchez, E. *Influencia del cambio climático en la mejora genética de plantas*. p. 165-196. Murcia, España.
- SAG (Servicio Agrícola Ganadero). (2023). *Catastro Vitícola Nacional 2022*. Ministerio de Agricultura. Gobierno de Chile. Santiago, Chile. <https://www.sag.gob.cl/content/catastro-viticola-nacional-2022>
- Salazar, C. (2020). Viticultura y cambio climático: efectos del incremento de temperatura. *En*: García, M., Barba, P., y Sellés, G. (eds.). *Investigación y desarrollo en vides*. p. 54. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA). Santiago, Chile. Recuperado de: <https://biblioteca.inia.cl/server/api/core/bitstreams/a8dcd53f-348b-408a-8a76-14fc0483e346/content>
- Salazar, C., y Reyes, M. (2020). Efectos del cambio climático en la vitivinicultura y alternativas para asegurar la sustentabilidad y calidad del viñedo en el Valle Central. *Tierra Adentro* N°112. *En*: Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA) (eds.). *Preparando la agricultura para el Cambio Climático*. p. 39-41. Ministerio de Agricultura. Gobierno de Chile. <https://hdl.handle.net/20.500.14001/5468>
- Tangney, P. (2019). Understanding climate change as risk: a review of IPCC guidance for decision-making. *Journal of Risk Research* 23(11):1424-1439. DOI:[10.1080/13669877.2019.1673801](https://doi.org/10.1080/13669877.2019.1673801)

- Van Leeuwen, C., Duchêne, E., Ollat, N., Parker, A. K., Schultz, H. R., Jones, G. V., and Santos, J. A. (2024). Climate change impacts and adaptations of wine production. *Nature Reviews Earth & Environment* 5:323–338. DOI:[10.1038/s43017-024-00521-5](https://doi.org/10.1038/s43017-024-00521-5)
- Vinos de Chile. (2023). Aporte del Vino a la Economía y Desarrollo de Chile. Recuperado de: <https://www.winesofchile.org/chile-vitivinicola/aporte-del-vino-a-la-economia-y-desarrollo-de-chile/>
- Vinos de Chile-ANIAE. (2022). Vendimia 2022: Informe Ejecutivo. Asociación Nacional de Ingenieros agrónomos Enólogos de Chile (ANIAE). Recuperado de: <https://www.enologo.cl/wp-content/uploads/2023/04/Reporte-Ejecutivo-2022.pdf>
- Zavala, M. (2024). Efectos del cambio climático en la Región de Coquimbo: Preguntas y respuestas esenciales para entender el cambio climático a nivel local. CEAZA (Centro de Estudios Avanzados en Zonas Áridas). Recuperado de: <https://ceaza.cl/2024/10/24/efectos-del-cambio-climatico-la-region-coquimbo-preguntas-respuestas-esenciales-entender-cambio-climatico-nivel-local/>
- Zurita-Silva, A., Díaz, I., Verdugo, N., y Mejía, N. (2020). Desafíos de la Viticultura en escenario de Cambio Climático. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA). *Revista Campo & Tecnología*, 16, 38-41. Osorno, Chile. <https://hdl.handle.net/20.500.14001/67814>