

**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE AGRONOMÍA**



**MODELACIÓN DEL RENDIMIENTO DEL TRIGO (*TRITICUM AESTIVUM* L.) CON EL
MODELO AQUACROP BAJO ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO EN LAS
REGIONES DEL MAULE Y LA ARAUCANÍA**

POR

GONZALO IGNACIO GÓMEZ TOLEDO

**MEMORIA PRESENTADA A LA
FACULTAD DE AGRONOMÍA DE LA
UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO AGRÓNOMO.**

**CONCEPCIÓN, CHILE
2025**

**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE AGRONOMÍA**

**MODELACIÓN DEL RENDIMIENTO DEL TRIGO (*TRITICUM AESTIVUM* L.) CON EL
MODELO AQUACROP BAJO ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO EN LAS
REGIONES DEL MAULE Y LA ARAUCANÍA**

POR

GONZALO IGNACIO GÓMEZ TOLEDO

**MEMORIA DE TÍTULO PRESENTADO
A LA FACULTAD DE AGRONOMÍA DE
LA UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO AGRÓNOMO.**

**CONCEPCIÓN, CHILE
2025**

Aprobada por:

Profesor asistente, Walter Valdivia C.
Ing. Agrónomo, Mg. Dr.

Guía

Profesor asistente, Mathias Kuschel O.
Ing. Civil Agrícola, Dr.

Asesor

Profesor asistente, Abdelhalim Khaled E.
Ing. Agrónomo, Dr. Cs.

Asesor

Profesor asociado, Guillermo Wells M.
Ing. Agrónomo, Mg. Sc.

Decano

TABLA DE CONTENIDOS

	Página
Resumen	1
Summary	1
Introducción	2
Materiales y métodos	5
Resultados y discusión	11
Conclusiones	26
Referencias	27

INDICE DE FIGURAS Y TABLAS

		Página
Figura 1	Ubicación de las estaciones meteorológicas y los distritos agroclimáticos según el atlas agroclimático de Chile.....	6
Figura 2	Temperaturas mínimas, máximas anuales y biomasa por temporada de la línea base 2015 - 2024 en la región del Maule.....	13
Figura 3	Precipitación, Evapotranspiración anuales y Biomasa acumulada por temporada en la región del Maule.....	14
Figura 4	Precipitación y biomasa en la región del Maule por (a) temporadas 2020 - 2021 y 2023 - 2024, y (b) durante la floración.....	15
Figura 5	Relación entre los rendimientos vs el Índice de humedad en la región del Maule.....	15
Figura 6	Temperaturas mínimas, máximas anuales y biomasa por temporada de la línea base 2015 - 2024 en la región de la Araucanía.	17
Figura 7	Precipitación, Evapotranspiración anuales y Biomasa acumulada por temporada en la región de la Araucanía...	18
Figura 8	Precipitación y biomasa acumulada por temporadas en la región de la Araucanía	19
Figura 9	Rendimientos vs IHA en la región de la Araucanía.....	19
Figura 10	Temperaturas mínimas por temporada en los distintos escenarios de cambio climático en la región del Maule...	21
Figura 11	Temperaturas mínimas por temporada en los distintos escenarios de cambio climático en la región de la Araucanía.....	21

Figura 12	Temperaturas máximas por temporada en los distintos escenarios de cambio climático en la región del Maule...	22
Figura 13	Temperaturas máximas por temporada en los distintos escenarios de cambio climático en la región de la Araucanía.....	22
Figura 14	Precipitaciones por temporada en los distintos escenarios de cambio climático en la región del Maule....	23
Figura 15	Precipitaciones por temporada en los distintos escenarios de cambio climático en la región de la Araucanía.....	24
Figura 16	Evapotranspiración de referencia por temporada en los distintos escenarios de cambio climático en la región del Maule.....	24
Figura 17	Evapotranspiración de referencia por temporada en los distintos escenarios de cambio climático en la región de la Araucanía.....	25
Tabla 1	Propiedades físicas de serie de suelo Diguillín en la región del Maule ajustadas según software Soil Water Characteristics (SWC).....	7
Tabla 2	Propiedades físicas de serie de suelo Mayulermo en la región de la Araucanía ajustadas según software Soil Water Characteristics (SWC).....	7
Tabla 3	Parámetros de cultivo utilizados en AquaCrop.....	9
Tabla 4	Metodología para cada variable en escenarios futuros de cambio climático.....	10
Tabla 5	Rendimiento y biomasa acumulada por temporada de trigo invernal 'Maxwell' en la región de Maule obtenido con el modelo AquaCrop bajo condición temporal de la línea base (2015 – 2024).....	11
Tabla 6	Rendimiento y biomasa acumulada por temporada de trigo invernal 'Maxwell' en la región de la Araucanía	16

	obtenido con el modelo AquaCrop bajo condición temporal de la línea base (2015 – 2024).....	
Tabla 7	Rendimientos y biomasa acumulada de los escenarios proyectados para la región del Maule y la región de la Araucanía obtenidos mediante modelo AquaCrop por temporada.....	20
Tabla 8	Resumen simulación de rendimientos con distintas fechas de siembra para Maule y Araucanía utilizando AquaCrop.....	26

MODELACIÓN DEL RENDIMIENTO DEL TRIGO (*TRITICUM AESTIVUM L.*) CON EL MODELO AQUACROP BAJO ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO EN LAS REGIONES DEL MAULE Y LA ARAUCANÍA

YIELD MODELING OF WHEAT (*TRITICUM AESTIVUM L.*) USING THE AQUACROP MODEL UNDER CLIMATE CHANGE SCENARIOS IN MAULE AND ARAUCANÍA REGIONS

Palabras índices adicionales: AquaCrop, cambio climático, modelación, rendimientos, trigo.

RESUMEN

El cambio climático y la escasez hídrica plantean un desafío para la producción agrícola, especialmente en cultivos esenciales para la alimentación como el trigo (*Triticum aestivum L.*) producido a nivel nacional con mayor presencia entre las regiones del Maule y la Araucanía. Esta investigación tuvo como objetivo estimar el rendimiento del trigo invernal bajo escenarios de cambio climático en dos localidades con condiciones de clima, suelo y fenologías diferentes utilizando el modelo AquaCrop. Se caracterizó una línea base de 9 años entre 2015 – 2024 con características de clima (evapotranspiración de referencia, temperaturas mínimas y máximas, y precipitación), suelo y comportamiento del cultivo; posteriormente, se simularon cuatro escenarios de cambio climático considerando aumento en las variables de evapotranspiración de referencia, temperaturas mínimas y máximas, y disminución de la variable precipitación; en variaciones de un 5%, 10%, 15% y 20%; finalmente, se evaluaron 2 fechas de siembra diferentes en el peor escenario como medida de manejo agronómico. Los resultados muestran que la disminución de la precipitación durante etapas fundamentales como la floración tiene un impacto determinante en los rendimientos, especialmente en la región del Maule, además, al adelantar la siembra en 2 semanas se observaron mejoras en los rendimientos de ambas regiones.

SUMMARY

Climate change and water scarcity pose a challenge for agricultural production, especially in essential food crops such as wheat (*Triticum aestivum L.*) produced nationally with greater presence between the Maule and Araucanía regions. This

research aimed to estimate winter wheat yield under climate change scenarios in two locations with different climate, soil and phenology conditions using the AquaCrop model. A baseline of 9 years between 2015 - 2024 was characterized with climate characteristics (reference evapotranspiration, minimum and maximum temperatures, and precipitation), soil and crop behavior; subsequently, four climate change scenarios were simulated considering an increase in the variables of reference evapotranspiration, minimum and maximum temperatures, and a decrease in the variable precipitation; in variations of 5%, 10%, 15% and 20%; finally, 2 different sowing dates were evaluated in the worst scenario as a measure of agronomic management. The results show that the decrease in precipitation during fundamental stages such as flowering has a decisive impact on yields, especially in the Maule region. In addition, by advancing planting by 2 weeks, significant improvements in yields were observed in both regions.

INTRODUCCIÓN

Se estima que la población mundial entre 2050 - 2060 alcance los 10.000 millones de personas (Urquidí, 2019) bajo un escenario de cambio climático y diversos problemas con la disponibilidad de agua que afecta directamente a los productores agrícolas, siendo Chile un país fuertemente afectado debido a su geografía y clima (Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia [CR2], 2015), existiendo una mega sequía a la fecha de más de 15 años; considerado como un país altamente vulnerable al cumplir con 7 de 9 criterios de vulnerabilidad planteados por la 'United Nations framework convention on climate change', tales como: poseer zonas costeras bajas, zonas áridas y semiáridas, zonas con cobertura forestal, entre otros (Rojas, 2013). El aumento de la población mundial estaría contribuyendo en agravar el cambio climático, acelerando la deforestación, la utilización de carbón como combustible y madera como materia prima (Orduna, 1995), dichas agravantes generan disminución de las precipitaciones, lo que conlleva a la sequía, que por su parte, supone una ruptura en las condiciones naturales habituales en que se desenvuelve la sociedad (Cuadrat & Pita, 2016). El cambio climático como tal es el resultado de varios factores (o desorden de factores) que generan un efecto en cadena de sucesos tanto para el medio ambiente como para la socioeconomía.

Como factores agravantes, además del déficit de precipitaciones, son el incremento de las temperaturas, el aumento de la evapotranspiración y la recurrencia e intensidad del fenómeno de sequía, factores exógenos como la estructura socioeconómica de la zona afectada, y como la población genera su toma de decisiones. Es por ello, que las actividades antropogénicas influyen en el aumento o intensificación de este cambio (Cuadrat & Pita, 2016; Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura [IICA], 2013). El cambio climático genera disminución de los ingresos y producto interno bruto (PIB) nacionales, en Chile, las localidades de bajos niveles de desarrollo se concentran principalmente en las regiones del Maule, Biobío y Araucanía, y en particular en localidades rurales (Rojas, 2013) donde el sector más perjudicado es el agrícola, que lo realizan productores de pequeño - mediano tamaño, convirtiendo la alimentación de muchas familias en una lucha continua ante las adversidades (IICA, 2013). Los escenarios que provoca el cambio climático afecta a varios sectores productivos de las regiones, por lo que siempre se debe considerar los problemas con miradas de las características ambientales, sociales, tecnológicas y económicas de las áreas en estudio (Centro de Agricultura y Medio Ambiente [AGRIMED], 2008), mientras que, las estrategias o políticas que se diseñen y apliquen para mitigar los efectos del cambio climático deben ser siempre basándose en procesos e interacciones biodinámicas de los recursos hídricos (Gohari et al., 2017). Los países desarrollados, a diferencia de los países en vías de desarrollo o con bajo nivel de PIB, realizan ajustes para disminuir los efectos adversos del cambio climático (Cuadrat & Pita, 2016).

Dentro de los principales cultivos para la alimentación se encuentra el trigo, el cual tuvo un rendimiento promedio de 59 qqm ha⁻¹ para trigo harinero (*Triticum aestivum* L.) y 67 qqm ha⁻¹ de trigo candeal (*Triticum turgidum* L. *spp. durum*) a nivel nacional en la temporada 2023 - 2024 (Instituto Nacional de Estadísticas [INE], 2024). El rendimiento del trigo en las regiones agroecológicas de riego es cercano al potencial, en cambio, en seco, las concentraciones de lluvias en meses invernales provocan escasa humedad en los periodos de crecimiento y llenado de grano (Peña, 2013). El clima donde más se siembra el trigo invernal es de tipo

mediterráneo, lluvioso en invierno y seco en verano desde la IV a la IX regiones, aproximadamente el 70% se establece en condiciones de secano, las que producen el 60% del grano cosechado del país (Mellado, 2007). Los cereales son los cultivos de mayor superficie sembrada a nivel nacional según datos de la temporada 2023 - 2024, siendo las zonas entre la región del Maule y la Araucanía las más importantes en participación de producción de trigo (INE, 2024; Oficina de Estudios y Políticas Agrarias [Odepa], 2023).

Una forma de poder diseñar estrategias de manejo agronómico frente al cambio climático es modelar la respuesta de cultivo ante variaciones que afecten el rendimiento, para estos ejercicios de simulación existe una variedad de modelos de simulación, como AquaCrop, WOFOST, CropSyst, DSSAT, entre otros. Los modelos de simulación de cultivos son herramientas útiles para cuantificar, interpretar y predecir las necesidades hídricas, desarrollo y rendimientos de los cultivos, comprender mejor los problemas y anticipar la realidad que se investiga, como también para desarrollar estrategias que optimicen la gestión hídrica en la agricultura; un buen modelo es capaz de evidenciar las interacciones entre los diferentes componentes de un sistema que no son evidentes al estudiar cada uno por sí solo, y permite ensayar experimentos que no serían posibles de realizar en un sistema real. AquaCrop es un modelo desarrollado por la Organización para la Agricultura y la Alimentación (FAO), y es uno de los softwares más utilizados por los investigadores para simular y desarrollar estrategias de gestión del agua en los cultivos. AquaCrop simula los rendimientos teóricos alcanzables en los cultivos en función del agua transpirada, en condiciones de secano, riego suplementario, déficit y riego total (Steduto et al., 2009; Raes et al., 2009). Este modelo fue desarrollado (Hsiao et al., 2009) y calibrado (Heng et al., 2009) para el cultivo de maíz y, debido a los buenos resultados obtenidos al simular rendimientos bajo diferentes escenarios, su uso se ha extendido a otros cultivos como algodón (Farahani et al., 2009; Garcia et al., 2009), cebada (Araya et al., 2010), trigo (Andarzian et al., 2011; Iqbal et al., 2014), remolacha azucarera (Stricevic et al., 2011; Garcia Vila et al., 2019) y girasol (Stricevic et al., 2011). La ventaja de este modelo es la facilidad de uso desde la interfaz, requerimiento reducido de parámetros de entrada y, sobre

todo, la flexibilidad para ingresar datos locales del suelo (características físico-hídricas y químicas), aplicación de agua, información climática y datos de cultivos (Foster et al., 2017).

El objetivo general de la investigación fue estimar el rendimiento de trigo invernal 'Maxwell' bajo escenarios de cambio climático en dos localidades utilizando el modelo AquaCrop, considerando factores de clima, suelo y cultivo. Como objetivos específicos se busca:

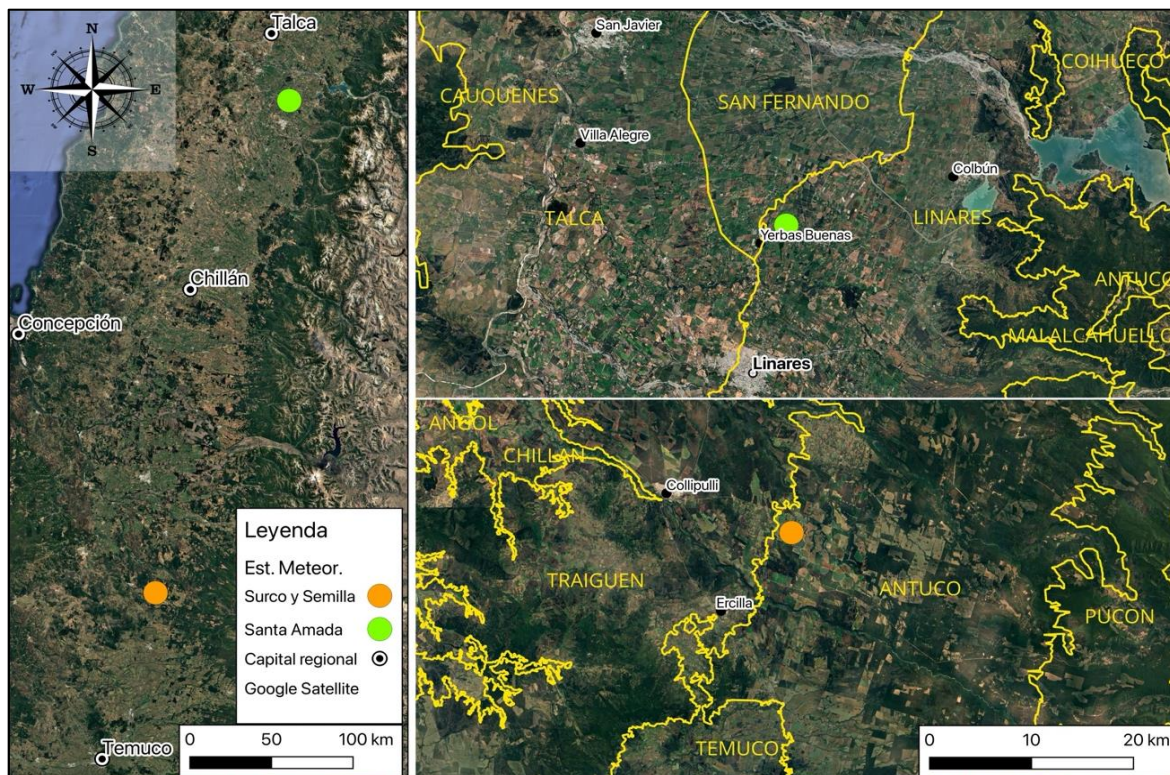
- 1) Caracterizar climáticamente 2 zonas productivas de trigo invernal representativas en la zona centro y sur de Chile (línea base 2015 – 2024) y su escenario futuro (proyección 2050) bajo cambio climático.
- 2) Determinar el rendimiento del trigo invernal a través del modelo AquaCrop en dos zonas edafoclimáticas en el periodo 2015 – 2024.
- 3) Evaluar la variación de rendimiento del trigo invernal a través del modelo AquaCrop en dos zonas edafoclimáticas bajo 4 escenarios de cambio climático.
- 4) Evaluar el impacto en los rendimientos con diferentes fechas de siembra en el escenario más desfavorable utilizando AquaCrop.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El estudio se desarrolló considerando la región del Maule y la región de la Araucanía, representando dos zonas con condiciones edafoclimáticas lo suficientemente diferenciadas para estimar rendimientos en cada uno de ellas, dichas regiones se encuentran dentro del área productiva con cultivos anuales y con una gran participación en superficie sembrada de trigo, dentro de cada región se tomó la provincia con mayor participación en producción de trigo para poder establecer un punto de extracción de datos climáticos y edáficos. En la región del Maule se consideró la provincia de Linares por tener una mayor superficie sembrada de trigo de la región (15.071 ha) (ODEPA, 2018; INE, 2007; Comercializadora de Trigo S.A. [Cotrisa], 2025); y, por otro lado, en la región de la Araucanía se tomó la provincia de Malleco, por su mayor superficie de trigo sembrada (38.730 ha) (INE, 2007; Cotrisa, 2025).

Figura 1. Ubicación de las estaciones meteorológicas y los distritos agroclimáticos según el atlas agroclimático de Chile.



Fuente: adaptado de Santibáñez (2017).

Tipo de suelo

Se seleccionaron suelos representativos de cada una de las regiones. En la región del Maule se escogió la serie de suelos Diguillín, debido a su mayor presencia en zonas de cultivo de trigo, mientras que en la región de la Araucanía se tomó la serie de suelo Mayulermo. Para poder utilizar estos suelos en el software AquaCrop, ya que la realidad de los suelos chilenos es excepcional debido a su origen volcánico, se ajustó los parámetros de cada suelo con el software Soil Water Characteristics (SWC) con estándares del departamento de agricultura de los Estados Unidos (USDA).

Serie Diguillín, región del Maule: Andisol (thermic Humic Haploxerands) (Trumao), derivado de cenizas volcánicas modernas, descansa sobre un sustrato constituido por toba volcánica, su capacidad de uso incluye categorías II y III (Stolpe, 2006).

Tabla 1. Propiedades físicas de serie de suelo Diguillín en la región del Maule ajustadas según software Soil Water Characteristics (SWC).

DIGUILLIN								
Profundidad (cm)	Textura	PMP %	CC %	SAT %	Arena %	Limo %	Arcilla %	M.O %
0 - 17	F	16,0	34,0	60,0	35,5	45,1	19,4	7,3
17 - 44	F	18,3	36,2	60,0	29,6	46,8	23,6	7,5
44 - 60	FL	17,1	35,8	60,0	26,8	50,8	22,4	7,0
60 - 74	F	19,5	36,8	58,8	26,7	46,3	27,0	7,1
74 - 96	F	18,5	36,6	59,7	25,8	49,8	24,4	7,1
96 - 146	FL	16,9	33,6	48,5	22,6	51,8	25,6	2,6
146 - 190	F	13,8	28,7	46,6	36,9	42,8	20,3	2,6

F: Franco; FL: Franco limosa; PMP: Punto de marchitez permanente; CC: Capacidad de campo; SAT: Saturación; M.O: Materia orgánica. Fuente: Stolpe, 2006.

Serie Mayulermo, región de la Araucanía: Andisol (thermic Humic Haploxerands), formado sobre cenizas volcánicas recientes, suelos muy profundos, bien drenados, de textura media, bien estructurado, muy poroso y libre de grava, su capacidad de uso va desde categoría II a IV (Centro de Información de Recursos Naturales [Ciren], 2002).

Tabla 2. Propiedades físicas de serie de suelo Mayulermo en la región de la Araucanía ajustadas según software Soil Water Characteristics (SWC).

MAYULERMO								
Profundidad (cm)	Textura	PMP %	CC %	SAT %	Arena %	Limo %	Arcilla %	M.O %
0 - 15	FL	18,4	37,7	60,0	16,2	57,8	26,0	6,4
15 - 30	FAL	20,7	38,8	59,9	12,8	56,3	30,9	6,6
30 - 48	FAL	20,1	37,8	55,5	12,7	56,0	31,3	4,7
48 - 90	FAL	21,6	38,0	51,1	12,4	52,9	34,7	2,7
90 - 120	AL	25,7	40,1	50,4	13,0	44,8	42,7	1,7

FL: Franco limosa; FAL: Franco arcillo limosa; AL: Arcillo limosa; PMP: Punto de marchitez permanente; CC: Capacidad de campo; SAT: Saturación; M.O: Materia orgánica. Fuente: Ciren, 2002.

Clima

Se recopilaron datos climáticos diarios de variación de temperatura mínima y máxima (Tmin y Tmax, respectivamente), pluviometría (Pp) y evapotranspiración de referencia (ETo) desde la red de estaciones agrometeorológicas del Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA) (<https://agrometeorologia.cl>) desde el 2015 al 2024. En la región del Maule se utilizó la estación Santa Amada en Linares, mientras en la región de la Araucanía se utilizó la estación Surco y Semilla en Collipulli. La

plataforma muestra el porcentaje % de datos diarios capturados, se utilizó un criterio de mínimo 90% de los datos diarios, para los días que presentaran un porcentaje menor o pérdida de datos se reemplazó con estaciones cercanas. Para reemplazar la falta de datos diarios en la estación Santa Amada de Linares se tomaron datos de las estaciones Yervas Buenas de Agromet (<https://www.agromet.cl>) de T (°C) y Pp (mm) mientras que los datos de ETo (mm) se tomaron de las estaciones San Clemente y Villa Alegre del INIA. Por otra parte, para reemplazar datos faltantes de la estación Surco y Semilla de Collipulli se tomaron datos de temperatura y precipitación de la estación Collipulli de Agromet, y los datos de ETo fueron tomados desde las estaciones Las Palmas y Pailahueque de agrometeorología INIA, de esta forma se logró reconstruir la base de datos agroclimáticos para el área de estudio. El estudio se desarrolló bajo dos distritos agroclimáticos, los cuales presentan las siguientes características:

Distrito agroclimático de Linares. La temperatura varía entre un máximo de enero de 29,1 °C (máx. de 29,9 °C y mín. de 27,4 °C dentro del distrito) y un mínimo de julio de 3,5 °C (máx. de 4,2 °C y mín. de 2,9 °C dentro del distrito). Tiene un promedio de 211 días consecutivos libres de heladas. En el año se registra un promedio de 20 heladas. El período de temperaturas favorables a la actividad vegetativa dura 9 meses. Registra anualmente 1.535 días grado y 949 horas de frío acumuladas hasta el 31 de Julio. La precipitación media anual es de 1.137 mm y un período seco de 5 meses, con un déficit hídrico de 846 mm/año. El período húmedo dura 5 meses durante los cuales se produce un excedente hídrico de 528 mm. (Santibáñez, 2017; p. 65)

Distrito agroclimático de Antuco. La temperatura varía entre un máximo de enero de 26,8 °C (máx. de 29,4 °C y mín. de 22,9 °C dentro del distrito) y un mínimo de julio de 3,8 °C (máx. de 3,9 °C y mín. de 1,9 °C dentro del distrito). Tiene un promedio de 175 días consecutivos libres de heladas. En el año se registra un promedio de 23 heladas. El periodo de temperaturas favorables a la actividad vegetativa dura 7 meses. Registra anualmente 1.123 días grado y 1.101 horas de frío acumuladas hasta el 31 de Julio. La precipitación media anual es de 1.884 mm y un periodo seco de 4 meses, con un déficit hídrico de 528 mm/año. El período húmedo dura 7 meses

durante los cuales se produce un excedente hídrico de 1.065 mm. (Santibáñez, 2017; p. 36)

El CO₂ utilizado en el archivo climático de AquaCrop fue el predeterminado por el software el cual es MaunaLoa.CO2 “Concentración de CO₂ atmosférico por defecto de 1902 a 2099”.

Cultivo

Se simularon los rendimientos del cultivar ‘Maxwell’ como referencia por ser una cultivar de extensa presencia, buenos rendimientos y buena adaptabilidad, sin embargo, su comportamiento es distinto según las zonas edafoclimáticas se lo permitan, por ello tiene algunas diferencias fisiológicas en Maule y Araucanía, y se debe considerar que, aunque tengan iguales condiciones de manejo, los rendimientos pueden ser muy distintos por efecto del clima y condiciones de suelo (Jobet et al., 2013). A continuación, se detallan los parámetros del cultivo en las dos regiones para el modelo AquaCrop.

Tabla 3. Parámetros de cultivo utilizados en AquaCrop.

PARAMETRO	‘MAXWELL’ MAULE	‘MAXWELL’ ARAUCANIA
Fecha de siembra	15 - Mayo	23 - Abril
Fecha de cosecha	19 - Enero	12 - Febrero
Densidad de siembra	2.500.000 pl ha ⁻¹	2.500.000 pl ha ⁻¹
	250 pl m ⁻²	250 pl m ⁻²
Cobertura inicial canopia (CCo)	5%	5%
Cobertura máxima canopia	98%	98%
Declinación canopia (CDC)	40 días – 7,6% día ⁻¹	38 días – 8% día ⁻¹
Emergencia	14 días	14 días
Max canopia	176 días	205 días
Senescencia	220 días	267 días
Madurez	250 días	296 días
Duración de floración	14 días	14 días
Profundidad máx. efectiva raíces	0,85 m	0,70 m
	131 días	196 días
Profundidad min efectiva raíces	0,40 m	0,30 m
Water productivity (WP)	15 g m ⁻²	16 g m ⁻²
Índice de cosecha (HI)	50%	50%
Soil water stresses	Tolerante	Tolerante
Temperatura base	0 °C	0 °C
Temperatura superior	30 °C	30 °C
Salinidad	No considerada	No considerada
Fertilidad	No considerada	No considerada

AquaCrop

El modelo AquaCrop simula el balance hídrico del suelo y los procesos de crecimiento del cultivo en función de los datos de entrada de: cultivo, suelo, clima y gestión en escala diaria (Raes et al., 2023). El componente productivo del consumo hídrico por parte de un cultivo (la transpiración) se utiliza para estimar la potencial biomasa acumulada diaria, utilizando un parámetro de productividad del agua específico para cada cultivo que se normaliza para la evapotranspiración de referencia, lo que hace que el parámetro sea aplicable a una amplia gama de climas; luego, la proporción de biomasa se convierte en rendimientos cosechable que se calcula utilizando un parámetro de índice de cosecha que aumenta durante la temporada de crecimiento y responde al estrés hídrico y térmico. AquaCrop está diseñado para simulaciones de cultivos herbáceos, actualmente no está diseñado para simulaciones de cultivos arbóreos perennes ni vides. (Cleves et al., 2016; Foster et al., 2016; Hernández et al., 2009).

Escenarios futuros

Con la base climática de datos histórico 2015 - 2024, se obtuvieron el percentil 50 de los datos para las variables de ETo, Tmin y Tmax; mientras que para la variable precipitación se obtuvo un promedio, de manera diaria formando un año modelo de 365 días representativa de los datos. Posteriormente se formaron 4 escenarios de cambio climático, con un aumento de las variables ETo y Tmin en variaciones de 5%, 10%, 15% y 20% respectivamente del percentil 50, para la variable Tmax se utilizaron los percentiles 55, 60, 65 y 70 de la base de datos climática, y por último para la variable Pp se disminuyó en un 5, 10, 15 y 20 % respecto del promedio de los datos históricos. Como se detalla en la siguiente tabla

Tabla 4. Metodología para cada variable en escenarios futuros de cambio climático.

Variable	Referencia histórica	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 4
ETo		+ 5%	+ 10%	+ 15%	+ 20%
Tmax	P50	P55	P60	P65	P70
Tmin		+ 5%	+ 10%	+ 15%	+ 20%
Pp	Promedio	- 5%	- 10%	- 15%	- 20%

ETo: Evapotranspiración de referencia, Tmax: Temperatura máxima, Tmin: Temperatura mínima, Pp: Precipitación, P50: Percentil 50, Referencia histórica: Respecto de la línea base climática 2015 - 2024.

Respecto al CO₂ utilizado en las simulaciones de escenarios futuros se utilizó el archivo *SSP5_8.5.CO2* el cual detalla “*Concentración de CO₂ atmosférico desde 1902 a 2099 – Escenario SSP5_8.5*”.

Fecha de siembra

Se utilizó como referencia el peor escenario de cambio climático en cada región, escenario 4 con una variación del 20% de sus variables climáticas, para evaluar el impacto de adelantar o atrasar la fecha de siembra bajo cambio climático en 2 semanas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Línea Base

Región del Maule, Provincia de Linares. Se caracterizó la región del Maule en la provincia de Linares utilizando la estación Santa Amada, el suelo Diguillín y el trigo invernal ‘Maxwell’, se obtuvieron los datos por temporada (Tabla 4) donde se detallan la Pp, ETo, índice de humedad (IHA) el cuál se obtiene al dividir la precipitación por la evapotranspiración ($Pp \ ETo^{-1}$), los rendimientos ($t \ ha^{-1}$) y la biomasa acumulada ($t \ ha^{-1}$) representa la energía almacenada por las plantas como resultado de la fotosíntesis y se utiliza como indicador durante el crecimiento del cultivo, esta biomasa constituye el rendimiento potencial que se puede alcanzar, dependiendo del índice de cosecha (HI) y la productividad del agua (WP).

Tabla 5. Rendimiento y biomasa acumulada por temporada de trigo invernal ‘Maxwell’ en la región de Maule obtenido con el modelo AquaCrop bajo condición temporal de la línea base (2015 – 2024).

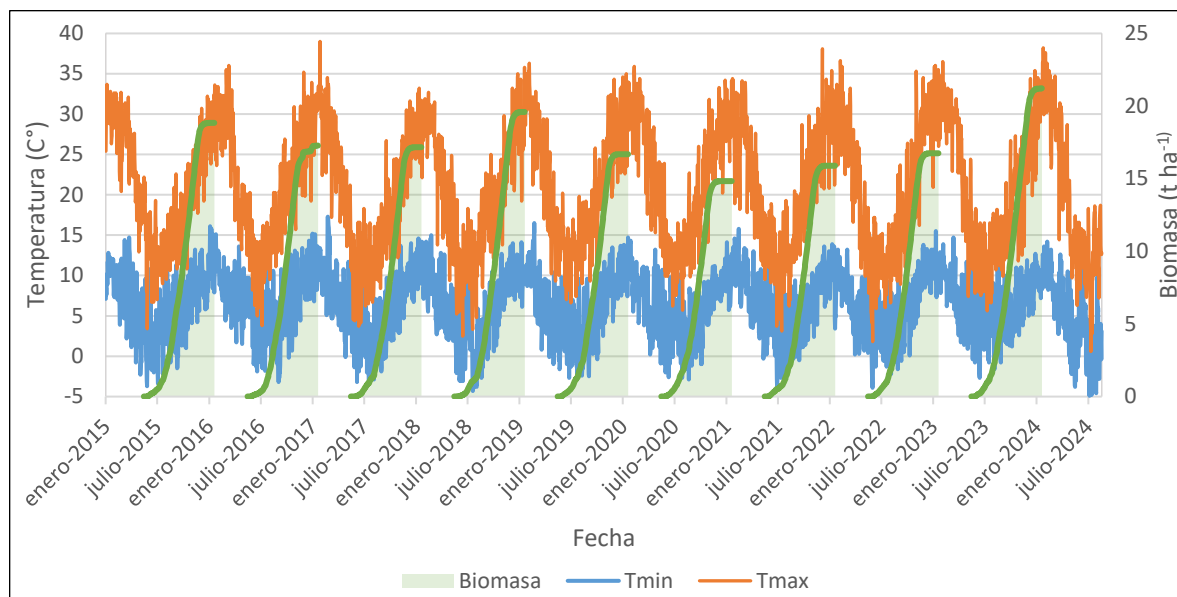
Temporada Maule	Pp (mm temp ⁻¹)	ETo (mm temp ⁻¹)	Índice humedad	Rendimientos (t ha ⁻¹)	Biomasa acumulada (t ha ⁻¹)
2015 - 2016	626,0	590,7	1,1	7,36	18,83
2016 - 2017	319,6	647,2	0,5	6,15	17,27
2017 - 2018	332,0	594,2	0,6	6,34	17,15
2018 - 2019	373,5	573,8	0,7	8,23	19,58
2019 - 2020	370,4	606,9	0,6	4,72	16,68
2020 - 2021	357,2	595,8	0,6	3,30	14,82
2021 - 2022	241,2	514,4	0,5	4,04	15,89
2022 - 2023	494,3	555,3	0,9	4,84	16,75
2023 - 2024	818,3	499,5	1,6	9,11	21,20

Pp: Precipitación; ETo: Evapotranspiración de referencia; mm temp⁻¹: milímetros por temporada; t ha⁻¹: toneladas por hectárea.

Los rendimientos más altos fueron las temporadas 2023 - 2024 y 2018 - 2019, mientras que los más bajo fueron las temporadas 2020 - 2021 y 2021 - 2022, esta diferencia entre el menor y mayor rendimiento de alrededor de 6 t ha^{-1} es normal (Jobet et al., 2017). Se puede observar que la temporada con mayor rendimiento (2023 - 2024) fue la que tuvo una precipitación e índice de humedad mayor respecto de las demás temporadas, y la ETo menor, lo que da un escenario propicio para alcanzar rendimientos más altos; por el contrario, la temporada con menor rendimiento (2020 - 2021) la cual, a pesar de ser la temporada de menor rendimientos, no tiene la temporada más baja de precipitaciones como la temporada 2021 - 2022 ni la evapotranspiración más alta como la temporada 2016 - 2017, esto se puede explicar que tuvo precipitaciones concentradas en invierno y déficit de agua en fases fundamentales del desarrollo del cultivo. Entre 2016 y 2022 las precipitaciones fueron bajo los 400mm lo que puede ser un indicador de déficit hídrico afectando así a los potenciales rendimientos; los niveles mayores de evapotranspiración coinciden en general con la baja precipitación, y el índice de humedad sólo en dos temporadas supera el valor 1 coincidiendo con las dos temporadas de mayores rendimientos.

En cuanto a las temperaturas, muestran un patrón estacional estable y su variación año a año fue similar, por lo que estrictamente las temperaturas no fueron un factor que afectó severamente los rendimientos. Sin embargo, es necesario detallar que las temperaturas juegan un papel importante en los rendimientos, siendo noviembre un mes relevante (en etapa de antesis), donde olas de calor por sobre los $30 \text{ }^{\circ}\text{C}$ o temperaturas bajo los $5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ reducen la viabilidad del polen y los estigmas, y aumentan la esterilidad de las espigas. En cuanto a heladas, las etapas de floración es la más sensible a este daño, el trigo invernal como lo es 'Maxwell' tolera bien las heladas en época vegetativa (Faiguenbaum, 2003) por lo que tanto en Maule y Araucanía tiene un buen comportamiento gracias a las épocas climáticas bien marcadas de Inverno y Verano (Jobet et al., 2013). Tomando como referencia la temporada con los rendimientos más bajos (temporada 2020 - 2021), en etapa de floración no presenta temperaturas por sobre los $30 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ni bajo los $5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (Mellado, 2007).

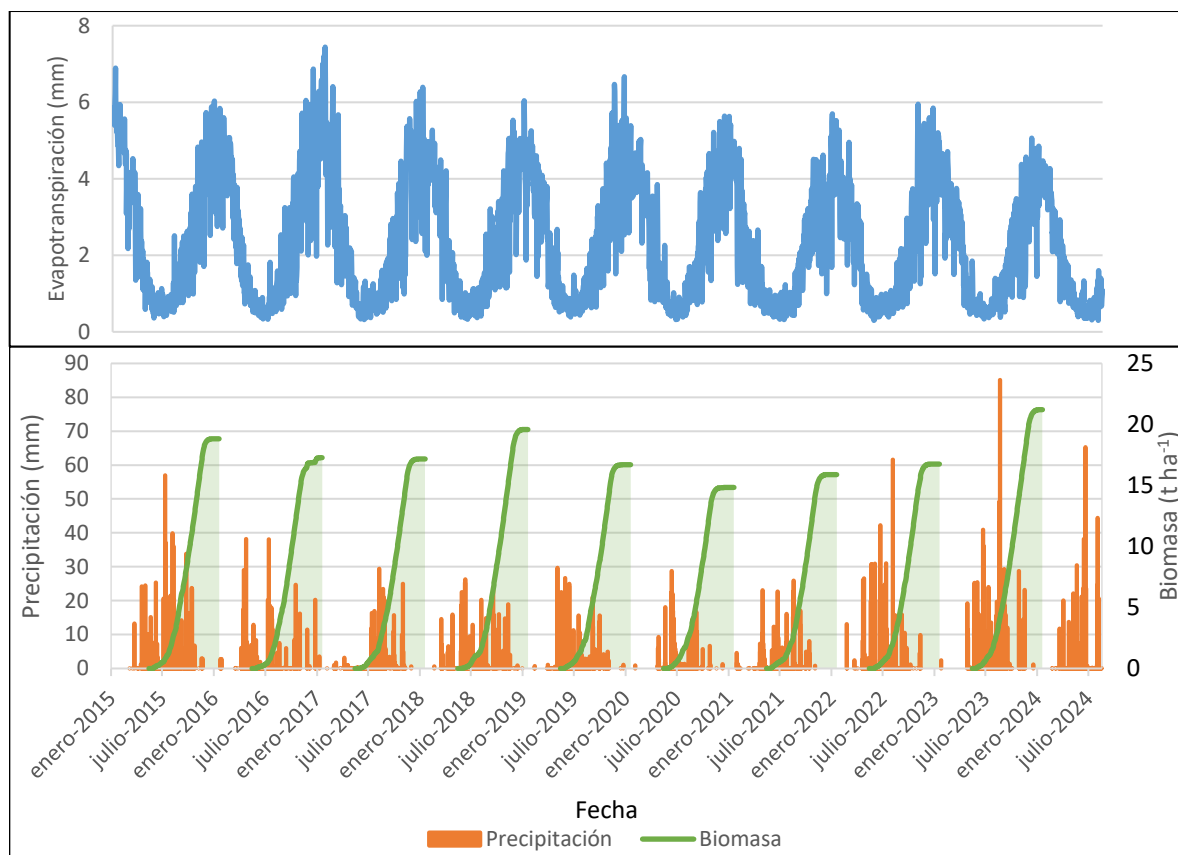
Figura 2. Temperaturas mínimas, máximas anuales y biomasa por temporada de la línea base 2015 - 2024 en la región del Maule.



Los factores de precipitación y evapotranspiración muestran variación de una temporada a otra, por un lado la ETo tiene una variabilidad similar entre temporadas, es menor cuando la precipitación es mayor y es mayor cuando la precipitación es menor, esto es debido a su parámetros que incluye su fórmula de Penman-Monteith donde la temperatura media y radiación son menores cuando hay presencia de nubes, por tanto no se puede tomar como un factor que incide directamente sobre los rendimientos; por otro lado, las precipitaciones que si tiene un rol muy importante en el cultivo del trigo muestran grandes diferencias entre temporadas, por ejemplo, la temporada de menor rendimientos (2020 - 2021) tiene una baja precipitación y la temporada de alto rendimiento (2023 - 2024) una alta precipitación, sin embargo, la temporada 2020 - 2021 no posee la temporada con mas bajas precipitaciones como lo es la temporada 2021 - 2022, esto se puede responder a en qué fase fueron concentradas las precipitaciones. El agua no puede ser un factor restrictivo en las etapas de macollaje, encañado, anthesis/floración y estado de grano lechoso (Mellado, 2007), de estas etapas la más sensible es floración y donde se determinarán los rendimientos. En situación de secano son deseables las precipitaciones primaverales, ya que existe una estrecha relación entre el agua caída y almacenada en el suelo hasta fines de octubre principios de noviembre, y

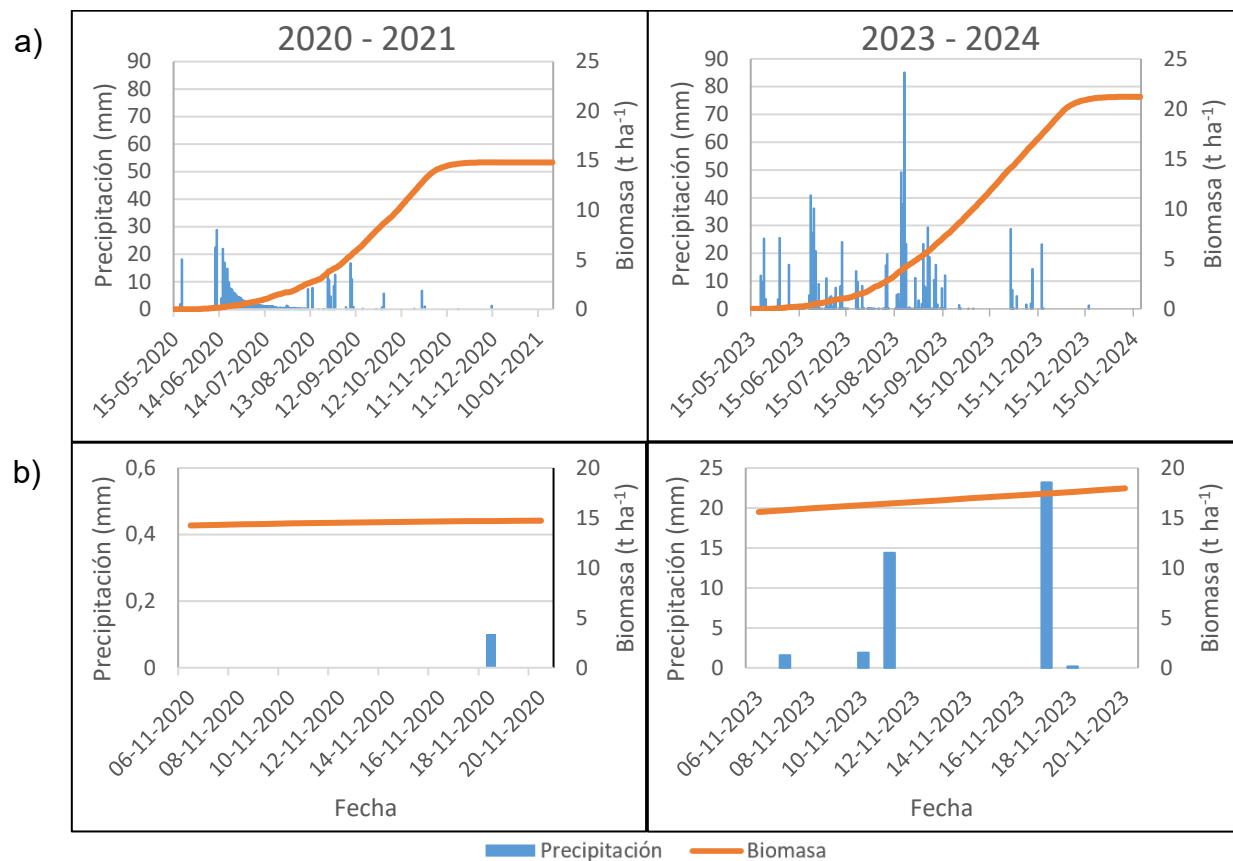
los rendimientos; para la región de Maule se requiere que llueva en Noviembre (Faiguenbaum, 2003).

Figura 3. Precipitación, evapotranspiración anuales y biomasa acumulada por temporada en la región del Maule.



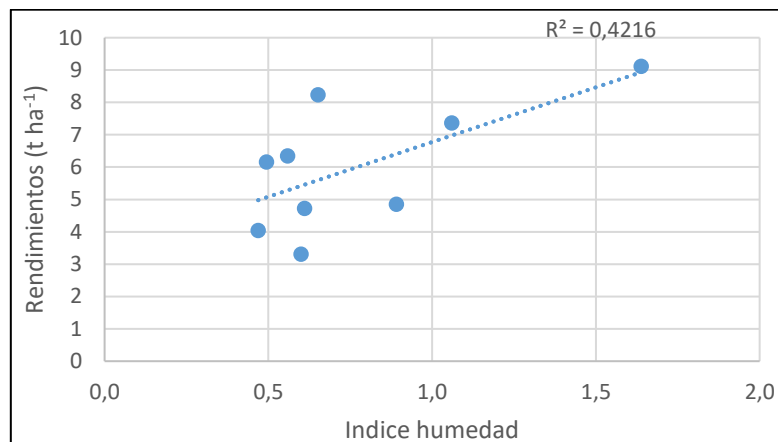
Identificada la precipitación como un factor importante en la formación de los rendimientos y sabiendo que la etapa más sensible es floración, se compararon las temporadas de menor rendimiento 2020 - 2021 y la temporada de mayor rendimiento 2023 - 2024 (figura 4a). La temporada 2020 - 2021 además de tener baja magnitud de precipitaciones, se concentraron en los meses de junio y principios de julio, pasado el mes de septiembre las lluvias fueron escasas, por el otro lado la temporada 2023 - 2024 tuvo sus precipitaciones distribuidas a lo largo de la temporada, notándose que hubo precipitación en el mes de noviembre en etapa de floración, desde comienzos de floración el 06 - noviembre hasta fines de floración el 20 - noviembre en la temporada 2020 - 2021 hubo tan solo 0,1 mm en 1 día en específico, mientras que la temporada 2023 - 2024 hubo abundante precipitación en al menos 4 días (figura 4b) aumentando la biomasa.

Figura 4. Precipitación y biomasa en la región del Maule por (a) temporadas 2020 - 2021 y 2023 - 2024, y (b) durante la floración.



Otra manera de medir las diferencias de humedad o periodos de sequía entre temporadas es con el IHA dada por la fórmula $PP \cdot ET_0^{-1}$, el cuál es replicable en un año agrícola o de forma diaria, lamentablemente en nuestro estudio este índice no muestra una relación con los rendimientos (figura 5) ($R^2 = 0,4^{ns}$)

Figura 5. Relación entre los rendimientos vs el índice de humedad en la región del Maule.



Región de la Araucanía, Provincia del Malleco. La zona sur de Chile, con clima moderadamente frío y alta precipitación, presenta condiciones ambientales muy favorables para la producción de trigo, permitiendo la obtención de rendimientos al más alto nivel mundial. En esta zona las heladas en floración son muy limitadas y evitables sembrando en fechas adecuadas (Faiguenbaum, 2003). La línea base de la región de la Araucanía en la provincia de Malleco, se estableció utilizando la estación Surco & Semilla, el suelo Mayulermo y el trigo invernal 'Maxwell', se obtuvieron los datos que se resumen en la tabla 6 por temporada.

Tabla 6. Rendimiento y biomasa acumulada por temporada de trigo invernal 'Maxwell' en la región de la Araucanía obtenido con el modelo AquaCrop bajo condición temporal de la línea base (2015 - 2024).

Temporada Araucanía	Pp (mm temp ⁻¹)	ETo (mm temp ⁻¹)	Índice humedad	Rendimiento (t ha ⁻¹)	Biomasa acumulada (t ha ⁻¹)
2015 - 2016	1465,2	730,9	2,0	8,66	22,98
2016 - 2017	1061,3	720,0	1,5	12,79	28,24
2017 - 2018	1352,5	673,2	2,0	7,95	22,51
2018 - 2019	1382,5	813,9	1,7	11,67	26,07
2019 - 2020	1095,6	750,7	1,5	6,80	22,46
2020 - 2021	1220,5	736,6	1,7	6,43	18,82
2021 - 2022	905,8	746,3	1,2	3,65	19,60
2022 - 2023	1299,0	761,5	1,7	6,12	22,73
2023 - 2024	1128,3	724,6	1,6	7,80	24,56

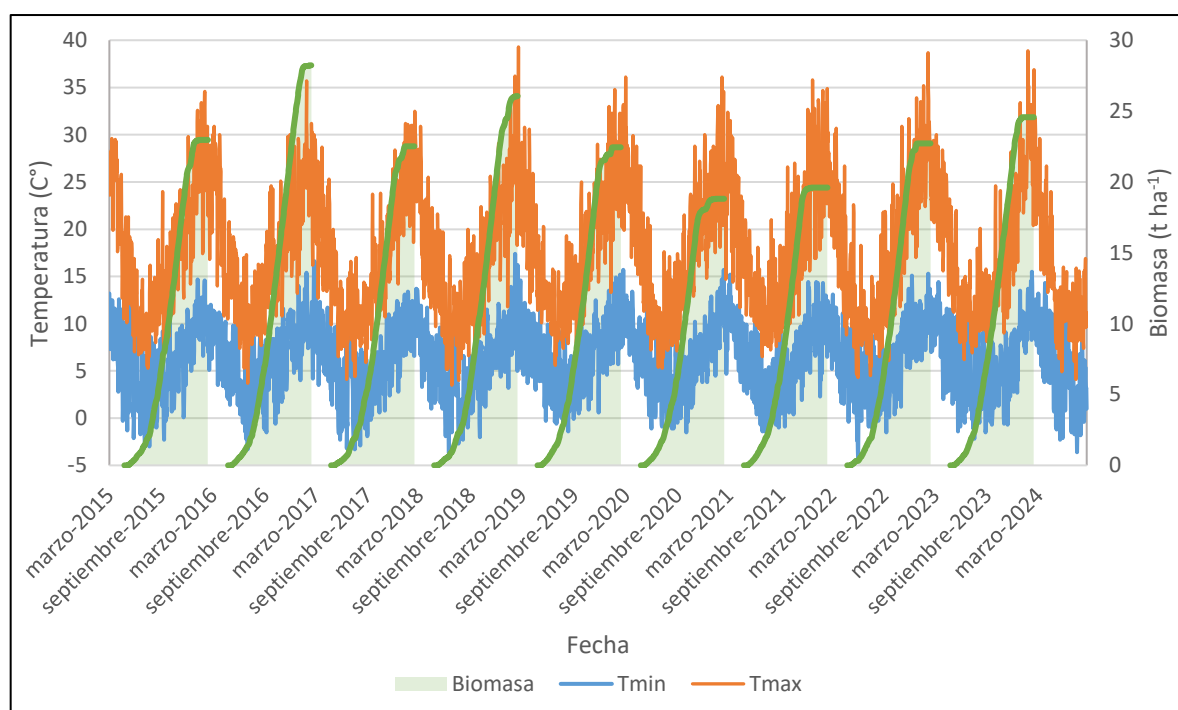
Pp: Precipitación; ETo: Evapotranspiración de referencia; mm temp⁻¹: milímetros por temporada.

Los rendimientos más altos fueron las temporadas 2016 - 2017 y 2018 - 2019, mientras que la más baja fue la temporada 2021 - 2022. Se puede observar un alto índice de humedad en las temporadas 2015 - 2016 y 2017 - 2018, sin embargo, estas temporadas no poseen los rendimientos más altos, esto al igual que en Maule se puede explicar con las concentraciones de lluvia y la disponibilidad hídrica en el suelo en fases importantes para los rendimientos, a la vez, se puede suponer que en esta región el IHA tampoco será un indicador correlativo de los rendimientos por la misma razón, ya que aunque llueva más y la ETo sea menor, los rendimientos se explican con las concentraciones de precipitaciones.

La figura 6 de temperaturas vs biomasa muestra que las variaciones entre temporadas no influyeron en los rendimientos, a pesar de que hay temperaturas altas por sobre los 30 °C son en los meses de enero - febrero donde no afecta

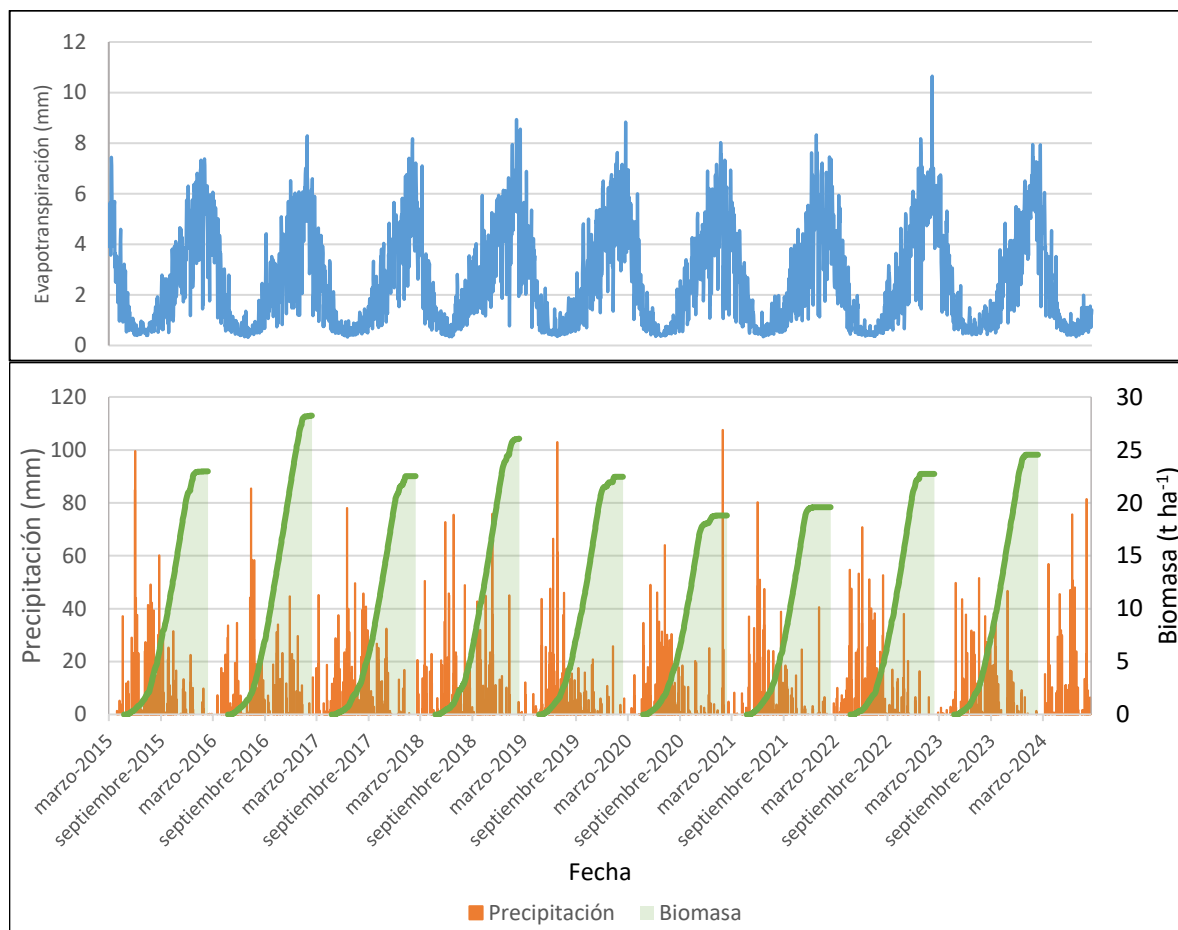
negativamente, al contrario, aporta al secado de grano para su cosecha; mientras que las temperaturas por bajo los 0 °C ocurren en época vegetativa y no perjudican al cultivo. En floración, y tomando la temporada con los rendimientos más bajos (2020 - 2021), no presenta temperaturas por sobre los 30 °C ni bajo los 5 °C que puedan afectar en los rendimientos, aunque en la temporada 2015 - 2016 presentó temperaturas mínimas bajo los 3° en 4 días de floración, no fue incidente en los rendimientos.

Figura 6. Temperaturas mínimas, máximas anuales y biomasa por temporada de la línea base 2015 - 2024 en la región de la Araucanía.



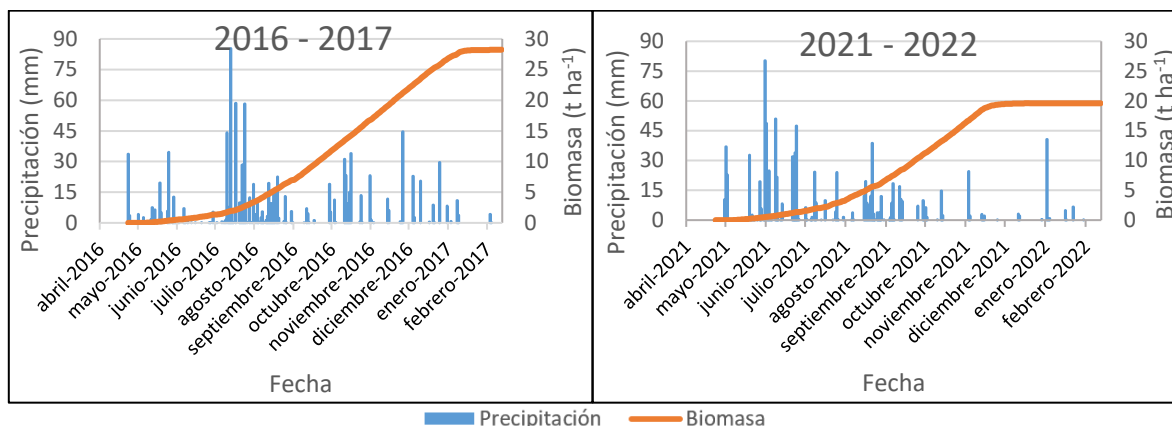
De la evapotranspiración de referencia no se puede concluir efectos directos sobre los rendimientos al igual como ocurrió en la región del Maule. Las precipitaciones se puede observar que son constantes en las temporadas de altos rendimientos como lo fueron 2016 - 2017 y 2018 - 2019, pero en la temporada 2021 - 2022 son bajas luego de la segunda mitad del crecimiento (después de septiembre). Para las regiones del Maule y Araucanía se requiere que llueva en noviembre y diciembre respectivamente (Faiguenbaum, 2003).

Figura 7. Precipitación, evapotranspiración anuales y biomasa acumulada por temporada en la región de la Araucanía.



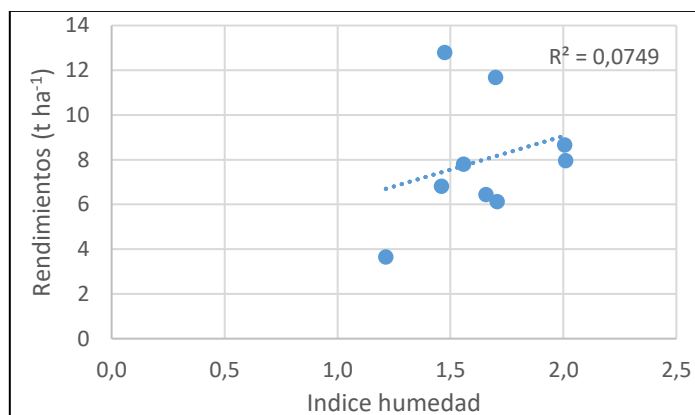
Como fue detallado anteriormente, la época más crítica en la formación de los rendimientos es la floración la cual en la región de la Araucanía ocurre entre el 14 - noviembre y el 27 - noviembre. Como se detalla en la figura 8 las precipitaciones en la temporada de mayor rendimiento 2016 - 2017 están presentes en toda la temporada y los rendimientos continúan creciendo luego del mes de noviembre, mientras que en la temporada de los rendimientos más bajos de la simulación 2021 - 2022 la pluviometría disminuye a partir del mes de septiembre, siendo menos frecuentes posterior a esta fecha, además de tener una magnitud menor de precipitaciones respecto de la temporada 2016 - 2017, llegando a la época de floración con baja pluviometría y los rendimientos cesan su incremento relacionándose con la falta de este recurso.

Figura 8. Precipitación y biomasa acumulada por temporada en la región de la Araucanía.



El IHA por temporada en la región de la Araucanía no guarda correlación, ya que esta región posee una mayor pluviometría anual, como fue mencionado la respuesta de los rendimientos ante la pluviometría se responde a la fecha donde se concentran estas.

Figura 9. Rendimientos vs IHA en la región de la Araucanía.



Escenarios futuros

Se plantean 4 escenarios futuros de cambio climático en los cuales existiría un aumento en las variables de ETo , $Tmin$, $Tmax$, y disminución de la variable Pp según corresponda, en variaciones de un 5 % (Escenario 1), 10% (Escenario 2), 15% (Escenario 3) y 20% (Escenario 4). Estos escenarios pueden ser asimilables a los modelos regionales (Cordex) SMHI-RCA4@MPI-M-MPI-ESM-LR y SMHI-RCA4@MIROC-MIROC5 RCP8.5 el cual en promedio para un futuro cercano (2020 - 2044) las variables $Tmin$, $Tmax$, ETo y Pp aumentan en un 10% y para un futuro intermedio (2045 - 2069) las mismas variables aumentan en un 20% (ver en

<https://simulaciones.cr2.cl>). Los rendimientos muestran un declive al aumentar de escenario, dado que tales variaciones proponen en su medida un escenario más complejo climáticamente que el anterior.

Tabla 7. Rendimientos y biomasa acumulada de los escenarios proyectados para la región del Maule y la región de la Araucanía obtenidos mediante modelo AquaCrop por temporada.

Región del Maule					
Escenario	Rendimientos (t ha ⁻¹)	Biomasa acumulada (t ha ⁻¹)	Variación de rendimiento (%)	Disminución agua disponible (m ³ ha ⁻¹)	Precipitación acumulada (mm)
P50	8,65	21,86	-	-	447,5
1 (5%)	7,77	21,46	- 10,2%	- 229	424,6
2 (10%)	6,49	21,22	- 30,6%	- 455	402,0
3 (15%)	5,82	20,94	- 42,2%	- 674	380,1
4 (20%)	4,35	20,60	- 53,8%	- 893	358,2
Región de la Araucanía					
Escenario	Rendimientos (t ha ⁻¹)	Biomasa acumulada (t ha ⁻¹)	Variación de rendimiento (%)	Disminución agua disponible (m ³ ha ⁻¹)	Precipitación acumulada (mm)
P50	12,93	30,37	-	-	1216,1
1 (5%)	12,41	29,78	- 4,0%	- 606	1155,5
2 (10%)	11,80	29,02	- 8,7%	- 1210	1095,1
3 (15%)	9,90	28,34	- 23,4%	- 1826	1033,5
4 (20%)	8,60	27,88	- 33,5%	- 2444	971,7

P50: Percentil 50 de los datos históricos 2015 - 2024; Variación de rendimientos%: En base al P50.

Temperaturas mínimas. Las temperaturas mínimas presentarán una tendencia al calentamiento, es decir, temperaturas bajo cero menos frecuentes y temperaturas mínimas cada vez más altas (Ministerio del Medio Ambiente [MMA], 2021). Sin embargo, como se detalló con anterioridad, las temperaturas no tuvieron una mayor injerencia en los rendimientos del cultivo debido a las épocas de verano e invierno bien marcadas en estas regiones. En cuanto a las repercusiones que puede traer al cultivo, el trigo es resistente a heladas desde macollaje hasta poco antes de la emisión de la inflorescencia, que coincide con el mes de noviembre (Mellado, 2007); de la simulación, las temperaturas bajo 0° ocurren antes de primavera, en fases vegetativas por lo que las temperaturas invernales no son un problema mayor en el desarrollo del cultivo.

Figura 10. Temperaturas mínimas por temporada en los distintos escenarios de cambio climático en la región del Maule.

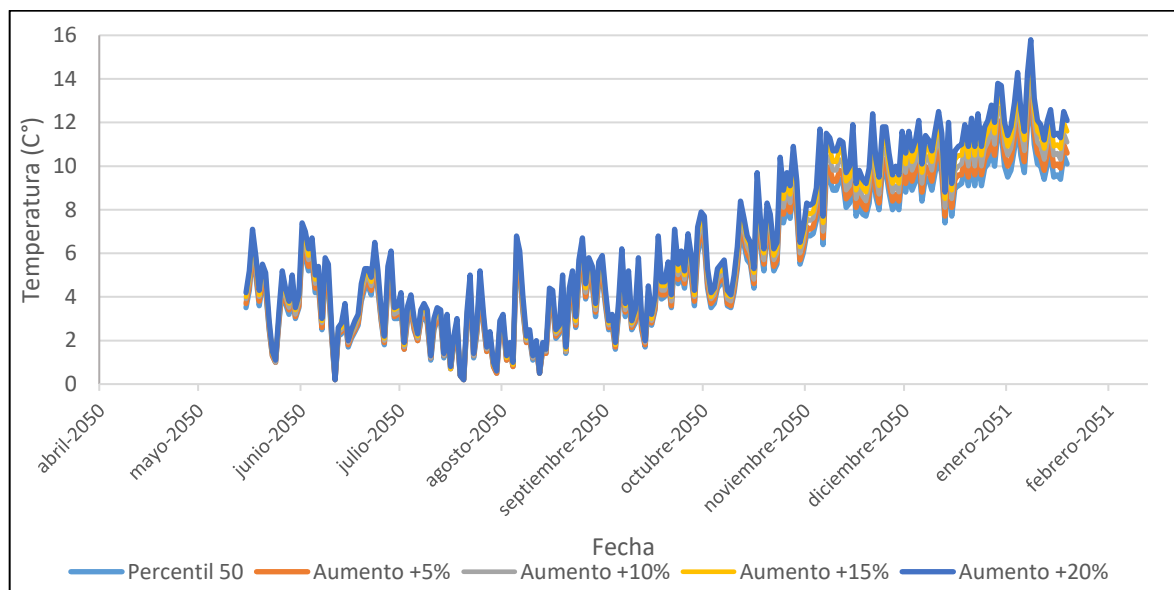
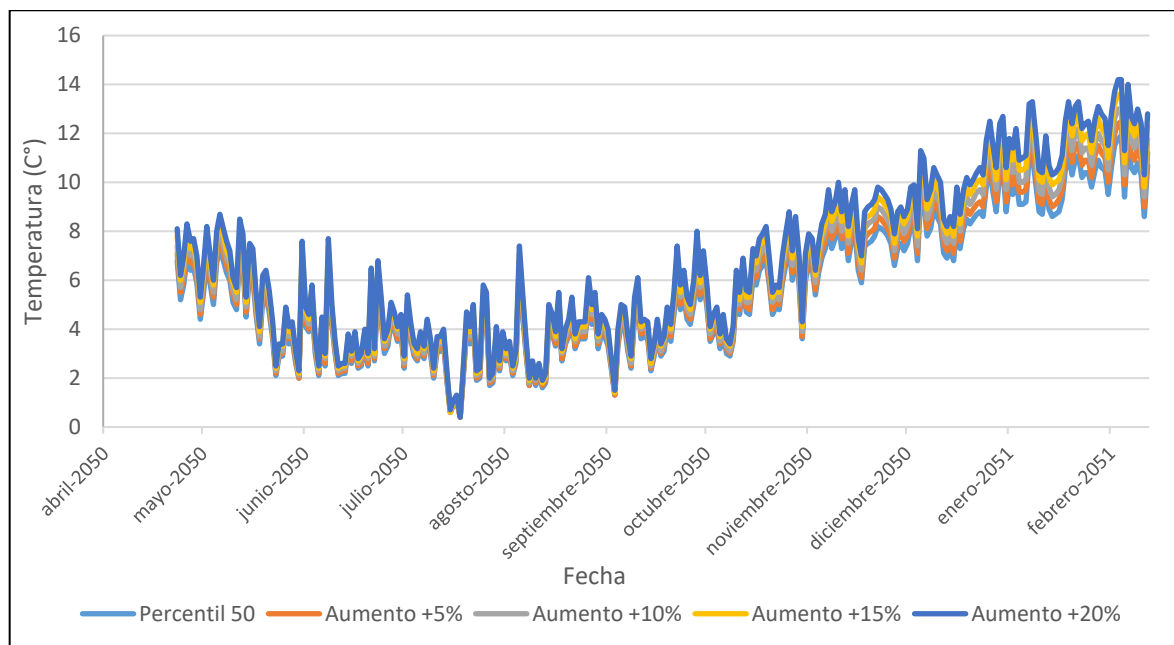


Figura 11. Temperaturas mínimas por temporada en los distintos escenarios de cambio climático en la región de la Araucanía.



Temperaturas máximas. Las temperaturas máximas juegan un rol relevante tanto en el cambio climático como en el comportamiento del cultivo, como fue mencionado, las temperaturas por sobre los 30 °C comienzan a provocar daño en los rendimientos, en Maule los escenarios 3 y 4 con 15% y 20% más de temperaturas respectivamente pasan esta barrera de los 30 °C a partir del mes de

diciembre, en Araucanía los escenarios 3 y 4 con 15% y 20% más de temperatura máxima superan esta barrera de los 30 °C después de la mitad de enero, en ambas regiones cuando ya ha finalizado floración, por tanto no hay daño por altas temperaturas en etapas importantes para el desarrollo del rendimiento.

Figura 12. Temperaturas máximas por temporada en los distintos escenarios de cambio climático en la región del Maule.

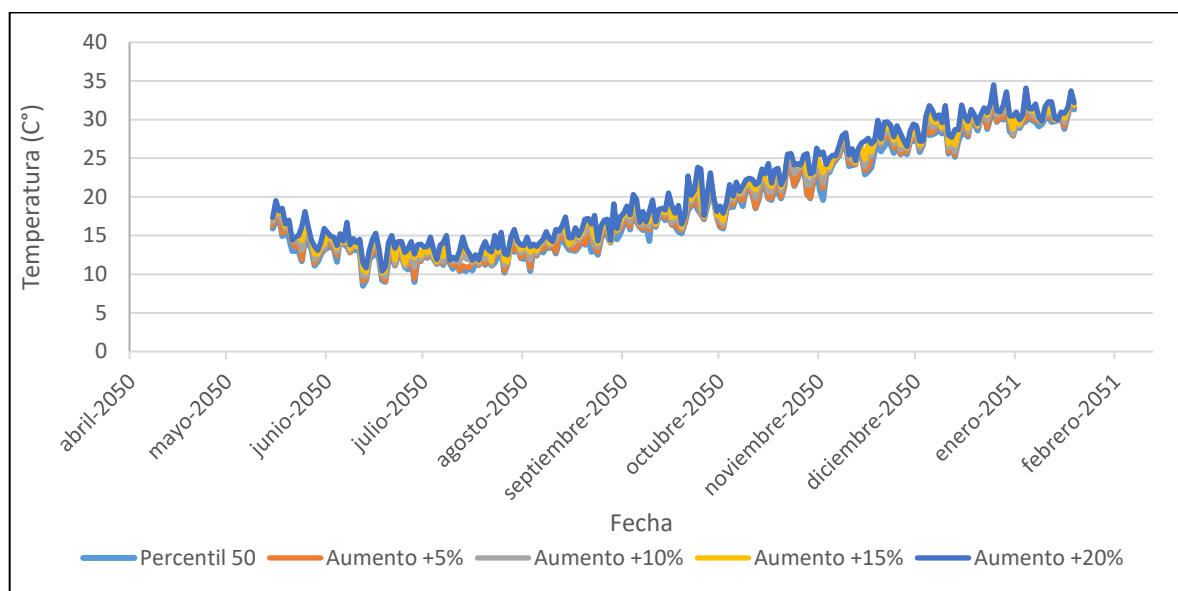
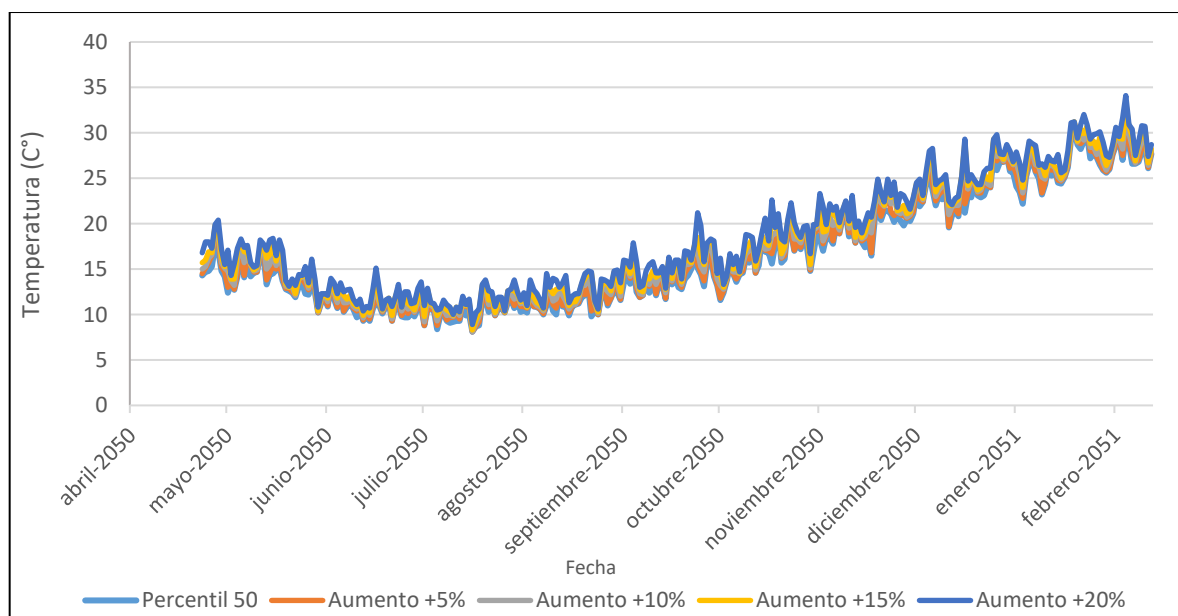


Figura 13. Temperaturas máximas por temporada en los distintos escenarios de cambio climático en la región de la Araucanía.



Precipitaciones. Las precipitaciones en escenarios de cambio climático presentarán una disminución, y como fue analizado, la pluviometría es uno de los principales factores que insidió en los rendimientos de cada temporada, el cultivo es sensible a la falta de este recurso, especialmente en fases del desarrollo donde el agua no puede restringirse. En Maule, en noviembre donde el agua debería estar presente en floración muestra pluviometrías bajo los 5 mm y tan solo 4 días de precipitación entre 1 y 2,7 mm por día, lo que da como respuesta a que en esta región cayeron mayormente los rendimientos como se detalló en la tabla resumen inicial de hasta un – 54 % de rendimientos en el peor escenario climático. En la región de la Araucanía la precipitación está presente en toda la temporada, en menor medida respecto del percentil 50 pero distribuida de manera de mantener un balance hídrico estable para el cultivo, inclusive cuando está en floración; en el mes de noviembre existe precipitación, lo que permitió que en esa región no decayeran en gran medida los rendimientos como ocurrió en Maule, el peor escenario de esta región con – 20 % de precipitación muestran una caída en los rendimientos de un - 33,5 %.

Figura 14. Precipitaciones por temporada en los distintos escenarios de cambio climático en la región del Maule.

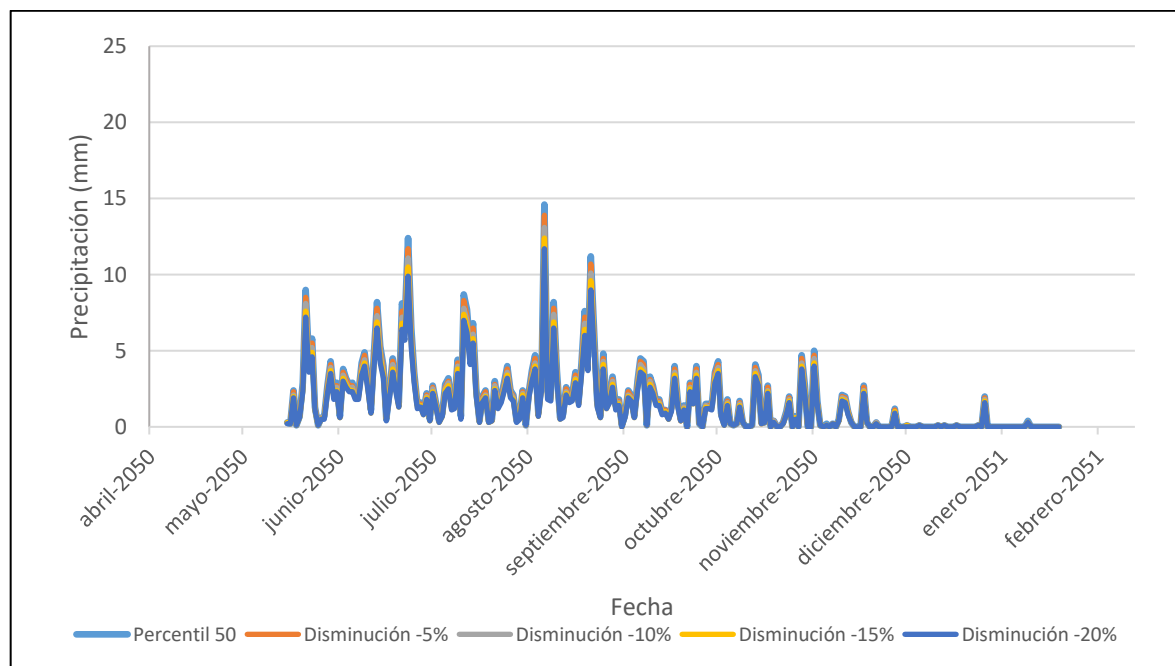
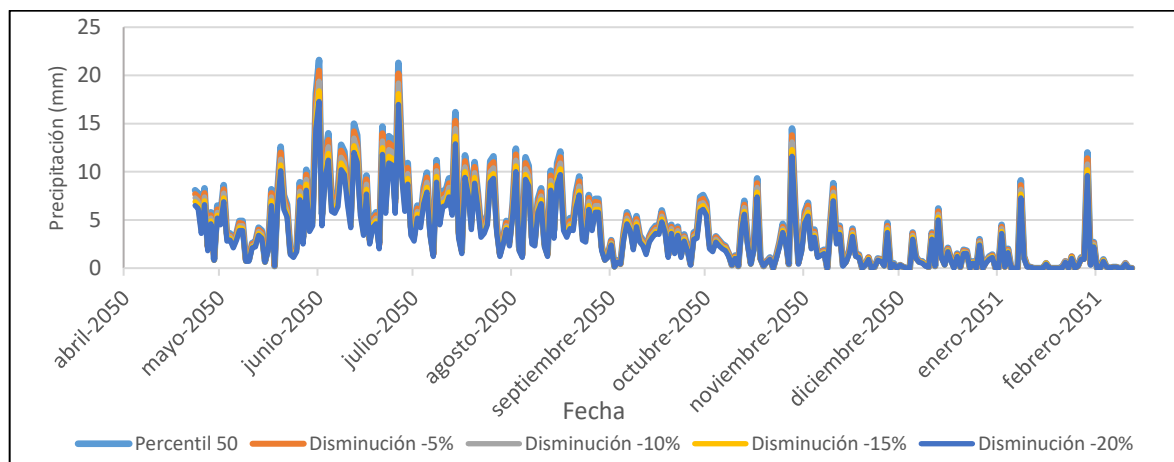


Figura 15. Precipitaciones por temporada en los distintos escenarios de cambio climático en la región de la Araucanía.



Evapotranspiración de referencia. La evapotranspiración del cultivo no puede tomarse estrictamente como explicativo a los rendimientos, ya que viene como respuesta a una fórmula (Penman-Monteith) en la que participan otras variables como la temperatura media y la radiación (FAO, 2006) que puede verse afectada cuando existe nubosidad o precipitación. Sin embargo, se puede detallar que la ETo incrementa en los distintos escenarios climáticos debido al aumento de las temperaturas medias, y la disminución de la precipitación (y con ello la baja nubosidad y mayor radiación); este incremento comienza en primavera y es mayor en los meses estivales.

Figura 16. Evapotranspiración de referencia por temporada en los distintos escenarios de cambio climático en la región del Maule.

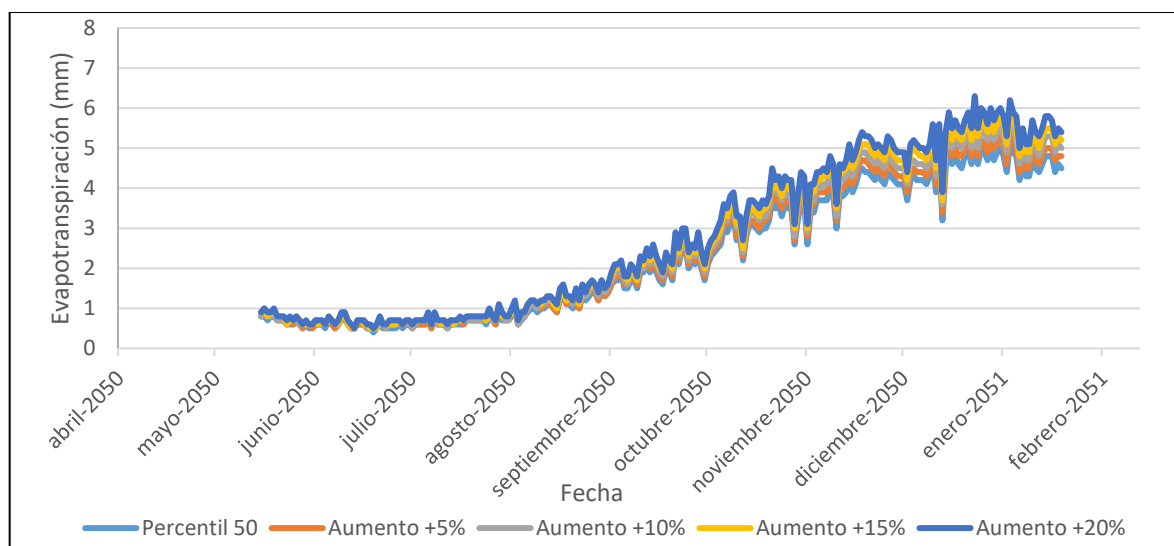
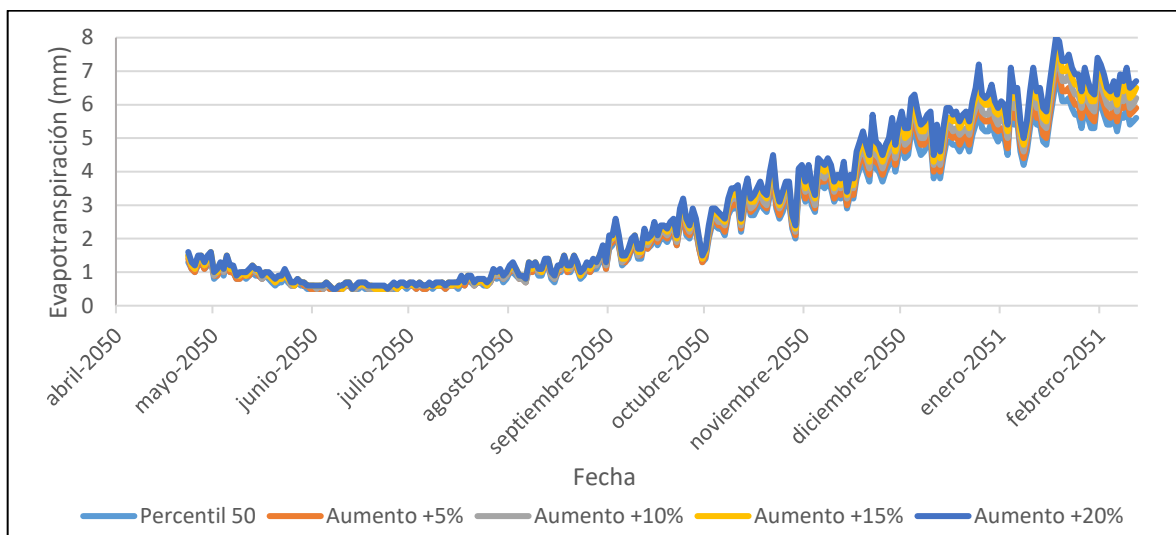


Figura 17. Evapotranspiración de referencia por temporada en los distintos escenarios de cambio climático en la región de la Araucanía.



Manejo agronómico

Fecha de siembra. Un buen desarrollo del cultivo, además de cuidados fitosanitarios, lo es la programación del cultivo según las condiciones climáticas, debido al cambio climático es fundamental adaptarse a mejores y nuevas fechas de siembra en todas las regiones de producción. La simulación hecha con AquaCrop con el peor escenario (escenario 4, 20 % variación) muestra en ambas regiones que adelantando la fecha de siembra se logra una notable mejora en los rendimientos de cosecha, de la misma manera, al atrasar en 2 semanas la siembra los rendimientos decaen fuertemente. Esta respuesta en los rendimientos y basándose, como ya hemos detallado, en las precipitaciones como un principal factor, al adelantar la siembra en Maule, tendríamos una floración el 23 - octubre hasta el 07 - noviembre, de esta manera aprovecharíamos más las precipitaciones, por el contrario, el escenario de + 2 semanas en Maule tendría una floración del 22 - noviembre al 06 - diciembre donde existe una casi nula precipitación. Por el lado de la Araucanía ocurre lo mismo con aprovechar de mejor manera las precipitaciones en floración, ya que con el escenario de adelantar 2 semanas la floración ocurre del 30 - octubre al 14 - noviembre existiendo mejor pluviometría, no así su escenario de 2 semanas tardías, donde su floración es del 28 - noviembre al 12 - diciembre con

muy baja pluviometría. En ambas regiones al adelantar la siembra no implicaría que el cultivo esté sometido a heladas, ya que seguiría ocurriendo en época vegetativa.

Tabla 8. Resumen simulación de rendimientos con distintas fechas de siembra para Maule y Araucanía utilizando AquaCrop.

	- 2 semanas	Referencia E4 (+ 20%)	+ 2 semanas
Maule			
Siembra a cosecha	30 - 04 a 04 - 01	15 - 05 a 19 - 01	30 - 05 a 03 - 02
Rendimiento (t ha ⁻¹)	8,7	4,35	1,9
Araucanía			
Siembra a cosecha	09 - 04 a 29 - 01	23 - 04 a 12 - 02	07 - 05 a 26 - 02
Rendimiento (t ha ⁻¹)	12,0	8,60	5,1

+ - 2 semanas: respecto de la fecha de siembra utilizada en los escenarios y línea base, E4: escenario 4 utilizado como referencia para estimar una mejoría.

CONCLUSIONES

AquaCrop permitió caracterizar y evaluar el impacto del cambio climático en los rendimientos del trigo invernal en las regiones del Maule y Araucanía, detallando como las precipitaciones son una variable climática fundamental en el desarrollo del cultivo, y como la floración es una etapa fenológica crítica y determinante de los rendimientos. La caracterización de la línea base evidenció el comportamiento de las variables climáticas y su relación con los rendimientos, reflejando la sensibilidad del trigo a la disponibilidad hídrica más que a temperaturas extremas, las cuales no representaron una limitante en ninguna de las regiones estudiadas.

Los escenarios de cambio climático mostraron una disminución progresiva de los rendimientos, siendo la región del Maule la más perjudicada con una reducción del 54 % en comparación a la región de la Araucanía con un 33,5 %; este comportamiento se explica principalmente por la diferencia en la distribución y volumen de la pluviometría, siendo más desfavorable en Maule durante la etapa de floración del cultivo. Asimismo, se comprobó que cambiar la fecha de siembra es un factor para mitigar los efectos del cambio climático. En ambas regiones el adelanto de las fechas de siembra en 2 semanas permitió mejorar los rendimientos en el peor escenario de cambio climático.

REFERENCIAS

1. AGRIMED. 2008. Análisis de vulnerabilidad del sector silvoagropecuario, recursos hídricos y edáficos de Chile frente a escenarios de cambio climático. Ministerio del Medio Ambiente. Santiago, Chile.
2. Andarzian, B., Bannayan, M., Steduto, P., Mazraeh, H., Barati, M., Barati, M., and Rahnama, A. (2011). Validation and testing of the AquaCrop model under full and deficit irrigated wheat production in Iran. *Agric. Water Manag.*, 100(1):1-8.
3. Araya, A., Habtu, S., Hadgu, K. M., Kebede, A., and Dejene, T. (2010). Test of AquaCrop model in simulating biomass and yield of water deficient and irrigated barley (*Hordeum vulgare*). *Agric. Water Manag.*, 97(11):1838-1846.
4. Centro de ciencia del clima y la resiliencia CR2 (2015). La mega sequía 2010-2015: Una lección para el futuro. Informe a la nación
5. Cotrisa (2025). Superficie sembrada. < <https://www.cotrisa.cl/mercado/superficie-sembrada-region/> > [Consulta: 20 mayo 2025]
6. Cuadrat, J. y Pita M. (2016). Acontecimientos pluviométricos extremos. En, *Climatología* (8va ed, pág. 188-189. Pp496). Catedra
7. CIREN, 2002. Estudio agrologico IX Región.
8. Cleves, J., Toro, J., Martínez, L. (2016). Los balances hídricos agrícolas en modelos de simulación agroclimáticas. Una revisión analítica. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 10 (1), 149-163. <https://doi.org/10.17584/rcch.2016v10i1.4460>
9. Faiguenbaum M.,Hugo. 2003. Labranza, siembra y producción de los principales cultivos de Chile. 760p. Vivaldi y Asociados. Santiago, Chile.
10. FAO, 2006. Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Estudio FAO Riego y drenaje 56. Rome, Italia
11. Farahani, H. J., Izzi, G., and Oweis, T. Y. (2009). Parameterization and evaluation of the AquaCrop model for full and deficit irrigated cotton. *Agron. J.*, 101(3):469-476.

12. Foster, T., Brozović, N., Butler, A. P., Neale, C. M. U., Raes, D., Steduto, P., ... & Hsiao, T. C. 2017. AquaCrop-OS: An open-source version of FAO's crop water productivity model. *Agricultural Water Management*, 181, 18-22.
13. García-Vila, M., Fereres, E., Mateos, L., Orgaz, F., and Steduto, P. (2009). Deficit irrigation optimization of cotton with AquaCrop. *Agron. J.*, 101(3):477-487.
14. Gohari, A., Mirchi, A. & Madani, K. System Dynamics Evaluation of Climate Change Adaptation Strategies for Water Resources Management in Central Iran. *Water Resour Manage* 31, 1413–1434 (2017).
15. Hernández, Naivy, Soto, F, & Caballero, A. (2009). Modelos de simulación de cultivos: Características y usos. *Cultivos Tropicales*, 30(1), 00.
16. Hsiao, T. C., Heng, L., Steduto, P., Rojas-Lara, B., Raes, D., and Fereres, E. (2009). AquaCrop - The FAO crop model to simulate yield response to water: III. Parameterization and testing for maize. *Agron. J.*, 101(3):448-459.
17. IICA (2013). Cambió el clima: herramienta para abordar la adaptación al cambio climático desde la extensión. Santiago
18. INE (2007). Superficie sembrada, producción y rendimiento de cereales, leguminosas y tubérculos, en riego y secano. <https://www.ine.gob.cl/estadisticas/economia/agricultura-agroindustria-y-pesca/censos-agropecuarios> [Consulta: 15 junio 2023]
19. INE (2024). Estimación de superficie, producción y rendimiento año agrícola 2023 - 2024. <https://www.ine.gob.cl/estadisticas/economia/agricultura-agroindustria-y-pesca/cosecha> [Consulta: 5 junio 2023]
20. INE (2024). Síntesis agropecuaria - Encuestas intercensales agropecuarias 2023 - 2024. <https://www.ine.gob.cl/estadisticas/economia/agricultura-agroindustria-y-pesca/cosecha> [Consulta: 5 junio 2023]
21. Iqbal, M. A., Shen, Y., Stricevic, R., Pei, H., Sun, H., Amiri, E., Penas, A., and del Rio, S. (2014). Evaluation of the FAO AquaCrop model for winter wheat on the North China Plain under deficit irrigation from field experiment to regional yield simulation. *Agric. Water Manag.*, 135:61-72.
22. Jobet, Claudio; Madariaga, Ricardo; Matus, Iván; Campillo, Ricardo; & Zuñiga, Javier. (2017). MAXWELL: EL CULTIVAR DE TRIGO QUE HA SUPERADO LAS BARRERAS PRODUCTIVAS EN EL SUR DE CHILE. *Chilean journal of*

agricultural & animal sciences, 33(1), 39-44. <https://dx.doi.org/10.4067/S0719-38902017000100105>

23. Jobet F., C., Mellado Z., M., Matus T., I., Campillo R., R., Espinoza N., N., Galdames G., R., Zuñiga R., J., & Jorquera F., E. 2013. *Manual de manejo para el cultivo del trigo*. 139 p. Empresa Copeval Agroindustrias.
24. Ministerio del medio ambiente [MMA]. (2021). *Sexto reporte del Estado del Medio Ambiente 2021*. Recuperado 20 de mayo de 2025, de <https://sinia.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2022/06/REMA2021.pdf> [Consulta: 20 mayo 2025]
25. Mellado Z., Mario. 2007. *El Trigo en Chile*. 684 p. Colección libros INIA N° 21. Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Centro Regional de Investigación Quilamapu, Chillán, Chile.
26. Orduna Diez, P. (1995) Medioambiente y desarrollo. En, *El medio ambiente*. (pág. 60. pp146) ESIC.
27. Odepa (2018). Región del Maule, Información regional 2018. En, *cultivos (7)* <https://www.odepa.gob.cl/wp-content/uploads/2018/03/Maule.pdf> [Consulta: 7 marzo 2024]
28. Odepa (2023, abril 25). *Boletín de cereales, abril 2023*. ODEPA. <https://www.odepa.gob.cl/publicaciones/boletines/boletin-de-cereales-abril-2023> [Consulta: 7 marzo 2024]
29. Peña, A. (2013). Validación del modelo AquaCrop en cinco genotipos de trigo (*Triticum aestivum* L.) cultivados en condiciones de disponibilidad de agua contrastantes. (Memoria de título, Ing. Agrón.) Universidad de Concepción, Fac. Agron. Chillán, Chile.
30. Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T. C., and Fereres, E. (2009). AquaCrop - The FAO crop model to simulate yield response to water: II. Main algorithms and software description. *Agron. J.*, 101(3):438-447.
31. Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T., Fereres, E. & AquaCrop Network. (2023). FAO Crop-water Productivity Model to simulate yield response to water. En *Reference manual for AquaCrop version 7.1*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
32. Rojas Hernández, J. (2013). Impactos sociales y ambientales del cambio climático global en la región del Biobío, desafíos para la sostenibilidad del siglo XXI. Universidad de Concepción

33. Santibáñez F. (2017). Atlas agroclimático de Chile: Regiones de Valparaíso, Metropolitana, O'Higgins y del Maule.
34. Santibáñez F. (2017). Atlas agroclimático de Chile: Regiones del Biobío y de la Araucanía.
35. Steduto, P., Hsiao, T. C., Raes, D., & Fereres, E. 2009. AquaCrop—The FAO crop model to simulate yield response to water: I. Concepts and underlying principles. *Agronomy Journal*, 101(3), 426-437.
36. Stolpe Neal B. (2006). Descripciones de los principales suelos de la VIII región de Chile.
37. Stricevic, R., Cosic, M., Djurovic, N., Pejic, B., and Maksimovic, L. (2011). Assessment of the FAO AquaCrop model in the simulation of rainfed and supplementally irrigated maize, sugar beet and sunflower. *Agric. Water Manag.*, 98(10):1615-1621.
38. Urquidi, Víctor L. (2005). Perspectiva de la población mundial. *Estudios demográficos y urbanos*, 20(1), 9-21. Epub 17 de octubre de 2019.