

# Cambio climático y sus efectos en el sector agrícola

## Maule





Vista panorámica, Talca

---



Centro de Investigación y Transferencia en Riego y Agroclimatología (CITRA)  
Facultad de Ciencias Agrarias  
Universidad de Talca  
Teléfono: +56 712200426 | Correo: [citra@citraulca.cl](mailto:citra@citraulca.cl)  
[www.citraulca.cl](http://www.citraulca.cl)

La presente publicación es resultado de una colaboración en el contexto del Programa de Gestión Hídrica, iniciativa de la Universidad de Talca y Enel Generación Chile.

Autores

Luis Morales-Salinas, Guillermo Fuentes-Jaque y Rodrigo Morales Zárate

**Equipo Universidad de Talca CITRA:** Director Samuel Ortega Farías, Coordinador Rodrigo Morales Zárate, Agrónomo Esperanza Salas Miranda

**Equipo Enel Generación Chile:** Responsable Relaciones Comunitarias. Pablo Castiglione Castillo, Especialista SR Sostenibilidad. Juan Carlos Yañez

Fotografía de portada.

Nubes en cielo de la comuna Colbún, Chile

---

An aerial photograph of a hydroelectric dam and reservoir. The water in the reservoir is a clear, vibrant blue. The dam structure is visible in the lower-left corner, and a concrete channel leads from the reservoir towards the center. The surrounding landscape is arid, with rocky banks and sparse green vegetation. In the background, there are green hills and a small bridge crossing the river. The Enel logo is overlaid in white on the left side of the image.

enel

Central Hidroeléctrica Loma Alta, San Clemente

---

# PRESENTACIÓN

El cambio climático, sus impactos y consecuencias, se presenta como uno de los principales desafíos actuales a los cuales debemos hacer frente como sociedad. Sus efectos, muchos de ellos irreversibles, producen cambios en los ecosistemas que por consecuencia influyen en las condiciones de vida de los seres humano. Es necesario avanzar en acciones de mitigación, pero se hace aún más crítico acelerar nuestra adaptación a este fenómeno. La acción climática requiere esfuerzos mancomunados del sector público, privado y la sociedad civil, quienes, de manera colaborativa y coordinada, pueden generar las condiciones para hacerle frente.

Cómo líderes de la transición energética nacional y global, Enel focaliza sus inversiones para acelerar la descarbonización energética a través del crecimiento de la capacidad renovable y una disminución progresiva de las fuentes térmicas. Es más, en línea con nuestro objetivo de lograr la carbono neutralidad al año 2040, hemos anticipado en 18 años nuestra salida de la generación a carbón con el cierre de nuestra última unidad en septiembre del 2022. En complemento a la descarbonización, estamos empujando la electrificación de los consumos energéticos, es decir, generar las condiciones para que se produzca un recambio de fuentes energéticas hacia la electricidad que será suministrada de manera creciente por renovables. Lo anterior, nos permitirá no solo reducir de manera considerable nuestras propias emisiones de gases de efecto invernadero, sino también de todos aquellos usuarios finales de la energía eléctrica.

Nuestro compromiso por la acción climática no se restringe a las actividades propias de nuestro negocio, y tenemos la convicción de que requiere de un enfoque sistémico y congruente con la vocación de cada territorio. Es por ello, que apuntamos al trabajo integrado entre ciencia, academia, industria, sociedad e instituciones, considerando a cada actor como parte de un sistema integrado en donde prima la necesidad de alinear una perspectiva común por la conservación de los recursos naturales. En esta lógica, desde el 2015 junto con la Universidad de Talca y su Centro de Investigación en Riego y Agroclimatología - CITRA, hemos desarrollado un programa cuyo propósito es la optimización del uso de agua en actividad de riego en la Región del Maule. Este programa es de suma importancia para nuestra compañía, ya que pone en valor la necesaria sinergia entre las industrias energéticas y agrícolas para hacer uso sostenible del recurso hídrico, y cuyos resultados dan cuenta de que la colaboración entre ambos sectores produce resultados concretos para la conservación del sistema hidrogeológico en esta región.

El presente documento es evidencia de la necesidad de impulsar el desarrollo científico-tecnológico y la importancia de difundir sus resultados para impulsar acciones individuales y colectivas. Contar con información de fenómenos globales, pero con miradas locales, permite avanzar en diseñar métodos y procesos para que las actividades humanas generen un menor impacto a los recursos ambientales, sociales y económicos. En concreto, avanzar en la adaptación al cambio climático.



**Daniel Rossi Chackal**

Head of EGP&TGx Sustainability Initiatives and Circular Economy  
Enel Chile



---

# Maule

## Cambio Climático y sus efectos en el sector agrícola

### Contenidos

<b>13</b>	<b>CAMBIO CLIMÁTICO: GENERALIDADES</b>		
	El efecto invernadero	14	
	Cambio climático antropogénico	15	
<b>21</b>	<b>EVOLUCIÓN EN LA ZONA CENTRAL DE CHILE</b>		
	Características de la región del Maule	21	
	Climatología de la región del Maule	23	
	Evolución de las variables climáticas	27	
	Índices térmicos	30	
	Evapotranspiración	34	
<b>37</b>	<b>PROYECCIONES DEL CAMBIO CLIMATICO</b>		
	Escenarios de cambio climático	37	
	Evolución de las variables climáticas	39	
<b>45</b>	<b>EFFECTOS EN EL SECTOR AGRÍCOLA</b>		
	Temperatura y crecimiento de las plantas	46	
	Cambio climático y fertilidad de suelo	47	
	Impacto del cambio climático en plagas y enfermedades	47	
	Aumento de la temperatura y disponibilidad de agua	48	
	Impacto a nivel nacional	49	
	Región del Maule. Disponibilidad de recursos hídricos	50	
	Cambios en la estructura productiva	51	
	Estrategias de adaptación	54	





Museo Histórico, Yerbas Buenas

---

## INTRODUCCIÓN

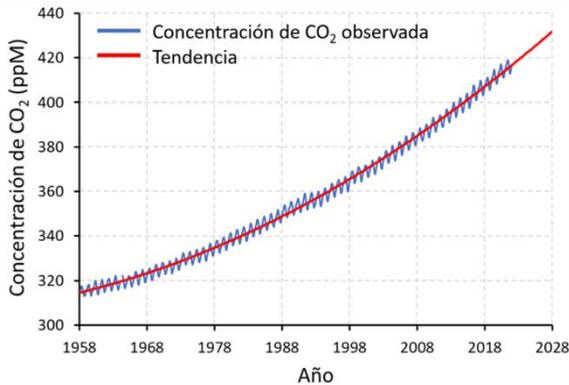
Hacia el año 1965, Lyndon B. Johnson (1908-1973), presidente de los Estados Unidos, presentó los resultados de un estudio que había solicitado con anterioridad a sus asesores científicos, usando la frase "Hacia el año 2000, el clima cambiará". Este informe constituyó un hito como el primer texto científico realizado en Estados Unidos y de alcance mundial sobre los posibles efectos del cambio climático en nuestro planeta.

El párrafo anterior nos muestra que la preocupación por el mundo científico y político sobre el cambio climático no es nueva. En efecto, hacia el aproximadamente el año 1824 el científico francés de la época Jean Baptiste Joseph Fourier (1768-1830) fue el primero en referirse al "Efecto Invernadero", donde se describe este fenómeno como el causante de que la atmósfera pueda retener calor. Posteriormente, el físico inglés John Henry Poynting (1852-1914), fue el primero en exponer esta analogía con los invernaderos y explicó teóricamente este fenómeno. En el año 1859 el físico irlandés John Tyndall (1820-1893), descubrió que algunos de los gases que componían la atmósfera terrestre (dióxido de carbono, el metano y el vapor de agua) eran los responsables de la retención de energía infrarroja, lo que hoy llamamos efecto invernadero. Sin embargo, ahora suponemos que Tyndall solo mejoró los experimentos realizados por la científica estadounidense Eunice Newton Foote, publicados en 1856, llegando a la misma conclusión que ella. El interés de Tyndall en esta investigación se fundamentaba en la intriga que le causaba explicar las causas de los cambios en el clima entre eras glaciares. En el año 1896, el sueco Svante Arrhenius (1859 – 1927) concluyó que la actividad industrial sería la principal causa de las emisiones de CO<sub>2</sub> hacia la atmósfera, descubrimiento que quedó registrado en un artículo científico. Posteriormente Arrhenius recibió el premio Nobel de Química por sus contribuciones a la físico-química.

A inicios de la Primera Guerra Mundial, Guy S. Callendar, estableció una relación entre la actividad humana, las emisiones de gases de efecto invernadero y el aumento de las temperaturas. Su contribución

principal, fue proponer la teoría que relacionaba el aumento de las concentraciones de dióxido de carbono en la atmósfera y el incremento de la temperatura global de la Tierra. En 1938, Callendar publicó que el incremento del 10% del CO<sub>2</sub> atmosférico podría desencadenar un aumento de la temperatura media de la tierra, una tendencia ya observada hasta ese momento. Su trabajo se basó en las observaciones realizadas durante los 48 años precedentes, en los cuales nuestra civilización había incrementado el uso de los combustibles fósiles como el carbón y el petróleo. Los resultados de este trabajo fueron conocidos como "El efecto Callendar", puesto que consideraba que esta relación frenaría la llegada de la próxima glaciación. Por otra parte, Edward Teller entre los años 40 y 50, señaló a los combustibles fósiles como los responsables del aumento en la temperatura, para ello relacionó las tablas de consumo de combustible y la temperatura.

Si avanzamos más rápido en el tiempo, podemos encontrar que el un científico estadounidense Charles David Keeling (1928 –2005) dedicó su vida a medir el comportamiento temporal de la molécula de dióxido de carbono en el Observatorio Mauna Loa en Hawái, Estados Unidos. Esta investigación de largo aliento, pues su información se encuentra disponible desde finales de 1950 hasta la fecha, informó con mucho detalle por primera vez al mundo de la posible injerencia antropogénica en contribuir a profundizar el "efecto invernadero" y por ende, influir en el calentamiento global. La curva generada por la investigación de Keeling, que se conoce por el mismo apellido del investigador, ha mostrado el aumento sostenido en la concentración de CO<sub>2</sub> atmosférico, el cual es un gas de efecto invernadero. La figura 1 muestra la curva de Keeling con los valores observados de la concentración de CO<sub>2</sub> en Mauna Loa en Hawái, donde los datos muestran que el promedio de concentraciones en el año 2021 alcanzó los 416,11 ppm. Actualmente, hasta julio de 2022, se registraron en promedio 419,37 ppm, muy superior al inicio de los registros en 1958 que eran de aproximadamente en promedio de 315,26 ppm, alcanzando un incremento sostenido del orden del 33% hacia nuestros días.



**Figura 1.-** La llamada Curva de Keeling que contiene los valores observados de la concentración de CO<sub>2</sub> atmosférico en Mauna Loa en Hawái (Línea azul) y la tendencia de las concentraciones (Línea roja)



**Figura 2.-** En los años 70's, apareció un fenómeno contradictorio al cambio climático en la opinión pública, denominado "El enfriamiento global", pero este nuevo fenómeno tuvo muy poco apoyo en la comunidad científica, sin embargo, desde el punto de vista popular tuvo otra perspectiva.

Posteriormente, en los años 70's un grupo de científicos relacionados con las ciencias de la atmósfera, liderado por Jule Charney (1917-1981), del Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT), publicaron un informe que contenía una evaluación detallada sobre la evolución del clima a nivel planetario. El trabajo es considerado premonitorio, ya que sus resultados mostraron que, si el CO<sub>2</sub> atmosférico se duplicaba, podría generar un aumento de 3 °C de la temperatura planetaria, pero con un error más bien alto, del orden de 1,5 °C. Si consideramos lo que conocemos hoy en día sobre el aumento real observado, estaríamos en torno a los 0,68 °C, lo que podría ser considerado cercano a las predicciones de ese informe.

Un aspecto curioso e interesante es que en los años 70's apareció otro fenómeno contradictorio al calentamiento global en la opinión pública, denominado "El enfriamiento global", a pesar de que la tasa de cambio del CO<sub>2</sub> atmosférico estaba en aumento. Este nuevo fenómeno fue propuesto en la década de 1970, basado en una tendencia mostrada a partir de los años 40 a los 70, que fue a la baja, cuya tasa de enfriamiento era de -0.3 °C/década. Esta hipótesis tuvo muy poco apoyo en la comunidad científica, sin embargo, desde el punto de vista popular tuvo otra perspectiva. Pese a lo anterior, el comportamiento de la temperatura en los años posteriores mostró que la tendencia era al calentamiento.

Producto de la preocupación política, en el año 1988 fue creado el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés), Fundado por Naciones Unidas (UN por sus siglas en inglés) y la Organización Meteorológica Mundial (WMO por sus siglas en inglés, o también Organización Meteorológica Mundial, OMM, en castellano).

Este grupo de expertos y políticos realiza evaluaciones periódicas, basadas en información científica fiable, sobre la evolución del cambio climático y actualmente son la referencia internacional en esta problemática. Su primer informe fue publicado en el año 1990 y hasta la actualidad han emitido seis de ellos. Expertos y consultores de la OMM han señalado que lo pronosticado en el primer informe se ha estado cumpliendo, sobre todo, que la mayor magnitud del calentamiento se iba a cumplir hacia las latitudes más altas del planeta (hacia los polos). A partir de 1992 la ONU concluye que el cambio climático es una amenaza creada por el hombre.

Un aspecto interesante es el documental desarrollado por el ex-vicepresidente de USA Al Gore, el cual fue estrenado en el año 2006, titulado "An Inconvenient Truth" (Una verdad incómoda). En este documental se ponía en evidencia de las consecuencias del cambio climático en la humanidad de manera muy ilustrativa.

Muchos de los hechos mostrados en ese documental han podido ser observados por las personas de todos los continentes, como el aumento de la temperatura, las olas de calor, la potencia de los huracanes, el derretimiento de los glaciares, el derretimiento de los polos, entre algunos de sus efectos.

Otro de los aspectos asociados, y recalcados en el Cuarto Informe del IPCC, es que el calentamiento global podría traer como consecuencia que los fenómenos extremos sean cada vez más intensos. Posteriormente, en el año 2007, apareció otro documental llamado "The Great Global Warming Swindle" (La gran farsa del calentamiento global), el cual fue muy polémico en la opinión pública. Este documental mostraba que la teoría cambio climático antropogénico es solo propaganda y que los fundamentos de este son muy cuestionables científicamente.

Este último documental fue ampliamente criticado y destinado al olvido por la comunidad. También en el año 2007, la cadena televisiva BBC emitía el documental "Climate Change - Britain Under Threat" (Cambio Climático, Gran Bretaña bajo la amenaza). Corresponde a una historia de ficción sobre cuál sería la situación de las islas británicas en un futuro si el cambio climático mantenía su tendencia actual. Posteriormente otros documentales han sido creados motivaciones similares a los anteriormente señalados.

Hacia el año 2009, Elinor Ostrom (1933-2012), politóloga y Premio Nobel de Economía en el año 2009, escribió un artículo interesante sobre el cambio climático y cual era su visión para poder enfrentar este fenómeno. Ostrom sostuvo que el cambio climático es un problema complejo y también no lineal, ya que estaría provocado por varios forzantes y retroalimentaciones, de las cuales no tenemos total conocimiento científico (Ostrom, 2009).

Sin embargo, un aspecto interesante de su propuesta se basaría en la idea de que la solución a este problema no pasa solo por los organismos de escala global (ONU, Protocolo de Kioto, Acuerdo de París,..., etc.). En efecto, su hipótesis se basa en que las estructuras socioeconómicas (ciudadanía, industrias, agricultores, ganaderos, transporte,...etc.) al interior de los países no generaría el adecuado interés y

credibilidad para organizarse y reducir el calentamiento global. Su propuesta se basa en una contribución dual al problema, es decir, el combate del cambio climático se debería basar en la sinergia entre el mundo político (Presidencia, Ministerios, Senado, Diputados, Municipalidad,...etc.) y el mundo ciudadano (Juntas de vecinos, ONG's, Empresas, PYMES,...etc). Lo anterior nos indicaría un camino distinto al propuesto originalmente, es decir, una política dirigida desde las más altas esferas políticas, lejos de la ciudadanía, a un sistema más participativo donde la sociedad en su conjunto genera las soluciones para combatir el cambio climático. Sin embargo, conocido el modus operandi de nuestro actual sistema político-económico esta visión podría tardar mucho en implementarse. Nuestra sociedad global esta haciendo grandes esfuerzos por organizar y alinear a todas las naciones para realizar medidas de mitigación y adaptación para el combate del cambio climático, sin embargo, observamos como esta negociación es compleja y difícil, ya que entran en conflicto los intereses de cada país. Por ello, lo más cómodo para todos sería mantener el status quo hasta que alguna generación venidera solucione este problema.

El clima es producto de las muchas relaciones entre los diferentes elementos que lo componen al interior de la tierra, por ejemplo, la biosfera, litósfera, atmósfera, la hidrósfera y la criósfera, los cuales interactúan entre si generando una estructura espacial, global y territorial del clima, sin embargo, no debemos olvidar al sol, quien es el principal causante del movimiento de la atmósfera y nuestra fuente de energía extraterrestre. En Chile, hace ya muchos años, se estudiaba un fenómeno complejo en la actual Región de Coquimbo, nos referimos a las comunidades agrícolas, fenómeno que dio origen en Chile al concepto de la "tragedia de los comunes", o también podríamos decir "la tragedia de los bienes comunes" (Hardin, 1968). El origen de este problema en la Región de Coquimbo, se encuentra asociada a las comunidades agrícolas, donde la tenencia de la tierra es colectiva (aproximadamente el 25% de la región). A veces, hemos escuchado decir "como esta tierra no es de nadie, nadie la cuida", frase que resume la tragedia, el actual colectivamente se va contra del interés personal y en el deterioro del bien común.

Podríamos decir que este sistema de gobernanza del bien común, según Hardin (1968), no es el más adecuado, donde privatizar o administrar desde una instancia superior parecieran ser las alternativas correctas. En el caso del problema del cambio climático, el bien común es el clima, en primera aproximación la atmósfera y los gases que la componen, por lo tanto, podríamos estar actualmente frente a un tipo de tragedia común. Este tema lo dejaremos abierto a la reflexión propia, sin embargo, nosotros vemos que el problema del cambio climático esta siendo enfrentado por la sociedad global usando una instancia superior de gobernanza, pero, ahora nos toca a nosotros, una especie de propiedad personal, colaborar para frenar este problema.

El cambio climático es un proceso que está establecido en nuestro planeta desde siempre, pero el cambio climático antropogénico es más nuevo. Actualmente hablamos de aumento de la temperatura o disminución de las precipitaciones, o aumento de estas, o aumento del nivel del mar, pero ¿cuánto hemos influido en ello?. Un aspecto interesante es que los procesos físicos que generan el cambio climático actual son conocidos hace muchos años, por lo menos los esenciales, como hemos visto anteriormente. Hoy en día el cambio climático es una realidad a la cual esta enfrentada la humanidad, sin embargo, es curioso que ella misma fue la causa. A pesar de que sus

repercusiones son más o menos claras, hay incógnitas que aún no son aclaradas a pesar de la gran cantidad de investigación científica realizada en el mundo, pero, ya podemos sentir en parte sus efectos y pueden ser alarmantes, por lo que es mejor prevenir que lamentar.

Sabemos que el cambio climático puede ser una fuente de muchas amenazas, por ejemplo, la disminución de las precipitaciones, el aumento de la temperatura, el aumento de la evapotranspiración y el incremento del déficit hídrico, y otras consecuencias que aún no han sido evaluadas adecuadamente.

Pese a lo anterior, en el caso de Chile también hay un augurio de oportunidades, como el movimiento de la frontera agrícola hacia el sur del país, que podría llenar de esperanza a la agricultura chilena, sin embargo, otras áreas quedarían bajo los impactos más fuertes de este cambio, evidentemente, con el consecuente impacto negativo tanto en lo económico como en lo social.

El presente libro constituye una fuente de información para el conocimiento de los alcances del cambio climático en la Región del Maule, donde el lector podrá conocer en profundidad, pero de forma simple en que consiste este fenómeno y cuál será su impacto el sistema agrícola en nuestra región.

### Referencias

- Hardin, G. 1968. The Tragedy of The Commons. Science, 162: 1243-48.
- INIA. 2017. Cambio Climático: Amenazas y oportunidades que surgen al ampliarse hacia el sur la frontera frutícola del país. Revista Campo & Tecnología, Año 2, Número 4.
- INIA. 2011. Especial Cambio Climático. Revista Tierra Adentro, Número 93
- Ostrom E. 2009. A polycentric approach for coping with climate change. Policy Research working paper 5095. Washington D.C., USA. The World Bank.



Estación Meteorológica Mariposas, Programa de  
Gestión Hídrica, San Clemente

---

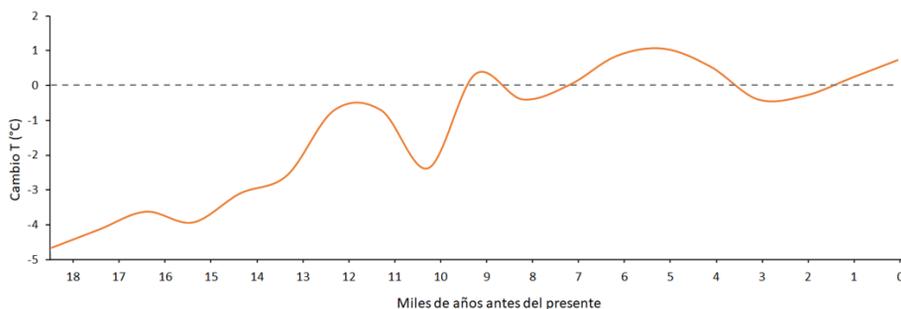
## CAMBIO CLIMÁTICO: GENERALIDADES

Cuando nos referimos al concepto de clima, usualmente lo asociamos en forma inadecuada al concepto de tiempo, error común que se nos ha introducido en la televisión. En efecto, para muchos periodistas, en muchos países, estos dos conceptos son similares y los usan indistintamente, sin embargo, son muy diferentes. El concepto de tiempo hace referencia al estado de la atmósfera en cada instante de tiempo, es decir, los valores que toman las variables meteorológicas (presión, precipitación, humedad relativa, radiación solar, temperatura, velocidad del viento, etc.) en intervalos de tiempo muy pequeño, como un segundo, una hora o un día. En cambio, el clima, es un concepto más integrador y que necesitamos un intervalo de tiempo mucho mayor para definirlo. Técnicamente, según la Organización Meteorológica Mundial (WMO, por sus siglas en inglés), corresponde al promedio de las variables meteorológicas en 30 años. Por ejemplo, los promedios de estos periodos de tiempo se denominan normales (Normals) y las últimas dos más conocidas son las 1961-1990 y 1991-2020. Según el método propuesto por Wladimir Koppen (1846-1940), las principales variables usadas para definir el clima de una región son la temperatura y la precipitación, conocidas como dos de los elementos del clima (Kottek et al., 2006). La definición anterior le confiere una de las características más importantes del clima, sus cambios suelen ser lentos en el tiempo, hecho que ha sido registrado en la literatura científica. Podemos decir, por lo tanto, que el clima de un territorio no es una propiedad inmutable, por el contrario, esta propiedad cambia en el tiempo, de forma natural o causada por la actividad humana a lo largo del tiempo.

La Tierra tiene una edad aproximada de unos 4500 millones de años (Ma), la vida en el planeta apareció

hace unos 3800 Ma atrás, y los homínidos hace unos 4 Ma. Acompañando a la evolución de la vida en la tierra, el clima siempre está cambiando, lo cual es un hecho irrefutable a lo largo de la existencia de la tierra. Si consideramos solamente la distancia al Sol como un factor preponderante para establecer el clima de la Tierra, la temperatura promedio debiera ser de  $-18^{\circ}\text{C}$ , sin embargo, es de  $15^{\circ}\text{C}$ . Es la atmósfera terrestre la que posibilita esta temperatura óptima para permitir la vida, con sus propiedades derivadas de la composición de gases con un dominio de nitrógeno (78,08%) y oxígeno (20,95%), pero además existen otros gases presentes en menor cantidad como el dióxido de carbono (0,035%) y el vapor de agua, el cual se encuentra en una proporción muy variable, entre el 1% y el 4%.

La figura 1 muestra la evolución promedio de la temperatura del aire del planeta desde finales del último período glacial hasta nuestros días, estimado a partir del aire encerrado en testigos de hielo en la Antártida (Lago Vostok). Esta figura nos muestra que en este período la tendencia es hacia un calentamiento natural de aproximadamente de  $0,285^{\circ}\text{C}$  cada mil años, lo que consideramos una tasa de calentamiento pequeña. Si consideramos ahora la tasa de calentamiento actual medida a partir de los años 60, esta sería del orden de  $0,16^{\circ}\text{C}$  por década, muy superior al calentamiento natural de la tierra a partir de la última glaciación. El hecho mencionado anteriormente llamó la atención de muchos científicos en el mundo, desencadenando una serie de mediciones y estudios sobre las posibles causas de este cambio climático reciente (últimos 100 años), tan distinto en velocidad de cambio al que se tenían según los antecedentes históricos.



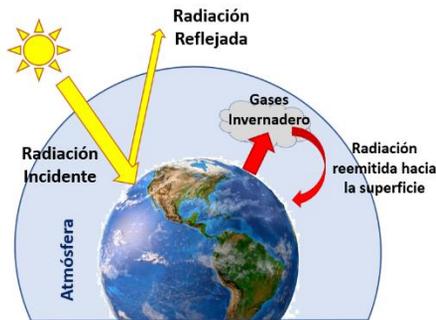
**Figura 1.-** Evolución promedio en el cambio de la temperatura del aire del planeta desde el final del último período glacial hasta nuestros días, estimado a partir de testigos de hielo de la Antártida.

Resumiendo, se ha observado a nivel planetario que las temperaturas superficiales a nivel de los continentes han aumentado a una velocidad mayor en relación con la temperatura del mar (Sea Surface Temperature: SST) en ambos hemisferios. De hecho, el calentamiento medio en los últimos 30 años, el cual se ha observado en todo el mundo, los registros actuales muestran que en los dos últimos decenios las tasas de calentamiento fueron del orden de  $0,27\text{ }^{\circ}\text{C}$ , sin embargo, en el mismo intervalo de tiempo la tasa de los océanos solo fue de  $0,13\text{ }^{\circ}\text{C}$  por decenio. Los registros muestran que el mayor calentamiento tuvo lugar en las estaciones de invierno y primavera.

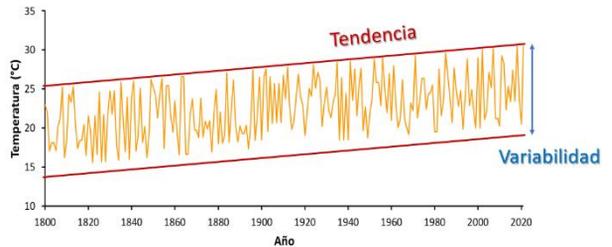
## El efecto invernadero

Desde un punto de vista histórico, cuando se comenzó a estudiar el origen de la temperatura de la tierra, más alta de lo que debiese tener, se realizó una analogía con el típico invernadero utilizado en agricultura. Específicamente en la atmósfera no ocurre lo mismo, exactamente igual, a lo que ocurre en un invernadero, esto se debe a que en un invernadero el fenómeno de la convección está limitada por la cubierta, pero en la atmósfera no hay límites a la convección. La convección es prácticamente cinco veces más importante que el proceso de absorción y reemisión de la energía infrarroja producto de los gases que componen la atmósfera. En efecto, solo el 1% de los gases que componen la atmósfera son los responsables del "efecto invernadero", que técnicamente se encuentra ligado a un efecto

atmosférico provocado por las particulares características de la atmósfera, como la composición de gases y partículas presentes en ella. Los principales gases de efecto invernadero (GEI) son el vapor de agua y el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), y a medida que estos aumenten, también se intensificará el efecto invernadero de la tierra. Por ejemplo, investigaciones realizadas en testigos de hielo que han permitido conocer las concentraciones de  $\text{CO}_2$  en los últimos cuatrocientos mil años, donde se han observado oscilaciones de cien mil años, mostrando niveles nunca superiores a 300 ppmv. A partir del Siglo XIX, los niveles de  $\text{CO}_2$  han aumentado a niveles nunca alcanzados en los últimos 400.000 años, lo que ha provocado un aumento de  $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  en los últimos 100 años. La figura 2 muestra un esquema simplificado del efecto invernadero provocado por la atmósfera terrestre. La atmósfera es prácticamente transparente a la energía solar proveniente del sol (Radiación incidente: flechas amarillas) pero aproximadamente un 33,3% de ella es reflejada hacia el espacio extraterrestre, el resto es absorbida por la superficie terrestre. La energía absorbida calienta la superficie terrestre y esta es emitida como radiación infrarroja (flecha roja) y posteriormente atrapada en parte por la atmósfera, la cual aumenta su temperatura reemitiéndola hacia la superficie (flecha roja curva) aumentando la temperatura de todo el sistema climático. Por lo tanto, en la superficie de la tierra posee una doble contribución radiativa, esto es la solar y la infrarroja emitida por la atmósfera, efecto que permite que la temperatura del planeta sea adecuada para la vida.



**Figura 2.-** Diagrama esquemático simplificado del "Efecto Invernadero" generado por la atmósfera terrestre.



**Figura 3.-** En cambio climático puede ser representado por el incremento de la temperatura en el tiempo, lo que llamamos tendencia, sin embargo, esta variable posee una variabilidad entre años que hacen que algunos sean más cálidos o fríos que otros..

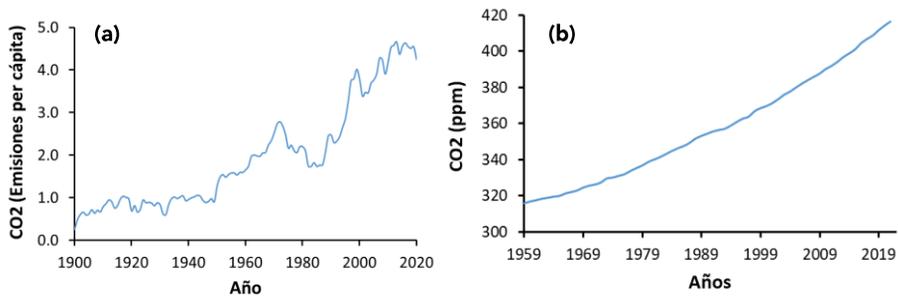
## Cambio climático antropogénico

La figura 3 muestra un ejemplo simplificado del concepto de cambio climático explicado a partir de una curva hipotética del comportamiento de la temperatura media de la tierra desde 1800 hasta la fecha. Como podemos observar en esta figura, la temperatura posee una variabilidad entre años que hacen que algunos sean más cálidos o fríos que otros, que podrían ser años NIÑO, NORMALES y NIÑA, dependientes de su intensidad. Pese a esta variabilidad, también observamos que la temperatura está aumentando, lo que llamamos tendencia, hecho que queda reflejado en la inclinación positiva de la curva. Este comportamiento de la tendencia sostenida a aumentar o decrecer es la que se asocia con el cambio climático, que corresponde a una variación de sus valores medios, en nuestro caso, se incrementan por cada década que transcurre. Como ya lo habíamos mencionado anteriormente, los cambios naturales en el clima de la tierra suelen ser lentos, sin embargo, los antecedentes científicos señalan que este cambio climático que estamos presenciando en los últimos cien años se debe a la influencia humana. En efecto, no se habían tenido antecedentes históricos sobre un cambio tan rápido en la evolución de la temperatura, como son las tendencias actuales.

A partir de los antecedentes anteriores, podríamos definir el cambio climático antropogénico de forma simple como un cambio drástico (corto plazo) en el clima debido a las alteraciones en los ciclos naturales (ciclo del agua, ciclo del carbono, efecto invernadero)

provocada por un cambio en la composición de la atmósfera, fundamentalmente por el aumento de los gases de efecto invernadero. El aumento de los GEI's se debe a la influencia humana, lo que se denomina actualmente cambio climático antropogénico. Este aumento se debe a la emisión de GEI's por parte de la actividad humana, como la industrial, urbana, transporte, deforestación, agricultura y ganadería, el cual se genera al quemar combustibles fósiles, los cuales fueron almacenados por la tierra a mucha profundidad en un largo período de tiempo. Estos gases han sido introducidos de forma masiva a partir de la revolución industrial, producto de la quema de carbón y petróleo.

La figura 4(b) muestra el incremento de las concentraciones de CO<sub>2</sub> a nivel mundial desde 1959 y hasta el año 2021, gráfico muy famoso por su aparición en muchos documentales de cambio climático. La tendencia casi exponencial del aumento en las concentraciones de CO<sub>2</sub> atmosférica no tiene precedentes en la historia climática conocida de la Tierra. La figura 4(a) muestra el aporte de Chile a las emisiones per cápita en nuestro planeta desde 1900 hasta nuestros días (Ton) derivados de consumo de combustible fósiles e industria, donde actualmente cada ciudadano chileno genera del orden de 4 toneladas anuales (Ton/Año). Si nos comparamos con un ciudadano de los Estados Unidos, ellos generan alrededor de 15 Ton/Año, en cambio con una persona de China, este valor es de 7 Ton/Año. Para el caso de Alemania, ellos disminuyeron de 14.5 Ton/Año en el año 1979 a 7,69 Ton/Año en el año 2020, una disminución notable de sus emisiones per cápita.

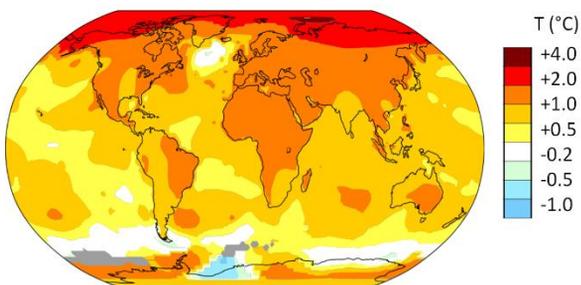


**Figura 4.-** (a) Aporte de las emisiones per cápita de CO<sub>2</sub> por Chile desde 1900 hasta nuestros días (Ton) derivados de consumo de combustible fósiles e industria. (b) Aumento de las concentraciones de CO<sub>2</sub> a nivel mundial desde 1959 y hasta el año 2021.

Francia, por otro lado, mostró un máximo de emisiones per cápita en 1973, del orden de las 10,34 Ton/año, pero disminuyó a 4,24 Ton/año en 2020, muy similar a las emisiones actuales de Chile. Este aumento explosivo de las emisiones de CO<sub>2</sub> se relaciona con el aumento de la temperatura terrestre, por ello se estima que el hombre posee un cierto grado de influencia en el calentamiento acelerado en los últimos 100 años. Este aumento de CO<sub>2</sub> en la atmósfera, es considerado un forzante del calentamiento planetario, al ser un gas de efecto invernadero estaría contribuyendo a acentuar el cambio climático. En efecto, consecuentemente con la definición de clima dada anteriormente, el efecto observado del cambio climático es el aumento de la temperatura planetaria y la modificación de los regímenes de precipitación en el mundo, efecto que se ha venido observando desde ya varios años, lo cual podría explicarse por el aumento de los gases de efecto invernadero.

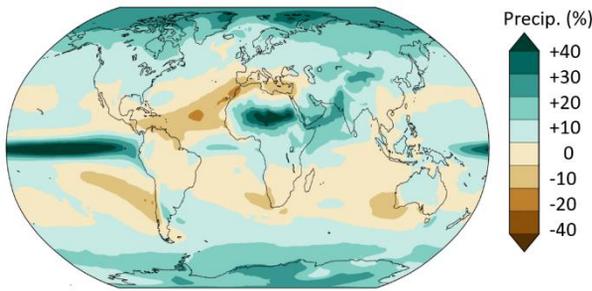
Las temperaturas medias anuales han mostrado un aumento sostenido en el tiempo desde finales de 1800 hasta nuestros días, casi lineal a partir de 1960 y hasta la fecha, comportamiento que se ha observado en todo el mundo, pero con tasa de cambio dependientes del territorio. La figura 5 muestra los cambios observados en la temperatura del aire en los últimos 50 años y corresponden a las diferencias en los promedios de 1956-1976 y 2011-2021. Sin embargo, un cambio tan rápido en una de las variables meteorológicas puede afectar a otras, como la precipitación.

Como se observa en la figura 5, el calentamiento en los continentes presenta características particulares, esto indica que no afectará a todas las regiones del planeta por igual. En efecto, el cambio climático reciente podría presentarse de forma diferente en cada región del planeta, por ejemplo, la variabilidad climática podría intensificar diferentes fenómenos como sequías, inundaciones, cambios en los patrones de la humedad, la dinámica de los vientos, cobertura de nieve, hielos, zonas costeras y los patrones de los océanos. La figura 6 muestra los cambios observados en la precipitación en los últimos años en relación con el promedio cercano a inicios del Siglo XX, expresado en porcentaje.



**Figura 5.-** Cambios observados en la temperatura del aire en los últimos 50 años y corresponden a las diferencias en los promedios de 1956-1976 y 2011-2021.

Como es posible observar en la figura los cambios en la precipitación están impactando fuertemente en la zona centro-sur de Chile, mostrando déficit entre un 10 y un 20 % en relación con la precipitación observada a principio del Siglo XX.



**Figura 6.-** Cambios observados en la precipitación en relación con el promedio cercano a inicios del Siglo XX, expresado en porcentaje.

A partir de las conclusiones emanadas del último informe del IPCC (2021), podemos señalar que el cambio climático a futuro afectara al sistema planetario, por ejemplo:

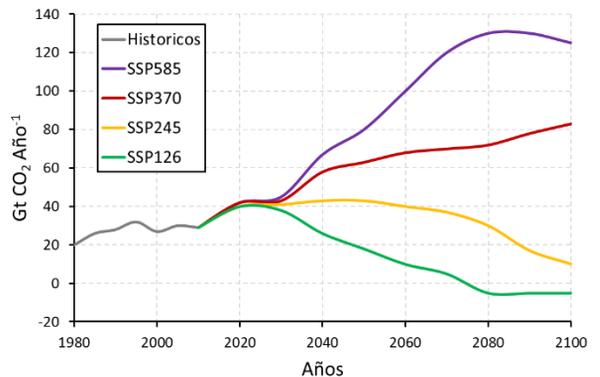
**Intensificación en el ciclo hidrológico:** Este efecto podría generar una mayor intensidad de las sequías, precipitaciones y las inundaciones en muchas regiones del planeta, por ejemplo, modificar el normal comportamiento de fenómenos como el Niño o la Niña. Otro efecto es la distribución espacial de los patrones de precipitación en la Tierra, desplazándose a otras zonas. Por ejemplo, se espera que en las latitudes altas aumenten las precipitaciones, mientras que en las regiones subtropicales es posible que disminuyan. También se esperan cambios en los patrones e intensidades de las precipitaciones asociadas con los monzones.

**Nieve, hielo y permafrost:** El aumento sostenido de la temperatura aumentará las tasas de deshielo del permafrost, el cual se denomina a la superficie que haya permanecido congelada durante mucho tiempo (Años). Esta superficie se considera compuesta por suelo, rocas y sedimentos, los cuales se encuentran consolidados conformando un todo por el hielo, el cual actúa como una especie de cemento. Por otra parte, es posible que la cobertura de nieve estacional disminuya, aumente el derretimiento de los glaciares y áreas cubiertas de hielo, así como también la pérdida del hielo marino en los polos (Ártico y Antártida), sobre todo en verano.

**Océanos y mares:** Es conocido que se ha registrado un aumento continuo del nivel del mar a lo largo del

siglo XXI, sin embargo, este fenómeno podría aumentar. Este aumento del nivel del mar podría contribuir a que las inundaciones costeras sean más frecuentes y graves, lo que generaría problemas de erosión costera. Este problema, ya no tan futuro, podría incrementar la frecuencia de las marejadas generando inundaciones costeras con mayores impactos. En el océano existen además otros fenómenos de mucha importancia, como la acidificación, los niveles de oxígeno, el incremento de la temperatura y el aumento en la frecuencia de las olas de calor marinas, fenómenos asociados con la influencia humana. Todos estos cambios repercuten en los ecosistemas marinos, así como en la pesca.

**Zonas urbanas:** En el caso de las ciudades, el cambio climático podría amplificar los fenómenos extremos, por ejemplo, se espera que aumente el número de olas de calor y por ende las temperaturas máximas absolutas. Lo anterior se debe fundamentalmente a que las ciudades muestran valores mayores de temperatura que sus alrededores, más de índole agrícola, lo que llamamos fenómeno de isla térmica. En el caso de las ciudades costeras, estas podrían estar afectadas, además, por las inundaciones, las cuales pueden deberse a períodos de intensas precipitaciones, aumento del nivel del mar y marejadas intensas.



**Figura 7.-** Los escenarios de cambio climático denominados "Trayectorias Socioeconómicas Compartidas (SSP)" fueron concebidos para generar una descripción coherente, consistente y plausible para una adecuada descripción de lo que podría ocurrir a futuro en el mundo.

Para una información más detallada de los posibles efectos del cambio climático a nivel regional, es decir, de áreas del planeta específicas, es necesario recurrir al Sexto Informe de Evaluación del IPCC (<https://www.ipcc.ch/languages-2/spanish/>). Pero este informe debe ser considerado como información útil para la toma de decisiones a nivel político, por ejemplo, realizar una planificación adecuada en cada país con el objetivo de generar planes de mitigación y adaptación para minimizar los posibles impactos en todo nuestro país. En el caso de la agricultura, se espera que esta sea resiliente, es decir, sea capaz de adaptarse al cambio climático con el objetivo de prevenir y gestionar el riesgo de desastres asociados, pero adicionalmente esta agricultura debe ser inclusiva, sostenible, baja en emisiones y próspera. A modo de resumen, podemos caracterizar los efectos más notables del cambio climático, según varios autores, son la Pérdida de biodiversidad, Derretimiento de glaciares, Aumento de los fenómenos climáticos extremos (Inundaciones y sequías), Cambios en los patrones de comportamiento plagas, Aumento de las enfermedades, entre algunos.

Para generar una descripción coherente, consistente y plausible, que nos permita contar con una adecuada descripción de lo que podría ocurrir a futuro en el mundo, es necesario contar con escenarios de cambio climático denominados. Los escenarios de cambio climático pueden ser considerados como hipótesis basadas en supuestos de naturaleza científica incluidos los supuestos técnicos y económicos. Desde un punto de vista probabilístico, estos escenarios son una especie de pronósticos de cómo evolucionará el clima del mundo, sin embargo, cada escenario planteado no tiene probabilidades asociadas para ver su factibilidad. Este tipo de modelos se basan en parametrizaciones, una mezcla de modelos matemáticos y estadísticos, que nos permiten modelar los posibles escenarios futuros para ser usados en la toma de decisiones. La figura 7 muestra los escenarios de cambio climático denominados "Trayectorias Socioeconómicas Compartidas (SSP)", los cuales fueron concebidos para generar una descripción coherente, consistente y plausible para una adecuada descripción de lo que podría ocurrir a futuro en el mundo.

En el caso de Chile, a partir del año 2018 es reconocido como uno de los países más vulnerables frente a los impactos del cambio climático, por ello,

esta situación particular de Chile ha sido motivo de preocupación por la comunidad política y científica del país el poder encontrar medidas de mitigación y adaptación que minimicen estos impactos. Por ejemplo, para el caso de Chile, los antecedentes muestran una tendencia en la temperatura del orden de 0,13 °C por década, considerando el período 1961 al 2019. Además, los reportes muestran que en el período 1981-2019, las temperaturas máximas aumentaron, en promedio, 0,20° C en Chile, siendo la zona de Curicó donde se observó el mayor aumento de la temperatura de 0,21°C por década en el mismo período. Como ya lo habíamos mencionado, los modelos globales y las diferentes proyecciones muestran que la Zona Central de Chile es una de las más afectadas en nuestro país, que tiene que ver con los aumentos de la temperatura y disminución de la precipitación. Uno de los problemas, que ya estamos viviendo, es la disminución de la cobertura de nieve por efectos del aumento de las anomalías de temperatura en la zona cordillerana.

En términos muy simples, este aumento de la temperatura desplaza a mayor altura la cota de nieve, lo que llamamos el desplazamiento de la isoterma cero. El efecto de la disminución de la cobertura de nieve en la cordillera reduciría la disponibilidad de agua dulce para consumo humano y para la agricultura. Consecuentemente con las predicciones cualitativas realizadas por distintos autores, el aumento de la temperatura y la disminución de las precipitaciones traería una profundización de la escasez hídrica a futuro, impactando en todos los ecosistemas, tanto naturales como los antrópicos. Este impacto en los ecosistemas, como se ha mencionado en informes del IPCC, conllevaría a la pérdida de biodiversidad. Pese a estos impactos esperados, nuestro país muestra condiciones particulares que lo hacen más resiliente frente al cambio climático que otros países del mundo, sin embargo, es necesario conocer este fenómeno para prepararnos eficientemente para estos cambios: Aumento de las temperaturas, disminución de la precipitación, aumento de los grados-día, disminución de las horas de frío, aumento de la evapotranspiración y con ello las tasas de riego, entre algunos problemas. Más adelante en este documento se discutirán con mayor profundidad todos los contenidos que hemos visto de forma simple y sucinta sobre los fundamentos del cambio climático.

## Referencias

- IPCC, 2022: Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [P.R. Shukla, J. Skea, R. Slade, A. Al Khourdajie, R. van Diemen, D. McCollum, M. Pathak, S. Some, P. Vyas, R. Fradera, M. Belkacemi, A. Hasija, G. Lisboa, S. Luz, J. Malley, (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA. doi: 10.1017/9781009157926.
- IPCC, 2022: Summary for Policymakers. In: Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [P.R. Shukla, J. Skea, R. Slade, A. Al Khourdajie, R. van Diemen, D. McCollum, M. Pathak, S. Some, P. Vyas, R. Fradera, M. Belkacemi, A. Hasija, G. Lisboa, S. Luz, J. Malley, (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA. doi: 10.1017/9781009157926.001.
- M. Pathak, R. Slade, P.R. Shukla, J. Skea, R. Pichs-Madruga, D. Ürges-Vorsatz, 2022: Technical Summary. In: Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [P.R. Shukla, J. Skea, R. Slade, A. Al Khourdajie, R. van Diemen, D. McCollum, M. Pathak, S. Some, P. Vyas, R. Fradera, M. Belkacemi, A. Hasija, G. Lisboa, S. Luz, J. Malley, (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA. doi: 10.1017/9781009157926.002
- Markus Kottek, Jürgen Grieser, Christoph Beck, Bruno Rudolf and Franz Rubel. 2006. World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated. Meteorologische Zeitschrift, Vol. 15, No. 3, 259-263.
- Keywan Riahi, Detlef P. van Vuuren, Elmar Kriegler, Jae Edmonds, Brian C. O'Neill, Shinichiro Fujimori, Nico Bauer, Katherine Calvin, Rob Dellink, Oliver Fricko, Wolfgang Lutz, Alexander Popp, Jesus Crespo Cuaresma, Samir KC, Marian Leimbach, Leiwen Jiang, Tom Kram, Shilpa Rao, Johannes Emmerling, Kristie Ebi, Tomoko Hasegawa, Petr Havlík, Florian Humpenöder, Lara Aleluia Da Silva, Steve Smith, Elke Stehfest, Valentina Bosetti, Jiyong Eom, David Gernaat, Toshihiko Masui, Joeri Rogelj, Jessica Strefler, Laurent Drouet, Volker Krey, Gunnar Luderer, Mathijs Harmsen, Kiyoshi Takahashi, Lavinia Baumstark, Jonathan C. Doelman, Mikiko Kainuma, Zbigniew Klimont, Giacomo Marangoni, Hermann Lotze-Campen, Michael Obersteiner, Andrzej Tabeau, Massimo Tavoni. The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview, Global Environmental Change, Volume 42, Pages 153-168, 2017, ISSN 0959-3780, DOI:10.1016/j.gloenvcha.2016.05.009.



Vista zona costera Constitución, región del Maule.

---

## EVOLUCIÓN EN LA ZONA CENTRAL DE CHILE

Las variaciones climáticas observadas en la Zona Central de Chile (ZC) han estado influenciadas por el cambio climático, y desde 1991 han contribuido a cambiar el comportamiento de las variables meteorológicas promedio, hecho que finalmente volvió obsoletas las medias climáticas del periodo 1961-1990. Por esta razón, la OMM en el año 2015 sugirió a todos sus países miembros actualizar el nuevo normal climatológico al periodo 1981-2010. En la actualidad las normales de todos los países miembros deben ser actualizadas al periodo 1991-2020.

En el Siglo XX, el clima de Chile mostró variaciones importantes en su comportamiento, donde la ZC fue una de ellas. Desde un punto de vista climático, la ZC la podríamos ubicar entre las condiciones oceánicas frías (Corriente de Humboldt) y las continentales de naturaleza más cálida y húmeda. Los cambios observados en las estaciones meteorológicas son aquellos los que discutiremos en este capítulo. Lo anterior indica que los resultados deben ser consideradas como una tendencia, ya que la distribución de las estaciones meteorológicas (EM) no esta en norma con la propuesta de la Organización Meteorológica Mundial (OMM). Sin embargo, y pese a esta dificultad, nos basaremos en información puntual (EM) y modelos numéricos que generan información espacial grillada tanto aquellos desarrollados en Chile como en el extranjero.

Algunas publicaciones han mostrado que la temperatura promedio ha aumentado aproximadamente en torno a 0,5 °C, sin embargo, este incremento no ha sido homogéneo, de hecho, los mayores aumentos se han observado en zonas de más altura, por ejemplo, la Cordillera de Los Andes por sobre los 2.000 m. Específicamente, a lo largo de la costa de la ZC se han observado disminuciones del orden de -0.15 °C/década, mientras que, hacia la Cordillera de Los Andes, un aumento de aproximadamente 0,25 °C/década. Por otra parte, el aumento de la temperatura también modificó las temperaturas mínimas y máximas diarias, pero en las

localidades costeras no ha sido detectado este aumento, probablemente explicable por la corriente de Humboldt, la cual tiene un efecto sobre ellas porque se trata de una corriente oceánica fría. Al parecer este hecho podría ser explicado por el aumento en la intensidad de los vientos del sur a lo largo de la costa, posiblemente derivada de un movimiento hacia el sur del Anticiclón del Pacífico (AP), movimiento de gran escala que ha sido consistente con los estudios realizados en cambio climático.

En el caso de las precipitaciones, ha sido más compleja su evaluación, debido al comportamiento entre años asociado con su variabilidad natural y el efecto del cambio climático. En efecto, en un estudio de la Universidad de Delaware, indicaría que, en la ZC de Chile, en específico de la Región del Maule al sur, presentaría tendencias significativas a la disminución, con valores de aproximadamente 100 mm/década.

### Características de la región del Maule

De toda la Zona Central de Chile, en este libro nos abocaremos a la Región del Maule para realizar una descripción de mucho detalle, primero una descripción espacial del clima y del agroclima, y posteriormente un análisis de la evolución del clima desde los años 70 hasta nuestros días. En términos generales, la Región del Maule forma parte de la Zona Central de Chile, y se encuentra aproximadamente entre los -34° 41' y -36° 33' de latitud, cubriendo en longitud desde la costa hasta el límite con Argentina en la Cordillera de Los Andes, con una superficie total de 30.469,1 km<sup>2</sup>. El régimen térmico se caracteriza por veranos calurosos y secos e inviernos fríos con temperaturas que varían entre una media máxima de 26,9 °C en enero y una mínima media de 3,9 °C en julio.

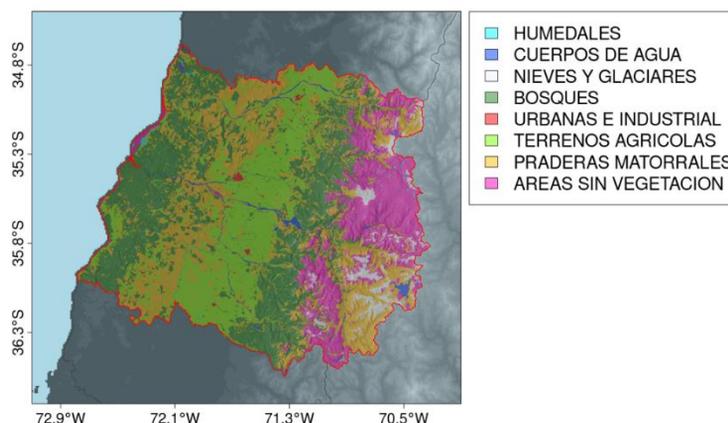


Figura 1.- Cartografía de uso del suelo, Región del Maule, Chile.

Específicamente, los inviernos se caracterizan por ser más bien templados, observándose temperaturas medias de 7 °C en los valles, sin embargo, en cuanto a las temperaturas mínimas, podrían llegar a -5 °C en torno a las ciudades que se encuentran en el valle central de la, como en Talca o Linares. La precipitación varía desde los 700 mm en los valles hasta 2140 mm en la Cordillera de Los Andes, donde la acumulación de nieve es el principal aporte a los afluentes usados para riego en el período estival.

Desde el punto de vista productivo, en la Región del Maule el uso del suelo de tipo agrícola comprende aproximadamente a 710.439,9 ha, lo que equivale al 23,4 % de la superficie total. Los cultivos que ocupan mayor superficie en la cuenca corresponden a los cultivos anuales (cereales, hortalizas) y permanentes (vid y otros frutales). El uso del suelo de tipo urbano en la cuenca es reducido sólo alcanza las 11.768,8 ha equivalentes al 0,4 % de la superficie total, correspondiendo a ciudades, pueblos y zonas industriales (figura 1).

Desde el punto de vista ecológico, la vegetación dominante es una mezcla de bosque nativo de distinto grado de desarrollo y composición, juntamente con plantaciones forestales, con un total aproximado de 795.957,6 ha correspondientes al 26.2 % de territorio. En relación con un transecto costa-cordillera, se observa una estratificación marcada.

En el caso de la Cordillera de la Costa, domina la

estepa de acacia caven y matorral esclerófilo (quillay, litre, boldo y peumo) en los sectores más húmedos. Hacia la precordillera de los Andes, entre los 400 y 600 metros de altura, se encuentra el bosque esclerófilo (maitén, quila, quillay, peumo y boldo). Subiendo en la cordillera de los andes, sobre los 600 metros de altura se encuentran los bosques de Nothofagus, en sectores de mayor humedad, denominado "bosque maulino" (roble maulino, canelo, lingue, olivillo y coigüe). Entre los 800 y 1.000 metros se desarrolla el bosque de Nothofagus asociado con canelo, olivillo y mañío. Sobre los 1.200 metros, se encuentra el bosque de Nothofagus obliqua. Por sobre los 2.000 metros se localizan cedros o cipreses de la cordillera, y por sobre esta altura, aparece la estepa andina de arbustos bajos y gramíneas (BCN, 2010).

Los suelos de la Región del Maule están conformados principalmente por alfisoles, molisoles, vertisoles, inceptisoles y andisoles (CIREN, 2010). De acuerdo con cifras del catastro vegetacional realizado por la Corporación Nacional Forestal (CONAF) durante el año 2007, la superficie regional por tipo de uso es la que se detalla en el cuadro 1. Los resultados de esta clasificación del uso del suelo, en contraste con Mayaux (2000), muestran semejanzas importantes en las estimaciones.

El uso del suelo, normalmente en modelos de simulación meteorológicos, suele ser usado como una capa de información relacionada con el estado de la superficie terrestre.

**Cuadro 1.** - Uso del suelo en la Región del Maule, Chile (hectáreas y porcentaje)

Uso del suelo	Superficie (Ha)	Superficie (%)
Áreas urbanas e industriales	11.678,8	0,4
Terrenos agrícolas	710.439,9	23,4
Praderas y matorrales	820.293,7	27,0
Bosques	795.957,6	26,2
Humedales	8.406,1	0,3
Áreas desprovistas de vegetación	566.198,0	18,7
Nieves y glaciares	65.156,6	2,1
Aguas continentales	28.723,8	0,9
Áreas no reconocidas	28.738,6	0,9
<b>Total</b>	<b>3.035.593,1</b>	<b>100,0</b>

A esta capa de información se le asocian parámetros meteorológicos como el albedo, emisividad, rugosidad, fundamentales para la estimación del balance de energía y flujos turbulentos. En el caso de modelos estadísticos, como el presentado en este capítulo, esta capa de información puede ser usada como un descriptor del estado de la superficie asociado a una variable categórica, pero con fuerte interpretación física (Scire, 2000).

## Climatología de la región del Maule

La zona se caracteriza por poseer un clima templado cálido con estación seca de 4 a 5 meses, denominado por la clasificación climática de Köppen como Csb. Podemos caracterizar a toda la región de Maule como un solo tipo climático, fundamentalmente debido a la fisiografía, en especial los efectos de la Cordillera de la Costa y la Cordillera de Los Andes. El clima genérico de toda la región del Maule es del tipo Csb, el cual es caracterizado por la temperatura y las precipitaciones, las cuales en mayoría son exclusivamente de origen frontal y principalmente centradas en invierno.

Aproximadamente el 72,5% de las precipitaciones se produce entre los meses de mayo a agosto, en cambio entre octubre a marzo hay un período seco entre 4 a 6 meses, donde los eventos de precipitación que pueden ocurrir en este período suelen tener una cierta importancia. También es en el período invernal donde suele acumularse la nieve en cordillera que constituye

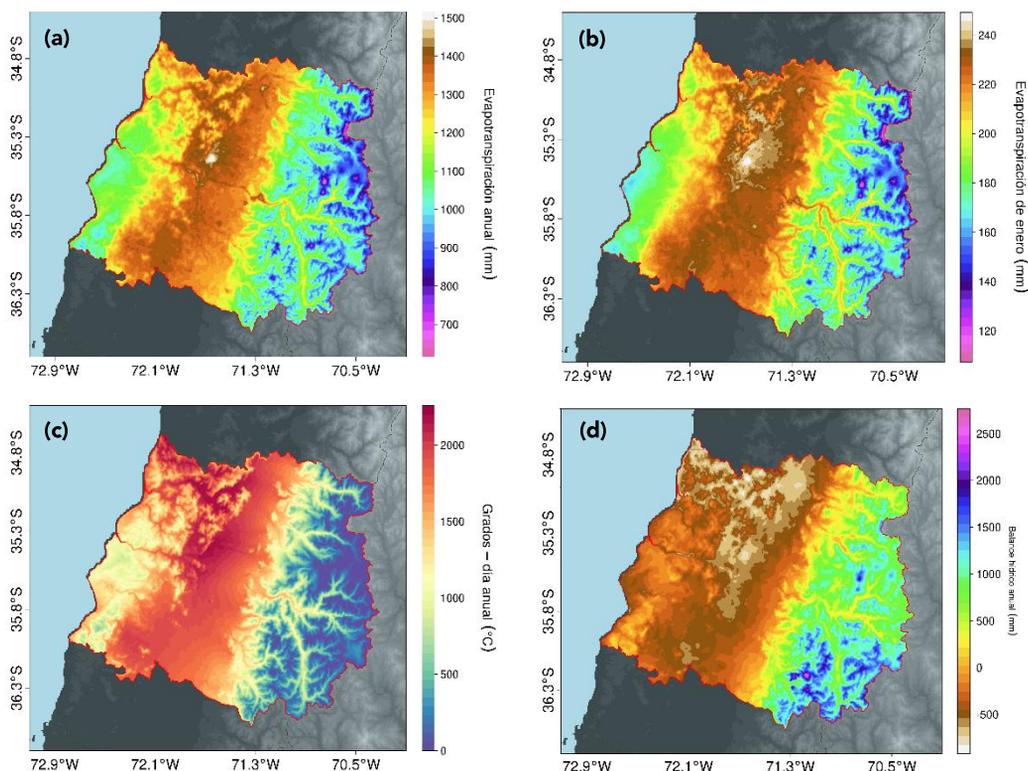
la fuente de agua en el período estival, y con ello, determina el agua aprovechable para el riego.

La precipitación acumulada en un año promedio posee una distribución espacial orientada de oeste a este, siguiendo patrones asociados a la topografía. Los montos anuales de precipitación, que en la costa se encuentran entre los 600 y los 800 mm, como la ciudad de Constitución, pero en el caso de Cauquenes, la precipitación puede aumentar su valor respecto de la costa. En las ciudades de Curicó y Talca, puede tomar valores entre los 600 y 800 mm, con un déficit hídrico en el orden de los 1000 mm. Finalmente en Linares la precipitación media anual es del orden de 1200 mm, con un déficit hídrico de los 850 mm, hacia la cordillera aumenta hasta valores cercanos a los 2.500 mm (Ver figura 2a).

La temperatura media anual varía de norte a sur entre unos 13 °C y 15 °C, pasando por las ciudades de Curicó, Talca y Linares. La temperatura varía aumentando sus valores, desde la costa hasta el inicio de la precordillera, las menores temperaturas se registran en el área costera, pero las mayores temperaturas se registran en la depresión intermedia o valle central.

Para el caso del secano costero, es principalmente la cercanía al océano y la corriente de Humboldt explican esta característica, sin embargo, hacia la Cordillera de Los Andes, la continentalidad, junto con el uso del suelo, serán los determinantes del comportamiento de la temperatura y de la amplitud térmica, tanto a nivel diario como entre el mes más cálido y el mes más frío (Ver figura 2b, 2c, 2d).

La figura 3 muestra los mapas correspondientes a valores medios anuales de (a) Evapotranspiración, (b) grados-Día (en base 10 °C), (c) Horas de Frío (en base 7 °C) y (d) balance Hídrico (precipitación – evapotranspiración). Con relación a los grados-día (GD/año), el secano costero e interior muestran valores de 1494 y 1740 respectivamente, en cambio en la depresión intermedia y precordillera se observan valores de 1734 y 881. La evapotranspiración (mm/año) varía notablemente de costa a cordillera, observándose valores de 1166 y 1288 en el secano correspondientes al secano costero e interior respectivamente, en cambio en la depresión intermedia y precordillera se observan valores de 1302 y 1096,4.



**Figura 2.** - Mapas correspondientes a valores medios anuales de (a) Evapotranspiración, (b) Grados-Día, (c) Horas de Frío y (d) balance Hídrico (Precipitación - Evapotranspiración).

Para la variable de balance hídrico (mm/año), que solo corresponde a la diferencia entre los valores anuales de precipitación y evapotranspiración, se observan valores para el secano costero e interior de -333 y -426 respectivamente, en cambio en la depresión intermedia y precordillera se observan valores de -317,6 y 604,4.

Las figuras 2 y 3 nos muestran que es posible, por la característica fisiográfica mencionada, que sea posible definir diferencias observables en cuanto a precipitación y temperatura, además del aumento de la latitud que se encuentra relacionado con la cantidad de radiación solar. Lo anterior nos permite generar hasta cuatro variaciones del clima establecido por el método de Köppen.

La figura 4 muestra una clasificación climática de la región del Maule y sus posibles variaciones. Los climas que se muestran corresponden a "Templado cálido con lluvias invernales y gran humedad atmosférica o Csbn's" (Correspondiente al secano costero), "Templado cálido con lluvias invernales o Csb" (Secano interior y valle central), "Templado frío con lluvias invernales o Csc" (Precordillera), y "Tundra por efecto de la altura o ETH" (Cordillera de los Andes). Los climas descritos para la Región del Maule corresponden a aquellos que abarcan varias regiones en el sentido latitudinal, los cuales son descritos a continuación:

**Csbn's:** Es un tipo de clima "Templado cálido con lluvias invernales y gran humedad atmosférica", que se encuentra ubicada a lo largo del secano costero. La temperatura media anual es del orden de 13,1 °C, la temperatura media mínima es del orden de 7,4 °C, en cambio la temperatura media máxima del orden de 18,81 °C, donde las amplitudes térmicas durante el año alcanzan valores del orden de los 5 °C, acumulando 1493,4 grados-día anuales en base 10 °C. La precipitación anual posee un valor medio de 833 mm, las cuales se concentran entre abril y noviembre, cifra mayor que la registrada en las regiones precedentes. La estación seca puede durar entre 4 a 5 meses. La evapotranspiración potencial anual es del orden de los 1166,1 mm, lo que genera un balance hídrico anual del orden de los -333 mm. La humedad relativa es alta, característica que le da su principal distintivo.

**Csb:** Corresponde a "Templado cálido con lluvias invernales", ubicado entre el secano interior y el valle central, el cual suele compararse con el tipo Mediterráneo. La precipitación se encuentra concentrada principalmente en los meses de invierno con un valor de 923,6 mm y preferentemente de tipo frontal, posee una evapotranspiración potencial de 1295,4 mm, generando un déficit hídrico del orden de -371,8 mm. El dominio anticiclónico le confiere a este tipo climático una estación seca prolongada, entre 6 a 8 meses. Las temperaturas disminuyen levemente de norte a sur y de mar a cordillera, con valores medio anuales de 13,5 °C, una temperatura media mínima de 7 °C y una media máxima de 20 °C, generando un total de 1736,8 grados-día.

**Csc:** Corresponde a un tipo de clima "Templado frío con lluvias invernales", que se encuentra preferentemente en la zona de Precordillera. La precipitación anual media de toda la franja es de aproximadamente 1700 mm, la cual se concentra preferentemente en invierno, presentando una evapotranspiración potencial de 1096,4 mm, lo que da un balance hídrico de 604,4 mm. La temperatura media anual es de 9,7 °C, una temperatura media mínima de 2,6 °C y una media máxima de 16,8 °C, generando un total de 880,8 grados-día.

**ETH:** Corresponde al tipo climático denominado "Tundra por efecto de la altura", el cual se puede asociar con la Cordillera de los Andes, el cual se desarrolla en la parte más alta de esta. Por la razón anterior la presencia de vegetación es muy escasa a nula ya que esta zona se encuentra con una cobertura nival persistente donde se encuentran glaciares y ventisqueros. Debido a las características presentes en esta altura, la precipitación es preferentemente nival. La temperatura media anual es de 6,2 °C, una temperatura media mínima de del orden de 1 °C y una media máxima de 13,5 °C. Se han observado que esta zona se presentan heladas en primavera, precipitaciones del orden de 1750 mm anuales, y nevazones fuertes en el invierno, fundamentalmente debido a la altura.

La clasificación mesoclimática, asociada con la identificación de zonas homogéneas de producción agrícola, consiste en la división del territorio en áreas más pequeñas con niveles de homogeneidad conocidos y con un potencial de uso específico. Su caracterización esta fundamentalmente basada en aspectos físicos, como son los elementos del clima, sus factores determinantes (Qiyao et al., 1991). Este método se basa en la distancia euclidiana como medida de cuantificación de la similitud o parentesco climático simple, sin embargo, nos permite clasificar en forma automática en grupos homogéneos previamente desconocidos y obtener áreas de manejo agrícola diferenciado por sus respectivas potencialidades.

La figura 4 muestra una segmentación del espacio en zonas mesoclimáticas homogéneas o distritos agroclimáticos en la región del Maule, mediante análisis de conglomerados (cluster) por el método de agrupamiento llamado kmedias (kmeans). Estas fueron calculadas a partir de las variables medias mensuales de Precipitación, Temperatura (máximas, mínimas y medias), Grados-Día y Horas de frío, obtenidos por modelización topoclimática (figura 2 y 3). En la figura 5 se muestran los 32 distritos mesoclimáticos homogéneos o distritos agroclimáticos obtenidos, los cuales establecen la variación espacial de las características agroclimáticas del área de estudio, según la resolución espacial de trabajo.

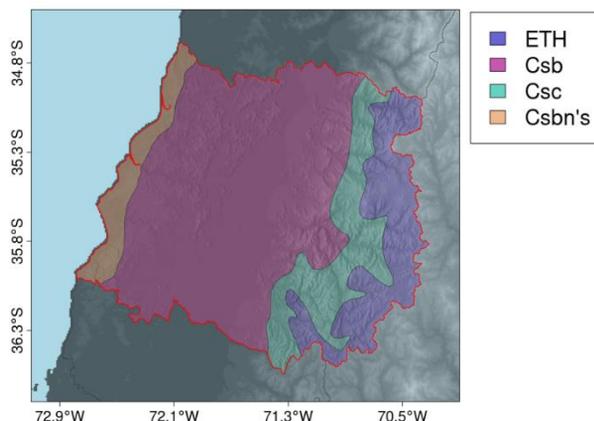


Figura 4.- Clasificación climática de la Región del Maule.

Comparando el conocimiento que poseemos de la región del Maule, podemos observar que en la figura 5 aparece un marcado efecto topográfico, pero además podemos distinguir zonas características, como las zonas costeras, los valles centrales (áreas agrícolas) y distritos que dividen la pre-cordillera y cordillera de los Andes, donde se concentran los bosques de Nothofagus. En la figura 5 cada unidad mesoclimática homogénea posee valores medios asociados de las variables climatológicas con las cuales se construyeron las áreas homogéneas, los cuales son mostradas como una tabla de datos anexa. La principal utilidad de las zonas mesoclimáticas, es

que pueden ser usadas mediante sistemas de información geográficas (GIS) para ser integradas en las aproximaciones al conocimiento de los servicios ecosistémicos en un territorio, pero además porque esta integración es relativamente fácil y se pueden generar resultados satisfactorios en menor tiempo. Esta cartografía que representa las zonas agroclimáticas puede ser usada como una herramienta para la toma de decisiones en agricultura, sobre todo que cada área homogénea representa un potencial agrícola particular, y con ello poder diferenciar las características que la hacen única desde el punto de vista de la producción silvoagropecuaria.

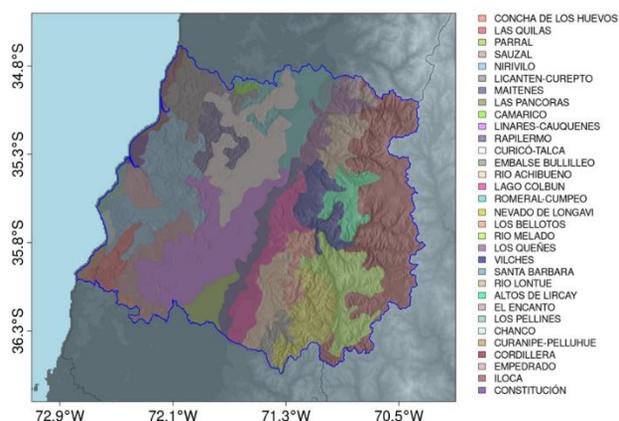


Figura 5.- Segmentación del espacio en zonas mesoclimáticas homogéneas o agroclimas en la Región del Maule, Chile.

## Evolución de las variables climáticas

Si recurrimos a la información periodística actual, los temas más recurrentes son la sequía y el cambio climático, sin embargo, cualquiera podría preguntarse cómo ha evolucionado el clima en la región del Maule desde la década de los 60's hasta la fecha. Muchos informes a nivel internacional han mostrado que el clima de nuestro planeta está cambiando, a tasas nunca antes registradas por la humanidad.

Todos estos cambios en el clima del planeta tienen una expresión a escala regional y local en Chile, en especial en la Zona Central, donde el impacto podría ser el más severo, sobre todo en la agricultura, quien nos provee de los alimentos necesarios. Pero además se han observado otros impactos, como las olas de calor a nivel urbano que provocan efectos en la salud de la población, o las marejadas en el litoral central, las cuales provocan daños importantes en la infraestructura.

Pese a los posibles efectos descritos en la literatura del posible impacto del cambio climático en el sistema económico-social, aún tenemos muchas incertidumbres. En efecto, contamos con aproximadamente 200 años de información climatológica en promedio en el planeta, pero a partir de 1900 ya la tenemos más sistematizada. Además, desde 1948 tenemos información climática grillada a escala horaria, diaria y mensual, sin embargo, esta aún no es suficiente. En efecto, si nos referimos a eventos climáticos de un período de retorno más largo, estamos en ausencia de información, por ejemplo, fenómenos que ocurrieron hace más de 400 años, mediante estudios de los anillos de los árboles, y que poseen una alta probabilidad de volver a manifestarse.

El hecho anterior es la principal razón del porque hay que simular estos fenómenos mediante modelos climáticos, de tal forma de efectuar pronósticos certeros para prevenir cualquier riesgo en el futuro. En el caso de Chile, podemos mencionar que se ha observado una sostenida pérdida de precipitaciones en los últimos 50 años en la Zona Central, lo cual ha quedado expuesto en muchos estudios. Sin embargo, en la Zona Central de Chile los científicos también han comunicado que en la historia reciente han ocurrido varias sequías prolongadas, como las que ocurrieron a

inicios del siglo 20 o en la década de los años 60, sin embargo, no hemos registrado ninguna tan extensa como la llamada Megasequía, la cual que comenzó aproximadamente en el año 2010 y aún sentimos sus efectos. A modo de ejemplo, estudios de los anillos de crecimiento de los árboles encontraron que alrededor de 1775 hubo una sequía importante intensificándose en la década de 1790, mostrando patrones similares a la actual, pero menos extensa en tiempo.

Los antecedentes muestran que la variabilidad climática podría estar cambiando sus patrones temporales y espaciales, principalmente manifestándose en un aumentando los eventos extremos todo el país, volviéndose más frecuentes las sequías, olas de calor, olas de frío, eventos de heladas y marejadas. Durante el siglo 20, la precipitación y la temperatura mostraron cambios importantes, y los algunos casos muy rápidos en comparación con las tendencias históricas.

También fenómenos usuales como la Oscilación del Sur (ENOS) y la Decadal del Pacífico (PDO), que modificaron el comportamiento conocido de El Niño y La Niña. Estas alteraciones provocan cambios en el régimen de precipitaciones y la temperatura, modificando otras variables climatológicas y incidencia en fenómenos naturales. Ha habido evidencias de cambios en los glaciares, retrocesos importantes de hasta 300 m, producto de los cambios observados en el siglo pasado.

Los estudios realizados en Chile muestran que las temperaturas máximas están aumentando en valles interiores y en la precordillera, pero estarían disminuyendo en las zonas costeras. En el caso de las temperaturas mínimas estarían aumentando en todas las zonas, es decir, desde la costa hasta la cordillera. Las precipitaciones muestran una sostenida disminución en los montos pluviométricos, sin embargo, con un patrón espacial desde la costa a cordillera distinto.

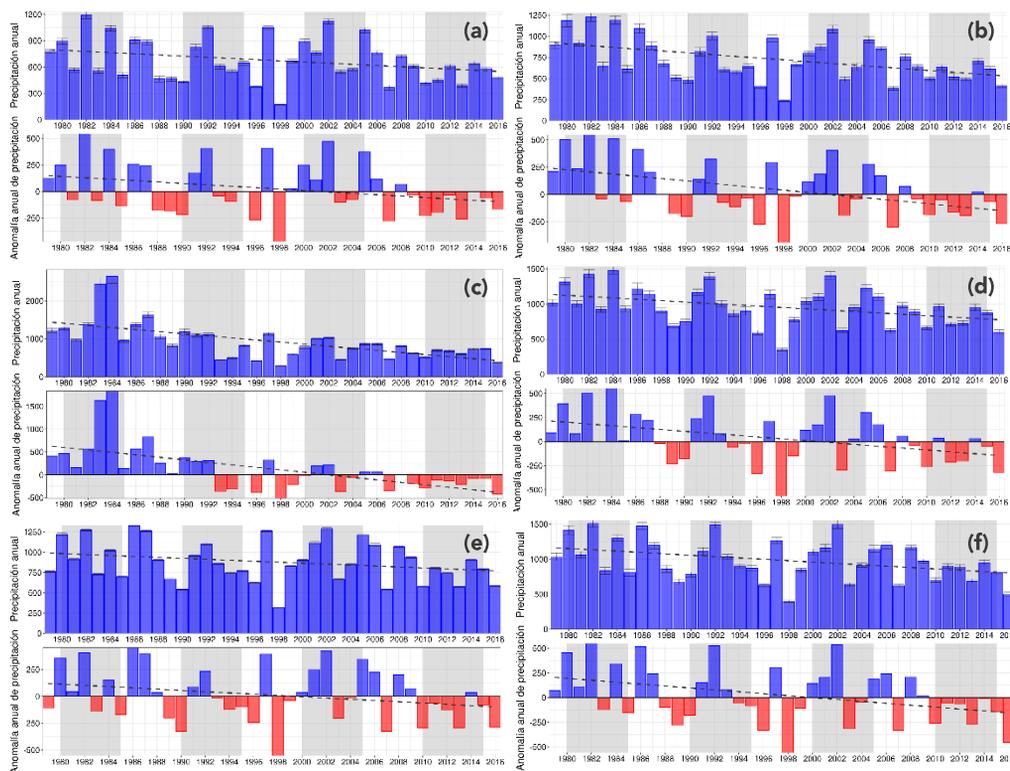
A continuación, se muestra un análisis las tendencias observadas, junto con su variabilidad temporal anual, de las variables climáticas de precipitación y temperatura desde finales de los años 60 hasta el año 2020, obtenidos de la base de datos grilladas del CR2 (<https://www.cr2.cl/datos-productos-grillados/>).

Para realizar una representación gráfica del análisis de la evolución del comportamiento de las variables climáticas y agroclimáticas de precipitación, temperaturas, grados-día, horas de frío, heladas y evapotranspiración, se utilizaron las localidades representativas de la región del Maule: Curicó, Talca, Constitución, Linares, Cauquenes y Parral.

Se analizaron las tendencias de cada una de las variables climatológicas consideradas por separado y a nivel medio anual. Las estaciones meteorológicas representativas fueron seleccionadas debido a que poseen suficientes datos desde el siglo 20 hasta el año 2020.

**Precipitación:** Todos los expertos señalan que en la región del Maule el régimen de precipitaciones podría disminuir, específicamente la frecuencia o número de

lluvias en cada estación del año, sin embargo, la concentración de estas podría presentarse en un breve período de tiempo, con ello aumentando la intensidad de las lluvias. El párrafo anterior es importante, debido a que en el futuro las precipitaciones anuales ocurrirán en solo unos pocos meses, generando posiblemente eventos complejos en algunos años debido a la variabilidad. La figura 6 muestra las tendencias en las precipitaciones anuales y sus anomalías en las localidades de Curicó, Talca, Constitución, Linares, Cauquenes y Parral. Las tendencias de las precipitaciones observadas en todas las estaciones son a la disminución, es decir, tasas negativas acordes con resultados encontrados por otros autores. También se señalan que esta tendencia negativa de las precipitaciones también se encuentra asociada con una disminución del número de días con lluvia, cálculos que no abordamos en este capítulo.



**Figura 6.-** Tendencias en las precipitaciones anuales y sus anomalías en las localidades de (a) Curicó, (b) Talca, (c) Constitución, (d) Linares, (e) Cauquenes y (f) Parral.

El comportamiento de la tendencia de las precipitaciones, desde un punto de vista histórico, podría estar asociada con la dinámica del Anticiclón del Pacífico (AP), el cual actúa como una estructura de bloqueo a las trayectorias de los sistemas frontales hacia la Zona Central de Chile, los cuales transportan desde el sur las precipitaciones. Estudios muestran que en las últimas cuatro décadas se muestra un desplazamiento hacia el sur del Centro del Anticiclón del Pacífico (CAP), generando que la cuña anticiclónica (Dorsal) que transita durante el año de norte a sur dividiendo al país en dos zonas perfectamente identificables.

El punto donde la dorsal toca a la costa chilena se denomina Lugar de Presión Máxima en Chile o LPM (Saavedra y Foppiano, 1992) y teóricamente es quien divide al país en zonas de buen tiempo (Norte del LPM) y mal tiempo (Sur del LPM). El hecho anterior explicaría el número decreciente de sistemas frontales que no logran llegar a la Zona Central o no poseen la capacidad de generar precipitaciones en esta zona de Chile. Esta característica ha sido observada por muchos autores, y es una explicación posible de este fenómeno, como lo había señalado Saavedra y Foppiano (1992). Morales (2017) muestra en un artículo de divulgación el desplazamiento del CAP hacia el sur durante el invierno mostrando los promedios de 1948-1960, 1961-1980, 1981-2000 y 2000-2016, que refuerza la idea del efecto del AP sobre el clima de la Región del Maule.

En relación con la tendencia media observada de la precipitación entre los años 1979 al 2006, en todas las estaciones se observa una tendencia a la disminución. Curicó muestra una tendencia de  $-6,67$  mm/año, donde los valores mínimos y máximos fueron del orden de 173 y 1192 mm respectivamente, con una variabilidad del 36% entre los años. En el caso de Talca, esta estación muestra una tendencia de  $-10,48$  mm/año, donde los valores mínimos y máximos fueron del orden de 236 y 1226 mm respectivamente, con una variabilidad interanual del 34%. En Constitución se observa una tendencia de  $-27,3$  mm/año, donde los valores mínimos y máximos fueron del orden de 289 y 2645 mm respectivamente, con una variabilidad interanual del 54%. Para Linares, observamos una tendencia de  $-9,68$  mm/año, donde los valores

mínimos y máximos fueron del orden de 352 y 1474 mm respectivamente, con una variabilidad interanual del 27%. En el caso de Cauquenes, observamos una tendencia de  $-5,9$  mm/año, donde los valores mínimos y máximos fueron del orden de 315 y 1326 mm respectivamente, con una variabilidad interanual del 29%. Finalmente, Parral, muestra una tendencia de  $-9,72$  mm/año, donde los valores mínimos y máximos fueron del orden de 398 y 1506 mm respectivamente, con una variabilidad del 29% entre los años.

**Temperaturas:** La figura 7 muestra las tendencias en las temperaturas máxima, media y mínima anuales en las localidades de (a)Curicó, (b)Talca, (c)Constitución, (d)Linares, (e)Cauquenes y (f)Parral. Estudios realizados muestran que las temperaturas máximas de enero en las zonas costeras presentan una leve tendencia, como es el caso de Constitución, sin embargo, hacia las zonas interiores y valles es posible observar una tendencia al alza más apreciable, como es el caso de Curicó, Talca, Linares, Cauquenes y Parral. También, producto del aumento sostenido de las temperaturas, es posible concluir que también han experimentado un aumento a las olas de calor, que corresponde a tres días consecutivos o más con una temperatura máxima por sobre el percentil 90 de la serie de tiempo. Para el caso de la región del Maule, el valle central es una zona con mayores probabilidades de ocurrencias de olas de calor, las cuales son una amenaza para la salud humana y la agricultura, las cuales se encuentran asociadas con los golpes de calor en frutales.

Curicó muestra una tendencia al alza en el período en las temperaturas máxima, promedio y mínima de 0,03, 0,02 y 0,02 °C/año, con una variabilidad interanual porcentual del 2,6, 3,3 y 7,0, respectivamente. Para el caso de Talca, esta muestra una tendencia al alza en el período en las temperaturas máxima, promedio y mínima de 0,014, 0,008 y 0,008 °C/año, con una variabilidad interanual porcentual del 3,0, 3,0 y 6,4, respectivamente. Constitución mostró una tendencia al alza en el período en las temperaturas máxima, promedio y mínima de 0,0085, 0,0104 y 0,0172 °C/año, con una variabilidad interanual porcentual del 2,8, 3,6 y 7,1, respectivamente. Hacia el sur de la región se observan las mismas tendencias al alza.

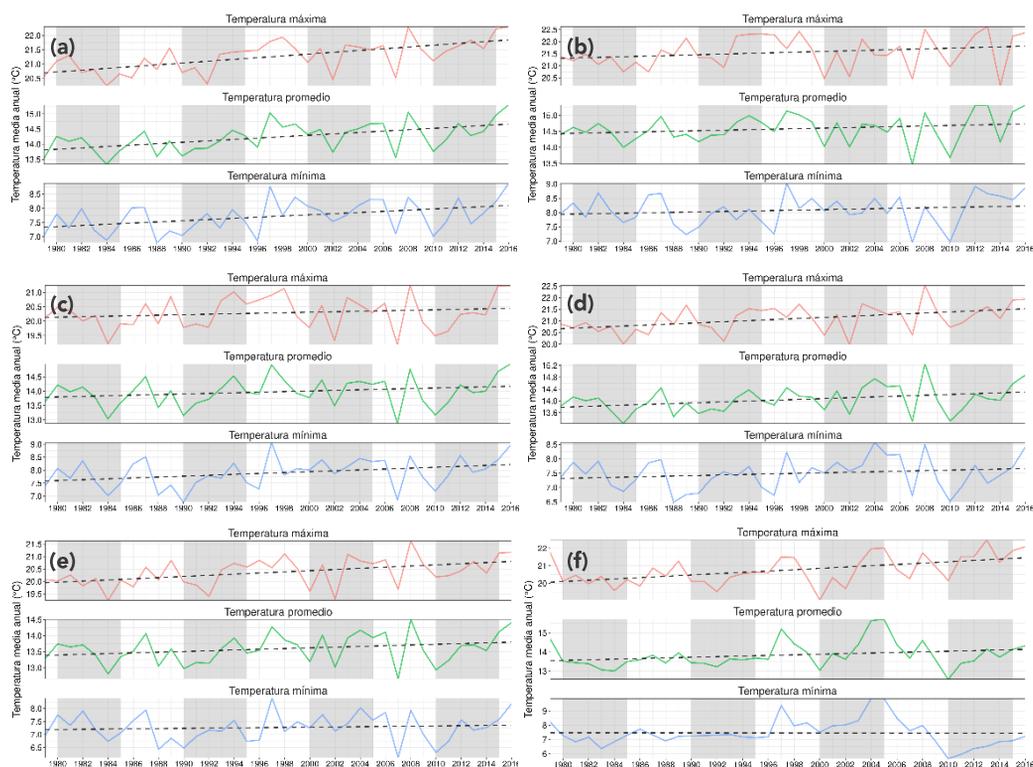
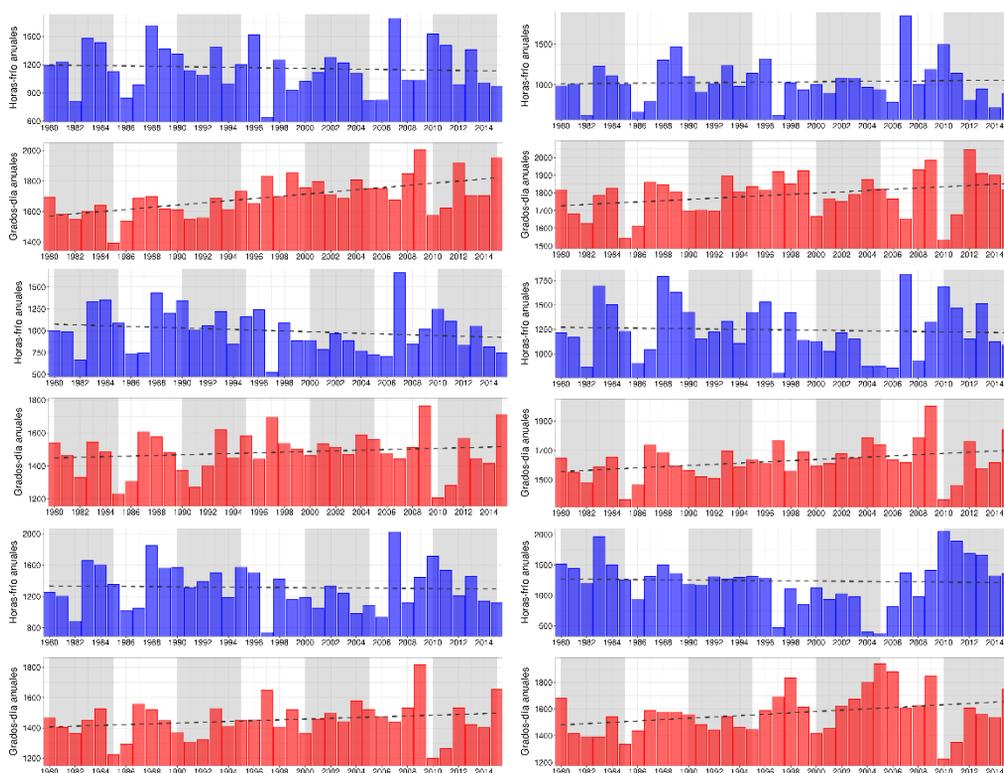


Figura 7.- Tendencias en las temperaturas máxima, media y mínima anuales en las localidades de (a)Curicó, (b)Talca, (c)Constitución,(d)Linares,(e)Cauquenesy(f)Parral.

## Índices térmicos

**Grados-Día:** Los grados-día (GD) corresponden a un estimador cuantitativo de la acumulación de calor en una localidad, tradicionalmente calculada a partir de un umbral térmico que depende de la especie considerada. Como ejemplo, para cultivos templados se utiliza un umbral de 10 °C, en cambio para cereales se utiliza un umbral de 5 °C, y finalmente, para praderas es posible usar un umbral de 0 °C. Este índice, GD, permite estimar los requerimientos de acumulación de calor para especies vegetales, de tal forma que al acumular un valor mínimo poder terminar su ciclo vegetativo. En el caso de considerar un umbral térmico de 10 °C, la región del Maule presenta un comportamiento de GD asociados a la estructura climática espacial (Zonas Climáticas) mostrada en la figura 4. En el caso de la franja litoral (Csbn's) la acumulación térmica es del orden de los 1000 GD, en

cambio hacia el interior (Csb), sus valores en promedio están en el orden de 1200 a 1600 GD, sin embargo, se pueden apreciar núcleos de mayor acumulación de calor, por ejemplo, en Talca y Cauquenes donde pueden superarse los 1500 GD. Hacia precordillera los GD disminuyen por efecto de la altura, con valores de GD muy similares a la zona costera, superando este valor en algunos valles. En el sector cordillerano los GD son bajos a muy bajos, en relación con precordillera y zonas costeras. En general, podemos decir que algunos sectores de precordillera y costa podrían presentar algunas limitaciones para algunos cultivos que necesitan un mayor requerimiento térmico acumulado en el período de desarrollo. Hacia la vertiente oriental (secano interior) y valle central los cultivos no presentan limitaciones de acumulación térmica para su lograr su madurez, sin embargo, es conveniente seleccionar las variedades apropiadas, ya que en esta zona aparecen otros inconvenientes, como las heladas.



**Figura 8.-** Tendencias en la acumulación térmica o grados-día (Base 10°C) para el período agosto-abril, y el número de horas de frío (Base 7 °C) en el período mayo-septiembre, en las localidades de (a)Curicó, (b)Talca, (c)Constitución, (d)Linares, (e)Cauquenes y (f)Parral.

Finalmente, en la zona precordillerana también se presentan limitaciones, sobre todo hacia la precordillera media hacia arriba, donde podría haber carencia de acumulación térmica para la maduración en frutales. Generalmente, GD inferiores a 800 podrían en sinergia con otros factores limitar en forma

importante el proceso y termino de maduración en frutales. La figura 8 muestra las tendencias en la acumulación térmica o grados-día (Base 10°C) para el período agosto-abril, en las localidades de (a)Curicó, (b)Talca, (c)Constitución, (d)Linares, (e)Cauquenes y (f)Parral.

**Cuadro 2.-** Valores máximos (GD), medios (GD), mínimos (GD), coeficiente de variación (%) y tendencia (GD/Año) totales anuales, para la serie de tiempo de grados-día correspondiente a los años 1979 al 2016.

Localidad	Máximo	Medio	Mínimo	CV (%)	Tendencia
Curicó	2.002,23	1.695,72	1.393,00	7,41	7.168
Talca	2.046,50	1.790,32	1.534,81	6,62	3.597
Constitución	1.764,23	1.483,01	1.206,14	8,68	1.951
Linares	2.002,41	1.628,36	1.363,69	7,86	4.111
Cauquenes	1.815,70	1.452,05	1.200,74	8,43	2.581
Parral	1.937,39	1.568,69	1.224,43	10,39	5.047

**Horas de Frío:** Las Horas de Frío (HF), una variable agroclimática derivada, corresponden a un estimador de los requerimientos de vernalización, o el período de frío por el que deben pasar los vegetales para comenzar y cumplir su ciclo de vida. La literatura muestra que el umbral térmico de 7 °C es aquel que puede ser considerado para estimar el número de horas que un vegetal ha pasado bajo este valor de temperatura para cumplir con sus requerimientos fisiológicos durante el receso vegetativo. Por ejemplo, es importante mencionar que una especie frutal que no cumpla con los requerimientos mínimos de acumulación de frío durante su receso podría mostrar una producción deficiente, en términos de rendimiento, y también irregular en términos de calidad.

La Región del Maule presenta un comportamiento muy asociado con su clima, esto es, se caracteriza por un gradiente de mar a cordillera y las modificaciones

topográficas respectivas. En el caso de la franja costera, en ella se observan HF relativamente bajas, entre 300 y 500 horas, que para algunas especies están muy por debajo de los requerimientos mínimos. En cambio, en el secano interior y valle central, las HF varían entre 700 a 1500 horas, hecho que asegura una producción frutal, ya que estos valores son los necesarios para cumplir con los requerimientos fisiológicos de algunos frutales. Separando el secano interior, es posible encontrar valores entre valores de HF entre 700 a 1100 horas, pero hacia el valle e inicio de precordillera, este valor podría subir de 1200 a 1800 horas. En precordillera las HF pueden alcanzar valores entre 1700 a 1900 horas, y hacia la cordillera estos valores podrían superar las 2300 horas. La Figura 8 muestra también las tendencias en el número de horas de frío (Base 7 °C) en el período mayo-septiembre, en las localidades de (a)Curicó, (b)Talca, (c)Constitución, (d)Linares, (e)Cauquenes y (f)Parral.

**Cuadro 3.-** Valores máximos (GD), medios (GD), mínimos (GD), coeficiente de variación (%) y tendencia (GD/Año) totales anuales, para la serie de tiempo de grados-día correspondiente a los años 1979 al 2016.

Localidad	Máximo	Medio	Mínimo	CV (%)	Tendencia
Curicó	1.690,60	1.164,30	641,44	21,37	-1.837
Talca	1.845,94	1.034,75	620,29	24,18	1.254
Constitución	1.663,88	998,87	521,45	25,05	-4.362
Linares	1.814,18	1.244,55	802,95	22,53	-1.620
Cauquenes	2.023,76	1.315,10	739,30	21,39	-1.135
Parral	2.056,22	1.240,85	378,38	30,80	-1.643

**Heladas:** Las heladas, en cuanto a frecuencia e intensidad, se encuentran asociadas con el comportamiento de las temperaturas mínimas. Se ha observado que el régimen de heladas estaría modificándose respecto del período climático anterior, 1961-1990. Estudios realizados anteriormente indicarían que la frecuencia o el número de heladas anuales estaría disminuyendo en las zonas interiores, como valles y precordillera, sin embargo, en las zonas costeras, de influencia marina, no es tan evidente o se observaría un leve aumento de ellas. Algunos autores señalan que este fenómeno costero se podría deber a la dinámica del AP, el cual al moverse hacia el sur podría transportar aire frío polar. En cambio, hacia el interior de la región, estaría más influenciado por el

efecto anticiclónico de condiciones de buen tiempo, efecto que afectaría el número de heladas anuales, con una tendencia hacia la disminución. La evolución de las heladas desde finales de 1970 hasta 2016, donde se observa una gran variabilidad temporal de este fenómeno en cada lugar considerado. La figura 9 muestra la evolución en la probabilidad de heladas y el número de heladas anuales (Tempranas y tardías) en las localidades de (a)Curicó, (b)Talca, (c)Constitución, (d)Linares, (e)Cauquenes y (f)Parral. La probabilidad de heladas ha ido disminuyendo con una tendencia muy leve, al igual que el número de heladas, mostrándose la diferencia entre heladas tempranas (Azul) y tardías (Verde).

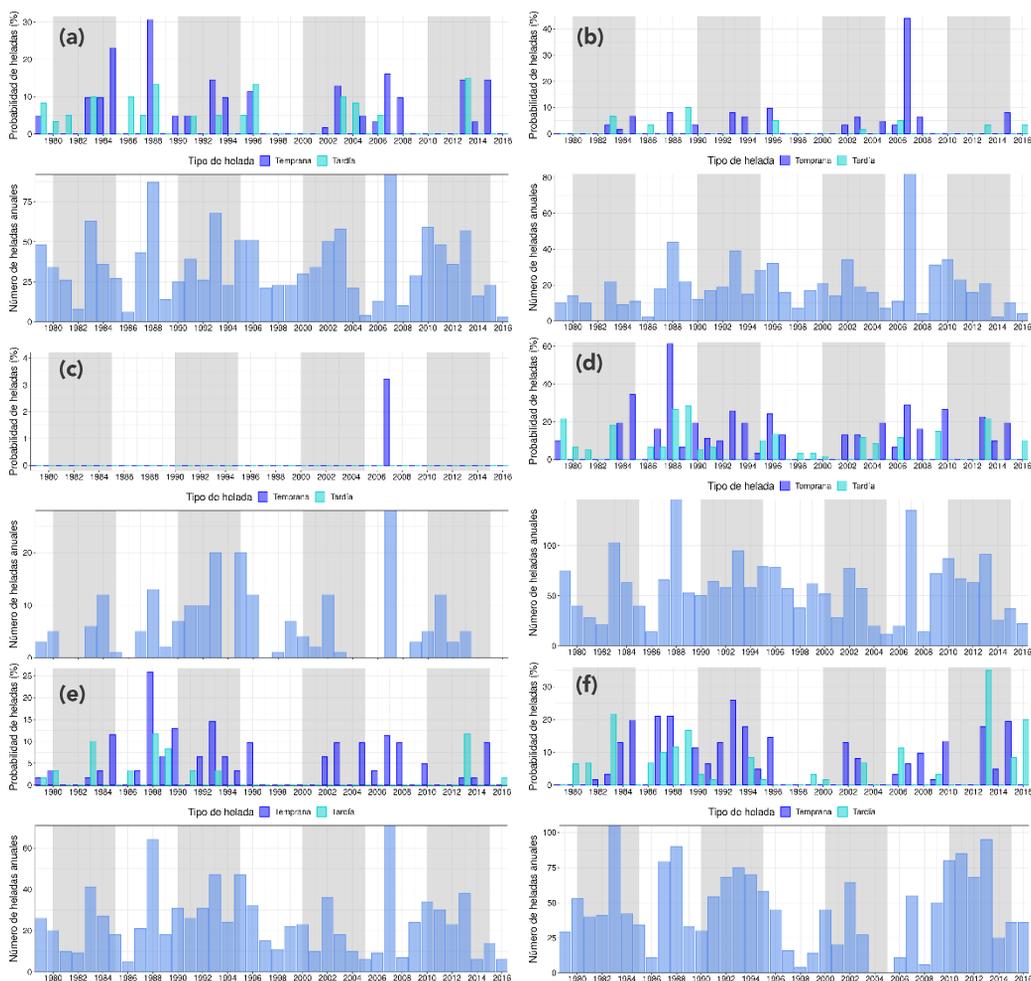


Figura 9.- Evolución en la probabilidad de heladas y el número de heladas anuales (tempranas y tardías) en las localidades de (a)Curicó, (b)Talca, (c)Constitución, (d)Linares, (e)Cauquenes y (f)Parral.

Cuadro 4.- Valores del número de heladas máximo, medio, mínimo, coeficiente de variación (%) y tendencia (heladas/Año) totales anuales, para la serie de tiempo correspondiente a los años 1979 al 2016.

Localidad	Máximo	Medio	Mínimo	CV (%)	Tendencia
Curicó	92,00	34,87	3,00	62,18	-0,118
Talca	82,00	18,76	0,00	79,23	0,162
Constitución	28,00	5,50	0,00	122,06	-0,043
Linares	146,00	57,05	12,00	55,34	-0,229
Cauquenes	71,00	23,95	5,00	64,98	-0,129
Parral	105,00	44,58	0,00	62,97	-0,199

## Evapotranspiración:

La evapotranspiración (ET) es una variable importante, ya que, debido a que engloba las pérdidas de agua hacia la atmósfera mediante la transpiración de los cultivos y la evaporación desde el suelo. La ET del cultivo de referencia (ET<sub>o</sub>) es la variable básica usada para conocer los requerimientos de agua de un cultivo y así diseñar una adecuada planificación del riego. Una forma simple de estimar la ET del cultivo (llamada también real o actual) es mediante el uso de los coeficientes de cultivo (K<sub>c</sub>). Específicamente,  $ET_c = K_c \cdot ET_o$ , coeficientes que dependen del estado de desarrollo del cultivo (Estado fenológico). Los K<sub>c</sub> pueden ser obtenidos a partir de tablas publicadas en diversos libros e informes, tanto a nivel internacional como a nivel nacional (FAO56, 2006). En términos

generales, la ET depende de la radiación solar, humedad relativa y velocidad del viento que determinan el régimen espacial de esta variable. En la franja costera la ET bordea los 800 mm, en cambio hacia el secano interior esta aumenta hasta unos 1150 mm anuales en el entorno de Cauquenes, principalmente por el aumento de la radiación solar producto de la disminución de la nubosidad y la influencia marina. En el valle central los valores de la ET bordean en promedio los 1000 mm, disminuyendo hacia precordillera. Hacia la cordillera la ET aumenta, fundamentalmente por la disminución de la humedad relativa y el aumento de la velocidad del viento. La figura 10 muestra las tendencias en la evapotranspiración de referencia (mm/año) anual acumulada para el período mayo-abril, en las localidades de (a)Curicó, (b)Talca, (c)Constitución, (d)Linares, (e)Cauquenes y (f)Parral.

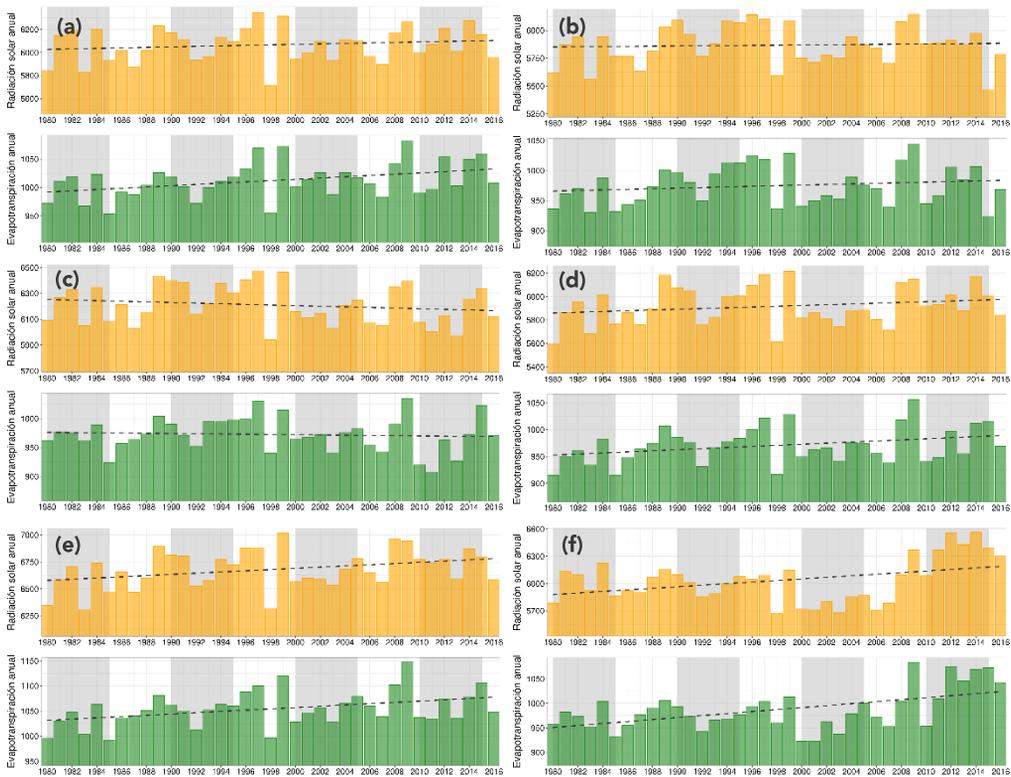


Figura 10.- Tendencias la evapotranspiración de referencia (mm/año) acumulada para el período mayo-abril, en las localidades de (a)Curicó, (b)Talca, (c)Constitución, (d)Linares, (e)Cauquenes y (f)Parral.

**Cuadro 5.-** Valores máximos (mm/año), medios (mm/año), mínimos (mm/año), coeficiente de variación (%) y tendencia (mm/año) totales anuales, para la serie de tiempo de evapotranspiración de referencia correspondiente a los años 1979 al 2016.

Localidad	Máximo	Medio	Mínimo	CV (%)	Tendencia
Curicó	1082,61	1012,25	953,29	3,08	1,127
Talca	1044,29	974,87	923,73	3,32	0,499
Constitución	1033,92	972,47	907,79	3,04	-0,205
Linares	1056,29	970,80	915,23	3,44	1,014
Cauquenes	1147,22	1054,40	991,33	3,27	1,286
Parral	1084,06	987,26	923,06	4,28	2,029

## Referencias

- Allen, R. G., L. S. Pereira, D. Raes, and M. Smith. 2006. Evapotranspiración del cultivo. Estudio FAO Riego Y Drenaje Boletín 56. FAO. Roma. ISBN 92-5-304219-2.
- Biblioteca del Congreso Nacional BCN. 2010. Sistema integrado de información Territorial (SIIT); Región del Maule (<http://www.bcn.cl/siit/regiones/region7/region.htm>).
- CIREN. 2010. Determinación de la erosión actual y potencial en los suelos de Chile: Región del Maule, Síntesis de resultados (<http://bibliotecadigital.ciren.cl/gsdlexterna/collect/bdirenci/index/assoc/HASH01a3.dir/PC14710.pdf>).
- CONAF-CONAMA-BIRF. 1999. Catastro y Evaluación de Recursos Vegetacionales Nativos de Chile ([http://otros.conaf.cl/cd\\_uso\\_suelos/reg07.pdf](http://otros.conaf.cl/cd_uso_suelos/reg07.pdf)).
- INIA. 2011. Especial Cambio Climático. Revista Tierra Adentro, Número 93.
- INIA. 2017. Cambio Climático: Amenazas y oportunidades que surgen al ampliarse hacia el sur la frontera frutícola del país. Revista Campo & Tecnología, Año 2, Número 4.
- Mayaux P., Strahler A., Eva H., Herold M., Shefali A., Naumov S., Dorado A., Di Bella C., Johansson D., Ordoyne C., Kopin I., Boschetti L. and Belward. A. (2006) Validation of the Global Land Cover 2000 Map (2006). IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 44: 1728-1739.
- Morales Luis, Canessa Fabricio, Mattar Cristian, Orrego Raúl y Matus Francisco. 2006. characterization and edaphic and climatic zonation in the region of Coquimbo, Chile. Revista Chilena Ciencia del Suelo y Nutrición Vegetal, Vol 6(3), pp. 52-74.
- Morales, Luis. 2017. Variabilidad Climática Interanual: Algunos comentarios sobre su comportamiento en Chile. Número especial Revista Campo & Tecnología, "Cambio Climático: Amenazas y oportunidades que surgen al ampliarse hacia el sur la frontera frutícola del país". Revista Campo & Tecnología, Año 2, Número 4.
- Qiyao, L., Jingming, Y., Baopu, F. 1991. A method of agrotopoclimatic division and its practice in China. International Journal of Climatology. 11: 86-96.
- Saavedra N. y A. J. Foppiano. 1992. Monthly mean pressure model for Chile. Int. Journal of Climatology, Vol. 12, páginas 469-480.
- Santibañez Quezada. (2014). Atlas del cambio climático en las zonas de régimen árido y semiárido : regiones de Coquimbo, Valparaíso y Metropolitana (Chile). Universidad de Chile, Centro de Agricultura y Medio Ambiente.
- Scire J.S., F.R. Robe, M. E. Ferneau, and R.J. Yamartino, 2000. A User's Guide for the CALMET Meteorological Model. Earth Tech Inc.



Carrete de riego, Corralones San Clemente

---

## PROYECCIONES DEL CAMBIO CLIMÁTICO

Actualmente los escenarios climatológicos para la evaluación de los impactos del cambio climático en diferentes subsistemas en la humanidad se encuentran disponibles en baja resolución, esto es resoluciones espaciales de cálculo que van entre los 250 y 10 km, sin embargo, los más comunes son del orden de los 20 km. Estos datos son proporcionados por las salidas numéricas de los llamados GCM (Modelos de Circulación General) o también conocidos como Modelos Climáticos Globales. Pese a lo anterior, hay varios centros de investigación en ciencias atmosféricas que mediante algoritmos numéricos de bajada de escala (Downscaling) han logrado estimar para todo el planeta los diferentes escenarios de cambio climático a una resolución espacial de 1km, es decir, un dato de las variables climáticas cada 1000 metros en un grillado de nivel mundial en coordenadas geográficas (WGS84). Este tamaño de grilla espacial es sorprendente, ya que consta de una matriz numérica (Imagen) de 43.200 columnas por 21.600 filas, que corresponden una matriz con 933.120.000 elementos o píxeles (Ramirez y Jarvis, 2010; Navarro-Racines et al., 2020).

Algunos autores piensan que no es recomendable alterar la resolución de cálculo de los GCM para no alterar las incertidumbres propias de los modelos generando sesgos en estimaciones a partir de ellos. Sin embargo, para aplicaciones concretas, como evaluar los impactos del cambio climático en la agricultura es necesario mejorar esta resolución original, llevando el tamaño de las matrices de salida de los GCM a una resolución más alta. El hecho fundamental radica en que la resolución espacial original de los GCM no es práctica en evaluaciones en agricultura, especialmente en condiciones topográficas denominadas complejas, como es el caso de la región del Maule, donde los topoclimas varían significativamente en distancias relativamente pequeñas (Morales 1997; Morales et al., 2006; Hijmans et al., 2005). En este capítulo mostraremos los resultados de una bajada de escala de los resultados entregados por los modelos GCM para los diferentes escenarios climáticos propuestos por el IPCC en todo

el mundo, pero a una resolución espacial de 250 m para la región del Maule.

### Escenarios de cambio climático

Desde la creación del IPCC, este organismo ha preparado para la evaluación del cambio climático una serie de documentos técnicos que les permite a los especialistas y políticos contar con la información suficiente para generar una determinada toma de decisiones en la implementación de planes de mitigación y adaptación en cada país. Estos informes contienen una recopilación del conocimiento científico-técnico disponible en informes y publicaciones científicas sobre el cambio climático y su posible evolución, junto a escenarios climáticos basados en hipótesis científicas de consenso a nivel mundial. La última entrega realizada por el IPCC corresponde al Sexto Informe de Evaluación, publicada el 28 de febrero de 2022. Este informe del IPCC se basó en 34 mil estudios tanto científicos como técnicos, e involucró a 270 autores de 67 países, del cual comentaremos en esta parte del presente capítulo.

Las conclusiones de este informe no son muy alentadoras, además informa a la opinión pública que estamos en el preciso momento de tomar acciones para frenar el cambio climático. Si ese calentamiento fuese de 2,0°C, las proyecciones señalan que el aumento del nivel del mar se situaría entre los 2 y los 6 metros. En efecto, este informe señala que, si la temperatura continúa creciendo a las tasas actuales en el futuro cercano (próximos 100 años) superaremos los límites de aumento de temperatura de 1,5 a 2,0 °C, uno de los objetivos planteados en el Acuerdo de París firmado en 2015. Además, los efectos secundarios como elevación del nivel del mar, eventos extremos como sequías e inundaciones, ocasionaran graves efectos en el sistema humano. Adicionalmente, el estudio señala la irreversibilidad de este cambio climático, es decir, estará con nosotros por siglos o milenios, antes de volver a retroceder.

Producto de la preocupación global a nivel político y científico sobre el cambio climático, el IPCC ha promovido el proporcionar escenarios de los posibles cambios para ser considerados en la toma de decisiones por los países. Los escenarios actuales son conocidos como “trayectorias socioeconómicas compartidas” o SSP, por sus siglas en inglés (Shared Socioeconomic Pathways).

Estas propuestas prospectivas, pueden ser considerados como escenarios de cambios socioeconómicos globales proyectados hasta el año 2100. Los SSP pueden ser considerados como propuestas descriptivas sobre la base de distintas hipótesis consideradas para los desarrollos socioeconómicos alternativos por el mundo. Estas descripciones temporales son una descripción lógica, de naturaleza cualitativa y cuantitativa, que nos sugieren una posible trayectoria de evolución a futuro para una decisión adoptada.

Globalmente, consideramos a los elementos cuantitativos como la fuente de información derivada de las bases de datos acumuladas por cada país, en términos de información poblacional, económica y ambiental (Climática, por ejemplo). Por lo tanto, los SSP se nutren de toda esta información y alimentan diferentes modelos que permiten generar evaluaciones para conocer los posibles caminos futuros. Los escenarios propuestos por el IPCC son:

**SSP1 (1.9 Sustentabilidad):** Este escenario se basa en supuestos de bajo crecimiento de la población, alto crecimiento económico, altos niveles de educación, gobernabilidad, una sociedad globalizada, cooperación internacional, desarrollo tecnológico y conciencia ambiental. Este escenario implicaría la neutralidad de carbono para el año 2050, por lo que la temperatura del planeta en el 2100 sería de 1,5 °C.

**SSP2 (2.6 Medio):** Este corresponde a un escenario intermedio, y se basa en los supuestos que dieron origen a SSP1 y la SSP3. Este escenario implicaría que la neutralidad del carbono sería después de 2050, por ello la temperatura global en el año 2100 sería de 2,0 °C.

**SSP3 (4.5 Fragmentación):** Este escenario se considera un alto crecimiento poblacional, bajo desarrollo económico, niveles bajos de educación, y

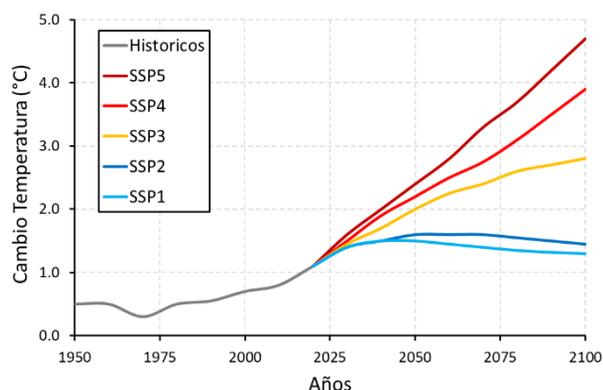
una sociedad fragmentada y poca conciencia ambiental. Los países no logran sus metas voluntarias de emisiones, propuestas en el acuerdo de París para el año 2030, ya que solo algunos países se comprometen a la neutralidad de carbono para 2050, por lo que se espera un calentamiento de entre 2.7 y 3,4 °C.

**SSP4 (7.0 Desigualdad):** Se considera este caso cuando los beneficios del desarrollo tecnológico no logran alcanzar a toda la población, representa un alto nivel para la adaptación. Se generaría un calentamiento del orden de 3,8 °C para el año 2100, fundamentalmente por el estancamiento de las políticas ambientales.

**SSP5 (8.5 Alta dependencia):** En este escenario la sociedad posee un bajo crecimiento en la población, un elevado crecimiento económico y un alto desarrollo humano, sin embargo, una muy alta dependencia de los combustibles fósiles. Se produciría un calentamiento de hasta 5,0 °C para el año 2100, también debido al estancamiento de las políticas ambientales.

La figura 1 muestra los escenarios de cambio climático denominados “Trayectorias Socio - económicas Compartidas (SSP)” para el posible incremento de la temperatura hasta el año 2100 en el planeta. Estos escenarios fueron concebidos para generar una descripción coherente, consistente y plausible para entregar a los tomadores de decisiones una adecuada descripción de lo que podría ocurrir a futuro en el mundo.

En relación con el sexto informe del IPCC, entre sus principales conclusiones, tenemos que al año 2100, los eventos de calor o también llamadas olas de calor se incrementarían en la zona central de Chile, por ejemplo, los eventos asociados con temperaturas extremas podrían tener una probabilidad de ocurrencia nueve veces superior comparada con la actualidad. En cambio, los eventos extremos asociados con las precipitaciones también se incrementarían, donde podrían aumentar en un 400% los eventos de sequía y en un 300% los eventos de lluvias extremas. Según los expertos, los eventos extremos de precipitaciones serían más cortos pero intensos, en cambio las sequías serían más prolongadas e intensas.



**Figura 1.-** Los escenarios de cambio climático denominados "Trayectorias Socioeconómicas Compartidas (SSP)" para el posible incremento de la temperatura hasta el año 2100 en el planeta.

En el caso de las temperaturas, con un 90-100% de probabilidad, podríamos extrapolar que podría observarse un aumento de las temperaturas, sin embargo, se distribuirá territorialmente de forma no uniforme, hecho que queda expresado al realizar un cambio de escala en los diferentes escenarios de cambio climático. De hecho, según el escenario considerado (SSP1-SSP5), este aumento en las temperaturas media podría ubicarse entre 2,0 y 5,0 °C, aproximadamente. Considerar un escenario en particular como plausible en un país depende única y exclusivamente de los tomadores de decisiones para realizar planes de mitigación y adaptación respectivos. Para el nivel de los océanos, el informe señala que es muy probable que siga aumentando, y con ello afectando más seriamente las zonas costeras, como son las marejadas y las inundaciones. En el caso de la temperatura en las zonas costeras, las cuales están reguladas por las corrientes marinas, también se espera, con un nivel de incertidumbre bajo, un incremento de las olas de calor.

## Evolución de las variables climáticas

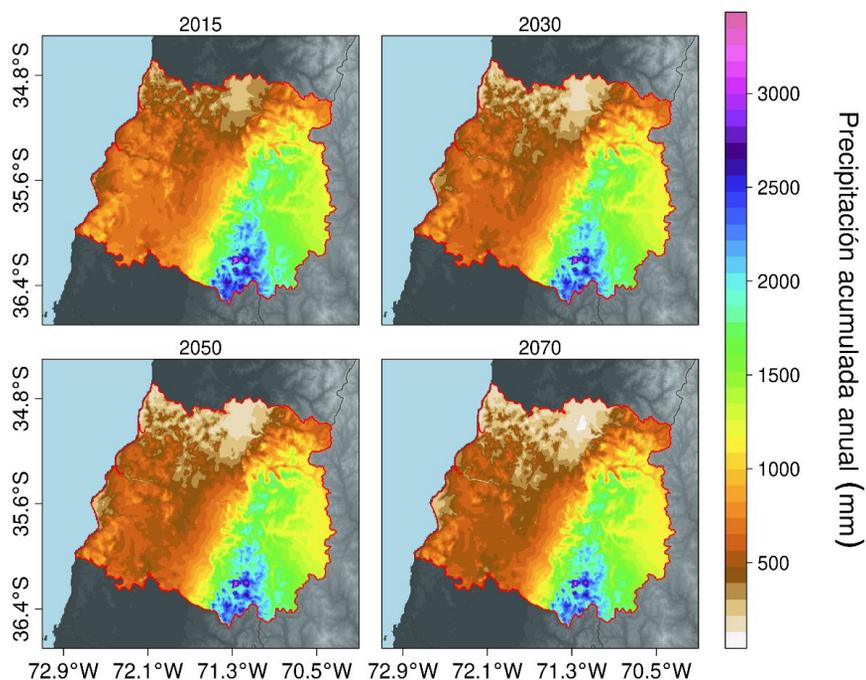
Las variables climatológicas discutidas en el presente documento corresponden a la precipitación anual (PPA), temperatura media (TM), grados-día (GD), evapotranspiración anual (ETA) y balance hídrico anual

(BHA: déficit o superávit hídrico). Estas variables fueron construidas a partir de los escenarios de cambio climático propuestos por el IPCC en su último informe y discutidos en el punto anterior. Se realizó una bajada de escala espacial (Downscaling) a 250 m para mejorar la percepción espacial de los cambios, basado en un método estadístico denominado método delta (Delta method), usado en la literatura científica por varios autores (Ramírez y Jarvis, 2010). Este método fue seleccionado por su capacidad de generar escenarios a una escala de análisis de detalle, como la que es necesaria para evaluar el impacto en los sistemas agropecuarios. Sin embargo, el método se basa en un par de suposiciones generales: (a) Los cambios en los elementos del clima varían solo en grandes distancias (Tendencias espaciales) y (b) Se considera que la relación entre el clima actual, llamada línea base (LB), y los escenarios de cambio climático se mantienen a lo largo de la simulación futura. La literatura científica reconoce que las hipótesis anteriores podrían no ser válidas en territorios más heterogéneos, como en el caso de la Zona Central de Chile, donde la topografía genera variaciones importantes generando anomalías espaciales (Por ejemplo, La Cordillera de Los Andes). Para más información, el lector podría consultar el artículo de Ramírez y Jarvis (2010) donde se discute adecuadamente el método utilizado. Por ello, estos escenarios desarrollados deben ser interpretados adecuadamente ya que corresponden a referencias que nos permiten conocer cómo podría ser el comportamiento promedio de las variables climatológicas a nivel territorial.

Los resultados de este proceso son representados solamente por sus valores promedio para cada uno de los escenarios de cambio climático propuestos por el IPCC (SSP) para una representación referencial para toda la región del Maule. En efecto, todos los escenarios de cambio climático generados se encuentran en formato grillado (Matricial) o de imagen, donde es posible la consulta en cada lugar, solo conocida su posición geográfica (Longitud) y es posible conocer todas las variables climáticas de interés agronómico. En todas las figuras siguientes, la LB se muestra como 2015, sin embargo, esta LB corresponde al promedio de los años 1985-2015. Para el caso de los escenarios promedio de 2030, 2050 y 2070, corresponden a los promedios de las décadas 2020-2040, 2040-2050 y 2060-280, respectivamente.

**Precipitación:** La figura 2 muestra las precipitaciones anuales promedio en cada década para los distintos escenarios climáticos futuros del IPCC, usando como partida la línea base elegida. Se observa una disminución de la precipitación en toda la región del Maule desde 2015 al 2070, sin embargo, esta es diferenciada en el transecto norte-sur y costa a cordillera, regulada por los diferentes factores, como las corrientes marinas, distancia a la costa, Cordillera de la Costa y Cordillera de Los Andes. Los modelos de cambio climático consultados muestran que al 2030,

proyectan que la precipitación media anual disminuirá entre un 5 y 15% aproximadamente en la Zona Central de Chile. La figura 2 muestra una aproximación a lo que podría ocurrir en promedio en cada una de las décadas analizadas y su efecto territorial, es decir, la configuración espacial de la precipitación total anual. Ahora si vemos el año 2050, notaremos también una disminución media entre el 20 al 25%, sin embargo, su expresión territorial (figura 2) nos indica que esta disminución será más notoria en la Provincia de Curicó, en la zona norte de la región del Maule.



**Figura 2.-** Escenarios climáticos futuros promedio para la precipitación en la región del Maule.

**Temperatura media:** La figura 3 muestra los distintos escenarios climáticos futuros del IPCC para las temperaturas medias anuales, usando como partida la línea base elegida al año 2015. Se observa un aumento de la temperatura en toda la región del Maule en los escenarios correspondientes a las décadas 2030, 2050 y 2070. También se puede apreciar que el calentamiento en la región no es homogéneo, siendo los valles donde se observa un proceso mucho más intenso. También, las diferencias en el espacio son mucho más marcadas en el transecto costa a

cordillera, donde el efecto de la corriente de Humboldt ejerce una influencia que se puede modelar por la distancia a la costa, sin embargo, los efectos de la Cordillera de la Costa y Cordillera de Los Andes también son marcados. Desde el punto de vista de las tendencias calculadas mediante los modelos de simulación, estas proyectan un aumento sostenido en la temperatura, prácticamente para todo el territorio nacional, pero con una tendencia que se estaría condicionada por la latitud y el transecto costa a Cordillera de Los Andes.

Específicamente, se espera que este aumento en la temperatura sea de mayor intensidad en la dirección norte a sur y de cordillera a océano. Hacia el año 2030, en promedio, podría registrarse un aumento en la temperatura del orden de los 0.8 °C en la Zona Central de Chile. Para el promedio de la década de 2050, la

tendencia al alza se mantiene, pero con valores que llegarían hasta 1°C. Producto de lo anterior, los modelos proyectan un aumento del número de ocurrencia de eventos de Olas de Calor, siendo los más importantes aquellos que ocurrirían en verano.

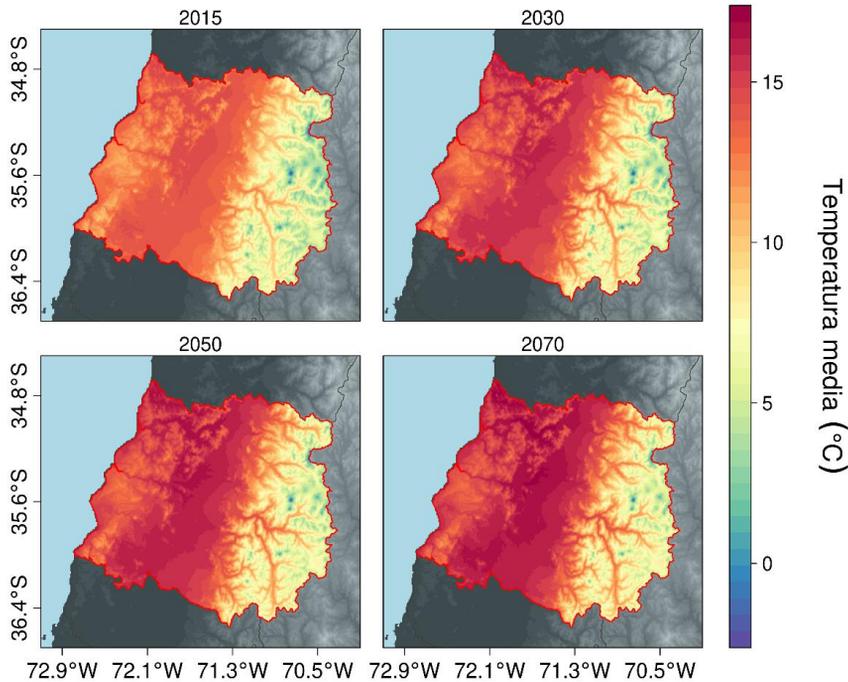


Figura 3.- Escenarios climáticos futuros promedio para la temperatura en la Región del Maule

**Grados-Día (GD):** Los grados-día, al ser una estimación de la acumulación de calor anual en el sistema climático, es una variable mucho más evidente al evaluar el aumento de la temperatura proyectada por los distintos modelos climáticos. Los Grados-Día anuales se calcularon en base 10 °C, la cual es comúnmente usada para evaluar si una especie vegetal puede llegar a la madurez fisiológica y poder generar semillas y frutos. En la figura 4 se muestra como es la actual acumulación de calor al año 2015 en la región del Maule donde en el valle central es del orden de los 2000 GD. Los escenarios promedio consultados muestran un aumento sostenido de los GD, fundamentalmente asociado a los aumentos pronosticados de la temperatura hacia las décadas de 2030, 250 y 2070, lo cual queda reflejado en la figura 4, donde los valles pasan de un color naranja a un color

rojizo, evidencia del aumento. Es posible notar en estas figuras que el aumento de los GD sigue el gradiente costa a cordillera, siendo más intenso en los valles y disminuyendo nuevamente hacia la cordillera. En relación con los posibles cambios que podrían producirse hacia el año 2030, nos indican que la acumulación térmica podría crecer en un 10,2% en Talca, un 6,7% en Curicó, un 10,7% en Linares, sin embargo, estas cifras al año 2050 podrían aumentar 21,7%, 17,7%, 21,3 en las mismas localidades respectivamente. Hacia el año 2070 la acumulación térmica podría aumentar en un orden del 29% en relación con los valores conocidos en la actualidad. La figura 4 muestra esta variabilidad territorial, donde se aprecia claramente este aumento, ya discutido anteriormente.

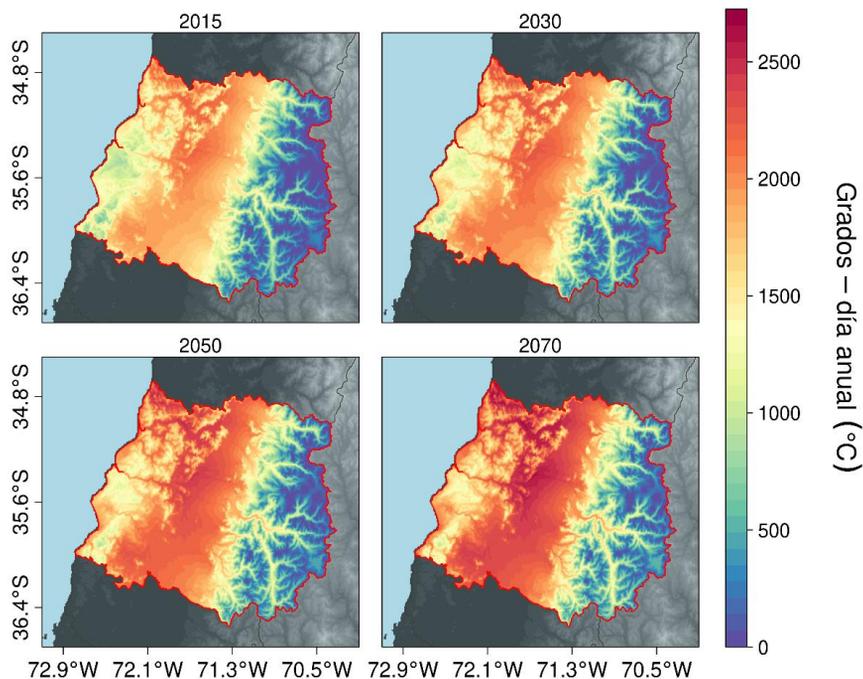
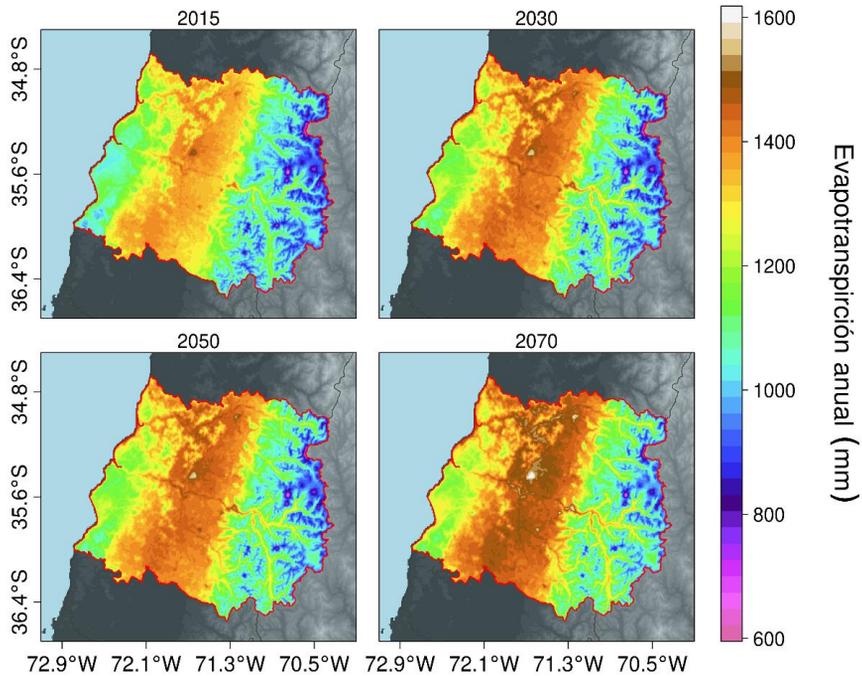


Figura 4.- Escenarios climáticos futuros promedio para los Grados-Día en la Región del Maule.

**Evapotranspiración:** Esta variable agroclimática es de suma importancia, ya que es usada para la planificación del riego. La figura 5 muestra la evapotranspiración de referencia (ET<sub>0</sub>) obtenida a través de la calibración del modelo de Hargreaves-Samani (HS) para toda la región del Maule. Como el modelo HS depende fuertemente de las características radiativas de la superficie, es decir, depende fuertemente de la radiación solar recibida, presenta esta figura una configuración muy parecida a la temperatura. Por ello, ET<sub>0</sub> depende del gradiente latitudinal y del gradiente costa a cordillera. En relación con el secano costero y secano interior, se espera que hacia el año 2030 crezca aproximadamente un 7% y un 4%, respectivamente, en cambio, la depresión intermedia y la precordillera crezca un 5%, todos en relación con los valores actuales. Hacia el año 2050, el secano costero y el interior mantendrán

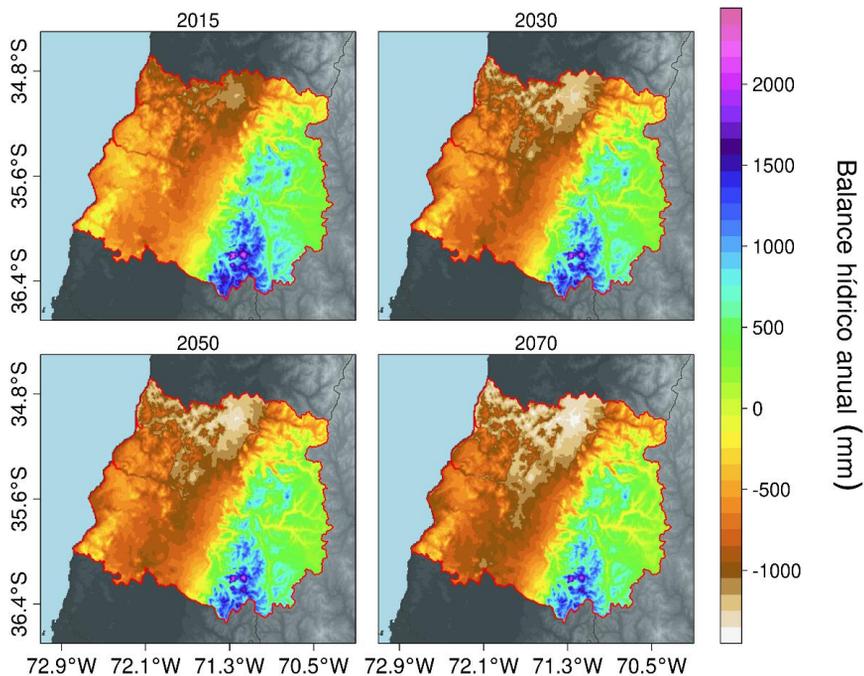
su aumento, sin embargo, la depresión intermedia y precordillera crecerán un 5% y 6%. Hacia el año 2070 la depresión intermedia y cordillera aumentarán la evapotranspiración en torno al 9%, en cambio el secano costero e interior aumentarán en torno al 10%. Esta situación a futuro nos indica que se deberá aplicar aún más agua de riego, con el objetivo de satisfacer la demanda evaporativa de la atmósfera en conjunto con las necesidades hídricas de los cultivos. El problema radica que la disponibilidad hídrica, preferentemente aportada por la precipitación, disminuirá entre un 20% al 25% en la región del Maule. Esta situación compleja, asociada con el aumento de las sequías, requerirá adaptar la infraestructura actual usada para satisfacer el riego, como son los embalses y sistemas de canales. Adicionalmente, la necesidad de contar con alternativas tecnológicas más adaptadas a los impactos del cambio climático.



**Figura 5.-** Escenarios climáticos futuros promedio para la Evapotranspiración en la región del Maule.

**Balance Hídrico:** Esta variable la entenderemos simplemente como la diferencia entre la precipitación y la evapotranspiración, que podría ser interpretada como déficit y excedente hídrico, según tengamos valores negativos o positivos en esta diferencia. La figura 6 muestra los escenarios climáticos futuros promedio para el Balance Hídrico (Precipitación – Evapotranspiración), expresado en valores positivos y negativos, los cuales corresponden a excedente o déficit, respectivamente, en la región del Maule. A simple vista la figura nos muestra que, en la actualidad, mayoritariamente entre el secano costero, secano interior, depresión intermedia y precordillera los déficits son del orden del -25,2%, aumentando de costa a precordillera. La misma figura nos muestra que el mayor impacto se centrará en la provincia de Curicó donde casi duplicará el déficit actual. Hacia el sur de la región, la situación es más alentadora, sin embargo,

no menos grave. En promedio en la región, el déficit crecerá del -25,2% en año 2030, al -31,6 el año 2050, para finalmente llegar al -44,2% el año 2070. Es necesario recordar que estos valores son un promedio regional, y es posible que a nivel local estos valores sean aún mayores. En relación con el secano costero y secano interior, se espera que hacia el año 2030 crezca aproximadamente un -30% y un -20%, respectivamente, en cambio, la depresión intermedia y la precordillera crezca un 25%, todos en relación con los valores actuales. Hacia el año 2050, el secano costero y el interior mantendrán su aumento en el mismo orden, sin embargo, la depresión intermedia y precordillera crecerán en torno al -32%. Hacia el año 2070 la depresión intermedia y cordillera aumentarán la evapotranspiración en torno al -45%, en cambio el secano costero e interior aumentarán en torno al -40%.



**Figura 6.-** Escenarios climáticos futuros promedio para el Balance Hídrico (Precipitación - Evapotranspiración), expresado como excedente o déficit, en la Región del Maule.

### Referencias

- Hijmans, R.J., S.E. Cameron, J.L. Parra, P.G. Jones and A. Jarvis, 2005. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology* 25: 1965-1978.
- Morales L. 1997. Evaluation and zoning of frost risk by topoclimatic modeling. Doctoral Thesis. Universidad de Concepción, Chile, 142 pp.
- Morales Luis, Canessa Fabricio, Mattar Cristian, Orrego Raúl y Matus Francisco. 2006. characterization and edaphic and climatic zonation in the region of Coquimbo, Chile. *Revista Chilena Ciencia del Suelo y Nutrición Vegetal*, Vol 6(3), pp. 52-74.
- Navarro-Racines, C., Tarapues, J., Thornton, P. et al. High-resolution and bias-corrected CMIP5 projections for climate change impact assessments. *Sci Data* 7, 7 (2020) doi:10.1038/s41597-019-0343-8.
- Ramírez J, Jarvis A. 2010. Downscaling Global Circulation Model Outputs: The Delta Method. Decision and Policy Analysis Working Paper No. 1. Cali, Colombia: International Center for Tropical Agriculture (CIAT). CGIAR Challenge Program on Climate Change, Agriculture, and Food Security.

## EFECTOS EN EL SECTOR AGRÍCOLA

La agricultura como sector productivo es una actividad estratégica debido a su rol en la generación de alimentos para la población, su participación en la generación de empleo, el intercambio de bienes y servicios derivados de las cadenas de proveedores y de comercialización de productos, entre otros. Se caracteriza por ser intensiva en el uso de recursos naturales y por lo tanto depender de las condiciones de factores como suelo, disponibilidad de recursos hídricos, condiciones y eventos climáticos.

Los cambios en las condiciones climáticas en los períodos recientes y su proyección en los próximos años han tenido efectos en el uso y disponibilidad de los recursos para la producción agrícola. Esto plantea un desafío de adaptación para el sector, cuyo objetivo está orientado a la obtención de alimentos de calidad, respetando el medio ambiente y conservando la fertilidad de la tierra mediante la utilización óptima de los recursos naturales.

El cambio climático afecta la producción agrícola en forma directa, indirecta y a través del factor humano. Entre estos últimos, además de la demanda de productos agrícolas están costos de producción, políticas sectoriales, comercio, así como los métodos de mitigación de los efectos negativos sobre los ecosistemas. Los impactos socioeconómicos de estos

procesos dependerán de la capacidad de adaptación de los grupos humanos y del desarrollo tecnológico que va desde las cultivares empleados en la producción, hasta las técnicas o métodos de cultivo y comercialización.

De la variedad de impactos que el cambio climático genera, algunos pueden ser considerados benéficos para la producción agrícola, sin embargo la mayor parte de estos representan una amenaza. Esto debido a que, dadas las condiciones, la variación de las temperaturas como el aumento de la concentración de CO<sub>2</sub> pueden aumentar el potencial de crecimiento y rendimiento, especialmente en especies como cereales. La fisiología de las plantas se ve altamente influenciada por el clima y su variabilidad de distintas formas, por lo que existen zonas que se verán favorecidas por temporadas más cálidas y disminución de eventos de heladas.

En el cuadro 1 se listan algunos de los impactos positivos y negativos que se han determinado sobre los sistemas productivos agrícolas. Estos consideran los efectos a nivel de la planta en los cultivos, recursos naturales abióticos (suelo, agua) y bióticos; como microorganismos patógenos, insectos y especies vegetales que afectan los cultivos.

**Cuadro 1.** - Cambio climático en la producción agrícola. Efectos positivos y negativos (Raza et al., 2019)

IMPACTOS POSITIVOS	IMPACTOS NEGATIVOS
<ul style="list-style-type: none"> <li>› Incremento de la productividad debido a la temperatura cálida</li> <li>› Incremento de la tasa de maduración</li> <li>› Temporadas agrícolas más largas y cálidas</li> <li>› Posibilidad del desarrollo de nuevos cultivos</li> <li>› Disminución del estrés hídrico en algunas áreas</li> <li>› Incremento en la producción debido a una mayor concentración de CO<sub>2</sub></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>› Incremento en la erosión</li> <li>› Eventos de tormentas e inundaciones</li> <li>› Aumento de enfermedades problemas de planificación debido a dificultades de pronóstico climático</li> <li>› Mayor crecimiento de malezas</li> <li>› Estrés térmico</li> <li>› Disminución de la eficiencia del trabajo agrícola debido a las altas temperaturas lluvias torrenciales</li> <li>› Brotes de plagas e insectos disminución de la efectividad de pesticidas</li> </ul>

## Temperatura y crecimiento de las plantas

Los efectos del cambio climático se derivan del aumento de las temperaturas ya sea en forma directa o a través de otros procesos ambientales. El cambio climático puede afectar a la agricultura de diversas formas. Por ejemplo, el calentamiento tiende a reducir los rendimientos porque los cultivos aceleran su desarrollo, produciendo menos grano en el proceso; y las temperaturas más altas también interfieren con la capacidad de las plantas para obtener y usar la humedad (Cline, W. 2008).

Particularmente el aumento de la temperatura ambiente dentro de un rango óptimo puede optimizar la producción de energía (10-35°C), sin embargo al exceder estos límites la fotosíntesis disminuye rápidamente (Tkemaladze, G.Sh., Makhashvili, K.A., 2016).

El aumento de la temperatura del suelo mejora el crecimiento de las raíces debido al aumento de la actividad metabólica de las células de la raíz y el desarrollo de raíces laterales (Repo et. al., 2004). Sin

embargo, la temperatura extrema del aire y del suelo puede alterar las relaciones de transporte de agua hacia las raíces y la planta. Esto puede reducir la tasa de transpiración haciendo que la planta no pueda seguir el ritmo de la alta demanda de evaporación atmosférica por la alta temperatura. Esto genera eventos de estrés severo por calor extremo a pesar de que exista un nivel adecuado de agua en el suelo, lo que provoca reducciones en la productividad y el rendimiento de la planta.

El principal impacto de las temperaturas más cálidas se presenta durante la etapa reproductiva. Se ha indicado que el rendimiento en el maíz se ve significativamente reducido hasta en un 80-90% comparado con un régimen de temperatura normal (Hatfield, J., Prueger, J., 2015).

Por otro lado, la temperatura del suelo altera la tasa de descomposición de la materia orgánica y la mineralización de diferentes compuestos, lo que en conjunto con su impacto en el contenido de agua del suelo afectan la absorción de nutrientes (Onwuka, B.M., 2016). Los principales efectos por estrés de alta temperatura al que se ven sometidos los cultivos son los establecidos den el cuadro 2.

**Cuadro 2.** - Efectos de la alta temperatura en plantas. (Hasanuzzaman et al., 2013)

<b>Desarrollo del cultivo</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>› Alteración en la fenología</li> <li>› Reducción del crecimiento</li> <li>› Desarrollo inadecuado del cultivo</li> </ul>
<b>Efectos bioquímicos</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>› Estrés oxidativo</li> <li>› Alteración de la fotosíntesis</li> <li>› Cambios en la distribución de materia seca</li> </ul>
<b>Productivos</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>› Reducción del rendimiento</li> <li>› Reducción en la calidad de los productos</li> </ul>

## Cambio climático y fertilidad de suelo

Se prevé que el cambio climático global tenga efectos variables en los procesos y propiedades del suelo importantes para restaurar la fertilidad y productividad del suelo. Se espera que el principal efecto sea a través de la alteración de las condiciones de humedad, el aumento de la temperatura del suelo y los niveles

de CO<sub>2</sub> (Pareek, N. 2017). Además, estos alterarían las características físico-químicas del suelo como pH, la hidrología y los ciclos de nutrientes. Estos efectos serán altamente sitio específicos, dependiendo de la magnitud del cambio climático, el tipo y características del suelo y condiciones climáticas locales. (Karmakar, R., Das, I., Dutta, D. y Rakshit, A., 2016). Las relaciones entre los efectos y sus consecuencias a nivel de suelo se presentan en la cuadro 3.

**Cuadro 3.** - Resumen de los efectos esperados de las variables individuales del cambio climático en los procesos del suelo (Pareek, N. 2017)

<b>Incremento de la temperatura</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>› Pérdida de materia orgánica</li> <li>› Reducción en el contenido de agua</li> <li>› Incremento en la tasa de mineralización</li> <li>› Pérdida en la estructura de suelo</li> <li>› Incremento en la respiración del suelo</li> </ul>
<b>Aumento en la concentración de CO<sub>2</sub></b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>› Ciclo de nutrientes acelerado</li> <li>› Aumento en la disponibilidad de carbono para los microorganismos</li> <li>› Aumento en la materia orgánica</li> </ul>
<b>Aumento en las precipitaciones</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>› Aumento en la saturación de suelo</li> <li>› Aumento en la pérdida de nutrientes</li> <li>› Erosión y escorrentía</li> <li>› Incremento de la producción en zonas áridas</li> <li>› Pérdida de nitrógeno</li> </ul>
<b>Disminución en las precipitaciones</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>› Reducción en la materia orgánica</li> <li>› Salinización</li> <li>› Reducción en la disponibilidad de nutrientes</li> </ul>

## Impacto del cambio climático en plagas y enfermedades

La relación entre el cambio climático y las enfermedades y plagas que afectan a los cultivos no es claro. Cambios en los factores de temperatura, concentración de CO<sub>2</sub>, niveles de humedad en el suelo o atmosférica tienen efectos diversos (Newman, J. 2003). La evidencia recopilada indica que el aumento o la disminución de una enfermedad estarán en función del huésped y del patógeno a nivel local. Es por esto que se deben realizar estudios sobre los

principales cultivos y las principales enfermedades para cada región. La temperatura es uno de los principales factores en conjunto con la lluvia para determinar la incidencia y severidad de enfermedad (Yañez-López, et al. 2012). Sin embargo, los cambios en el clima podrían causar la expansión de enfermedades. Debido a los ajustes de las condiciones y la ocurrencia de efectos desfavorables de temperatura, se plantea que existiría una transmisión de enfermedades, dado que los patógenos migrarán desde su origen principal a otras partes como una forma de adaptación y supervivencia (Peace, N. 2020).

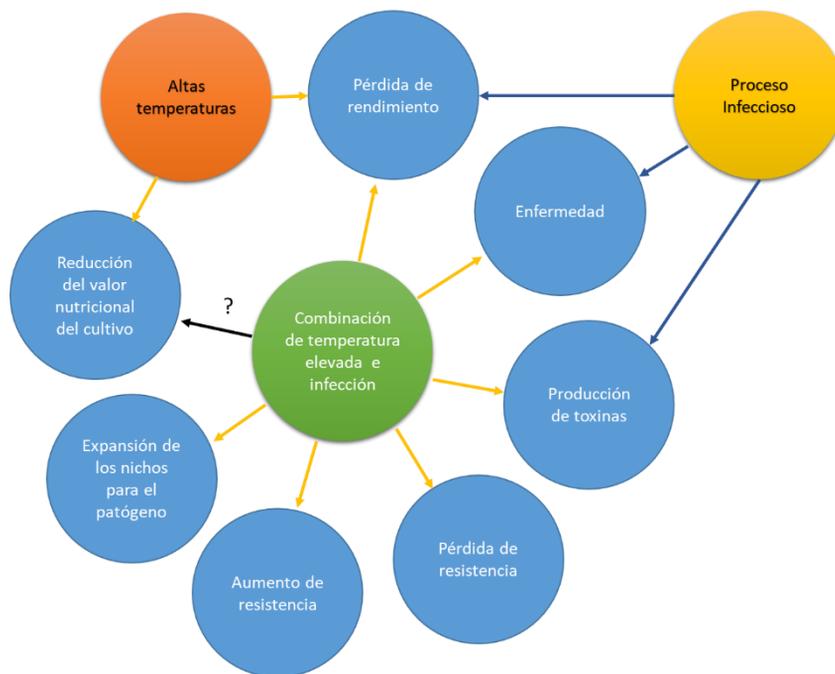


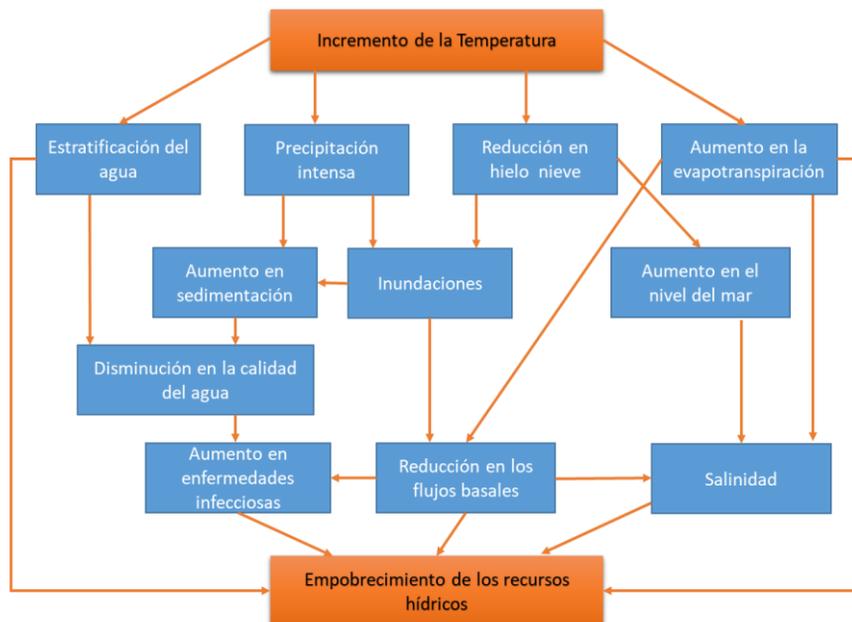
Figura 1.- Efectos del estrés simultáneo por temperatura elevada y la infección por patógenos (Cohen, S. y Leacha, J., 2020).

## Aumento de la temperatura y disponibilidad de agua

Tanto las reservas como el flujo de agua en los componentes del ciclo hidrológico se ven fuertemente alterados por el cambio climático. El calentamiento global produce aumentos en la evaporación y la precipitación con una intensificación actual del ciclo hidrológico (Zhan, S., Song, C., Wang, J., Sheng, Y. Quan, J. 2019). Por esto se debe enfatizar la necesidad de mejorar las capacidades para monitorear y predecir las consecuencias de los cambios en los regímenes hídricos (Huntigton, T. 2006). El impacto neto de las temperaturas más altas en la disponibilidad de agua es una carrera entre evapotranspiración y precipitación, la cual por lo general es ganada por la evapotranspiración (Cline, W.

2008). El cambio climático también juega un papel importante en el aumento de la presión sobre el uso del agua junto con otros factores como con la contaminación el crecimiento de la población y los cambios en el uso de la tierra (Aerts, J. y Droogers, P. 2004).

Por otro lado a pesar de la disponibilidad relativa de recursos hídricos, la serie de factores y fenómenos que afectan el proceso de los ciclos hidrológicos determinan un empobrecimiento de estos recursos. Los cambios en la población y el uso de la tierra también afectan dinámicamente estos ciclos, los que además se ven determinados por las políticas y actividades humanas. Por esto, existe incertidumbre en la determinación de las proyecciones y situaciones futuras de la disponibilidad de agua como factor social que la que existe en los modelos hidrológicos y climáticos (figura 2) (Kazama, S. y Oki, T., 2006).



**Figura 2.-** Propagación de la influencia del aumento de la temperatura a los recursos hídricos. (Kazama, S. y Oki, T., 2006)

## Impacto a nivel nacional

Chile es vulnerable al cambio climático debido a su topografía, variedad climática y de ecosistemas, así como la tendencia a la desertificación, entre otros. Se han identificado que los principales factores que presentan cambios significativos y que afectan al sector agrícola corresponden a la temperatura, las precipitaciones, los eventos climáticos extremos, disponibilidad de recursos hídricos, desplazamiento de las zonas de cultivo. (MMA, 2017)

En el largo plazo, el cambio climático podría afectar la agricultura de las siguientes formas:

- **Productividad**, en términos del rendimiento y calidad de los productos agrícolas.
- **Prácticas culturales**, a través de los cambios en el uso del agua y los elementos utilizados en las labores agrícolas como pesticidas fertilizantes y herbicidas.
- **Espacio rural**, debido a la pérdida de espacios de

cultivo, especialmente en zonas de secano y la incorporación de terrenos derivados de las variaciones en la estructura productiva y capacidad de riego.

- **Adaptación**, cultivos y organismos (plagas y enfermedades) que pueden pasar a ser más competitivos derivados de los cambios en la climatología local.
- **Efectos medioambientales**, como la pérdida de suelo por erosión, variación en el sistema de drenaje y los cambios en los ecosistemas productivos.

Las proyecciones indican que con incrementos de 1,0 a 3,0°C en la temperatura promedio habría disminución en la producción de los cultivos en las latitudes bajas y una aumento en las latitudes altas (ODEPA, 2013).

Según el Plan de Acción Nacional frente al Cambio Climático, los principales efectos con relación al sector agrícola corresponden a:

- **Temperatura.** Se proyecta un aumento de temperatura en todo el territorio nacional, con un gradiente de mayor a menor, de norte a sur y de Cordillera a Océano. Sin embargo, el calentamiento promedio en Chile es menor al calentamiento promedio global (Sánchez, L. 2022).
- **Precipitación.** Nuestro país experimenta un déficit generalizado de precipitaciones, con excepción de zonas del extremo norte. Entre las regiones de Coquimbo y O'Higgins los déficits varían entre un 60% y casi un 100%. Del Maule hasta Aysén los déficits varían entre un 10% y un 60% y disminuyen más hacia el sur, hasta llegar en Magallanes, a un 13% de superávit (Morales, C. y Ruiz, R., 2019).
- **Eventos climáticos extremos.** Las principales amenazas naturales en la zona son de tipo hidrometeorológicos, provocadas por las inundaciones fluviales, producto de regímenes de lluvia con vientos intensos, provocando anegamientos, y procesos de remoción en masa. En cuanto a las temperaturas extremas, varias localidades de la zona centro sur alcanzaron niveles inusualmente elevados durante el 2017. En la región del Maule, particularmente en la ciudad de Curicó, la temperatura máxima alcanzó los 37,3 °C, valor que no se registraba hace 91 años. Situación similar vivió la ciudad de Chillán, con una temperatura de 41,5 °C, no existiendo un nivel similar desde hace 71 años (Galilea, O. 2020).
- **Biodiversidad.** Se proyecta una pérdida importante del patrimonio genético nacional, caracterizado por un alto endemismo. Se estima que el bosque caducifolio y el bosque espinoso mediterráneo interior de *Acacia caven* serían los más afectados debido a que los bioclimas asociados a ellos parecen des configurarse. Además se prevé detrimento de ecosistemas como los humedales andinos en la zona norte y especies de flora endémicas clasificadas como vulnerables o en peligro de extinción (MMA,2017).
- **Recursos hídricos.** Se proyecta una reducción significativa de los caudales medios mensuales en las cuencas entre las regiones de Coquimbo y Los Lagos en conjunto con la elevación de la isoterma de 0°C. Esto trae como consecuencia la reducción de las reservas de agua en las cabeceras de cuencas nivales y nivo-pluviales con la consiguiente

disminución de los recursos hídricos producto de las precipitaciones anuales. Adicionalmente, el retroceso de glaciares sería significativo, afectando los aportes de agua en los períodos secos. Por el mismo motivo, se espera un leve aumento de los caudales disponibles en el extremo austral (MMA,2017).

## Región del Maule. Disponibilidad de recursos hídricos

La región del Maule posee una capacidad de 3.618 Hm<sup>3</sup>, distribuida en 8 embalses principalmente en la cuenca del río Maule. Estos combinan su uso tanto para el riego agrícola como para la generación hidroeléctrica.

Las aguas de la cuenca del Maule son utilizadas para diversas actividades, principalmente para fines de regadío (65%), para actividades agrícolas y generación hidroeléctrica (3%), industrial y urbana, entre otras. Cuando la distribución se separa de acuerdo con el tipo de derecho concedido en la cuenca, se observa que en usos consuntivos el riego es quien tiene el porcentaje más alto, y en usos no consuntivos es la energía hidroeléctrica el mayor porcentaje (Enel, 2020).

En cuanto a esta, existen numerosas centrales que hacen uso del caudal que conforma la cuenca del Maule. Estas son: Cipreses, Isla, Ojos de Agua, Pehuenche, Curillínque, Loma Alta (Enel Generación Chile), Lircay, Providencia, Mariposas (Hidromaule), Chiburgo, Colbún y Machicura, San Ignacio, La Mina, San Clemente (Colbún S.A.). En conjunto estas representan una capacidad instalada de más de 1.368 MW, constituyendo un 9% del total nacional en hidroelectricidad, según la información de Generadoras de Chile.

Con el incremento de la temperatura, las tasas de evaporación aumentan. Por esto se espera que a nivel planetario provoque un aumento de precipitaciones, especialmente en las latitudes altas. Sin embargo en nuestro país se ha visto afectado por una sequía que se ha prolongado por más de una década. Los factores que explican la disminución de las precipitaciones se relacionan con las condiciones particulares de las condiciones atmosféricas y en el océano.

**Cuadro 3.-** Precipitaciones región del Maule 2006- 2021 (mm)

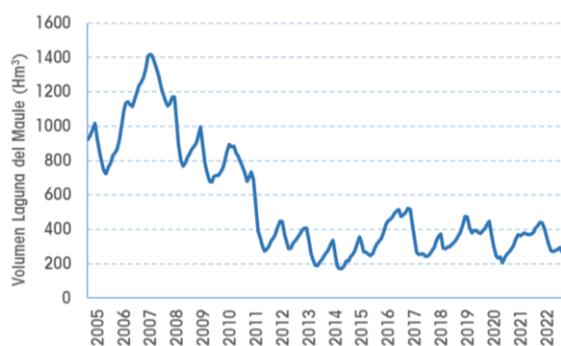
	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	Variación	%
<b>Curicó</b>	688	353	673	579	404	416	539	371	393	564	468	618	456	220	454	334	-353,4	-51%
<b>Talca</b>	767	334	661	553	457	563	452	451	514	554	377	605	426	216	543	504	-263,1	-34%
<b>Colorado</b>	1684	879	1396	1280	927	1174	996	923	1114	1401	826	1378	1024	538	1209	763	-920,7	-55%
<b>Linares</b>	970	573	895	782	597	914	641	653	778	808	475	910	649	420	712	623	-346,2	-36%
<b>Parral</b>	1131	601	1144	919	677	857	920	640	853	786	436	956	691	404	708	620	-510,5	-45%

Este efecto determina que las altas presiones del océano pacífico impiden que los sistemas frontales avancen hacia el continente. Datos registrados por la Dirección General de Aguas en los últimos 15 años (2006-2021), indican que en la región del Maule ha habido una disminución de precipitaciones entre un 34% y 55% (cuadro 3) en estaciones de medición distribuidas en la región.

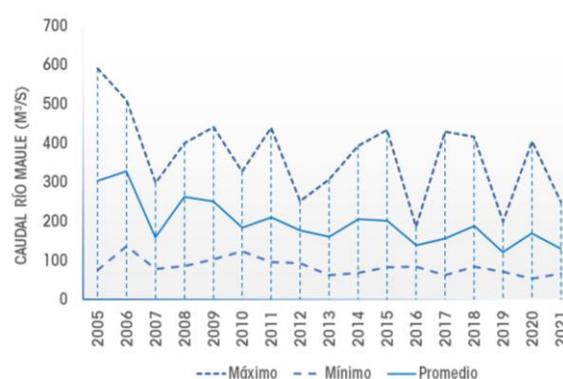
La disminución de las precipitaciones ha afectado el nivel de los embalses destinados para su uso en riego. La Laguna del Maule es el punto de referencia para el seguimiento de la evolución de las reservas hídricas para la cuenca. Esta recibe únicamente los aportes de la precipitación ya sea lluvia o nieve, por lo que se correlaciona con la disponibilidad de recursos hídricos tanto para la generación hidroeléctrica como para el riego agrícola. Respecto de la Laguna del Maule, el año 2007 fue el último en que se registró un lleno total de su capacidad (1.420 Hm<sup>3</sup>), tras lo cual su nivel

máximo anual ha ido descendiendo paulatinamente llegando a oscilar entre los 33% y 25% de su potencial de almacenamiento en los últimos 5 años (figura 3).

El río Maule corresponde al cauce que domina la principal cuenca hidrográfica de la región, la cantidad de agua en este ha disminuido en forma correspondiente con los de los embalses. Los datos registrados de caudal indican que el año 2005 se registró un promedio de 303,9 m<sup>3</sup>/s y el año 2021 fue de 130,3 m<sup>3</sup>/s, lo que establece una reducción del caudal promedio anual del 57% en los últimos 16 años. Aun cuando el período de tiempo indicado pudiera no ser representativo en términos de los efectos del cambio climático, si representa un desafío para el sector agrícola de la cuenca del Maule, quienes han debido implementar estrategias para intentar terminar las temporadas de riego reduciendo los perjuicios para la producción (figura 4).



**Figura 3.-** Volumen reservas de Laguna del Maule, Chile



**Figura 4.-** Caudal río Maule en Armerillo, Chile

## Cambios en la estructura productiva

La variación de la temperatura y de los cambios en los regímenes de precipitaciones y de eventos de estrés térmico han determinado que diferentes zonas geográficas presenten dificultades para el establecimiento de cultivos. Por una parte, la disminución del agua disponible ha restringido la factibilidad de implementar cultivos de alta demanda hídrica. La concentración de los esfuerzos para mantener una agricultura de alta productividad y manifiestamente competitiva ha repercutido en el abandono de áreas de secano, menos productivas

(Giglo, N., 2018).

Simultáneamente, los cambios en la temperatura y los índices climáticos han determinado que la aptitud de cultivos cambie, determinando que especies frutales puedan desarrollarse en sectores donde era riesgoso debido a la ocurrencia de heladas primaverales.

Actualmente existe una disminución en la superficie sembrada con cultivos anuales, los que han caído en aproximadamente desde 1.220.00 ha en la temporada 1986-87 a menos de 600.000 ha en la temporada 2020-21 (cuadro 4). La explicación de esta variación reside en el aumento de superficie dedicado a actividades silvícolas y el incremento en la superficie plantada con frutales (Faiguenbaum, H., 2022)

**Cuadro 4.- Superficie sembrada cultivos anuales (Faiguenbaum, H., 2022)**

Superficie Total	1986-87	1996-97	2006-07	2016-17	120-21	Superficie sembrada 1986 v/s 2020
Número de Hectáreas	1.221.209	1.835.364	45.563	676.209	592.919	48.6%

En estudio técnico ODEPA indica los principales efectos esperados del cambio climático sobre cultivos tradicionales. Considerando cambios en la superficie y productividad. (ODEPA, 2013), los que se detallan a continuación:

### Trigo

- Bajo riego, el aumento de las temperaturas aceleraría ciclo productivo y una reducción del rendimiento. Mayor impacto en zonas costeras que en zonas interiores.
- Secano, disminución (10%-20%) en el rendimiento en norte y centro del país debido a mayores sequías. En tanto, de la precordillera del Bio-Bio al sur habría un aumento gradual entre el 30% y 100% respecto a los rendimientos actuales.

### Maíz

- El potencial productivo se expandiría dado las exigencias de temperatura del cultivo. Desde Coquimbo al Bío-Bío, se estima una disminución productiva entre 10 y 20% en el valle central. Inversamente en la costa y precordillera, aumentaría el rendimiento hasta un 50%. En la zona sur los rendimientos aumentarían entre un 60% y 200%.

### Papa

- Zona norte presentaría una reducción entre 10 y 20% del rendimiento.
- Zona centro-norte, el rendimiento disminuiría hasta un 30%
- Entre Talca y Temuco, la disminución se presenta sólo en el valle central, ya que en la costa y precordillera habría aumentos de hasta un 50%.
- Desde la Región de la Araucanía al sur, los rendimientos aumentan hasta llegar a 150% y 200% en la Región de los Lagos.
- En secano, los aumentos se producirían en la costa del Bío-Bío y desde Valdivia hasta Coyhaique

### Poroto

- Zona norte y centro, se espera que el rendimiento se mantenga bajo la condición de clima futuro,
- Región de la Araucanía al sur, aumentaría la productividad entre 10% y 20%, llegando hasta 100% en la Región de Los Lagos.

### Remolacha (bajo riego)

- Entre Valparaíso y Talca, por el valle central, habría aumento de rendimiento de hasta un 50% en algunos lugares.

- En la costa y precordillera de la zona centro, habría una reducción en el rendimiento.
- Región de la Araucanía al sur, el aumento térmico invernal incrementaría el potencial productivo, incluso con menor pluviometría.
- Probables aumento de la incidencia de plagas y enfermedades dado por el aumento de las temperaturas.

#### Praderas

- La productividad crece gradualmente a medida que las precipitaciones aumentan, llegando a su máximo en la Región de Aysén, donde se optimiza la combinación entre disponibilidad de agua y temperatura.

#### Frutales

- Extensión del área del cultivo hacia el sur, abarcando las regiones de La Araucanía, Los Ríos y Los Lagos.
- Aceleración de la fenología de los cultivos, reducción del tiempo de desarrollo y aumento de la precocidad de la madurez.



**Figura 4.-** Evolución Superficie Cultivada de Frutales en Chile. Datos del Catastro Frutícola ODEPA-CIREN (Pefaur, J. 2020)

En los últimos 20 años, la superficie plantada con frutales ha aumentado a una tasa media anual de 3,2%, alcanzando las 342.654 ha. Todas las regiones han aumentado su superficie, destacando aquellas de la zona central de Chile (Pefaur, J., 2020).

Las especies de mayor expansión son cerezos, avellanos europeos, arándanos, nogales, olivos y mandarinos. Se ha indicado que este proceso se desarrolla:

- Sustituyendo a especies que pierden importancia relativa, principalmente en las zonas frutícolas tradicionales de Chile central.
- Colonizando nuevas zonas como la cordillera de la costa, como el olivos en los secanos interior y costero

- Expansión en territorios que actualmente no son de riego y que se extienden al sur de la cuenca del Biobío.

El desplazamiento de la fruticultura chilena hacia el sur se debe a un proceso de reconversión productiva en la zona frutícola tradicional, más que por condiciones climáticas inhóspitas en la zona norte. Se está en presencia de una dinámica de vinculación del sector frutícola con el medio geográfico en la que tiende a dominar su expansión, reconversión y consolidación por sobre una tendencia a su estabilización o contracción productiva. Este proceso inevitablemente continuará ejerciendo una fuerte presión sobre diversos aspectos vinculados a los recursos naturales, especialmente con el agua (Apey, A. 2019).

## Estrategias de adaptación

El cambio climático ha traído consigo un escenario de mayor temperatura, déficit hídrico, pérdida en la calidad de los alimentos, pérdida de aptitud de los suelos de los valles productivos, emergencia de plagas y malezas, produciendo enormes pérdidas económicas. Las opciones de adaptación y las nuevas tecnologías requeridas, son algunas de las áreas que requieren del aporte de la ciencia desde la modelación del clima, el estudio de los impactos sociales ambientales y económicos a nivel local y la vulnerabilidad de los diferentes sistemas socio-ecológicos (CEPAL, 2009).

Para atenuar los efectos del cambio climático se debe desarrollar estrategias en torno a la mitigación y adaptación. Esto considera la reducción de las causas del calentamiento global y disminución de la magnitud de las consecuencias negativas provocadas y esperadas por causa del cambio climático (Sanchez, L., 2022).

La adaptación como tal se basa en la disponibilidad de tecnologías y mejores formas de manejo de los recursos, en los cuales los agricultores y demás actores de las cadenas productivas deben tomar un rol activo complementario al impulso proporcionado por políticas sectoriales. Dada la multiplicidad de patrones de impacto, las soluciones deben ser variadas y flexibles considerando las características geográficas, socioeconómicas y agropecuarias específicas. Sin embargo la toma de decisiones y la definición de objetivos y líneas de acción deben ser diseñadas a escala global, nacional, territorial y predial.

Los agricultores y la población rural son particularmente vulnerables al cambio climático, en el cual se ponen en riesgo no sólo su producción sino también sus métodos de vida y cultura en general. La Adaptación basada en Ecosistemas (AbE), aparece como una alternativa y viable, que es definida como la utilización de la biodiversidad y los servicios de los ecosistemas, como parte de una estrategia más amplia de adaptación, para ayudar a las personas a adaptarse a los efectos adversos del cambio climático (Lhumeau, A., Cordero, D., 2012).

La agricultura sostenible implica reconciliar en el sector, las demandas ambientales, sociales y económicas de las generaciones presentes y futuras. Lograr que la agricultura sea sostenible requiere de disponer de variedades adaptadas y de alto rendimiento, con calidad de nutricional mejorada y resistentes al estrés, con un uso racional de fertilización orgánica e inorgánica, realizando un manejo integrado de plagas, enfermedades y malezas, con la utilización de plaguicidas selectivos y de bajo riesgo. Así mismo se debe realizar una gestión eficiente del recurso hídrico para la obtención de mejor producción con menor consumo de agua (Academia Chilena de Ciencias Agronómicas, 2020).

En este sentido se ha indicado que tanto el agua y la energía son elementos claves para el desarrollo. El agua pasará a ocupar un rol extremadamente estratégico como resultado del aumento del consumo, el deterioro de la calidad, el aumento en la variabilidad de los ciclos hidrológicos y la disminución de su disponibilidad en las cuencas de nuestro país. Las opciones en este sentido están en: la tecnificación del regadío, el desarrollo de microsistemas de cosecha de aguas, cambio de la geografía de la agricultura regada, fortalecimiento de las instituciones en torno a la administración de los recursos hídricos, desarrollo de una agricultura que esté en sintonía inteligente con el clima (Santibañez, F. 2017).

El Plan Estratégico de Gestión Hídrica de la cuenca del Maule, elaborado por el MOP el 2020, añade al análisis general, de que se debe realizar un especial seguimiento al proceso de recarga de acuíferos, los que experimentarían un deterioro en la disponibilidad de agua como resultado de las condiciones ambientales. Por esta razón, se debe evaluar una consideración adicional de Superávit Estructural para contrarrestar los menores aportes futuros. De forma complementaria establece la necesidad de innovar en la red de distribución de agua para el riego, con la construcción de piscinas de infiltración además de la renovación de estructuras centenarias aún en operación. Esto debe estar en relación con los usos y consumos de los recursos hídricos, debiendo considerar el incremento de la demanda agrícola y la incorporación de los conceptos de caudal ambiental o caudal base a la gestión de los ríos y cuencas. (MOP, 2020)

La energía hidroeléctrica representa aproximadamente el 60% de la generación de electricidad en el Sistema Interconectado Central y por sus bajos costos de operación es la primera opción de generación. Sin embargo, la disponibilidad de esta fuente de energía es altamente variable. En períodos donde las condiciones climatológicas reducen la disponibilidad de generación hidroeléctrica existe un aumento de costo relevante para el país, tanto de tipo económico al aumentar la generación por medio de fuentes más costosas (como el carbón o el diésel) y por los efectos contaminantes de las mismas.

Por esto se plantean una serie de medidas genéricas que apuntan a lograr reducciones en la emisión de gases de efecto invernadero en esta línea. Principalmente en el sector eléctrico, estas se enfocan en reducir la demanda de energía o a descarbonizar la manera en que se genera la energía. Acciones en este sentido es la ley de energías renovables no convencionales, que implica la obligación de que las empresas generadoras de electricidad incorporen a sus matrices la generación mediante energías renovables no convencionales.

Otro ejemplo corresponde a la serie de medidas y programas que ha propiciado el Programa País de Eficiencia Energética y que ha tenido como resultado una reducción de la demanda eléctrica a nivel nacional (CEPAL, 2012).

El año 2020, Enel Generación Chile publicó un estudio denominado "Hidroenergía por diseño cuenca del Maule". Este estudio cruza información basado en la presión del desarrollo de actividades antrópicas en la cuenca del Maule, reflejando la considerable intervención sobre su estructura natural con la consecuente reducción de la vegetación nativa. En el estudio plantea que la estructura de la propiedad de la tierra en esta zona determina una oportunidad para el desarrollo de sistemas de conservación con conectividad ecológica, de lo cual ya existen experiencias previas. Se indica que se requiere la coordinación y participación de la comunidad, la academia, sector privado, autoridades y servicios públicos para la implementación de estrategias de conservación con visión social. Esta apunta al desarrollo de planes que consideren la validación de la conservación, programas de mejora a la salud del

ecosistema y programas de educación para fortalecer el medioambiente y el ecoturismo (ENEL, 2020).

La involucración de la empresa privada en la sistematización de la información territorial y el diseño de estrategias de adaptación, está precisamente en línea con el enfoque de conservación y administración de los recursos naturales, necesarios para enfrentar el cambio climático.

Como país, el Plan de Adaptación Acción del Cambio Climático del Sector Silvoagropecuario plantea como ejes principales impulsar:

1.-Competitividad en la agricultura. Fortaleciendo la planificación y gestión de los recursos hídricos, impulsando programas de uso sustentable y eficiente, en conjunto con reforzar los programas de inversión en riego, junto con líneas de financiamiento para la ampliación y modernización productiva. Adicionalmente, estimular la adopción de sistemas de alerta y control integrado de plagas y enfermedades.

2.- Investigación e innovación. Apoyo en la investigación y fomento a la innovación en gestión de recursos hídricos, desarrollando la investigación aplicada y el desarrollo de herramientas analíticas y de información para la toma de decisiones. Inducir la adopción de nuevas variedades y especies que se adapten a las condiciones planteadas por el cambio climático.

3.- Sustentabilidad económica, social y ambiental. Fomentar el uso de prácticas agronómicas tendientes a mantener y recuperar el potencial productivo de los suelos, monitoreando los cambios en las zonas de producción, en conjunto con la adaptación de las prácticas productivas. Simultáneamente el desarrollo de sistemas de monitoreo ambiental de modo de detectar en forma temprana riesgos potenciales.

4.- Transparencia y acceso a mercados. Implementación de un programa de huella hídrica y un sistema de información para la adaptación al cambio climático incorporando estos elementos en instancias de capacitación en cambio climático.

En la misma línea desde Academia Chilena de Ciencias Agronómicas plantea las siguientes acciones:

- Programa de adaptación de la agricultura al cambio climático (investigación, desarrollo tecnológico e innovación público privadas)
- Favorecer el desarrollo de alianzas y métodos productivos entre los sectores primarios, la industria y distribución promoviendo integración.
- Aumento de capital humano para la incorporación de una estrategia de agricultura inteligente.
- Mantener y apoyar la competitividad de Chile en torno a los ejes, protección y mejoramiento de medidas fitosanitarias. de agricultura limpia
- Favorecer el desarrollo de mercado interno para la producción y comercialización de productos saludables.
- Modernización de la infraestructura, normativas y políticas en torno al uso del agua y la certificación.
- Revisar la regulación laboral para promover el desempeño en un marco de responsabilidad social.
- Promover la salud con productos seguros, saludables y diversificados.

## Referencias

- Academia Chilena de Ciencias Agronómicas. 2020. Cambio climático: efectos sobre la producción hortofrutícola y estrategias de adaptación en Chile. 74 pp.
- Aerts, J. y Droogers, P. 2004. "Climate Change in contrasting river basins". CABI Publishing, 2004. ISBN 0-85199-835-6.
- Apey, A. 2019. "La fruticultura en Chile: Tendencias productivas y su expresión territorial". ODEPA.
- Burdon, J., Zhan, J., 2020. "Climate change and disease in plant communities". PLOS Biology 18(11): e3000949.
- CEPAL, 2012. "La economía del cambio climático en Chile". Naciones Unidas, Santiago de Chile.
- Cline, W. 2008. "Global Warming and Agriculture". Finance and Development. March 2008. Volume 45, number 1
- Cohen, S. y Leacha, J., 2020. "High temperature-induced plant disease susceptibility: more than the sum of its parts". Plant Biology Volume 56, August 2020, Pages 235-241
- Enel, 2020. "Estudio Hidroenergía por Diseño en la cuenca del río Maule". Enel Generación Chile.
- Faiguenbaum, H., 2022 "El nuevo mapa de cultivos". En: Revista Mundo Agro N° 148. Abril, 2022. Pags. 11-20
- Fernández, J., 2020. "Cambio climático. Efectos sobre la producción hortofrutícola y estrategias de adaptación en Chile". Academia Chilena de Ciencias Agronómicas.
- Galilea, O. 2020. "Cambio Climático y Desastres Naturales. Una perspectiva macroregional. Instituto de Asuntos Públicos. Universidad de Chile. 261 p
- Gligo, N., 2018. "Macropresiones sobre el medio ambiente" En: informe País Universidad de Chile 2018., Págs. 15-40.
- Hasanuzzaman, M., Nahar, K., Alam, M., Roychowdhury, R. Fujita, M., 2013. "Physiological, Biochemical, and Molecular Mechanisms of Heat Stress Tolerance in Plants". International Journal of Molecular Sciences. 2013, 143, 9643-9684
- Hatfield, J. L., Boote, K. J., Kimball, B. A., Ziska, L. H., Izaurralde, R. C., Ort, D., Thomson, A. M. and Wolfe, D., 2011. "Climate Impacts on Agriculture: Implications for Crop Production". Agronomy Journal. Volume 103, Issue 2–2011
- Hatfield, J., Prueger, J., 2015. "Temperature extremes: Effect on plant growth and development" Weather and Climate Extremes 10 (2015) 4-10
- Huntington, T. 2006. "Evidence for intensification of the global water cycle: Review and synthesis". Journal of Hydrology. Volume 319. Issues 1-4, 15 March 2006, pages 83-95.
- Karmakar, R., Das, I., Dutta, D. y Rakshit, A., 2016. "Potential Effects of Climate Change on Soil Properties: A Review". Science International, 4 (2): 51-73, 2016.
- Kazama, S. y Oki, T., 2006. "The effects of climate change on water resources". Global Environmental Research 10(2)/2006: 201-206
- Lhumeau, A., Cordero, D., 2012. "Adaptación basada en Ecosistemas: una respuesta al cambio climático". UICN, Quito, Ecuador. 17 pp.
- Ministerio del Medioambiente, 2017. Plan de acción nacional de cambio climático 2017-2022.
- Morales, C. y Ruiz, R., 2019. "Aguas Continentales". En: Informe País. Estado del Medio Ambiente en Chile 2018. Universidad de Chile. Instituto de Asuntos Públicos. 112-170.
- MOP, 2020. "Plan estratégico de gestión hídrica en la cuenca del Maule". Ministerio de Obras Públicas. Realizado por UTP Everis Chile S.A. - Hidrogestión S.A.
- Newman, J., 2004. "Climate change and cereal aphids: the relative effects of increasing CO<sub>2</sub> and temperature on aphid population dynamics". Global Change Biology (2003) 10, 5-15
- ODEPA, 2013. Cambio climático impacto en la agricultura heladas y sequías.
- Onwuka, B.M., 2016. "Effects of soil temperature on Some Soil properties and plant growth" Scholarly Journal of Agricultural Science Vol. 6(3), pp. 89-93 July, 2016
- Párek, N. 2017. "Climate change impact on soils: adaptation and mitigation". MOJ Eco Environ Sci. 2017; 2(3):136–139.
- Peace, N., 2020. "Impact of climate change on insects, pest, diseases and animal biodiversity". International Journal of Environmental Sciences & Natural Resources. Volume 23. Issue 5 – March 2020.
- Pefaur, J., 2020. "Evolución de la Fruticultura en los últimos 20 años". ODEPA
- Raza, A., Razzaq, A., Mehmood, S., Zou, X., Zhang, X., Lv, Y., Xu, J. 2019. "Impact of Climate Change on Crops Adaptation and Strategies to Tackle Its Outcome: A Review". Plants 2019, 8, 34
- Repo, T., Leinonen, I., Ryyppo, A. and Finer, L., 2004. "The effect of soil temperature on bid phenology, chlorophyll fluorescence, carbohydrate content and cold bardiness of Norway spruce seedlings". Physiologia Plantarum, 121: 93-100.
- Sánchez, L., 2022. "Cambio climático y sus efectos en la agricultura". Boletín INIA/N°463 Pág. 11-35.
- Santibañez, F., 2017. "El cambio climático y los recursos hídricos en Chile" En: Agricultura Chilena: Reflexiones y Desafíos al 2030 Publicación de la Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (ODEPA). 2017. Pags 147-178
- Tkemaladze, G.Sh., Makhshvili, K.A., 2016. "Climate changes and photosynthesis". Annals of Agrarian Science 14 (2016) 119-126.
- Yañez-López, R., Torres-Pacheco, I., Guevara-González, R., Hernández-Zul, M., Quijano Carranza, J., Rico-García, E., 2012. "The effect effect of climate change on plant diseases". African Journal of Biotechnology. Vol. 11 (10), pp. 2417-2428.
- Zhan, S., Song, C., Wang, J., Sheng, Y. Qian, J. 2019. "A Global Assessment of Terrestrial Evapotranspiration Increase Due to Surface Water Area Change". Earths Future. 2019 Mar; 7 (3): 266-282.



