



UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

**GENERACIÓN DE PROYECCIÓN DE SERIES DE EVAPORACION EN LA LAGUNA
CARÉN, REGIÓN METROPOLITANA, Y SUS FORZANTES METEOROLÓGICAS**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL

CLAUDIA FERNANDA SALAZAR BEIZA

PROFESOR GUÍA:
ALBERTO DE LA FUENTE STRANGER

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
PABLO MENDOZA ZÚÑIGA
NICOLÁS VÁSQUEZ PLACENCIA

ESTA MEMORIA FUE PARCIALMENTE FINANCIADA POR EL PROYECTO
FONDECYT REGULAR NÚMERO 1221191

SANTIAGO DE CHILE
2024

**RESUMEN DE MEMORIA PARA OPTAR AL
TÍTULO DE INGENIERÍA CIVIL**

POR: CLAUDIA FERNANDA SALAZAR BEIZA

FECHA: 2024

PROF. ALBERTO DE LA FUENTE STRANGER

GENERACIÓN DE PROYECCIÓN DE SERIES DE EVAPORACIÓN EN LA LAGUNA CARÉN, REGIÓN METROPOLITANA, Y SUS FORZANTES METEOROLÓGICAS

El cambio climático ha transformado los procesos hidrológicos en todo el mundo, con repercusiones profundas en la disponibilidad y distribución del agua. Entre estos procesos, la evaporación juega un papel crucial en el ciclo del agua y en el mantenimiento de los ecosistemas acuáticos y terrestres. Para proyectar los posibles impactos futuros del cambio climático en estos procesos, la comunidad científica utiliza una variedad de modelos de circulación general (MCG). Entre estos modelos se encuentran los de la sexta fase del Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados (CMIP6), que proporcionan proyecciones climáticas hasta el año 2100. Estas proyecciones son vitales para comprender y mitigar los impactos del cambio climático en la hidrología, la agricultura, la biodiversidad y la infraestructura, entre otros aspectos cruciales de la vida humana y el medio ambiente.

En este trabajo se busca, como objetivo principal, cuantificar y proyectar series de evaporación en el humedal Laguna Carén, ubicado en la comuna de Pudahuel, Santiago. Para ello, se utilizan datos extraídos de ocho modelos de circulación general del CMIP6, específicamente del escenario más pesimista, SSP5-8.5. Sin embargo, debido a la gran resolución horizontal que poseen los GCM y, por ende, su baja precisión para representar procesos hidrológicos a escalas locales, se realiza un escalamiento estadístico de estos datos. Para este propósito, se emplea el modelo de reanálisis ERA5, que proporciona datos con una resolución más adecuada para la escala del estudio. Posteriormente, se calculan las series de evaporación utilizando el método combinado, el cual integra los enfoques aerodinámicos y de intercambio de masa.

Como resultado, se tiene que cinco de los ocho modelos presentan un aumento sostenido de la evaporación a lo largo del tiempo, lo cual es el escenario esperable debido al contexto de cambio climático y el aumento en la temperatura que este produce. Por otro lado, otros tres modelos mostraron una tendencia a la baja. Estas discrepancias entre modelos subrayan la incertidumbre inherente a las proyecciones climáticas y la importancia de considerar múltiples escenarios y enfoques para una evaluación más robusta.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero agradecer a las personas que me han visto crecer y me han apoyado en cada paso durante mi vida y en especial en esta última etapa de la universidad porque sin ellos no hubiese llegado tan lejos. Agradezco enormemente a mi mamá por ser la persona más incondicional del mundo, por acompañarme en los buenos momentos y ser capaz de levantarme y sacarme una sonrisa en los peores. A mi hermano David por su increíble paciencia, consejos y abrazos cuando más lo he necesitado. Y por último a mis abuelitos: Papi y Mami, que sin ellos no sería ni la mitad de lo que soy hoy y espero que de alguna forma u otra devolverles todo lo que hicieron y hacen por mi día a día.

También quiero agradecer a todos los amigos que he hecho a lo largo de mi vida. A mis amigas del colegio que literal me han visto crecer desde pequeña y me han acompañado en todas las etapas de mi vida. Igualmente, a los amigos que hice durante mi paso por la universidad. Sepan que me llevo los mejores recuerdos de ustedes, de todas las risas y a veces gritos en la biblioteca, de todas las conversaciones y almuerzos que compartimos y de todas las juntas que hicimos. Espero estar ahí cuando cumplan todos sus sueños y metas, porque estoy segura de que así será.

Y, por último, aunque no lo van a leer jamás, quiero darles las gracias a mis perritas. Gracias Milly por acompañarme 19 años y ser tan buena compañera, por quedarte estudiando conmigo hasta tan tarde a pesar de que se te cayeran los ojitos del sueño. Fuiste parte de este proceso y aunque partiste antes de que terminara, en parte todo esto es gracias a ti. Y a mi Emmita, que llegaste a revolver la casa con tus locuras, languetazos y amor. ¡Gracias por siempre sacarme una risa y por enseñarme que siempre se puede empezar de cero y volver a querer!

TABLA DE CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN	1
1.1	MOTIVACIÓN	1
1.2	OBJETIVOS	2
	Objetivos Específicos	2
2	MARCO TEÓRICO	3
2.1	CAMBIO CLIMÁTICO	3
2.2	MODELOS DE CIRCULACIÓN GENERAL	7
2.3	ESCALAMIENTO ESTADÍSTICO	9
2.4	EVAPORACIÓN EN HUMEDALES	11
2.5	FORZANTES METEOROLÓGICAS QUE AFECTAN EL PROCESO DE EVAPORACIÓN EN UN HUMEDAL	15
3	ZONA DE ESTUDIO	18
4	METODOLOGÍA	21
4.1	RECOPILACIÓN DE DATOS	21
4.2	ESCALAMIENTO ESTADÍSTICO	25
4.3	CÁLCULO DE SERIES DE EVAPORACIÓN	26
5	RESULTADOS	28
5.1	FORZANTES METEOROLÓGICAS EXTRAÍDAS DE LOS CGM	28
5.2	SERIES DE EVAPORACIÓN EN LA LAGUNA CARÉN	31
6	ANÁLISIS Y DISCUSIÓN	32
6.1	FORZANTES METEOROLÓGICAS	32
6.2	CÁLCULO DE LAS SERIES DE EVAPORACIÓN	36
7	CONCLUSIONES	38
8	BIBLIOGRAFÍA	39
9	ANEXOS	43
A.	RECOPILACIÓN DATOS DE ERA5	43
B.	DATOS EXTRAÍDOS DE LOS GCMS	46

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 3. 1: PARÁMETROS MORFOMÉTRICOS DE LA LAGUNA CARÉN OCTUBRE 2016. FUENTE: ADAPTACIÓN ROMÁN CASTILLO (2017).....	19
TABLA 4. 1: VARIABLES DESCARGADAS Y SU DESCRIPCIÓN.	22
TABLA 6. 1: PENDIENTE DE SEN PARA CADA FORZANTE METEOROLÓGICA EN ESTUDIO.	32
TABLA 6. 2: PENDIENTE DE SEN PARA LAS SERIES DE EVAPORACIÓN DE CADA MODELO DE CIRCULACIÓN GENERAL.	36

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 2. 1: VARIACIÓN OBSERVADA DE A) EL PROMEDIO MUNDIAL DE LAS TEMPERATURAS EN SUPERFICIE; B) EL PROMEDIO DEL NIVEL MEDIO DEL MAR A PARTIR DE DATOS MAREOMÉTRICOS Y SATELITALES; Y C) LA CUBIERTA DE NIEVE EN EL HEMISFERIO NORTE. FUENTE IPCC (2007).	4
FIGURA 2. 2: VARIACIONES DE LA TEMPERATURA GLOBAL EN LA SUPERFICIE PARA LOS CUATRO ESCENARIOS RCP. FUENTE: IPCC (2014).	6
FIGURA 2. 3: ESQUEMA DE GRILLAS DE MCG. FUENTE: ADAPTACIÓN DEL CAMBIO CLIMÁTICO GLOBAL (2016).	8
FIGURA 2. 4: ESQUEMA DE LA UBICACIÓN DEL NIVEL FREÁTICO EN HUMEDALES UBICADOS EN ZONAS DE SOBREEXPLOTACIÓN DE AGUA SUBTERRÁNEA (IMAGEN IZQUIERDA) Y EN ZONAS CON MENOS EXTRACCIÓN DE AGUA (IMAGEN DERECHA). FUENTE: RODRIGUES CAPÍTULO ET AL. (2020).	11
FIGURA 2. 5: TENDENCIAS MUNDIALES DE LA EXTENSIÓN DE LOS HUMEDALES MARINOS/COSTEROS Y CONTINENTALES SEGÚN LAS ESTIMACIONES DEL ÍNDICE DE EXTENSIÓN DE HUMEDALES. FUENTE: ADAPTACIÓN DE LEADLEY ET AL. (2014).	13
FIGURA 2. 6: ILUSTRACIÓN DE LA VELOCIDAD DEL VIENTO SOBRE LA EVAPORACIÓN EN CONDICIONES ATMOSFÉRICAS SECAS Y CALIENTE COMPARADAS CON CONDICIONES HÚMEDAS Y TIBIAS. FUENTE: ALLEN (2006).	17
FIGURA 3. 1: UBICACIÓN LAGUNA CARÉN, REGIÓN METROPOLITANA. FUENTE: GOOGLE MAPS.	18
FIGURA 3. 2: BATIMETRÍA LAGUNA CARÉN. FUENTE: ROMÁN CASTILLO (2017).	19
FIGURA 5. 1: VARIACIÓN DEL PROMEDIO ANUAL DE LA TEMPERATURA. LA LÍNEA DE COLOR NEGRO INDICA EL PROMEDIO DE LA FORZANTE METEOROLÓGICA DE LOS MODELOS ESTUDIADOS.	28
FIGURA 5. 2: VARIACIÓN DEL PROMEDIO ANUAL DE LA HUMEDAD RELATIVA. LA LÍNEA DE COLOR NEGRO INDICA EL PROMEDIO DE LA FORZANTE METEOROLÓGICA DE LOS MODELOS ESTUDIADOS.	29
FIGURA 5. 3: VARIACIÓN DEL PROMEDIO ANUAL DE LA PRESIÓN ATMOSFÉRICA. LA LÍNEA DE COLOR NEGRO INDICA EL PROMEDIO DE LA FORZANTE METEOROLÓGICA DE LOS MODELOS ESTUDIADOS.	29
FIGURA 5. 4: VARIACIÓN DEL PROMEDIO ANUAL DE LA VELOCIDAD DEL VIENTO. LA LÍNEA DE COLOR NEGRO INDICA EL PROMEDIO DE LA FORZANTE METEOROLÓGICA DE LOS MODELOS ESTUDIADOS.	30

FIGURA 5. 5: VARIACIÓN DEL PROMEDIO ANUAL DE LA RADIACIÓN SOLAR. LA LÍNEA DE COLOR NEGRO INDICA EL PROMEDIO DE LA FORZANTE METEOROLÓGICA DE LOS MODELOS ESTUDIADOS.	30
FIGURA 5. 6: VARIACIÓN ANUAL DE LA EVAPORACIÓN EN LA LAGUNA CARÉN. LA LÍNEA DE COLOR NEGRO INDICA EL PROMEDIO DE LA EVAPORACIÓN DE LOS DISTINTOS MODELOS ESTUDIADOS.	31
FIGURA 6. 1: PROMEDIO ANUAL DE LA TEMPERATURA MEDIA EN CHILE. FUENTE: REPORTE ANUAL DE LA EVOLUCIÓN DEL CLIMA EN CHILE, 2021.....	33
ANEXO A. 1: VARIACIÓN DEL PROMEDIO ANUAL DE LA TEMPERATURA EN EL PERIODO 1973-2014. LA LÍNEA SEGMENTADA INDICA LA TENDENCIA LINEAL.....	43
ANEXO A. 2: VARIACIÓN DEL PROMEDIO ANUAL DE LA HUMEDAD RELATIVA EN EL PERIODO 1973-2014. LA LÍNEA SEGMENTADA INDICA LA TENDENCIA LINEAL.....	43
ANEXO A. 3: VARIACIÓN DEL PROMEDIO ANUAL DE LA VELOCIDAD DEL VIENTO EN EL PERIODO 1973-2014. LA LÍNEA SEGMENTADA INDICA LA TENDENCIA LINEAL.....	44
ANEXO A. 4: VARIACIÓN DEL PROMEDIO ANUAL DE LA RADIACIÓN SOLAR EN EL PERIODO 1973-2014. LA LÍNEA SEGMENTADA INDICA LA TENDENCIA LINEAL.....	44
ANEXO A. 5: VARIACIÓN DEL PROMEDIO ANUAL DE LA PRESIÓN ATMOSFÉRICA EN EL PERIODO 1973-2014. LA LÍNEA SEGMENTADA INDICA LA TENDENCIA LINEAL.....	45
FIGURA B. 1: VARIACIÓN DEL PROMEDIO ANUAL DE LA TEMPERATURA MEDIA (A), HUMEDAD RELATIVA (B), VELOCIDAD DEL VIENTO (C), RADIACIÓN SOLAR (D) Y PRESIÓN ATMOSFÉRICA (E) SEGÚN EL MODELO DE CIRCULACIÓN GENERAL AWI-CM-1-1-MR. LA LÍNEA AZUL REPRESENTA LOS DATOS HISTÓRICOS DEL MODELO, MIENTRAS QUE LA LÍNEA NARANJA MUESTRA LAS PROYECCIONES DEL ESCENARIO SSP5-8.5.....	46
FIGURA B. 2: VARIACIÓN DEL PROMEDIO ANUAL DE LA TEMPERATURA MEDIA (A), HUMEDAD RELATIVA (B), VELOCIDAD DEL VIENTO (C), RADIACIÓN SOLAR (D) Y PRESIÓN ATMOSFÉRICA (E) SEGÚN EL MODELO DE CIRCULACIÓN GENERAL AWI-CM-1-1-MR. LA LÍNEA AZUL REPRESENTA LOS DATOS HISTÓRICOS DEL MODELO, MIENTRAS QUE LA LÍNEA NARANJA MUESTRA LAS PROYECCIONES DEL ESCENARIO SSP5-8.5.....	47
FIGURA B. 3: VARIACIÓN DEL PROMEDIO ANUAL DE LA TEMPERATURA MEDIA (A), HUMEDAD RELATIVA (B), VELOCIDAD DEL VIENTO (C), RADIACIÓN SOLAR (D) Y PRESIÓN ATMOSFÉRICA (E) SEGÚN EL MODELO DE CIRCULACIÓN GENERAL EC-EARTH3. LA LÍNEA AZUL REPRESENTA LOS DATOS HISTÓRICOS DEL MODELO, MIENTRAS QUE LA LÍNEA NARANJA MUESTRA LAS PROYECCIONES DEL ESCENARIO SSP5-8.5.....	48
FIGURA B. 4: VARIACIÓN DEL PROMEDIO ANUAL DE LA TEMPERATURA MEDIA (A), HUMEDAD RELATIVA (B), VELOCIDAD DEL VIENTO (C), RADIACIÓN SOLAR (D) Y PRESIÓN ATMOSFÉRICA (E) SEGÚN EL MODELO DE CIRCULACIÓN GENERAL GFDL-CM4. LA LÍNEA AZUL	

REPRESENTA LOS DATOS HISTÓRICOS DEL MODELO, MIENTRAS QUE LA LÍNEA NARANJA MUESTRA LAS PROYECCIONES DEL ESCENARIO SSP5-8.5.....	49
FIGURA B. 5: VARIACIÓN DEL PROMEDIO ANUAL DE LA TEMPERATURA MEDIA (A), HUMEDAD RELATIVA (B), VELOCIDAD DEL VIENTO (C), RADIACIÓN SOLAR (D) Y PRESIÓN ATMOSFÉRICA (E) SEGÚN EL MODELO DE CIRCULACIÓN GENERAL GFDL-ESM4. LA LÍNEA AZUL REPRESENTA LOS DATOS HISTÓRICOS DEL MODELO, MIENTRAS QUE LA LÍNEA NARANJA MUESTRA LAS PROYECCIONES DEL ESCENARIO SSP5-8.5.....	50
FIGURA B. 6: VARIACIÓN DEL PROMEDIO ANUAL DE LA TEMPERATURA MEDIA (A), HUMEDAD RELATIVA (B), VELOCIDAD DEL VIENTO (C), RADIACIÓN SOLAR (D) Y PRESIÓN ATMOSFÉRICA (E) SEGÚN EL MODELO DE CIRCULACIÓN GENERAL INM-CM4-8. LA LÍNEA AZUL REPRESENTA LOS DATOS HISTÓRICOS DEL MODELO, MIENTRAS QUE LA LÍNEA NARANJA MUESTRA LAS PROYECCIONES DEL ESCENARIO SSP5-8.5.....	51
FIGURA B. 7: VARIACIÓN DEL PROMEDIO ANUAL DE LA TEMPERATURA MEDIA (A), HUMEDAD RELATIVA (B), VELOCIDAD DEL VIENTO (C), RADIACIÓN SOLAR (D) Y PRESIÓN ATMOSFÉRICA (E) SEGÚN EL MODELO DE CIRCULACIÓN GENERAL INM-CM5-0. LA LÍNEA AZUL REPRESENTA LOS DATOS HISTÓRICOS DEL MODELO, MIENTRAS QUE LA LÍNEA NARANJA MUESTRA LAS PROYECCIONES DEL ESCENARIO SSP5-8.5.....	52
FIGURA B. 8: VARIACIÓN DEL PROMEDIO ANUAL DE LA TEMPERATURA MEDIA (A), HUMEDAD RELATIVA (B), VELOCIDAD DEL VIENTO (C), RADIACIÓN SOLAR (D) Y PRESIÓN ATMOSFÉRICA (E) SEGÚN EL MODELO DE CIRCULACIÓN GENERAL MPI-ESM1-2-HR. LA LÍNEA AZUL REPRESENTA LOS DATOS HISTÓRICOS DEL MODELO, MIENTRAS QUE LA LÍNEA NARANJA MUESTRA LAS PROYECCIONES DEL ESCENARIO SSP5-8.5.....	53

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Motivación

Las emisiones de gases de efecto invernadero desde la era preindustrial han desencadenado consecuencias climáticas notables, tales como el incremento de la temperatura global, la disminución de los volúmenes de hielo, cambios en los patrones de lluvia a nivel mundial y un incremento en la frecuencia de fenómenos climáticos extremos, entre otros (IPCC, 2014). En este contexto, es importante reconocer el impacto significativo que ha tenido el cambio climático en los ciclos hidrológicos, afectando sus distintos procesos, tales como la transpiración, condensación, evaporación y distribución de las precipitaciones (Huntington, 2006).

Dentro de los procesos afectados por el cambio climático, la evaporación juega un papel crucial. Este fenómeno, que consiste en la transformación del agua líquida en vapor de agua, es impulsado principalmente por la energía solar, aunque también está influenciado por otros factores como la temperatura del aire, la humedad relativa y la velocidad del viento. La evaporación es fundamental para la redistribución de la humedad atmosférica y la generación de precipitaciones. Según estudios recientes (Allen et al., 2019), la evaporación también desempeña un papel vital en la regulación del clima y en el mantenimiento del equilibrio hídrico de los ecosistemas, especialmente en regiones sensibles como lo son los humedales (Gorgen, H., W., & Andermann, 2018). Sin embargo, estos se encuentran entre los ecosistemas más vulnerables al cambio climático debido a su ubicación en áreas bajas y su sensibilidad a las variaciones en los niveles de agua y las condiciones hidrológicas (Davidson, 2014) (Hughes, 2017).

Para comprender mejor las consecuencias del cambio climático en la evaporación y otros procesos hidrológicos, es esencial proyectar estos cambios hacia el futuro (IPCC, 2014). Sin embargo, primero es importante entender la sensibilidad de la evaporación a las variaciones de forzantes meteorológicas en el clima presente. Por esta razón, en el presente trabajo de título se analizan las respuestas de la evaporación a cambios en

forzantes meteorológicas actuales y se generan proyecciones de series de evapotranspiración hasta el año 2100 para el caso de estudio del humedal Laguna Carén, un ecosistema altamente sensible a los cambios en las condiciones hidrológicas y climáticas. Este estudio se basa en la utilización de modelos climáticos globales del CMIP6, los cuales entregan simulaciones de distintas forzantes meteorológicas y su variación a lo largo del tiempo, que afectan al proceso de evaporación, tales como la radiación solar, temperatura del aire, humedad relativa, velocidad del viento y presión atmosférica.

1.2 Objetivos

El objetivo general de este estudio es cuantificar las pérdidas causadas por evaporación en la Laguna Carén, así como también se busca realizar una proyección prospectiva que permita comprender y anticipar cómo estas pérdidas pueden evolucionar en el futuro.

Objetivos Específicos

Para poder cumplir con el objetivo general de este trabajo de título, se han definido los siguientes objetivos específicos:

- Generar una base de datos propia para forzantes meteorológicas relacionadas con el proceso de evaporación.
- Realizar un escalamiento estadístico con las forzantes meteorológicas.

2 MARCO TEÓRICO

Dentro del siguiente capítulo se desarrolla y explican los aspectos teóricos en los cuales se enmarca la presente memoria. En primer lugar, se abordan los conceptos generales de cambio climático y se revisan los avances en su estudio. A continuación, se presenta el concepto de Modelo de Circulación General (GCM) y se discute cómo estos modelos se integran con el escalamiento estadístico para mejorar la precisión de las proyecciones climáticas. Finalmente, se examina cómo el cambio climático afecta a la evaporación en los humedales.

2.1 Cambio Climático

La dependencia histórica de los combustibles fósiles en los sistemas de producción de energía ha contribuido al aumento de los gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera. Un ejemplo notable es el dióxido de carbono (CO₂), cuya presencia es natural hasta cierto punto. Sin embargo, la actividad humana, como la deforestación y la quema de combustibles fósiles, ha incrementado drásticamente sus concentraciones desde el inicio de la Revolución Industrial (IPCC, 2021).

De acuerdo con un informe de la Organización Meteorológica Mundial (OMM) publicado en noviembre de 2023, las concentraciones de CO₂ y otros gases de efecto invernadero han alcanzado niveles récord, superando en un 147 % los niveles preindustriales. Esto, es un claro indicador del impacto devastador de la actividad humana en el sistema climático global.

Los gases de efecto invernadero tienen la característica única de retener la radiación solar absorbida por la Tierra, prolongando su permanencia en la atmósfera. Este fenómeno se debe a la capacidad de estos gases, como el dióxido de carbono (CO₂), el metano (CH₄) y el vapor de agua, de absorber y reemitir la radiación infrarroja emitida por la superficie terrestre, creando una especie de manta que atrapa el calor en la atmósfera. Como consecuencia directa, el aumento de la concentración de GEI provoca un desequilibrio en el sistema climático, incrementando la retención de calor y generando un fenómeno conocido como calentamiento global. Este aumento de la temperatura media de la Tierra tiene impactos en los ecosistemas, los patrones climáticos y la biodiversidad (IPCC, 2021), con consecuencias que incluyen el derretimiento de los casquetes polares, el aumento del nivel del mar, la acidificación de los océanos y eventos climáticos extremos más frecuentes e intensos (NOAA, 2021).

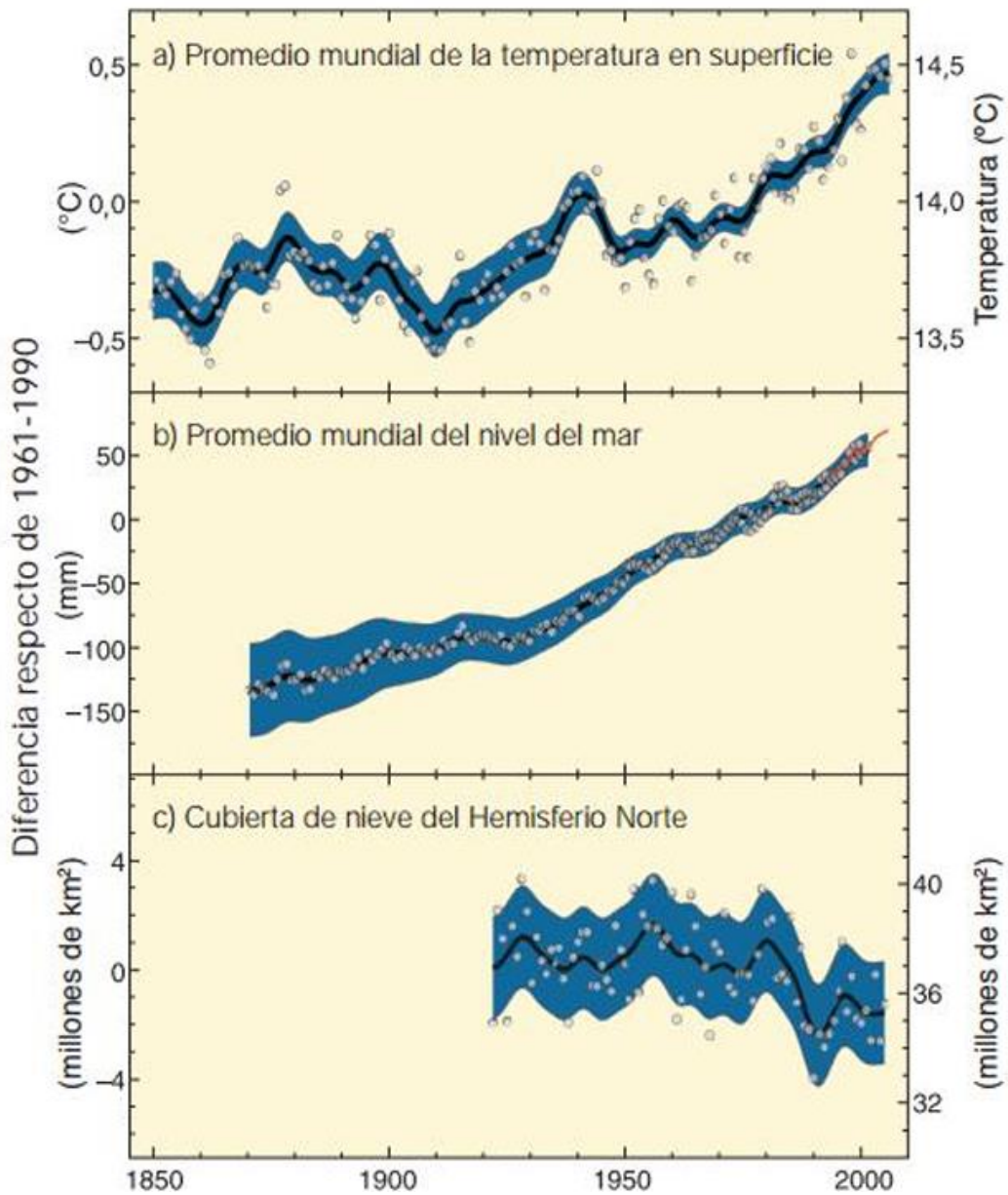


Figura 2. 1: Variación observada de a) El promedio mundial de las temperaturas en superficie; b) el promedio del nivel medio del mar a partir de datos mareométricos y satelitales; y c) la cubierta de nieve en el hemisferio norte. Fuente IPCC (2007).

El cambio climático y la contaminación se encuentran intrínsecamente ligados, configurando un futuro que demanda un análisis exhaustivo y una acción concertada. Para comprender mejor este futuro y las posibles soluciones, numerosos estudios se han desarrollado utilizando modelos climáticos de tecnología avanzada. En este contexto, el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC), establecido por la Organización de las Naciones Unidas (ONU), juega un rol fundamental. Su objetivo es evaluar la información científica relevante para comprender los riesgos asociados al cambio climático, brindando una base sólida para la toma de decisiones y la acción proactiva.

Bajo este contexto, el IPCC ha creado dos conjuntos de escenarios climáticos: las Trayectorias de Concentraciones Representativas (RCP, por sus siglas en inglés) y las Trayectorias Socioeconómicas Compartidas (SSP, por sus siglas en inglés). Las RCP describen diferentes niveles de emisiones de gases de efecto invernadero y forzamiento radiativo. Existen cuatro RCP: RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 y RCP8.5, donde el número después de RCP indica el forzamiento radiativo a finales del siglo XXI en vatios por metro cuadrado (W/m^2). El RCP2.6 representa un escenario de mitigación fuerte, lo que lleva a una estabilización temprana de las concentraciones de gases de efecto invernadero y un menor calentamiento global (IPCC, 2021), mientras que el RCP8.5 representa un escenario más pesimista, donde las emisiones continúan aumentando sin control, lo que resulta en un forzamiento radiativo significativo y un calentamiento global considerable (O'Neill et al., 2014).

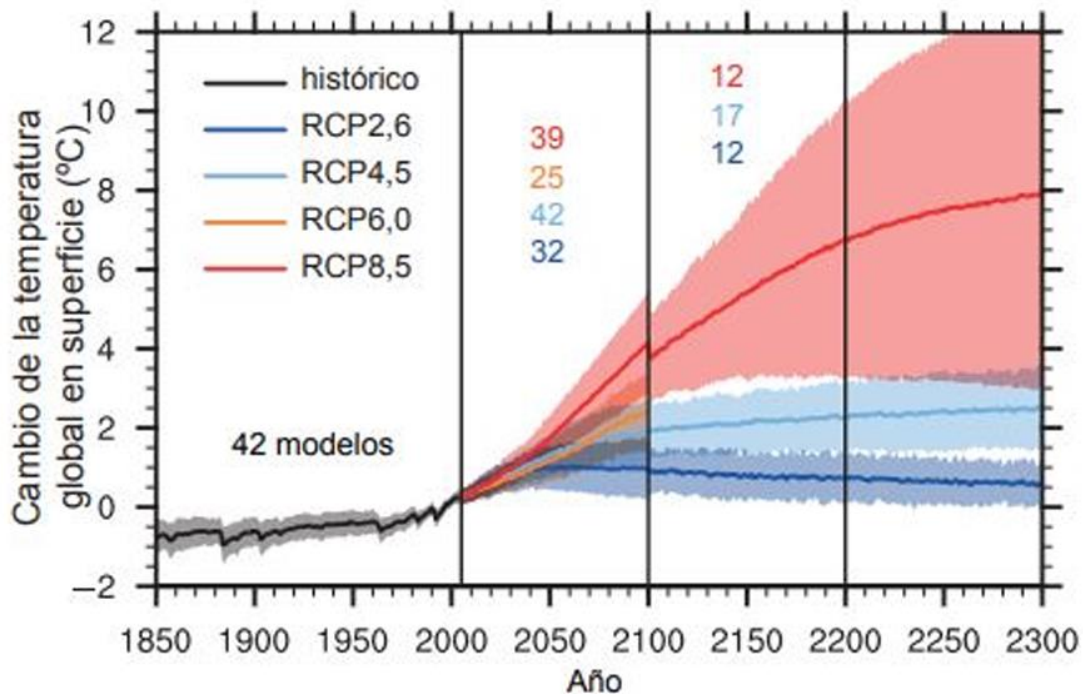


Figura 2. 2: Variaciones de la temperatura global en la superficie para los cuatro escenarios RCP. Fuente: IPCC (2014).

Por otro lado, los cinco escenarios SSP (SP1, SSP2, SSP3, SSP4 y SSP5) exploran cómo podrían interactuar los cambios en la sociedad, la economía y la tecnología para influir en las emisiones de GEI y el clima en el futuro. Cada escenario describe un futuro socioeconómico diferente. Específicamente, el escenario SSP1, denominado "Sostenibilidad", se caracteriza por un rápido avance tecnológico, una mayor igualdad social y una fuerte cooperación internacional para abordar el cambio climático y otros desafíos ambientales. Este escenario contrasta con el SSP5, "Desarrollo basado en combustibles fósiles", que supone una continuación de las tendencias actuales de desarrollo, con un enfoque en la maximización del crecimiento económico y el uso extensivo de recursos fósiles (Riahi et al., 2016). Este escenario conlleva altas emisiones de GEI y un aumento significativo en el calentamiento global.

Las proyecciones climáticas futuras proporcionadas por los MCG son la principal fuente de información para la investigación del cambio climático y sus impactos relacionados. Los informes del IPCC se basan en el Proyecto de Intercomparación de Modelos

Acoplados (CMIP), un marco colaborativo de modelización climática coordinado por el Programa Mundial de Investigación Climática (PMIC). Actualmente, CMIP se encuentra en su sexta fase (CMIP6) y constituye la última generación de futuros escenarios climáticos (Eyring et al., 2016).

2.2 Modelos de Circulación General

Los Modelos de Circulación General (GCM, por sus siglas en inglés) son herramientas computacionales que simulan tanto los procesos físicos como los dinámicos que determinan el clima de la Tierra. Estos modelos integran las leyes de la física y la química para representar las interacciones entre la atmósfera, los océanos y la criósfera.

Los GCM son herramientas esenciales para proyectar el cambio climático futuro y se utilizan para simular cómo el clima de la Tierra podría cambiar en respuesta a diferentes escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero. Las proyecciones del cambio climático proporcionan información crucial para la toma de decisiones sobre la adaptación y la mitigación del cambio climático.

Estos modelos, desarrollados por diferentes centros de investigación y universidades, por lo general se ejecutan en grillas horizontales que dividen la Tierra en celdas con diferentes resoluciones espaciales. Las grillas de alta resolución, caracterizadas por tener celdas más pequeñas, permiten representar con mayor precisión los detalles locales del clima. Por otro lado, las grillas de baja resolución, es decir, aquellas que tienen celdas más grandes, son menos precisas a nivel local, pero ofrecen una mayor eficiencia computacional.

Esta diferencia en la resolución conlleva implicancias para la representación de los procesos climáticos a diferentes escalas. Por lo general, los resultados de las simulaciones realizadas con GCM se entregan utilizando grillas de baja resolución, lo que limita la capacidad de representar procesos a escala regional. Esto es particularmente relevante para países como Chile, que poseen un terreno geográficamente complejo, con notables diferencias orográficas, como las presentes en la cordillera de los Andes.

Sharma et al. (2007) señala estas limitaciones, destacando cómo la resolución horizontal influye en la representación de fenómenos climáticos locales y regionales. La falta de detalle en las simulaciones a escala regional puede dificultar la comprensión y predicción de eventos climáticos específicos, lo que resalta la necesidad de mejorar la resolución horizontal en futuras investigaciones climáticas y modelos predictivos.

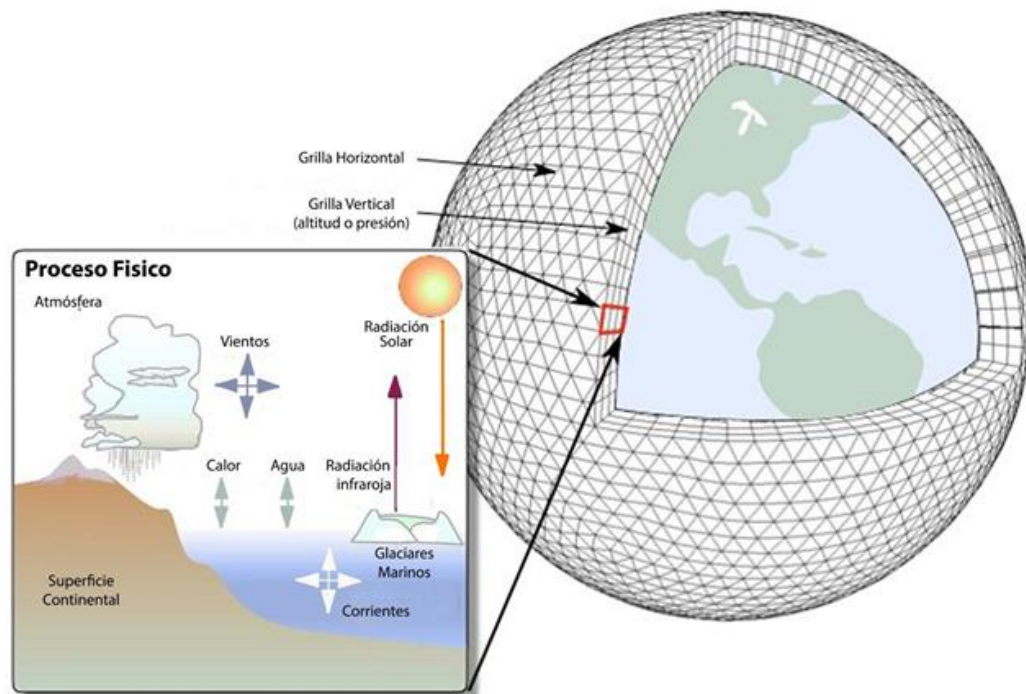


Figura 2. 3: Esquema de grillas de MCG. Fuente: Adaptación del Cambio Climático Global (2016).

En la Figura 2. 3 se muestra una representación simplificada de la utilización de grillas para la predicción del clima de la Tierra. Los diferentes elementos del diagrama interactúan entre sí para crear los patrones climáticos que se observan en la superficie terrestre.

2.3 Escalamiento Estadístico

El escalamiento, en el contexto de los Modelos de Circulación General, también conocido como desagregación espacial, es una técnica fundamental para traducir las simulaciones climáticas a escalas horizontales más finas. Los GCM simulan el clima a una resolución horizontal gruesa (decenas o cientos de kilómetros), mientras que muchas aplicaciones, como la planificación urbana o la gestión de recursos hídricos, requieren información climática a escala local.

Existen actualmente dos enfoques principales para el escalamiento de Modelos Climáticos Globales: dinámicos y estadísticos. Los métodos dinámicos involucran el uso de condiciones iniciales y de borde de un GCM para impulsar un Modelo Climático Regional (RCM). En un RCM, las propiedades atmosféricas se calculan en grillas más finas, resolviendo ecuaciones termodinámicas y de movimiento (Spak et al., 2007). Sin embargo, este enfoque conlleva una incertidumbre significativa en la parametrización de procesos a escalas más pequeñas. Además, al no ser alimentado con observaciones in-situ, el RCM puede mostrar sesgos importantes en comparación con estas mediciones directas.

Por otro lado, el escalamiento estadístico evalúa relaciones espaciales y temporales entre variables climáticas de gran escala y locales sobre un periodo histórico y extiende estas relaciones para proyectarlas a periodos climáticos futuros no observados. Los métodos de escalamiento estadístico pueden clasificarse en tres grupos:

- Análogos: busca patrones similares de las variables comunes en un entorno regional.
- Comparación de distribuciones:
 - Regresivos: relaciona algún predictor derivado del GCM con una variable a predecir. Pueden ser lineales o no lineales.
 - Basado en cuantiles: busca ajustar distribución de modelos espacialmente escalados con observaciones, considerando modelos uni-variados y multivariados.
- Machine Learning: utiliza algoritmos estadísticos avanzados para reproducir características climáticas históricas.

Para este estudio, se emplea el método de escalamiento MBCn (Corrección de Sesgos y Análogos Construidos Multisitio), propuesto por Cannon et al. (2018). Este enfoque multivariado se fundamenta en la comparación de las distribuciones de variables climáticas entre el Modelo de Circulación Global y los datos observados. Una característica destacada de este método es su capacidad para preservar las relaciones

físicas entre las diversas variables climáticas analizadas, lo que resulta en simulaciones más consistentes y realistas (Teutschbein et al., 2012).

El método MBCn se basa en tres conjuntos de datos: observaciones históricas, simulaciones históricas y proyecciones o predicciones de los modelos climáticos. El proceso se divide en:

- Calibración: se ajusta el modelo MBCn para asegurar que las simulaciones históricas y proyectadas del GCM coincidan con los datos observacionales (Maraun, 2018).
- Construcción de análogos: se buscan días en las observaciones históricas que tengan características climáticas similares al día simulado que se quiere ajustar. Estos son los llamados análogos y se utilizan para tener en cuenta las relaciones entre las variables climáticas.
- Corrección de sesgos: se aplica una corrección a las simulaciones del modelo para tener en cuenta las diferencias entre las simulaciones y las observaciones. Esta corrección se basa en los análogos y en la información de las simulaciones históricas (Teutschbein et al., 2012).
- Generación de datos: se utiliza el método QDM (Quantile Distribution Matching) para ajustar la distribución de probabilidad de las simulaciones del MCG a la distribución de probabilidad de las observaciones (Maraun, 2018).

2.4 Evaporación en Humedales

Los humedales, caracterizados por la predominancia del agua en su entorno, albergan una rica diversidad vegetal y animal (Ramsar, 2006). Estos espacios pueden ser naturales o artificiales, abarcando una amplia variedad de tipos, desde extensas marismas hasta aguas poco profundas, desempeñando un papel fundamental en la regulación del entorno circundante. Su distribución geográfica es variada, encontrándose en llanuras aluviales, costas y zonas montañosas, adaptándose a distintas condiciones ambientales. La Figura 2. 4 ilustra esta diversidad, mostrando cómo la capa freática puede estar cerca de la superficie terrestre en algunos casos, mientras que, en otros, la tierra está completamente cubierta por agua. Esta variabilidad ambiental influye directamente en la vida vegetal y animal que habita en estos ecosistemas, donde el agua se posiciona como el elemento principal que define su estructura y función.

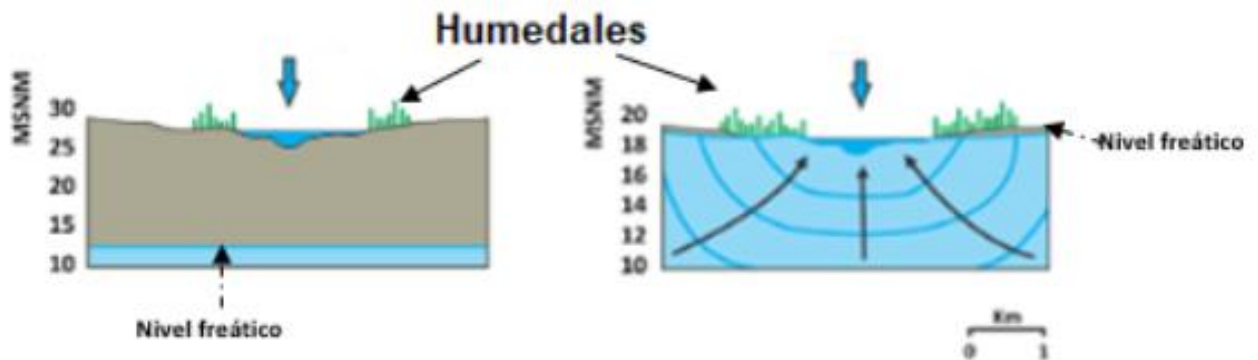


Figura 2. 4: Esquema de la ubicación del nivel freático en humedales ubicados en zonas de sobreexplotación de agua subterránea (imagen izquierda) y en zonas con menos extracción de agua (imagen derecha). Fuente: Rodrigues Capítulo et al. (2020).

Según Cowardin (1979), para que un humedal sea considerado como tal, debe cumplir con al menos uno de los siguientes atributos: i) periódicamente, la tierra sostiene vegetación predominantemente hidrófita; ii) el sustrato es predominantemente suelo hídrico, con mal drenaje o sin drenaje; iii) el sustrato está saturado con agua o cubierto

por aguas superficiales en algún momento durante la temporada de crecimiento de la vegetación anual.

La Convención sobre los Humedales, conocida también como la Convención de Ramsar, surgió en Ramsar, Irán, en 1971 con el objetivo principal de conservar y utilizar de manera racional los humedales. Para abordar la ambigüedad en la definición de los humedales, esta convención desarrolló una clasificación que proporciona un marco amplio para identificar rápidamente los principales hábitats de humedales en todo el mundo. Estos hábitats se clasifican según su ubicación en el paisaje y el tipo de vegetación presente, dividiéndose en tres grandes grupos: marinos, continentales y artificiales.

Los humedales, que representan aproximadamente del 6,2 % al 7,6 % de la superficie terrestre global (Di L, et al., 2017), desempeñan un papel crucial en la provisión de diversos servicios ecosistémicos. Uno de los roles principales que cumplen es la regulación del clima a través de procesos como la evapotranspiración, que incluye tanto la evaporación del agua desde la superficie del suelo como la transpiración de las plantas. Este mecanismo ayuda a igualar las diferencias de temperatura en el espacio y en el tiempo (Cizkova et al., 2013).

Estudios han evidenciado que la evapotranspiración puede influir en la formación de nubes. Taylor (2010), se observó un aumento del 54 % en la probabilidad de iniciación de nuevas tormentas en áreas circundantes a los humedales, lo que se relaciona con períodos de inundaciones. Estos hallazgos resaltan la importancia de los humedales en el ciclo hidrológico y su contribución a la regulación climática a nivel regional y global.

Otro de los atributos más destacados de los humedales es su capacidad para actuar como esponjas naturales. Esta característica se refiere a su habilidad para absorber y retener el agua caída durante lluvias o tormentas durante extensos periodos de tiempo, y posteriormente liberarla durante períodos de sequía, ya sea mediante evapotranspiración, flujo subterráneo o descarga en cuerpos de agua superficiales cercanos (Mitsch & Gosselink, 2015).

Además, los humedales desempeñan un papel crucial en el ciclo del carbono. Estos ecosistemas tienen la capacidad de almacenar carbono dentro de sus comunidades vegetales y en el suelo, en lugar de liberarlo a la atmósfera en forma de dióxido de carbono o metano. Esta capacidad de almacenamiento de carbono hace que los humedales sean importantes reguladores climáticos a nivel global. Además de moderar las condiciones climáticas, su capacidad para retener carbono puede proporcionar una influencia regulatoria significativa para mitigar el cambio climático (Ponnamperuma, 1972).

A pesar de la importancia que tienen los humedales para la regulación del clima y la provisión de servicios al ecosistema, se estima que cerca del 64 % al 71 % de los humedales existentes desde la época preindustrial han desaparecido debido a la expansión de la agricultura, la urbanización y la construcción de infraestructura (Davidson, N., 2014), como se observa en la Figura 2. 5.

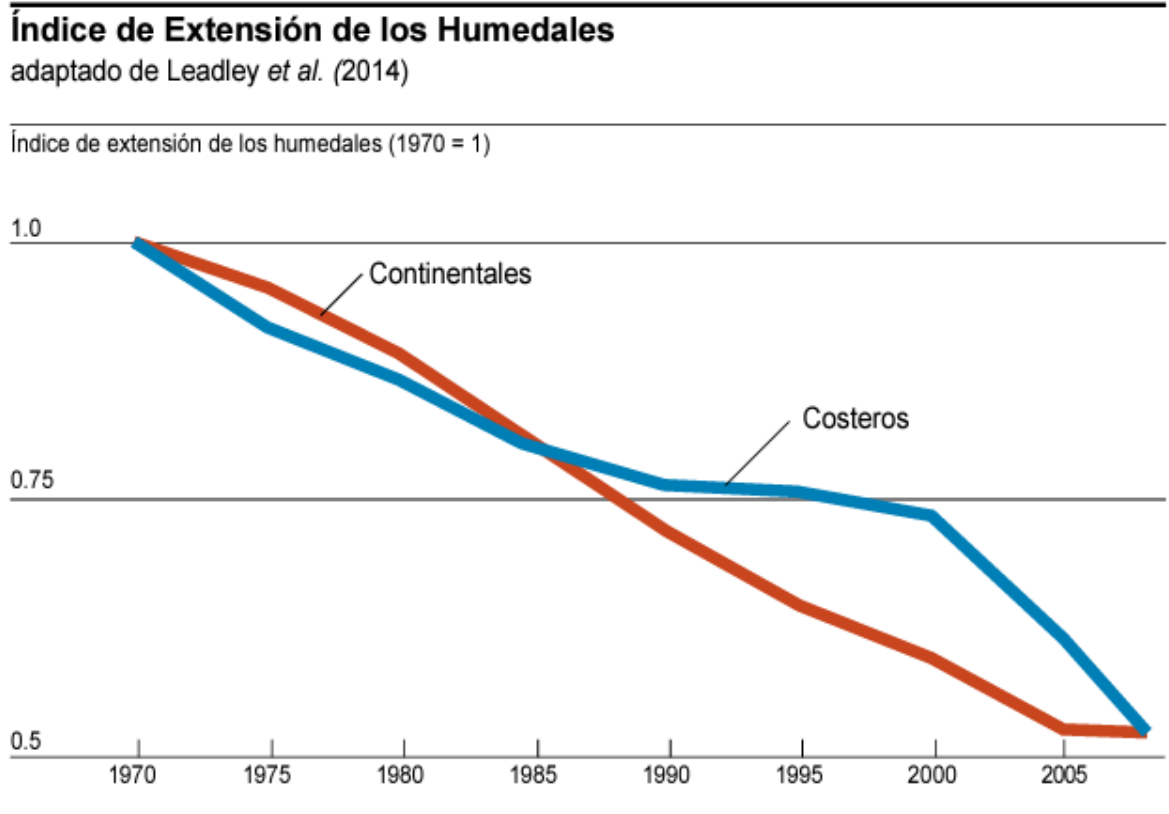


Figura 2. 5: Tendencias mundiales de la extensión de los humedales marinos/costeros y continentales según las estimaciones del Índice de Extensión de Humedales. Fuente: Adaptación de Leadley *et al.* (2014).

Los humedales que aún subsisten enfrentan crecientes desafíos debido al cambio climático. El aumento de la temperatura global, la intensificación de los eventos climáticos extremos y las alteraciones en los patrones de precipitación amenazan la integridad y el funcionamiento de estos ecosistemas vitales.

Por ejemplo, las inundaciones prolongadas o repentinas pueden alterar la composición de especies dentro de los humedales, beneficiando a algunas y desplazando a otras. Además, cuando la cantidad de agua que llega al humedal en un corto período de tiempo es excesiva, su capacidad para absorberla y regular el flujo de agua se ve comprometida, lo que resulta en una disminución de su eficacia para prevenir inundaciones. Este exceso de agua también amenaza la capacidad de los suelos de los humedales para retenerla, lo que conduce a condiciones de sequía más severas y a una reducción en la recarga de aguas subterráneas (Junk, 2013).

Además, los efectos del cambio climático, como el aumento de la temperatura, afectan el proceso de evapotranspiración. La temperatura más alta aumenta la tasa de evapotranspiración, lo que resulta en una mayor evaporación de agua del humedal y puede contribuir a su sequía (Allen, 1998).

2.5 Forzantes Meteorológicas que afectan el proceso de evaporación en un humedal

La evapotranspiración es la combinación de dos procesos: la evaporación de la superficie del agua y la transpiración del agua a través de las plantas. La evaporación se refiere a la pérdida directa de agua desde la superficie hacia la atmósfera, mientras que la transpiración implica la liberación de vapor de agua por parte de las plantas durante la fotosíntesis y otros procesos fisiológicos (Monteith et al., 2013). A continuación, se describen las forzantes meteorológicas que afectan específicamente el proceso de evaporación en un humedal.

- **Temperatura del aire:** la temperatura del aire es clave para la evaporación debido a su influencia directa en la energía disponible para impulsar este proceso. Cuando la temperatura aumenta, la energía cinética de las moléculas de agua en la superficie también se incrementa, lo que provoca una mayor actividad molecular y una tasa de evaporación más alta. Es decir, a temperaturas más altas, las moléculas de agua tienen más energía para superar la tensión superficial y escapar del estado líquido, convirtiéndose en vapor (Hoobins et al., 2001).
- **Radiación solar:** el proceso de evaporación está determinado por la cantidad de energía disponible para evaporar el agua. La radiación solar es la más importante fuente de energía en el planeta y puede cambiar grandes cantidades de agua líquida en vapor de agua. La cantidad potencial de radiación que puede llegar a una superficie evaporante viene determinada por su localización y época del año. Debido a las diferencias en la posición del planeta y a su movimiento alrededor del sol, esta cantidad potencial de radiación es diferente para cada latitud y para las diversas estaciones del año. La radiación solar real que alcanza la superficie evaporante depende de la turbidez de la atmósfera y de la presencia de nubes que reflejan y absorben cantidades importantes de radiación.
- **Velocidad del viento:** actúa como un acelerador de la evaporación. En primer lugar, facilita la transferencia de masa al eliminar de manera continua el vapor de agua formado en la superficie, evitando su acumulación y promoviendo una evaporación constante. Además, el viento reduce la humedad relativa del aire sobre la superficie del agua, creando un mayor gradiente de presión de vapor que impulsa la evaporación. Por último, promueve la mezcla del aire sobre la superficie del agua, evitando la formación de una capa límite térmica que podría frenar la evaporación al reducir la transferencia de calor desde la atmósfera hacia el agua (Shuttleworth, 2012).

-
- Humedad relativa: esta define la capacidad del aire para albergar vapor de agua. Cuando la humedad relativa es baja, el aire tiene una capacidad limitada para retener vapor, lo que genera un gradiente de concentración entre la superficie del agua y la atmósfera. Este gradiente, con una alta concentración de vapor en la superficie y baja en la atmósfera, impulsa la difusión de las moléculas de agua desde la superficie hacia la atmósfera, acelerando la tasa de evaporación. Por el contrario, cuando la humedad relativa es alta, el gradiente de concentración se reduce, lo que puede disminuir la tasa de evaporación. Esto se debe a que el aire ya está cercano a su punto de saturación de vapor de agua, lo que limita la cantidad de vapor adicional que puede absorber (Monteith et al., 2008).
 - Presión atmosférica: la presión atmosférica influye en la temperatura de ebullición del agua, ya que, a menor presión, las moléculas de agua necesitan menos energía para alcanzar el estado gaseoso. Por otro lado, la presión atmosférica puede influir en la estabilidad atmosférica y en la formación de nubes, lo que a su vez afecta la cantidad de radiación solar que llega a la superficie del agua y, por lo tanto, la tasa de evaporación. Además, los cambios en la presión atmosférica pueden indicar variaciones en las condiciones meteorológicas, como la llegada de sistemas de alta o baja presión, que pueden afectar la velocidad y la dirección del viento (Wallace et al., 2006).

El efecto combinado de los factores climáticos que afectan la evaporación se muestra en la Figura 2. 6 para dos condiciones climáticas diferentes. La tasa de evaporación es alta en condiciones calientes y secas debido a la baja humedad del aire y la alta energía disponible de la radiación solar y el calor latente. En estas circunstancias, el aire puede almacenar mucho vapor de agua, y el viento facilita su transporte y eliminación. En cambio, en condiciones húmedas, la alta humedad y la presencia de nubes reducen la tasa de evaporación. La velocidad del viento afecta la evaporación de manera diferente según el clima: en climas secos, pequeñas variaciones en la velocidad del viento pueden causar grandes cambios en la evaporación, mientras que, en climas húmedos, el viento solo reemplaza el aire saturado con aire ligeramente menos saturado, afectando menos la evaporación.

El aumento de la velocidad del viento para las dos condiciones climáticas presentadas afecta la evaporación en diferente forma como muestra la pendiente de las curvas en la Figura 2. 6. Cuanto más seca esté la atmósfera, más grande será el efecto sobre la

evaporación y mayor es la pendiente de la curva. Para las condiciones húmedas, el viento puede sustituir el aire saturado solamente por aire levemente menos saturado y así reducir la energía térmica. Por tanto, bajo condiciones húmedas la velocidad del viento afecta la evaporación en un grado mucho menos importante que bajo climas áridos en los que variaciones pequeñas en la velocidad del viento pueden dar lugar a importantes variaciones en la evapotranspiración

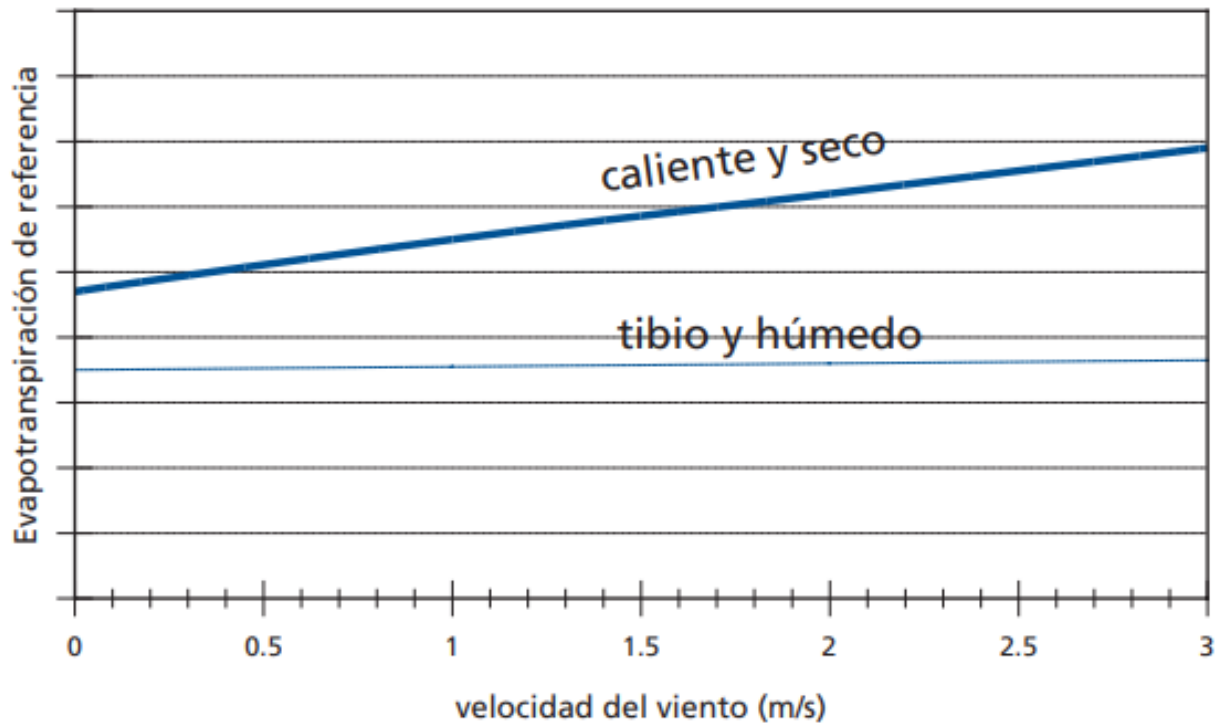


Figura 2. 6: Ilustración de la velocidad del viento sobre la evaporación en condiciones atmosféricas secas y caliente comparadas con condiciones húmedas y tibias. Fuente: Allen (2006).

3 ZONA DE ESTUDIO

La zona de estudio corresponde al humedal Laguna Carén, un cuerpo de agua artificial ubicado en el sector poniente de la Región Metropolitana, específicamente en la comuna de Pudahuel. Sus coordenadas UTM están comprendidas entre los 326555E a 329025E y los 6298961N a 6300277N y está a 460 [msnm].



Figura 3. 1: Ubicación Laguna Carén, Región Metropolitana. Fuente: Google Maps.

La Laguna Carén se encuentra próxima a la confluencia del río Mapocho y el estero Lampa. Es alimentada por tres cuencas adyacentes: la cuenca de Lo Aguirre, la cuenca del Noviciado y la cuenca de Lipangue, que vierten sus aguas en la laguna a través de diversos cauces afluentes. La cuenca de Lo Aguirre está asociada al río Lo Aguirre, la cuenca del Noviciado al río Noviciado, y la cuenca de Lipangue al estero Lipangue. Por otra parte, la laguna descarga sus aguas a través del estero Lampa, poco antes de su desembocadura en el río Mapocho.

Esta laguna fue construida en el año 1982 para el transporte de relaves mineros y se forma en el cauce del estero Carén gracias a un muro artificial de 100 metros de longitud y 6 metros de altura máxima que represa al estero. En el muro posee un vertedero de seis compuertas que descargan al estero Lampa (De Miguel, 2006). A continuación, se muestran algunas de las características morfológicas de la Laguna Carén, según un estudio realizado en el año 2017.

Parámetro	Valor
Volumen	839394.9 [m ³]
Área	306692.5 [m ²]
Profundidad media	0.56 [m]
Profundidad máxima	3.4 [m]

Tabla 3. 1: Parámetros morfométricos de la Laguna Carén, octubre de 2016. Fuente: Adaptación de Román Castillo (2017).

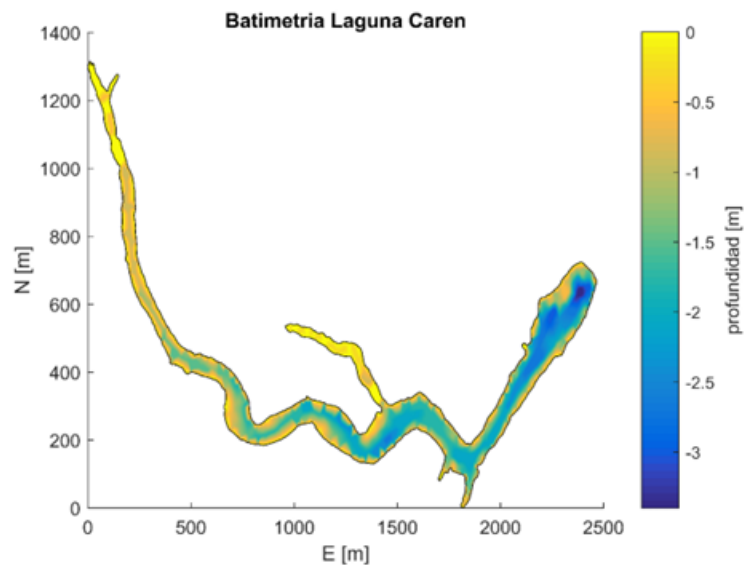


Figura 3. 2: Batimetría Laguna Carén. Fuente: Román Castillo (2017).

Debido a su ubicación, el clima en la zona se caracteriza por ser de tipo mediterráneo con influencia del Anticiclón del Pacífico. Este fenómeno genera condiciones climáticas estables, con cielos despejados, escasa nubosidad y baja probabilidad de precipitaciones. Su influencia se traduce, principalmente, en veranos secos y cálidos, con una fuerte radiación solar y vientos provenientes desde la costa.

Lo anterior se ve fuertemente contrastado durante el invierno, donde el desplazamiento del anticiclón hacia el norte permite el ingreso de sistemas frontales desde el sur. El clima en los meses de invierno se caracteriza por tener una mayor nubosidad, reduciendo las horas de sol y la radiación solar, una disminución de la temperatura y un aumento de las precipitaciones.

La temperatura media anual en la zona es de aproximadamente 14°C, alcanzando una máxima de 30°C en verano (específicamente en enero y febrero) y una mínima cercana a los 2°C en invierno, especialmente en julio (DMC, 2016). Sin embargo, en los últimos años se ha experimentado un aumento lineal de la temperatura media, variando +0.14°C por década (Reporte anual de la evolución del clima en Chile, 2021).

En cuanto a las precipitaciones, se registra una precipitación anual promedio de 380 mm, concentrada principalmente en invierno, siendo julio el mes más lluvioso con alrededor de 60 mm. No obstante, al igual que la temperatura, se ha observado un cambio en este patrón debido a la llamada Megasequía en Chile, desarrollada durante los últimos 14 años. Durante este período, se han registrado déficits de hasta un 40% en la zona central de Chile, atribuibles tanto a la variabilidad climática natural como a factores antropogénicos (Garreaud, 2020). Aunque no existen estudios específicos que analicen directamente la Laguna Carén, se espera que esta tendencia a la disminución de las precipitaciones también afecte a dicha zona.

4 METODOLOGÍA

4.1 Recopilación de datos

Para obtener las forzantes meteorológicas relevantes para el proceso de evaporación desde un cuerpo superficial del agua, se recurre a la descarga de datos proporcionados por los modelos de circulación general disponibles del proyecto CMIP6. Sin embargo, es crucial seleccionar los modelos que cumplan con los requisitos específicos simultáneos tales como:

- Disponibilidad diaria de las variables requeridas para poder obtener las forzantes meteorológicas ya mencionadas, tanto para el periodo histórico y para el periodo simulado.
- Cumplir con tener una resolución horizontal igual a 100 km.
- Los datos descargados de cada MCG deben poseer la misma etiqueta de variación, lo que implica una configuración del modelo idéntica, incluyendo las condiciones iniciales, forzantes externas y otras características relevantes para la simulación climática específica.

Por otra parte, se destaca que las simulaciones históricas analizadas en este trabajo de título corresponden desde el año 1973 hasta el año 2014, mientras que las simulaciones proyectadas por los distintos MCG van desde el año 2015 hasta el año 2100.

Además, es importante señalar que el escenario escogido para las simulaciones proyectadas corresponde al SSP5-8.5 el cual corresponde al escenario más pesimista, donde no existen medidas de mitigación destinadas a frenar el cambio climático. Por último, se elige una etiqueta de variación para los modelos con la convención r100i1p1f1.

Los GCM escogidos para este trabajo son los siguientes:

- AWI-CM-1-1-MR
- CMCC-ESM2
- EC-Earth3
- GFDL-CM4
- GFDL-ESM4

- INM-CM4-8
- INM-CM5-0
- MPI-ESM1-HR

Mientras que las variables extraídas de cada modelo y su descripción se señalan en la Tabla 4. 1.

Variables descargadas	Descripción	Unidad
tas	Temperatura cercana a la superficie	K
tamax	Temperatura máxima cercana a la superficie	K
tasmin	Temperatura mínima cercana a la superficie	K
uas	Viento del este cercano a la superficie	m/s
vas	Viento del oeste cercano a la superficie	m/s
hurs	Humedad relativa cercana a la superficie	%
ps	Presión del aire en la superficie	Pa

Tabla 4. 1: Variables descargadas y su descripción.

Con las variables descargadas de cada modelo, es posible obtener las forzantes meteorológicas mencionadas para calcular la evaporación de la zona a través de las siguientes ecuaciones:

Para calcular la velocidad del viento, se empleó la suma vectorial de los componentes uas y vas:

$$v = \sqrt{uas^2 + vas^2}$$

Donde:

v: Velocidad del viento [m s⁻¹].

uas: Viento del este cercano a la superficie [m/s].

vas: Viento del oeste cercano a la superficie [m/s].

Por otra parte, se estima la radiación neta a partir de la radiación neta de onda corta mediante la siguiente fórmula:

$$Rn = (1 - \alpha) \cdot RS \downarrow$$

Donde:

R_n : Radiación solar neta [MJ/m²/s].

α : Albedo [%].

$RS \downarrow$: Radiación solar incidente [MJ/m²/s].

Para efectos de este trabajo de título se utiliza un albedo cercano al 3%, el cual corresponde a un albedo superficial en cuerpos de aguas claras (Baladrón, 2011).

La radiación solar incidente se puede estimar a partir de la radiación solar en el tope de la atmósfera mediante la ecuación:

$$RS \downarrow = \begin{cases} ST_k \cdot \text{sen}\psi & \text{durante el día (sen}\psi \text{ es positivo)} \\ 0 & \text{durante la noche (sen}\psi \text{ es negativo)} \end{cases}$$

Donde:

$RS \downarrow$: Radiación solar incidente.

S: Corresponde a la constante solar de 1360 [W m⁻²].

Ψ : Corresponde al complemento del ángulo cenital [°].

T_k : Es la transmisividad.

La transmisividad puede ser calculada según la ecuación de Burridge and Gadd (1974):

$$T_k = (0.6 + 0.2 \text{sen}\psi)(1 - 0.4 \sigma_{CH})(1 - 0.7 \sigma_{CM})(1 - 0.4 \sigma_{CL})$$

Donde:

T_k : Transmisividad.

$\text{sen } \psi$: Seno del ángulo de incidencia.

σ_c : Representa la fracción del cielo cubierto y los subíndices H, M y L significan nubosidad alta, media y baja respectivamente.

$$\sin\psi = \sin\phi\sin\delta_s - \cos\phi\cos\delta_s\cos\left[\frac{180 \cdot t_{UTC}}{12} - \lambda_e\right]$$

Donde:

ϕ : Corresponde a la latitud [°].

λ_e : Corresponde a la longitud [°].

δ_s : Declinación solar (latitud a la cual los rayos solares caen verticalmente a mediodía).

t_{UTC} : Tiempo universal [h].

Y la declinación solar se determina mediante la siguiente ecuación:

$$\delta_s = 23.46\cos\left[\frac{360(d - 173)}{365.25}\right]$$

Donde:

δ_s : Declinación solar.

d: Corresponde al día del año.

4.2 Escalamiento Estadístico

En este trabajo se aplica el método MBCn utilizando los datos simulados del período histórico obtenidos de los distintos modelos del CMIP6 y los datos históricos observados del Sistema de Reanálisis de la Tierra Atmosférica ERA5. El modelo de reanálisis ERA5 fue utilizado debido a su alta resolución espacial, superior a la de los modelos CMIP6, lo que permite obtener datos más precisos una vez escalados. Además, ERA5 es una fuente confiable y ampliamente utilizada en estudios climáticos y meteorológicos, lo que garantiza la calidad y la consistencia de los datos observados (ERA5, 2020).

El ERA5 es producido por el Centro Europeo de Predicción a Plazo Medio y ofrece una cobertura global, con resolución horaria y una amplia gama de variables meteorológicas, incluyendo las forzantes necesarias para el cálculo de la evaporación en la zona de estudio. Esto lo convierte en una opción ideal para estudios climáticos y análisis de tendencias a largo plazo.

El proceso de escalamiento estadístico MBCn se llevó a cabo utilizando el paquete MBC en el lenguaje de programación R, que permite realizar análisis estadísticos avanzados y modelado de datos climáticos de manera eficiente y reproducible. Este código proporciona herramientas para el procesamiento y análisis de datos, así como la implementación de modelos estadísticos para el escalamiento de variables climáticas. Además, se realizaron ajustes y correcciones necesarios para garantizar la consistencia y validez de los resultados obtenidos.

4.3 Cálculo de series de evaporación

Para calcular la evaporación en la superficie del agua se emplea el método combinado, el cual considera que tanto la energía disponible como el transporte de vapor de agua son factores limitantes para la evaporación. Este método considera las cinco forzantes meteorológicas: temperatura, humedad relativa, velocidad del viento, presión atmosférica y radiación solar.

$$E = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \cdot E_r + \frac{\gamma + \Delta}{\gamma} \cdot E_a$$

Donde:

E: Evaporación total [mm/día].

E_r : Evaporación producto de la radiación [mm/día].

Δ : Pendiente de la curva de vapor.

γ : Constante psicrométrica [kPa].

E_a : Evaporación aerodinámica [mm/día].

El componente radiativo de la evaporación se calcula como:

$$E_r = \frac{R_n - G}{\lambda}$$

Donde:

E_r : Evaporación producto de la radiación [mm/día].

R_n : Radiación neta [MJ/m²/día].

G: Flujo de calor del suelo [MJ/m²/día].

λ : Calor latente de vaporización [MJ/kg].

$$\lambda = 2.501 - (2.361 \cdot 10^3) \cdot T$$

Donde:

λ : Calor latente de vaporización [MJ/kg].

T: Temperatura del aire[°C].

El componente aerodinámico de la evaporación se calcula mediante:

$$E_a = \frac{k^2 \cdot u_2 \cdot (e_s - e_a)}{\left[\ln \frac{z_2}{z_0} \right]^2}$$

Donde:

E_a : Evaporación aerodinámica [mm/día].

k : Constante igual a 0.41.

u_2 : Velocidad del viento a 2 metros sobre la superficie [m/s].

e_s : Presión de vapor de saturación [kPa].

e_a : Presión de vapor real [kPa].

Para el cálculo de la presión de vapor de saturación se utiliza la fórmula propuesta por Tetens (1930):

$$e_s = 0.611 \cdot \exp \frac{17,27 \cdot T}{T + 237,3}$$

Donde:

e_s : Presión media de vapor de saturación [kPa].

T : Temperatura del aire [°C].

La presión de vapor real se obtiene gracias a:

$$e_a = \frac{HR}{100} \cdot e_s$$

Donde:

e_a : Presión real de vapor [kPa].

HR: Humedad relativa [%].

e_s : Presión media de vapor de saturación [kPa].

5 RESULTADOS

En esta sección, se presentan los resultados obtenidos tras aplicar el escalamiento estadístico a las forzantes meteorológicas de los diferentes modelos climáticos globales. Además, se incluyen las series temporales de evaporación correspondientes calculadas con los datos mencionados.

5.1 Forzantes meteorológicas extraídas de los CGM

A continuación, se presentan los promedios anuales de cada forzante meteorológica de los modelos seleccionados para este estudio. Cabe destacar que estos promedios están calculados con las forzantes meteorológicas previamente escaladas.

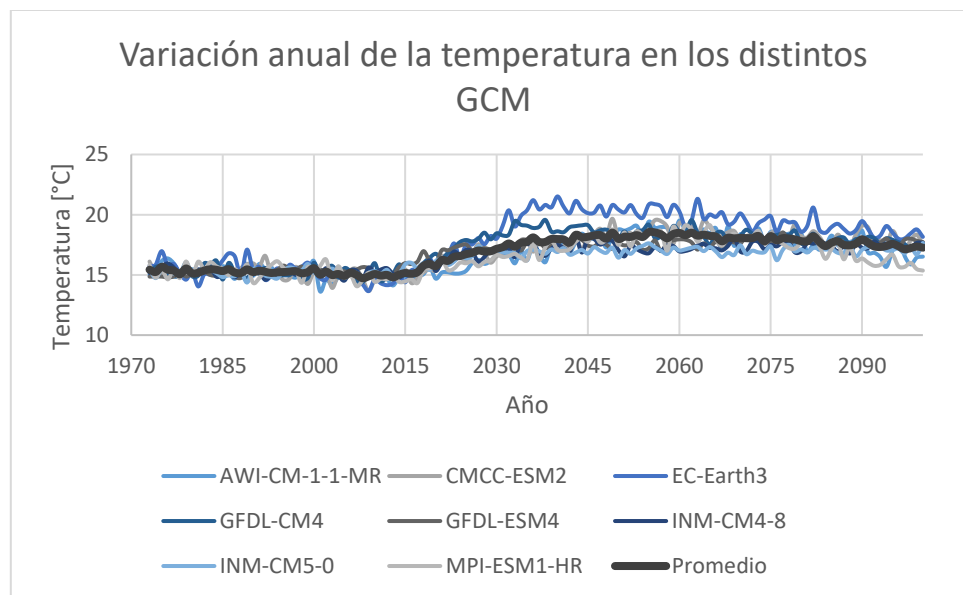


Figura 5. 1: Variación del promedio anual de la temperatura. La línea de color negro indica el promedio de la forzante meteorológica de los modelos estudiados.

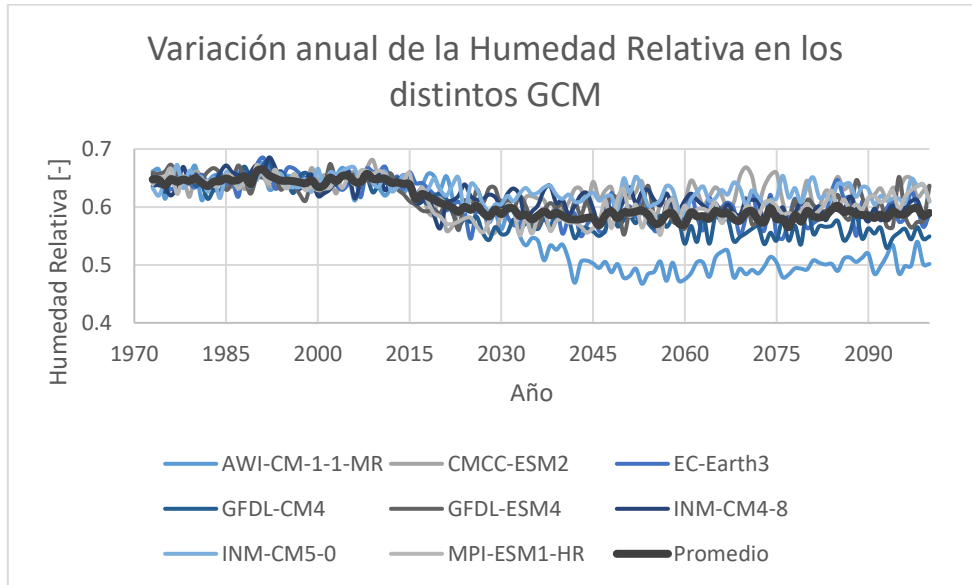


Figura 5. 2: Variación del promedio anual de la humedad relativa. La línea de color negro indica el promedio de la forzante meteorológica de los modelos estudiados.

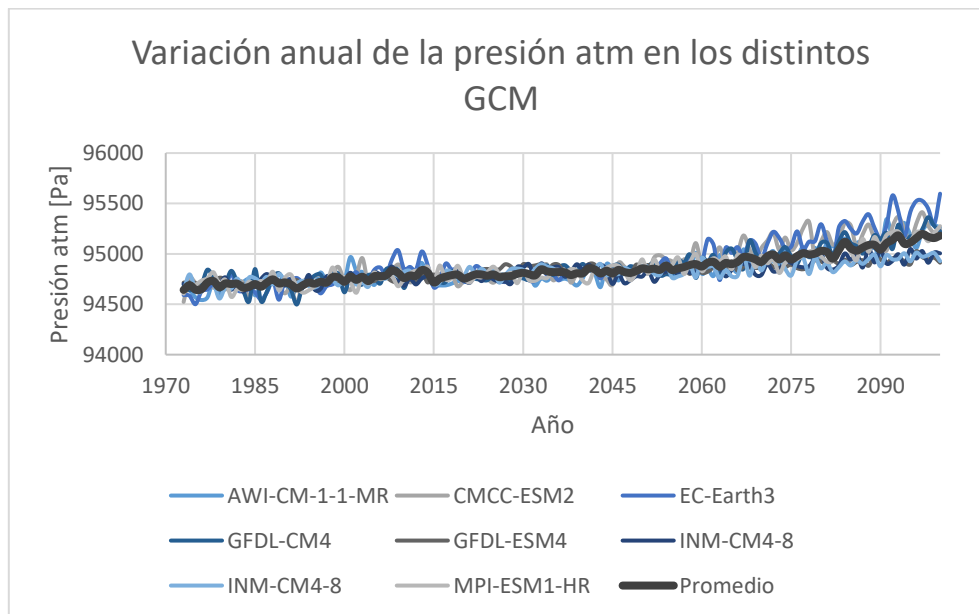


Figura 5. 3: Variación del promedio anual de la presión atmosférica. La línea de color negro indica el promedio de la forzante meteorológica de los modelos estudiados.

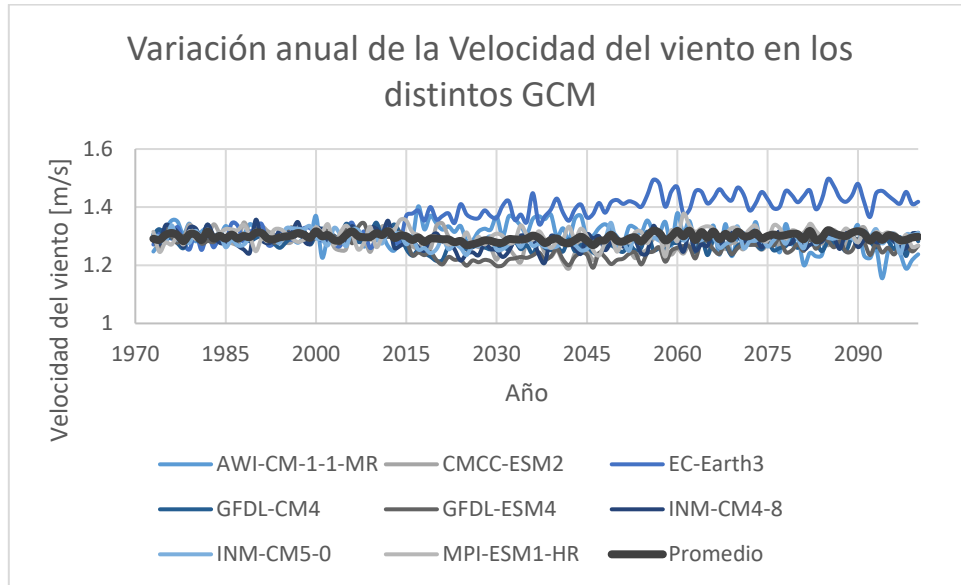


Figura 5. 4: Variación del promedio anual de la velocidad del viento. La línea de color negro indica el promedio de la forzante meteorológica de los modelos estudiados.

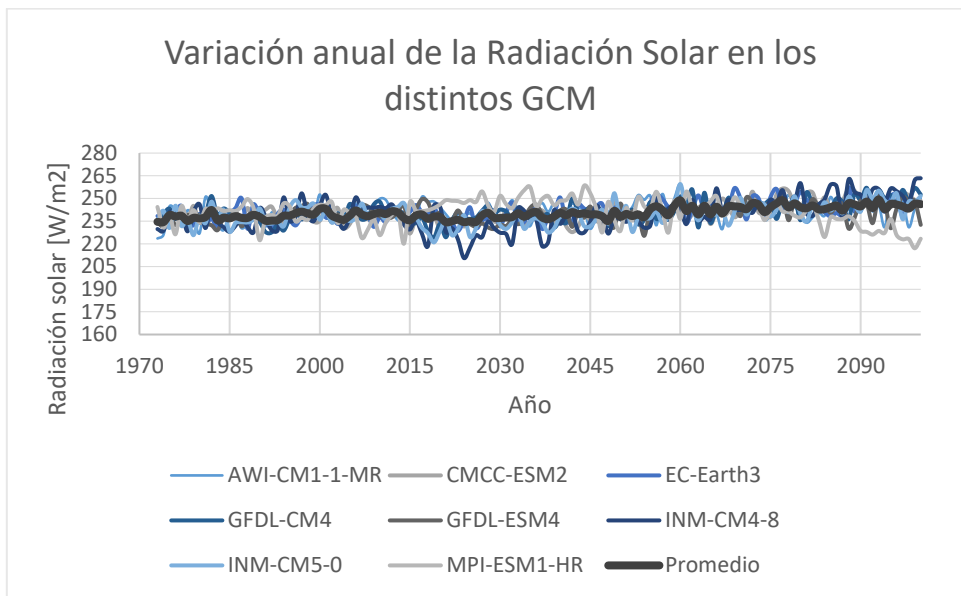


Figura 5. 5: Variación del promedio anual de la radiación solar. La línea de color negro indica el promedio de la forzante meteorológica de los modelos estudiados.

5.2 Series de evaporación en la Laguna Carén

A continuación, se presentan los resultados del cálculo de la evaporación para cada modelo de circulación general después de que las forzantes meteorológicas han sido escaladas mediante el método MBCn.

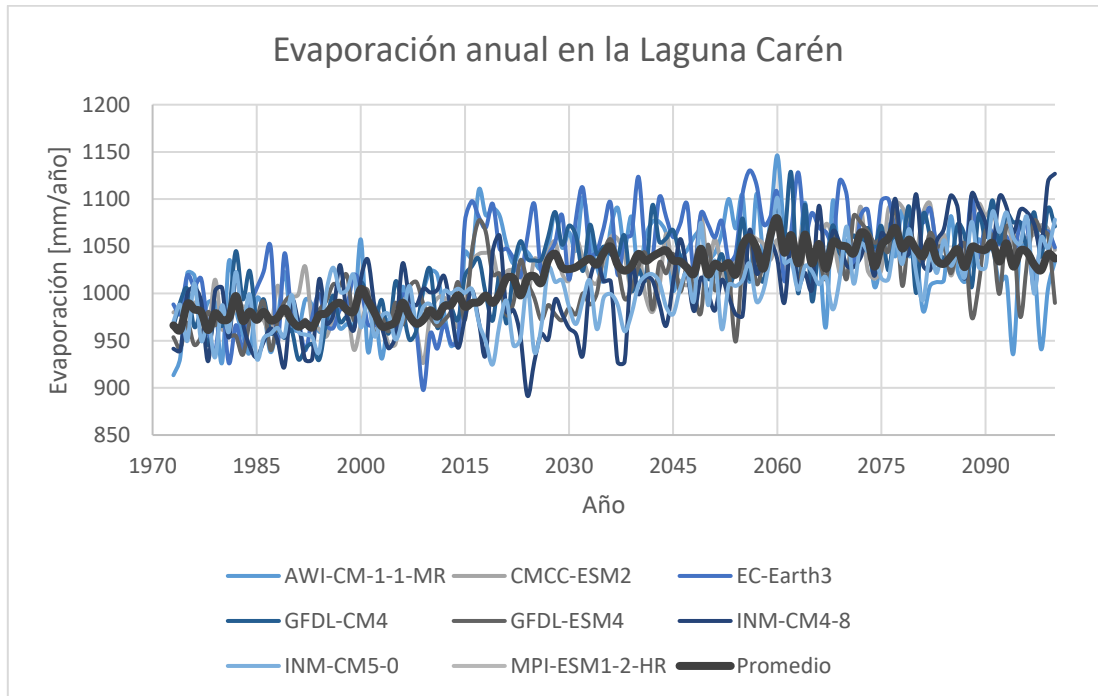


Figura 5. 6: Variación anual de la evaporación en la Laguna Carén. La línea de color negro indica el promedio de la evaporación de los distintos modelos estudiados.

6 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se analizan los resultados obtenidos en el presente trabajo de título. Se presentan y discuten las tendencias y patrones observados en los datos, se comparan con estudios previos y se exploran los impactos de estos hallazgos en el contexto del análisis climático. Además, se destacan las fortalezas y limitaciones de la metodología empleada y se proponen posibles direcciones para investigaciones futuras.

6.1 Forzantes meteorológicas

- **Datos del modelo ERA5**

En primer lugar, es importante destacar que los datos extraídos del modelo de reanálisis ERA5 para el período histórico comprendido entre 1973 y 2014 en la zona de la Laguna Carén sugieren tendencias que pueden ser fundamentales para el posterior análisis estadístico.

Para visualizar mejor estas tendencias, se utiliza la pendiente de Sen, una herramienta estadística empleada para identificar tendencias en datos no lineales como lo son las forzantes meteorológicas. Como resultado de este análisis, se observan pendientes negativas para: radiación solar, velocidad del viento, humedad relativa y temperatura.

Forzante meteorológica	Pendiente Sen
Temperatura	-0.095
Humedad relativa	-0.143
Velocidad del viento	-0.048
Presión atmosférica	0.000
Radiación solar	-0.095

Tabla 6. 1: Pendiente de Sen para cada forzante meteorológica en estudio.

Específicamente, la tendencia a la baja de la temperatura promedio anual durante el período de estudio contrasta radicalmente con las tendencias globales de aumento de temperatura asociadas al cambio climático. Por ejemplo, en los últimos años, en Chile se ha observado un sostenido aumento de la temperatura media, con una tendencia lineal de $+0.14\text{ }^{\circ}\text{C}$ por década en el período comprendido entre 1961 y 2020, manteniéndose con el mismo valor en el período 1981- 2020, tal como se aprecia en la Figura 6. 1.

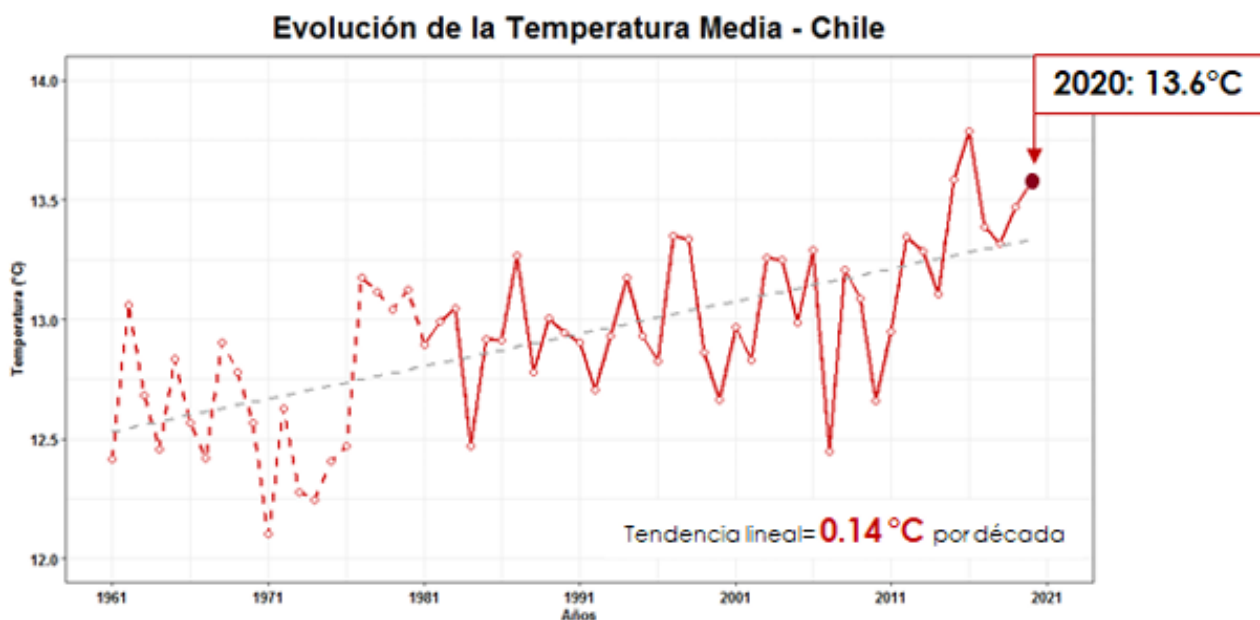


Figura 6. 1: Promedio anual de la temperatura media en Chile. Fuente: Reporte anual de la evolución del clima en Chile, 2021.

La discrepancia entre las tendencias observadas en los datos del modelo de reanálisis ERA5 y las tendencias globales de aumento de temperatura plantea interrogantes sobre la validez de los resultados obtenidos en el escalamiento estadístico a realizar. Aunque los datos del ERA5 ofrecen una visión detallada de las condiciones climáticas locales en la zona de la Laguna Carén, es fundamental reconocer que, como cualquier modelo, puede estar sujeto a limitaciones y errores.

Dadas estas diferencias notorias entre las tendencias de temperatura y la necesidad de obtener resultados confiables y precisos para un análisis estadístico

riguroso, se considera utilizar, en futuros estudios, otro conjunto de datos para el escalamiento estadístico. Sería pertinente evaluar datos de otro modelo de reanálisis climático o recurrir a observaciones de estaciones meteorológicas cercanas a la Laguna Carén, para corroborar y complementar los resultados derivados del ERA5.

- **Datos de los GCM**

Las forzantes meteorológicas obtenidas de los GCM (ver la sección de Anexos) muestran las tendencias esperadas tanto para el período histórico abordado en este estudio (1973 al 2014) como para el período simulado (2015 al 2100).

En particular, en la Figura B. 1, Figura B. 2, Figura B. 3, Figura B. 4, Figura B. 5, Figura B. 6, Figura B. 7 y Figura B. 8 se observa un aumento sostenido de las temperaturas durante el período de las simulaciones históricas. Sin embargo, en el período proyectado con el escenario SSP5-8.5, se registra un incremento aún mayor, alcanzando una temperatura aproximada de 20°C a finales del siglo. En todos los modelos, se observa un aumento aproximado de 5°C, lo cual concuerda con los estudios realizados por Bozkurt et al. (2018), que indican un incremento de 3,5°C para finales del siglo.

Además de las tendencias mostradas por los GCM para las distintas forzantes meteorológicas, es importante señalar que en este trabajo de título solo se considera el escenario más desfavorable del proyecto CMIP6, SSP5-8.5, el cual no necesariamente es el más realista. En el estudio realizado por Brunner et al. (2020) se concluye que los escenarios que proyectan mayores aumentos de temperatura serían los menos probables, justificando la necesidad de incluir en el análisis otros escenarios menos extremos para, posteriormente, calcular las series de evaporación que reflejen de manera más precisa las condiciones futuras más probables.

Por último, es importante destacar la incertidumbre asociada a los Modelos de Circulación General en sí, ya que, si bien se ha avanzado en complejidad de modelos, entregando diversidad de escenarios futuros, cada GCM es creado de forma diferente sin abarcar todas las posibilidades en cuanto a representación física de la realidad (Clark et al., 2016).

- **Escalamiento estadístico**

Un punto importante para destacar es que el método escogido para realizar el escalamiento también contribuye a la incertidumbre de las forzantes meteorológicas futuras. El escalamiento dinámico ha avanzado considerablemente en la física del problema y en la eficiencia computacional en comparación con los métodos estadísticos recientes. Sin embargo, su costo computacional y la dificultad de implementación siguen siendo muy elevados. Además, una desventaja significativa es que no se alimenta con observaciones in situ, lo que puede resultar en sesgos importantes respecto a estas.

Por otro lado, el escalamiento estadístico presenta la ventaja de poder obtener resultados para diversos Modelos Climáticos Globales. Sin embargo, depende fuertemente de la calidad y disponibilidad de las fuentes de observación. Si la fuente observacional no existe o no mide adecuadamente, el escalamiento estadístico heredará estos inconvenientes, afectando la precisión y confiabilidad de los resultados.

En particular, el método de escalamiento estadístico MBCn elegido para este trabajo tiene la ventaja de considerar múltiples variables interrelacionadas. Así, además de analizar los cuantiles de la variable principal, también se examinan otras variables que pueden estar asociadas con el evento. Este enfoque más completo contribuye a mejorar la precisión del modelo al capturar de manera más efectiva la complejidad de los fenómenos meteorológicos.

- **Forzantes meteorológicas escaladas**

Los resultados presentados en Figura 5. 1, Figura 5. 2, Figura 5. 3, Figura 5. 4 y Figura 5. 5 muestran las tendencias de las forzantes meteorológicas tras la aplicación del escalamiento estadístico.

Entre estas, la tendencia de la temperatura, representada en la Figura 5.1, destaca por evidenciar un aumento durante el periodo proyectado en comparación con los datos históricos. Sin embargo, este incremento no es lineal a lo largo del tiempo. Particularmente, se observa una disminución de la temperatura desde el año 2015 hasta el 2100, lo cual contradice estudios previos en la materia.

Esta discrepancia entre lo esperado y lo que se observa puede deberse a la tendencia marcada en los datos obtenidos del modelo ERA5, donde se aprecia

una disminución de la temperatura a lo largo del tiempo. Además, el escalamiento estadístico puede amplificar las anomalías si las tendencias observadas en el ERA5 no se alinean adecuadamente con las proyecciones de los modelos del CMIP6. Este desajuste puede resultar en proyecciones que no reflejan fielmente las tendencias climáticas reales, sugiriendo la necesidad de una revisión y ajuste de los métodos de escalamiento para mejorar la precisión de las proyecciones climáticas futuras.

6.2 Cálculo de las series de evaporación

Una vez calculadas las series de evaporación, se observa una tendencia generalizada hacia el aumento de la evaporación a lo largo de los años en los GCM. Esta tendencia se detalla en la Tabla 6. 2 a continuación.

GCM	Pendiente Sen
AWI-CM-1-1-MR	0.047
CMCC-ESM2	0.023
EC-Earth3	0.008
GFDL-CM4	0.008
GFDL-ESM4	-0.008
INM-CM4-8	-0.085
INM-CM5-0	0.039
MPI-ESM1-HR	-0.008

Tabla 6. 2: Pendiente de Sen para las series de evaporación de cada modelo de circulación general.

El aumento de la tasa de evaporación es consistente con las expectativas derivadas del cambio climático, ya que el IPCC (2021) señala que el incremento en la temperatura global y la mayor capacidad de la atmósfera para retener vapor de agua contribuyen a una mayor tasa de evaporación.

Por otra parte, es importante destacar que método utilizado para calcular la evaporación también afecta a los resultados obtenidos. En este caso el método combinado, al integrar componentes del balance de energía y del enfoque aerodinámico, ofrece varias ventajas significativas. En primer lugar, proporciona una mayor precisión en las estimaciones de

evaporación al considerar simultáneamente el flujo de energía y las condiciones atmosféricas. Esta integración permite capturar una gama más amplia de factores que influyen en la evaporación como la temperatura, humedad relativa, velocidad del viento, presión atmosférica y radiación solar lo cual reduce sesgos y mejora la confiabilidad de los resultados.

7 CONCLUSIONES

A partir de las series de evaporación estimadas en el presente trabajo, se logra cumplir con el objetivo principal de cuantificar y proyectar series de evaporación en el humedal Laguna Carén, ubicado en la comuna de Pudahuel, Santiago, utilizando datos extraídos de ocho modelos de circulación general del CMIP6, específicamente del escenario más pesimista, el SSP5-8.5. En términos generales, todos los modelos muestran una evaporación anual cercana a los 1000 mm, lo cual es lo esperado. Sin embargo, no todos los modelos muestran la tendencia anticipada de un incremento continuo de la evapotranspiración a lo largo de los años en el contexto del cambio climático. Cinco de estos modelos presentan la tendencia esperada de un aumento continuo de la evaporación, mientras que los otros tres modelos muestran una tendencia a la baja.

Estas discrepancias sugieren la necesidad de revisar la metodología empleada, ya sea para la obtención de las forzantes meteorológicas, el tipo de escalamiento realizado con los datos o el método utilizado para calcular la evapotranspiración. Realizar esta revisión podría ayudar a resolver las anomalías observadas en algunos resultados. Esta revisión es crucial para garantizar que las proyecciones de evapotranspiración sean lo más precisas y útiles posible para la planificación y gestión de los recursos hídricos en un futuro afectado por el cambio climático.

Para futuras investigaciones, se recomienda explorar métodos alternativos para el escalamiento estadístico de las variables meteorológicas y considerar la aplicación de modelos adicionales para validar los resultados obtenidos. Además, sería beneficioso investigar el impacto de diferentes escenarios de emisión y su influencia en la evapotranspiración proyectada.

En resumen, aunque se lograron avances significativos en la cuantificación de la evaporación en el humedal Laguna Carén, es esencial continuar mejorando las metodologías y ampliar la investigación para obtener proyecciones más confiables y útiles para la planificación y gestión de los recursos hídricos en un futuro afectado por el cambio climático.

8 BIBLIOGRAFÍA

- Allen, R., Pereira, L., Raes, D., & Smith, M. (1998). *Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements*. Rome, Italy: Numer 56 in FAO Irrigation and Drainage Paper. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Allen, R., Pereira, L., Raes, D., & Smith, M. (2006). *Evapotranspiración del cultivo: Guía para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*. Roma.
- Allen, S., Lenton, T., & Trafford, J. (2019). *Carbon dioxide removal: Climate change, pollution and the urgency of governance*.
- Baladrón, M. (2011). *Estudio de la hidrotermodinámica del ecosistema humedal ciénagas del name. Tesis para optar al grado de magister en ciencias de la ingeniería, mención recursos hídricos y medio ambiente. Memoria para optar al título de ingeniero civil Universidad de Chile*. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Departamento de Ingeniería Civil.
- Bozkurt, D., Rojas, M., Boiser, J., & Valdivieso, J. (2018). Projected hydroclimate changes over 51 andean basins in central chile from downscaled cmip5 models under the low and high emission scenarios. *Climatic Change*.
- Cambio Climático Global. (2016). Modelo del Clima Global (MCG). *Cambio climático global*.
- Cannon, A., Sobie, S., & Murdock, T. (2018). Multivariate quantile mapping bias correction: an n-dimensional probability density function transform for climate model simulations of multiple variables. *Climate Dynamics*, 50(11-12):3077-3097.
- Cizkova, H., Kvet, J., Comin, F., Laiho, R., Pokorny, J., & Pithart, D. (2013). Estado actual de los humedales europeos y su posible futuro en el contexto del cambio climático global. *Ciencias Acuáticas*, 75(1):3-26.
- Clark, M., & Kavetski, D. (2010). Ancient numerical demons of conceptual hydrological modeling: 1. Fidelity and efficiency of time stepping schemes. *Water Resources Research*, 46(10).
- Cowardin, L., Carter, V., Golet, F., & LaRoe, E. (1979). Classification of wetlands and deepwater habitats of the United States. *Department of the Interior, Fish and Wildlife Service*.

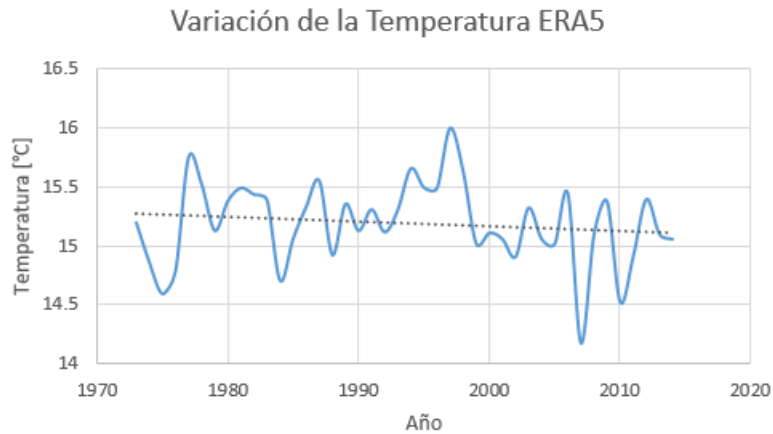
-
- Davidson, N. (2014). How much wetland has the world lost? long-term and recent trends in global wetland area. *Marine and Freshwater Research*, 934-941.
- De Miguel, A. D. (2006). Desarrollo de un sistema de pago por servicios ambientales en la laguna Carén. Trabajo de titulación para obtener el título de ingeniero de ejecución en ambiente. *Universidad de Santiago de Chile*.
- Di, L., Wei, C. C., Xiliang, N., Rong, T., & Xiaojun, X. (2017). Monitoring and predicting the degradation of a semi-arid wetland due to climate change and water abstraction in the ordos lurus relictus national nature. *Wetlands*, 37(2):355-367.
- Dirección Meteorológica de Chile. (2016). *Clima de la región metropolitana de Santiago*. Obtenido de <https://www.bcn.cl/siit/nuestropais/region13/clima.htm>
- Eyring, V., Bony, S., Senior, G., Stevens, B., Stouffer, R., & Taylor, K. (2016). Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental desing and organization. *Geosi*.
- Garreaud, R., Boisier, J., Rondanelli, R., A.Montecinos, Sepúlveda, H., & Veloso-Aguila, D. (2020). The central chile mega drought (2010-2018): a climate dynamics perspective. *International Journal of Climatology*, 40(1):421-439.
- Gorgen, H., W., W., S. M., & Andermann, C. (2018). A global data set of soil hydraulic properties and sub-grid variability of soil water retention and hydraulic conductivity curves. *Earth System Science Data*, 129-145.
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Biavati, G., Horányi, A., Sabater, J., & Thépaut, J. (2020). The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1999-2049.
- Hughes, L. (2017). Ecological impacts of climate change in australia: An expert assessment. *Pacific Conservation Biology*, 219-248.
- Huntington, T. (2006). Evidence for intensification of the global water cycle: Review and synthesis. *Journal of Hydrology*, 83-95.
- IPCC. (2007). Cambio Climático: Informe de síntesis. *Contribución de los grupos de trabajo I, II y III al Cuarto informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Experto sobre el cambio climático*. Ginebra, Suiza.
- IPCC. (2014). Climate Change 2014: Synthesis Report. . *Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Genova, Switzerland.
-

-
- IPCC. (2021). Summary for Policymakers. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
- Junk, W., An, S., Finlayson, C., Gopal, B., Kvet, J., & Mitchell, S. (2012). Estado actual del conocimiento sobre los humedales del mundo y su futuro bajo el cambio climático global: Una síntesis. *Ciencias Acuáticas*, 75(1): 151-167.
- Leadley, P., Krug, C., Alkemade, R., Pereira, H., Sumaila, U., Walpole, M., . . . Mumby, P. (2014). *Progress towards the Aichi Biodiversity Targets: An assessment of biodiversity trends, policy scenarios and key actions*. Montreal, Canadá: Secretariat of the Convention on Biological Diversity.
- Maraun, D. (2018). *Bias correction and downscaling of climate models*. Cham: Springer.
- Mitsch, W., & Gosselink, J. (2015). *Wetlands*. John Wiley & Sons.
- Monteith, J. (1965). Evaporation and the environment. *The State and Movement of Water in Living Organisms. XIXth Symposium* (págs. 205-234). Swansea: Cambridge University Press.
- Monteith, J., & Unsworth, M. (2008). *Principles of Environmental Physics*. Academic Press.
- Monteith, J., & Unsworth, M. (2013). *Principles of Environmental Physics: Plants, Animals and Atmosphere*.
- National Oceanic and Atmospheric Administration. (2021). *Climate change impacts*. Obtenido de <https://www.noaa.gov/education/resource-collections/climate/climate-change-impacts>
- Oficina de Cambio Climático de la Sección de Climatología de la Dirección Meteorológica de Chile. (2021). Reporte anual de la evolución del clima en Chile. *Dirección General de Aeronáutica*.
- O'Neill, B., Kriegler, E., Riahi, K., Ebi, K., Hallegatte, S., Carter, T., & Vuuren, D. v. (2014). A new scenario framework climate change research: the concept of shared socioeconomic pathways. *Climate Change*, 122(3):387-400.
- Organización Meteorológica Mundial. (2023). Estado del clima global en 2023: Informe previsional.
- Ponnamperuma, F. (1972). The chemistry of submerged soils. *Advances in Agronomy*.

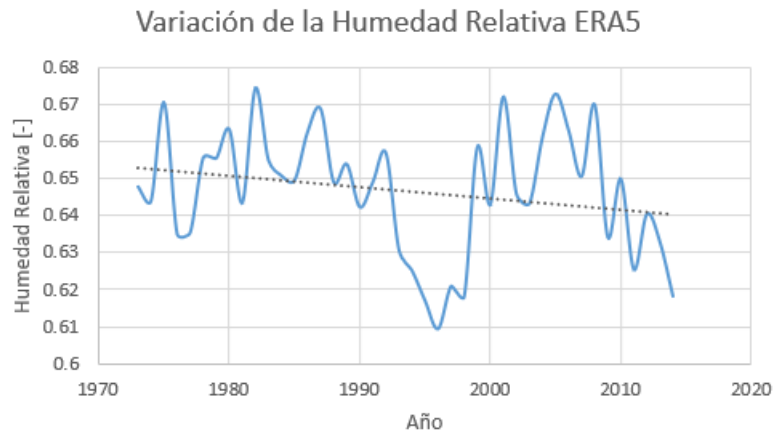
-
- Riahi, K., Vuuren, D. v., Kriegler, E., Edmonds, J., O'Neill, B., Fujimori, S., & Calvin, K. (2016). The shared socioeconomic pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview. *Global Environmental Change*, 42:153-168.
- Rodrigues, L., Kruse, E., & Gómez, N. (2020). Los bañados de desborde fluvial: una mirada desde la geohidrología. *Biología Acuática*, 35:1-13.
- Roman, E. (2017). *Laguna Carén: Estudio de su hidrodinámica y calidad del agua a partir de la instalación y operación de una estación de monitoreo ambiental*. Obtenido de <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/146735>
- Sharma, D., Gupta, A. D., & Babel, M. (2007). Spatial disaggregation of bias-corrected gcm precipitation for improved hydrologic simulation. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11:1373-1390.
- Spak, A., Wild, M., & Roeckner, E. (2007). Dynamically downscaled eigenmodes of atmospheric variability: The ale-gcm/rcm. *Journal of Climate*, 20(20):4828-4850.
- Tetens, O. (1930). Uber einige meteorologische. 6:297-309.
- Teutschbein, C., & Seibert, J. (2012). Bias correction of daily precipitation forecast: efficient methods and application to the cosmo model. *Journal of Hydrometeorology*, 13(5):1180-1198.
- Wallace, J., & Hobbs, P. (2006). *Atmospheric: An Introductory Survey*. Academic Press.

9 ANEXOS

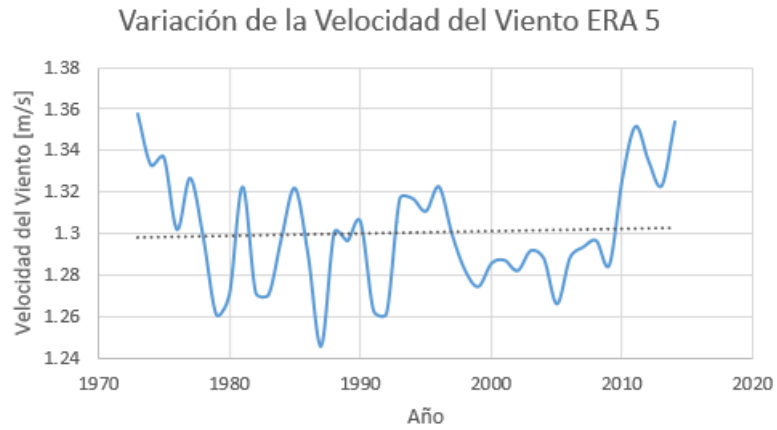
A. RECOPIACIÓN DATOS DE ERA5



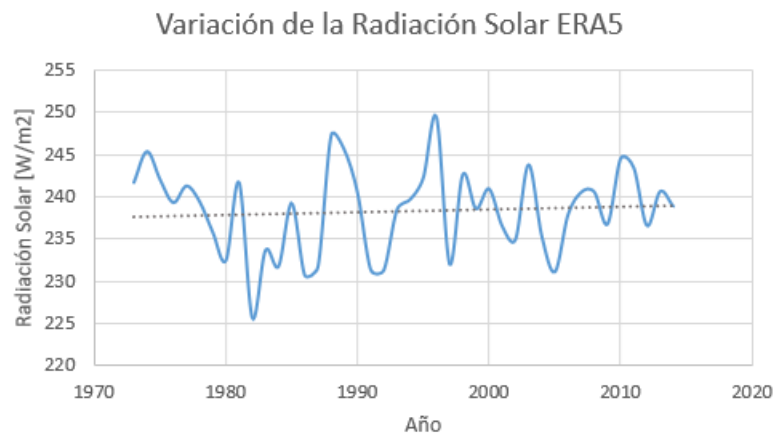
Anexo A. 1: Variación del promedio anual de la temperatura en el periodo 1973-2014. La línea segmentada indica la tendencia lineal.



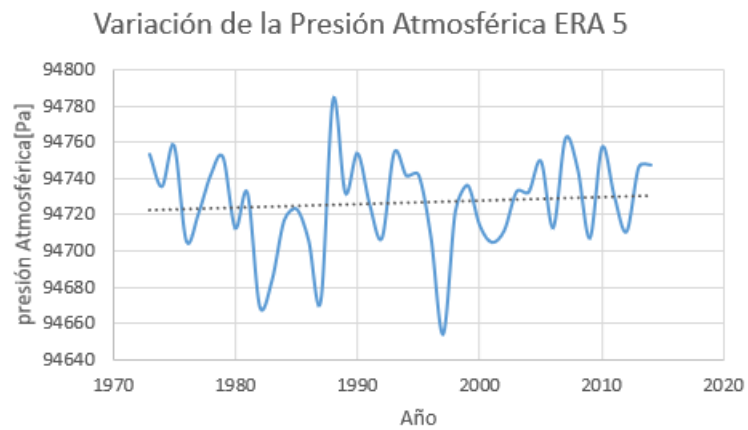
Anexo A. 2: Variación del promedio anual de la humedad relativa en el periodo 1973-2014. La línea segmentada indica la tendencia lineal.



Anexo A. 3: Variación del promedio anual de la velocidad del viento en el periodo 1973-2014. La línea segmentada indica la tendencia lineal.



Anexo A. 4: Variación del promedio anual de la radiación solar en el periodo 1973-2014. La línea segmentada indica la tendencia lineal.



Anexo A. 5: Variación del promedio anual de la presión atmosférica en el periodo 1973-2014. La línea segmentada indica la tendencia lineal.

B. DATOS EXTRAÍDOS DE LOS GCMS

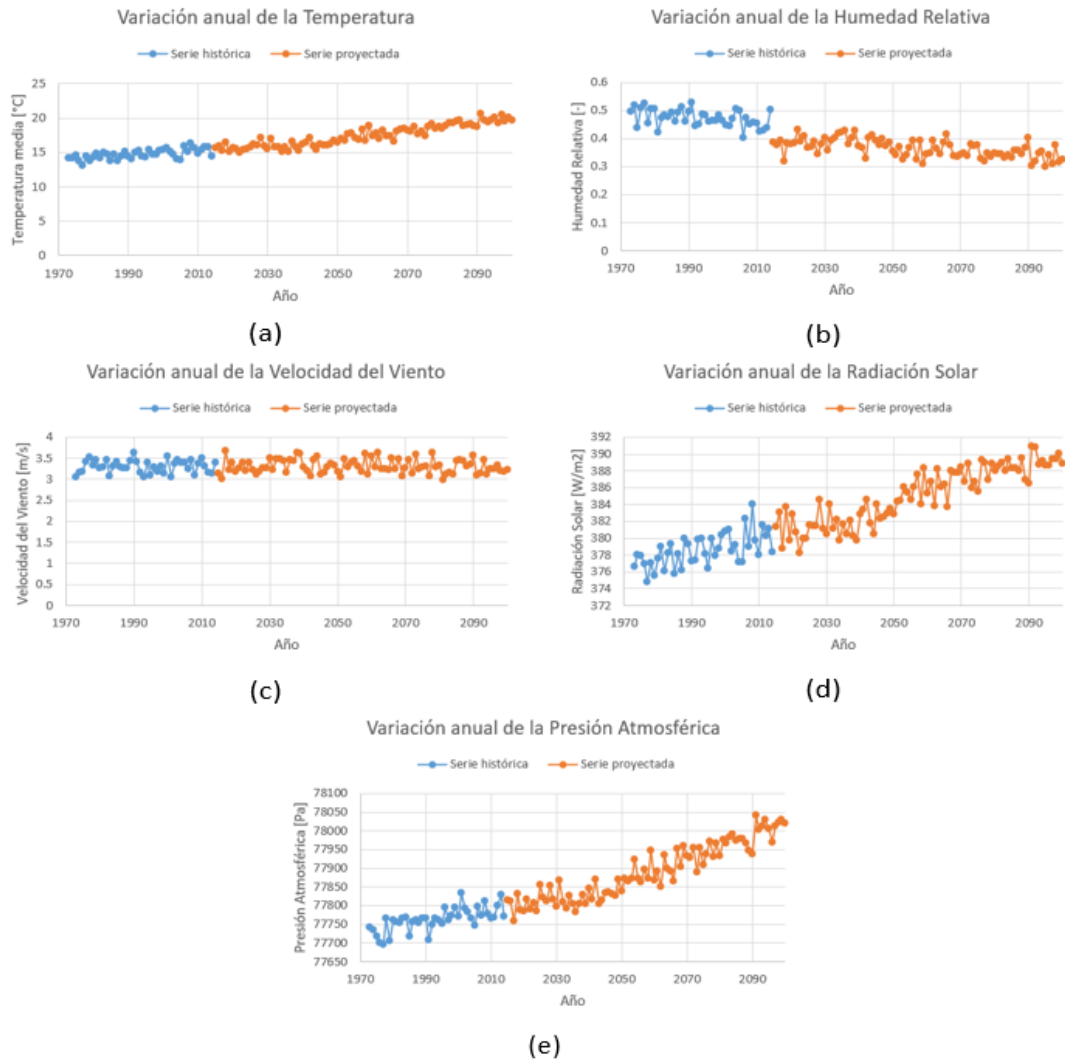


Figura B. 1: Variación del promedio anual de la temperatura media (a), humedad relativa (b), velocidad del viento (c), radiación solar (d) y presión atmosférica (e) según el Modelo de Circulación General AWI-CM-1-1-MR. La línea azul representa los datos históricos del modelo, mientras que la línea naranja muestra las proyecciones del escenario SSP5-8.5.



Figura B. 2: Variación del promedio anual de la temperatura media (a), humedad relativa (b), velocidad del viento (c), radiación solar (d) y presión atmosférica (e) según el Modelo de Circulación General AWI-CM-1-1-MR. La línea azul representa los datos históricos del modelo, mientras que la línea naranja muestra las proyecciones del escenario SSP5-8.5.

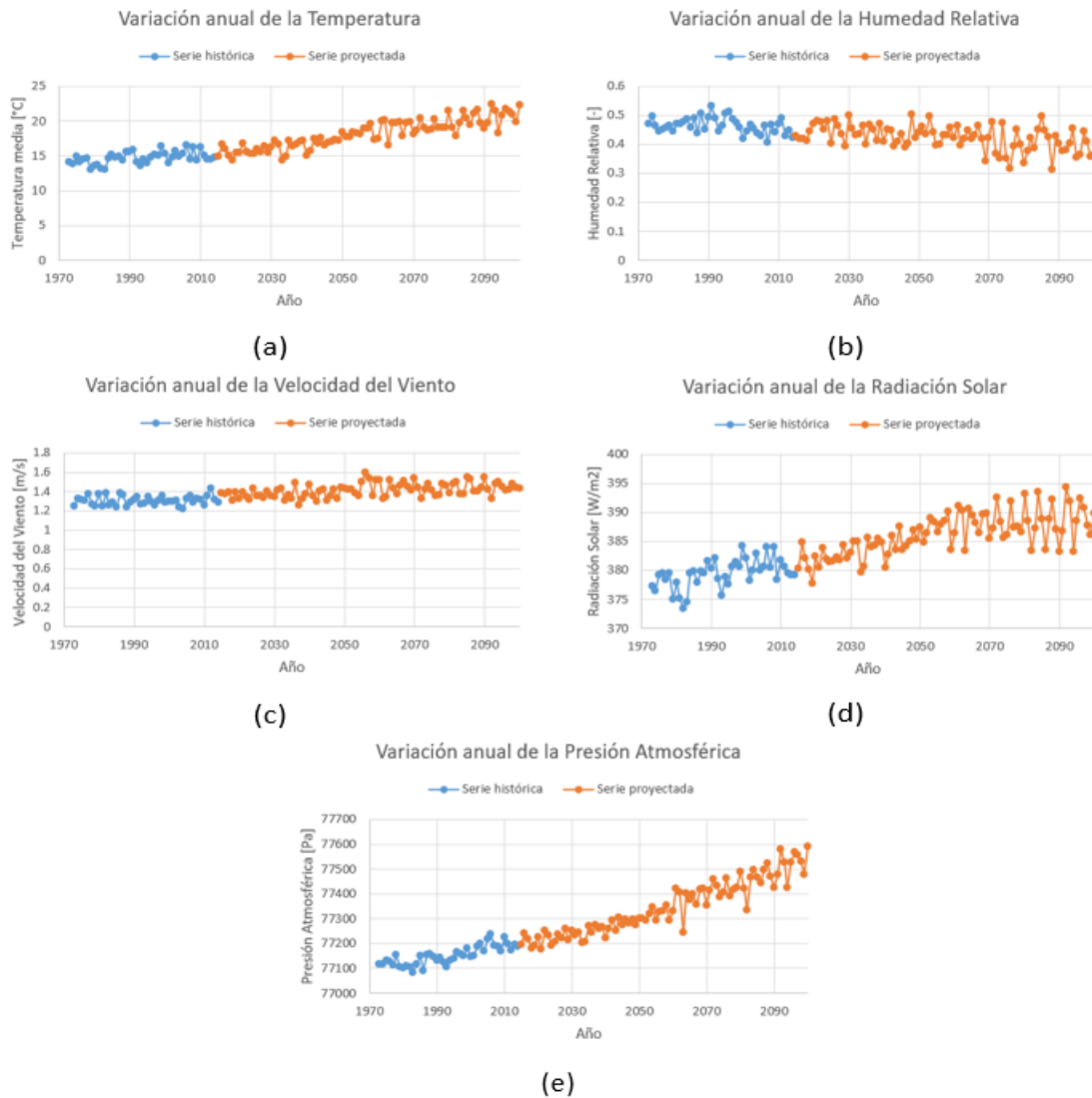


Figura B. 3: Variación del promedio anual de la temperatura media (a), humedad relativa (b), velocidad del viento (c), radiación solar (d) y presión atmosférica (e) según el Modelo de Circulación General EC-Earth3. La línea azul representa los datos históricos del modelo, mientras que la línea naranja muestra las proyecciones del escenario SSP5-8.5.

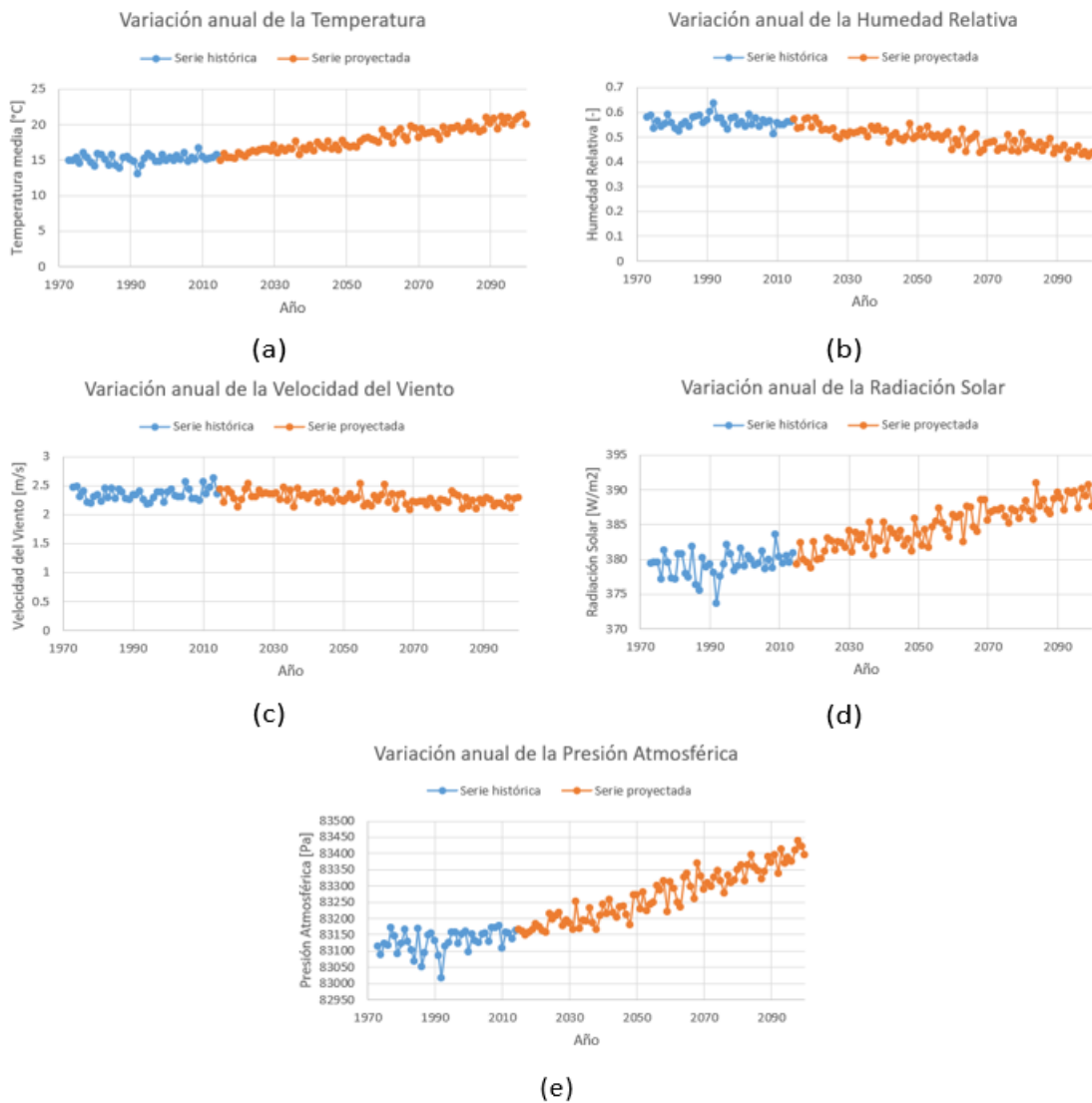


Figura B. 4: Variación del promedio anual de la temperatura media (a), humedad relativa (b), velocidad del viento (c), radiación solar (d) y presión atmosférica (e) según el Modelo de Circulación General GFDL-CM4. La línea azul representa los datos históricos del modelo, mientras que la línea naranja muestra las proyecciones del escenario SSP5-8.5.

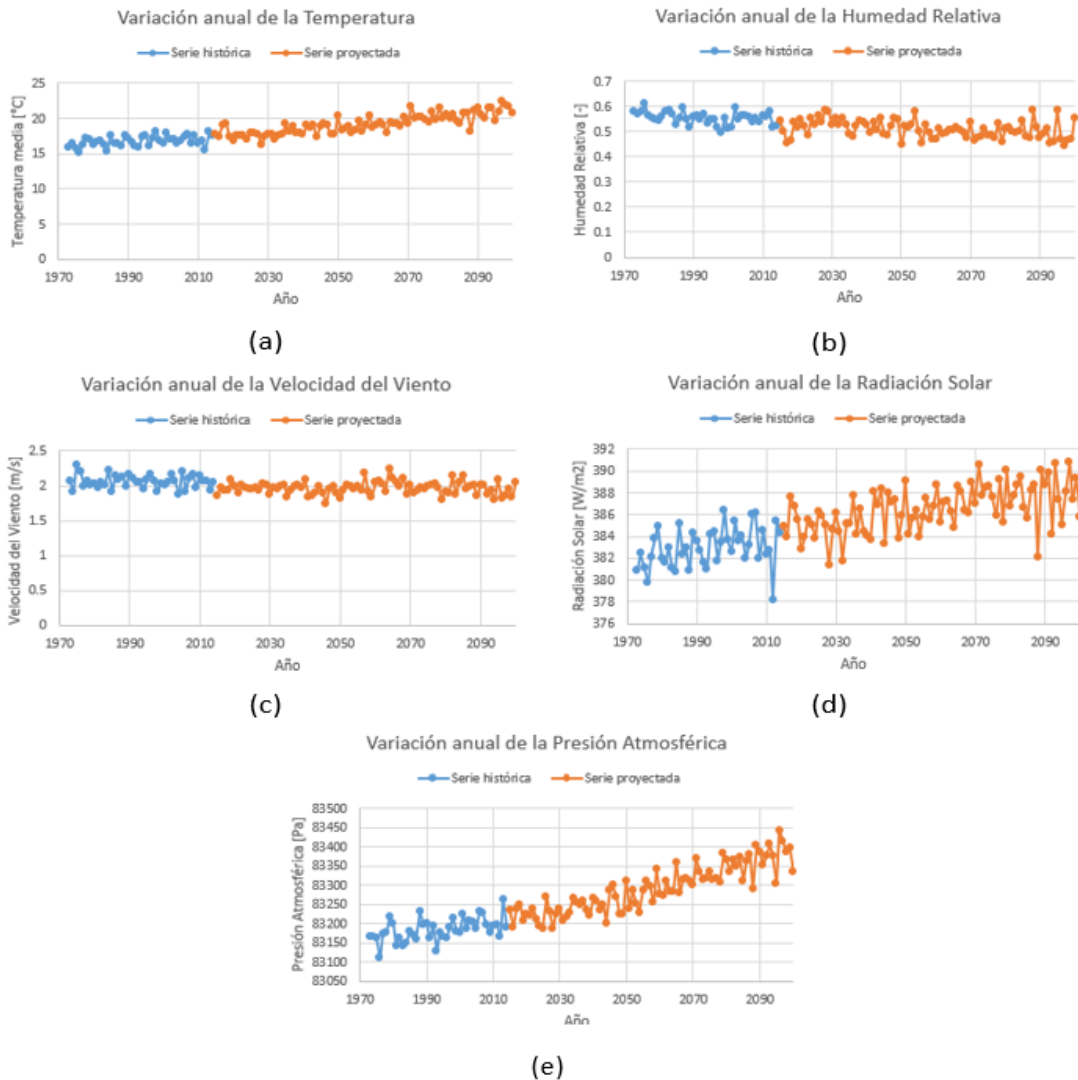


Figura B. 5: Variación del promedio anual de la temperatura media (a), humedad relativa (b), velocidad del viento (c), radiación solar (d) y presión atmosférica (e) según el Modelo de Circulación General GFDL-ESM4. La línea azul representa los datos históricos del modelo, mientras que la línea naranja muestra las proyecciones del escenario SSP5-8.5.

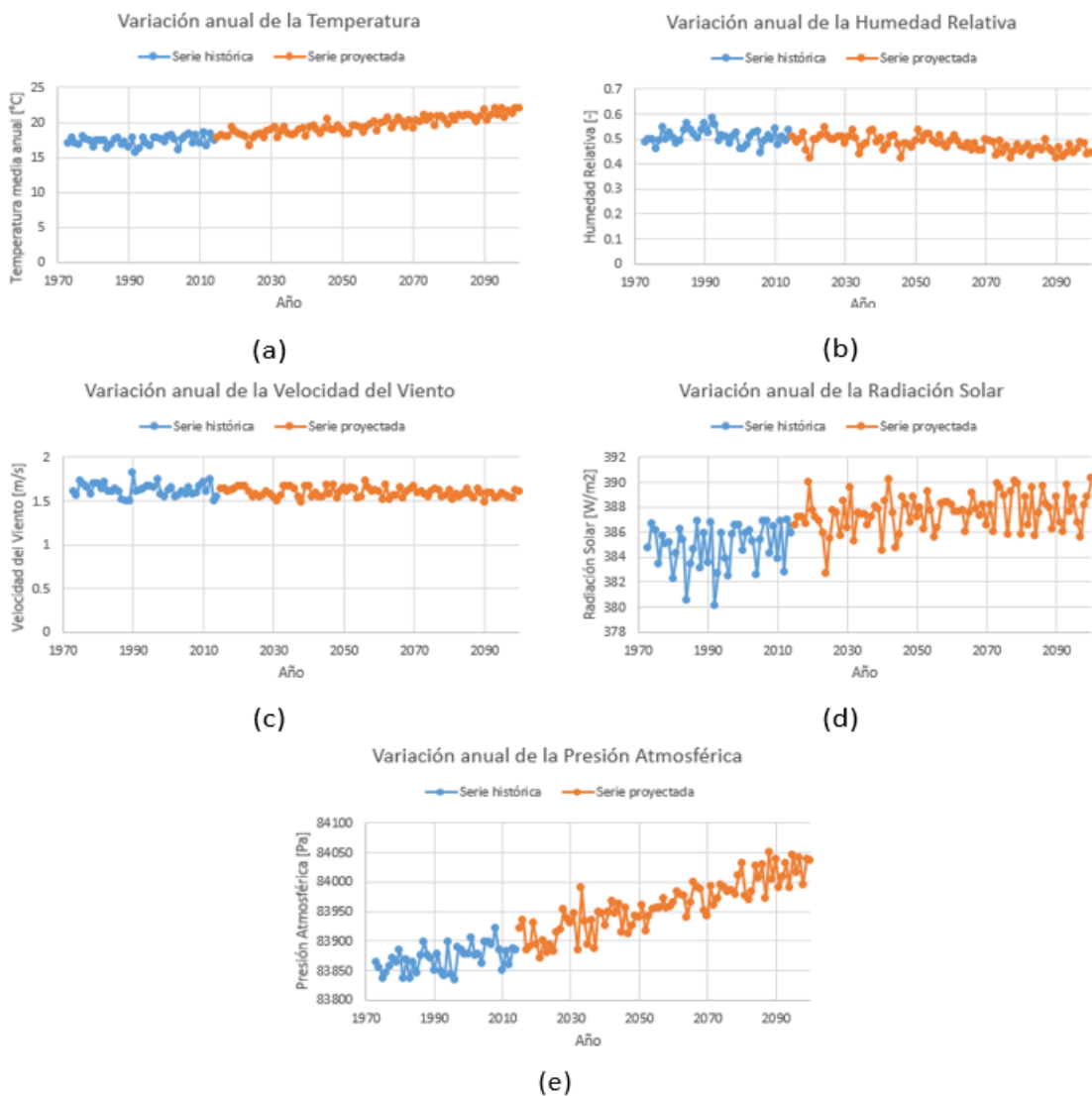


Figura B. 6: Variación del promedio anual de la temperatura media (a), humedad relativa (b), velocidad del viento (c), radiación solar (d) y presión atmosférica (e) según el Modelo de Circulación General INM-CM4-8. La línea azul representa los datos históricos del modelo, mientras que la línea naranja muestra las proyecciones del escenario SSP5-8.5.

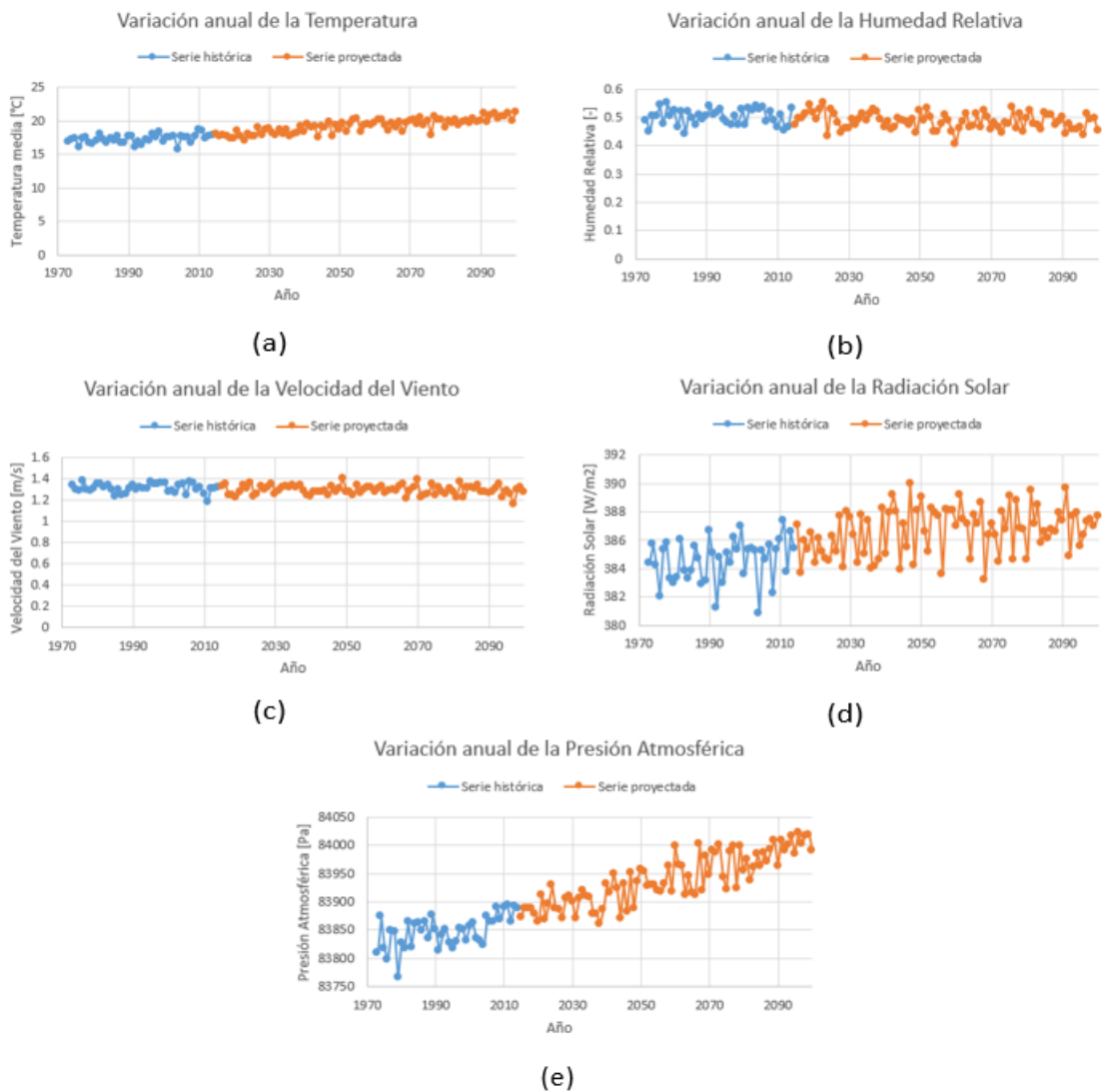


Figura B. 7: Variación del promedio anual de la temperatura media (a), humedad relativa (b), velocidad del viento (c), radiación solar (d) y presión atmosférica (e) según el Modelo de Circulación General INM-CM5-0. La línea azul representa los datos históricos del modelo, mientras que la línea naranja muestra las proyecciones del escenario SSP5-8.5.

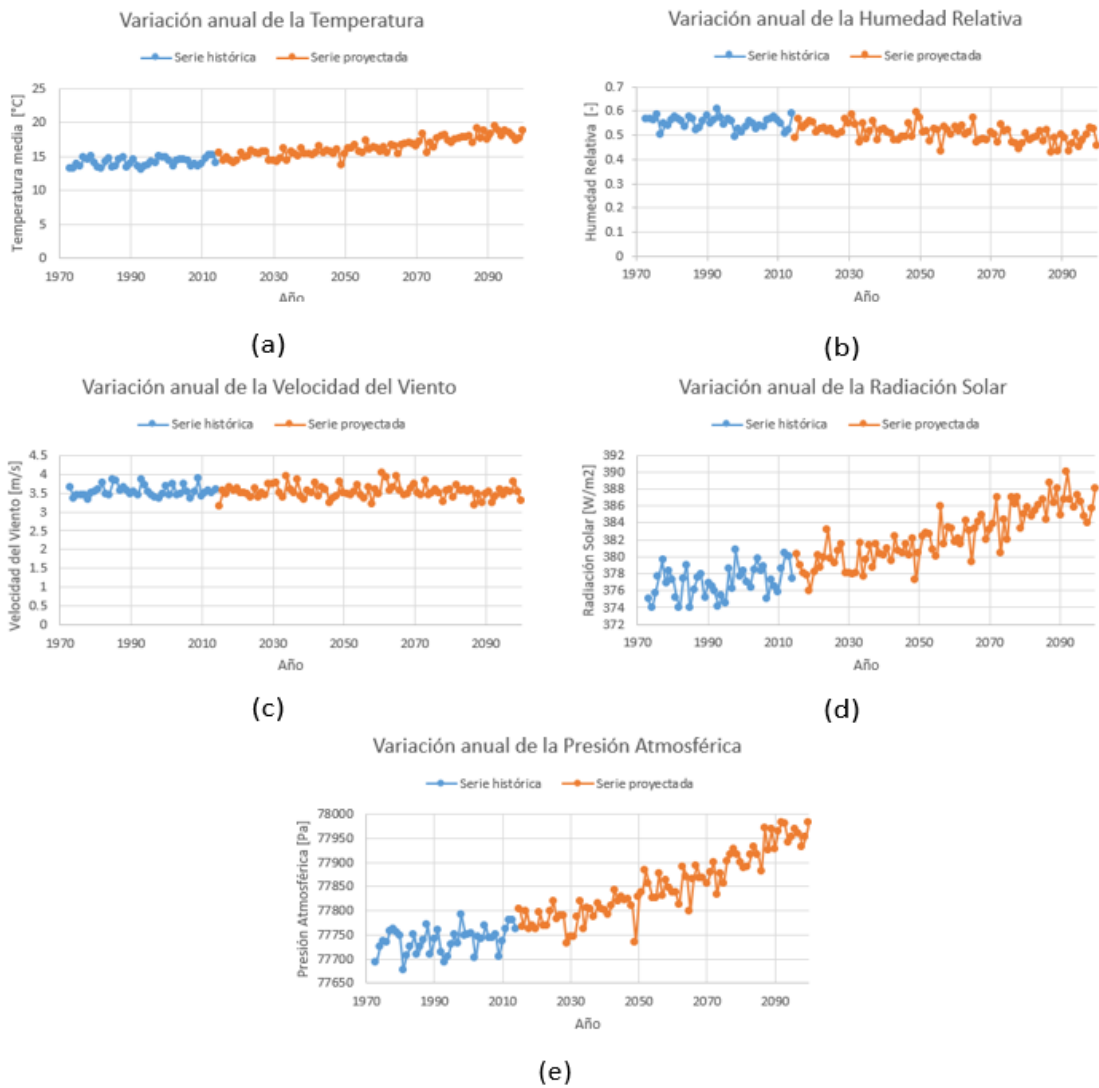


Figura B. 8: Variación del promedio anual de la temperatura media (a), humedad relativa (b), velocidad del viento (c), radiación solar (d) y presión atmosférica (e) según el Modelo de Circulación General MPI-ESM1-2-HR. La línea azul representa los datos históricos del modelo, mientras que la línea naranja muestra las proyecciones del escenario SSP5-8.5.