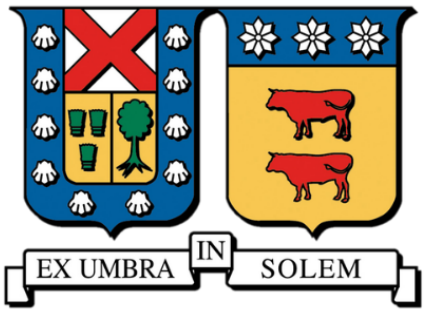

DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES

EVALUACIÓN DE PRODUCTOS CMIP6 PARA LA ESTIMACIÓN DE FORZANTES METEOROLÓGICAS EN TRES CUENCAS ANDINAS DE CHILE

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL

DANIELA FERNANDA PAREDES MOYA

PROFESORA GUÍA:
LINA CASTRO HEREDIA

SANTIAGO DE CHILE
2026

CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): [x] Memoria o trabajo de título ☐ Tesis de Postgrado

Título del trabajo: Evaluación de Productos CMIP6 para la Estimación de Forzantes Meteorológicas en Tres Cuencas Andinas de Chile

Nombre del candidato(a): Daniela Fernanda Paredes Moya

Carrera / Grado: Ingeniería Civil

Campus: San Joaquín **Departamento:** Obras Civiles

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, __LINA MABEL CASTRO HEREDIA___, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución.

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL (marcar una opción)

[X] El trabajo **NO contiene** información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

☐ El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (**embargo**) por **(marcar una opción)**:

☐ 6 meses ☐ 12 meses ☐ 2 años ☐ 3 años ☐ 5 años ☐ 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

_____

_____

_____

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Powered by ecert
Firma electrónica avanzada
LINA MABEL CASTRO HEREDIA
2026.10.20 13:52:09 -0300

Fecha: ___20 Oct 2026____ **Firma:** _____

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 20 de octubre, 2026 **Firma:**

Contenido

1 Introducción 8

2 Objetivos 10

3 Materiales y métodos 11

3.1 Zona de estudio 11

3.2 Bases de datos 12

3.2.1 Datos meteorológicos y productos grillados 12

3.2.2 Modelos de Circulación General 14

3.3 Metodología 15

3.3.1 Preproceso de CR2MET y modelos CMIP6 15

3.3.2 Escalamiento estadístico y corrección de sesgo productos CMIP6 17

4 Resultados y discusión 19

4.1 Corrección de temperatura CR2MET 19

4.2 Evaluación retrospectiva y proyecciones futuras de productos CMIP6 para temperatura 23

4.2.1 Cuenca Río Maule Alto 23

Cuenca Río Aconcagua Alto 31

4.2.2 Cuenca Río Yeso 38

4.3 Evaluación retrospectiva y proyecciones futuras de productos CMIP6 para precipitación 45

4.3.1 Cuenca Río Maule Alto 45

4.3.2 Cuenca Río Aconcagua Alto 52

4.3.3 Cuenca Río Yeso 59

5 Conclusiones 66

6 Referencias 68

Anexos 70

A. Especificaciones de estaciones meteorológicas 70

B. Resultados de temperatura media 72

C. Resultados de precipitación 78

Figuras

Figura 3-1: Mapa de las cuencas Río Aconcagua Alto, Río Yeso y Río Maule Alto, junto con sus respectivas elevaciones. 11
Figura 3-2: Mapa de las estaciones meteorológicas utilizadas para el análisis de la cuenca Río Maule Alto. . 13
Figura 3-3: Esquema metodológico para cada objetivo específico. 15
Figura 4-1: Distribución del error mensual de temperatura de CR2MET original y corregido en las estaciones meteorológicas de Maule Alto. 19
Figura 4-2: Distribución espacial de temperatura media original, corregida y diferencia asociada en la cuenca Maule Alto. 20
Figura 4-3: Distribución del error mensual de temperatura de CR2MET original y corregido en las estaciones meteorológicas de Aconcagua Alto. 20
Figura 4-4: Distribución espacial de temperatura media original, corregida y diferencia asociada en la cuenca Aconcagua Alto. 21
Figura 4-5: Distribución del error mensual de temperatura de CR2MET antes y después de la corrección altitudinal, cuenca río Yeso. 22
Figura 4-6: Distribución espacial de temperatura media original, corregida y diferencia asociada en la cuenca Yeso. 22
Figura 4-7: Comparación de la temperatura media anual de CR2MET con los GCMs en la cuenca Maule Alto durante 1980–2014: a) modelos originales; b) corregidos con QDM; y c) corregidos con MBCn. Cada panel incluye el promedio de temperatura media anual de CR2MET y de cada modelo. 24
Figura 4-8: Ciclo anual histórico de temperatura media de CR2MET y modelos CMIP6 para a) modelos originales, b) modelos corregidos mediante QDM y c) modelos corregidos mediante MBCn, Maule Alto. ... 26
Figura 4-9: Diagrama de Taylor histórico mensual de temperatura media, cuenca Maule Alto. 27
Figura 4-10: Series de temperatura media anual proyectadas para el periodo 2030–2099 en la cuenca Maule Alto: a) mediante QDM; y b) mediante MBCn. Cada panel incluye el promedio de temperatura media anual de cada modelo para 2030–2064 y 2065–2099. 28
Figura 4-11: Ciclos anuales de temperatura media históricos y proyectados mediante QDM y MBCn para los periodos 2000–2014, 2030–2064 y 2065–2099, Maule Alto. 29
Figura 4-12: Distribución espacial de la temperatura media anual en la cuenca Maule Alto para (a) CR2MET histórico (2000-2014), (b–e) proyecciones 2030–2064 corregidas mediante QDM y (f–i) mediante MBCn. . 30
Figura 4-13: Distribución espacial de la temperatura media anual en la cuenca Maule Alto para (a) CR2MET histórico (2000-2014), (b–e) proyecciones 2065–2099 corregidas mediante QDM y (f–i) mediante MBCn. . 31
Figura 4-14: Comparación de la temperatura media anual de CR2MET con los GCMs en la cuenca Aconcagua Alto durante 1980–2014: a) modelos originales; b) corregidos con QDM; y c) corregidos con MBCn. Cada panel incluye el promedio de temperatura media anual de CR2MET y de cada modelo. 32

Figura 4-15: Ciclo anual histórico de temperatura media de CR2MET y modelos CMIP6 para a) modelos originales, b) modelos corregidos mediante QDM y c) modelos corregidos mediante MBCn, Aconcagua Alto. 33
Figura 4-16: Diagrama de Taylor histórico mensual de temperatura media, cuenca Aconcagua Alto. 34
Figura 4-17: Series de temperatura media anual proyectadas para el periodo 2030–2099 en la cuenca Aconcagua Alto: a) mediante QDM; y b) mediante MBCn. Cada panel incluye el promedio de temperatura media anual de cada modelo para 2030–2064 y 2065–2099. 35
Figura 4-18: Ciclos anuales de temperatura media históricos y proyectados mediante QDM y MBCn para los periodos 2000–2014, 2030–2064 y 2065–2099, Aconcagua Alto. 36
Figura 4-19: Distribución espacial de la temperatura media anual en la cuenca Aconcagua Alto para (a) CR2MET histórico (2000 - 2014), (b–e) proyecciones 2030 –2064 corregidas mediante QDM y (f–i) mediante MBCn. 37
Figura 4-20: Distribución espacial de la temperatura media anual en la cuenca Aconcagua Alto para (a) CR2MET histórico (2000 - 2014), (b–e) proyecciones 2065–2099 corregidas mediante QDM y (f–i) mediante MBCn 37
Figura 4-21: Comparación de la temperatura media anual de CR2MET con los GCMs en la cuenca Yeso durante 1980–2014: a) modelos originales; b) corregidos con QDM; y c) corregidos con MBCn. Cada panel incluye el promedio de temperatura media anual de CR2MET y de cada modelo. 38
Figura 4-22: Ciclo anual histórico de temperatura media de CR2MET y modelos CMIP6 para a) modelos originales, b) modelos corregidos mediante QDM y c) modelos corregidos mediante MBCn, Yeso. 40
Figura 4-23: Diagrama de Taylor histórico mensual de temperatura media, cuenca Yeso. 41
Figura 4-24: Series de temperatura media anual proyectadas para el periodo 2030–2099 en la cuenca Yeso: a) mediante QDM; y b) mediante MBCn. Cada panel incluye el promedio de temperatura media anual de cada modelo para 2030–2064 y 2065–2099. 42
Figura 4-25: Ciclos anuales de temperatura media históricos y proyectados mediante QDM y MBCn para los periodos 2000–2014, 2030–2064 y 2065–2099, Yeso. 43
Figura 4-26: Distribución espacial de la temperatura media anual en la cuenca Yeso para (a) CR2MET histórico (2000-2014), (b–e) proyecciones 2030–2064 corregidas mediante QDM y (f–i) mediante MBCn. 44
Figura 4-27: Distribución espacial de la temperatura media anual en la cuenca Yeso para (a) CR2MET histórico (2000-2014), (b–e) proyecciones 2065–2099 corregidas mediante QDM y (f–i) mediante MBCn. 44
Figura 4-28: Comparación de la precipitación anual de CR2MET con los GCMs en la cuenca Maule Alto durante 1980–2014: a) modelos originales; b) corregidos con QDM; y c) corregidos con MBCn. Cada panel incluye el promedio de la precipitación anual de CR2MET y de cada modelo. 46
Figura 4-29: Ciclo anual histórico de precipitación de CR2MET y modelos CMIP6 para a) modelos originales, b) modelos corregidos mediante QDM y c) modelos corregidos mediante MBCn, Maule Alto. 47
Figura 4-30: Diagrama de Taylor de precipitación mensual, cuenca Maule Alto. 48

Figura 4-31: Series de precipitación anual proyectadas para el periodo 2030–2099 en la cuenca Maule Alto: a) mediante QDM; y b) mediante MBCn. Cada panel incluye el promedio de precipitación anual de cada modelo para 2030–2064 y 2065–2099. 49
Figura 4-32: Ciclos anuales de precipitación históricos y proyectados mediante QDM y MBCn para los periodos 2000–2014, 2030–2064 y 2065–2099, Maule Alto. 51
Figura 4-33: Comparación de la precipitación anual de CR2MET con los GCMs en la cuenca Aconcagua Alto durante 1980–2014: a) modelos originales; b) corregidos con QDM; y c) corregidos con MBCn. Cada panel incluye el promedio de la precipitación anual de CR2MET y de cada modelo. 52
Figura 4-34: Ciclo anual histórico de precipitación de CR2MET y modelos CMIP6 para a) modelos originales, b) modelos corregidos mediante QDM y c) modelos corregidos mediante MBCn, Aconcagua Alto. 54
Figura 4-35: Diagrama de Taylor de precipitación mensual, cuenca Aconcagua Alto. 55
Figura 4-36: Series de precipitación anual proyectadas para el periodo 2030–2099 en la cuenca Aconcagua Alto: a) mediante QDM; y b) mediante MBCn. Cada panel incluye el promedio de precipitación anual de cada modelo para 2030–2064 y 2065–2099. 56
Figura 4-37: Ciclos anuales de precipitación históricos y proyectados mediante QDM y MBCn para los periodos 2000–2014, 2030–2064 y 2065–2099, Aconcagua Alto. 58
Figura 4-38: Comparación de la precipitación anual de CR2MET con los GCMs en la cuenca Yeso durante 1980–2014: a) modelos originales; b) corregidos con QDM; y c) corregidos con MBCn. Cada panel incluye el promedio de la precipitación anual de CR2MET y de cada modelo. 59
Figura 4-39: Ciclo anual histórico de precipitación de CR2MET y modelos CMIP6 para a) modelos originales, b) modelos corregidos mediante QDM y c) modelos corregidos mediante MBCn, cuenca Yeso. 61
Figura 4-40: Diagrama de Taylor de precipitación mensual, cuenca Yeso. 62
Figura 4-41: Series de precipitación anual proyectadas para el periodo 2030–2099 en la cuenca Yeso: a) mediante QDM; y b) mediante MBCn. Cada panel incluye el promedio de precipitación anual de cada modelo para 2030–2064 y 2065–2099. 63
Figura 4-42: Ciclos anuales de precipitación históricos y proyectados mediante QDM y MBCn para los periodos 2000–2014, 2030–2064 y 2065–2099, Yeso. 64

Tablas

Tabla 3-1: Descripción de estaciones meteorológicas utilizadas en la cuenca Río Maule Alto. Se consideran las variables temperatura media (tas) y precipitación (pr). 13
Tabla 3-2: Descripción de Modelos de Circulación General CMIP6 utilizados. 14
Tabla 3-3: Gradientes definidos para cada estación (Ibañez et al., 2021) 16
Tabla 4-1: Métricas de desempeño (MBE, NRMSE, correlación de Pearson y Perkins Skill Score) de los modelos originales y corregidos de temperatura media durante el periodo 1980–2014, cuenca Maule Alto... 24

Tabla 4-2: Métricas de desempeño (MBE, NRMSE y correlación de Pearson) de los modelos originales y corregidos de temperatura media para el ciclo anual histórico, cuenca Maule Alto. 26
Tabla 4-3: Señal de cambio climático (SCC) y tasa decadal de cambio climático (TD) de temperatura media para el futuro cercano y lejano respecto del periodo histórico, cuenca Maule Alto. 28
Tabla 4-4: Métricas de desempeño (MBE, NRMSE, correlación de Pearson y Perkins Skill Score) de los modelos originales y corregidos de temperatura media durante el periodo 1980–2014, cuenca Aconcagua Alto. 32
Tabla 4-5: Métricas de desempeño (MBE, NRMSE y correlación de Pearson) de los modelos originales y corregidos de temperatura media para el ciclo anual histórico, cuenca Aconcagua Alto. 33
Tabla 4-6: Señal de cambio climático (SCC) y tasa decadal de cambio climático (TD) de temperatura media para el futuro cercano y lejano respecto del periodo histórico, cuenca Aconcagua Alto. 35
Tabla 4-7: Métricas de desempeño (MBE, NRMSE, correlación de Pearson y Perkins Skill Score) de los modelos originales y corregidos de temperatura media durante el periodo 1980–2014, cuenca Yeso. 39
Tabla 4-8: Métricas de desempeño (MBE, NRMSE y correlación de Pearson) de los modelos originales y corregidos de temperatura media para el ciclo anual histórico, cuenca Yeso. 40
Tabla 4-9: Señal de cambio para el futuro cercano y lejano respecto del periodo histórico, Yeso. 42
Tabla 4-10: Métricas de desempeño (PBIAS, NRMSE, correlación de Pearson y Perkins Skill Score) de los modelos originales y corregidos de precipitación durante el periodo 1980–2014, cuenca Maule Alto. 46
Tabla 4-11: Métricas de desempeño (MBE, NRMSE y correlación de Pearson) de los modelos originales y corregidos de precipitación para el ciclo anual histórico, cuenca Maule Alto. 47
Tabla 4-12: Señal de cambio de precipitación para el futuro cercano y lejano respecto del periodo histórico, Maule Alto. 49
Tabla 4-13: Coeficiente de variación de precipitación anual para el periodo histórico, futuro cercano y futuro lejano, Maule Alto. 50
Tabla 4-14: Media y desviación estándar entre modelos de la precipitación mensual proyectada por estación, para el futuro cercano y lejano, Maule Alto. 51
Tabla 4-15: Métricas de desempeño (PBIAS, NRMSE, correlación de Pearson y Perkins Skill Score) de los modelos originales y corregidos de precipitación durante el periodo 1980–2014, cuenca Aconcagua Alto. ... 53
Tabla 4-16: Métricas de desempeño (MBE, NRMSE y correlación de Pearson) de los modelos originales y corregidos de precipitación para el ciclo anual histórico, cuenca Aconcagua Alto. 54
Tabla 4-17: Señal de cambio para el futuro cercano y lejano respecto del periodo histórico, cuenca Aconcagua Alto. 56
Tabla 4-18: Coeficiente de variación de precipitación anual para el periodo histórico, futuro cercano y futuro lejano, Aconcagua Alto. 57
Tabla 4-19: Media y desviación estándar entre modelos de la precipitación mensual proyectada por estación, para el futuro cercano y lejano, Aconcagua Alto. 58
Tabla 4-20: Métricas de desempeño (PBIAS, NRMSE, correlación de Pearson y Perkins Skill Score) de los modelos originales y corregidos de precipitación durante el periodo 1980–2014, cuenca Yeso. 60

Tabla 4-21: Métricas de desempeño (MBE, NRMSE y correlación de Pearson) de los modelos originales y corregidos de precipitación para el ciclo anual histórico, cuenca Yeso..... 61
Tabla 4-22: Señal de cambio para el futuro cercano y lejano respecto del periodo histórico, Yeso..... 63
Tabla 4-23: Coeficiente de variación de precipitación anual para periodo histórico, futuro cercano y futuro lejano, Yeso..... 63
Tabla 4-24: Media y desviación estándar entre modelos de la precipitación mensual proyectada por estación, para el futuro cercano y lejano, Yeso. 65

1 Introducción

El estudio del cambio climático ha adquirido relevancia en la comunidad científica, puesto que, al realizar proyecciones climáticas, estas muestran una evolución poco alentadora y con posibles efectos sobre la biósfera y el ciclo hidrológico (Vásquez et al., 2025). Esta situación se vuelve crítica en zonas montañosas, las cuales son vulnerables especialmente a los cambios de temperatura y precipitación, como lo demuestra un estudio realizado en la cuenca del Río Bhagirathi, en la cordillera del Himalaya. En las proyecciones realizadas, se concluyó que el aumento de la temperatura máxima y mínima provocaría una disminución del caudal del río, ya que esa variación anticiparía el inicio del deshielo de los glaciares y con esto, el régimen de los ríos se vería alterado (Singh et al., 2022). Otra zona que también ha sido estudiada es la cordillera de los Andes, la cual corresponde a la cadena montañosa más grande del mundo, y que abastece de agua dulce a más de 90 millones de personas, por lo cual adquiere una gran relevancia en materia de recursos hídricos (Espinoza et al., 2020). Particularmente en Chile se han realizado diversos estudios, los cuales proyectan reducciones drásticas en la nevada y con un aumento en la altura del nivel de congelación. Esta situación puede exacerbar el riesgo de inundaciones y deslizamientos de tierra en todo Chile (Vásquez et al., 2025). Por otro lado, para Chile Central, proyecciones realizadas bajo el escenario de emisiones SSP5-8.5, muestran un clima significativamente más seco (hasta un 30-40%) y más cálido en hasta 6°C a final de siglo (2080-2099), lo que afectaría directamente en la cobertura nival y hielos andinos (Salazar et al., 2024). Incluso, considerando un escenario de bajas emisiones, se proyecta que el manto nival de los Andes disminuya entre un 35-45% hacia mediados de siglo, mientras que, en las zonas más dominadas por los deshielos, los cambios hidrológicos proyectados bajo el escenario RCP8.5 se acompañan de una mayor disminución del manto nival en un 75-85% (Bozkurt et al., 2018). Todo esto impactaría en la disponibilidad de agua para el consumo humano, riego, generación de energía hidroeléctrica y la economía en general, por lo que se vuelve necesario evaluar adecuadamente estos cambios y comprender cuáles serían sus implicancias, para así implementar medidas de mitigación y adaptación al cambio climático (Salazar et al., 2024; Singh et al., 2022).

Los estudios de cambio climático se realizan utilizando Modelos de Circulación General (GCM), los cuales simulan la atmósfera, los océanos, la superficie terrestre y el hielo marino, incluidas las interacciones entre los ciclos biogeoquímicos y las actividades humanas. Los GCMs se agrupan en el Coupled Model Intercomparison Project (CMIP), que es una iniciativa internacional, de libre acceso y con un formato estandarizado para todos los modelos. Los modelos CMIP, actualmente en su sexta fase, mejoran las versiones anteriores al aumentar la resolución, agregar nuevos mecanismos de retroalimentación e incorporar procesos avanzados del sistema terrestre (Eyring et al., 2016; Vásquez et al., 2025). A pesar de estos aspectos positivos, los GCMs tienen limitaciones respecto a la representación de sectores que poseen una topografía compleja, como lo son las zonas de alta montaña (Gateño et al., 2024; Vásquez et al., 2024). Esto se debe a la baja resolución horizontal de los modelos, que no permite representar adecuadamente la complejidad del relieve en sectores cordilleranos, influyente en el comportamiento climático del sector.

Dado lo anterior, se han desarrollado métodos de escalamiento (downscaling) que permiten mejorar la resolución espacial de los modelos. Estos se clasifican principalmente en métodos de escalamiento dinámico y estadístico. El downscaling dinámico utiliza Modelos Climáticos Regionales (RCM), los cuales permiten traducir la evolución meteorológica de gran escala entregada por los GCMs a una escala regional físicamente consistente, con una mayor resolución. Para esto, se utilizan condiciones iniciales y de contorno provenientes de los GCMs, simulando explícitamente procesos físicos y sus interacciones dentro del sistema climático, lo que permite incorporar con mayor detalle la influencia de características como la topografía y los procesos de mesoescala (Schmidli et al., 2006; Xu et al., 2021). Sin embargo, la generación simulaciones regionales mediante RCMs requiere elevados recursos computacionales, ya que estos modelos presentan altas resoluciones, y además requieren información proveniente de diversos GCMs para generar las simulaciones (Bozkurt et al., 2019).

El downscaling estadístico establece relaciones estadísticas entre variables observadas a gran escala y observaciones locales. Una vez establecidas estas relaciones para el clima actual, se aplican a los GCMs para generar proyecciones a escala local (Araya-Osses et al., 2020). Además, los modelos también tienen algunas discrepancias respecto a los datos climáticos observado, por lo tanto, deben ser corregidos para simular y proyectar el clima de manera adecuada. Para esto se aplican métodos de corrección de sesgo, como Quantile Delta Mapping (QDM) o Multivariate Bias Correction (MBCn), siendo este último capaz de corregir sesgos y aumentar la resolución de los modelos de manera simultánea. Además, algunos estudios han demostrado que el método MBCn replica mejor la correlación entre temperatura y la precipitación en zonas áridas o templadas con fracciones de nieve importantes (Vásquez et al., 2025).

A partir de lo expuesto, esta memoria tiene por objetivo evaluar modelos CMIP6 en tres cuencas de alta montaña en Chile Central, implementando métodos de desagregación espacial estadística. Para esto, se seleccionan cuatro modelos CMIP6 y, utilizando información climática observada del periodo 1980-2014, se aplican distintos métodos de downscaling y corrección de sesgo. Los resultados permitirán identificar qué modelos se ajustan de mejor manera, según la corrección utilizada y cuenca estudiada. Finalmente, con los modelos corregidos se realizan y analizan las proyecciones de cambio climático para los periodos 2030-2064 y 2065-2099.

2 Objetivos

Objetivo General: Evaluar modelos CMIP6 en cuencas de alta montaña, implementando métodos de desagregación espacial estadística.

Objetivos Específicos:

1. Evaluar el desempeño histórico de modelos CMIP6 en la representación de variables climáticas en cuencas andinas de Chile.
2. Evaluar la eficacia de los métodos de desagregación espacial estadística y corrección de sesgo para mejorar la resolución y representatividad de las proyecciones climáticas en regiones montañosas.
3. Analizar las proyecciones de cambio climático en cuencas de alta montaña y sus efectos a largo plazo.

3 Materiales y métodos

3.1 Zona de estudio

Las cuencas andinas escogidas para este estudio corresponden la cuenca del Río Aconcagua Alto, Río Yeso y Río Maule Alto (Hasta antes junta Río Melado). La cuenca del Río Aconcagua Alto (32.83°S, 70.24°O), que cuenta con una superficie 1959.36 km^2, pertenece a la región de Valparaíso, en la cuenca del Río Aconcagua. Por otro lado, la cuenca del Río Yeso (33.65°S, 70.04°O) tiene un área de 627.01 km^2, se ubica en la región Metropolitana de Santiago y pertenece a la cuenca del Río Maipo. Por último, la cuenca del Río Maule Alto (35.81°S y 70.65°O) se encuentra en la cuenca del Río Maule, en la región del Maule, y abarca una superficie de 2710.757 km^2 (https://simbio.mma.gob.cl/). La Figura 3-1 muestra la ubicación de estas cuencas con sus respectivas elevaciones.

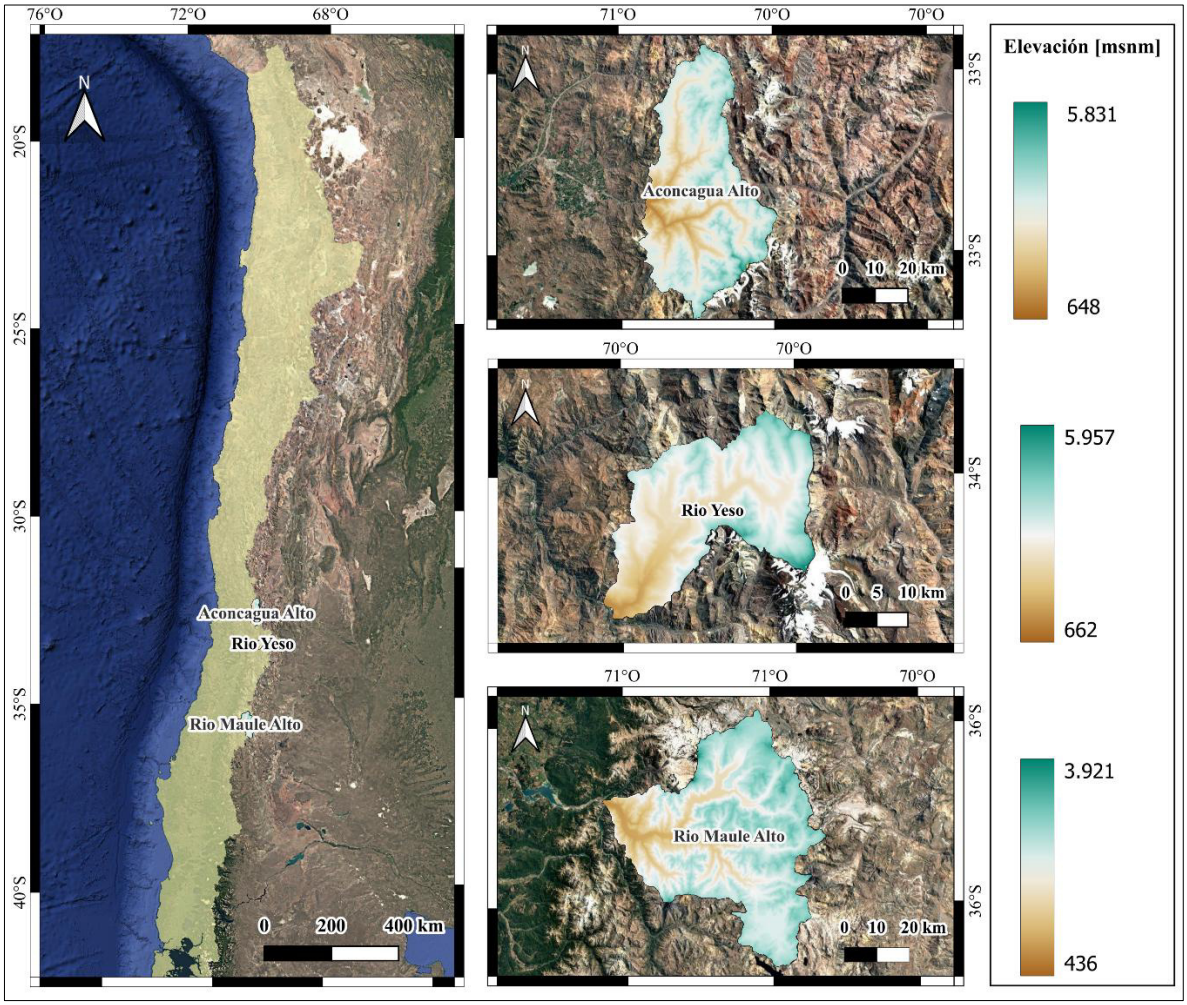

Figura 3-1: Mapa de las cuencas Río Aconcagua Alto, Río Yeso y Río Maule Alto, junto con sus respectivas elevaciones.

La macrozona a la cual pertenecen las cuencas seleccionadas es Chile Central, que se encuentra entre las latitudes 29°S y 40°S. “Chile central tiene un clima mediterráneo típico, con precipitaciones invernales de tipo estratiforme (JJA). Su clima está moldeado por el anticiclón subtropical y la trayectoria de tormentas en latitudes medias (Garreaud et al., 2009, 2017)” (Salazar et al., 2024). Por otro lado, estas cuencas, al estar ubicadas en la cordillera de los Andes, donde se genera un marcado incremento orográfico de la precipitación de escala sinóptica en el lado de barlovento de la cordillera (Salazar et al., 2024), y gracias a las bajas temperaturas, más del 70% de la precipitación cae en forma de nieve, influyendo en la hidrología de esta región (Vásquez et al., 2025). Específicamente, la cuenca Río Aconcagua Alto presenta una precipitación entre 90 y 120 milímetros mensuales promedio en los meses de invierno, mientras que Río Yeso puede superar los 200 milímetros y Río Maule Alto presenta precipitaciones de alrededor de 800 milímetros mensuales, también en meses de invierno.

La importancia de las cuencas estudiadas radica en su función como fuentes fundamentales de agua dulce, debido a la presencia de glaciares, nieve, embalses y cuerpos de agua como lagos. Estas entregan una amplia variedad de beneficios socioeconómicos y ambientales, destacando el suministro de agua para consumo humano, el riego y producción hidroeléctrica (Bozkurt et al., 2018).

3.2 Bases de datos

3.2.1 Datos meteorológicos y productos grillados

Para obtener la información en formato grillado se consideró la base de datos CR2MET (v2.5) (https://www.cr2.cl/datos-productos-grillados/) como el producto observacional. Las variables utilizadas fueron precipitación (pr) y temperatura media (tas), abarcando entre las latitudes 29°S, 38°S y longitudes 62°O y 79°O, coordenadas dentro de las cuales se ubican las cuencas seleccionadas. Los productos grillados CR2MET tienen una resolución horizontal de 0.05° X 0.05°, y el periodo de observaciones corresponde a 35 años, entre el 1980 y 2014 (Pablo Boisier et al., 2018a).

Para tener más información y validar CR2MET, se utilizaron las estaciones meteorológicas de cada cuenca (https://www.cr2.cl/bases-de-datos/). En el caso de la cuenca Río Maule Alto, estas se encuentran detalladas en la Tabla 3-1, todas tienen una frecuencia mensual, y pertenecen a la Dirección General de Aguas (DGA). Además, la Figura 3-2 presenta un mapa con la distribución espacial de las estaciones en la cuenca. Figura A-1 y Figura A- 2 muestran los mapas correspondientes a la cuenca río Aconcagua Alto y río Yeso respectivamente, mientras que la Tabla A- 1 y la Tabla A- 2 describen las estaciones meteorológicas de las cuencas mencionadas anteriormente.

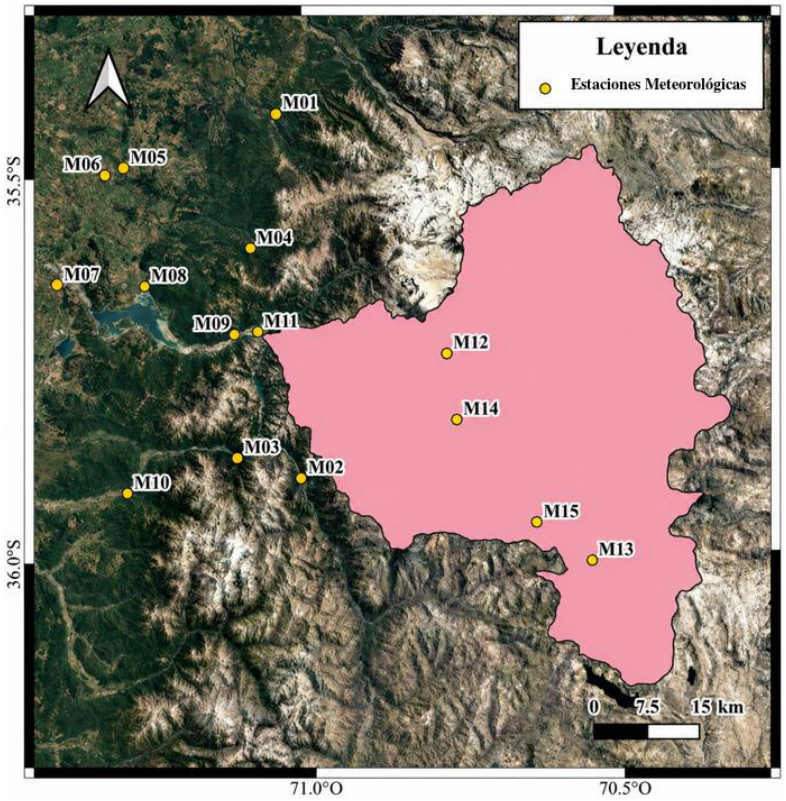

Figura 3-2: Mapa de las estaciones meteorológicas utilizadas para el análisis de la cuenca Río Maule Alto.

Tabla 3-1: Descripción de estaciones meteorológicas utilizadas en la cuenca Río Maule Alto. Se consideran las variables temperatura media (tas) y precipitación (pr).

ID	Estación meteorológica	Ubicación (lat°, lon°)	Altura (msnm)	Periodo	Variables
M01	Fundo el Radal	-35.42, -71.04	685	1992-2015	pr
M02	Rio Melado en el Salto	-35.88, -71.02	730	2003-2015	pr, tas
M03	Hornillo	-35.86, -71.12	810	1980-2015	pr
M04	Vilches Alto	-35.59, -71.08	1058	1992-2015	pr
M05	Huapi	-35.48, -71.29	250	1980-2015	pr
M06	El Durazno	-35.49, -71.32	275	1992-2015	pr
M07	Colbun (Maule Sur)	-35.62, -71.40	280	1980-2015	pr
M08	Colorado	-35.64, -71.26	420	1980-2015	pr, tas
M09	Rio Maule en Armerillo	-35.70, -71.11	470	2001-2015	pr, tas
M10	Ancoa Embalse	-35.91, -71.29	421	1959-2017	pr, tas
M11	Armerillo	-35.70, -71.07	492	1980-2015	pr, tas
M12	Río Cipreses En Dasague Laguna La Invernada	-35.73, -70.77	1300	2015	pr, tas
M13	Los Condores	-36.01, -70.55	2172	2014-2015	pr, tas
M14	Río Maule En Los Baños	-35.81, -70.76	980	2015	pr, tas
M15	Lo Aguirre	-35.96,-70.57	2000	2000-2015	tas

3.2.2 Modelos de Circulación General

Los Modelos de Circulación General son considerados las herramientas más confiables para evaluar la evolución del clima bajo diferentes forzamientos antrópicos, como las emisiones de gases invernadero, y entregan una estimación de los posibles climas futuros basados en factores socioeconómicos y demográficos correspondientes a diferentes escenarios de emisiones. Estos modelos se basan en principios físicos que describen numéricamente el sistema climático, y pueden reproducir las características observadas del clima actual y los cambios pasados (Araya-Osses et al., 2020).

Existe una gran cantidad de GCMs, los cuales han sido agrupados bajo el Coupled Model Intercomparison Project (CMIP), que actualmente se encuentra en su sexta fase. Este proyecto fue impulsado por el World Climate Research Programme (WCRP) hace más de 20 años y permite que acceso a los modelos sea de carácter público. Esto se ha logrado estandarizando el formato de los modelos, para facilitar el análisis por parte de la comunidad científica, a través del Earth System Grid Federation (Eyring et al., 2016).

La elección de los modelos se fundamenta en el buen rendimiento que estos han tenido para la macrozona de Chile central. En particular, el modelo CanESM5 fue identificado como el que mejor representa las características históricas de Chile central, sobre todo para la variable de precipitación, sin embargo, también es considerado un modelo que sobrestima la temperatura (Gateño et al., 2024; Salazar et al., 2024; Vásquez et al., 2024).

Los modelos CMIP6 (https://esgf-metagrid.cloud.dkrz.de/search) utilizados se especifican en la Tabla 3-2. Estos modelos contienen las variables de precipitación y temperatura media, con resoluciones horizontales en un rango entre 0.94 a 2.80 grados.

Tabla 3-2: Descripción de Modelos de Circulación General CMIP6 utilizados.

Modelos	**Institución (país)**	**Resolución espacial**	
		Longitud °	**Latitud °**
CanESM5	CCCMa (Canadá)	2.80	2.80
IPSL-CM6A-LR	IPSL (Francia)	1.25	2.50
MPI-ESM1-2-HR	MPI-M (Alemania)	0.94	0.94
MRI-ESM2-0	MRI (Japón)	1.12	1.13

Por otro lado, los modelos CMIP6 entregan proyecciones climáticas basadas en escenarios alternativos de futuras emisiones y cambios en el uso de la tierra producidos con modelos de evaluación integrada. Estos escenarios son conocidos como los Shared Socioeconomic Pathways (SSP), y describen los posibles desarrollos globales para mitigar y adaptarse al cambio climático. Se consideran elementos que incluyen el crecimiento demográfico, económico, la urbanización y uso de suelo, y corresponden a evoluciones alternativas de la sociedad. Los modelos escogidos se encuentran bajo el escenario SSP5-8.5, definido como el caso más desfavorable, ya que considera altas emisiones y una economía donde el uso de combustibles fósiles es la base del desarrollo (O'Neill et al., 2016).

3.3 Metodología

La Figura 3-3 corresponde a un esquema metodológico del estudio, organizado según los objetivos específicos planteados y las actividades necesarias para completarlos. En una primera etapa se obtienen, evalúan y preparan los datos, tanto de los modelos CMIP6 como la información climática observada. De esta forma, es posible conocer el comportamiento de los modelos, previo a las correcciones. El segundo objetivo específico contempla el ajuste de los modelos históricos, aplicando métodos de escalamiento estadístico y corrección se sesgo. Con estos resultados se evalúa el desempeño de los modelos, comparando los resultados con los datos observados, y finalmente se utilizan los modelos proyectados para determinar los cambios climáticos esperados.

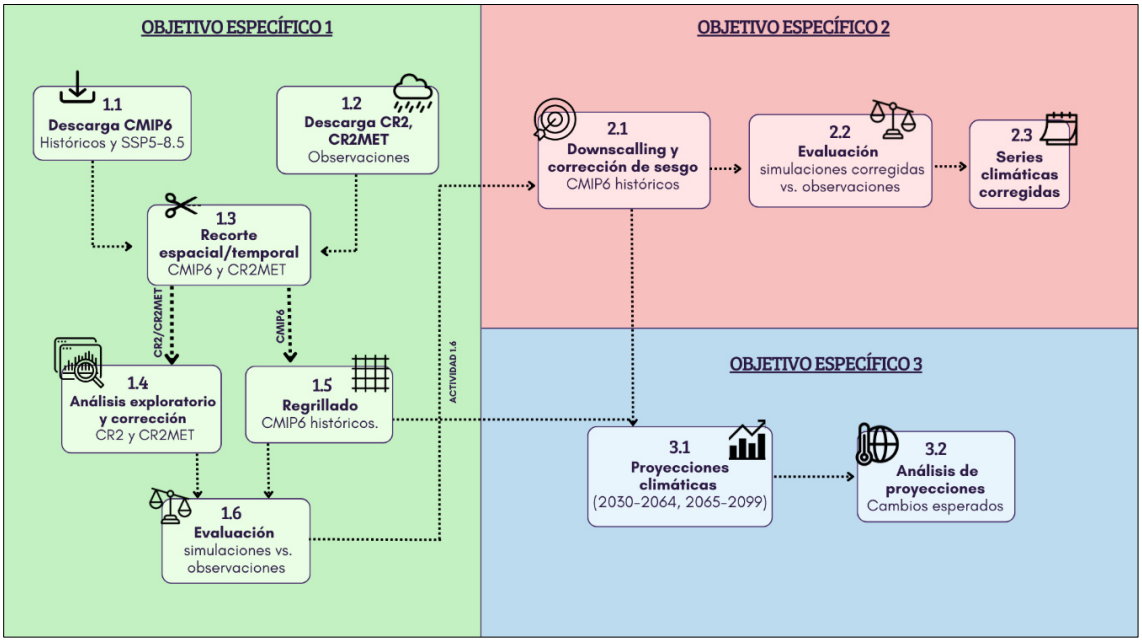

Figura 3-3: Esquema metodológico para cada objetivo específico.

3.3.1 Preproceso de CR2MET y modelos CMIP6

Los productos grillados utilizados para realizar este análisis, tanto la base de datos CR2MET como los GCMs fueron recortados espacialmente para reducir el área de análisis a las cuencas seleccionadas, entre las latitudes 29°S y 38°S y longitudes 62°W y 79°W. Además, fue necesario realizar un recorte temporal, para que las observaciones y simulaciones históricas se encuentren en el periodo 1980-2014 y las proyecciones en el periodo 2030-2099.

Corrección de temperatura media CR2MET

En Chile, la investigación climática se ha visto obstaculizada a causa de la escasez de mediciones realizadas mediante estaciones meteorológicas, situación que se vuelve crítica en zonas de paisaje complejo como lo es la cordillera de los Andes. Para mejorar esto, el Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR2) desarrolló la base de datos CR2MET, la cual consta de información climática de alta resolución en formato de grillas.

La construcción de los datos de temperatura se realizó mediante registros de temperaturas extremas diarias, datos satelitales obtenidos a través de sensores MODIS y además fueron incorporados datos topográficos del país. En el caso de la precipitación, se utiliza la red nacional de pluviómetros para calibrar modelos provenientes del reanálisis ERA-Interim mediante desagregación estadística. Además, es necesario utilizar una técnica de interpolación ajustar la climatología y la variabilidad temporal en las regiones cercanas a las estaciones de monitoreo (Pablo Boisier et al., 2018b).

Pese a que CR2MET es considerada una fuente de información confiable, para realizar estudios puntuales se vuelve necesario realizar una depuración previa de los datos, ya que, en la mayoría de los casos, los pixeles entregados por CR2MET presentan diferencias en temperatura y altitud respecto a los datos observados. Para corregir esta diferencia, se utilizan las estaciones meteorológicas disponibles dentro y alrededor de la cuenca analizada. A cada estación se le asigna el píxel de CR2MET correspondiente a su ubicación espacial, para estimar la temperatura que tendría aquel píxel si se encontrara a la misma altitud de la estación. Esto se realiza utilizando la Ecuación 1, considerando los gradientes térmicos de la

Tabla 3-3 que varían según la estación del año corregida.

$$\Delta T = \gamma \, (Z_{est} - Z_{pix}) \quad \textbf{(1)}$$

Tabla 3-3: Gradientes definidos para cada estación (Ibañez et al., 2021) .

Estación	Gradiente γ [°C/km]
DEF	-4.3
MAM	-4.2
JJA	-4.5
SON	-5.0

Teniendo la diferencia de temperatura asociada al desnivel, se calcula la temperatura de CR2MET ajustada a la cota de la estación mediante la Ecuación 2, para luego obtener el sesgo entre la observación y nuevo el valor de temperatura del píxel (Ecuación 3).

$$T_{CR2(Z_{est})} = T_{CR2} + \Delta T \quad \textbf{(2)}$$

$$Sesgo = T_{obs} - T_{CR2(Z_{est})} \quad \textbf{(3)}$$

Finalmente, el sesgo se aplica sobre la información original de CR2MET para obtener una nueva grilla de temperatura corregida para la cuenca objetivo.

$$T_{corr} = T_{CR2} + sesgo \quad \textbf{(4)}$$

Puesto que los pixeles que contienen estaciones meteorológicas son limitados, se aplican los sesgos de estos a cada píxel cuya altura sea más cercana, para luego continuar con la corrección y generar un producto grillado que responda de manera más confiable a los datos medidos.

En el caso de la precipitación, a pesar de que existen diferencias entre la información medida y la entregada por CR2MET, no se realiza corrección de datos. Esto se debe a que la precipitación presenta una variabilidad más compleja que la temperatura, dependiendo además de la altitud de factores como los orográficos, el viento, la topografía, entre otros, por lo que se requiere un modelo de corrección que escapa a los alcances del presente estudio.

Adecuación espacial de CMIP6 a CR2MET

Los modelos CMIP6 presentan una resolución espacial más gruesa que los productos grillados de CR2MET, por lo que se requiere aumentar la resolución de los GCMs mediante la herramienta Climate Data Operators (CDO) (https://code.mpimet.mpg.de/projects/cdo), la cual usa una interpolación conservativa de primer orden (*remapcon*). Esto se realiza con el objetivo de igualar la resolución espacial de los modelos a la de los productos grillados CR2MET, lo que resulta necesario para realizar correcciones de sesgo, escalamiento estadístico y realizar cálculo de métricas de evaluación de desempeño.

Con estos ajustes realizados, se generan series climáticas para las variables escogidas, tanto para CR2MET como para los modelos CMIP6 históricos. Utilizando métricas estadísticas como sesgo medio (MBE) para temperatura, sesgo porcentual (PBIAS) para precipitación, error cuadrático medio normalizado (NRMSE), correlación de Pearson y Perkins Skill Score, se pueden comparar los resultados de los datos observados y simulaciones (Araya-Osses et al., 2020; Gateño et al., 2024; Salazar et al., 2024). Con los resultados obtenidos se clasifica el desempeño de los modelos originales, lo que más adelante permitirá determinar cuáles son los modelos más adecuados para la cuenca de estudio, y como se comportan frente a las correcciones de sesgo y downscaling.

3.3.2 Escalamiento estadístico y corrección de sesgo productos CMIP6

Mejorar la representatividad de las simulaciones históricas de los modelos requiere la aplicación de métodos de downscaling estadístico y correcciones de sesgo. Para llevarlo a cabo, se utilizan los métodos Quantile Delta Mapping (QDM) y Multivariate Bias Correction (MBCn). QDM corresponde a un método univariado, lo que implica que está diseñado para corregir sesgos en una sola variable, preservando los cambios relativos proyectados por el modelo en todos sus cuantiles (Cannon et al., 2015). En el caso de MBCn, este corrige simultáneamente diversas variables climáticas, ajustando tanto sus distribuciones individuales como sus relaciones de dependencia (Cannon, 2018).

Para su implementación, estos métodos se aplican usando el software estadístico R y Python, a través de las librerías *MBC*, *climQMBC* (Python Software Foundation, 2023; R Core Team, 2024). Los resultados obtenidos son validados con las observaciones históricas, utilizando las métricas mencionadas, y añadiendo además

diagramas de Taylor (Taylor, 2001). La validación se realiza considerando dos escalas temporales distintas. La primera corresponde al análisis interanual, el cual se representa mediante series anuales que consideran el promedio de cada año. La segunda corresponda a un análisis intra-anual mediante ciclos anuales, y muestra la variabilidad que ocurre dentro de un mismo año, promediando los meses del periodo de estudio. Por último, los diagramas de Taylor, que se utilizan únicamente para evaluar el periodo histórico, consideran la serie mensual completa sin promediar (420 meses, correspondientes a los 35 años del periodo histórico).

Proyecciones de cambio climático

Para realizar las proyecciones de cambio climático se utilizaron los modelos CMIP6 para el escenario SSP5-8.5 y se dividió el periodo de estudio en 2030-2064 y 2065-2099, los cuales corresponden a futuro cercano y futuro lejano respectivamente. Con los métodos de downscaling y corrección de sesgo se generaron series de temperatura y precipitación, cuyos resultados son evaluados usando métricas como señal de cambio climático, y en el caso particular de la precipitación, se añade el coeficiente de variación (Araya-Osses et al., 2020; Salazar et al., 2024; Vásquez et al., 2025).

4 Resultados y discusión

4.1 Corrección de temperatura CR2MET

La Sección 3.3.1 detalla la metodología utilizada para mejorar la representatividad del producto grillado CR2MET mediante una corrección utilizando las estaciones meteorológicas cercanas. Previo a su aplicación, se compararon los datos mensuales de temperatura de CR2MET original con las observaciones disponibles en las estaciones ubicadas dentro de los límites de las cuencas Maule Alto, Aconcagua Alto y Yeso. Para realizar esta evaluación, se calculó la diferencia entre la temperatura mensual de CR2MET y la temperatura observada en cada estación (en los pixeles correspondientes). Los valores negativos indican una subestimación de temperatura por parte de CR2MET, mientras que los valores positivos indican sobrestimación.

Cuenca Maule Alto

La Figura 4-1 presenta los errores encontrados en cada uno de los pasos temporales, que corresponden a meses, entre los años 1980-2017, para las estaciones M14 (980 m), M12 (1300 m), M15 (2000 m) y M13 (2172). Cada caja corresponde al píxel en el cual se encuentra la estación detallada en la abscisa del gráfico. Para evaluar el desempeño, se consideraron únicamente las estaciones dentro de los límites de la cuenca. La ubicación de estas estaciones se presenta en la Figura 3-2.

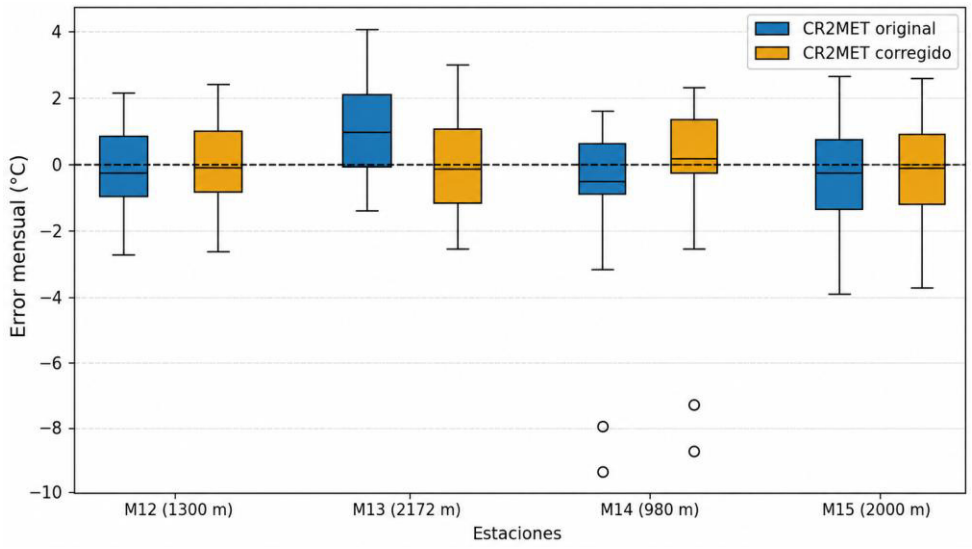

Figura 4-1: Distribución del error mensual de temperatura de CR2MET original y corregido en las estaciones meteorológicas de Maule Alto.

Previo a la corrección, CR2MET tiende a subestimar la temperatura en todas las estaciones, a excepción de la M13, en la cual se observa una sobrestimación. La aplicación de la corrección desplaza las medianas hacia un error cercano a cero, aunque la dispersión de los errores no varía, y tampoco elimina los valores atípicos, pero sí disminuye su magnitud, como se observan en la estación M14.

La Figura 4-2 muestra la distribución espacial de la temperatura media anual de CR2MET, antes y después de la corrección, mientras que el panel c) presenta la diferencia entre estos dos. Como se aprecia, el rango de corrección va entre -1°C y 1°C, con disminuciones de temperatura principalmente en la zona más alta de la cuenca (Figura 3-1)

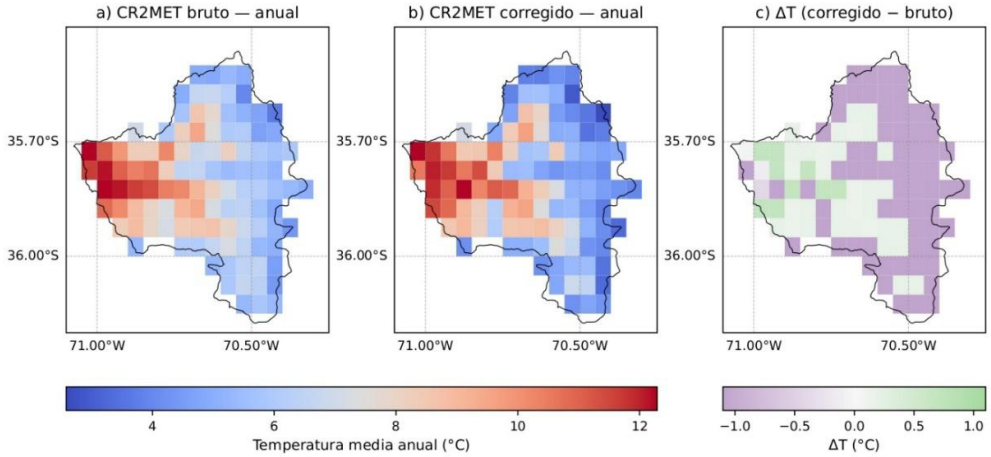

Figura 4-2: Distribución espacial de temperatura media original, corregida y diferencia asociada en la cuenca Maule Alto.

Cuenca Aconcagua Alto

En el caso de la cuenca Aconcagua Alto se analizaron las estaciones A02 (1391 m), A05 (1420 m) y A04 (1800 m) (sus ubicaciones en la Figura A- 1). La Figura 4-3 muestra la distribución de los errores mensuales de CR2MET original y corregido en los pixeles correspondientes a estas estaciones.

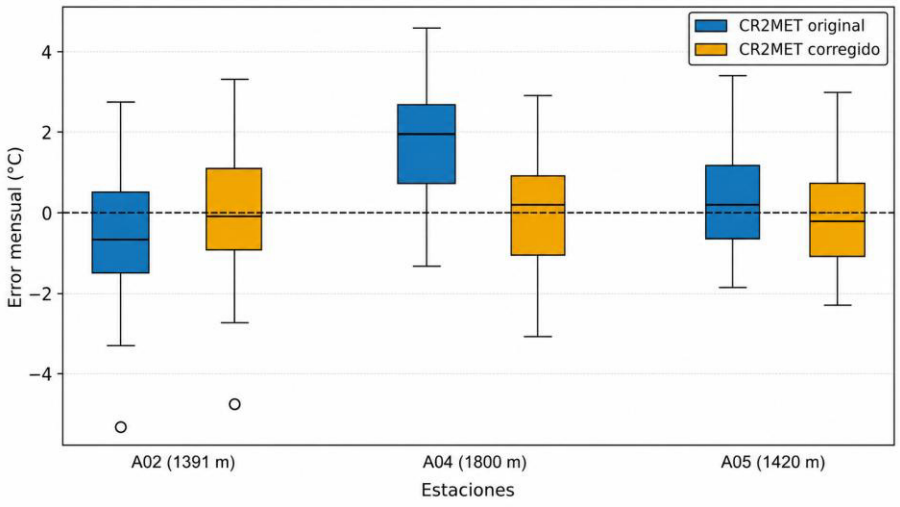

Figura 4-3: Distribución del error mensual de temperatura de CR2MET original y corregido en las estaciones meteorológicas de Aconcagua Alto.

Los errores de CR2MET no presentan una tendencia entre las estaciones analizadas. En A02 se puede observar una subestimación, en A04 una sobrestimación, y en A05 la mediana se encuentra cercana a cero. Luego de aplicar la corrección, las medianas se acercan a un error cercano a cero, pero conservando la dispersión entre

los errores, al igual como sucedió en la cuenca anterior. Tampoco se observa una relación clara entre las estaciones de mayor altitud y el signo del error. La estación A04 ubicada a 1800 msnm, es la de mayor elevación entre las estaciones de Aconcagua Alto y sobrestima la temperatura, al igual que la estación a mayor altura de la cuenca Maule. Sin embargo, ya que la elevación de la cuenca Aconcagua Alto varía entre 648 y 5831 msnm, A04 no representa a los sectores de mayor altitud de la cuenca. Por esto, los resultados entregados no permiten realizar una relación concluyente entre altitud y signo del error.

La Figura 4-4 presenta la distribución espacial de la temperatura media anual de CR2MET original y corregida de la cuenca Aconcagua Alto. El rango de temperatura corregida va desde -1,5°C a 1,5°C, y se observa que el área de sobrestimación de temperatura, que se encuentra en el sector más bajo de la cuenca, es menor al área de subestimación.

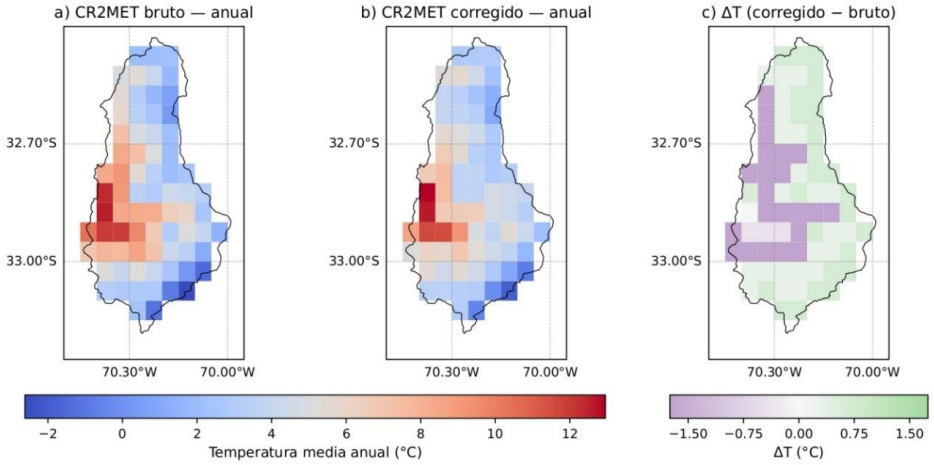

Figura 4-4: Distribución espacial de temperatura media original, corregida y diferencia asociada en la cuenca Aconcagua Alto.

Cuenca Yeso

En la cuenca Yeso se puede observar que presenta una única estación dentro de sus límites (Figura A- 2), la cual corresponde a Y01 (2475 m). De la Figura 4-5 se puede ver que no se encontraron valores atípicos, y que CR2MET original tiene una tendencia a subestimar la temperatura. Al corregirse, sigue subestimando levemente, pero ya posicionando a la mediana mucho más cerca del error cero. Debido a que se tiene una sola estación, no es posible evaluar una posible relación entre la altura de la estación y el signo del error.

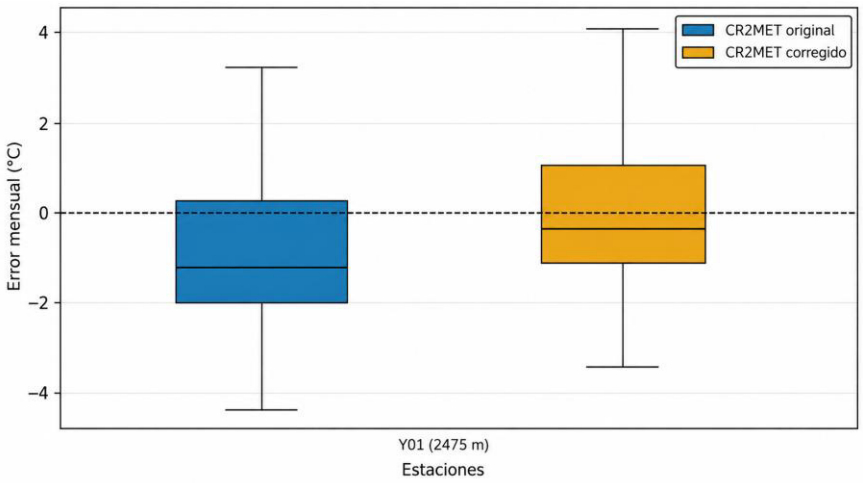

Figura 4-5: Distribución del error mensual de temperatura de CR2MET antes y después de la corrección altitudinal, cuenca río Yeso.

La Figura 4-6 muestra una situación similar a la de Aconcagua Alto, donde los errores se encuentran en un rango de -1,5 a 1,5 °C, y la mayor parte de la cuenca se corrigió aumentando la temperatura, lo que implica una subestimación por parte de CR2MET original. Si se observa el mapa de elevaciones (Figura 3-1), se aprecia que los pixeles con mayor altitud en esta cuenca son las que, en general, presentaron un menor sesgo (entre 0 y 0,75°C), como se ve en el panel c) de la Figura 4-6.

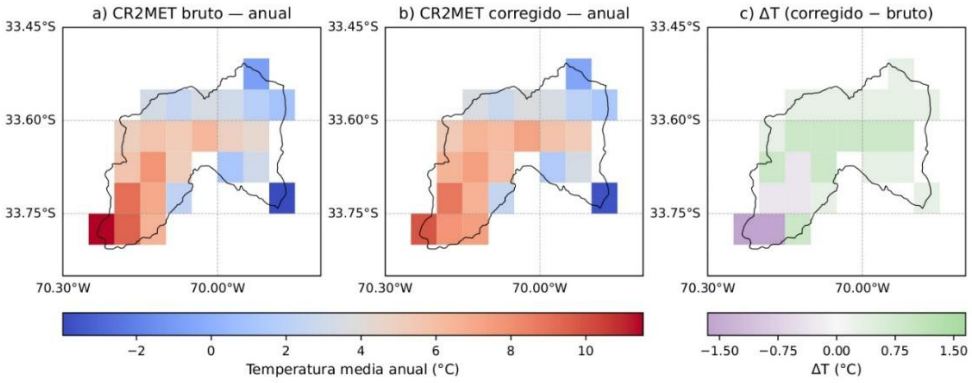

Figura 4-6: Distribución espacial de temperatura media original, corregida y diferencia asociada en la cuenca Yeso.

La comparación entre CR2MET y las estaciones meteorológicas demostró que CR2MET original presenta sesgos tanto positivos como negativos, y la magnitud y signo de esos varían entre las estaciones y cuencas analizadas. Sin embargo, no se pudo apreciar una relación entre altitud de la estación y signo del sesgo, principalmente por la baja presencia de estaciones dentro de los límites de las cuencas. La aplicación de la corrección permitió reducir estos sesgos, desplazando las medianas de los errores hacia valores cercanos a cero, obteniendo así un producto grillado con datos más cercanos a los registrados por las estaciones, el cual se utiliza posteriormente para trabajar con los GCMs. A partir de esta sección, cuando se habla de datos observados, se hace referencia a los productos grillados CR2MET ya corregidos, en el caso de la temperatura. Para la precipitación se utiliza la misma denominación, pese a que estos datos no fueron corregidos.

4.2 Evaluación retrospectiva y proyecciones futuras de productos CMIP6 para temperatura

En esta sección se analiza el comportamiento de los modelos CMIP6 de temperatura media, considerando tanto el periodo histórico como proyecciones futuras. Para esto, se comparan los GCMs originales y corregidos mediante QDM y MBCn con los datos de CR2MET, determinando qué modelos se destacan por su buen desempeño según las métricas. Luego de esto, se estudian las proyecciones de cambio climático para el futuro cercano (entre los años 2030 y 2064) y futuro lejano (entre el 2065 y 2099), midiendo las tendencias para cada cuenca.

4.2.1 Cuenca Río Maule Alto

Periodo histórico

Para construir las series anuales de temperatura media, se considera el promedio anual de cada año del periodo histórico, lo que corresponde a 35 años. La Figura 4-7 (a) presenta los GCMs sin ningún tipo de corrección siendo comparados con la serie histórica de datos CR2MET. Cualitativamente, se puede destacar la gran diferencia de temperatura que existe entre el modelo CanESM5 y CR2MET, mientras que el modelo MPI-ESM1-2-HR se posiciona con el mejor comportamiento. Las series de modelos corregidos mediante QDM y MBCn se presentan en la Figura 4-7, en los paneles (b) y (c) respectivamente. Ambos métodos mejoran el comportamiento de los modelos, siendo el método MBCn el que se destaca por sobre QDM. Este último método tiende a una mayor sobrestimación, lo que se vuelve más notorio entre los años 2000 y 2015 para CanESM5 e IPSL-CM6A-LR. El panel (a) lo evidencia en los máximos simulados por CanESM5, que superan los 8°C, mientras que CR2MET tiene temperaturas máximas de alrededor 7°C.

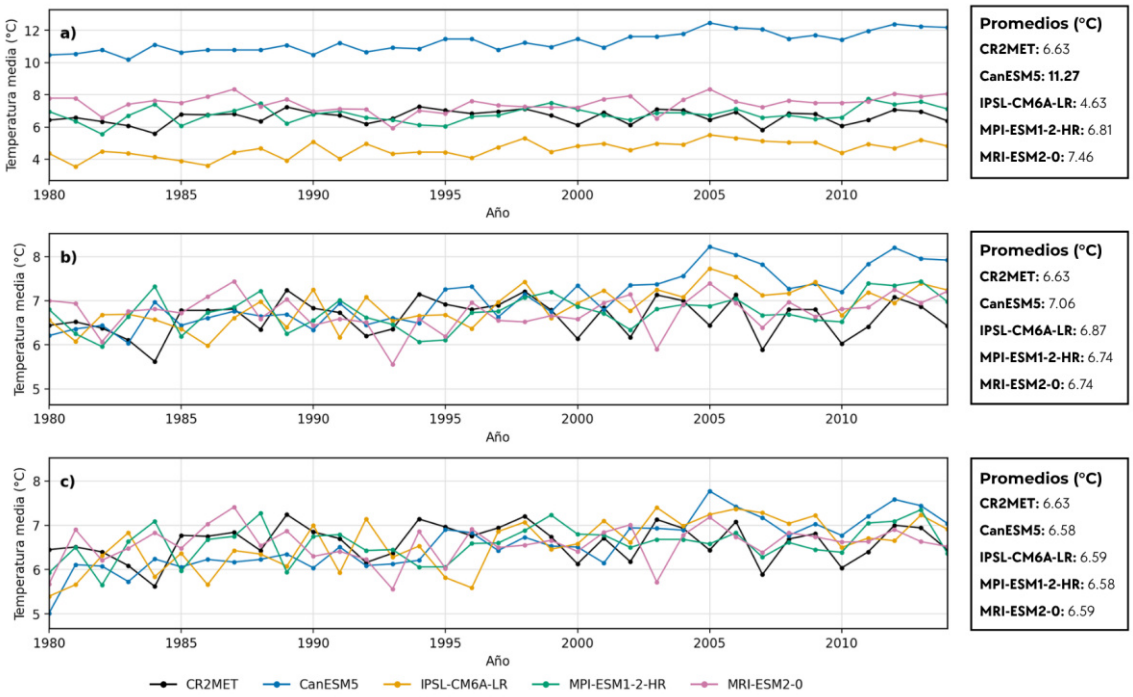

Figura 4-7: Comparación de la temperatura media anual de CR2MET con los GCMs en la cuenca Maule Alto durante 1980–2014: a) modelos originales; b) corregidos con QDM; y c) corregidos con MBCn. Cada panel incluye el promedio de temperatura media anual de CR2MET y de cada modelo.

Tabla 4-1: Métricas de desempeño (MBE, NRMSE, correlación de Pearson y Perkins Skill Score) de los modelos originales y corregidos de temperatura media durante el periodo 1980–2014, cuenca Maule Alto.

Modelo	MBE (°C)			NRMSE (%)			Correlación de Pearson (-)			Perkins Skill Score (-)		
	Original	QDM	MBCn	Original	QDM	MBCn	Original	QDM	MBCn	Original	QDM	MBCn
CanESM5	4.64	0.44	-0.05	70.70	12.70	10.10	0.07	0.06	0.15	0.88	0.88	0.93
IPSL-CM6A-LR	-1.99	0.25	-0.04	31.50	9.40	9.90	0.09	0.11	0.16	0.86	0.87	0.93
MPI-ESM1-2-HR	0.17	0.11	-0.04	10.30	9.00	9.10	-0.05	-0.04	0.02	0.84	0.88	0.93
MRI-ESM2-0	0.83	0.11	-0.04	16.10	8.90	8.60	0.01	0.05	0.11	0.81	0.85	0.92

Para realizar un análisis cuantitativo, se utilizan diversas métricas mencionadas en la Sección 3.3.1, cuyos resultados se presentan en la Tabla 4-1. El MBE se calculó como la diferencia promedio entre la temperatura simulada por el modelo y la temperatura de CR2MET, por lo tanto, los valores positivos representan sobrestimación de la temperatura, mientras que los negativos una subestimación.

En las simulaciones originales, CanESM5 presenta la mayor sobrestimación, con un sesgo (MBE) de 4,64°C, mientras que IPSL-CM6A-LR subestima la temperatura en 1,99 °C. Por otra parte, MRI-ESM2-0 y MPI-ESM1-2-HR presentan el menor sesgo, con un MBE de 0,83 °C y 0,17 °C respectivamente. Los resultados del NRMSE de la Tabla 4-1 muestran la misma tendencia de desempeño en los modelos, siendo CanESM5 el que presenta

el mayor error (70,7%), seguido por IPSL-CM6A-LR con un NRMSE de 31,5 %, y MPI-ESM1-2-HR con el menor valor, que alcanza un 10,3%.

La aplicación de QDM y MBCn disminuye el sesgo de todos los modelos. Con QDM, los valores del MBE se reducen a un rango de 0,11 a 0,44 °C, mientras que con MBCn se encuentran entre 0,04 y 0.05 °C, pero con sesgo negativo. La mayor disminución la presenta CanESM5, pasando de un MBE original de 4,64°C a 0,44°C con QDM y a -0,05°C con MBCn. También se observa una reducción en el NRMSE, con valores que, considerando todos los modelos, se encuentran entre 8,9 % y 12,7% con QDM y entre 8,6 % y 10,1 % con MBCn. Estos resultados muestran que MBCn corrige de mejor manera el sesgo (MBE), mientras que ambos métodos presentan un desempeño similar respecto a la magnitud del error (NRMSE).

La correlación de Pearson (Tabla 4-1) fue calculada a partir de las series de temperatura media anual, con el objetivo de evaluar la variabilidad temporal. Esta presenta valores bajos, que se encuentran entre −0,05 y 0,09 en el caso de los modelos originales, y entre -0,04 y 0,16 luego de las correcciones. Pese a que MBCn presenta los valores mayores, estos continúan siendo bajos, lo que demuestra que las correcciones no mejoran considerablemente el comportamiento de los modelos y la reproducción de años cálidos y fríos. Esto también se aprecia en las series de la Figura 4-7, donde los patrones de temperatura varían de formas distintas entre modelos y con respecto a CR2MET a lo largo del periodo histórico.

Por último, se utiliza el Perkins Skill Score (Tabla 4-1) para conocer qué tan bien los modelos reproducen la distribución de la temperatura. Este compara la frecuencia con la que ocurren los distintos valores de temperatura en los modelos y CR2MET, sin considerar el orden temporal, y se calculó utilizando los 35 valores de temperatura media anual del periodo 1980-2014. Los modelos originales presentan PSS entre 0,81 y 0,88, mientras que MBCn obtiene los mejores resultados, entre 0,92 y 0,93, lo que muestra una alta coincidencia entre las distribuciones de las series simuladas y observadas.

Además del comportamiento interanual de los modelos, se analizó la variación estacional de la temperatura representada con ciclos anuales, con el objetivo de evaluar se los modelos reproducen correctamente la estacionalidad. Los ciclos anuales consideran el periodo 2000 – 2014, que corresponde a los últimos 15 años del periodo histórico. Se realiza de esta manera porque al aplicar el método QDM, este requiere años de validación, por lo que se utilizaron los años 1980 – 1999 para realizar la corrección, y los últimos 15 años del periodo como validación.

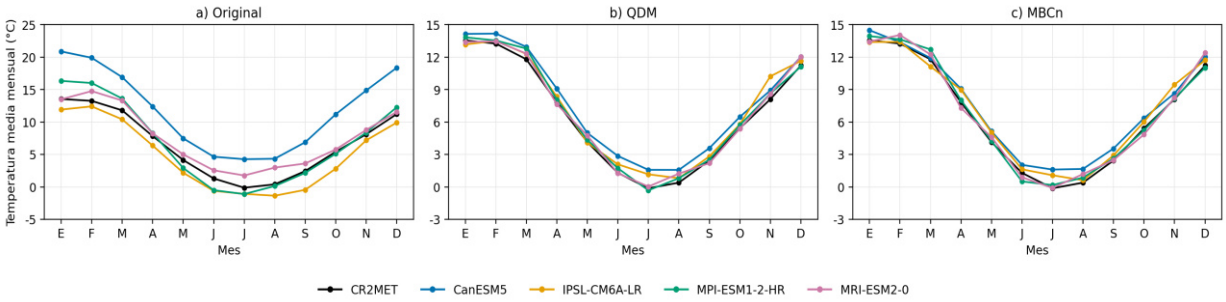

Figura 4-8: Ciclo anual histórico de temperatura media de CR2MET y modelos CMIP6 para a) modelos originales, b) modelos corregidos mediante QDM y c) modelos corregidos mediante MBCn, Maule Alto.

Tabla 4-2: Métricas de desempeño (MBE, NRMSE y correlación de Pearson) de los modelos originales y corregidos de temperatura media para el ciclo anual histórico, cuenca Maule Alto.

Modelo	MBE (°C)			NRMSE (%)			Correlación de Pearson (-)		
	Original	QDM	MBCn	Original	QDM	MBCn	Original	QDM	MBCn
CanESM5	5.22	1.02	1.00	65.70	13.30	13.50	0.99	0.99	0.99
IPSL-CM6A-LR	-1.64	0.58	0.64	21.20	10.10	10.40	0.99	0.99	0.99
MPI-ESM1-2-HR	0.35	0.27	0.30	17.70	5.00	6.20	0.99	0.99	0.99
MRI-ESM2-0	1.03	0.26	0.35	15.80	5.80	8.00	0.98	0.99	0.99

La Figura 4-8 muestra el ciclo anual de los modelos originales comparados con CR2MET, y se puede observar que los modelos reproducen bien la forma estacional del ciclo. CanESM5 es el modelo que destaca por sobrestimar la temperatura, con un sesgo estacional comparado con CR2MET que varía entre 3,91°C (JJA) y 6,99°C (DEF). Por otro lado, MPI-ESM1-2-HR y MRI-ESM2-0 presentan un sesgo entre -1°C y 2,18°C a lo largo del año, mientras que IPSL-CM6A-LR presenta las temperaturas más bajas, manteniéndose durante todo el año por debajo de la temperatura de CR2MET y llegando a su valor mínimo en SON (-2,11°C). Estos resultados se detallan en la Tabla B- 1.

La Figura 4-8 (a) y (b), por otro lado, presenta los ciclos anuales corregidos con QDM y MBCn, mostrando una corrección uniforme, con temperaturas más cercanas a CR2MET, las cuales varían entre los 0°C en invierno y los 14°C en los meses de verano, principalmente en enero y febrero. Pese a las correcciones, CanESM5 sigue entregando las mayores temperaturas, con un MBE de 1°C y un NRMSE de 0,65, como se observa en la Tabla 4-2. Por otro lado, los modelos MPI-ESM1-2-HR y MRI-ESM2-0 presentan el mejor desempeño general, destacando a MBCn por sus resultados, con un MBE de 0,30 y 0,35°C respectivamente.

En cuanto a la correlación de Pearson (Tabla 4-2), esta se mantiene sobre 0,98 tanto en los modelos originales como corregidos, lo que demuestra que los modelos originales ya representaban de buena manera la estacionalidad. Esto implica que, al aplicar las correcciones se ajusta principalmente la magnitud de la temperatura.

Mientras las series anuales evalúan el desempeño interanual y los ciclos anuales evalúan el comportamiento estacional, el diagrama de Taylor (Figura 4-9) muestra el comportamiento mensual del periodo histórico

completo, que corresponde a 420 meses. El diagrama muestra que la mayoría de los modelos se encuentran agrupados, con correlaciones cercanas a 0,95 y desviaciones estándar similares a la de CR2MET, sin existir una gran diferencia entre QDM y MBCn. Los resultados de correlación son más altos que los obtenidos anteriormente en el análisis interanual, donde se observa que los modelos no representan correctamente los patrones de años cálidos o fríos que muestra CR2MET (Figura 4-7), mientras que los ciclos anuales sí representan bien la estacionalidad. Como el diagrama de Taylor se realiza a partir de la serie mensual completa, sin promediar, se conserva la estacionalidad, lo cual termina favoreciendo la correlación, pese a que el desacuerdo interanual también permanece.

En relación con la desviación cuadrática media (RMSD), la mayoría de los modelos se ubican cerca de 1,5°C, mientras que IPSL-CM6A-LR corregido con MBCn es el modelo con peor desempeño, superando los 2°C.

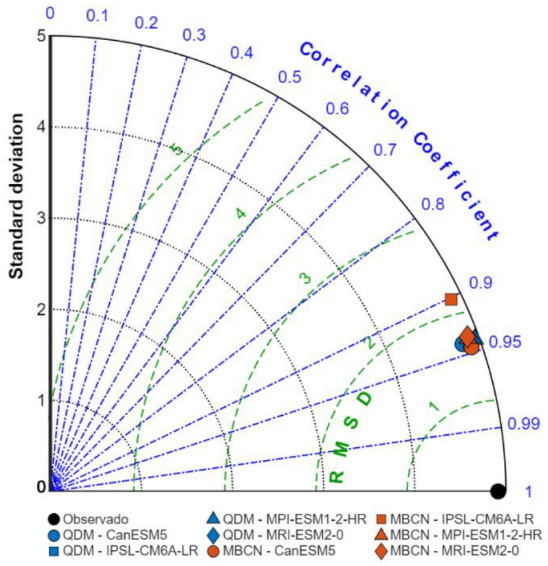

Figura 4-9: Diagrama de Taylor histórico mensual de temperatura media, cuenca Maule Alto.

Proyecciones de cambio climático

Luego de analizar el comportamiento histórico de los modelos y métodos de corrección, se utilizan las proyecciones de temperatura media entre los años 2030 y 2099, los cuales se dividen en periodo futuro cercano (2030 – 2064) y lejano (2065 – 2099).

Con el objetivo de cuantificar, en promedio, cuánto va a variar la temperatura respecto al periodo histórico, se utiliza la señal de cambio climático. Esta obtiene la diferencia entre el promedio de periodo histórico y del proyectado. Además, se calcula la tasa decadal (TD), que corresponde a la pendiente de la serie anual proyectada y se expresa en °C/década.

La Figura 4-10 corresponde a la serie anual proyectada, tanto para el método QDM (panel a) como para MBCn (panel b). Ambos métodos de corrección concuerdan en el aumento de temperatura, llegando a 14°C hacia final

de siglo en el caso de CanESM5, que persiste como el modelo con mayores valores de temperatura. Este aumento equivale a una tasa decadal de 0,91°C/década con QDM y 0,73°C/década con MBCn para el periodo futuro lejano (Tabla 4-3). Estos resultados representan un aumento de 5,23°C en el futuro cercano y 5,63°C en el futuro lejano con respecto al promedio del periodo histórico. Los otros tres modelos presentan tasas decadales más bajas para este mismo periodo, entre 0,42°C/década y 0,67°C/década, para futuro cercano y lejano respectivamente, lo que se traduce en aumentos de temperatura que se encuentran en un rango de 3,04°C a 4,19°C hacia finales de siglo.

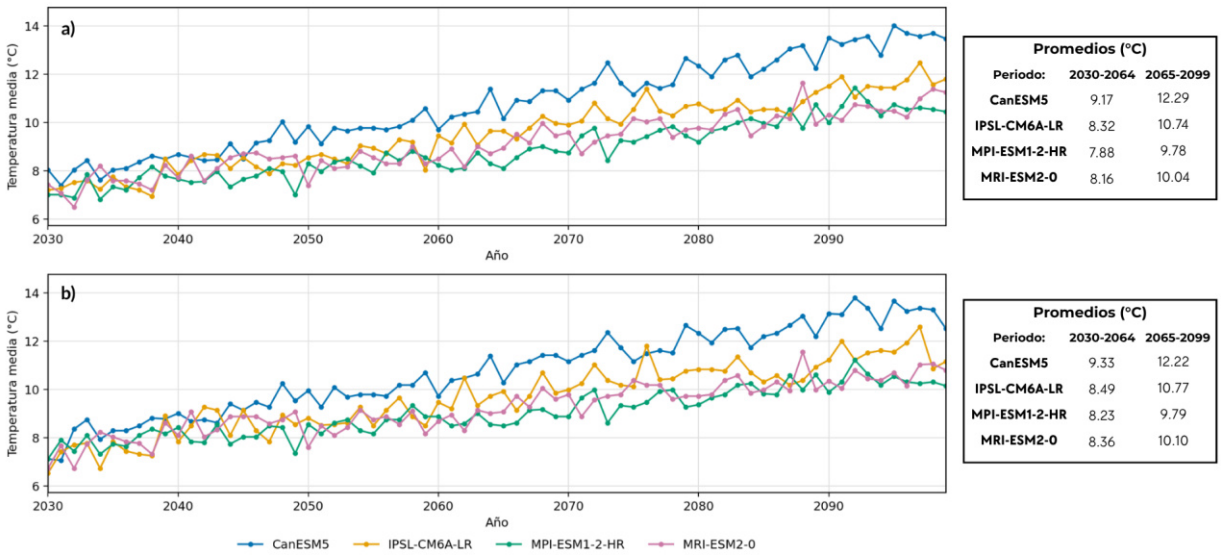

Figura 4-10: Series de temperatura media anual proyectadas para el periodo 2030–2099 en la cuenca Maule Alto: a) mediante QDM; y b) mediante MBCn. Cada panel incluye el promedio de temperatura media anual de cada modelo para 2030–2064 y 2065–2099.

Tabla 4-3: Señal de cambio climático (SCC) y tasa decadal de cambio climático (TD) de temperatura media para el futuro cercano y lejano respecto del periodo histórico, cuenca Maule Alto.

Modelo	QDM (°C) 2030–2064		QDM (°C) 2065–2099		MBCn (°C) 2030–2064		MBCn (°C) 2065–2099	
	SCC (°C)	TD (°C/dec)	SCC (°C)	TD (°C/dec)	SCC (°C)	TD (°C/dec)	SCC (°C)	TD (°C/dec)
CanESM5	2.11	0.86	5.23	0.91	2.74	0.89	5.63	0.73
IPSL-CM6A-LR	1.45	0.64	3.86	0.62	1.89	0.7	4.19	0.51
MPI-ESM1-2-HR	1.14	0.42	3.04	0.67	1.64	0.43	3.19	0.52
MRI-ESM2-0	1.42	0.41	3.30	0.52	1.78	0.43	3.51	0.42

Nota: La temperatura media de CR2MET en la cuenca Maule Alto durante el periodo 1980–2014 es de 6,63 °C

En la Tabla 4-3, al observar todos los modelos en conjunto, se aprecia un aumento de temperatura que supera 1°C en el futuro cercano, y un aumento de más de 3°C para el futuro lejano. En promedio, se espera que en el futuro cercano la temperatura supere los 8°C, y en el futuro lejano esté cerca de los 10 °C, teniendo en cuenta que la temperatura histórica promedio de los modelos se encuentra por debajo de los 7,1°C (Tabla B- 2). Este aumento es menor para los modelos corregidos con QDM, y el modelo que presenta la menor señal de cambio climático en ambos periodos es MPI-ESM1-2-, con valores de 1,42°C y 3,04°C para futuro cercano y lejano respectivamente.

Estos resultados coinciden con estudios realizados para Chile Central, como Gateño et al. (2024), que para el periodo 2065 – 2098 proyectan un aumento entre 2.13 y 4.79°C. Por otro lado Salazar et al. (2024) y Vásquez et al. (2025) concuerdan en un aumento de 4-5°C, donde, además, este último estudio destacó que la cordillera de los Andes sufrirá un mayor incremento de temperatura respecto al análisis completo realizado por macrozonas.

Al analizar los ciclos anuales proyectados de la Figura 4-11, se ve un aumento de temperatura en todas las estaciones, y modelos, volviéndose aún más notorio hacia final de siglo. De la Tabla B- 4, se puede observar que el verano (DEF) corresponde a la estación más afectada, ya que presenta los mayores valores de señal de cambio climático. Estos varían según el modelo, pero se encuentran en un rango entre 3,26 y 6,74°C para el futuro lejano, considerando los resultados de QDM y MBCn. Con estas variaciones, se proyecta que, hacia finales de siglo, la cuenca tenga veranos que se puedan encontrar entre 16,76 y 19,42°C, mientras que en invierno (JJA) se esperan temperaturas de 3,71 hasta 5,39°C en el periodo 2065-2099 (Tabla B- 3). El modelo que proyecta las mayores temperaturas es CanESM5, alcanzando los valores más altos en los rangos descritos anteriormente, lo que evidencia su tendencia a sobrestimar la temperatura con respecto al resto de los modelos, como se vio también en las series anuales.

Al comparar los dos métodos de corrección en la Figura 4-11, no se aprecian diferencias importantes en la forma de los ciclos, manteniendo la estacionalidad. Para respaldar esta observación, se calculó el coeficiente de correlación de Spearman entre los valores de temperatura estacional de ambos métodos. El resultado entregó un coeficiente ρ de 0,994 para el futuro cercano y ρ de 0,991 para el futuro lejano, considerando un nivel de significancia α de 0,05, lo que confirma que ambos métodos de corrección resultan consistentes entre sí.

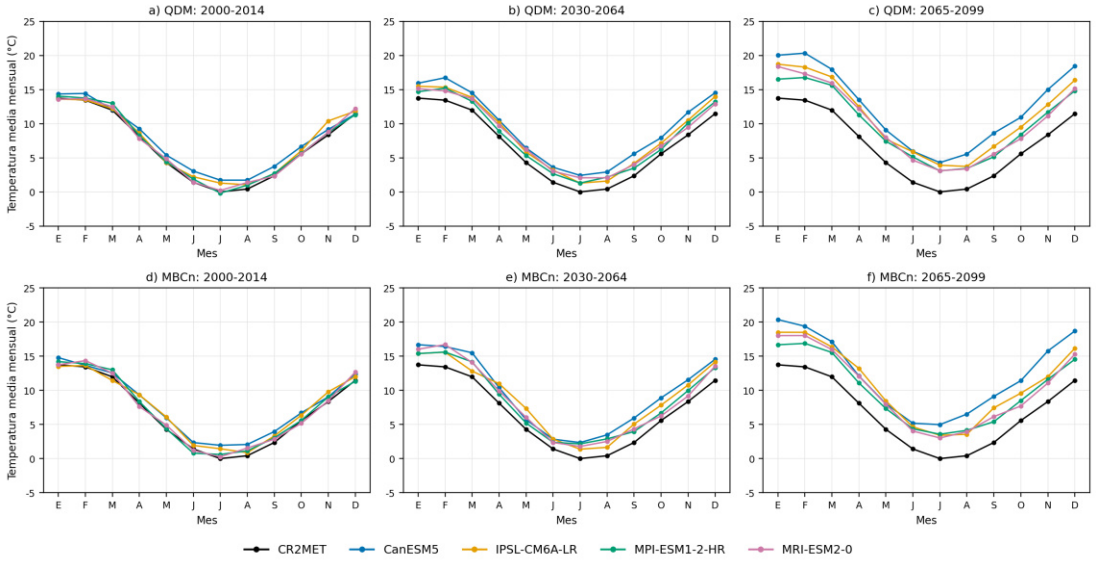

Figura 4-11: Ciclos anuales de temperatura media históricos y proyectados mediante QDM y MBCn para los periodos 2000–2014, 2030–2064 y 2065–2099, Maule Alto.

Para complementar los análisis realizados, se evalúa la distribución espacial de la temperatura media en los distintos periodos de estudio. En el caso del mapa de CR2MET, este corresponde a un promedio del periodo

2000 – 2014 (el mismo periodo utilizado para los ciclos anuales), el cual se compara con los modelos proyectados. Las figuras presentadas se separan por método de corrección y periodo de estudio (futuro cercano o lejano).

En los mapas de la Figura 4-12 y Figura 4-13 se ve que patrón de temperaturas es el mismo para CR2MET y para los modelos, lo que significa que estos reproducen de buena forma la distribución espacial observada, presentando una mayor temperatura en la zona de menor altitud, aproximadamente entre los 436 y 1500 msnm (ver Figura 3-1). En este sector, los modelos proyectan temperaturas promedio superiores a 13°C para el periodo 2030 – 2064, y sobre 15°C en el periodo 2065 – 2099 (Figura 4-13). Por otro lado, se observa un aumento de temperatura en las zonas altas de la cuenca (sobre los 2700 msnm aproximadamente), las cuales en el periodo histórico registran temperaturas promedio menores a 4°C, pero que a finales de siglo se proyectan temperaturas que superan los 7°C. Esto se vuelve crítico, ya que estos sectores presentan nieve y glaciares, que podrían verse afectados por este aumento de temperatura.

Por último, CanESM5 corresponde al modelo que proyecta un mayor aumento de temperatura utilizando ambos métodos de corrección en los dos periodos (paneles b y f), llegando a los valores más altos y superando los 17°C en las zonas más cálidas, mientras que MPI-ESM1-2-HR entrega los menores resultados, donde sus máximos valores se acercan a los 13°C. Al analizar las diferencias que se generan según el método de corrección utilizado, se puede observar que estas se vuelven más evidentes hacia finales de siglo, siendo QDM el que alcanza las mayores temperaturas, incluso llegando a los 18°C en CanESM5 (Figura 4-13 b).

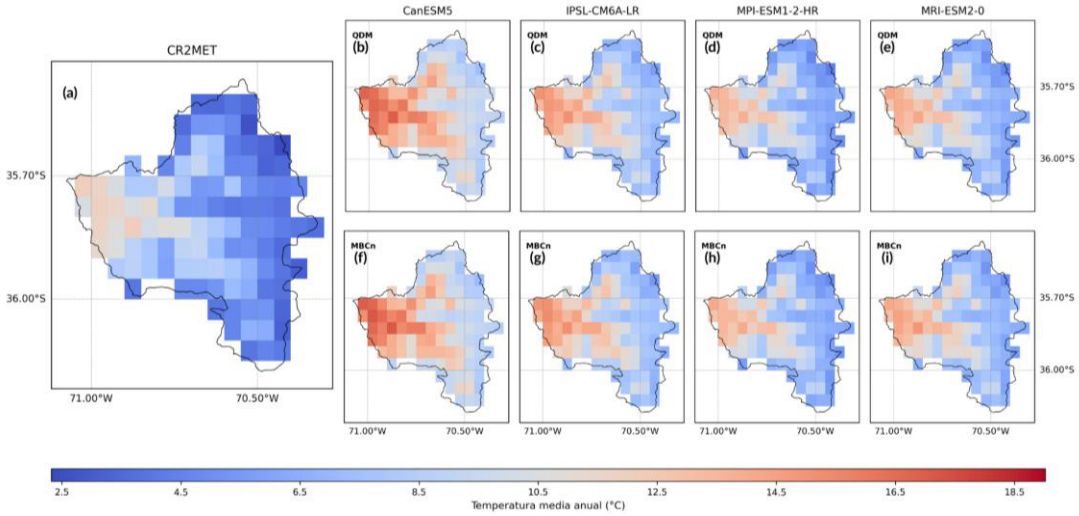

Figura 4-12: Distribución espacial de la temperatura media anual en la cuenca Maule Alto para (a) CR2MET histórico (2000-2014), (b–e) proyecciones 2030–2064 corregidas mediante QDM y (f–i) mediante MBCn.

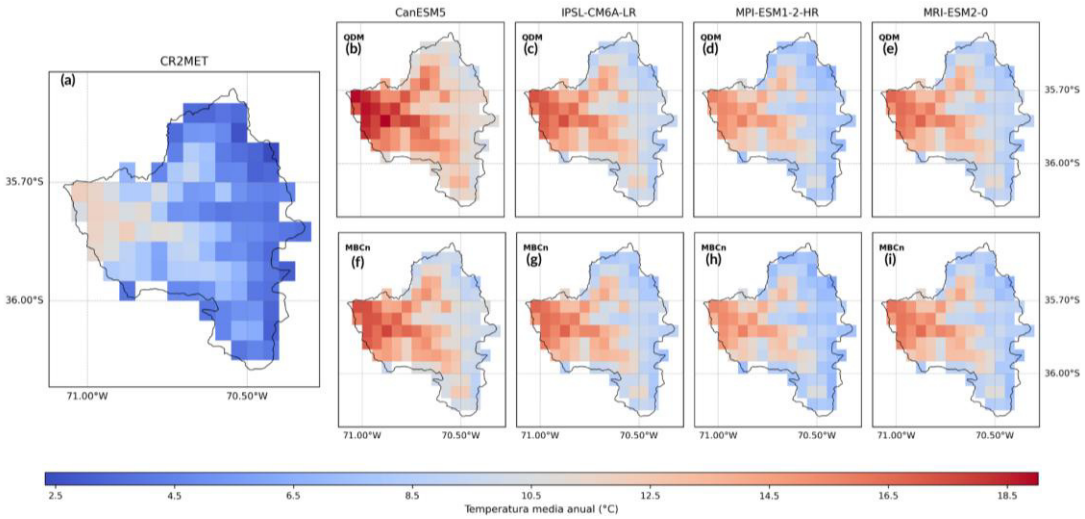

Figura 4-13: Distribución espacial de la temperatura media anual en la cuenca Maule Alto para (a) CR2MET histórico (2000-2014), (b–e) proyecciones 2065–2099 corregidas mediante QDM y (f–i) mediante MBCn.

Cuenca Río Aconcagua Alto

Periodo histórico

Siguiendo la misma metodología aplicada en Maule Alto, se evalúa el desempeño de los modelos en la cuenca Aconcagua Alto en el periodo histórico (1980 – 2014), mediante series anuales, que representan el promedio anual de temperatura media para mostrar su evolución a lo largo de los años, y ciclos anuales, que presentan el comportamiento de cada mes a lo largo de todos los años del periodo de estudio, mostrando el comportamiento estacional dentro de un año.

El comportamiento de los modelos sin corregir, comparados con CR2MET se presenta en la Figura 4-14, mostrando que, al igual que en la cuenca Maule Alto, el modelo CanESM5 se destaca por sobrestimar la temperatura, mientras que IPSL-CM6A-LR es modelo más similar a CR2MET. Además, se presentan los modelos históricos corregidos con los métodos QDM y MBCn (paneles b y c de la Figura 4-14). En ambos casos se observa un acuerdo entre modelos entre los años 1995 y 2000, donde existe una menor variabilidad temporal. Esto se percibe gráficamente, ya que las curvas de los modelos coinciden de mejor manera con CR2MET, a diferencia de los años entre 2005 y 2015, donde se ve una mayor dispersión entre los modelos y el histórico observado. En ese periodo también se evidencia la diferencia entre los métodos de corrección, siendo QDM el que genera mayores diferencias entre modelos.

Luego de corregir, CanESM5 se posiciona como el modelo que sobrestima la temperatura, haciéndose más evidente a partir del año 2010 en el caso de QDM, y a partir de 2005 con MBCn. Por último, se observa que la variación de temperatura entre el inicio y fin del periodo histórico es de alrededor de 1°C.

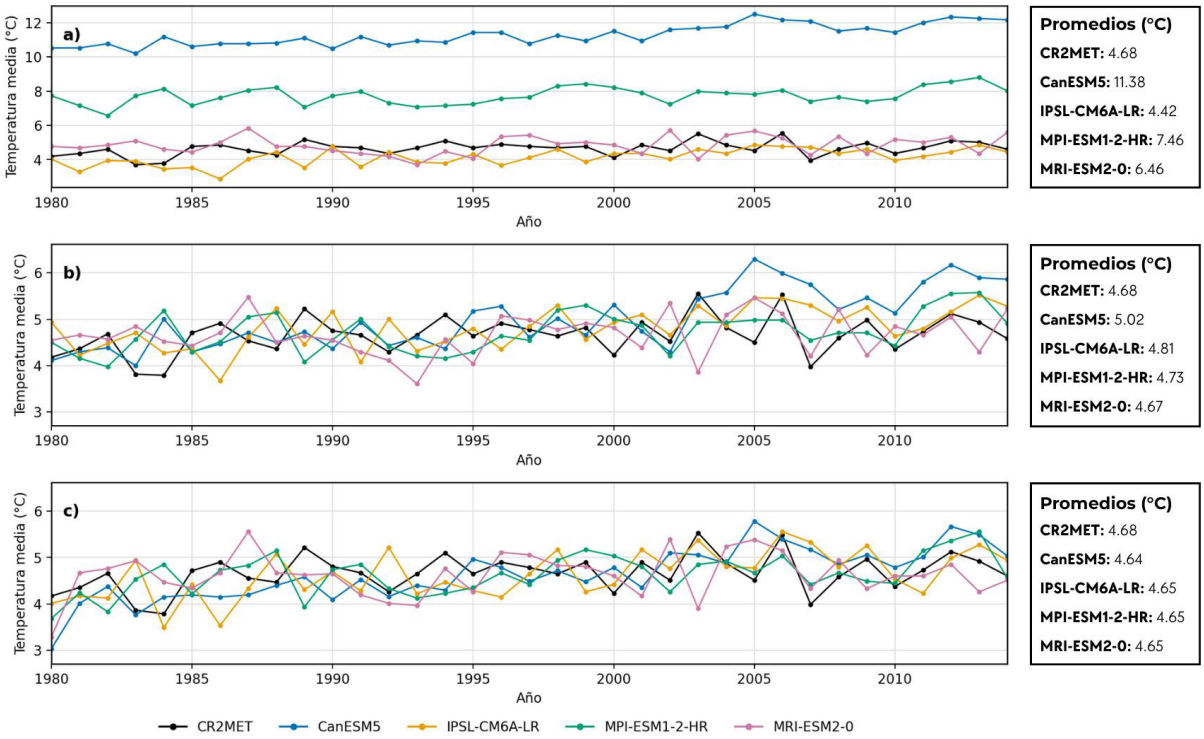

Figura 4-14: Comparación de la temperatura media anual de CR2MET con los GCMs en la cuenca Aconcagua Alto durante 1980–2014: a) modelos originales; b) corregidos con QDM; y c) corregidos con MBCn. Cada panel incluye el promedio de temperatura media anual de CR2MET y de cada modelo.

Tabla 4-4: Métricas de desempeño (MBE, NRMSE, correlación de Pearson y Perkins Skill Score) de los modelos originales y corregidos de temperatura media durante el periodo 1980–2014, cuenca Aconcagua Alto.

Modelo	MBE (°C)			NRMSE (%)			Correlación de Pearson (-)			Perkins Skill score (-)		
	Original	QDM	MBCn	Original	QDM	MBCn	Original	QDM	MBCn	Original	QDM	MBCn
CanESM5	6.69	0.46	-0.04	143.30	18.20	13.70	0.23	0.22	0.27	0.87	0.87	0.94
IPSL-CM6A-LR	-0.27	0.14	-0.03	13.60	11.40	10.80	0.17	0.19	0.31	0.89	0.89	0.93
MPI-ESM1-2-HR	2.78	0.08	-0.04	60.50	11.50	11.10	0.09	0.10	0.19	0.84	0.85	0.93
MRI-ESM2-0	1.78	0.02	-0.04	40.20	11.90	11.90	-0.02	0.02	0.10	0.84	0.85	0.91

Los resultados de las métricas MBE y NRMSE (Tabla 4-4) muestran que los modelos originales, en general, presentan mayores errores y sesgos en Aconcagua Alto que en la cuenca Maule Alto, con excepción de IPSL-CM6A-LR, que en Aconcagua presenta un sesgo de -0,27°C, mientras que en Maule Alto de -1,99°C. El método MBCn presenta los menores valores de MBE, aunque dejando un sesgo negativo en todos los modelos, mientras que NRMSE muestra diferencias reducidas entre ambos métodos de corrección y CR2MET, siendo IPSL-CM6A-LR el modelo con menor NRMSE.

Por otro lado, los modelos presentan una baja representatividad en la variación temporal, ya que la correlación de Pearson entrega valores entre 0,10 y 0,31, donde IPSL-CM6A-LR obtuvo el máximo valor (Tabla 4-4). Finalmente, analizando Perkins Skill Score, los modelos corregidos con MBCn en general presentan valores

altos, lo que indica que todos los modelos reproducen bien la frecuencia y magnitud de los eventos, destacándose CanESM5 con un valor de 0,94.

Los ciclos anuales corregidos (Figura 4-15 b y c) muestran gran similitud, tanto entre métodos de corrección como modelos, con la excepción del CanESM5. Utilizando QDM, se ve una mayor superposición de las curvas de temperatura de los distintos modelos, mostrando un acuerdo entre ellos. En la Tabla 4-5 se observa que las correcciones reducen los errores de los modelos, pero esto son mayores en el ciclo anual que en las series anuales. En este caso, el modelo MRI-ESM2-0 presenta el menor sesgo con ambos métodos de corrección, con valores de 0,05°C en QDM y 0,08°C en MBCn.

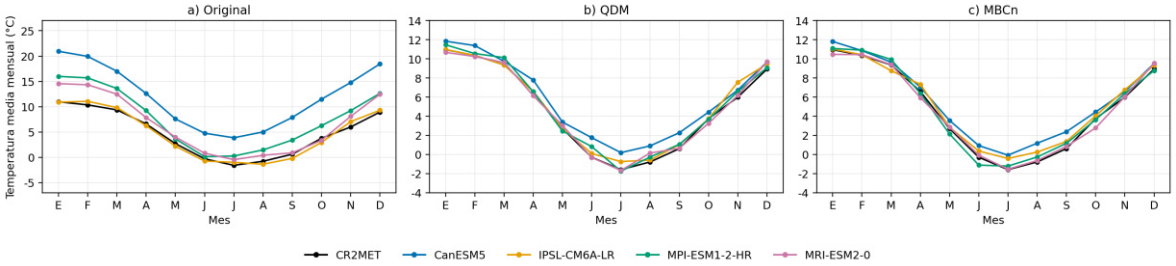

Figura 4-15: Ciclo anual histórico de temperatura media de CR2MET y modelos CMIP6 para a) modelos originales, b) modelos corregidos mediante QDM y c) modelos corregidos mediante MBCn, Aconcagua Alto.

Tabla 4-5: Métricas de desempeño (MBE, NRMSE y correlación de Pearson) de los modelos originales y corregidos de temperatura media para el ciclo anual histórico, cuenca Aconcagua Alto.

Modelo	MBE (°C)			NRMSE (%)			Correlación de Pearson (-)		
	Original	QDM	MBCn	Original	QDM	MBCn	Original	QDM	MBCn
CanESM5	7.28	1.07	1.02	115.6	18.40	17.9	0.98	0.99	0.99
IPSL-CM6A-LR	-0.04	0.32	0.43	9.30	9.10	10.10	0.99	0.99	0.99
MPI-ESM1-2-HR	2.90	0.18	0.23	49.70	5.40	7.60	0.99	0.99	0.99
MRI-ESM2-0	1.83	0.05	0.08	34.90	6.20	5.70	0.99	0.99	0.99

En el diagrama de Taylor de la Figura 4-16 se realiza a utilizando los 420 valores mensuales del periodo histórico, por lo que los modelos conservan su estacionalidad y sus correlaciones son mayores que en la serie anual. Se observa una desviación estándar de los modelos cercana al observado, que corresponde a 4,5°C aproximadamente, mientras que los modelos están entre 4,4 y 4,6°C. El coeficiente de correlación de Pearson se encuentra entre 0,90 y 0,95 para los modelos, siendo nuevamente el IPSL-CM6A-LR corregido con MBCn el que presenta la menor correlación y con un RMSD de 2°C, ligeramente mayor a los demás modelos. En general, los puntos que representan QDM y MBCn se encuentran prácticamente superpuestos, lo que muestra que ambos métodos de corrección consiguen un desempeño similar.

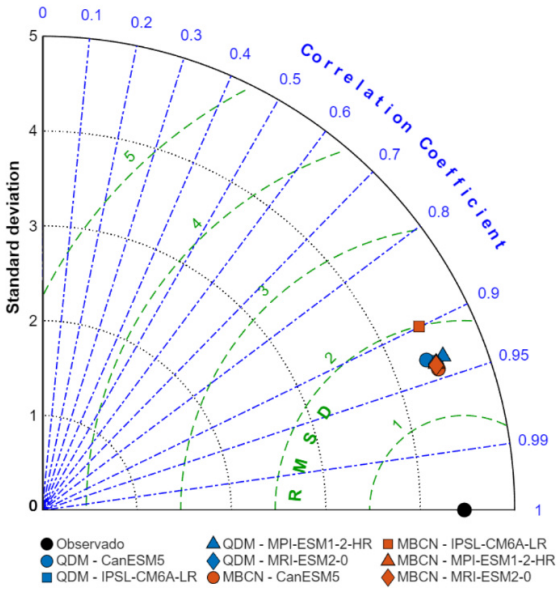

Figura 4-16: Diagrama de Taylor histórico mensual de temperatura media, cuenca Aconcagua Alto.

Proyecciones de cambio climático

Mediante las series anuales en el periodo 2030 – 2099, se puede observar un aumento de temperatura anual promedio que alcanza los 10°C a finales de siglo. El modelo CanESM5 sobrestima la temperatura, situación que se hace más evidente conforme se avanza en la serie anual, llegando a los 12°C al año 2099. Entre los años 2030 y 2050, existe una menor dispersión entre los modelos, mostrando un aumento relativamente uniforme, alcanzando los 8°C al final de ese periodo. A partir del 2050, el CanESM5 comienza a alejarse progresivamente de los demás modelos.

Analizando la señal de cambio, el método QDM proyecta temperaturas inferiores a las entregadas por el MBCn. En general, se puede observar un aumento de temperatura de 2°C en el periodo futuro cercano, con un promedio anual de temperatura que varía entre 6 y 7°C según el modelo (Tabla B- 2), mientras que a finales de siglo hay menor acuerdo entre modelos respecto al aumento de temperatura. Se observan señales de cambio que van entre 3,21°C y 3,30°C MPI-ESM1-2-HR, que es el modelo con menor incremento, considerando ambos métodos de corrección. IPSL-CM6A-LR, por su parte, se encuentra en un rango entre 4,18°C y 4,45°C y CanESM5 entre 5,49°C y 5,92°C, con una tasa decadal de cambio de hasta 0,98°C/década corrigiendo con QDM y 0,75°C/década con MBCn (que es la más alta entre todos los modelos). CanESM5, además, presenta una temperatura promedio anual que supera los 10°C para finales de siglo. Estos resultados también resultan coherentes con lo descrito en Maule respecto a lo proyectado por diversos autores para Chile Central.

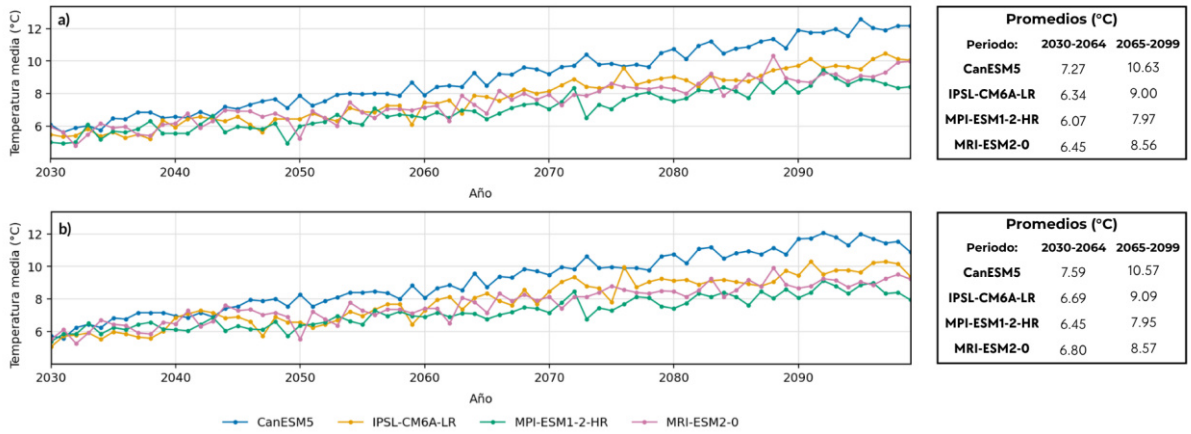

Figura 4-17: Series de temperatura media anual proyectadas para el periodo 2030–2099 en la cuenca Aconcagua Alto: a) mediante QDM; y b) mediante MBCn. Cada panel incluye el promedio de temperatura media anual de cada modelo para 2030–2064 y 2065–2099.

Tabla 4-6: Señal de cambio climático (SCC) y tasa decadal de cambio climático (TD) de temperatura media para el futuro cercano y lejano respecto del periodo histórico, cuenca Aconcagua Alto.

Modelo	QDM (°C) 2030–2064		QDM (°C) 2065–2099		MBCn (°C) 2030–2064		MBCn (°C) 2065–2099	
	SCC (°C)	TD (°C/dec)	SCC (°C)	TD (°C/dec)	SCC (°C)	TD (°C/dec)	SCC (°C)	TD (°C/dec)
CanESM5	2.14	0.84	5.49	0.98	2.94	0.84	5.92	0.75
IPSL-CM6A-LR	1.58	0.60	4.18	0.66	2.05	0.6	4.45	0.53
MPI-ESM1-2-HR	1.32	0.46	3.21	0.6	1.80	0.42	3.30	0.47
MRI-ESM2-0	1.75	0.50	3.85	0.61	2.15	0.48	3.92	0.44

Nota: La temperatura media de CR2MET en la cuenca Aconcagua Alto durante el periodo 1980–2014 es de 4,68 °C

Los ciclos de temperatura de la Figura 4-18 muestran un comportamiento similar al ya analizado en la cuenca Maule Alto. Se ve una mayor dispersión entre modelos en los meses cálidos (DEF), alcanzando una señal de cambio climático máxima de 5,88°C con QDM y 6,26°C con MBCn hacia final de siglo, correspondiente al modelo CanESM5. Por otro lado, MPI-ESM1-2-HR presenta el menor aumento, con 2,91°C y 2,94°C corregido con QDM y MBCn respectivamente (Tabla B- 8). Con estos resultados se proyecta que en el periodo 2030-2064 la cuenca tenga veranos que se puedan encontrar entre 11,33°C y 13,01°C, mientras que para el 2065-2099 entre 12,97 y 16,29°C. En el caso de los meses de invierno, se proyectan temperaturas entre 2,60 y 5,32°C hacia finales de siglo (2065-2099), lo que muestra que la cuenca dejaría de presentar temperaturas bajo 0°C en esta época del año (Tabla B- 7).

Se observa además un acuerdo entre modelos, los cuales presentan un patrón estacional similar a lo largo del año. Este acuerdo se confirma al aplicar el coeficiente de correlación de Spearman entre los valores estacionales corregidos con QDM y MBCn, obteniéndose ρ=0,997 tanto para el futuro cercano (2030-2064) como para el futuro lejano (2065-2099). Además, en la Figura 4-18c y f se repite el comportamiento de CanESM5 observado en las series anuales, donde tiende a sobrestimar la temperatura, alejándose de lo proyectado por los demás modelos.

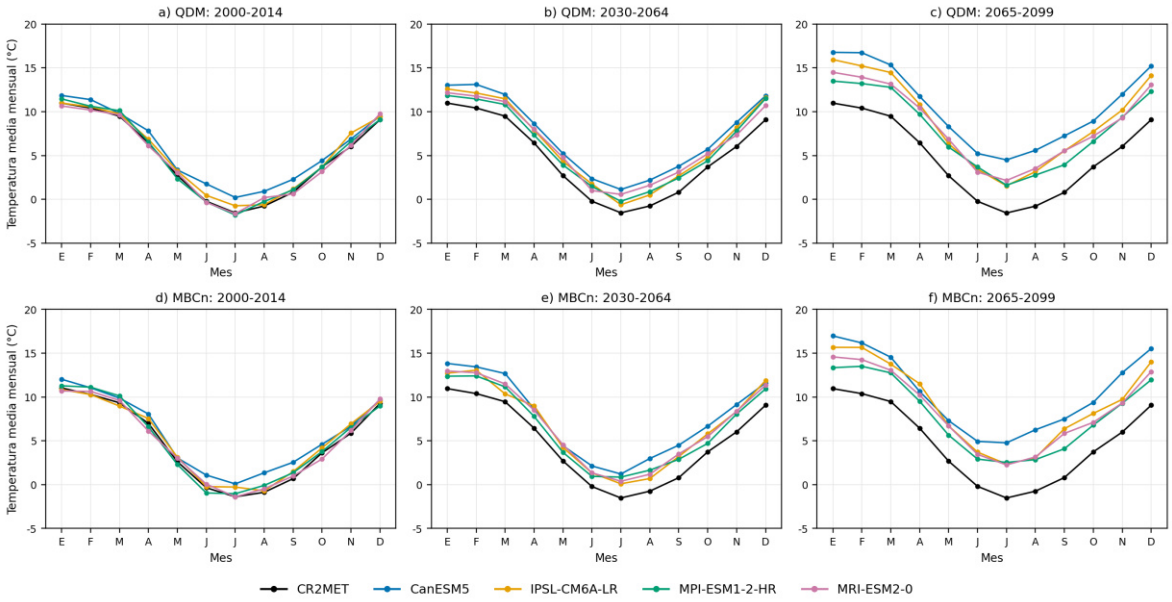

Figura 4-18: Ciclos anuales de temperatura media históricos y proyectados mediante QDM y MBCn para los periodos 2000–2014, 2030–2064 y 2065–2099, Aconcagua Alto.

En los mapas presentados en la Figura 4-19 y Figura 4-20 se observa una distribución de temperaturas parecidas a la de la cuenca Maule Alto, ya que su topografía es similar. Esto se ve en que los pixeles con menor altura (inferior a 2000 msnm) son aquellos que tiene mayor temperatura y se acercan al valle (oeste), mientras que hacia el este se encuentra la cordillera, sector con bajas temperaturas y mayor altitud (sobre 3500 msnm). Además, esta cuenca presenta un rango de elevaciones entre 648 y 5831 msnm, como se observa en la Figura 3-1.

Al observar la Figura 4-19 (a), que corresponde a CR2MET, se aprecia que las zonas más cálidas alcanzan una temperatura cercana a los 13°C, mientras que en los pixeles de mayor altura se observan temperaturas inferiores a 2°C. Al realizar una comparación con los modelos del periodo 2030-2064, se observa un aumento en toda la cuenca, destacándose la zona de valle, la cual en el caso de CanESM5 llega a presentar alrededor de 17°C, mientras que los demás modelos se encuentran cerca de los 15°C. También se puede observar que los mapas corregidos con ambos métodos (QDM y MBCn) son similares entre sí en lo que respecta a la tonalidad de colores en los pixeles, sin embargo, en el futuro lejano (Figura 4-20) empiezan a diferenciarse entre ellos. En este último periodo, se puede observar que gran parte de la cuenca tiende a superar los 5°C, llegando a los 18°C en los pixeles más cálidos en el caso de modelos como IPSL-CM6A-LR y MRI-ESM2-0. En el caso de CanESM5, este modelo presenta pixeles con temperatura superior a 19°C corrigiendo con QDM, mientras que mediante MBCn la temperatura máxima se encuentra alrededor de 18°C. Por último, MPI-ESM1-2-HR es el que se observa con menores temperaturas, encontrándose en un rango entre 1°C en zonas altas y 15°C en zonas de menor altura.

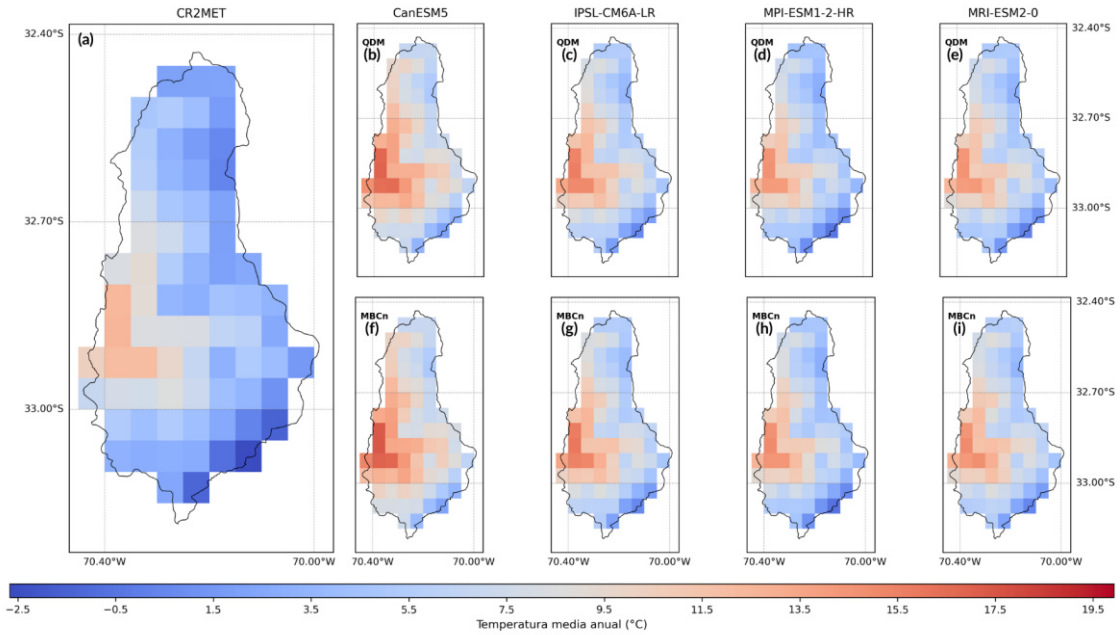

Figura 4-19: Distribución espacial de la temperatura media anual en la cuenca Aconcagua Alto para (a) CR2MET histórico (2000 - 2014), (b–e) proyecciones 2030 –2064 corregidas mediante QDM y (f–i) mediante MBCn.

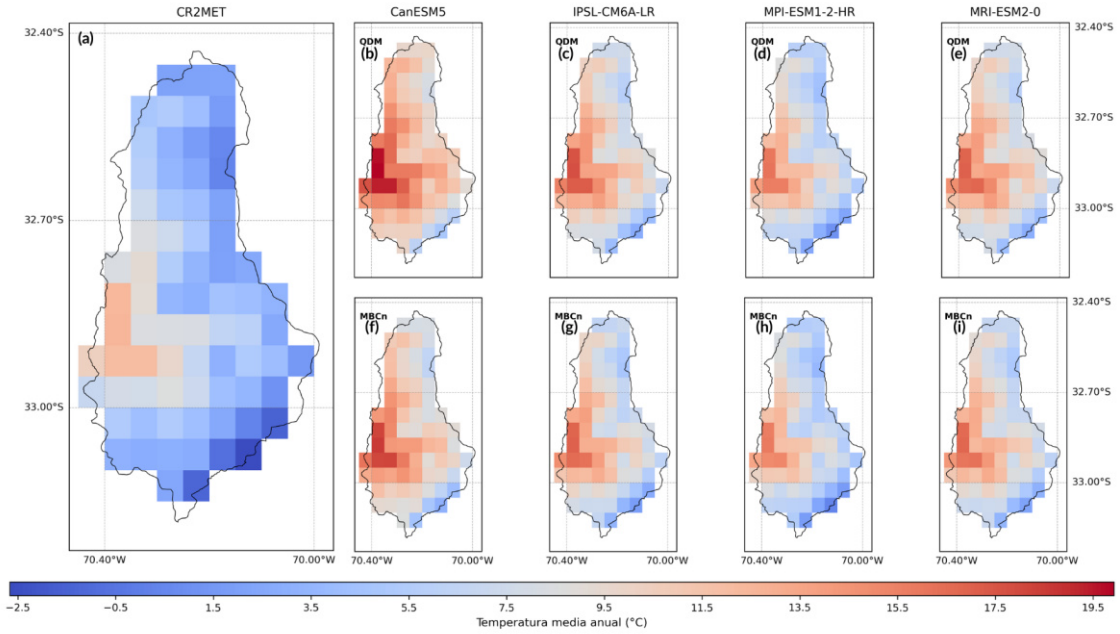

Figura 4-20: Distribución espacial de la temperatura media anual en la cuenca Aconcagua Alto para (a) CR2MET histórico (2000 - 2014), (b–e) proyecciones 2065–2099 corregidas mediante QDM y (f–i) mediante MBCn

4.2.2 Cuenca Río Yeso

Periodo histórico

Para la cuenca del río Yeso, se observa en la Figura 4-21 (a) que los modelos originales tienen un comportamiento similar a las cuencas Aconcagua Alto. Estos se encuentran en un rango de temperatura entre 3 y 12°C y los modelos IPSL-CM6A-LR y MRI-ESM2-0 tienen el mejor desempeño, con un promedio de 4,14 y 4,85°C respectivamente. Esto también se puede visualizar en el panel (a) de la figura, donde las curvas de estos dos modelos se superponen con CR2MET. Por otro lado, CanESM5 original presenta una temperatura de 11,27°C promedio, siendo el modelo con mayores temperaturas simuladas, al igual que en las cuencas analizadas previamente. Los modelos corregidos mediante QDM y MBCn se presentan en los paneles (b) y (c) respectivamente, y en ambos casos se observa una mejora en la magnitud de las temperaturas simuladas. Esto se puede evidenciar gráficamente, ya que las curvas de cada modelo y de CR2MET se superponen, pese a que se aprecia diferencias en la variabilidad temporal entre modelos. Los modelos corregidos con QDM presentan un rango de temperaturas se encuentra entre 4,67 y 5,02°C, este último valor correspondiente a CanESM5, mientras que en el caso de en la corrección con MBCn, los modelos alcanzaron valores entre 4,62 y 4,63°C.

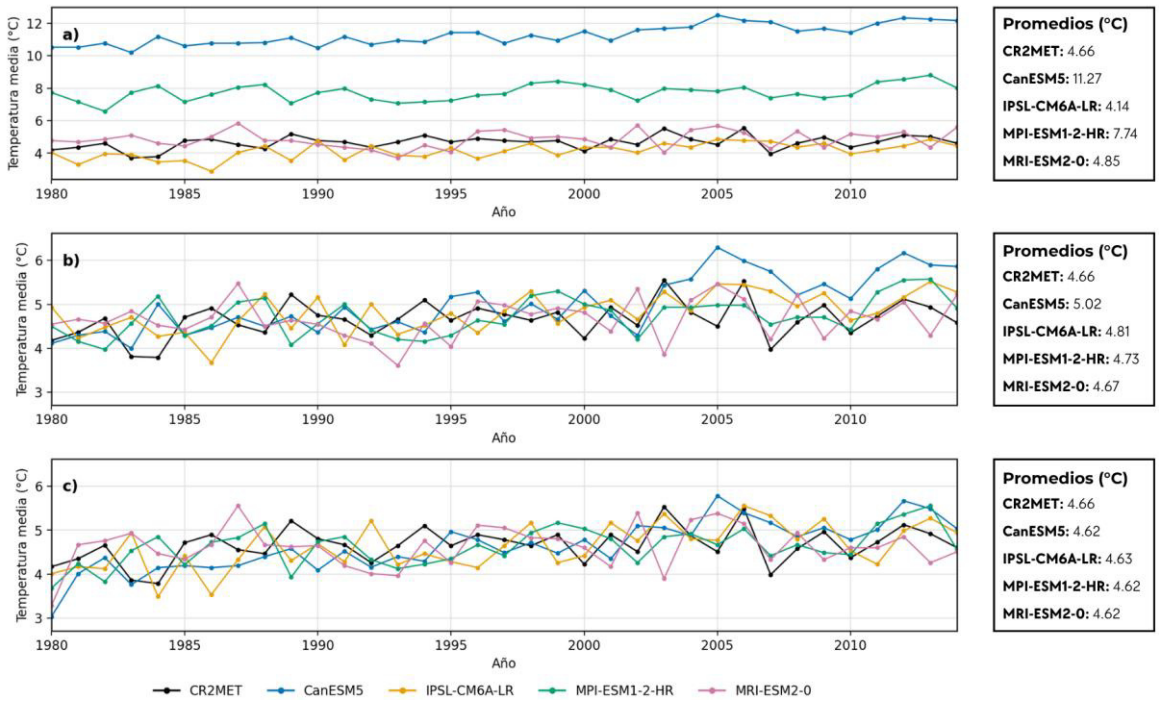

Figura 4-21: Comparación de la temperatura media anual de CR2MET con los GCMs en la cuenca Yeso durante 1980–2014: a) modelos originales; b) corregidos con QDM; y c) corregidos con MBCn. Cada panel incluye el promedio de temperatura media anual de CR2MET y de cada modelo.

Tabla 4-7: Métricas de desempeño (MBE, NRMSE, correlación de Pearson y Perkins Skill Score) de los modelos originales y corregidos de temperatura media durante el periodo 1980–2014, cuenca Yeso.

Modelo	MBE (°C)			NRMSE (%)			Correlación de Pearson (-)			Perkins Skill Score (-)		
	Original	QDM	MBCn	Original	QDM	MBCn	Original	QDM	MBCn	Original	QDM	MBCn
CanESM5	6.61	0.36	-0.04	141.90	15.80	11.80	0.28	0.26	0.38	0.88	0.84	0.92
IPSL-CM6A-LR	-0.53	0.15	-0.04	16.90	12.50	12.20	0.12	0.12	0.25	0.86	0.84	0.91
MPI-ESM1-2-HR	3.08	0.07	-0.04	67.10	12.00	11.30	0.06	0.09	0.21	0.83	0.86	0.89
MRI-ESM2-0	0.19	0.01	-0.04	15.20	13.10	12.80	-0.03	-0.02	0.09	0.84	0.86	0.89

En relación con el MBE de los modelos originales, la Tabla 4-7 muestra que CanESM5 presenta el mayor sesgo (6,61°C), seguido de MPI-ESM1-2-HR con 3,08°C, mientras que el modelo con menor MBE corresponde a MRI-ESM2-0, con un valor de 0,19°C. El caso de IPSL-CM6A-LR se diferencia de los otros modelos en que este presenta un sesgo negativo de -0.53°C, lo que indica que previo a las correcciones, este modelo subestima el promedio de temperatura. El NRMSE muestra la misma tendencia, con CanESM5 alcanzando el mayor valor de error, que corresponde a un 141,90%, mientras que MRI-ESM2-0 tiene el menor error, equivalente a 15,20%.

De la Tabla 4-7 se aprecia que el método MBCn genera una mayor reducción en el MBE, entregando un valor de -0.04 en todos los modelos, mientras que, utilizando QDM, los sesgos se encuentran en un rango entre 0,01°C y 0,36°C. Por otro lado, los resultados de NRMSE se encuentran en rangos similares para ambos métodos de corrección, entre 11,30% y 13,10% para todos los modelos, con excepción de CanESM5 corregido con QDM, el cual presenta un NRMSE de 15,80%.

Los resultados de correlación de Pearson de la Tabla 4-7 muestran que las correcciones realizadas con MBCn tienen mejores resultados que las realizadas con QDM, ya que para este último método se obtienen coeficientes que se encuentran entre -0,02 y 0,26, mientras que MBCn tiene coeficientes que van desde 0,09 a 0,38. Analizando los modelos corregidos con este último método, CanESM5 presenta la mayor correlación, lo que significa que este modelo se destaca en replicar la variabilidad temporal, sin embargo, presenta un coeficiente de 0,38, lo cual se puede considerar una baja correlación. Por otro lado, el Perkins Skill Score también posiciona a CanESM5 como el modelo que representa mejor la distribución de temperatura, simulando las magnitudes y frecuencias de temperaturas. Este presenta con un valor de 0,92 en el caso de MBCn, seguido por IPSL-CM6A-LR con un PSS de 0,91.

En los ciclos anuales (Figura 4-22a) se ve que los modelos originales simulan de buena forma la estacionalidad real de la cuenca Yeso, pero sobrestimando la magnitud de la temperatura de algunos modelos (CanESM5 y MPI-ESM1-2-HR). Esto se observa en el sesgo estacional (diferencia entre CR2MET y el modelo), donde CanESM5 presenta el mayor sesgo, con 5,72°C en invierno (JJA) y 9,11°C en verano (DEF). Por otro lado, MPI-ESM1-2-HR mantiene un sesgo positivo durante todo el año, entre 2,04°C (JJA) y 4,71°C (DEF) y MRI-ESM2-0 varía entre -1,16°C (SON) y 2,17°C (DEF). Estos resultados se detallan en la Tabla B- 9.

En relación con el MBE en los modelos originales, CanESM5 es el que presenta el mayor valor (7,07°C), seguido de MPI-ESM1-2-HR con un sesgo de 3,17°C (Tabla 4-8). Tal como sucedió al analizar las series

anuales, el modelo IPSL-CM6A-LR es el único que subestima, con un MBE de -0,29°C, mientras que MRI-ESM2-0 presenta el menor sesgo (0,23°C). Luego de aplicar QDM y MBCn, la dispersion entre los modelos disminuye, ajustando las magnitudes a las de CR2MET, como lo confirma la Tabla 4-8, donde ambos métodos reducen el MBE y el NRMSE respecto de los modelos originales. Se puede obervar que MRI-ESM2-0 y MPI-ESM1-2-HR presentan los mejores resultados en sesgo y error. El primero tiene un MBE de 0,03°C y 0,07°C corregido con QDM y MBCn respectivamente, y un NRMSE de 6,70% (QDM) y 5,80% (MBCn). MPI-ESM1-2-HR, por otro lado, cuenta con un MBE de 0,15°C (QDM) y de 0,18°C (MBCn), y respecto a NRMSE, los valores corresponden a 5,40% y 8,20%para QDM y MBCn respectivamente. El modelo CanESM5 luego de las correcciones sigue siendo el que presenta mayores sesgos y errores, con 0,80°C de MBE al ser corregido con MBCn y 0,84 con QDM, mientras que, con ambos métodos de corrección, su NRMSE corresponde a 14,0%.

Los resultados de la correlación de Pearson de la Tabla 4-8 muestra valores de 0,99 tanto en los modelos originales como en los corregidos con QDM y MBCn. Esto indica que los modelos, previo a las correcciones, ya representan bien la estacionalidad, donde las menores temperaturas se encuentran en invierno (JJA), y las mayores en los meses de verano (DEF), y que, al aplicar métodos de corrección, estos ajustaron principalmente la magnitud de las temperaturas.

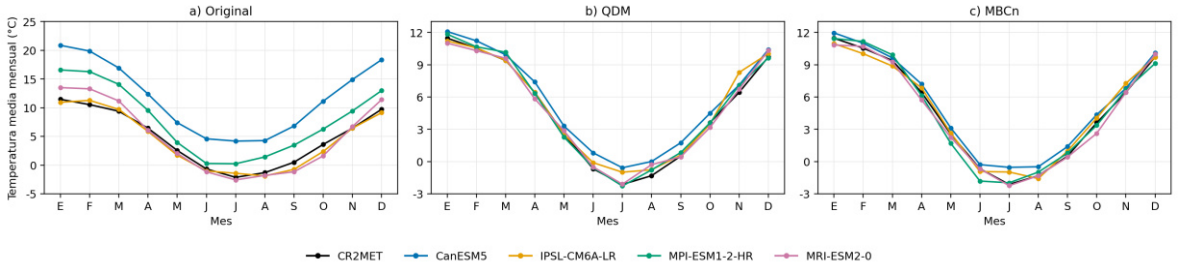

Figura 4-22: Ciclo anual histórico de temperatura media de CR2MET y modelos CMIP6 para a) modelos originales, b) modelos corregidos mediante QDM y c) modelos corregidos mediante MBCn, Yeso.

Tabla 4-8: Métricas de desempeño (MBE, NRMSE y correlación de Pearson) de los modelos originales y corregidos de temperatura media para el ciclo anual histórico, cuenca Yeso.

Modelo	MBE (°C)			NRMSE (-)			Correlación de Pearson		
	Original	QDM	MBCn	Original	QDM	MBCn	Original (-)	QDM (-)	MBCn (-)
CanESM5	7.07	0.84	0.80	108.00	13.80	14.00	0.99	0.99	0.99
IPSL-CM6A-LR	-0.29	0.35	0.44	10.7	10.60	10.30	0.99	0.99	0.99
MPI-ESM1-2-HR	3.17	0.15	0.18	51.40	5.40	8.20	0.99	0.99	0.99
MRI-ESM2-0	0.23	0.03	0.07	21.80	6.70	5.80	0.99	0.99	0.99

El diagrama de Taylor de la Figura 4-24, muestra el comportamiendo mensual del periodo histórico completo, que corresponde a 420 meses, a diferencia de las series anuales (interanual) y los ciclos anuales (estacional). Al igual que en las cuencas anteriores, esto favorece una mayor correlación que la observada las series anuales, ya que conserva la estacionalidad. En Yeso, los modelos muestran un buen desempeño, con una correlación cercana a 0,95 y desviación estándar de 4,8 °C, similar a la de CR2MET. Además, se ve que los simbolos de

los modelos se superponen entre sí, sin grandes diferencias entre QDM y MBCn, siendo IPSL-CM6A-LR corregido con MBCn el modelo que se aleja de la tendencia, presentando un RMSD mayor que los demás modelos, y un coeficiente de correlación de 0,90.

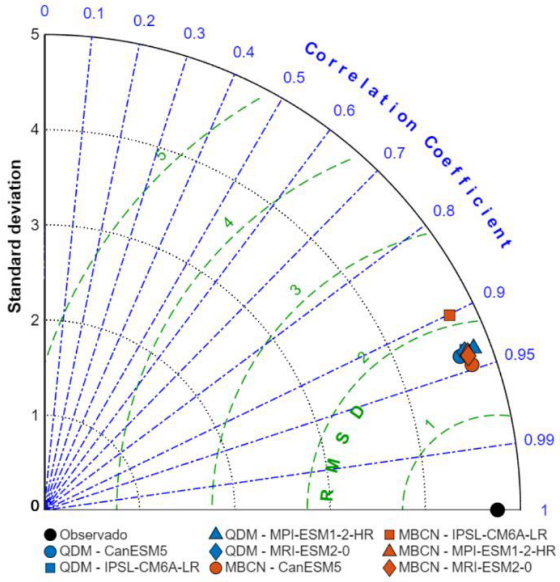

Figura 4-23: Diagrama de Taylor histórico mensual de temperatura media, cuenca Yeso.

Proyecciones de cambio climático

Una vez evaluado el desempeño histórico de los modelos y métodos de corrección, se analizan sus proyecciones de temperatura media para el periodo 2030-2099. Para cuantificar el cambio el cambio esperado respecto al periodo histórico, se utiliza la señal de cambio climático (SCC), que corresponde a la diferencia entre el promedio del periodo proyectado y el histórico. Además, se obtiene la tasa decadal (TD), que corresponde a la pendiente de la serie anual proyectada, expresada en °C/década.

Al analizar las series de temperatura proyectada (Figura 4-24), CanESM5 es el único modelo que alcanza una temperatura superior a 10°C hacia finales de siglo, específicamente luego del año 2080, mientras que desde este mismo año, los otros modelos se encuentran principalmente entre los 8°C y 9°C. También se observa que los métodos de corrección QDM y MBCn no presentan grandes diferencias en las series anuales.

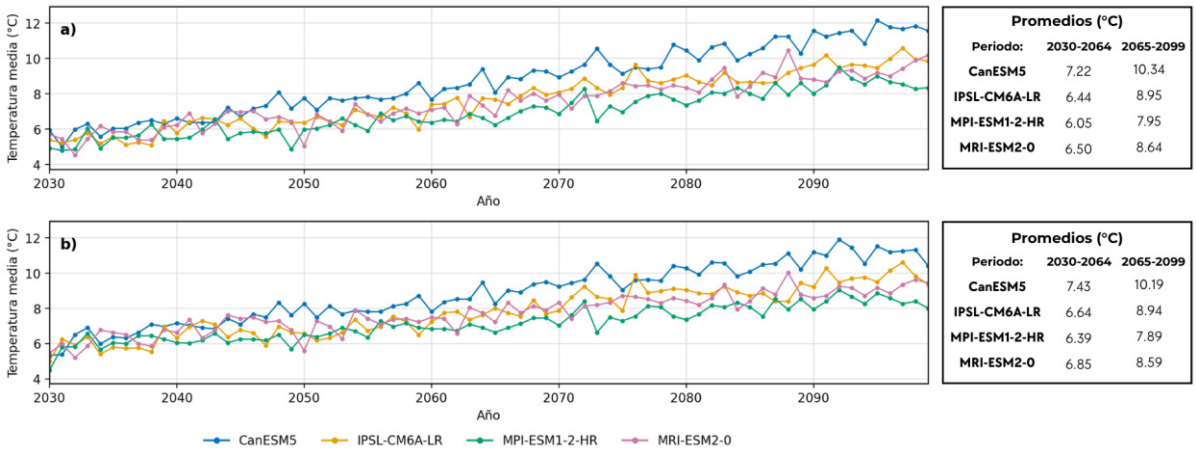

Figura 4-24: Series de temperatura media anual proyectadas para el periodo 2030–2099 en la cuenca Yeso: a) mediante QDM; y b) mediante MBCn. Cada panel incluye el promedio de temperatura media anual de cada modelo para 2030–2064 y 2065–2099.

Tabla 4-9: Señal de cambio para el futuro cercano y lejano respecto del periodo histórico, Yeso.

Modelo	QDM (°C) 2030–2064		QDM (°C) 2065–2099		MBCn (°C) 2030–2064		MBCn (°C) 2065–2099	
	SCC (°C)	TD (°C/dec)	SCC (°C)	TD (°C/dec)	SCC (°C)	TD (°C/dec)	SCC (°C)	TD (°C/dec)
CanESM5	2.20	0.87	5.32	0.91	2.80	0.83	5.56	0.71
IPSL-CM6A-LR	1.62	0.61	4.13	0.63	2.01	0.55	4.31	0.55
MPI-ESM1-2-HR	1.33	0.44	3.23	0.61	1.76	0.41	3.26	0.47
MRI-ESM2-0	1.83	0.51	3.96	0.63	2.22	0.47	3.97	0.45

Nota: La temperatura media de CR2MET en la cuenca Yeso durante el periodo 1980–2014 es de 4,66 °C

Los resultados de la señal de cambio climático ponen en evidencia que el método MBCn tiende a proyectar temperaturas levemente mayores que el QDM, al igual que en la cuenca Aconcagua Alto. Se espera un aumento de temperatura para el periodo futuro cercano (2030-2064) que varía entre 1,33°C (MPI-ESM1-2-HR, QDM) y 2,80°C (CanESM5, MBCn), mientras que, para final de siglo, el rango se encuentra entre 3,23°C (MPI-ESM1-2-HR, QDM) y 5,56°C (CanESM5, MBCn), siendo MPI-ESM1-2-HR, en ambos periodos, el modelo con la menor señal de cambio climático (Tabla 4-9).

Respecto a la tasa decadal, CanESM5 presenta los valores más altos, con 0,87 °C/década corrigiendo con QDM, y 0,83°C/década con MBCn en el futuro cercano y 0,91°C/década (QDM) y 0,71°C/década (MBCn) en el futuro lejano. Los demás modelos presentan tasas más bajas, entre 0,41°C/década y 0,63°C/década considerando ambos periodos y métodos. Observando las temperaturas promedio proyectadas, entre los años 2030-2064 se espera un rango entre 6,05°C y 7,43°C, mientras que para el periodo 2065-2099 se esperan valores entre 7,89°C y 10,34°C, considerando todos los modelos y ambos métodos de corrección (Tabla B- 10). En comparación con Maule Alto y Aconcagua Alto en el futuro lejano, en Yeso se observa una dispersión en los valores de la señal de cambio similar a la de Aconcagua (3,21°C a 5,92°C), aunque con un rango menor (3,23°C a 5,56°C), resultados consistentes con lo mencionado anteriormente para Chile Central.

En lo que respecta al comportamiento estacional, se observa de la Figura 4-25 que las curvas proyectadas conservan la estacionalidad, tanto en los modelos corregidos con QDM como MBCn. En la Tabla B- 8 se

conserva la tendencia de CanESM5 siendo el modelo que proyecta la mayor señal de cambio, y en este caso la estación más afectada corresponde al verano (DEF), con un aumento de 2,65°C (QDM) y 3,30°C (MBCn) en el futuro cercano respecto al periodo histórico, mientras que en el futuro lejano se espera un aumento en promedio de 6,54°C con ambos métodos de corrección. El modelo MPI-ESM1-2-HR es el que presenta menores valores de señal de cambio, con temperaturas entre 1,30°C y 1,92°C para el futuro cercano, considerando los dos métodos de corrección y las 4 estaciones, y temperaturas entre 2,93°C y 3,59°C en el futuro lejano. Estas señales de cambio se traducen en los promedios de temperatura que se muestran en la Tabla B- 11, proyectando hacia final de siglo veranos con una temperatura que varía entre 13,3°C (MPI-ESM1-2-HR, MBCn) y alrededor de 17°C (CanESM5, MBCn y QDM). Por otro lado, en invierno se esperan temperaturas que superan los 2°C, llegando a 3,5°C en CanESM5 corregido con MBCn.

Gráficamente, en la Figura 4-25, se puede ver un acuerdo entre los modelos corregidos con ambos métodos, mostrando una alta consistencia entre QDM y MBCn para las simulaciones estacionales. Esto se nota en los rangos de temperatura que abarcan los modelos corregidos con ambos métodos, ya que, por ejemplo, en los gráficos (b) y (e) las curvas fluctúan entre valores cercanos 13-14°C en verano y alrededor de los 0°C en invierno. Esta observación es demostrada mediante el coeficiente de correlación de Spearman, calculado entre los valores estacionales de QDM y MBCn, resultando un ρ equivalente a 0,997 en el periodo 2030-2064 y un ρ de 0,988 en 2065-2099 (α=0,05).

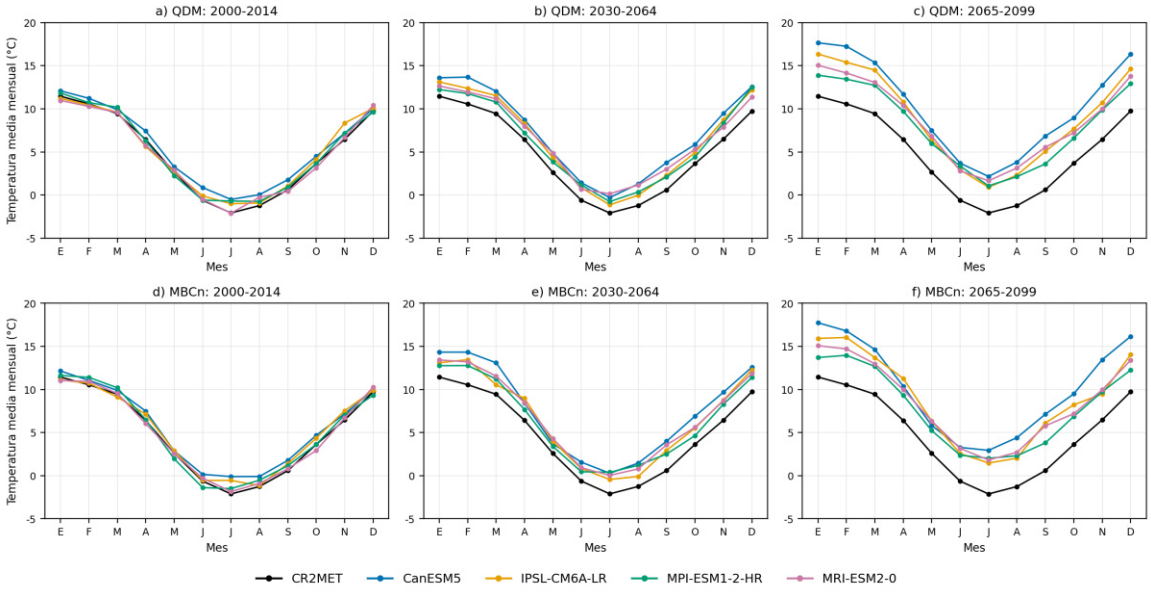

Figura 4-25: Ciclos anuales de temperatura media históricos y proyectados mediante QDM y MBCn para los periodos 2000–2014, 2030–2064 y 2065–2099, Yeso.

Además del comportamiento temporal de la temperatura, se evalúa su distribución espacial utilizando el mismo periodo de referencia de CR2MET (2000-2014), siendo la Figura 4-26 correspondiente al periodo 2030-2064 y la Figura 4-27 al periodo 2065-2099.

La cuenca del río Yeso es la que presenta mayor altura (Figura 3-1), y se ve reflejado en las temperaturas representadas en los mapas, donde CR2MET alcanza una mínima de -3,5°C en el periodo histórico acotado a 2000 – 2014, mientras que en la zona baja de la cuenca (bajo los 2600 msnm aproximadamente) las temperaturas promedio alcanzan los 10°C en el mismo periodo. En esta cuenca en particular se puede ver que incluso las zonas más altas se ven fuertemente afectadas por la variación de temperatura, llegando a promediar temperaturas sobre los 0°C, siendo CanESM5 el primer modelo en superar este valor, alcanzando 1°C en el periodo futuro cercano y cerca de 2,5°C en el futuro lejano. Por otro lado, MPI-ESM1-2-HR se mantiene como el modelo que proyecta un menor aumento, acercándose a los 0,5°C hacia fines de siglo.

En la zona de menos altura, las temperaturas proyectadas alcanzan un rango entre 12°C y 14,5°C durante el futuro cercano, y entre 12,5°C y 16°C en el futuro lejano, siendo CanESM5 el modelo que presenta los valores más altos en toda la cuenca y en ambos periodos futuros. En relación con los métodos de corrección, las diferencias se hacen más notorias en la Figura 4-27, donde QDM entrega temperaturas más altas que MBCn.

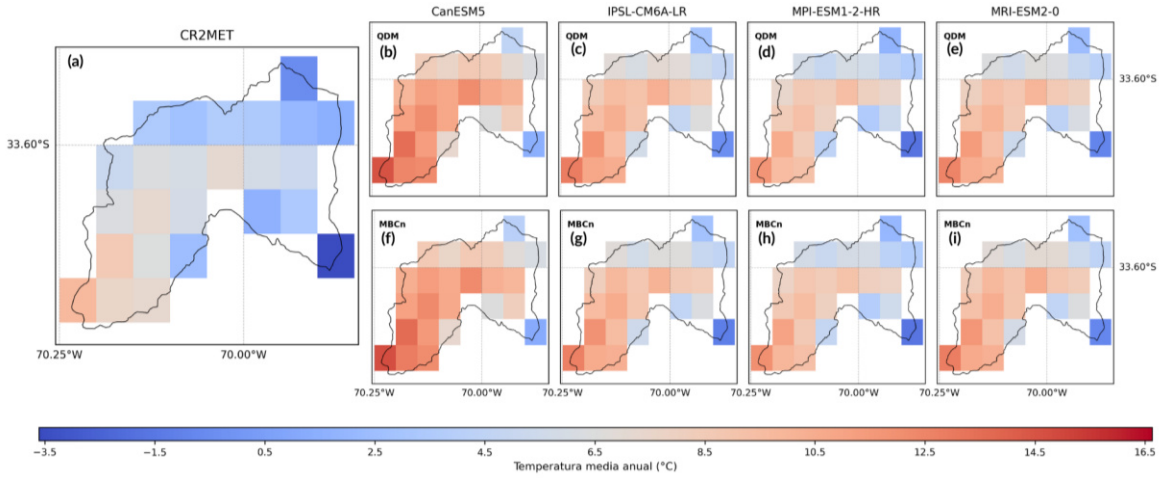

Figura 4-26: Distribución espacial de la temperatura media anual en la cuenca Yeso para (a) CR2MET histórico (2000-2014), (b–e) proyecciones 2030–2064 corregidas mediante QDM y (f–i) mediante MBCn.

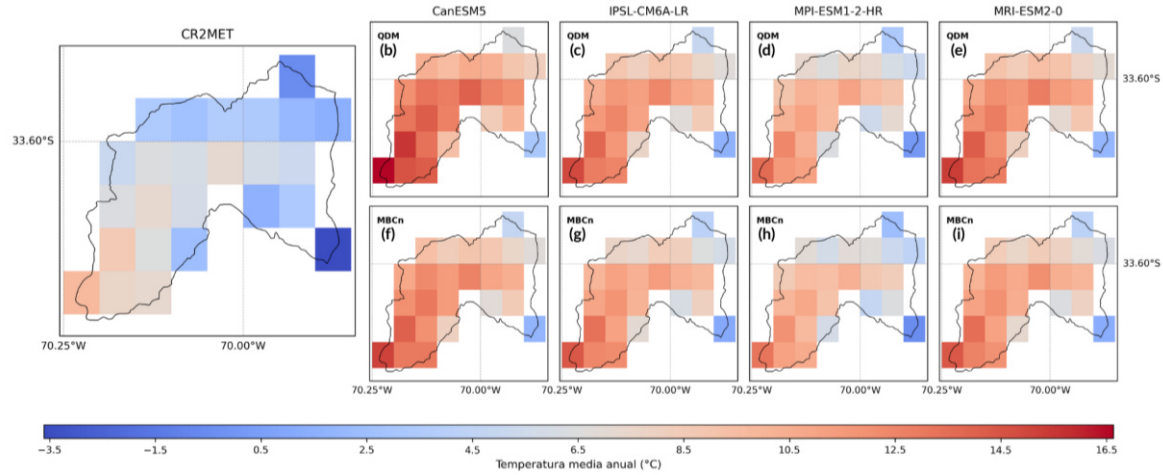

Figura 4-27: Distribución espacial de la temperatura media anual en la cuenca Yeso para (a) CR2MET histórico (2000-2014), (b–e) proyecciones 2065–2099 corregidas mediante QDM y (f–i) mediante MBCn.

4.3 Evaluación retrospectiva y proyecciones futuras de productos CMIP6 para precipitación

En esta sección evalúan los modelos CMIP6 y su capacidad de representar la precipitación, considerando tanto su desempeño durante el periodo histórico como sus proyecciones entre los años 2030 y 2099, los cuales, al igual que en la temperatura, se dividen en dos periodos de estudio. Para realizar el análisis de los modelos, se comparan las simulaciones originales y corregidas mediante QDM y MBCn con las series históricas observadas de CR2MET. Utilizando diversas métricas se identifican los modelos con mejor desempeño, para luego realizar las proyecciones y evaluar las variaciones esperadas para cada cuenca.

4.3.1 Cuenca Río Maule Alto

Periodo histórico

La Figura 4-28 presenta los modelos sin corrección y CR2MET en forma de series anuales, abarcando el periodo histórico desde el 1980 hasta el 2014. Se puede observar una gran diferencia entre los modelos, no solo en magnitud, sino en los patrones que representan a lo largo de los años, siendo CanESM5 el que muestra una menor variabilidad interanual, seguido por IPSL-CM6A-LR. El modelo MRI-ESM2-0 sobrestima la precipitación, pero con un comportamiento mucho más variable a lo largo de los años. Esto demuestra que, a nivel general, los modelos originales no representan correctamente la precipitación histórica de la cuenca.

Luego de aplicar las correcciones con los métodos QDM y MBCn, se ve una mejora de aquellos modelos que tenían una baja variabilidad temporal. Además, se observa que los modelos se acercan a CR2MET en magnitud, pero con una precipitación que en general fluctúa entre los 500 y 1500 mm/año. Se ve además un evento de alta precipitación por parte del modelo CanESM5 cerca del año 2001, el cual no es registrado por CR2MET. Este evento supera los 2000 mm/año en el caso de la corrección con QDM, mientras con MBCn disminuye a alrededor de 1700 mm/año. Con esto se puede ver que, a pesar de estos eventos puntuales, las correcciones mejoran la magnitud de los modelos, pero no necesariamente la variabilidad temporal.

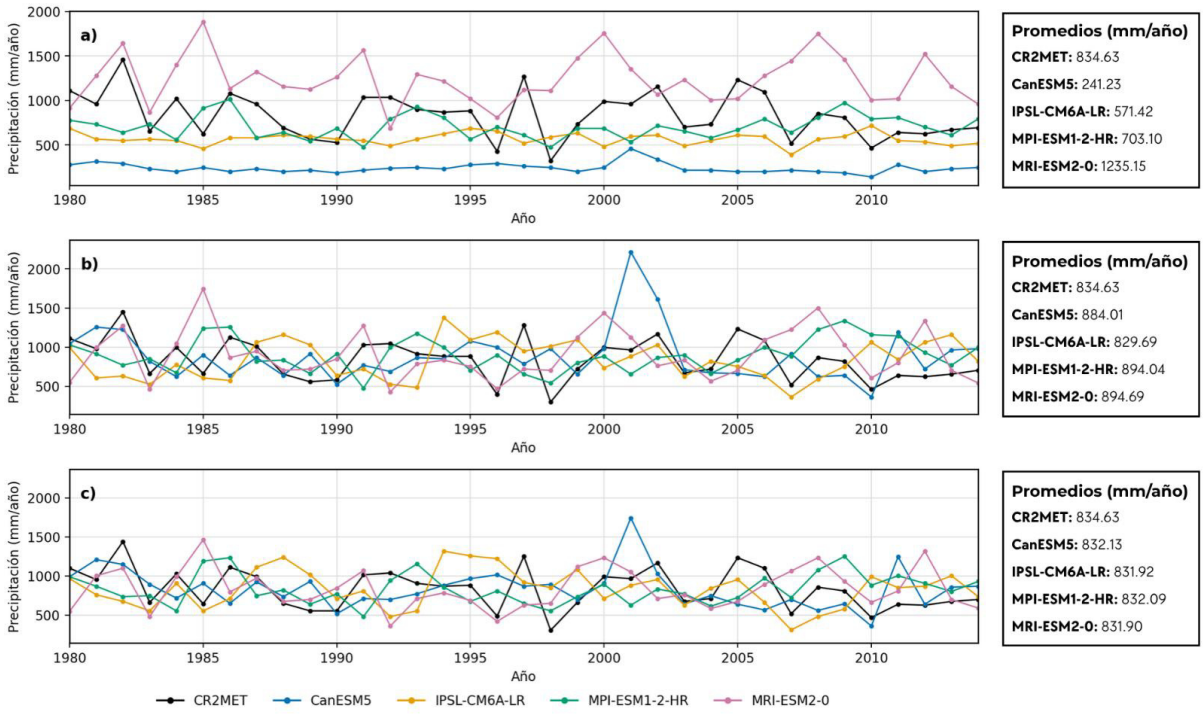

Figura 4-28: Comparación de la precipitación anual de CR2MET con los GCMs en la cuenca Maule Alto durante 1980–2014: a) modelos originales; b) corregidos con QDM; y c) corregidos con MBCn. Cada panel incluye el promedio de la precipitación anual de CR2MET y de cada modelo.

Tabla 4-10: Métricas de desempeño (PBIAS, NRMSE, correlación de Pearson y Perkins Skill Score) de los modelos originales y corregidos de precipitación durante el periodo 1980–2014, cuenca Maule Alto.

Modelo	PBIAS (%)			NRMSE (%)			Correlación de Pearson (-)			Perkins Skill Score (-)		
	Original	QDM	MBCn	Original	QDM	MBCn	Original	QDM	MBCn	Original	QDM	MBCn
CanESM5	-71.10	5.92	-0.30	74.00	45.10	38.40	0.24	0.18	0.16	0.75	0.94	0.94
IPSL-CM6A-LR	-31.54	-0.59	-0.32	43.60	45.50	42.40	0.03	-0.18	-0.04	0.66	0.86	0.94
MPI-ESM1-2-HR	-15.76	7.12	-0.30	37.00	40.30	37.10	0.07	-0.04	0.05	0.79	0.92	0.93
MRI-ESM2-0	47.99	7.19	-0.33	62.10	45.30	41.40	0.12	0.14	0.08	0.69	0.92	0.95

Las métricas PBIAS y NRMSE evidencian que el método con mejor desempeño en su corrección corresponde a MBCn, pero introduciendo una leve subestimación, lo que muestra que este método logra una corrección más pareja entre los modelos, disminuyendo el PBIAS a un rango menor, entre -0,30% y 0,33%. Esto es independiente de la magnitud y signo del sesgo original de cada uno, mientras que QDM entrega un PBIAS en un rango mayor (-0,59% a 7,19%). Los modelos tienen resultados parecidos, destacando CanESM5 y MPI-ESM1-2-HR, que además presentan los valores más bajos de NRMSE al ser corregidos con MBCn (37,10% y 38,40% respectivamente). En promedio, esta cuenca registró una precipitación anual de 834,6 mm/año (CR2MET), mientras que el periodo histórico simulado por los modelos, considerando ambos métodos de corrección, se encuentra en un rango entre 830 y 895 mm/año.

Analizando la correlación de Pearson y Perkins Skill Score de la Tabla 4-10, se ve que los modelos con corrección mejoran levemente en relación con su comportamiento temporal durante el periodo de estudio, pero aun con resultados poco representativos, siendo IPSL-CM6A-LR corregido con MBCn el que alcanza la máxima correlación de 0,16. Por otro lado, el PSS sí presenta mejoras, aumentando esta métrica de 0,7 a 0,92 en promedio.

La Figura 4-29 presenta el ciclo anual histórico, que muestra el comportamiento estacional promedio dentro de un año (intra-anual). A diferencia de lo observado en temperatura media, los modelos originales tienen un desempeño deficiente, tanto en magnitudes como en estacionalidad. CR2MET concentra la precipitación en invierno (JJA), llegando hasta septiembre, donde su máximo se encuentra en julio, mientras que modelos como MRI-ESM2-0 y MPI-ESM1-2-HR desplazan su máximo a junio (Figura 4-29). Por otro lado, el modelo original con peor comportamiento corresponde a IPSL-CM6A-LR, el cual presenta una precipitación relativamente uniforme alrededor de 100 mm/mes, con sus valores más altos en verano, entregando una correlación negativa (Tabla 4-11). Esta situación no se notaba en el análisis interanual de las series (Figura 4-28 a), ya que este compara la precipitación total acumulada año a año, sin considerar en qué meses ocurre la precipitación, mientras que los ciclos anuales (Figura 4-29 a) compara el comportamiento estacional, por lo que el modelo puede simular correctamente el total anual de precipitación, pero fallar en la estacionalidad.

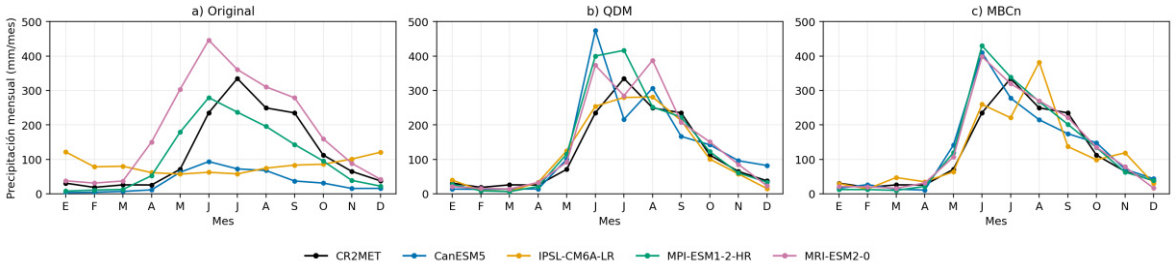

Figura 4-29: Ciclo anual histórico de precipitación de CR2MET y modelos CMIP6 para a) modelos originales, b) modelos corregidos mediante QDM y c) modelos corregidos mediante MBCn, Maule Alto.

Tabla 4-11: Métricas de desempeño (MBE, NRMSE y correlación de Pearson) de los modelos originales y corregidos de precipitación para el ciclo anual histórico, cuenca Maule Alto.

Modelo	PBIAS (%)			NRMSE (%)			Correlación de Pearson (-)		
	Original	QDM	MBCn	Original	QDM	MBCn	Original	QDM	MBCn
CanESM5	-120.37	23.62	16.52	75.40	52.60	31.70	0.81	0.79	0.88
IPSL-CM6A-LR	-53.89	-2.21	0.38	77.40	17.40	38.60	-0.42	0.97	0.84
MPI-ESM1-2-HR	-19.05	29.07	26.67	36.40	34.40	38.30	0.85	0.95	0.91
MRI-ESM2-0	97.49	29.71	24.33	64.80	39.30	32.00	0.83	0.90	0.93

Al realizar las correcciones, la magnitud mejora y la estacionalidad de los modelos se asemejan más a CR2MET, lo que se evidencia en la superposición de las curvas en todas las estaciones de la Figura 4-29, con excepción de JJA, que sigue presentando diferencias importantes. Por otro lado, al analizar las métricas de la Tabla 4-11, se observa que el modelo IPSL-CM6A-LR tiene el mejor desempeño luego de ser corregido con QDM, con

PBIAS más cercano a cero (2,21%), el menor NRMSE (17,40%) y la mayor correlación de Pearson (0,97) mientras que CanESM5 presenta el peor desempeño, con un NRSME de 52,60% y la menor correlación, equivalente a 0,79. Al analizar los modelos corregidos con MBCn, MRI-ESM2-0 obtiene los mejores resultados, con el menor NRMSE (32%) y la mayor correlación (0,93), mientras que MPI-ESM1-2-HR presenta el peor desempeño, con el PBIAS más alto, correspondiente a 26,67% y el NRMSE de 38,30% .

El diagrama de Taylor de la Figura 4-30 evidencia que el desempeño mensual de los modelos en precipitación es menor que en temperatura, donde la correlación de Pearson en promedio se encuentra cerca de 0,95, mientas que en precipitación se tiene aproximadamente un valor de 0,5. Específicamente, los modelos se encuentran en un rango de correlación entre 0,4 y 0,55 y resultados de RMSD entre 150 y 175 mm/mes.

En relación con la desviación estándar, los modelos corregidos con MBCn son los que replican de mejor forma la dispersión de los datos CR2MET, con una desviación estándar cercana a 150 mm/mes en los cuatro modelos, mientras CR2MET se acerca a 155 mm/mes. IPSL-CM6A-LR corregido con QDM es el único modelo sometido a este tipo de corrección que tiene una dispersión similar a CR2MET, ya que CanESM5, MRI-ESM2-0 y MPI-ESM1-2-HR se ubican entre 175 y 180 mm/mes.

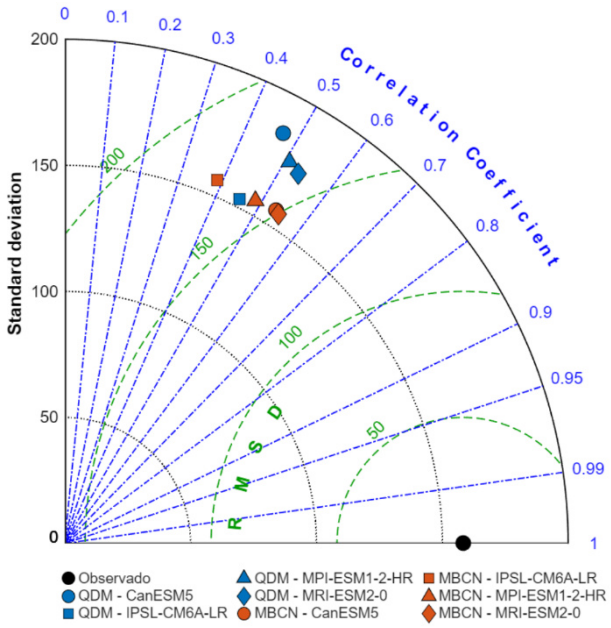

Figura 4-30: Diagrama de Taylor de precipitación mensual, cuenca Maule Alto.

Proyecciones de cambio climático

La Figura 4-31 muestra las series proyectadas para los años 2030 – 2099. Se ve una alta variabilidad interanual, destacándose el modelo IPSL-CM6A-LR, el cual presenta una variación de más de 1000 mm/año entre los años 2046 y 2047. Si bien los otros modelos también presentan variabilidad, en general no supera los 500 mm/año. Por otro lado, los gráficos no muestran una tendencia clara de cambio climático, por lo que a simple vista no es posible deducir si la precipitación proyectada aumenta o disminuye.

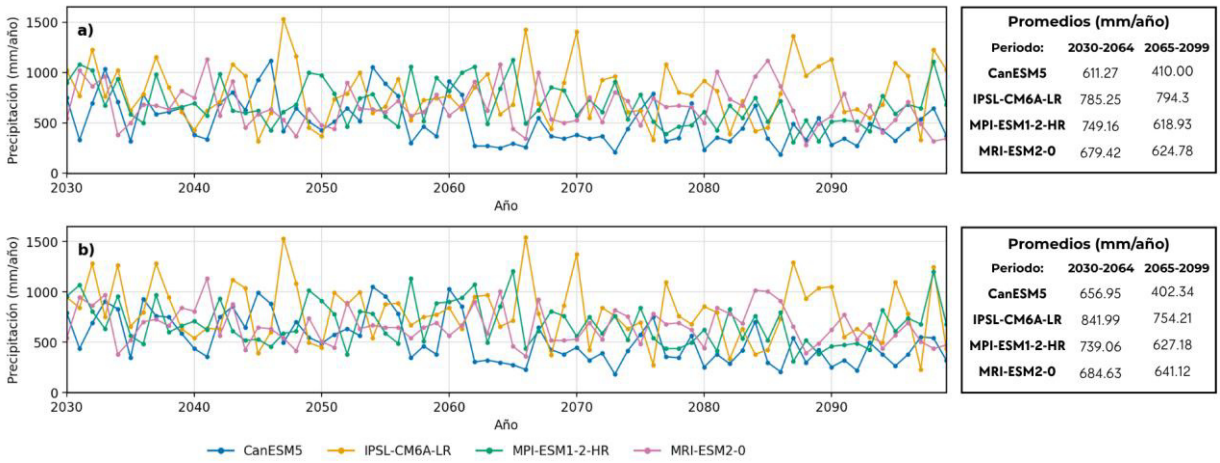

Figura 4-31: Series de precipitación anual proyectadas para el periodo 2030–2099 en la cuenca Maule Alto: a) mediante QDM; y b) mediante MBCn. Cada panel incluye el promedio de precipitación anual de cada modelo para 2030–2064 y 2065–2099.

Tabla 4-12: Señal de cambio de precipitación para el futuro cercano y lejano respecto del periodo histórico, Maule Alto.

Modelo	QDM (%)		MBCn (%)	
	2030–2064	2065–2099	2030–2064	2065–2099
CanESM5	-30.85	-53.62	-21.05	-51.65
IPSL-CM6A-LR	-5.35	-4.26	1.210	-9.34
MPI-ESM1-2-HR	-16.20	-30.84	-11.18	-24.62
MRI-ESM2-0	-24.06	-30.17	-17.70	-22.93

Analizando la señal de cambio climático de Tabla 4-12, se ve que los modelos proyectan una disminución de la precipitación, donde el método QDM genera porcentajes mayores en los resultados, con la excepción de IPSL-CM6A-LR en el futuro lejano, donde MBCn genera una disminución mayor que QDM (-9,34% y -4,26% respectivamente). Estos resultados posicionan a IPSL-CM6A-LR como el modelo con menor señal de cambio climático, incluso presentando el único porcentaje de aumento de precipitación en el futuro cercano al ser corregido con MBCn (1,21%). CanESM5, por otro lado, presenta una disminución entre el 20 y 30% para el periodo futuro cercano, y más del 50% de disminución para el futuro lejano, dependiendo del método de corrección, siendo el modelo con mayor SCC. Estos resultados, a nivel general, son coherentes con estudios realizados en Chile Central, los cuales coinciden en proyectar disminución de precipitación en un rango entre 20 y 40% hacia finales de siglo (Gateño et al., 2024; Salazar et al., 2024; Vásquez et al., 2025). Estos autores, además, reportan un alto acuerdo de signo entre modelos, lo que implica que la mayoría de ellos proyectan años más secos.

La gran variabilidad que presenta la precipitación anual a lo largo del periodo futuro explica por qué no se calcula la tasa de cambio decadal como se realizó con la temperatura. Además de considerar si la precipitación aumentará o disminuirá, es relevante estudiar cuánto va a variar la precipitación año a año, ya que, a pesar de que se proyecte una disminución de esta misma, las series anuales muestran eventos importantes, con grandes diferencias de precipitación en periodos cortos de tiempo. La Tabla 4-13 presenta el coeficiente de variación,

donde los modelos corregidos con QDM muestran valores mayores, con la excepción de MPI-ESM1-2-HR, que presenta los mismos valores para cada periodo de estudio usando los dos métodos de corrección (0,24 en el periodo histórico, 0,29 en el futuro cercano y 0,33 en el futuro lejano). La otra excepción corresponde a IPSL-CM6A-LR, que, al ser corregido con MBCn entrega un coeficiente 0,43, mientras que con QDM un valor de 0,41. En general, los modelos proyectan un aumento progresivo en la variabilidad, pero esto no se cumple en las proyecciones de MRI-ESM2-0, que presenta un comportamiento atípico. Este proyecta una disminución de la variabilidad en el periodo futuro cercano y un nuevo aumento hacia finales de siglo, con un valor de 0,35, siendo menor que el simulado en el periodo histórico. CanESM5 corregido con QDM, por su parte, alcanza su máxima variabilidad en el futuro cercano (0,41) y disminuye en el futuro lejano (0,38), aunque estos resultados siguen siendo mayores que la variabilidad del periodo histórico (0,39). Finalmente, IPSL-CM6A-LR es el modelo que proyecta mayor variabilidad hacia finales de siglo, con coeficientes de 0,41 y 0,43 siendo corregido con QDM y MBCn respectivamente.

Tabla 4-13: Coeficiente de variación de precipitación anual para el periodo histórico, futuro cercano y futuro lejano, Maule Alto.

Modelo	QDM (-)			MBCn (-)		
	1980-2014	2030–2064	2065–2099	1980-2014	2030–2064	2065–2099
CanESM5	0.39	0.41	0.38	0.31	0.36	0.36
IPSL-CM6A-LR	0.30	0.36	0.41	0.30	0.32	0.43
MPI-ESM1-2-HR	0.24	0.29	0.33	0.24	0.29	0.33
MRI-ESM2-0	0.37	0.31	0.35	0.32	0.28	0.28

En la Figura 4-32, que presenta el comportamiento estacional de los modelos, se observa un mayor acuerdo entre ellos durante el verano (DEF) y otoño (MAM), especialmente al ser corregidos con MBCn. En el futuro cercano, por ejemplo, los 4 modelos varían entre 17,14 y 21,34 mm/mes en verano al ser corregidos con MBCn (Figura 4-32 (a), Tabla C- 3). Es relevante mencionar que estas estaciones presentan precipitaciones cercanas a cero, mientras que invierno (JJA) y primavera (SON) concentran la mayor parte de estas, siendo además los meses con menor acuerdo entre modelos. En invierno, durante el periodo futuro lejano, CanESM5 proyecta valores más bajos que los demás modelos (132,47 mm/mes con MBCn y 148,80 mm/mes con QDM), mientras que IPSL-CM6A-LR entrega los valores de precipitación más altos (277,78 mm/mes y 287,86 mm/mes corregido con MBCn y QDM respectivamente). De la Figura 4-32 se puede observar que el comportamiento estacional es coherente entre los dos métodos de corrección. Esto se corrobora utilizando el coeficiente de correlación de Spearman entre los resultados de QDM y MBCn, que en el futuro cercano entrega un ρ de 0,988 y en el futuro lejano un ρ de 0,973, considerando un nivel de significancia α de 0,05.

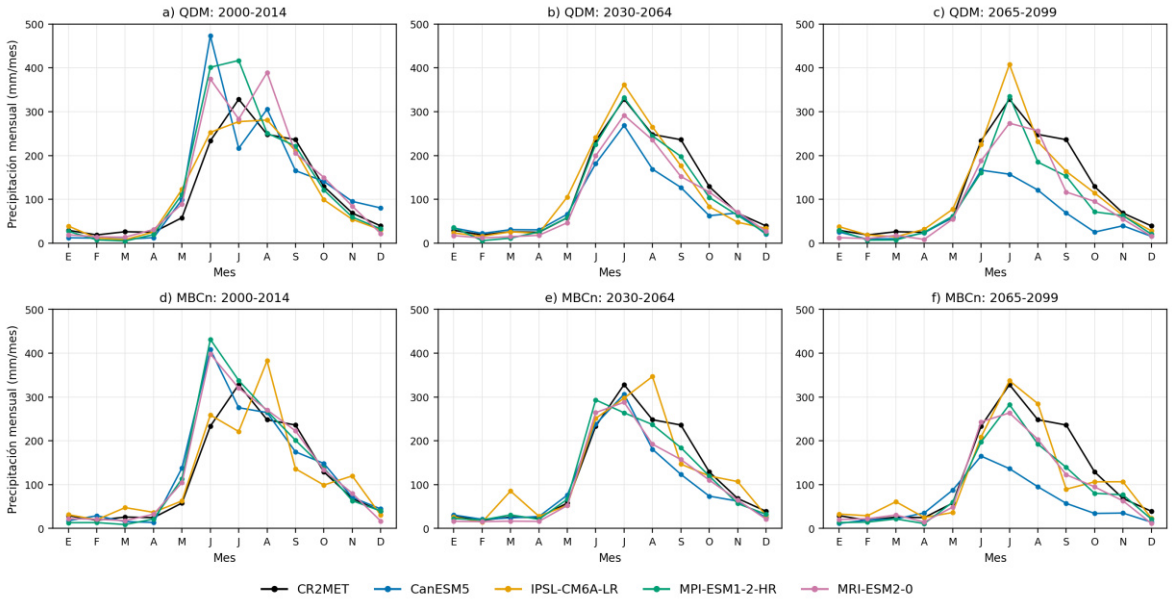

Figura 4-32: Ciclos anuales de precipitación históricos y proyectados mediante QDM y MBCn para los periodos 2000–2014, 2030–2064 y 2065–2099, Maule Alto.

Tabla 4-14: Media y desviación estándar entre modelos de la precipitación mensual proyectada por estación, para el futuro cercano y lejano, Maule Alto.

Estación	Media (mm/mes)				Desviación Estándar (mm/mes)			
	QDM (2030-2064)	QDM (2065-2099)	MBCn (2030-2064)	MBCn (2065-2099)	QDM (2030-2064)	QDM (2065-2099)	MBCn (2030-2064)	MBCn (2065-2099)
DJF	20.71	19.05	19.81	19.51	2.26	5.65	1.88	5.19
JJA	253.48	225.80	263.7	218.05	31.66	57.68	24.99	61.41
MAM	36.89	31.05	38.03	37.31	10.89	7.17	12.09	8.39
SON	106.36	85.69	110.59	83.86	15.55	29.19	16.09	27.77

En lo que respecta a la dispersión entre modelos, La Tabla 4-14 presenta tanto la media como la desviación estándar, la cual aumenta del futuro cercano al futuro lejano en DEF, JJA y SON bajo ambos métodos de corrección, siendo JJA la estación donde se hace más notorio. En invierno, la media entre los modelos baja de 253,70 a 225,80 mm/mes bajo QDM, mientras que corregidos con MBCn disminuye de 263,70 mm/mes en el periodo cercano a 218,05 mm/mes en el periodo lejano. Además, la desviación estándar en JJA pasa de 31,66 a 57,68 mm/mes con QDM y de 24,99 a 61,41 mm/mes con MBCn. Tanto SON como DEF presentan la misma tendencia a aumentar su desviación estándar entre el periodo futuro cercano y lejano. En MAM, por otro lado, ocurre lo contrario, ya que la dispersión entre modelos disminuye hacia finales de siglo, pasando de 10,89 mm/mes a 7,17 mm/mes corrigiendo con QDM. Estas diferencias entre modelos presentan una incertidumbre en la representación de los meses lluviosos, sin embargo, no se observa un cambio en la estacionalidad de las precipitaciones, concentrándose en los meses de invierno al igual que en el periodo histórico.

4.3.2 Cuenca Río Aconcagua Alto

Periodo histórico

La serie de precipitación anual de modelos originales presenta similitudes con la serie de la cuenca Maule Alto, donde existe una diferencia en magnitud y comportamiento temporal. En este caso, CanESM5 e IPSL-CM6A-LR tienen una menor variabilidad año a año (Figura 4-33), donde este último además sobrestima la precipitación, mientras que CanESM5 se encuentra en general dentro del rango de valores de CR2MET. Siguiendo este mismo criterio de análisis, CanESM5 es el modelo con menor sesgo y error (PBIAS de -28,88% y NRMSE de 52,70%), aunque MPI-ESM1-2-HR representa mejor el rango de valores de los modelos originales, con un PSS de 0,80, como se observa en la Tabla 4-15.

Al corregir los modelos, se ve que principalmente mejoran las magnitudes, acotando el rango de precipitación a un rango entre 100 - 600 mm/año, y que previo a las correcciones presentaban más de 1000 mm/año de diferencia. En general, los modelos no superan los 600 mm/año, existiendo algunos eventos peak excepcionales, donde el más destacable corresponde al generado por CanESM5 en el año 2001, pero que no refleja un evento histórico. El promedio anual entregado por CR2MET corresponde a 261 mm/año, los eventos corregidos mediante QDM se encuentran entre 276 y 308 mm/año, y los corregidos con MBCn coinciden en una precipitación de 260 mm/año.

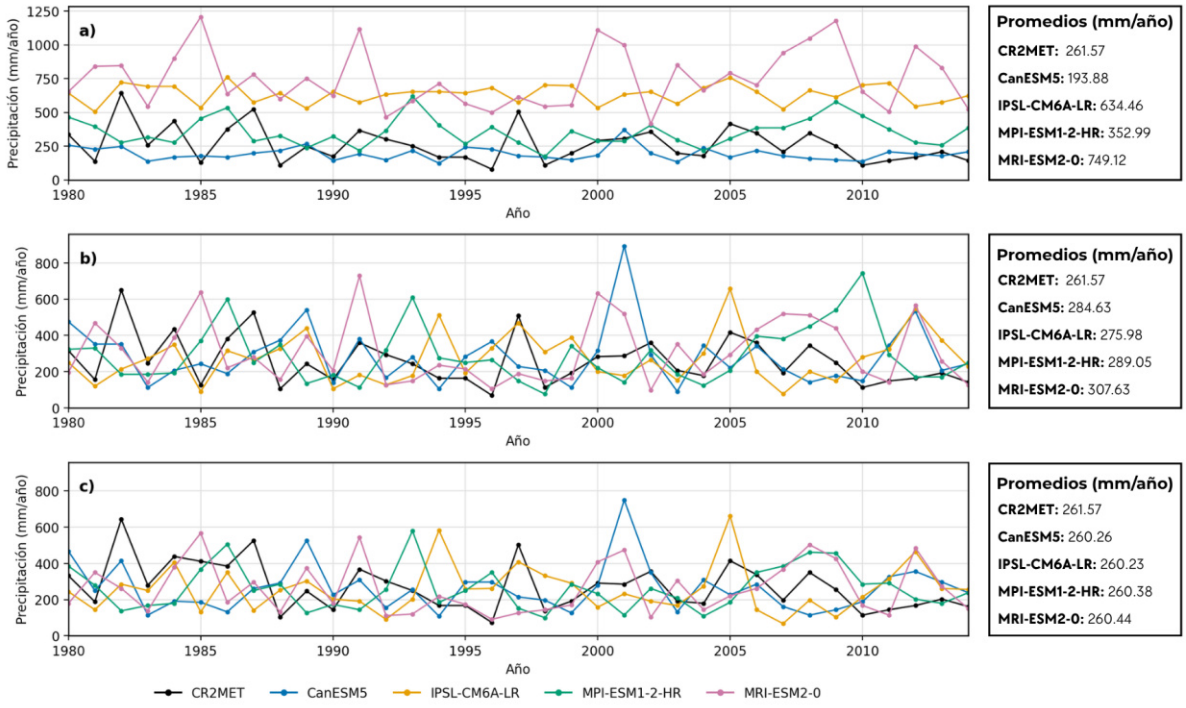

Figura 4-33: Comparación de la precipitación anual de CR2MET con los GCMs en la cuenca Aconcagua Alto durante 1980–2014: a) modelos originales; b) corregidos con QDM; y c) corregidos con MBCn. Cada panel incluye el promedio de la precipitación anual de CR2MET y de cada modelo.

Tabla 4-15: Métricas de desempeño (PBIAS, NRMSE, correlación de Pearson y Perkins Skill Score) de los modelos originales y corregidos de precipitación durante el periodo 1980–2014, cuenca Aconcagua Alto.

Modelo	PBIAS (%)			NRMSE (%)			Correlación de Pearson (-)			Perkins Skill Score (-)		
	Original	QDM	MBCn	Original	QDM	MBCn	Original	QDM	MBCn	Original	QDM	MBCn
CanESM5	-25.88	8.81	-1.31	52.70	69.10	58.90	0.12	0.07	0.16	0.51	0.94	0.96
IPSL-CM6A-LR	142.56	5.51	-0.50	135.40	61.90	59.80	0.15	0.12	0.12	0.56	0.91	0.95
MPI-ESM1-2-HR	34.95	10.51	-0.51	68.5	74.10	63.80	-0.11	-0.11	-0.08	0.80	0.96	0.94
MRI-ESM2-0	186.39	17.61	-0.45	184.30	73.00	63.00	0.17	0.14	0.13	0.59	0.91	0.96

Para conocer el desempeño puntual de los modelos, se analizan las métricas PBIAS y NRMSE, y se puede observar que el método QDM tiende a sobrestimar la precipitación, y MBCn a subestimar ligeramente. La magnitud de los errores es cercana entre modelos, destacándose CanESM5 y el IPSL-CM6A-LR.

Al analizar la Tabla 4-15, que presenta la correlación de Pearson, se observa que los modelos, en casos como IPSL-CM6A-LR y MRI-ESM2-0 tienen una disminución en su correlación una vez aplicadas las correcciones. Esto sucede tanto con QDM como con MBCn. El modelo que presenta la mayor correlación es CanESM5, con una correlación de 0,16, lo que muestra la baja representatividad respecto a la variabilidad interanual. Por otro lado, al igual que en la cuenca Maule Alto, el resultado de PSS muestra una mejora importante, aumentando desde un rango de 0,51 a 0,80 en los modelos originales a 0,91 a 0,97 tras ser corregidos, indicando una buena representación del rango de valores históricos observados.

Al observar los ciclos anuales (Figura 4-34), se puede ver en los modelos originales una estacionalidad muy similar a la cuenca Maule Alto. CR2MET registra un máximo de precipitación en julio, siendo JJA y septiembre los meses más lluviosos, pero no superando los 100 mm/mes. Al realizar las correcciones, se observa una mejora en las magnitudes de precipitación, donde QDM alcanza valores máximos alrededor de los 120 mm/mes, mientras que MBCn llega a los 160 mm/mes. A simple vista, el primer método de corrección es el que genera un mayor acuerdo entre modelos y similitud de comportamiento estacional respecto a CR2MET. A pesar de eso, se observa una sobrestimación sistemática en mayo y sobrestimaciones puntuales en agosto y septiembre. En el caso de MBCn, la mayoría de las precipitaciones máximas se encuentran en junio, desplazados 1 mes de lo registrado históricamente, pero en DEF y MAM, ambos métodos de corrección simulan correctamente los valores de precipitación.

La Tabla 4-16 muestra que todos los modelos sobrestiman la precipitación, donde MBCn entrega un PBIAS menor que QDM en todos los modelos, mientras que en NRMSE esto solo ocurre en un modelo (MPI-ESM1-2-HR). El que PBIAS y NRMSE muestren tendencias distintas no es una contradicción, puesto que el PBIAS se calcula considerando el signo de los errores, por lo cual estos pueden compensarse entre sí, mientras que el NRMSE, al trabajar con los cuadrados de los errores, no depende del signo de los errores. Considerando las dos métricas mencionadas, los modelos CanESM5 e IPSL-CM6A-LR corregidos con QDM presentan el mejor desempeño, con un PBIAS de 38,04% y 24,26% y NRMSE de 41,70% y 27,20% respectivamente. Se destaca, además, que IPSL-CM6A-LR es el único modelo original que presenta una correlación de Pearson negativa (-

0,52). Esto también se puede ver en la Figura 4-34 (a), donde presenta una estacionalidad inversa a la de los demás modelos y CR2MET, sin embargo, luego de ser corregido con QDM, alcanza una correlación de 0,95, la más alta entre los modelos.

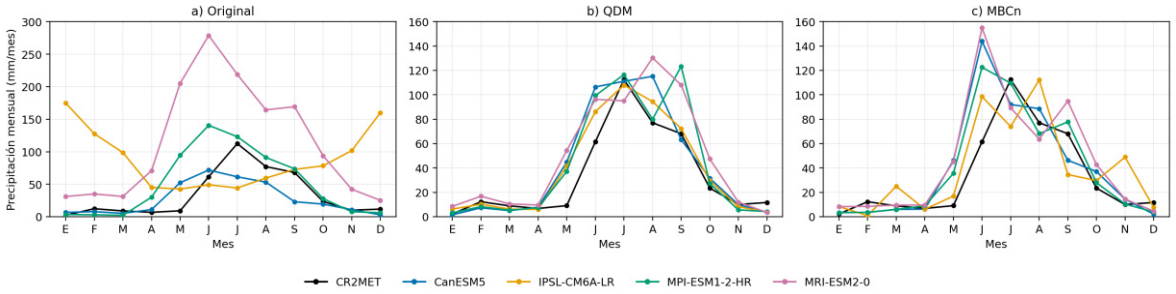

Figura 4-34: Ciclo anual histórico de precipitación de CR2MET y modelos CMIP6 para a) modelos originales, b) modelos corregidos mediante QDM y c) modelos corregidos mediante MBCn, Aconcagua Alto.

Tabla 4-16: Métricas de desempeño (MBE, NRMSE y correlación de Pearson) de los modelos originales y corregidos de precipitación para el ciclo anual histórico, cuenca Aconcagua Alto.

Modelo	PBIAS (%)			NRMSE (-)			Correlación de Pearson (-)		
	Original	QDM	MBCn	Original	QDM	MBCn	Original	QDM	MBCn
CanESM5	-31.88	38.04	32.50	51.10	41.70	58.50	0.73	0.91	0.78
IPSL-CM6A-LR	247.58	24.26	19.68	179.60	27.20	51.50	-0.52	0.95	0.76
MPI-ESM1-2-HR	74.70	41.42	26.84	71.60	43.80	41.00	0.78	0.92	0.89
MRI-ESM2-0	365.94	70.07	52.38	211.20	55.30	65.40	0.55	0.65	0.73

En la Figura 4-35 se presenta el diagrama de Taylor, y se puede ver que los modelos tienen un desempeño deficiente con una correlación que se encuentra entre 0,20 y 0,35, donde modelos como IPSL-CM6A-LR (MBCn) y MPI-ESM1-2-HR (QDM) tienen las menores correlaciones, mientras que CanESM5 (QDM y MBCn) y MRI-ESM2-0 (QDM) se encuentra cercanos a una correlación de 0,35. El RMSD se encuentra en un rango entre 75 y 85 mm/mes en la mayoría de los modelos, exceptuando MPI-ESM1-2-HR corregido con QDM, que tiene un RMSD de aproximadamente 95 mm/mes. En lo que respecta a la desviación estándar, los modelos corregidos con MBCn están más cerca del observado, teniendo una dispersión aproximada de 65 mm/mes. En este análisis, CanESM5 corregido con MBCn se destaca por tener el mejor desempeño, ya que, como se mencionó antes, presenta la mayor correlación (0,35), menor RMSD (78 mm/mes) y desviación estándar de 66,5 mm/mes.

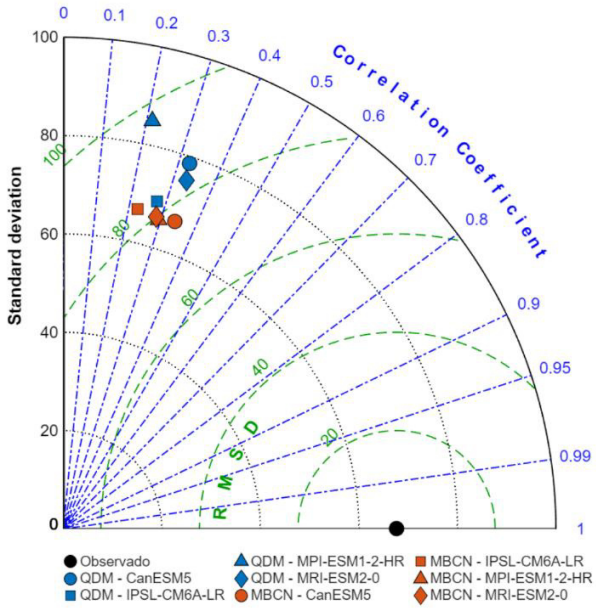

Figura 4-35: Diagrama de Taylor de precipitación mensual, cuenca Aconcagua Alto.

Proyecciones de cambio climático

Las series proyectadas (Figura 4-36) no muestran una tendencia clara por parte de los modelos, al igual que en la cuenca Maule Alto. En su mayoría, las precipitaciones fluctúan entre los 100 y 400 mm/año observándose eventos máximos que no son replicados por los demás modelos, mostrando un desacuerdo en sus proyecciones. En el caso de QDM, la precipitación proyectada alcanza los 800 mm/año, mientras que corrigiendo con MBCn, 700 mm/año.

Observando la señal de cambio climático, los modelos corregidos con QDM proyectan una mayor disminución de precipitación comparado con MBCn. En este caso se observa una tendencia de los modelos, siendo el futuro lejano el más afectado a la reducción de precipitación, pero no hay un acuerdo en la magnitud de esta variación, a excepción de MRI-ESM2-0, que tiene un comportamiento opuesto a los demás modelos, con una mayor disminución en el futuro cercano que en el lejano. Esto se observa tanto al ser corregido con QDM (-30,71% en el futuro cercano y -23,09% en el futuro lejano) como con MBCn (-16,93% en el futuro cercano y -12,77% en el futuro lejano).

Los modelos IPSL-CM6A-LR y MPI-ESM1-2-HR tienen mayor cercanía a nivel general, donde, mediante QDM se proyecta una disminución aproximada del 15% durante el futuro cercano, y entre 21,26% y 33,40% para el lejano, mientras que CanESM5 proyecta una reducción del 53,60% (QDM) y 42,81% (MBCn). Al igual que en Maule Alto, CanESM5 es el modelo más pesimista hacia final de siglo, y las magnitudes de disminución de precipitación se encuentran dentro de lo ya observado en estudios previos realizados en Chile Central, como se comentó en el análisis de Maule.

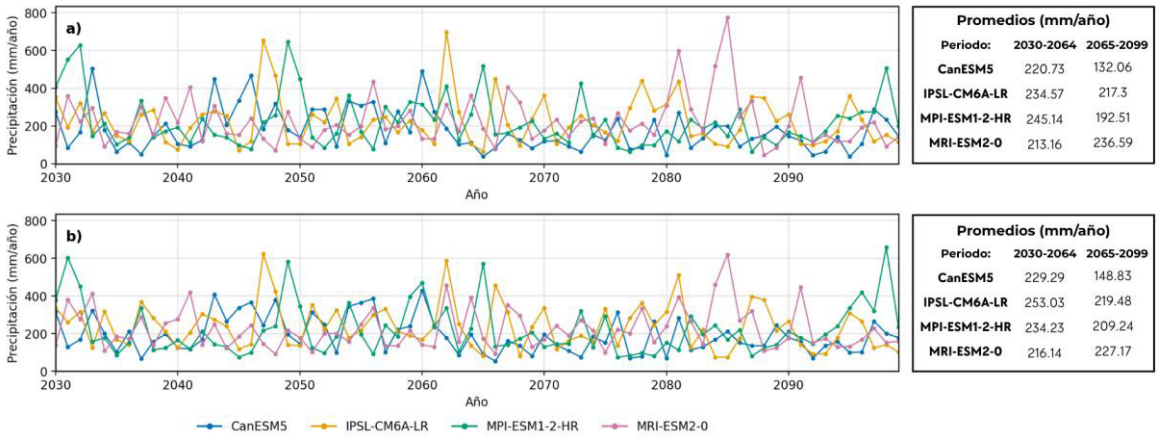

Figura 4-36: Series de precipitación anual proyectadas para el periodo 2030–2099 en la cuenca Aconcagua Alto: a) mediante QDM; y b) mediante MBCn. Cada panel incluye el promedio de precipitación anual de cada modelo para 2030–2064 y 2065–2099.

Tabla 4-17: Señal de cambio para el futuro cercano y lejano respecto del periodo histórico, cuenca Aconcagua Alto.

Modelo	QDM (%)		MBCn (%)	
	2030–2064	2065–2099	2030–2064	2065–2099
CanESM5	-22.45	-53.60	-11.90	-42.81
IPSL-CM6A-LR	-15.00	-21.26	-2.77	-15.66
MPI-ESM1-2-HR	-15.19	-33.40	-10.04	-19.64
MRI-ESM2-0	-30.71	-23.09	-16.93	-12.77

La cuenca Aconcagua presenta altos coeficientes de variación históricos (Tabla 4-18), superando 0,50 en casi todos los casos. Esta métrica nuevamente se encuentra en la situación de desacuerdo entre modelos respecto a si la variabilidad interanual de la precipitación va a aumentar o disminuir. En lo que concuerdan los modelos en su mayoría es que la variabilidad va a aumentar en el futuro cercano, donde todos los modelos, excepto MRI-ESM2-0 aumentan su coeficiente de variación con respecto al periodo histórico al ser corregidos con QDM. De la Tabla 4-19 se ve que el modelo que presenta mayor aumento es IPSL-CM6A-LR, pasando de 0,51 a 0,66, mientras que, como se mencionó anteriormente, MRI-ESM2-0 presenta un coeficiente de 0,59 en el periodo histórico que disminuye a 0,51 en el futuro cercano.

En el caso de MBCn, no hay un acuerdo entre los modelos, ya que tanto IPSL-CM6A-LR como MPI-ESM1-2-HR proyectan un aumento en el coeficiente de variación entre el periodo histórico y el futuro cercano, pasando de 0,51 a 0,52 y de 0,46 a 0,64 respectivamente, mientras que para CanESM5 y MRI-ESM2-0 disminuye de 0,51 a 0,48 y de 0,56 a 0,52 respectivamente.

En el futuro lejano hay una mayor dispersión en los resultados, sin embargo, en la mayoría de los casos se mantiene la tendencia de cada modelo con ambos métodos de corrección, con excepción de MRI-ESM2-0, que aumenta su coeficiente de variación de 0,59 a 0,71 siendo corregido con QDM, pero disminuye de 0,56 a 0,55 con MBCn. Considerando todos los modelos, estos presentan rangos de coeficiente de variación entre 0,54 y

0,71 para QDM y 0,47 y 0,67, lo permite concluir que, mientras más lejana sea la ventana temporal considerada, más se dificulta obtener acuerdos y tendencias entre modelos.

Tabla 4-18: Coeficiente de variación de precipitación anual para el periodo histórico, futuro cercano y futuro lejano, Aconcagua Alto.

Modelo	QDM (-)			MBCn (-)		
	1980-2014	2030–2064	2065–2099	1980-2014	2030–2064	2065–2099
CanESM5	0.57	0.62	0.54	0.51	0.48	0.47
IPSL-CM6A-LR	0.51	0.66	0.54	0.51	0.52	0.56
MPI-ESM1-2-HR	0.54	0.65	0.61	0.46	0.64	0.67
MRI-ESM2-0	0.59	0.51	0.71	0.56	0.52	0.55

Respecto a la estacionalidad, el método MBCn consigue una mayor homogeneidad entre las proyecciones del periodo futuro cercano (Figura 4-37e), mientras que, en las otras figuras, el mayor acuerdo se encuentra principalmente en DEF y MAM, donde el cambio de precipitación es gráficamente casi imperceptible. Esto se genera porque en esos meses la precipitación es cercana a cero, y ya que se proyecta una disminución de precipitación, estas estaciones no se ven mayormente afectadas. En JJA se pueden ver mayores diferencias entre los modelos, y son respaldadas mediante la Tabla C- 7, donde CanESM5 proyecta la mayor disminución haca el futuro lejano, pasando de 73,81 a 47,17 mm/mes con QDM y de 82,84 a 50,31 mm/mes con MBCn. Por otro lado, MRI-ESM2-0 es el único modelo que aumenta su precipitación en JJA, de 75,39 a 91,10 mm/mes siendo corregido con QDM y de 75,12 a 84,91 mm/mes con MBCn. A pesar de este comportamiento individual de los modelos, la media para JJA considerando todos los modelos muestra una disminución hacia el futuro lejano, pasando de 80,68 a 71,77 mm/mes con QDM y de 81,45 a 73,38 mm/mes con MBCn (Tabla 4-19). Por otro lado, considerando las diferencias mencionadas, se observa consistencia entre los modelos a lo largo del ciclo anual. Esta observación se justifica utilizando el coeficiente de correlación de Spearman, que para el futuro cercano corresponde a 0, 958 y para el futuro lejano a 0,986, considerando un nivel de significancia α de 0,05.

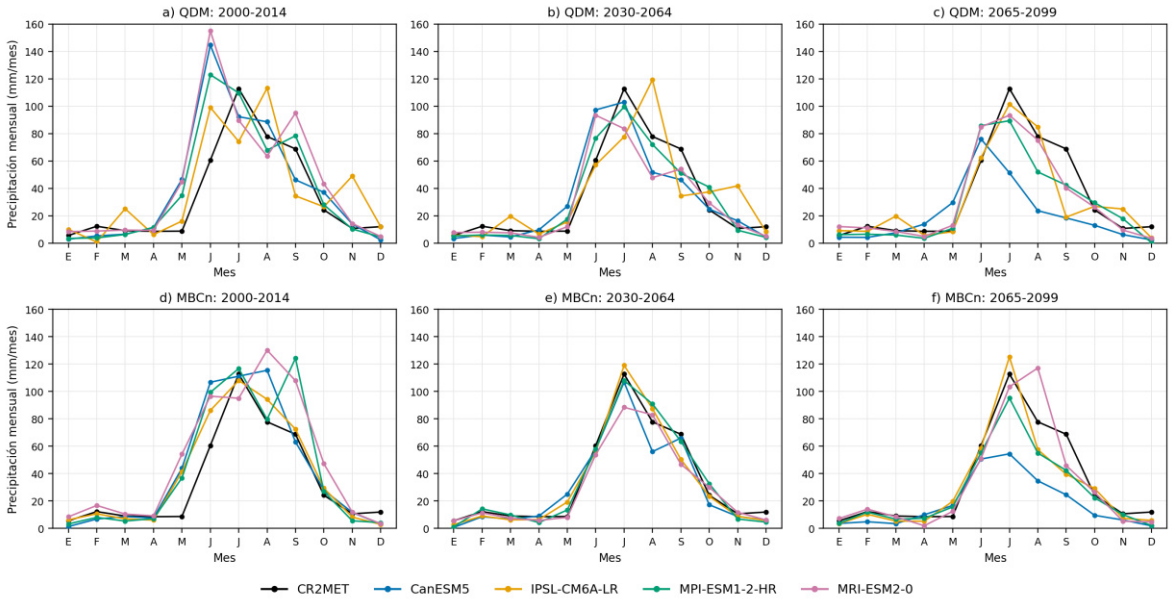

Figura 4-37: Ciclos anuales de precipitación históricos y proyectados mediante QDM y MBCn para los periodos 2000–2014, 2030–2064 y 2065–2099, Aconcagua Alto.

Tabla 4-19: Media y desviación estándar entre modelos de la precipitación mensual proyectada por estación, para el futuro cercano y lejano, Aconcagua Alto.

Estación	Media (mm/mes)				Desviación Estándar (mm/mes)			
	QDM (2030-2064)	QDM (2065-2099)	MBCn (2030-2064)	MBCn (2065-2099)	QDM (2030-2064)	QDM (2065-2099)	MBCn (2030-2064)	MBCn (2065-2099)
DJF	7.00	6.11	5.91	6.11	2.26	2.13	1.03	2.06
JJA	80.68	71.77	81.45	73.38	31.66	18.82	4.38	15.93
MAM	10.04	9.00	10.12	10.63	10.89	1.38	2.51	4.15
SON	30.20	22.13	33.17	22.70	15.55	6.07	3.74	7.13

La Tabla 4-19, además, presenta la desviación estándar entre los 4 modelos. Bajo la corrección QDM, la dispersión entre modelos disminuye del futuro cercano al futuro lejano en todas las estaciones, destacándose JJA, ya que baja de 31,66 mm/mes a 18,82 mm/mes. Lo contrario sucede con la corrección MBCn, donde se observa que la dispersión aumenta en las 4 estaciones, y nuevamente se destaca JJA, cuya desviación estándar pasa de 4,38 mm/mes en el futuro cercano a 15,93 mm/mes en el futuro lejano. De estos resultados se puede concluir que el mes que presenta mayor desacuerdo entre modelos corresponde a JJA, que además corresponde al mes más lluvioso, mientras que en los meses de baja precipitación no se ven afectados de la misma forma a los cambios proyectados, estando por debajo de los 3 mm/mes de variación entre el futuro cercano y lejano.

4.3.3 Cuenca Río Yeso

Periodo histórico

Las series anuales de precipitación de los modelos originales (Figura 4-38a) presentan comportamientos similares a las cuencas anteriormente analizadas, principalmente en lo que respecta a la sobrestimación de magnitudes y patrones de variabilidad temporal. CanESM5 tiene un promedio de 222,73 mm/año, IPSL-CM6A-LR y MRI-ESM2-0 superan los 620 mm/año, MPI-ESM1-2-HR promedia 392 mm/año y CR2MET registró una precipitación de 455,85 mm/año.

Luego de corregir los modelos, CanESM5 presenta un máximo en el año 2001, comportamiento que se repite tanto en Maule como Aconcagua Alto. En este caso, con la corrección QDM, el modelo mencionado presenta un peak que llega a los 1500 mm/año, mientras que con MBCn alcanza los 1200 mm/año, pero su promedio en el periodo histórico corresponde a 484,17 mm/año (QDM) y 453,55 mm/año (MBCn). El método MBCn es el que logró promedios anuales más homogéneos entre los modelos, los cuales presentan un rango de precipitación entre 453,41 y 453,59 mm/año (Figura 4-38c) mientras que QDM (Figura 4-38b) entrega un rango entre 461,88 y 522,83 mm/año.

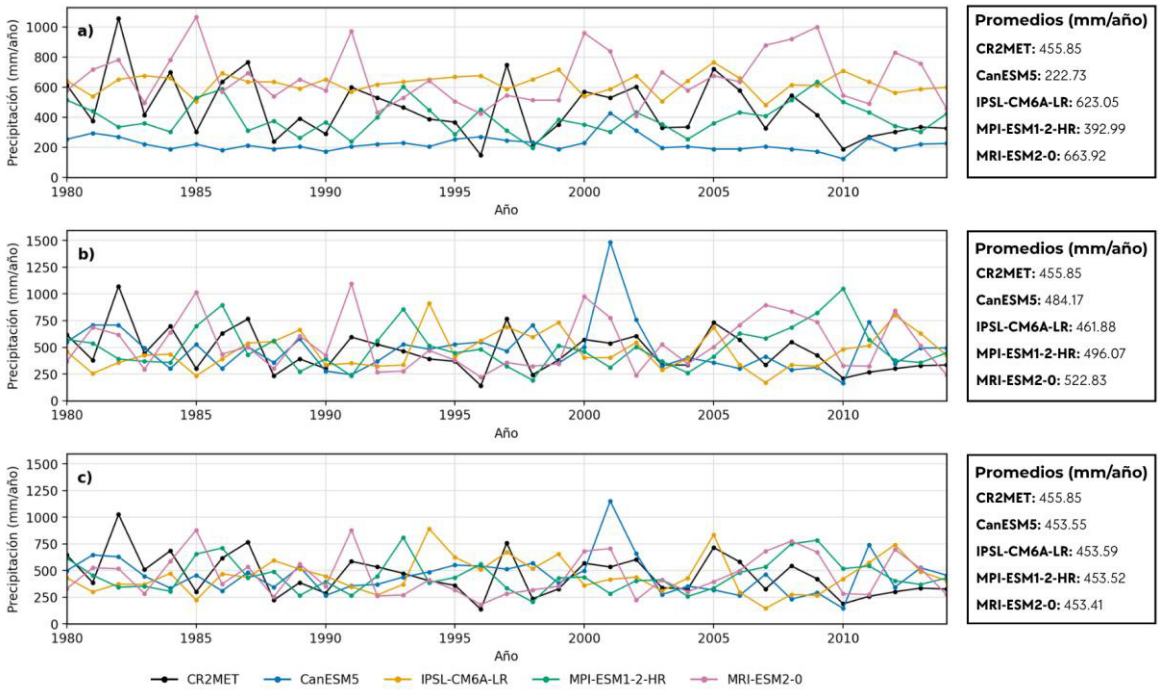

Figura 4-38: Comparación de la precipitación anual de CR2MET con los GCMs en la cuenca Yeso durante 1980–2014: a) modelos originales; b) corregidos con QDM; y c) corregidos con MBCn. Cada panel incluye el promedio de la precipitación anual de CR2MET y de cada modelo.

Tabla 4-20: Métricas de desempeño (PBIAS, NRMSE, correlación de Pearson y Perkins Skill Score) de los modelos originales y corregidos de precipitación durante el periodo 1980–2014, cuenca Yeso.

Modelo	PBIAS (%)			NRMSE (%)			Correlación de Pearson (-)			Perkins Skill Score (-)		
	Original	QDM	MBCn	Original	QDM	MBCn	Original	QDM	MBCn	Original	QDM	MBCn
CanESM5	-51.14	6.21	-0.50	61.60	58.30	51.40	0.17	0.10	0.09	0.58	0.94	0.94
IPSL-CM6A-LR	36.68	1.32	-0.50	52.70	54.50	52.90	0.14	-0.05	-0.02	0.59	0.90	0.92
MPI-ESM1-2-HR	-13.79	8.82	-0.51	48.60	59.60	53.20	-0.07	-0.11	-0.11	0.83	0.93	0.93
MRI-ESM2-0	45.64	14.69	-0.54	64.30	59.90	50.70	0.20	0.19	0.19	0.66	0.91	0.95

Las métricas de la Tabla 4-20 muestran que MPI-ESM1-2-HR es el modelo que presenta mejor desempeño de los modelos brutos, con un PBIAS de -13,79%, NRMSE de 48,60%. También se puede observar que el método de corrección que genera mejores resultados es MBCn, tanto por su PBIAS como por el NRMSE en todos los modelos. Específicamente, los resultados de PBIAS de MBCn se encuentran en un rango más acotado, entre -0,50% y -0,54%, mientras que los de QDM 1,32% y 14,69%. En el caso del NRMSE, los valores entre ambos métodos se encuentran más cercanos: entre 50,70% y 53,2% corrigiendo con MBCn, y entre 54,50% y 59,90% con QDM. Pese a esto, al comparar con el modelo original, el NRMSE de IPSL-CM6A-LR y MPI-ESM1-2-HR empeoran, siendo este último modelo el más afectado, aumentando el error de 48,60% a 59,60% con QDM y 53,20% con MBCn

Por otro lado, la correlación de Pearson (Tabla 4-20) entrega resultados muy deficientes, incluso con valores menores a cero en IPSL-CM6A-LR (-0,05 corregido con QDM y -0,02 con MBCn) y MPI-ESM1-2-HR (-0,11 corregido con ambos métodos), lo que se interpreta como un comportamiento interanual de los modelos que tiene a oponerse a lo descrito por CR2MET. El modelo con mejor correlación es MRI-ESM2-0, con un valor de 0,19 siendo corregido con ambos métodos. Mientras tanto, los valores de PSS de los modelos corregidos superan 0,90, siendo CanESM5 el que se destaca con un valor de 0,94 con ambos métodos de corrección, y MRI-ESM2-0, que presenta un PSS de 0,95 siendo corregido con MBCn. Estos resultados muestran una buena representación en el rango de valores de precipitación y su frecuencia a lo largo del periodo histórico.

Con respecto a los ciclos anuales, la Figura 4-39 muestra que el comportamiento estacional de los modelos originales es similar entre ellos, variando principalmente en la magnitud de la precipitación simulada. El modelo IPSL-CM6A-LR es la excepción a este comportamiento, ya que se destaca por tener una estacionalidad contraria a CR2MET y a los demás modelos, siendo DEF la estación con mayor precipitación, llegando cerca de los 170 mm/mes, mientras que en JJA se encuentra cerca de los 60 mm/mes. Esto también se aprecia en la Tabla 4-21, específicamente en la correlación de Pearson con un valor de -0,54, lo que representa una correlación negativa con respecto a CR2MET. Los demás modelos originales se encuentran en un rango entre 0,78 y 0,82, siendo MPI-ESM1-2-HR el que presenta mejor correlación.

Luego de realizar las correcciones, se ve que MBCn genera el mayor acuerdo entre modelos y con magnitudes más cercanas a las observadas en la curva de CR2MET, sin embargo, la estacionalidad en invierno y primavera difiere mucho entre modelos. Las métricas de la Tabla 4-21 destacan el comportamiento de IPSL-CM6A-LR

corregido con QDM, ya que, a pesar de que existe sobrestimación, presenta un PBIAS de 7,72% y NRMSE de 29,80%, alcanzando el mejor desempeño de los 4 modelos.

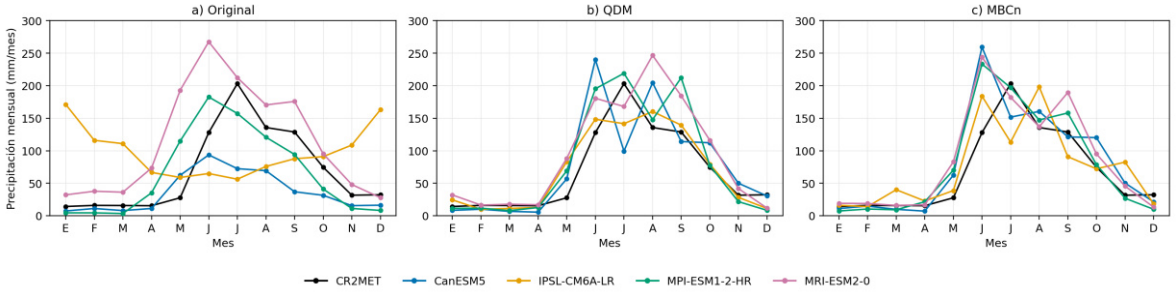

Figura 4-39: Ciclo anual histórico de precipitación de CR2MET y modelos CMIP6 para a) modelos originales, b) modelos corregidos mediante QDM y c) modelos corregidos mediante MBCn, cuenca Yeso.

Tabla 4-21: Métricas de desempeño (MBE, NRMSE y correlación de Pearson) de los modelos originales y corregidos de precipitación para el ciclo anual histórico, cuenca Yeso

Modelo	PBIAS (%)			NRMSE (%)			Correlación de Pearson (-)		
	Original	QDM	MBCn	Original	QDM	MBCn	Original	QDM	MBCn
CanESM5	-85.60	28.07	37.72	58.90	56.70	50.20	0.78	0.74	0.82
IPSL-CM6A-LR	77.51	7.72	13.36	100.60	29.80	45.70	-0.54	0.90	0.77
MPI-ESM1-2-HR	-9.48	39.73	28.88	41.50	37.70	37.80	0.82	0.95	0.91
MRI-ESM2-0	120.85	66.89	52.70	74.60	51.00	47.00	0.78	0.87	0.88

Como ya se ha mencionado anteriormente, el diagrama de Taylor muestra el comportamiento mensual del periodo histórico completo, que corresponde a 420 meses. En la Figura 4-40 se puede ver que la correlación entre los modelos y el observado se encuentra entre 0,20 y 0,45, siendo los modelos CanESM5 y MRI-ESM2-0 corregidos con ambos métodos los que tiene la correlación más alta. El RMSD de todos los modelos se encuentra entre 100 y 150 mm/mes, y los modelos corregidos con MBCn son los que se acercan más a la desviación estándar de CR2MET, con valores de alrededor de 105 mm/mes. Se puede ver, además, que el único modelo corregido con QDM que se acerca a los modelos con MBCn corresponde a IPSL-CM6A-LR, el cual además presenta una correlación de 0,3. Estos resultados demuestran una gran incertidumbre en el comportamiento de los modelos, ya que no se observa acuerdo entre ellos ni buenos resultados comparados con CR2MET.

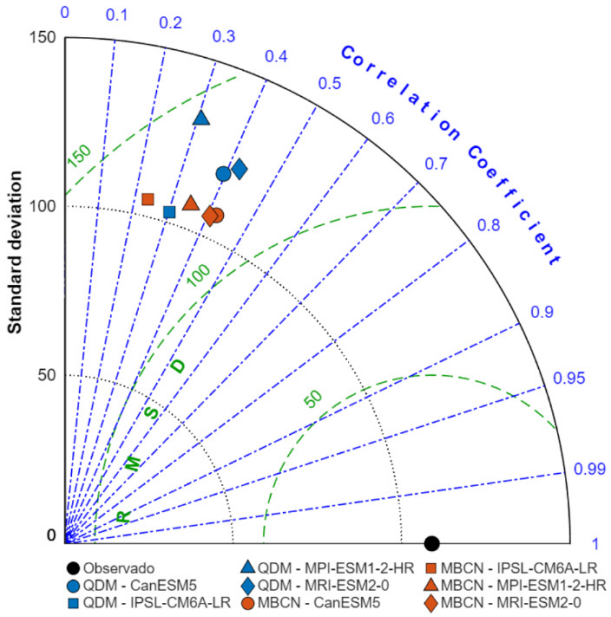

Figura 4-40: Diagrama de Taylor de precipitación mensual, cuenca Yeso.

Proyecciones de cambio climático

Las series proyectadas a continuación en la Figura 4-41 presentan un rango de variación entre 100 y 900 mm/año, tanto para corrección QDM como para MBCn. Se puede observar un comportamiento variable y que no se replica entre modelos, además de máximos de precipitación en distintos años del periodo futuro. El modelo IPSL-CM6A-LR tiene una mayor presencia de eventos máximos, superando los 600 mm/año en al menos 4 años diferentes, principalmente siendo corregido con QDM. Dependiendo del método de corrección usado, se pueden ver diferencias entre aproximadamente 400 y 700 mm/año entre años consecutivos, como sucede con IPSL-CM6A-LR como se aprecia en la Figura 4-41 (a). A modo de ejemplo, entre los años 2060 y 2070, se puede ver una fluctuación de la precipitación, que en un año lluvioso alcanza los 900 mm/año, mientras que el año que sigue es un año seco que proyecta alrededor de 200 mm/año.

Analizando la señal de cambio climático, se conserva la tendencia de disminución de precipitación. En la Tabla 4-22, CanESM5 se presenta como el modelo más afectado. En el periodo futuro cercano corregido con QDM, proyecta una disminución de -32,22% y de -55,80% en el futuro lejano, mientras que con MBCn se entregan valores de SCC de -17,05% y -53,09% para futuro cercano y lejano respectivamente. Por otro lado, IPSL-CM6A-LR es el modelo menos afectado, con una SCC máxima de -13,34%, ocurrida en el futuro lejano al ser corregido con MBCn. Los modelos poseen un acuerdo de signo, pero no de magnitud, como se puede apreciar en periodo futuro lejano con corrección MBCn, donde la señal de cambio se encuentra en un rango entre -11% (MRI-ESM2-0) y -53% (CanESM5), por lo tanto, definir un porcentaje de disminución general de precipitación se dificulta. Al comparar con las cuencas analizadas anteriormente, se observa que nuevamente CanESM5 corresponde al modelo más pesimista, ya que en los tres casos la SCC supera los -50%, a excepción de Aconcagua Alto bajo corrección MBCn, que presenta un valor de -42,81%.

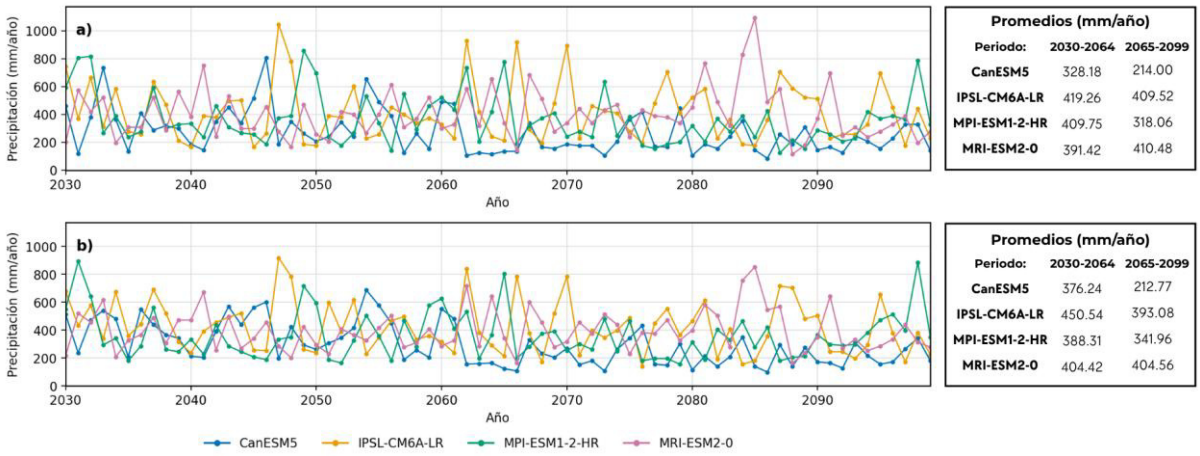

Figura 4-41: Series de precipitación anual proyectadas para el periodo 2030–2099 en la cuenca Yeso: a) mediante QDM; y b) mediante MBCn. Cada panel incluye el promedio de precipitación anual de cada modelo para 2030–2064 y 2065–2099.

Tabla 4-22: Señal de cambio para el futuro cercano y lejano respecto del periodo histórico, Yeso.

Modelo	QDM (%)		MBCn (%)	
	2030–2064	2065–2099	2030–2064	2065–2099
CanESM5	-32.22	-55.80	-17.05	-53.09
IPSL-CM6A-LR	-9.23	-11.34	-0.67	-13.34
MPI-ESM1-2-HR	-17.40	-35.88	-14.38	-24.60
MRI-ESM2-0	-25.13	-21.49	-14.11	-10.77

En lo que respecta al coeficiente de variación de la Tabla 4-23, el comportamiento discrepante entre modelos y métodos de corrección se sostiene. Sin embargo, haciendo un análisis global, la mayoría de los modelos proyectan un aumento en el coeficiente de variación en el periodo futuro cercano, con valores entre 0,37 y 0,55, considerando todos los resultados de QDM y MBCn, siendo MRI-ESM2-0 la excepción. Este modelo disminuye tanto con la corrección QDM (de 0,49 a 0,40) como con MBCn (de 0,44 a 0,37), y este comportamiento ya se observó previamente, en Aconcagua Alto. Considerando todos los modelos y métodos de corrección, el coeficiente de variación para el futuro lejano se encuentra en un rango entre 0,41 y 0,51. A modo de comparación, el periodo histórico presenta coeficientes de variación que van desde 0,34 (MPI-ESM1-2-HR con MBCn) a 0,49 (MRI-ESM2-0 con MBCn).

Tabla 4-23: Coeficiente de variación de precipitación anual para periodo histórico, futuro cercano y futuro lejano, Yeso.

Modelo	QDM (-)			MBCn (-)		
	1980-2014	2030–2064	2065–2099	1980-2014	2030–2064	2065–2099
CanESM5	0.48	0.55	0.45	0.40	0.42	0.41
IPSL-CM6A-LR	0.38	0.53	0.50	0.37	0.42	0.48
MPI-ESM1-2-HR	0.40	0.48	0.49	0.34	0.48	0.48
MRI-ESM2-0	0.49	0.40	0.51	0.44	0.37	0.40

En relación con los ciclos anuales (Figura 4-42), el comportamiento de los modelos en el periodo histórico no genera una buena representación estacional, situación que fue advertida en las cuencas analizadas previamente. Esta situación es relevante en las estaciones JJA y SON, donde se observan máximos anuales y patrones estacionales que no representan lo entregado por CR2MET. A diferencia de lo observado en Maule Alto, en Yeso no se aprecia un desacuerdo entre métodos de corrección en JJA, ya que tanto QDM como MBCn coinciden en una disminución de la precipitación. El desacuerdo entre los métodos se observa principalmente en MAM y DEF, como se detalla en la SCC de la Tabla C- 12. En el caso de MAM, CanESM5 presenta para el futuro lejano una disminución de 36,93% siendo corregido con QDM y un aumento de 10,01% con MBCn, mientras que, en esa misma estación, IPSL-CM6A-LR muestra un comportamiento similar para el futuro cercano (-29,05% QDM y 4,49% MBCn). En lo que respecta a DEF, MPI-ESM1-2-HR muestra que, en el periodo futuro cercano, la corrección QDM genera una SCC de 18,09%, mientras que MBCn da un valor de -27,37%. A pesar de estos comportamientos puntuales, se ve que la forma de los ciclos de ambos métodos de corrección representa correctamente la estacionalidad. Para verificar esto, se calcula el coeficiente de correlación de Spearman, con el objetivo de evaluar la consistencia entre los resultados de QDM y MBCn, resultando un ρ de 0,976 para el periodo futuro cercano y un ρ de 0,982 en el futuro cercano, considerando un nivel de significancia α de 0,05.

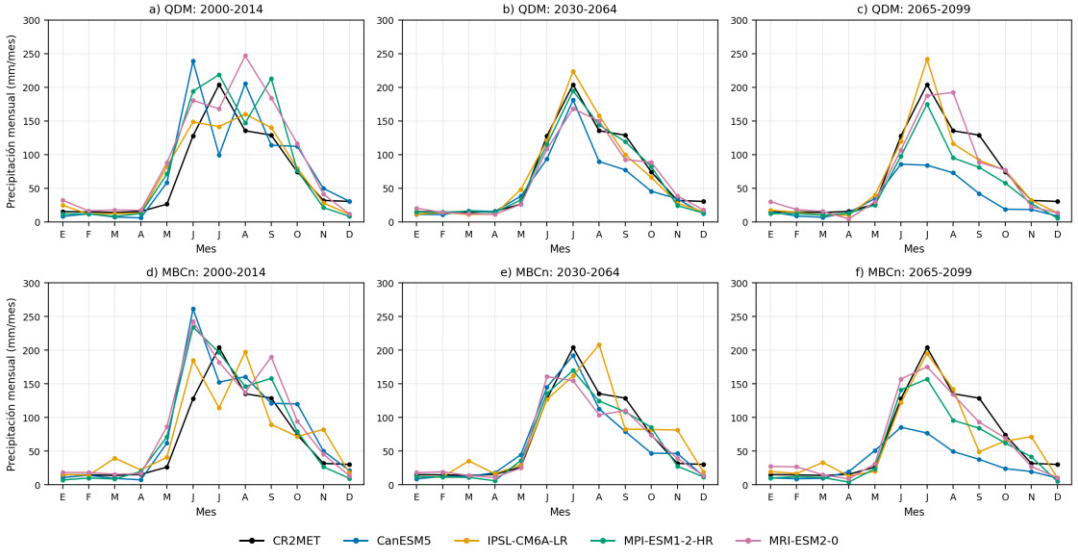

Figura 4-42: Ciclos anuales de precipitación históricos y proyectados mediante QDM y MBCn para los periodos 2000–2014, 2030–2064 y 2065–2099, Yeso.

Tabla 4-24: Media y desviación estándar entre modelos de la precipitación mensual proyectada por estación, para el futuro cercano y lejano, Yeso.

Estación	Media (mm/mes)				Desviación Estándar (mm/mes)			
	QDM (2030-2064)	QDM (2065-2099)	MBCn (2030-2064)	MBCn (2065-2099)	QDM (2030-2064)	QDM (2065-2099)	MBCn (2030-2064)	MBCn (2065-2099)
DJF	14.85	14.37	13.63	14.29	2.60	4.94	2.49	5.59
JJA	145.81	131.79	150.16	128.36	18.83	38.4	11.43	39.77
MAM	20.17	17.06	20.89	19.86	3.23	2.36	4.42	5.7
SON	67.01	53.15	72.28	54.16	10.44	17.86	9.78	17.61

Al analizar la Tabla 4-24, la cual agrupa el comportamiento de todos los modelos por estación, se puede apreciar que JJA concentra la mayor parte de la precipitación, con un promedio de 145 mm/año con QDM y 150 mm/año con MBCn en el futuro cercano, y en el futuro lejano 131 mm/mes y 128 mm/mes corrigiendo con QDM y MBCn respectivamente. Este último método de corrección muestra la mayor disminución de precipitación en JJA, mientras que en DEF los resultados se mantienen relativamente constantes, con un promedio de alrededor de 14 mm/mes con ambos métodos de corrección, y en el periodo futuro completo. Al observar los resultados de desviación estándar, JJA se presenta como la estación con mayor dispersión entre los modelos, donde, en el futuro cercano, QDM entrega un valor de 18,83 mm/mes, mientras que MBCn de 11,43 mm/mes. En el futuro lejano, en cambio, los valores aumentan a 38,40 y 39,77 mm/mes, siendo corregido con QDM y MBCn respectivamente. Esto muestra que, hacia finales de sigo existe un mayor desacuerdo entre los modelos, lo que dificulta la interpretación de las proyecciones. Las demás estaciones se mantienen en rangos más cercanos de desviación estándar, donde SON se destaca por sus valores más altos en comparación a DEF y MAM. Esta estación presenta en el futuro cercano una desviación estándar de 10,44 y 9,78 mm/mes con QDM y MBCn respectivamente, y en el futuro lejano este valor aumenta a 17,86 y 17,61 mm/mes bajo la corrección QDM y MBCn respectivamente.

5 Conclusiones

Este estudio tuvo como finalidad evaluar el desempeño histórico y proyecciones futuras de modelos CMIP6 en tres cuencas andinas de Chile Central: Maule Alto, Aconcagua Alto y Yeso, considerando temperatura media y precipitación. En primer lugar, se observó que la corrección de la temperatura de CR2MET fue necesaria para contar con una base de datos más representativa, ya que existían diferencias entre los pixeles y las estaciones meteorológicas. Estos errores alcanzaban valores cercanos a ± 1,5°C, con sectores donde CR2MET sobrestimaba la temperatura, y otros donde subestimaba. Luego de aplicar la corrección altitudinal, los sesgos disminuyeron y la mediana de los errores se acercó a cero, demostrando que las diferencias de cota entre pixeles y estaciones pueden introducir errores considerables en las cuencas de estudio.

En relación con la temperatura media, los resultados históricos muestran que los modelos originales presentan sesgos relevantes, destacando CanESM5 por su alta sobrestimación en las tres cuencas. La aplicación de Quantile Delta Mapping y Multivariate Bias Correction mejora el desempeño de los modelos, reduciendo los errores, mejorando la dispersión de datos y la frecuencia de estos mismos. MBCn se destaca por su desempeño levemente mejor en las series anuales, mientras que QDM obtiene mejores resultados en los ciclos anuales, mejorando la estacionalidad. A pesar de esto, los resultados de las correlaciones de Pearson demuestran que, aunque los modelos hayan sido corregidos, no mejora de manera considerable la variabilidad interanual, lo que implica que los modelos no reproducen de manera eficiente la variación año a año. Por otro lado, los resultados de los ciclos anuales y de los diagramas de Taylor muestran que los modelos tienen un mejor desempeño cuando los análisis se hacen a nivel mensual, ya que la estacionalidad tiene más relevancia, y los modelos sí la replican bien. Al comparar el comportamiento estacional de los modelos con los dos métodos de corrección usados, se observó que los resultados no presentaban grandes diferencias, lo que fue demostrado mediante el coeficiente de correlación de Spearman, el cual entregó valores superiores a 0,95 en todos los casos, tanto en temperatura como en precipitación.

Las proyecciones de temperatura muestran una señal de calentamiento en las cuencas estudiadas bajo el escenario SSP5-8.5. Este aumento se incrementa hacia el periodo futuro lejano, donde la variación de temperatura en Maule Alto se encuentra entre 3,04 y 5,63°C, en Aconcagua Alto el aumento está entre 3,21 y 5,92°C, y en Yeso estos valores fluctúan entre 3,23 y 5,56°C. Estos resultados se encuentran dentro de lo proyectado por estudios previos dentro de Chile Central, que además destacan el gran impacto que se producirá en la cordillera de los Andes, posicionándola como una de las zonas con mayor calentamiento. Esto resulta relevante, puesto que las cuencas estudiadas acumulan nieve y glaciares que se verán fuertemente afectados por el aumento de temperatura, y, en consecuencia, también la disponibilidad hídrica de las ciudades que dependen de ellas.

En el caso de la precipitación se observaron mayores dificultades en la representación de magnitud y variabilidad interanual que en la temperatura. Los modelos originales presentan diferencias respecto a CR2MET, y pese a que QDM y MBCn mejoraron los resultados, principalmente en magnitud y distribución, los coeficientes de correlación de Pearson son bajos, lo que indica que los modelos no replican de manera

confiable los años lluviosos y secos observados. MBCn se destaca por ajustar de mejor manera los promedios anuales, mientras que QDM presenta mejores resultados en algunos ciclos anuales, sin embargo, luego de la corrección persisten las diferencias en los meses lluviosos, que corresponden a JJA.

Por último, las proyecciones de precipitación muestran una disminución en las tres cuencas, siendo el futuro lejano el periodo más afectado. En Maule Alto CanESM5 proyecta más de un 50% menos de precipitación respecto del periodo histórico, mientras que en Aconcagua Alto esas disminuciones se encuentran en un rango entre 20 y 54%, dependiendo del modelo y del método de corrección utilizado, donde MBCn tiende a proyectar resultados más optimistas. La cuenca río Yeso, por otro lado, presenta un mayor desacuerdo entre modelos, con reducciones de precipitación que se encuentran entre 11 y 55% hacia finales de siglo. Cabe destacar también que CanESM5 se posiciona como el modelo que proyecta mayor calentamiento, como se mencionó anteriormente, y también una mayor disminución de precipitación en las tres cuencas, lo que ya había sido observado en otras investigaciones (Salazar et al., 2024).

Los resultados obtenidos son coherentes con estudios previos realizados en Chile Central, los cuales también proyectan un futuro más seco (Gateño et al., 2024; Salazar et al., 2024; Vásquez et al., 2025). Sumado a lo anterior, el coeficiente de variación presenta una tendencia de aumento, especialmente en el futuro cercano, además de un menor acuerdo en las magnitudes entre los propios modelos hacia el futuro lejano. Considerando todo esto, los resultados proyectan un futuro más cálido y menos lluvioso para las cuencas de estudio, además con precipitaciones más variables a nivel interanual, lo que respalda la necesidad de realizar estudios detallados, que profundicen en las fuentes de incertidumbre entre modelos, incorporando modelos ya validados en otras cuencas montañosas del mundo, y que permitan realizar planes de gestión hídrica confiables en Chile Central. El aporte de este trabajo se centra en la evaluación comparativa de los métodos QDM y MBCn frente a datos observacionales reales en tres cuencas andinas de la zona centro de Chile, cubriendo de forma conjunta su desempeño histórico y sus proyecciones a largo plazo en temperatura y precipitación.

6 Referencias

Araya-Osses, D., Casanueva, A., Román-Figueroa, C., Uribe, J. M., & Paneque, M. (2020). Climate change projections of temperature and precipitation in Chile based on statistical downscaling. *Climate Dynamics*, *54*(9–10), 4309–4330. https://doi.org/10.1007/s00382-020-05231-4

Bozkurt, D., Rojas, M., Boisier, J. P., Rondanelli, R., Garreaud, R., & Gallardo, L. (2019). Dynamical downscaling over the complex terrain of southwest South America: present climate conditions and added value analysis. *Climate Dynamics*, *53*(11), 6745–6767. https://doi.org/10.1007/s00382-019-04959-y

Bozkurt, D., Rojas, M., Boisier, J. P., & Valdivieso, J. (2018). Projected hydroclimate changes over Andean basins in central Chile from downscaled CMIP5 models under the low and high emission scenarios. *Climatic Change*, *150*(3–4), 131–147. https://doi.org/10.1007/s10584-018-2246-7

Cannon, A. J. (2018). Multivariate quantile mapping bias correction: an N-dimensional probability density function transform for climate model simulations of multiple variables. *Climate Dynamics*, *50*(1–2), 31–49. https://doi.org/10.1007/s00382-017-3580-6

Cannon, A. J., Sobie, S. R., & Murdock, T. Q. (2015). Bias correction of GCM precipitation by quantile mapping: How well do methods preserve changes in quantiles and extremes? *Journal of Climate*, *28*(17), 6938–6959. https://doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00754.1

Espinoza, J. C., Garreaud, R., Poveda, G., Arias, P. A., Molina-Carpio, J., Masiokas, M., Viale, M., & Scaff, L. (2020). Hydroclimate of the Andes Part I: Main Climatic Features. In *Frontiers in Earth Science* (Vol. 8). Frontiers Media S.A. https://doi.org/10.3389/feart.2020.00064

Eyring, V., Bony, S., Meehl, G. A., Senior, C. A., Stevens, B., Stouffer, R. J., & Taylor, K. E. (2016). Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geoscientific Model Development*, *9*(5), 1937–1958. https://doi.org/10.5194/gmd-9-1937-2016

Gateño, F., Mendoza, P. A., Vásquez, N., Lagos-Zúñiga, M., Jiménez, H., Jerez, C., Vargas, X., Rubio-Álvarez, E., & Montserrat, S. (2024). Screening CMIP6 models for Chile based on past performance and code genealogy. *Climatic Change*, *177*(6). https://doi.org/10.1007/s10584-024-03742-1

Ibañez, M., Gironás, J., Oberli, C., Chadwick, C., & Garreaud, R. D. (2021). Daily and seasonal variation of the surface temperature lapse rate and 0°C isotherm height in the western subtropical Andes. *International Journal of Climatology*, *41*(S1), E980–E999. https://doi.org/10.1002/joc.6743

O'Neill, B. C., Tebaldi, C., Van Vuuren, D. P., Eyring, V., Friedlingstein, P., Hurtt, G., Knutti, R., Kriegler, E., Lamarque, J. F., Lowe, J., Meehl, G. A., Moss, R., Riahi, K., & Sanderson, B. M. (2016). The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6. *Geoscientific Model Development*, *9*(9), 3461–3482. https://doi.org/10.5194/gmd-9-3461-2016

Pablo Boisier, J., Alvarez-Garretón, C., Cepeda, J., Osses, A., Vásquez, N., & Rondanelli, R. (2018a). CR2MET: A high-resolution precipitation and temperature dataset for hydroclimatic research in Chile. In *Geophysical Research Abstracts* (Vol. 20).

Pablo Boisier, J., Alvarez-Garretón, C., Cepeda, J., Osses, A., Vásquez, N., & Rondanelli, R. (2018b). CR2MET: A high-resolution precipitation and temperature dataset for hydroclimatic research in Chile. In *Geophysical Research Abstracts* (Vol. 20).

Python Software Foundation. (2023). *Python* (3.12.9).

R Core Team. (2024). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing.

Salazar, Á., Thatcher, M., Goubanova, K., Bernal, P., Gutiérrez, J., & Squeo, F. (2024). CMIP6 precipitation and temperature projections for Chile. *Climate Dynamics*, *62*(3), 2475–2498. https://doi.org/10.1007/s00382-023-07034-9

Schmidli, J., Frei, C., & Vidale, P. L. (2006). Downscaling from GCM precipitation: A benchmark for dynamical and statistical downscaling methods. *International Journal of Climatology*, *26*(5), 679–689. https://doi.org/10.1002/joc.1287

Singh, D., Zhu, Y., Liu, S., Srivastava, P. K., Dharpure, J. K., Chatterjee, D., Sahu, R., & Gagnon, A. S. (2022). Exploring the links between variations in snow cover area and climatic variables in a Himalayan catchment using earth observations and CMIP6 climate change scenarios. *Journal of Hydrology*, *608*. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.127648

Taylor, K. E. (2001). Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. *Journal of Geophysical Research*, *106*(D7), 7183–7192. https://doi.org/10.1029/2000JD900719

Vásquez, N. A., Mendoza, P. A., Knoben, W. J. M., Arnal, L., Lagos-Zúñiga, M., Clark, M., & Vargas, X. (2024). The Key Role of Temporal Stratification for GCM Bias Correction in Climate Impact Assessments. *Earth's Future*, *12*(8). https://doi.org/10.1029/2023EF004242

Vásquez, N. A., Mendoza, P. A., Lagos-Zuñiga, M., Scaff, L., Muñoz-Castro, E., & Vargas, X. (2025). Robust spatial changes in climate classes: insights from bias-corrected CMIP6 models across Chile. *Environmental Research Letters* , *20*(1). https://doi.org/10.1088/1748-9326/ad9d5b

Xu, Z., Han, Y., Tam, C. Y., Yang, Z. L., & Fu, C. (2021). Bias-corrected CMIP6 global dataset for dynamical downscaling of the historical and future climate (1979–2100). *Scientific Data*, *8*(1). https://doi.org/10.1038/s41597-021-01079-3

Anexos

A. Especificaciones de estaciones meteorológicas

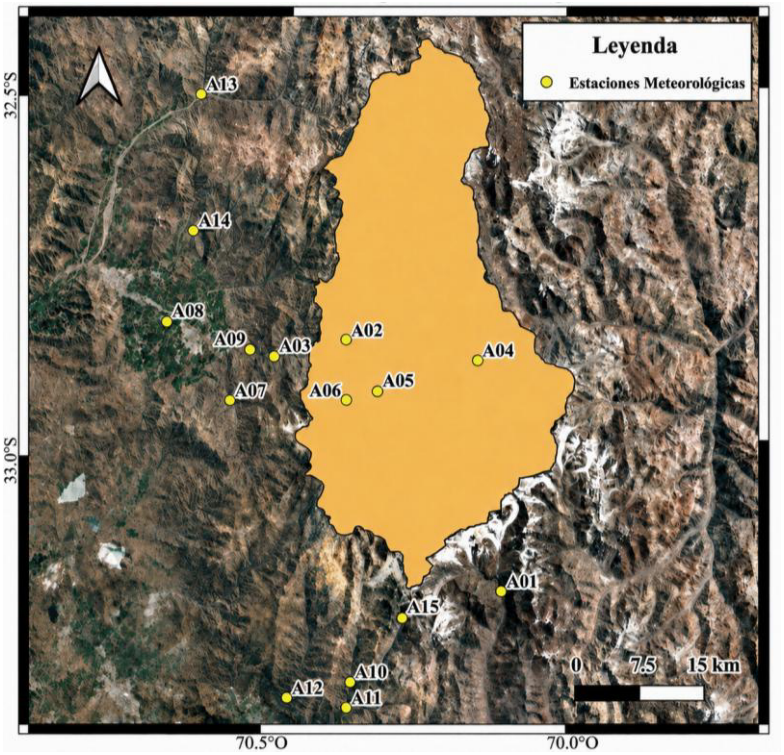

Figura A- 1: Mapa de las estaciones meteorológicas utilizadas para el análisis de la cuenca Río Aconcagua Alto.

Tabla A- 1: Descripción de estaciones meteorológicas utilizadas en la cuenca Río Aconcagua Alto.

ID	Estación meteorológica	Ubicación (lat°, lon°)	Altura (msnm)	Período	Variables
A01	Valle Olivares	-33.18, -70.11	2787	2014–2015	pr, tas
A02	Canal Colorado En Bocatoma	-32.83, -70.35	1391	2014–2015	pr, tas
A03	Vilcuya	-32.86, -70.47	1100	1980–2015	pr, tas
A04	Río Juncal En Juncal	-32.86, -70.16	1800	2014–2015	pr, tas
A05	Río Aconcagua En Río Blanco	-32.90, -70.30	1420	2014–2015	pr, tas
A06	Riecillos	-32.92, -70.35	880	1980–2015	pr
A07	Estero Pocuro En El Sifón	-32.91, -70.54	1000	2014–2015	pr
A08	Los Andes	-32.83, -70.60	820	1980–2015	pr
A09	Río Aconcagua En Chacabuquito	-32.85, -70.50	950	1999–2015	pr, tas
A10	Río San Francisco Antes Junta Estero Yerba Loca	-33.30, -70.36	1550	2013–2015	pr, tas
A11	Estero Yerba Loca Antes Junta San Francisco	-33.34, -70.33	1350	2009–2015	pr, tas
A12	Estero Arrayán En La Montosa	-33.32, -70.45	880	2013–2015	pr, tas
A13	Río Putaendo En Resguardo Los Patos	-32.50, -70.58	1218	2001–2015	pr, tas
A14	Jahuel	-32.68, -70.60	1020	1989–2015	pr, tas
A15	Estero Yerba Loca En Piedra Carvajal	-33.22, -70.27	3250	2013–2015	pr, tas

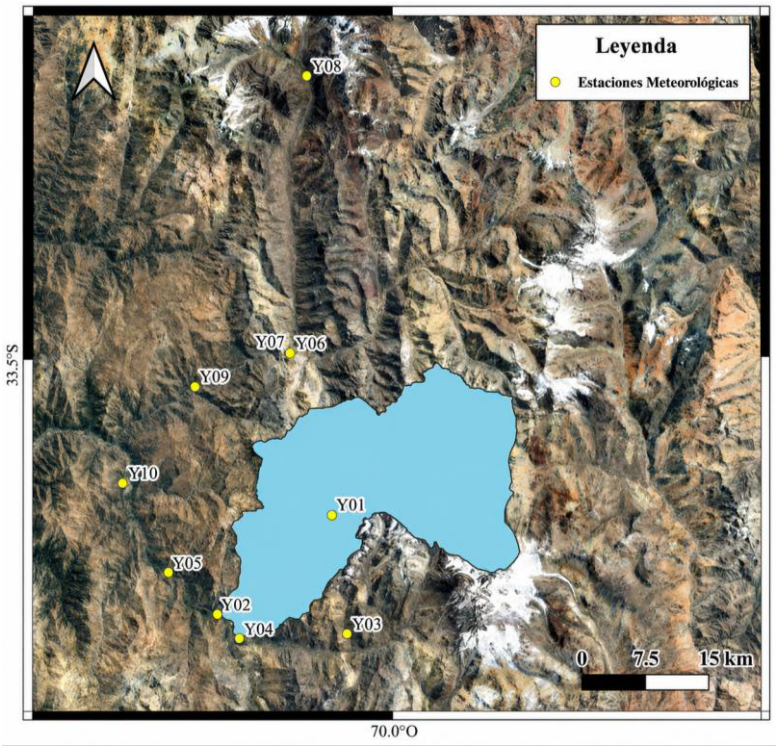

Figura A- 2: Mapa de las estaciones meteorológicas utilizadas para el análisis de la cuenca Río Yeso.

Tabla A- 2: Descripción de estaciones meteorológicas utilizadas en la cuenca Río Yeso

ID	Estación meteorológica	Ubicación (lat°, lon°)	Altura (msnm)	Período	Variables
Y01	El Yeso Embalse	-33.67, -70.08	2475	1980–2015	pr, tas
Y02	San Gabriel	-33.78, -70.23	1266	1980–2015	pr
Y03	Glaciar San Francisco en Aguas Panimavida	-33.80, -70.07	2220	2013–2015	pr, tas
Y04	Río Volcán en Queltehues	-33.80, -70.20	1365	2014–2015	pr, tas
Y05	Río Maipo en San Alfonso	-33.73, -70.30	1092	2010–2015	pr
Y06	Río Olivares antes Junta Río Colorado	-33.48, -70.13	1500	2014–2015	pr, tas
Y07	Río Colorado antes Junta Río Olivares	-33.49, -70.13	1500	2013–2015	pr, tas
Y08	Valle Olivares	-33.18, -70.11	2787	2014–2015	pr, tas
Y09	Maitenes Bocatoma	-33.53, -70.26	1143	1988–2015	pr
Y10	San José de Maipo Retén	-33.63, -70.35	943	1980–2015	pr

B. Resultados de temperatura media

Cuenca río Maule Alto

Tabla B- 1: Sesgo medio estacional de temperatura media, calculado como la diferencia entre el promedio estacional de cada modelo (original y corregido mediante QDM y MBCn) y el promedio estacional de CR2MET, cuenca Maule Alto.

Modelo	Estación	Original (°C)	QDM (°C)	MBCn (°C)
CanESM5	DEF	6.99	0.67	0.68
	MAM	4.29	0.83	0.78
	JJA	3.91	1.5	1.45
	SON	5.69	1.05	1.09
IPSL-CM6A-LR	DEF	-1.32	0.17	0.26
	MAM	-1.65	0.41	0.47
	JJA	-1.49	0.86	0.83
	SON	-2.11	0.87	1.01
MPI-ESM1-2-HR	DEF	2.18	0.15	0.28
	MAM	0.25	0.46	0.49
	JJA	-1.00	0.27	0.21
	SON	-0.05	0.21	0.22
MRI-ESM2-0	DEF	0.55	0.29	0.71
	MAM	0.88	0.28	0.24
	JJA	1.94	0.35	0.38
	SON	0.76	0.12	0.09
CR2MET	DEF		12.71	
	MAM		7.96	
	JJA		0.48	
	SON		5.26	

Tabla B- 2: Temperatura media anual histórica (1980–2014) y proyectada (2030–2064 y 2065–2099), corregida mediante QDM y MBCn, Maule Alto.

Modelo	QDM (°C)			MBCn (°C)		
	1980–2014	2030–2064	2065–2099	1980–2014	2030–2064	2065–2099
CanESM5	7.06	9.17	12.29	6.59	9.33	12.22
IPSL-CM6A-LR	6.87	8.32	10.74	6.59	8.49	10.77
MPI-ESM1-2-HR	6.74	7.88	9.78	6.59	8.23	9.79
MRI-ESM2-0	6.74	8.16	10.04	6.59	8.36	10.10

Tabla B- 3: Temperatura media estacional histórica (1980–2014) y proyectada (2030–2064 y 2065–2099), corregida mediante QDM y MBCn, desglosada por modelo y estación, Maule Alto.

Modelo	Estación	QDM (°C)			MBCn (°C)		
		1980–2014	2030–2064	2065–2099	1980–2014	2030–2064	2065–2099
CanESM5	DEF	12.87	15.53	19.42	12.60	15.71	19.34
	MAM	8.24	10.29	13.33	7.89	10.39	12.27
	JJA	1.34	2.67	5.09	0.70	2.71	5.39
	SON	5.79	8.20	11.33	5.34	8.61	11.87
IPSL-CM6A-LR	DEF	12.65	14.73	17.60	12.60	14.96	17.56
	MAM	8.06	9.78	12.19	7.89	9.79	12.41
	JJA	1.06	1.80	3.73	0.69	1.78	3.73
	SON	5.72	6.99	9.43	5.34	7.54	9.46
MPI-ESM1-2-HR	DEF	12.64	14.04	15.87	12.60	14.62	15.87
	MAM	8.08	9.09	11.30	7.89	9.46	11.22
	JJA	0.81	1.87	3.71	0.70	2.22	3.77
	SON	5.43	6.52	8.23	5.34	6.75	8.34
MRI-ESM2-0	DEF	12.70	14.11	16.76	12.60	15.26	16.99
	MAM	8.01	9.79	11.91	7.89	9.84	11.87
	JJA	0.85	2.23	3.51	0.70	2.06	3.49
	SON	5.40	6.50	7.97	5.33	6.43	8.11

Tabla B- 4: Señal de cambio estacional de temperatura media para el futuro cercano y lejano, Maule Alto.

Modelo	Estación	QDM (°C)		MBCn (°C)	
		2030–2064	2065–2099	2030–2064	2065–2099
CanESM5	DEF	2.66	6.55	3.11	6.74
	MAM	2.05	5.09	2.50	4.39
	JJA	1.33	3.74	2.01	4.69
	SON	2.41	5.54	3.27	6.53
IPSL-CM6A-LR	DEF	2.08	4.95	2.36	4.96
	MAM	1.71	4.12	1.91	4.52
	JJA	0.73	2.67	1.08	3.03
	SON	1.27	3.71	2.19	4.12
MPI-ESM1-2-HR	DEF	1.40	3.23	2.02	3.27
	MAM	1.01	3.22	1.57	3.33
	JJA	1.06	2.89	1.52	3.08
	SON	1.08	2.79	1.40	3.00
MRI-ESM2-0	DEF	1.41	4.05	2.66	4.39
	MAM	1.78	3.91	1.95	3.98
	JJA	1.38	2.66	1.37	2.79
	SON	1.10	2.58	1.09	2.77

Cuenca río Aconcagua Alto

Tabla B- 5: Sesgo medio estacional de temperatura media, calculado como la diferencia entre el promedio estacional de cada modelo (original y corregido mediante QDM y MBCn) y el promedio estacional de CR2MET, cuenca Aconcagua Alto.

Modelo	Estación	Original (°C)	QDM (°C)	MBCn (°C)
CanESM5	DEF	9.64	0.82	0.78
	MAM	6.2	0.73	0.58
	JJA	5.39	1.79	1.65
	SON	7.88	0.94	1.06
IPSL-CM6A-LR	DEF	0.29	0.09	0.2
	MAM	-0.09	0.27	0.31
	JJA	-0.15	0.42	0.52
	SON	-0.2	0.5	0.68
MPI-ESM1-2-HR	DEF	4.62	0.2	0.32
	MAM	2.68	0.15	0.16
	JJA	1.5	0.12	0.12
	SON	2.8	0.25	0.32
MRI-ESM2-0	DEF	3.65	0.07	0.22
	MAM	1.91	0.07	0.04
	JJA	1.13	0.24	0.22
	SON	0.62	-0.16	-0.14
CR2MET	DEF		10.16	
	MAM		6.21	
	JJA		-0.83	
	SON		3.51	

Tabla B- 6: Temperatura media anual histórica (1980–2014) y proyectada (2030–2064 y 2065–2099), corregida mediante QDM y MBCn, Aconcagua Alto.

Modelo	QDM (°C)			MBCn (°C)		
	1980–2014	2030–2064	2065–2099	1980–2014	2030–2064	2065–2099
CanESM5	5.14	7.27	10.63	4.65	7.59	10.57
IPSL-CM6A-LR	4.82	6.34	9.00	4.65	6.69	9.09
MPI-ESM1-2-HR	4.76	6.07	7.97	4.65	6.45	7.95
MRI-ESM2-0	4.70	6.45	8.56	4.65	6.80	8.57

Tabla B- 7: Temperatura media estacional histórica (1980–2014) y proyectada (2030–2064 y 2065–2099), corregida mediante QDM y MBCn, desglosada por modelo y estación, Aconcagua Alto

Modelo	Estación	QDM (°C)			MBCn (°C)		
		1980–2014	2030–2064	2065–2099	1980–2014	2030–2064	2065–2099
CanESM5	DEF	10.35	12.49	16.24	10.03	13.01	16.29
	MAM	6.35	8.60	11.78	6.03	8.59	10.81
	JJA	0.02	1.91	5.11	-0.74	2.11	5.32
	SON	3.83	6.10	9.38	3.43	6.77	9.86
IPSL-CM6A-LR	DEF	10.04	12.12	15.10	10.03	12.58	15.15
	MAM	6.15	7.93	10.45	6.04	7.91	10.63
	JJA	-0.56	0.45	2.60	-0.74	0.69	2.67
	SON	3.65	5.10	7.85	3.43	5.71	7.99
MPI-ESM1-2-HR	DEF	10.08	11.33	12.99	10.03	11.92	12.97
	MAM	6.10	7.39	9.54	6.04	7.60	9.30
	JJA	-0.69	0.68	2.69	-0.74	1.15	2.75
	SON	3.54	4.89	6.65	3.43	5.25	6.78
MRI-ESM2-0	DEF	10.03	11.52	13.82	10.03	12.37	13.95
	MAM	6.06	7.99	10.13	6.04	8.19	10.01
	JJA	-0.64	1.06	2.92	-0.74	0.96	2.95
	SON	3.36	5.23	7.36	3.43	5.79	7.43

Tabla B- 8: Señal de cambio estacional de temperatura media para el futuro cercano y lejano, Aconcagua Alto.

Modelo	Estación	QDM (°C)		MBCn (°C)	
		2030–2064	2065–2099	2030–2064	2065–2099
CanESM5	DEF	2.14	5.88	2.99	6.26
	MAM	2.26	5.44	2.55	4.77
	JJA	1.88	5.09	2.85	6.06
	SON	2.26	5.56	3.34	6.42
IPSL-CM6A-LR	DEF	2.07	5.06	2.55	5.12
	MAM	1.78	4.30	1.88	4.59
	JJA	1.02	3.16	1.43	3.41
	SON	1.45	4.20	2.28	4.56
MPI-ESM1-2-HR	DEF	1.25	2.91	1.90	2.94
	MAM	1.29	3.44	1.56	3.32
	JJA	1.37	3.39	1.89	3.49
	SON	1.35	3.11	1.82	3.35
MRI-ESM2-0	DEF	1.48	3.79	2.34	3.92
	MAM	1.93	4.07	2.15	3.97
	JJA	1.70	3.56	1.71	3.69
	SON	1.87	3.99	2.36	4.00

Cuenca río Yeso

Tabla B- 9: Sesgo medio estacional de temperatura media, calculado como la diferencia entre el promedio estacional de cada modelo (original y corregido mediante QDM y MBCn) y el promedio estacional de CR2MET, cuenca Yeso.

Modelo	Estación	Original (°C)	QDM (°C)	MBCn (°C)
CanESM5	DEF	9.11	0.52	0.56
	MAM	6.07	0.61	0.46
	JJA	5.72	1.38	1.3
	SON	7.38	0.86	0.89
IPSL-CM6A-LR	DEF	-0.12	0.01	0.11
	MAM	-0.32	0.16	0.17
	JJA	-0.01	0.63	0.67
	SON	-0.73	0.62	0.8
MPI-ESM1-2-HR	DEF	4.71	0.11	0.21
	MAM	3.05	0.1	0.06
	JJA	2.04	0.16	0.13
	SON	2.87	0.25	0.31
MRI-ESM2-0	DEF	2.17	-0.03	0.17
	MAM	0.31	-0.07	-0.12
	JJA	-0.42	0.35	0.32
	SON	-1.16	-0.13	-0.1
CR2MET	DEF		10.59	
	MAM		6.18	
	JJA		-1.33	
	SON		3.57	

Tabla B- 10: Temperatura media anual histórica (1980–2014) y proyectada (2030–2064 y 2065–2099), corregida mediante QDM y MBCn, Yeso.

Modelo	QDM (°C)			MBCn (°C)		
	1980–2014	2030–2064	2065–2099	1980–2014	2030–2064	2065–2099
CanESM5	5.02	7.22	10.34	4.63	7.43	10.19
IPSL-CM6A-LR	4.81	6.44	8.95	4.63	6.64	8.94
MPI-ESM1-2-HR	4.73	6.05	7.95	4.63	6.39	7.89
MRI-ESM2-0	4.67	6.50	8.64	4.63	6.85	8.59

Tabla B- 11: Temperatura media estacional histórica (1980–2014) y proyectada (2030–2064 y 2065–2099), corregida mediante QDM y MBCn, desglosada por modelo y estación, Yeso

Modelo	Estación	QDM (°C)			MBCn (°C)		
		1980–2014	2030–2064	2065–2099	1980–2014	2030–2064	2065–2099
CanESM5	DEF	10.60	13.24	17.11	10.40	13.70	16.97
	MAM	6.18	8.51	11.53	5.92	8.49	10.28
	JJA	-0.60	0.79	3.20	-1.19	0.80	3.51
	SON	3.91	6.35	9.50	3.54	6.85	10.00
IPSL-CM6A-LR	DEF	10.38	12.57	15.49	10.41	12.94	15.38
	MAM	5.99	7.98	10.48	5.92	7.88	10.44
	JJA	-0.92	-0.06	1.97	-1.19	0.06	2.02
	SON	3.81	5.26	7.85	3.54	5.79	7.98
MPI-ESM1-2-HR	DEF	10.42	11.78	13.43	10.41	12.33	13.33
	MAM	5.96	7.34	9.55	5.921	7.51	9.19
	JJA	-1.12	0.16	2.13	-1.19	0.64	2.22
	SON	3.65	4.95	6.70	3.54	5.19	6.88
MRI-ESM2-0	DEF	10.36	11.97	14.34	10.40	12.84	14.41
	MAM	5.89	8.01	10.12	5.92	8.13	9.80
	JJA	-1.04	0.65	2.53	-1.19	0.58	2.56
	SON	3.48	5.38	7.55	3.54	5.98	7.64

Tabla B- 12: Señal de cambio estacional de temperatura media para el futuro cercano y lejano, Yeso

Modelo	Estación	QDM (°C)		MBCn (°C)	
		2030–2064	2065–2099	2030–2064	2065–2099
CanESM5	DEF	2.65	6.51	3.30	6.56
	MAM	2.33	5.36	2.57	4.36
	JJA	1.39	3.80	1.99	4.69
	SON	2.44	5.59	3.31	6.46
IPSL-CM6A-LR	DEF	2.19	5.12	2.54	4.97
	MAM	1.99	4.49	1.95	4.51
	JJA	0.85	2.88	1.25	3.21
	SON	1.46	4.04	2.25	4.44
MPI-ESM1-2-HR	DEF	1.36	3.01	1.92	2.93
	MAM	1.38	3.59	1.58	3.27
	JJA	1.28	3.26	1.83	3.40
	SON	1.30	3.05	1.65	3.34
MRI-ESM2-0	DEF	1.61	3.98	2.44	4.01
	MAM	2.12	4.23	2.21	3.88
	JJA	1.69	3.57	1.77	3.75
	SON	1.90	4.07	2.44	4.10

C. Resultados de precipitación

Cuenca río Maule Alto

Tabla C- 1: Precipitación estacional histórica promedio de GCMs originales, corregidos y CR2MET, Maule Alto.

Estaciones		DEF (mm/mes)	MAM (mm/mes)	JJA (mm/mes)	SON (mm/mes)
Observado		29.58	36.06	273.85	137.85
CanESM5	Original	10.87	25.81	78.35	27.41
	QDM	35.58	40.79	332.32	134.36
	MBCn	26.55	45.61	319.15	131.99
IPSL-CM6A-LR	Original	106.89	65.84	64.66	90.02
	QDM	27.48	49.29	271.67	122.75
	MBCn	25.56	46.67	287.99	118.18
MPI-ESM1-2-HR	Original	13.65	80.70	237.96	92.02
	QDM	22.07	45.41	356.39	134.34
	MBCn	22.26	48.56	347.26	133.46
MRI-ESM2-0	Original	36.56	162.39	373.52	176.06
	QDM	18.97	44.32	350.44	146.26
	MBCn	19.29	49.45	330.66	145.62

Tabla C- 2: Precipitación media anual histórica (1980–2014) y proyectada (2030–2064 y 2065–2099), corregida mediante QDM y MBCn, Maule Alto.

Modelo	QDM (mm/año)			MBCn (mm/año)		
	1980-2014	2030-2064	2065-2099	1980-2014	2030-2064	2065-2099
CanESM5	884.01	611.27	410.00	832.13	656.95	402.34
IPSL-CM6A-LR	829.69	785.25	794.3	831.92	841.99	754.21
MPI-ESM1-2-HR	894.04	749.16	618.93	832.09	739.06	627.18
MRI-ESM2-0	894.69	679.42	624.78	831.89	684.63	641.12

Tabla C- 3: Precipitación estacional proyectada (mm/mes) por modelo, para el futuro cercano (2030–2064) y lejano (2065–2099), corregida mediante QDM y MBCn, Maule Alto.

Modelo	Estación	QDM (mm/mes)		MBCn (mm/mes)	
		2030-2064	2065-2099	2030-2064	2065-2099
CanESM5	DJF	18.87	17.63	19.92	16.47
	JJA	215.66	148.8	242	132.47
	MAM	40.36	30.78	38.85	47.7
	SON	86.45	44.81	87.9	42.46
IPSL-CM6A-LR	DJF	20.39	26.94	20.83	27.24
	JJA	289.57	287.86	298.26	277.78
	MAM	50.64	41.23	54.72	40.55
	SON	103.11	113.62	124.08	100.42

Modelo	Estación	QDM (mm/mes)		MBCn (mm/mes)	
		2030-2064	2065-2099	2030-2064	2065-2099
MPI-ESM1-2-HR	DJF	23.97	18.13	21.34	16.51
	JJA	266.02	226.51	265.21	224.29
	MAM	30.12	25.16	30.99	30.65
	SON	122.95	95.41	119.55	99.21
MRI-ESM2-0	DJF	19.6	13.5	17.14	17.84
	JJA	242.69	240.01	249.34	237.66
	MAM	26.45	27.05	27.55	30.35
	SON	112.94	88.92	110.82	93.36

Tabla C- 4: Señal de cambio estacional de precipitación para el futuro cercano y lejano, Maule Alto

Modelo	Estación	QDM (%)		MBCn (%)	
		2030–2064	2065–2099	2030–2064	2065–2099
CanESM5	DEF	-36.52	-39.44	-26.32	-39.31
	MAM	-14.58	-34.86	-13.74	5.92
	JJA	-31.46	-52.71	-16.16	-54.11
	SON	-33.99	-65.78	-33.60	-68.61
IPSL-CM6A-LR	DEF	-19.99	3.02	-22.43	1.95
	MAM	0.16	-18.47	21.69	-9.82
	JJA	0.49	-0.10	3.34	-3.76
	SON	-17.96	-9.59	-6.24	-24.12
MPI-ESM1-2-HR	DEF	-0.55	-23.01	-20.53	-37.64
	MAM	-38.87	-48.93	-31.15	-31.91
	JJA	-17.96	-30.14	-8.12	-22.29
	SON	-6.18	-27.20	-9.71	-25.07
MRI-ESM2-0	DEF	-13.09	-40.76	-36.08	-33.68
	MAM	-45.96	-44.75	-38.83	-32.60
	JJA	-24.45	-25.29	-13.59	-17.64
	SON	-17.06	-34.70	-16.29	-29.48

Cuenca río Aconcagua Alto

Tabla C- 5: Precipitación estacional histórica promedio de GCMs originales, corregidos y CR2MET, Aconcagua Alto.

Estaciones		DEF (mm/mes)	MAM (mm/mes)	JJA (mm/mes)	SON (mm/mes)
Observado		9.47	8.59	83.78	34.30
CanESM5	Original	6.10	22.61	62.20	17.43
	QDM	4.54	18.80	111.32	34.63
	MBCn	3.79	19.41	108.50	32.78
IPSL-CM6A-LR	Original	154.29	62.17	50.99	84.55
	QDM	6.41	17.85	96.33	36.70
	MBCn	5.45	15.80	95.42	36.62
MPI-ESM1-2-HR	Original	4.23	42.17	118.34	36.52
	QDM	5.07	16.56	98.68	51.94
	MBCn	3.79	16.82	100.13	38.80
MRI-ESM2-0	Original	30.46	102.44	220.50	101.80
	QDM	9.56	24.52	107.43	55.73
	MBCn	7.16	20.81	102.97	50.87

Tabla C- 6: Precipitación media anual histórica (1980–2014) y proyectada (2030–2064 y 2065–2099), corregida mediante QDM y MBCn, Aconcagua Alto.

Modelo	QDM (mm/año)			MBCn (mm/año)		
	1980-2014	2030-2064	2065-2099	1980-2014	2030-2064	2065-2099
CanESM5	284.63	220.73	132.06	260.26	229.29	148.83
IPSL-CM6A-LR	275.98	234.57	217.3	260.23	253.03	219.48
MPI-ESM1-2-HR	289.05	245.14	192.51	260.38	234.23	209.24
MRI-ESM2-0	307.63	213.16	236.59	260.44	216.14	227.17

Tabla C- 7: Precipitación estacional proyectada (mm/mes) por modelo, para el futuro cercano (2030–2064) y lejano (2065–2099), corregida mediante QDM y MBCn, Aconcagua Alto.

Modelo	Estación	QDM (mm/mes)		MBCn (mm/mes)	
		2030-2064	2065-2099	2030-2064	2065-2099
CanESM5	DJF	5.65	3.51	4.42	4.24
	JJA	73.81	47.18	82.84	50.31
	MAM	13.71	10.31	12.31	16.58
	SON	30.46	13.03	28.95	12.71
IPSL-CM6A-LR	DJF	6.28	6.06	6.13	6.12
	JJA	87.47	80.31	85.19	83.01
	MAM	10.34	10.03	12.16	10.29
	SON	27.02	25.15	37.96	23.42
MPI-ESM1-2-HR	DJF	8.4	6.12	6.34	5.11
	JJA	86.07	68.49	82.67	75.31
	MAM	9.14	8.09	8.69	7.35

Modelo	Estación	QDM (mm/mes)		MBCn (mm/mes)	
		2030-2064	2065-2099	2030-2064	2065-2099
	SON	33.87	25.15	33.65	29.5
MRI-ESM2-0	DJF	7.68	8.73	6.77	8.97
	JJA	75.39	91.1	75.12	84.91
	MAM	6.99	7.56	7.32	8.31
	SON	29.45	25.21	32.12	25.18

Tabla C- 8: Señal de cambio estacional de precipitación para el futuro cercano y lejano, Aconcagua Alto.

Modelo	Estación	QDM (%)		MBCn (%)	
		2030–2064	2065–2099	2030–2064	2065–2099
CanESM5	DEF	7.05	-34.71	-39.63	-43.27
	MAM	-18.31	-38.56	-0.79	33.59
	JJA	-26.25	-52.85	-7.43	-43.78
	SON	-18.29	-65.05	-21.60	-66.38
IPSL-CM6A-LR	DEF	9.37	3.65	-10.26	-13.11
	MAM	-36.63	-38.49	-2.09	-17.10
	JJA	-7.44	-15.02	-4.80	-7.24
	SON	-28.45	-33.40	2.83	-36.55
MPI-ESM1-2-HR	DEF	46.19	8.25	-13.43	-29.48
	MAM	-41.85	-48.53	-30.09	-40.90
	JJA	-10.29	-28.61	-7.67	-15.88
	SON	-24.06	-43.61	-8.90	-20.13
MRI-ESM2-0	DEF	2.19	16.69	-7.36	23.88
	MAM	-63.61	-60.65	-41.06	-33.08
	JJA	-24.34	-8.57	-16.12	-5.19
	SON	-36.03	-45.24	-13.09	-31.86

Cuenca río Yeso

Tabla C- 9: Precipitación estacional histórica promedio de GCMs originales, corregidos y CR2MET, Yeso.

Estaciones		DEF (mm/mes)	MAM (mm/mes)	JJA (mm/mes)	SON (mm/mes)
Observado		19.83	18.55	155.96	78.17
CanESM5	Original	10.87	25.81	78.35	27.41
	QDM	17.60	23.10	182.07	92.43
	MBCn	14.95	26.31	191.39	97.18
IPSL-CM6A-LR	Original	150.17	78.78	65.37	95.97
	QDM	15.97	35.46	150.49	82.32
	MBCn	13.84	31.4	165.98	81.58
MPI-ESM1-2-HR	Original	5.07	50.75	153.88	48.41
	QDM	11.31	30.37	187.25	103.97
	MBCn	9.09	30.58	188.72	88.00
MRI-ESM2-0	Original	32.24	100.36	217.18	106.37
	QDM	20.19	40.81	199.11	114.04
	MBCn	16.74	37.25	188.31	110.30

Tabla C- 10: Precipitación media anual histórica (1980–2014) y proyectada (2030–2064 y 2065–2099), corregida mediante QDM y MBCn.

Modelo	QDM (mm/año)			MBCn (mm/año)		
	1980-2014	2030-2064	2065-2099	1980-2014	2030-2064	2065-2099
CanESM5	484.17	328.18	214.00	453.55	376.24	212.77
IPSL-CM6A-LR	461.88	419.26	409.52	453.59	450.54	393.08
MPI-ESM1-2-HR	496.07	409.75	318.06	453.52	388.31	341.96
MRI-ESM2-0	522.83	391.42	410.48	453.4	404.42	404.56

Tabla C- 11: Precipitación estacional proyectada (mm/mes) por modelo, para el futuro cercano (2030–2064) y lejano (2065–2099), corregida mediante QDM y MBCn, Yeso.

Modelo	Estación	QDM (mm/mes)		MBCn (mm/mes)	
		2030-2064	2065-2099	2030-2064	2065-2099
CanESM5	DJF	12.08	11.29	11.56	10.62
	JJA	121.8	81.26	148.31	70.95
	MAM	22.86	17.04	22.72	27.6
	SON	53.37	27.26	58.46	27.75
IPSL-CM6A-LR	DJF	13.39	14.88	13.79	15.05
	JJA	167.08	159.54	166.76	153.68
	MAM	22.82	20.24	26.24	20.2
	SON	64.57	67.35	81.54	62.65
MPI-ESM1-2-HR	DJF	16.13	10.18	12.08	9.6
	JJA	151.09	122.67	144.25	132.3

Modelo	Estación	QDM (mm/mes)		MBCn (mm/mes)	
		2030-2064	2065-2099	2030-2064	2065-2099
	MAM	18.69	14.59	17.96	14.28
	SON	76.72	56.11	74.57	62.82
MRI-ESM2-0	DJF	17.82	21.14	17.07	21.89
	JJA	143.25	163.68	141.31	156.5
	MAM	16.31	16.37	16.64	17.36
	SON	73.39	61.86	74.55	63.42

Tabla C- 12: Señal de cambio estacional de precipitación para el futuro cercano y lejano, Yeso.

Modelo	Estación	QDM (%)		MBCn (%)	
		2030–2064	2065–2099	2030–2064	2065–2099
CanESM5	DEF	-25.21	-28.98	-30.06	-35.44
	MAM	-15.40	-36.93	-9.44	10.01
	JJA	-30.68	-53.76	-9.90	-56.90
	SON	-41.40	-70.07	-31.13	-67.97
IPSL-CM6A-LR	DEF	-9.21	-1.99	-14.59	-6.97
	MAM	-29.05	-37.08	4.49	-19.56
	JJA	3.25	-1.41	1.32	-6.62
	SON	-25.23	-22.01	-3.96	-26.21
MPI-ESM1-2-HR	DEF	18.09	-23.56	-27.37	-41.54
	MAM	-37.81	-51.45	-28.49	-43.15
	JJA	-15.16	-31.12	-12.34	-19.60
	SON	-20.10	-41.56	-12.14	-25.98
MRI-ESM2-0	DEF	2.06	20.87	3.50	33.90
	MAM	-52.85	-52.66	-33.74	-30.85
	JJA	-21.53	-10.35	-14.10	-4.87
	SON	-26.79	-38.29	-12.15	-25.27