



UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

# **EVALUACIÓN DEL IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN EVENTOS EXTREMOS. ANÁLISIS DE RIESGO DE SEQUÍAS E INUNDACIONES USANDO MÉTODOS SIMPLES**

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL**

**DAVID BENJAMÍN SEELMANN FREIRE**

PROFESORA GUÍA:  
XIMENA VARGAS MESA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
JAMES MCPHEE TORRES  
MIGUEL LAGOS ZUÑIGA

SANTIAGO DE CHILE  
2017

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR A TÍTULO DE:**  
Ingeniero Civil, Mención Hidráulica, Sanidad y Ambiental  
**POR:** David Benjamín Seelmann Freire  
**FECHA:** 14/03/2017  
**PROFESOR GUIA:** Ximena Vargas Mesa

## **EVALUACIÓN DEL IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN EVENTOS EXTREMOS. ANÁLISIS DE RIESGO DE SEQUÍAS E INUNDACIONES USANDO MÉTODOS SIMPLES**

Con frecuencia, en hidrología es sencillo calcular eventos extremos, como lo son las crecidas y sequías, si se dispone de una base de datos con registros extensos. Por otro lado, existen índices más complejos que requieren análisis detallados de los fenómenos y que pueden considerar la modelación de relaciones precipitación-escorrentía. Además, estando actualmente en un escenario de cambio climático, es necesario entender y determinar una conexión entre este y estos eventos extremos.

En este trabajo se utilizaron datos de proyecciones realizadas en anteriores estudios para el siglo XXI, bajo el escenario RCP8.5, con cuatro modelos diferentes de circulación global en las cuencas del río Maipo, Maule y Biobío. Lo anterior se refiere a series de precipitaciones, temperaturas medias y caudales medios, todos a escala diaria. Con esto y, utilizando relaciones precipitación-escorrentía simples como Verni y King e hidrograma unitario triangular, se determinó el caudal máximo instantáneo asociado a distintos periodos de retorno para analizar los riesgos crecidas en distintos períodos de tiempo. Simultáneamente se analizaron las series de precipitaciones y caudales medios para determinar índices de aridez que permiten analizar cambios de comportamiento de las sequías meteorológicas.

Se agregó, además, el estudio de las sequías y crecidas en la cuenca del Limarí, donde fue necesario realizar previamente el escalamiento de las forzantes meteorológicas seleccionando el modelo de circulación global más conveniente.

Como resultado se obtuvo una serie de cambios significativos, apreciándose disminuciones en los eventos húmedos y aumentos en los eventos secos, siendo la cuenca del Río Biobío la que presenta mayores tendencias hacia las sequías meteorológicas. En esta cuenca se estima un aumento de hasta un 72% en eventos de sequías moderadas y extremas según el Índice de Precipitación Estandarizado, y disminuciones de 4 puntos porcentuales en eventos húmedos en el futuro lejano. Por otro lado, los índices de caudales muestran severas disminuciones en la sub-cuenca del Río Maipo con escasez en más de un 44% del tiempo y con sequías de más de 16 meses, al usar los parámetros históricos. Finalmente, en términos de crecidas, la región del Maipo parece ser la más afectada con variaciones de más del triple de los caudales asociados a altos periodos de retorno en el futuro lejano con respecto a los históricos.

*Dedico esta memoria a los monstruos. Solo lo hice para demostrar que jamás trabajaría para mr. Burns.*

*Pero más que a cualquier persona, este trabajo va dedicado al Danjo, porque debe haber sido una de las personas en las que más pensé durante todo este tiempo y es con los que más me gustaría celebrar el fin de esta etapa con un buen "Salud".*

*Siempre te voy a extrañar.*

*Quiero agradecer a todas las personas que han estado conmigo durante este tiempo.*

*A mis padres por apoyarme en todo lo que he hecho y darme las herramientas para  
sobrepasar todos los obstáculos.*

*A la profesora Ximena por ser un guía incomparable, siempre dispuesta a ayudar y de  
quien he aprendido mucho a lo largo de este trabajo.*

*A mis amigos por hacer que el tiempo en la universidad haya sido mucho más que  
aprender.*

*A la maca por empujarme todo este último tiempo a hacer las cosas de la mejor forma  
posible.*

# TABLA DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN Y MOTIVACIÓN .....	1
1.1	Introducción.....	1
1.2	Objetivos del Estudio.....	2
1.3	Estructura del Informe.....	3
2.	REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1	Cambios en las estadísticas y eventos.....	5
2.2	Predicción del comportamiento global .....	6
2.3	Cálculo de caudales .....	10
2.4	Caracterización de eventos extremos .....	14
2.5	Proyecciones de Caudales Medios Diarios en Siglo XXI .....	24
3.	ZONA DE ESTUDIO.....	27
3.1	Cuenca del Río Biobío.....	28
3.2	Cuenca del Río Maule .....	31
3.3	Cuenca del Río Maipo.....	34
3.4	Cuenca del Río Limarí .....	37
4.	ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN DISPONIBLE.....	41
4.1	Cuenca del Río Biobío.....	41
4.2	Cuenca del Río Maule .....	44
4.3	Cuenca del Río Maipo.....	47
4.4	Cuenca del Río Limarí .....	50
5.	CÁLCULO DE CAUDALES MÁXIMOS.....	55
5.1	Cuenca del Río Biobío: Sub-Cuenca “Laguna de la Laja”.....	55

5.2	Cuenca del Río Maule: Sub-Cuenca “Laguna de la Invernada” .....	58
5.3	Cuenca del Río Maipo: Sub-Cuenca “Volcán en los Queltehues” .....	60
6.	ÍNDICES METEOROLÓGICOS E HIDROLÓGICOS.....	65
6.1	Cuenca del Río Biobío: Sub-Cuenca “Laguna de la Laja”.....	65
6.2	Cuenca del Río Maule: Sub-Cuenca “Laguna de la Invernada” .....	70
6.3	Cuenca del Río Maipo: Sub-Cuenca “Volcán en los Queltehues” .....	75
6.4	Cuenca del Río Limarí: Sub-Cuenca “Pichasca” .....	79
7.	ANÁLISIS Y CONCLUSIONES.....	81
7.1	Comentarios de los datos, índices y modelos .....	81
7.2	Cuenca del Río Biobío: Sub-Cuenca “Laguna de la Laja”.....	82
7.3	Cuenca del Río Maule: Sub-Cuenca “Laguna de la Invernada” .....	83
7.4	Cuenca del Río Maipo: Sub-Cuenca “Volcán en los Queltehues” .....	84
7.5	Cuenca del Río Limarí: Sub-Cuenca “Pichasca” .....	84
7.6	Comentarios generales.....	85
	BIBLIOGRAFÍA.....	87

## Índice de Tablas

Tabla 2.1: Escenarios para el cambio climático a futuro. (Fuente: IPCC, 2013). .....	7
Tabla 2.2: Niveles y denominaciones IPE. ....	16
Tabla 2.3: Tabla de probabilidad del IPE. ....	16
Tabla 2.4: Resultados para los valores del PDSI. ....	22
Tabla 3.1: Datos de las estaciones que se utilizan en este trabajo. ....	28
Tabla 3.2: Características de la estación a ocupar para las crecidas e índices. ....	30
Tabla 3.3: Valores promedios por periodo de las temperaturas medias diarias para cada modelo. (Fuente: Lagos et al. 2015).....	30
Tabla 3.4: Caudales medios anuales por periodo para cada uno de los 4 modelos en Laguna de la Laja. (Fuente: Lagos et al. 2015) .....	31
Tabla 3.5: Estadísticos de las precipitaciones diarias máximas por periodo y modelo. (Fuente: Lagos et al. 2015) .....	31
Tabla 3.6: Características de la cuenca definida por la estación "Laguna Invernada". ..	33
Tabla 3.7: Promedios por periodo de las temperaturas medias diarias. (Fuente: Lagos et al. 2015) .....	33
Tabla 3.8: Caudal medio por periodo en la estación Laguna de la Invernada. (Fuente: Lagos et al. 2015).....	34
Tabla 3.9: Estadísticos de las precipitaciones máximas diarias en Armerillo. (Fuente: Lagos et al. 2015).....	34
Tabla 3.10: Datos de cuenca drenada por la estación "Volcán en los Queltehues". .....	36
Tabla 3.11: Promedios por periodo de las temperaturas medias diarias por modelo. (Fuente: Lagos et al. 2015) .....	37
Tabla 3.12: Caudales medios por periodo en la estación Río Volcán en Queltehues. (Fuente: Lagos et al. 2015) .....	37
Tabla 3.13: Estadísticos de las precipitaciones máximas diarias por periodo de la estación Pirque. (Fuente: Lagos et al. 2015).....	37
Tabla 3.14: Datos de la cuenca que descarga en la estación Pichasca.....	39
Tabla 4.1: Coeficientes para determinar el caudal máximo instantáneo en base al caudal medio diario. ....	41
Tabla 4.2: Índices de error con respecto a la serie real de precipitaciones medias, máximas y mínimas de cada mes. ....	51
Tabla 4.3: Temperaturas medias anuales en los diferentes intervalos de tiempo. ....	53
Tabla 4.4: Precipitaciones anuales medias para cada periodo en la estación Pichasca. ....	53
Tabla 4.5: Promedio de las precipitaciones máximas diarias por periodo. ....	54
Tabla 5.1: Área promedio bajo la isoterma de 0° durante tormentas en la cuenca Laguna de la Laja para cada periodo. ....	55

Tabla 5.2: Variación de las crecidas según la fórmula Verni y King con respecto a caudales históricos: Cuenca Laguna de la Laja. ....	55
Tabla 5.3: Variación del caudal máximo instantáneo según diferentes periodos de retorno en la sub-cuenca del Biobío, con respecto a las crecidas del periodo histórico.	56
Tabla 5.4: Variaciones de los caudales del periodo de deshielo en la cuenca de la Laguna de la Laja. ....	57
Tabla 5.5: Variación de los caudales máximos instantáneos según periodo de retorno calculados con el HUT con respecto al caudal histórico de cada modelo. ....	57
Tabla 5.6: Áreas bajo la isoterma 0° en la cuenca definida por la estación "Laguna de la Invernada". ....	58
Tabla 5.7: Variación de los caudales calculados con Verni y King para los diferentes periodos. ....	58
Tabla 5.8: Resultados del caudal medio diario a máximo instantáneo para la cuenca definida por la estación "Laguna de la Invernada". ....	59
Tabla 5.9: Caudales máximos del periodo de deshielo en la cuenca de la Laguna de la Invernada. ....	59
Tabla 5.10: Variación de las crecidas en la sub-cuenca "Laguna de la Invernada" con respecto a la calculada para el periodo histórico de cada modelo. ....	60
Tabla 5.11: Variación del área en la sub-cuenca definida por la estación "Volcán en los Queltehues". ....	60
Tabla 5.12: Variaciones de los resultados de la fórmula Verni y King en la estación "Volcán en los Queltehues". ....	61
Tabla 5.13: Resultados de caudales máximos instantáneos para la estación "Volcán en los Queltehues". ....	61
Tabla 5.14: Caudales máximos instantáneos para periodo de deshielo. ....	62
Tabla 5.15: Variación de los caudales de crecidas calculadas con el HUT para la sub-cuenca en estudio. ....	62
Tabla 6.1: Evolución de las sequías hidrológicas en la cuenca del Biobío. ....	67
Tabla 6.2: Escenario no estacionario utilizando el índice de caudales bajos. ....	68
Tabla 6.3: Resultados del índice en el escenario de parámetros históricos. ....	72
Tabla 6.4: Evolución del índice en escenario no estacionario. ....	72
Tabla 6.5: Índice en los diferentes periodos en el escenario estacionario. ....	77
Tabla 6.6: Escenario no estacionario para el índice de caudales bajos. ....	77



## Índice de Figuras

Figura 2.1: Temperaturas observadas en las superficies oceánica y continental. (Fuente: Modificado de IPCC, 2013) .....	5
Figura 2.2: Cantidad de desastres naturales anuales, Fuente: (Modificado de EMDAT, 2016). .....	6
Figura 2.3: Modelos MCG. Fuente: (Modificado de Viner, 1998) .....	7
Figura 2.4: Escalamiento de los datos de un MCG. Fuente: (Modificado de Wilby et al., 1997) .....	8
Figura 2.5: Hidrograma de ejemplo. ....	11
Figura 2.6: Hidrograma unitario triangular del SCS. (Fuente: Monroy, 2010) .....	12
Figura 2.7: Capacidad de campo según tipo de suelo. (Fuente: Ven te Chow et al, 1988) .....	18
Figura 2.8: Definición de sequías según el método propuesto por Dracup. (Fuente: Fernández, 1997). .....	23
Figura 2.9: Predicciones de precipitaciones máximas diarias según dos modelos diferentes. (Lagos et al. 2015). .....	25
Figura 2.10: Curvas de duración de temperatura media en días con lluvia para diferentes modelos en la estación Colorado. (Fuente: Lagos et al. 2015). .....	25
Figura 2.11: Variación de los caudales con diferentes periodos de retorno en diferentes estaciones pluviométricas. ....	26
Figura 3.1: Mapa de las cuencas donde se realiza el estudio. ....	27
Figura 3.2: Mapa de la cuenca del Biobío y la sub-cuenca Laguna de la Laja. ....	28
Figura 3.3: Datos en la estación meteorológica que se utiliza en el trabajo. ....	29
Figura 3.4: Curva hipsométrica del área drenada por la estación. ....	30
Figura 3.5: Mapa de la cuenca del río Maule y la sub-cuenca Laguna de la Invernada. ....	32
Figura 3.6: Contraste entre las precipitaciones y temperaturas medias mensuales en la cuenca del río Maule. ....	32
Figura 3.7: Curva hipsométrica de la cuenca que descarga por la estación "Laguna de la Invernada" .....	33
Figura 3.8: Cuenca del río Maipo y la sub-cuenca Río Volcán en Queltehues. ....	35
Figura 3.9: Temperatura media mensual y precipitación mensual para cada mes en la estación Pirque. ....	35
Figura 3.10: Curva hipsométrica de la cuenca delimitada por la estación "Río Volcán en Queltehues" .....	36
Figura 3.11: Mapa del a cuenca del río Limarí y la sub-cuenca Pichasca. ....	38
Figura 3.12: Temperaturas medias mensuales y precipitaciones medias mensuales en el Limarí. ....	38
Figura 3.13: Curva hipsométrica de la cuenca que descarga en Pichasca. ....	39

Figura 4.1: Tendencias lineales de la evolución de las temperaturas medias anuales en cada modelo. (Fuente: Lagos et al. 2015).....	42
Figura 4.2: Tendencias en las precipitaciones en la estación Quilaco. (MPI-ESM-LR se superpone en casi todo el tramo a CMCC-CMS). (Fuente: Lagos et al. 2015) .....	42
Figura 4.3: Tendencias en las precipitaciones máximas diarias en cada modelo. (Fuente: Lagos et al. 2015) .....	43
Figura 4.4: Tendencia en las medias anuales de los cuatro modelos. (Fuente: Lagos et al. 2015) .....	43
Figura 4.5: Variación del Q95% en Laguna de la Laja. (Fuente: Lagos et al. 2015) .....	44
Figura 4.6: Caudal con 85% de excedencia en el tiempo para la estación Laguna de la Laja. (Fuente: Lagos et al. 2015).....	44
Figura 4.7: Tendencias en las temperaturas medias anuales para la estación Colorado. (Fuente: Lagos et al. 2015) .....	45
Figura 4.8: Tendencias en las precipitaciones anuales en la estación Armerillo. (Fuente: Lagos et al. 2015).....	45
Figura 4.9: Tendencias de las precipitaciones máximas por modelo en la estación Armerillo. (Fuente: Lagos et al. 2015) .....	46
Figura 4.10: Tendencias en el caudal medio anual en la estación "Laguna de la Invernada". (Fuente: Lagos et al. 2015) .....	46
Figura 4.11: Variación de los caudales de 95% diarios con respecto a los históricos. (Fuente: Lagos et al. 2015) .....	47
Figura 4.12: Caudal del 85% en Laguna de la Invernada para cada modelo. (Fuente: Lagos et al. 2015).....	47
Figura 4.13: Tendencias en las temperaturas medias anuales en la estación Pirque según los cuatro modelos. (Fuente: Lagos et al. 2015).....	48
Figura 4.14: Tendencias en las temperaturas medias anuales para la estación Pirque. (Fuente: Lagos et al. 2015) .....	48
Figura 4.15: Tendencias en las precipitaciones máximas en Pirque. (Fuente: Lagos et al. 2015) .....	49
Figura 4.16: Tendencia de los caudales medios anuales de la estación. (Fuente: Lagos et al. 2015) .....	49
Figura 4.17: Variación de los caudales del 95% de probabilidad de excedencia con respecto a los históricos. (Fuente: Lagos et al. 2015) .....	50
Figura 4.18: Caudal del 85% de probabilidad de excedencia en Volcán en los Queltehues. (Fuente: Lagos et al. 2015) .....	50
Figura 4.19: Comparación de las curvas de duración de precipitaciones anuales que entrega cada modelo con la real. ....	52
Figura 4.20: Temperatura media anual y su respectiva tendencia en Carén. ....	52
Figura 4.21: Precipitación anual y su tendencial en Pichasca.....	53

Figura 4.22: Tendencia de las precipitaciones máximas en Pichasca y los datos desde donde se extrajo.....	54
Figura 6.1: IPE para el periodo de deshielo en escenario estacionario (izquierda) y no estacionario (derecha).....	65
Figura 6.2: IPE para la cuenca estudiada en escenario estacionario (izquierda) y no estacionario (derecha).....	66
Figura 6.3: Evolución del IPE en escenario estacionario (izquierda) y no estacionario (derecha).....	66
Figura 6.4: Resultados del PDSI en la cuenca definida por la estación "Laguna de la Laja". .....	67
Figura 6.5: Resultados del balance hídrico por cada modelo, BCC-CSM1.1, CMCC-CMS, CSIRO-Mk3.6.0 y MPI-ESM-LR respectivamente. ....	69
Figura 6.6: Evolución del IPE en escenario estacionario (izquierda) y no estacionario (derecha).....	70
Figura 6.7: El IPE para los distintos intervalos en el periodo pluvial para el caso estacionario (izquierda) y no estacionario (derecha).....	70
Figura 6.8: Cambios en el IPE para los diferentes intervalos en caso estacionario (izquierda) y no estacionario (derecha). ....	71
Figura 6.9: Resultados en la cuenca definida por la estación "Laguna de la Invernada". .....	72
Figura 6.10: Resultados del balance hídrico por cada modelo, BCC-CSM1.1, CMCC-CMS, CSIRO-Mk3.6.0 y MPI-ESM-LR respectivamente. ....	74
Figura 6.11: IPE para los diferentes intervalos en escenario parámetros históricos (izquierda) y no estacionario (derecha). Período de deshielo. Cuenca Volcán en Queltehues.....	75
Figura 6.12: Evolución del IPE en la cuenca del Maipo con parámetros estacionarios (izquierda) y no estacionarios (derecha). ....	75
Figura 6.13: IPE en la cuenca del Maipo en escenario estacionario (izquierda) y no estacionario (derecha).....	76
Figura 6.14: Resultados del índice para la cuenca definida por la estación "Río Volcán antes de junta con río Maipo". .....	76
Figura 6.15: Resultados del balance hídrico por cada modelo, BCC-CSM1.1, CMCC-CMS, CSIRO-Mk3.6.0 y MPI-ESM-LR respectivamente. ....	78
Figura 6.16: IPE en Período de deshielo para el escenario parámetros históricos (izquierda) y no estacionario (derecha). Estación Pichasca.....	79
Figura 6.17: Evolución del IPE en Período pluvial para el escenario parámetros históricos (izquierda) y no estacionario (derecha). Estación Pichasca.....	79
Figura 6.18: IPE para el año hidrológico en la estación "Pichasca". .....	80
Figura 6.19: PDSI en la estación "Pichasca". .....	80

## Índice de Anexos

Anexo A. Tablas DGA .....	91
Anexo B. Caudales Calculados .....	93
Anexo C. Análisis de la Información Disponible .....	101
Anexo D. Escalamiento Limarí .....	125
Anexo E. Índices de Precipitación Estandarizado .....	135
Anexo F. Índice de severidad de sequías de Palmer .....	151
Anexo G. Índice de Caudales Diarios bajos .....	159
Anexo H. Otras Tablas .....	163

# 1. Introducción y Motivación

## 1.1 Introducción

Fenómenos naturales como los terremotos, tsunamis, tormentas o sequías se denominan desastres naturales cuando originan pérdidas materiales o de vidas humanas. Luego, el riesgo de un desastre está asociado a la probabilidad de ocurrencia del evento en cuestión, y de la vulnerabilidad del lugar donde éste ocurre.

La ingeniería en general, y en particular la ingeniería hidráulica, plantea modelos basados en datos históricos que permiten hacer una predicción acerca del futuro, con el fin de prever los posibles efectos de un evento y resolver o adaptarse a las situaciones futuras que se proyectan en relación a los recursos hídricos. Así es como se asumen riesgos, tales como al determinar un caudal de diseño con cierto periodo de retorno para ciertas construcciones, cuando se estima el volumen que podrá acumular cierto embalse de riego para satisfacer las demandas agrícolas, etc.

Hasta ahora, los cálculos mencionados se realizan considerando estacionareidad en los datos obtenidos durante el tiempo y suponiendo que ésta se mantiene en el futuro. Sin embargo, durante los últimos años, se ha visto, en la gran mayoría del planeta, un aumento significativo en los desastres naturales tales como, sequías, tormentas, huracanes entre otros. Según el centro internacional estadístico de desastres (Guhapir *et al*, 2014), en los últimos 15 años se ha visto un aumento de un 22% en la cantidad de estos, comparado con los 15 años anteriores, muchos de estos eventos han sido atribuidos al cambio climático (CC). Según un estudio realizado, durante el año 2013, un 70% de los eventos extremos fueron a causa de este fenómeno (Herring *et al*, 2014).

Sin embargo, aunque en Chile el tema lleva un tiempo siendo el centro del debate, no han sido evaluados, de manera sistemática, los posibles aumentos en la frecuencia o severidad de eventos como sequías e inundaciones, aunque si ha habido ciertos acercamientos al análisis de los efectos del CC como el realizado por Miguel Lagos para las cuencas nivales y pluvio-nivales en tres cuencas de Chile Central (Lagos, 2015), los estudiados por Juan Carlos Richard, particularmente para las sequías en la cuenca del río Cautín (Richard, 2014) y las disminución de las precipitaciones en Chile Central en años posteriores a 1970 (Boisier *et al*. 2016).

Así es como, dada la importancia que significa diseñar obras o medidas de contingencia frente a este tipo de eventos, en este trabajo se analiza a través de índices y cálculos

simples el impacto del CC en la ocurrencia de eventos de sequías e inundaciones en cuatro cuencas de Chile ubicadas entre la IV<sup>a</sup> y la VII<sup>a</sup> región.

Entre los métodos disponibles para la estimación de crecidas se encuentra el método de Verni y King (Verni y King, 1977) el cual, con una ecuación, logra incorporar las variaciones de temperatura, mediante los cambios en el área de precipitación, además de la precipitación incluida de forma explícita en la fórmula que estima el caudal máximo instantáneo. Otra forma de cálculo de esta variable, por ejemplo, es aquella que estima el caudal máximo instantáneo mediante el producto del caudal medio diario, en este caso, los simulados con el modelo WEAP (Lagos *et al*, 2015) y un coeficiente empírico definido en base a una serie de datos históricos (DGA, 1995) y que, en este caso, se recalcularán con los datos más cercanos a los puntos de aforo estudiados. Por último, se analiza el efecto de las variaciones de temperatura y precipitación considerando un hidrograma unitario triangular en las diferentes cuencas. Luego, para el caso de las sequías hidrológicas, por ejemplo, se utilizó el índice de caudales bajos (Cammalleri *et al*. 2016) con un análisis diario.

Por otro lado, cabe destacar que los efectos del CC no solo afectan a los cauces directamente, ya que las sequías y los periodos húmedos también pueden ser analizados desde un punto de vista netamente meteorológico. Por ello, también se aplicaron índices de precipitaciones y aridez a los datos para reconocer duraciones e intensidades en estos eventos. Entre ellos se encuentra el Índice de Precipitación Estandarizado (IPE) el cual define los eventos de humedad o sequía según la precipitación de un intervalo definido en relación al promedio y la desviación de los datos históricos.

Para ello se consideró el escenario de cambio climático RCP 8.5, el cual supone que para el año 2100 el forzamiento radiativo de la tierra alcanzará los 8.5 W/m<sup>2</sup>. Bajo esta base, se utilizó tanto las forzantes radiativas como los caudales medios diarios obtenidos por (Lagos *et al*, 2015) para estas cuencas, usando 4 modelos de circulación global: BCC-CSM1.1, CMCC-CMS, CSIRO-Mk3.6.0 y MPI-ESM-LR.

## 1.2 Objetivos del Estudio

### 1.2.1 Objetivo principal

- Determinar desde un punto de vista meteorológico e hidrológico, los efectos del cambio climático en eventos extremos que pueden ocasionar sequías e inundaciones.

### 1.2.2 Objetivos secundarios

- Investigar sobre índices asociados a eventos extremos.
- Determinar evolución de estos índices en tres cuencas chilenas utilizando series de precipitaciones diarias, temperaturas medias diarias y caudales medios diarios simulados a base de cuatro MCG.
- Efectuar el escalamiento de las forzantes en la zona del río Limarí, realizando un análisis previo para encontrar el MCG más adecuado para el estudio.

### 1.3 Estructura del Informe

En las próximas páginas se muestra el trabajo realizado, resultados obtenidos y conclusiones de la experiencia, analizando el texto para verificar que se hayan cumplido, o no, los objetivos propuestos en la sección anterior. Para esto, en este capítulo se ha contextualizado y propuesto las diferentes metas a alcanzar por este documento.

El capítulo 2 reúne la información recopilada atinente al trabajo, en conjunto con las fórmulas y relaciones que se utilizan en los cálculos, incluyendo limitaciones, pros y contras, y, en general, diferentes análisis de cada una de ellas. Luego, en el capítulo 3 se muestran las características más importantes de la zona de estudio, geomorfología, ubicación, etc., incluida la información sobre sus respectivas estaciones utilizadas en el estudio. Los datos que se utilizan en el estudio, y sus características más importantes se muestran en el capítulo 4 con lo cual se termina de contextualizar el presente trabajo.

Luego, en los capítulos 5 y 6 se presentan los resultados de los cálculos en las cuatro cuencas, partiendo por los diferentes métodos de crecidas para luego pasar a los índices meteorológicos e hidrológicos, respectivamente.

Finalmente, en el capítulo 6 se agrega una serie de conclusiones y observaciones al trabajo realizado, a resultados en cada cuenca en particular y resultados en general de tipo cualitativo y cuantitativo.





## 2. Revisión Bibliográfica

### 2.1 Cambios en las estadísticas y eventos

El cambio climático se puede definir como una variación estadística importante en el estado del clima que persiste durante un largo periodo y se puede deber tanto a procesos naturales internos o a forzantes externas (*Glosario IPCC*<sup>1</sup>). Sin embargo, en particular para los estudios recientes de este fenómeno, la definición de este varía un poco, siendo recalcada la importancia de la actividad humana en el incremento de estos cambios. Esto tiene sentido al entender que el sistema climático planetario, donde se incluyen océanos, biosfera, litosfera, entre otras cosas, no logra justificar las alteraciones observadas considerando las forzantes externas naturales como erupciones volcánicas o la variabilidad en la actividad solar (*Vargas, et al. 2008*).

Así, durante los últimos años, los efectos del cambio climático han sido cada vez más evidentes, demostrando variaciones considerables en las temperaturas de la superficie terrestre (Figura 2.1, izquierda), oceánica (Figura 2.1, derecha) y el nivel del mar, por nombrar algunas.

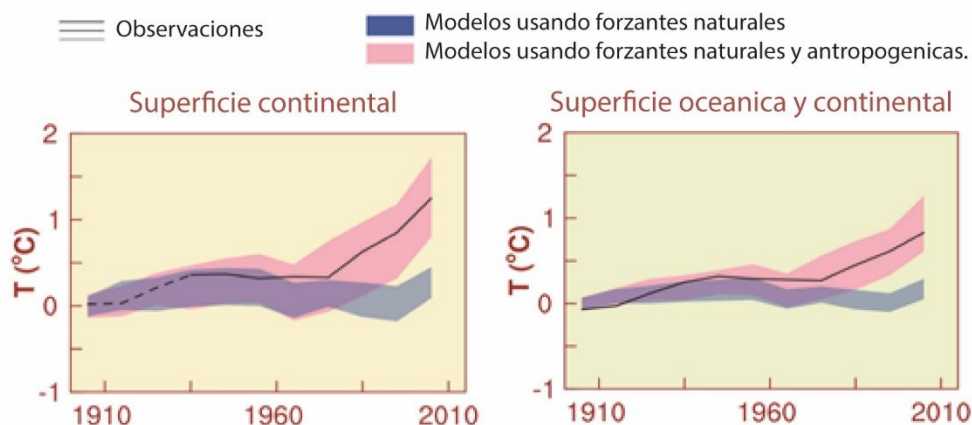


Figura 2.1: Temperaturas observadas en las superficies oceánica y continental. (Fuente: Modificado de IPCC, 2013)

Dado que esto afecta a una gran cantidad de factores atmosféricos, también se ven afectados, indirectamente, otros fenómenos como lo es la cantidad de eventos extremos en la meteorología, tormentas, escasez de lluvias, huracanes, entre otros y también a la hidrología, habiendo sequías más largas e intensas, crecidas más grandes y más comunes (*Herring et al., 2014*)

En particular, cuando estos eventos tienen consecuencias fatales y/o monetarias, llegan a llamarse desastres naturales, dentro de los cuales se pueden considerar erupción de volcanes, terremotos y, los eventos estudiados, inundaciones y sequías. El Centro de

<sup>1</sup> Sigla en inglés, Intergovernmental Panel on Climate Change.

Base de Datos de Desastres Naturales (EMDAT<sup>2</sup>) realiza un catastro de la cantidad de muertes, monto de pérdidas monetarias y cantidad de desastres naturales cada año desde donde se extrae la Figura 2.2, que muestra la cantidad anual de desastres entre los años 1900 y 2014 para Asia y las Américas, donde se ve un incremento notable en la cantidad de eventos para los años posteriores a la revolución industrial, hecho que marca el inicio del incremento en las emisiones de CO<sub>2</sub> entre otros gases de efecto invernadero, y, por consiguiente, el efecto en el cambio climático.

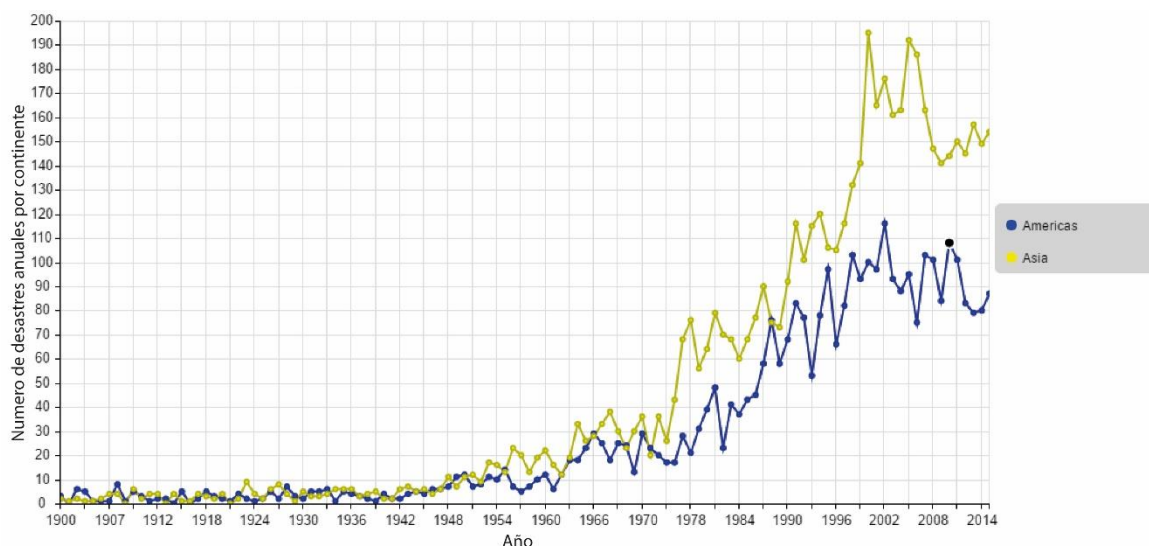


Figura 2.2: Cantidad de desastres naturales anuales, Fuente: (Modificado de EMDAT, 2016).

## 2.2 Predicción del comportamiento global

Los MCG, Modelos de Circulación General, son modelos numéricos que representan procesos físicos tanto en la atmósfera como en los océanos y sobre la superficie terrestre y son los métodos más avanzados que se tienen por ahora para poder pronosticar las respuestas meteorológicas al cambio climático (*von Storch et al, 1991*). Estos se basan en distintos escenarios de concentraciones globales de gases de efecto invernadero para futuro cercano y lejano, los que se muestran a continuación en la Tabla 2.1.

Luego, estos modelos calculan en tres dimensiones (Figura 2.3), utilizando diferentes tipos de grillas horizontales y verticales, incorporando todos los factores, internos y externos, que se correlacionan dentro de nuestra atmosfera, logrando predecir el comportamiento de ciertas variables como lo es la precipitación, vientos, temperaturas entre otros.

<sup>2</sup> Sigla en inglés, Emergency Events Database.

Tabla 2.1: Escenarios para el cambio climático a futuro. (Fuente: IPCC, 2013).

Años	2046 – 2065		2081 – 2100	
Escenario	Variación de la Temperatura	Rango probable	Variación de la Temperatura	Rango probable
	Media Anual		Media Anual	
RCP <sup>3</sup> 2,6	1,0 °C	[0,4;1,6] °C	1,0 °C	[0,3;1,7] °C
RCP4,5	1,4 °C	[0,9;2,0] °C	1,8 °C	[1,1;2,6] °C
RCP6,0	1,3 °C	[0,8;1,8] °C	2,2 °C	[1,4;3,1] °C
RCP8,5	2,0 °C	[1,4;2,6] °C	3,7 °C	[2,6;4,8] °C

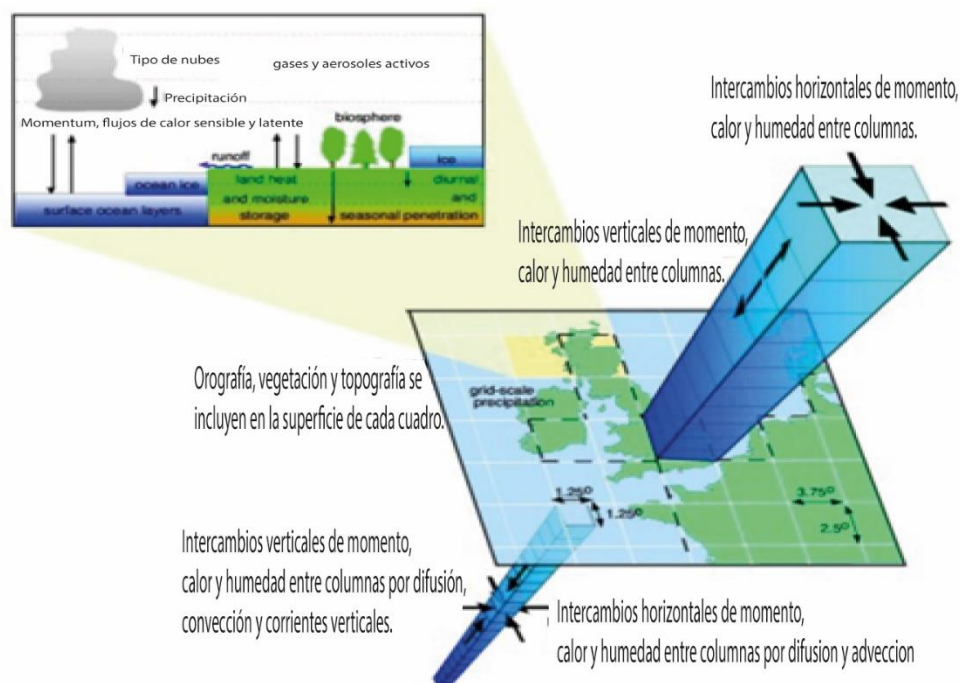


Figura 2.3: Modelos MCG. Fuente: (Modificado de Viner, 1998)

Así, el proyecto CMIP5<sup>4</sup> compara las predicciones de una larga lista de modelos de generales<sup>5</sup> y, con ello lograr una mayor precisión en los cálculos de esta disciplina.

Cuatro de estos modelos fueron utilizados en el estudio sobre las proyecciones de crecidas bajo distintos MCG (Lagos et al, 2015). Entre ellos se encuentra el modelo del

<sup>3</sup> Sigla en inglés, "Representative Concentration Pathways"

<sup>4</sup> Coupled Model Intercomparison Project, phase 5.

<sup>5</sup> Anexo, tabla H.1.

centro climático de Beijing versión 1.1 (BCC-CSM1.1), el cual entrega resultados bastante acertados, comparados con otros modelos (*Tonwen et al., 2015*) y tiene una resolución aproximada de  $2.8125^{\circ} \times 2.8125^{\circ}$ . El CMCC-CMS, por otro lado, es un modelo creado por el Centro Euro-Mediterráneo del Cambio Climático con una grilla horizontal de  $2^{\circ} \times 2^{\circ}$ . Otro modelo CMIP5 es el CSIRO-Mk3.6.0, con una grilla más pequeña que los dos modelos anteriores, de  $1.9^{\circ} \times 1.9^{\circ}$ , de interés particular en Australia donde ya ha sido probado exitosamente tanto para las fechas históricas como actuales (*Collier et al., 2011*). Por último, el modelo proveniente del Instituto de Meteorología Max Planck, MPI-ESM-LR con igual resolución al modelo anterior y con buenos resultados según el CMIP5, (*Miao, 2014*).

Debido a que estos modelos utilizan grillas tan grandes, donde la de menos dimensiones mostrada anteriormente es de  $1.9^{\circ} \times 1.9^{\circ}$  (en las cercanías de Santiago,  $1.9^{\circ} \approx 170$  kilómetros), es necesario encontrar los datos relevantes a puntos en particular, como lo es, por ejemplo, la lluvia en una cuenca (figura 4). Por ello, para variables hidrológicas, es necesario escalar esta grilla a una más pequeña donde  $0.125^{\circ}$  debiese ser suficiente para cuencas de hasta  $10.000 \text{ km}^2$  (*Salathe et al., 2002*). Existen dos tipos generales de escalamientos; el dinámico y, el que es utilizado en este texto, el escalamiento estadístico.

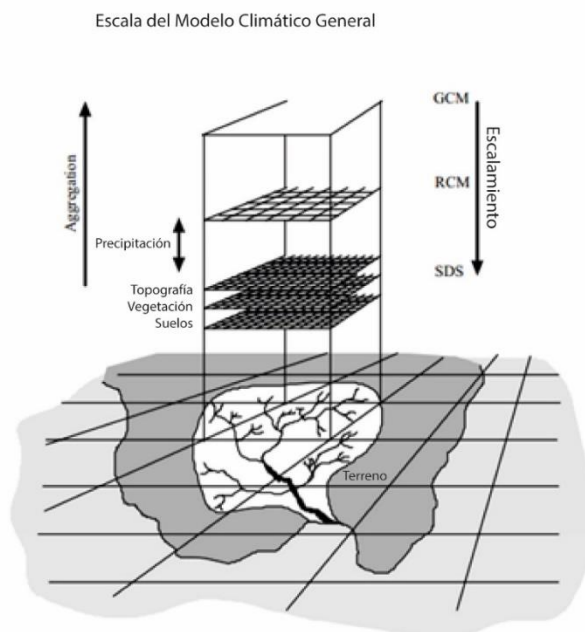


Figura 2.4: Escalamiento de los datos de un MCG. Fuente: (Modificado de Wilby et al., 1997)

El escalamiento estadístico, y en particular, el escalamiento usado en hidrología, ha sido ampliamente estudiado (*Wilby, 1997, von Storch, 1992*) y se ha logrado establecer cuatro tipos de metodologías:

- Modelos de Regresión: Establecen relaciones lineales o no lineales entre los datos a gran escala y los datos de interés, donde son válidos la utilización de redes neuronales y funciones de transferencia, las que son entrenadas utilizando datos históricos.
- Aproximaciones basadas en patrones climáticos: Se utilizan los datos promedios para definir una clasificación climática para la zona encontrando probabilidades de días húmedos seguidos, entre otras cosas. Luego, utilizando curvas de probabilidad de ambas zonas se logra enlazar ambas bases de datos creando una correlación.
- Generadores estocásticos de datos climatológicos: Se relaciona bastante con el tipo anterior y solo se diferencia en el sentido de su predicción donde, en este caso, se utiliza para cálculos de tiempos más pequeños.
- Modelación con áreas delimitadas: Modelos más sofisticados que crean una sub-grilla utilizando el MCG como condición de borde variable en el tiempo.

Sin embargo, se entiende que muchas de las formas de cálculo utilicen más de una de estas metodologías por lo que se entiende que estas son híbridas con el fin de maximizar la capacidad computacional, simplicidad y eficiencia de los métodos.

En el caso particular de los datos a utilizar en este trabajo (*Lagos et al, 2015*), se utilizó un escalamiento estadístico de dos partes, comenzando por la utilización de un escalamiento espacial mediante el inverso a la distancia según muestra la Ecuación 2.1.

*Ecuación 2.1:: Escalamiento Espacial*

$$P_e = \frac{\left(\frac{P_1}{R_1} + \frac{P_2}{R_2} + \frac{P_3}{R_3} + \frac{P_4}{R_4}\right)}{\sum_{i=1}^4 R_i}$$

Donde:

$P_e$  [mm]: Precipitación acumulada según escala de tiempo en la estación de interés.

$P_i$  [mm]: Precipitación acumulada según escala de tiempo en la esquina  $i$  de la grilla.

$R_i$  [km]: Distancia entre la estación la esquina " $i$ " de la grilla.

Al obtener estos datos, se busca una función de transferencia entre las curvas de duración de los datos observados y los escalados espacialmente en la estación de interés.

### 2.3 Cálculo de caudales

El cálculo de caudales es una de las bases de la hidrología. Sin embargo, existen muchas formas de estimar diferentes tipos de caudales, dentro de los cuales se encuentran caudales medios diarios, mensuales o anuales (en realidad para cualquier ventana de tiempo), caudales mínimos y máximos, etc. Además, estos cálculos pueden requerir de diferentes datos para su utilización, siendo algunos bastante complejos. Por ello, a continuación, se detallan ciertas formas simples de cálculo para estimar el caudal máximo instantáneo por efecto de una tormenta.

Uno de los métodos validados para el cálculo de caudales máximos para Chile (DGA, 1995) es el método de Verni y King (Verni y King, 1977). Sin embargo, tanto en el documento mencionado como en otros estudios (Parra, 2009), se especifica que la fórmula base presentada tiene ciertas limitaciones dado que el coeficiente 0,00618 depende del periodo de retorno y de la zona donde se utiliza por lo que se agrega un coeficiente extra que depende de las mismas variables. La fórmula queda de la siguiente forma, mostrada en la siguiente Ecuación 2.2.

*Ecuación 2.2: Método de Verni y King modificado*

$$Q_{max}(T) = C(T) * 0.00618 * A^{0.88} * Pp_{diaria}^{1.24}$$

Donde:

$Q_{max} \left[ \frac{m^3}{s} \right]$ : Caudal máximo instantáneo con periodo de retorno de “T” años.

$Pp_{diaria} [mm]$ : Precipitación máxima diaria para un periodo de retorno “T”.

$A [km^2]$ : Área pluvial de la cuenca.

$C(T) [-]$ : Coeficiente empírico definido por periodo de retorno y región<sup>6</sup>.

Como comenta la DGA en el manual de caudales máximos y mínimos (DGA, 1995), esta fórmula está limitada a cuencas con régimen pluvial o nivo-pluvial con áreas entre los 20 y los 10.000 km<sup>2</sup> para periodos de retorno menores a los 100 años. Además, el documento de la Dirección General de Aguas propone que su uso es válido entre la III<sup>a</sup>

---

<sup>6</sup> Tabla A.1 en el anexo.

y la IXª región de Chile, siendo esta fórmula la que mejor predice los caudales máximos instantáneos, comparados con otras fórmulas como el método racional, fórmula de Fuller y otros.

Para estimar el caudal máximo instantáneo, QMI, en el manual de eventos extremos de la DGA (1995) se incluye un método de cálculo simple el cual relaciona el caudal medio diario con un caudal máximo instantáneo para el mismo día. Si se tiene el caudal medio diario, solo es necesario encontrar un factor empírico que relacione ambos valores (Arias, 2011) para finalmente aplicar la Ecuación 2.3.

*Ecuación 2.3: Caudal medio diario*

$$Q_{max} = \alpha * Q_{diario} \quad Q_{max} = \beta * Q_{diario}$$

Donde:

$Q_{max} \left[ \frac{m^3}{s} \right]$ : Caudal máximo instantáneo.

$\alpha [-]$ : Coeficiente empírico para época pluvial recalculado<sup>7</sup>.

$\beta [-]$ : Coeficiente empírico para época de deshielo recalculado.

$Q_{diario} \left[ \frac{m^3}{s} \right]$ : Caudal medio diario.

Por último, el hidrograma de una corriente es la representación gráfica de la respuesta de una cuenca a una tormenta en particular con las variaciones de caudal dispuestas en forma cronológica. Así, un hidrograma de un solo máximo se aprecia como en la Figura 2.5,

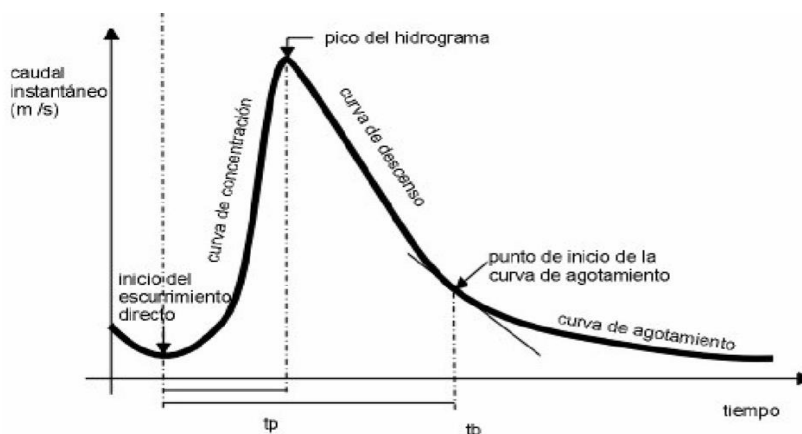


Figura 2.5: Hidrograma de ejemplo.

<sup>7</sup> En anexo, tabla A.2.

Para utilizar este tipo de herramientas en la predicción de caudales, se establece un hidrograma tipo para la cuenca asociado a una duración de lluvia de intensidad constante. Esto se hace estimando, a partir de un hidrograma conocido de precipitación efectiva conocida, un hidrograma de precipitación efectiva unitaria, es decir, un hidrograma unitario (HU).

Cuando no existe información subdiaria de caudales, se determina el tiempo base<sup>8</sup>, y el tiempo al máximo<sup>9</sup> en función de características geomorfológicas de la cuenca fáciles de determinar. Así, se pueden citar tres tipos de hidrogramas unitarios (Monroy, 2010):

- Los que relacionan las características del hidrograma unitario con las características de la cuenca (Snyder, Gray, otros).
- Los basados en HU adimensionales (SCS<sup>10</sup>).
- Basados en modelos de almacenamiento y tránsito en la cuenca (Clark, Nash, otros).

De todos estos, el de mayor interés para este estudio es el del SCS. En este HU se supone que, si el volumen escurrido por una tormenta es conocido, el caudal máximo se puede calcular considerando una forma triangular del hidrograma, como el de la Figura 2.6.

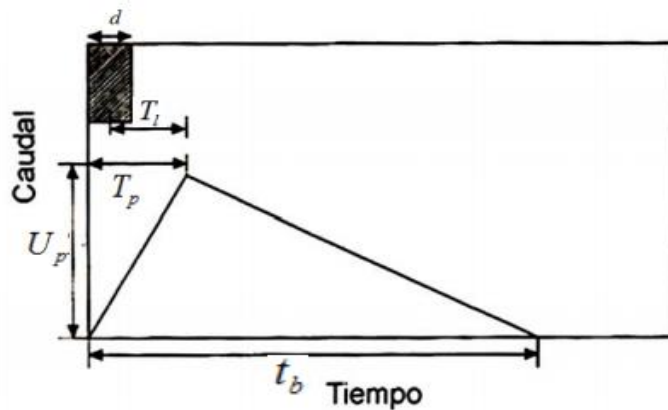


Figura 2.6: Hidrograma unitario triangular del SCS. (Fuente: Monroy, 2010)

Entonces, dada la forma del hidrograma, se pueden extraer relaciones geométricas como la mostrada en la.

Ecuación 2.4: Hidrograma unitario triangular (HUT).

$$V_u = \frac{Q_{max} * t_b}{2} = A * Pp_u$$

<sup>8</sup> Intervalo entre el inicio y el fin del escurrimiento directo.

<sup>9</sup> Tiempo entre el inicio del escurrimiento y el máximo del hidrograma.

<sup>10</sup> Soil Conservation Service, USA.



Donde:

$Q_{max} \left[ \frac{m^3}{s} \right]$ : Caudal máximo instantáneo.

$t_b [hr]$ : Tiempo base del hidrograma unitario triangular

$V_u [m^3]$ : Volumen escurrido debido a una precipitación unitaria.

$A [km^2]$ : Área pluvial de la cuenca.

$Pp_u [mm]$ : Precipitación unitaria.

De esto, y de la forma geométrica del HUT, se extraen las siguientes ecuaciones,

*Ecuación 2.5: (HUT) Caudal máximo.*

$$Q_{max} = 0208 * \frac{Pp_e * A}{t_b}$$

*Ecuación 2.6: (HUT) Tiempo base.*

$$t_b = 2,67 * t_p$$

*Ecuación 2.7: (HUT) Tiempo al peak.*

$$t_p = \frac{d}{2} + t_r$$

*Ecuación 2.8: (HUT) Tiempo de retraso de la cuenca.*

$$t_r = 0.6 * t_c$$

*Ecuación 2.9: (HUT) Tiempo de concentración de la cuenca.*

$$t_c = 0.000325 * \frac{L^{0.77}}{S^{0.385}}$$

*Ecuación 2.10: (HUT) Duración precipitación efectiva.*

$$d = 2\sqrt{t_c}$$

Donde:

$Q_{max} \left[ \frac{m^3}{s} \right]$ : Caudal máximo instantáneo.

$t_b [hr]$ : Tiempo base del hidrograma unitario triangular

$A [km^2]$ : Área pluvial de la cuenca.

$Pp_u$  [mm]: Precipitación unitaria.

$Pp_e$  [mm]: Precipitación unitaria.

$t_p$  [hr]: Tiempo al máximo.

$t_r$  [hr]: Tiempo de retraso de la cuenca.

$d$  [hr]: Duración precipitación efectiva.

$L$  [m]: Longitud cauce principal.

$S$  [m/m]: Pendiente media del cauce principal.

## 2.4 Caracterización de eventos extremos

Este acápite trata sobre los diferentes tipos de índices que existen para definir la duración e intensidad, tanto de sequías y crecidas hidrológicas como meteorológicas. En primer lugar, es necesario definir de forma correcta lo que ese entiende por un evento de estas características.

Por ello, se presentan a continuación ciertas definiciones que permiten esclarecer que es cada uno de estos fenómenos. En cuanto a las sequías, Vicario et al. (2015) especifica que existen 4 tipos de sequías, dos de las cuales son de interés:

- Meteorológicas: “...Basadas en datos climáticos, es una expresión de la desviación de la precipitación respecto del valor promedio durante un tiempo determinado...”
- Hidrológicas: “...Es una deficiencia en el caudal o volumen de aguas superficiales o subterráneas...”

En cuanto a la definición de sequía meteorológica, pocos autores difieren demasiado de la definición anterior, incluyendo o excluyendo ciertos términos. Otros autores han recolectado definiciones varias en cuanto a las sequías hidrológicas argumentando que pocas cuantifican lo que es una sequía, por lo que mucho menos podrían definir su intensidad (Wilhite et al, 1985), sin embargo, existen métodos que dan al menos una mirada de ello y se comentan más adelante.

Por otro lado, la definición de sequía hidrológica en el texto de Vicario excluye un elemento vital que no pasa desapercibido. En general, se incluye la demanda hídrica de la zona (Yevjevich et al, 1978; Beran et al, 1985; Wilhite et al, 1985) por lo que una sequía hidrológica quedaría mejor descrita por la definición de Fernández (1997)

“...Periodos prolongados de escasez de recursos hídricos capaces de provocar efectos adversos sobre la sociedad o los sistemas productivos...”.

También, es necesario definir el evento contrario a la sequía, es decir, un periodo húmedo en cuanto a precipitaciones o, desde una perspectiva hidrológica, una crecida o inundación, ya definidas en el acápite 2.3. Son varios los autores que proponen que un periodo húmedo es simplemente, el contrario a la sequía meteorológica, es decir, un aumento en la cantidad normal de precipitación en una cierta zona durante un cierto periodo de tiempo (Naranjo, 2012; Perez, 2013).

A base de lo anterior, a continuación, se analizan diferentes índices para cuantificar estos eventos.

#### 2.4.1 Índices de sequías meteorológicas

El índice de precipitación estandarizado, o IPE es un método de cuantificación de sequías y periodos húmedos extremadamente simple. Creado por McKee, Doesken y Kleist en el año 1993 con el fin de simplificar el cálculo de estos eventos, el índice es avalado por la Organización Mundial de Meteorología, OMM, que reconoce la facilidad del cálculo considerando que el único dato necesario es la precipitación (OMM, 2012).

Considerando esto, este mismo manual especifica que, a pesar de que se puede utilizar con datos entre 20 y 30 años, es preferible que la cantidad de datos sobrepase los 50 años para otorgarle fiabilidad a los resultados. Además de ello, el IPE otorga la posibilidad de calcular eventos a diferentes periodos de tiempo, pudiendo así estimar, por ejemplo, sequías que afectan a la agricultura (3 meses) como al déficit de aguas subterráneas (12 meses).

En cuanto a su cálculo, el método dicta 3 pasos a seguir:

1. Ajustar curva de probabilidad al set de datos.
2. Se convierte la serie de datos de interés en una distribución normal estandarizada (con media 0 y varianza 1) utilizando la siguiente Ecuación 2.11.

*Ecuación 2.11: IPE*

$$IPE_i = \frac{Pp_i - \overline{Pp}_{hist}}{\sigma_{hist}}$$

Donde:

$Pp_i \left[ \frac{mm}{tiempo} \right]$ : Precipitación en el periodo “i” en el intervalo de tiempo elegido.

$\overline{P}_{hist} \left[ \frac{mm}{tiempo} \right]$ : Media de la precipitación en el intervalo de tiempo elegido.

$\sigma_{hist} \left[ \frac{mm}{tiempo} \right]$ : Desviación estándar en el intervalo de tiempo elegido.

3. Luego, el IPE busca la distribución normal estandarizada de los datos para extraer un valor. Con este valor, se utiliza la Tabla 2.2 para definir qué tipo de periodo es.

Tabla 2.2: Niveles y denominaciones IPE.

Denominación (Sigla)	Cota Inferior	Cota Superior
Extremadamente Húmedo (E.H.)	2	$+\infty$
Severamente Húmedo (S.H.)	1.5	1.99
Moderadamente Húmedo (M.H.)	1	1.49
Normal o Aproximadamente Normal (A.N.)	-0.99	0.99
Moderadamente Seco (M.S.)	-1.49	-1
Severamente Seco (S.S.)	-1.99	-1.5
Extremadamente Seco (E.S.)	$-\infty$	-2

Basado en el análisis de antecedentes en Colorado (USA), Mckee determinó que cada intervalo tenía una probabilidad de ocurrencia y ésta se muestra a continuación.

Tabla 2.3: Tabla de probabilidad del IPE.

IPE	Categoría	Número de veces en 100 años	Severidad del evento
0 a -0,99	Sequía Leve	33	1 en 3 años
-1,00 a -1,49	Sequía Moderada	10	1 en 10 años
-1,50 a -1,99	Sequía Severa	5	1 en 20 años
< -2,00	Sequía Extrema	2,5	1 en 50 años

Dadas estas características, el manual de la OMM describe ciertas ventajas entre las cuales destacan:

- Apto para varias escalas temporales.
- Se pueden comparar diferentes zonas.
- Su carácter probabilístico otorga un contexto histórico.

Sin embargo, existen algunos textos que delimitan la funcionalidad real de este índice, donde se expresa la poca utilidad del IPE para zonas relativamente áridas dada la no normalidad de los datos por la gran cantidad de datos nulos (Naresh et al, 2009).

Además de ello, se estima que este índice no es realmente sensible a cambios rápidos del clima por lo que no es confiable utilizarlo para sequías o periodos húmedos cortos, menores a los 3 meses (*Wu et al, 2007*).

El segundo índice es el llamado “Palmer Drought Severity Index” o PDSI. Este es un método ampliamente usado en los Estados Unidos y el mundo tanto para estimar una sequía contemporánea como para comparar sequías históricas (*Alley, 1984*). En este caso, el PDSI requiere de más datos que el IPE ya que no solo considera la precipitación, sino que también utiliza datos de temperaturas, y con ella la humedad del suelo y posibilidad de recarga, lo que lo hace más complejo. En primer lugar, se define la Ecuación 2.12 para calcular la evapotranspiración mensual en base a la temperatura media del mes.

*Ecuación 2.12: Fórmula de Thornthwaite.*

$$ETP = ETP_{sc} * \frac{N * d}{12 * 30}$$

Donde:

$ETP[mm]$ : Evapotranspiración potencial del mes.

$ETP_{sc}[mm]$ : Evapotranspiración potencial del mes sin corregir.

$N [horas]$ : Máxima cantidad de horas de sol en el día.

$d[día]$ : Días del mes.

Para llegar a la Ecuación 2.12, se requieren utilizar las siguientes ecuaciones.

*Ecuación 2.13: (Thornthwaite) Índice de calor mensual.*

$$i = \frac{T^{1,514}}{5}$$

*Ecuación 2.14: (Thornthwaite) Índice de calor anual.*

$$I = \sum_1^{12} i$$

*Ecuación 2.15: (Thornthwaite) Evapotranspiración potencial sin corregir.*

$$ETP_{sc} = 16 * \left(\frac{10T}{I}\right)^a$$

*Ecuación 2.16: (Thornthwaite) Factor de temperatura.*

$$a = I^3 * 675 * 10^{-9} - I^2 * 771 * 10^{-7} + I * 1792 * 10^{-5} + 0,49239$$

Ecuación 2.17: (Thornthwaite) Horas de sol en el día 15.

$$N = \frac{24}{\pi} \omega_s$$

Donde:

$T$  [°C]: Temperatura media del mes.

$\omega_s$  [°]: Latitud.

En cuanto al agua útil, se calcula según la Ecuación 2.18,

Ecuación 2.18: Valor del agua útil.

$$VAU = CC - PMP$$

Donde:

$CC$  [mm]: Capacidad de campo.

$PMP$  [mm]: Punto de marchitez permanente.

Por otro lado, la cantidad máxima de agua que puede contener un suelo, o capacidad de campo, se extrae en base al tipo de suelo y, al supuesto de una profundidad de 3 metros de profundidad útil.

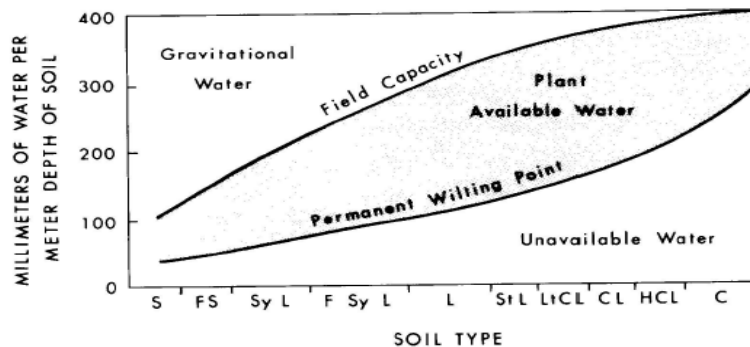


Figura 2.7: Capacidad de campo según tipo de suelo. (Fuente: Ven te Chow et al, 1988)

Por último, el punto de marchitez permanente se puede estimar según la capacidad de campo como se muestra en la Ecuación 2.19.

Ecuación 2.19: Punto de marchitez permanente,

$$PMP = \frac{CC}{1,85}$$

Donde:

$PMP$  [mm]: Punto de marchitez permanente.

$CC$  [mm]: Capacidad de campo.

Así, el PDSI define que el suelo se conforma por dos capas. Una superficial que puede guardar hasta 25 mm de agua y funciona como espejo de agua, y una segunda que obtiene el resto del agua útil posible en el suelo.

*Ecuación 2.20: (PDSI) Pérdida en capa superficial*

$$Pp \leq ETP \Rightarrow L_s = \min(S_s, ETP - Pp)$$

Donde:

$L_s$  [mm]: Pérdida en la capa superficial.

$S_s$  [mm]: Contenido de agua útil en la capa superficial (con un máximo de 25 mm).

$ETP$  [mm]: Evapotranspiración potencial del mes calculada con la Ecuación 2.12.

$Pp$  [mm]: Precipitación mensual.

*Ecuación 2.21: (PDSI) Pérdida en capa profunda*

$$Pp \leq ETP \Rightarrow L_u = (ETP - Pp - L_s) \frac{S'_u}{VAU}$$

Donde:

$L_u$  [mm]: Pérdida en la capa profunda.

$L_s$  [mm]: Pérdida en la capa superficial.

$S'_u$  [mm]: Contenido de agua útil en la capa profunda al inicio del mes.

$ETP$  [mm]: Evapotranspiración potencial del mes calculada con la Ecuación 2.12.

$Pp$  [mm]: Precipitación mensual.

$VAU$  [mm]: Valor del agua útil en el suelo.

Luego, se calculan ciertas variables de valores potenciales,

*Ecuación 2.22: (PDSI) Recarga Potencial*

$$PR = VAU - S'_u - S'_s$$

Ecuación 2.23: (PDSI) Pérdida Potencial

$$PL_S = \min(ETP, S_S) \quad PL_u = (ETP - PL_S) * \frac{S_u}{VAU}$$

$$PL = PL_S + PL_u$$

Ecuación 2.24: (PDSI) Escurrimiento Potencial

$$PRO = VAU - PR = S_S + S_u$$

Donde:

$VAU$  [mm]: Valor del agua útil en el suelo.

$S'_u$  [mm]: Contenido de agua útil en la capa profunda al inicio del mes.

$S'_s$  [mm]: Contenido de agua útil en la capa superficial al inicio del mes.

$ETP$  [mm]: Evapotranspiración potencial del mes calculada con la Ecuación 2.12.

Y con éstas, se calculan los siguientes coeficientes a nivel mensual,

Ecuación 2.25: (PDSI) Coeficiente de evapotranspiración para el mes "i"

$$\alpha_i = \frac{\overline{ETR}_i}{\overline{ETP}_i}$$

Donde:

$ETP_i$  [mm]: Evapotranspiración potencial del mes calculada con la Ecuación 2.12.

$ETR_i$  [mm]: Evapotranspiración real del mes calculada (pérdida total en las capas).

Ecuación 2.26: (PDSI) Coeficiente de recarga para el mes "i"

$$\beta_i = \frac{\overline{R}_i}{\overline{PR}_i}$$

Donde:

$R$  [mm]: Recarga real calculada.

$PR$  [mm]: Recarga potencial (Ecuación 2.22).

Ecuación 2.27: (PDSI) Coeficiente de escurrimiento para el mes "i"

$$\gamma = \frac{\overline{RO}_i}{\overline{PRO}_i}$$



Donde:

$RO[mm]$ : Ecurrimiento real calculado.

$PR [mm]$ : Ecurrimiento potencial (Ecuación 2.24).

*Ecuación 2.28: (PDSI) Coeficiente de pérdidas para el mes "i"*

$$\delta = \frac{\bar{L}_i}{P\bar{L}_i}$$

Donde:

$L[mm]$ : Pérdidas en las capas.

$PL [mm]$ : Pérdida potencial (Ecuación 2.23).

Luego, se define el déficit en cada mes utilizando los coeficientes calculados,

*Ecuación 2.29: (PDSI) Déficit*

$$d = P - (\alpha_i PE + \beta_i PR + \gamma_i PRO - \delta_i PL)$$

Dado lo anterior, se calcula el peso de cada mes en la Ecuación 2.32, para lo cual se debe buscar un factor climático según las ecuaciones Ecuación 2.30 y Ecuación 2.31.

*Ecuación 2.30: (PDSI) Factor Climático*

$$\hat{K}_i = 1,5 \log \left( \frac{\frac{\overline{ETP}_i + \bar{R}_i + \overline{RO}_i}{\bar{P}_i + \bar{L}_i} + 2,80}{\bar{D}_i} \right)$$

*Ecuación 2.31: (PDSI)  $\bar{D}_i$*

$$\bar{D}_i = \sqrt{\sum_{i=1}^{12} |d_i|}$$

*Ecuación 2.32: (PDSI) Factor de peso para mes "i"*

$$K_i = \frac{17,67\hat{K}_i}{\sum_{i=1}^{12} \bar{D}_i * \hat{K}_i}$$

Luego se calcula el índice "Z" para cada mes como,

*Ecuación 2.33: (PDSI) Factor Z*

$$Z = K_i * d$$

Y, por último, el índice de Palmer se obtiene de la

*Ecuación 2.34: (PDSI) Índice de Sequía.*

$$X_i = \frac{X_{i-1} + Z_i}{3 - 0,103 * X_{i-1}}$$

Así, cuando  $X_i$  es menor a -1,0 sea define el inicio de una sequía que termina cuando este mismo es mayor que -0,5. Luego, la severidad del mes de sequía se define según la Tabla 2.4.

Al igual que el IPE, define una serie de intervalos para definir qué tipo de evento está ocurriendo u ocurrió. Sin embargo, el método, en su base, utiliza un balance hídrico entre precipitación, evapotranspiración y recarga, pero de forma poco precisa. Esto, ya que utiliza cálculos medianamente arbitrarios como el cálculo de la evapotranspiración de Thornthwaite (1948) habiendo varias posibilidades mas (*Alley, 1984*).

*Tabla 2.4: Resultados para los valores del PDSI.*

<b>Valor</b>	<b>Denominación (Abreviación)</b>
<b><math>\geq 4,00</math></b>	Extremadamente húmedo (E.H.)
<b>3,00 a 3,99</b>	Muy húmedo (Mu.H.)
<b>2,00 a 2,99</b>	Moderadamente húmedo (Mo.H.)
<b>1,00 a 1,99</b>	Levemente húmedo (L.H.)
<b>0,50 a 0,99</b>	Periodo húmedo incipiente (H.I.)
<b>0,49 a -0,49</b>	Cercano a normal (C.A.)
<b>-0,50 a -0,99</b>	Sequía incipiente (S.I.)
<b>-1,00 a -1,99</b>	Sequía leve (L.S.)
<b>-2,00 a -2,99</b>	Sequía moderada (Mo.S.)
<b>-3,00 a -3,99</b>	Sequía severa (Mu.S.)
<b><math>\leq -4</math></b>	Sequía extrema (E.S.)

## 2.4.2 Índices de sequías hidrológicas

Dado que en el acápite 2.3 ya se especificaron los métodos para el cálculo de caudales máximos, en este caso solo se comentarán los métodos de sequías hidrológicas.

El primer método propuesto por Dracup et al. (1980a, 1980b) en el que define una sequía por cuatro componentes:

1. Variable que representa la oferta
2. Cuantificar la demanda mínima como un caudal con “x” probabilidad de excedencia.
3. Intervalo de tiempo a discretizar.

Así, se define que cuando la oferta, es decir el caudal, no es capaz de satisfacer la demanda mínima de recursos hídricos, se observa una sequía según la

Ecuación 2.35.

Ecuación 2.35: Índice con balance hídrico

$$Dif(i) = Q_i - Q_{85\%}$$

Donde:

$Dif \left[ \frac{m^3}{s} \right]$ : Diferencia donde, al ser negativa es sinónimo de sequía.

$Q_i \left[ \frac{m^3}{s} \right]$ : Caudal medio anual en el año “i”.

$Q_{85\%} \left[ \frac{m^3}{s} \right]$ : Caudal medio anual con 85% de probabilidad de excedencia.

Por lo que, el déficit o superávit del recurso hídrico se puede representar como en la Figura 2.8,

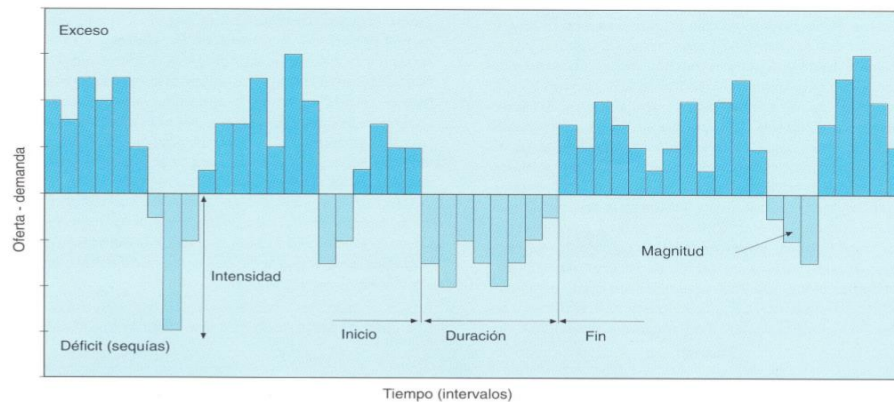


Figura 2.8: Definición de sequías según el método propuesto por Dracup. (Fuente: Fernández, 1997).

Este método ya fue utilizado en la zona central Chile por Fernández (1997), donde realizó una caracterización de los caudales de las zonas de estudio. Luego, la intención del método es predecir el riesgo de sequía, lo que se determina de forma probabilística utilizando la información obtenida del balance hídrico y aplicando un caudal límite. En simples palabras, lo que se busca es una probabilidad de excedencia de la demanda sobre la oferta.

Por último, se presenta el índice de caudales diarios bajos (*Cammarelli et al, 2016*) que utiliza el caudal del 95% de excedencia para fijar el límite entre la sequía y la no sequía. Dado que el análisis se realiza a nivel diario, se requiere de un caudal límite por día, por lo tanto, se extraen 365 datos de caudales del 95%. Sin embargo, para calcular cada uno de los caudales límite, se utilizan los datos de los 30 días más cercanos (15 pasados y 15 futuros) para crear la curva de duración. Hecho esto, este índice se puede resumir en la Ecuación 2.36.

*Ecuación 2.36: Índice de caudales diarios bajos*

$$Q(t = i) \leq Q_{95\%}^i \Rightarrow \text{Inicio Sequía}$$

$$Q(t = i) > Q_{95\%}^i \Rightarrow \text{Fin Sequía}$$

Gracias a esto se pueden calcular, no solo la cantidad del periodo en sequía, sino que también, la duración media y máxima de éstas durante el periodo de estudio.

## 2.5 Proyecciones de Caudales Medios Diarios en Siglo XXI

El estudio presentado en la SOCHID sobre proyecciones de caudales medios diarios en cuencas andinas en base a cuatro modelos de circulación general diferentes (*Lagos et al. 2015*) presenta resultados variados en cuanto a los cambios de las precipitaciones máximas diarias donde se pueden encontrar diferencias entre los modelos y en cada estación. Un ejemplo de esto son los resultados mostrados en la Figura 2.9, ambas predicciones en Armerillo, donde, en el lado izquierdo se puede notar una leve variación en la curva del futuro lejano (2051-2100) con respecto al histórico con el modelo BCC\_CMS1.1, a diferencia del lado derecho, donde el modelo CMCC\_CMS predice un aumento considerable de las tormentas máximas.

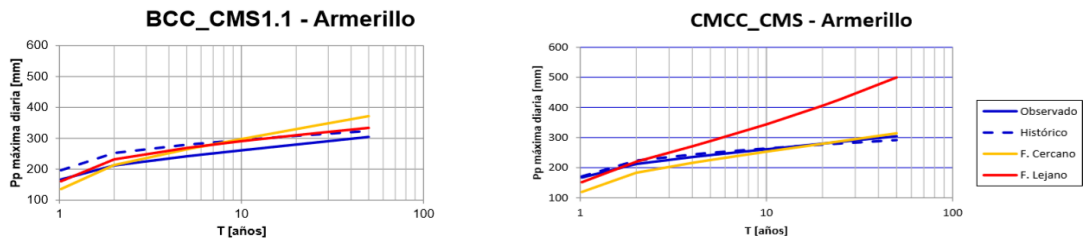


Figura 2.9: Predicciones de precipitaciones máximas diarias según dos modelos diferentes. (Lagos et al. 2015).

Sin embargo, las predicciones hechas en cuanto a temperaturas medias anuales son bastante más consecuentes entre sí, pronosticando alzas generales de esta variable durante eventos de lluvia, como se muestra en la Figura 2.10.

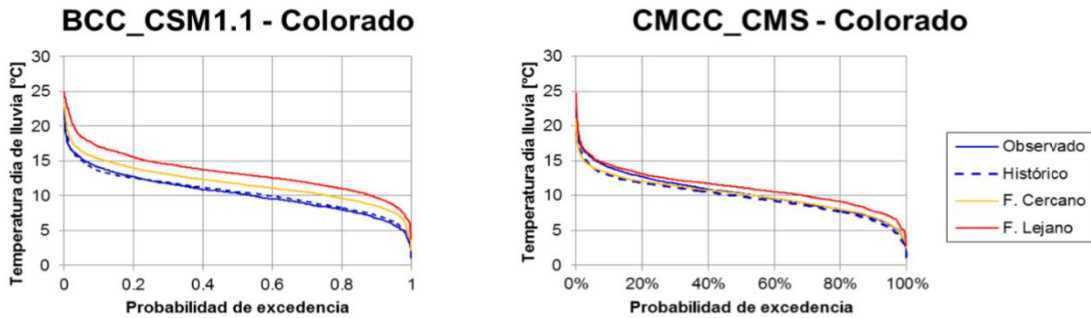


Figura 2.10: Curvas de duración de temperatura media en días con lluvia para diferentes modelos en la estación Colorado. (Fuente: Lagos et al. 2015).

En cuanto a las variaciones de las crecidas de 10, 20 y 50 años de periodo de retorno, los resultados del estudio muestran un aumento general hacia el futuro lejano en todos los modelos. Sin embargo, se puede notar ciertas disminuciones según algunos modelos, como lo muestra la Figura 2.11.

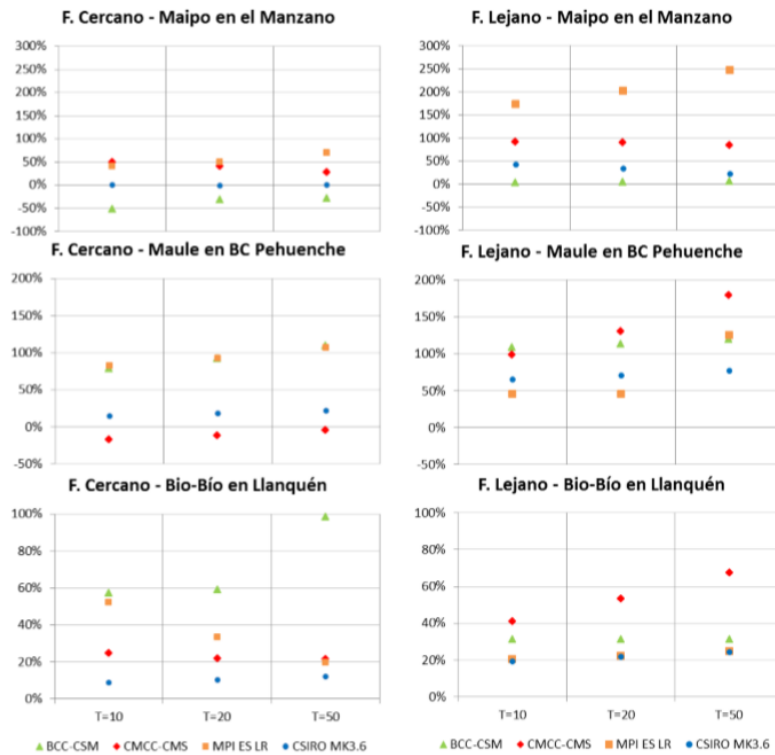


Figura 2.11: Variación de los caudales con diferentes periodos de retorno en diferentes estaciones fluviométricas.

Los datos de precipitación diaria y temperatura media diaria usados para determinar caudales medios diarios modelados mediante el modelo WEAP<sup>11</sup> son los utilizados en este trabajo.

<sup>11</sup> Water Evaluation and Planning System.

### 3. Zona de estudio

Este trabajo se enfoca en 4 cuencas de Chile las que se distribuyen desde IV<sup>a</sup> hasta la IX<sup>a</sup> región como se presenta en la Figura 3.1 a continuación.

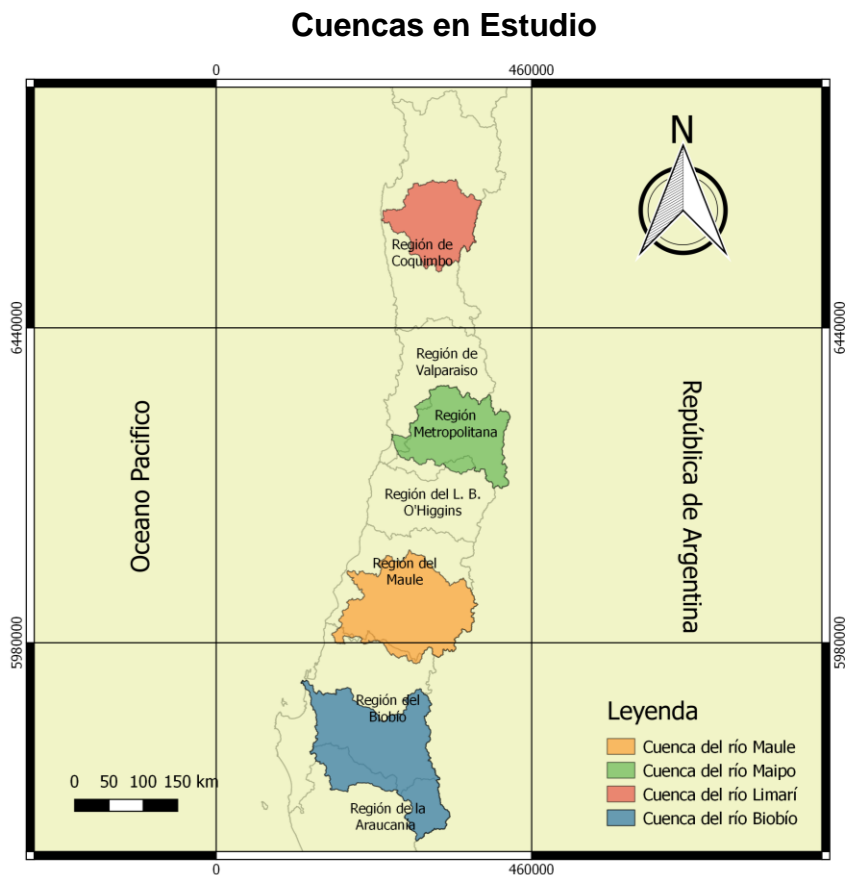


Figura 3.1: Mapa de las cuencas donde se realiza el estudio.

Además, considerando que se requieren de datos meteorológicos en todas las cuencas, y datos fluviométricos en tres de ellas, la Tabla 3.1 muestra las coordenadas y características de cada una de ellas.

A continuación, se presenta un breve resumen de las características de cada cuenca y como se definen las sub-cuencas donde se realizan los cálculos de crecidas y sequías.

Tabla 3.1: Datos de las estaciones que se utilizan en este trabajo.

Cuenca	Estación	Tipo	UTM N [m]	UTM E [m]	Altitud [m.s.n.m]
<b>Río Biobío</b>	Quilaco	Meteorológica	5825399	235537	225
	Laguna de la Laja	Fluviométricos	5861449	290215	1330
<b>Río Maule</b>	Armerillo	Meteorológica	6047150	312059	492
	Colorado	Meteorológica	6053778	295308	420
	Laguna de la Invernada	Fluviométricos	6044725	339254	1317
<b>Río Maipo</b>	Pirque	Meteorológica	6272526	352676	659
<b>Río Limarí</b>	Rio Volcán antes junta Río Maipo	Fluviométricos	6158303	387963	1302
	Pichasca	Meteorológica	6635892	320345	725
	Carén	Meteorológica	6584776	330468	740

### 3.1 Cuenca del Río Biobío

La cuenca del Río Biobío, tal como se muestra en la Figura 3.2, se ubica mayoritariamente en la VIIIª y parte de la IXª región, con una superficie de 24.264 km<sup>2</sup>. Además, se especifica que se limita entre los paralelos 36°42'-38°49' sur y los meridianos 71°-73°20' longitud oeste.

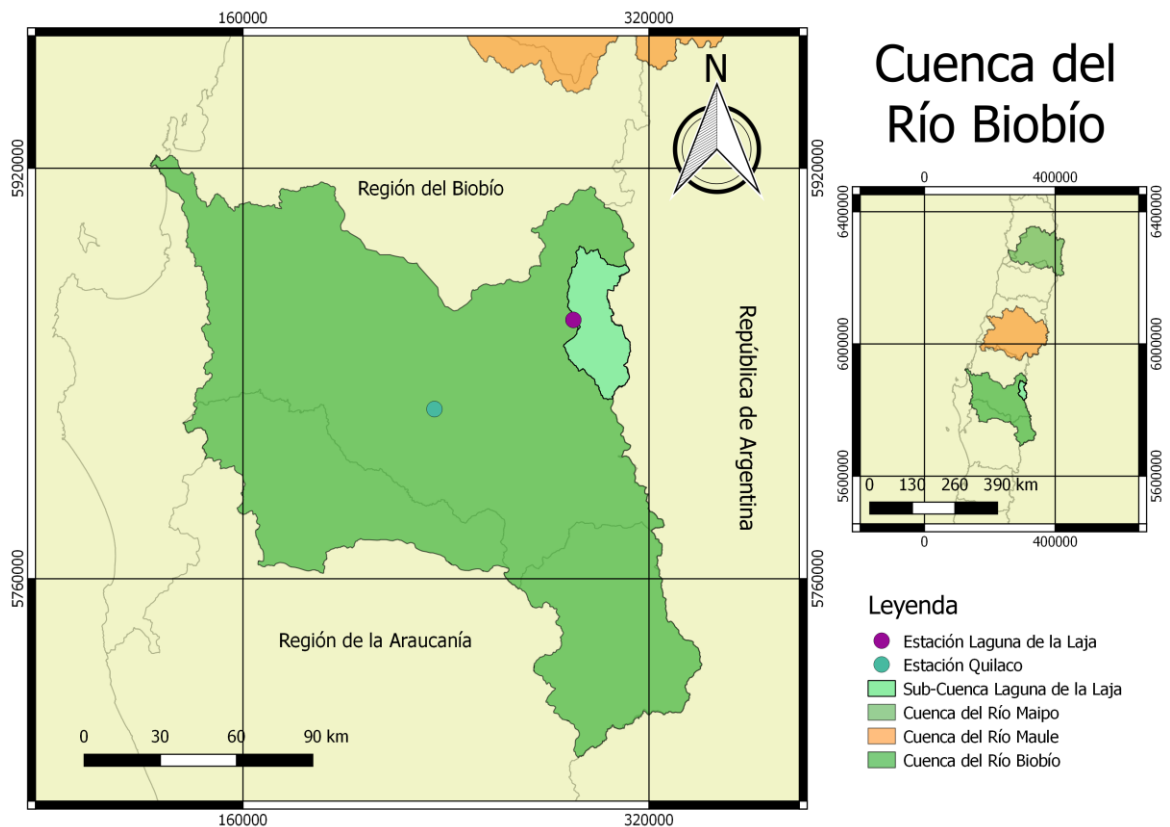


Figura 3.2: Mapa de la cuenca del Biobío y la sub-cuenca Laguna de la Laja.



El clima de la cuenca queda delimitado por la transición entre dos tipos, el mediterráneo y el templado húmedo, típico de la zona sur. Considerando la zona de interés, parte alta de la cuenca, se especifica que las temperaturas son bajas fluctuando entre los 6.9 y 10°C, con precipitaciones que se concentran en los meses de mayo y agosto totalizando una magnitud anual media de 2.190 mm. La curva de variación estacional promedio en la estación Quilaco, se presenta en la Figura 3.3.

Sobre los 1.500 m.s.n.m., el clima cambia a frío de altura con lluvias constantes mayores a los 2000 mm anuales y con temperaturas bajas dando cabida a zonas con nieves (DGA, 2004).

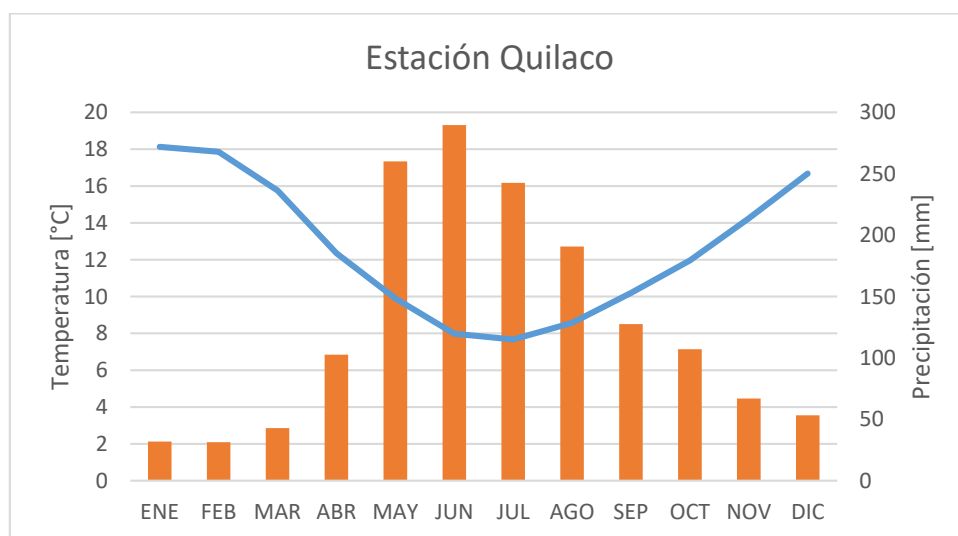


Figura 3.3: Datos en la estación meteorológica que se utiliza en el trabajo.

En las partes bajas de la cuenca, la evaporación alcanza los 122,2 mm por año, mientras en las partes altas se estiman 101,6 mm/año (DGA, 2004).

Entre los cauces de la cuenca del Río Biobío se distinguen los ríos Biobío, Claro, Laja y Malleco.

Dentro de esta cuenca, en la zona alta, se encuentra la estación “Laguna Laja”, cuyas características se muestran en la Tabla 3.2 y, que drena un área con una curva hipsométrica mostrada en la Figura 3.4. Así, esta sub-cuenca se utiliza para los cálculos de crecidas e índices que se realizan en este trabajo, como representativo de la cuenca del río Biobío.

Tabla 3.2: Características de la estación a ocupar para las crecidas e índices.

Nombre Estación	Laguna de la Laja
Área drenada [km <sup>2</sup> ]	966
Pendiente Media [m/m]	0,01
Cota Media [m.s.n.m.]	1735
Cota Máxima [m.s.n.m.]	3649,5
Largo máximo escurrimiento [km]	47,467
Este [m]	290215
Norte [m]	5861449

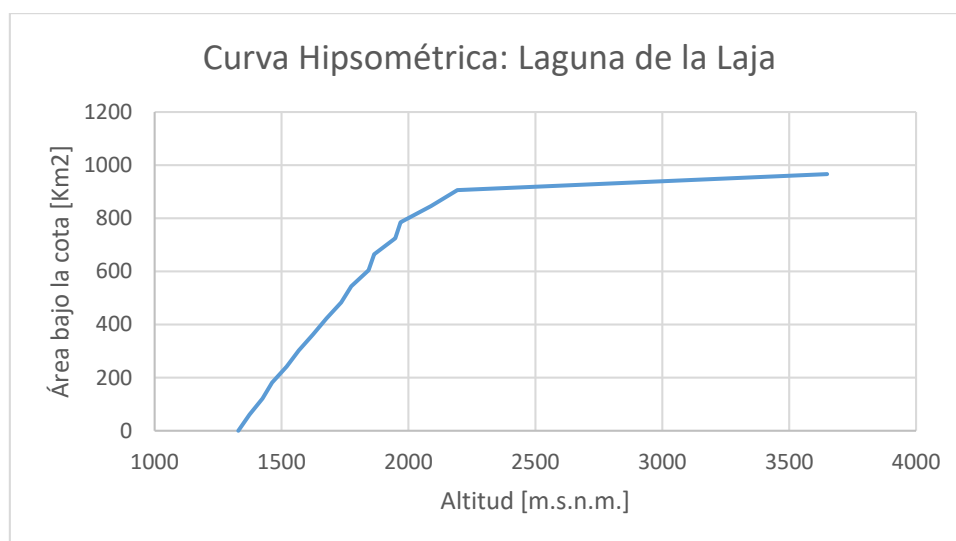


Figura 3.4: Curva hipsométrica del área drenada por la estación.

Por otro lado, en la Tabla 3.3 se muestran las medias por periodo de las temperaturas medias diarias en la estación Quilaco para cada modelo.

Tabla 3.3: Valores promedios por periodo de las temperaturas medias diarias para cada modelo. (Fuente: Lagos et al. 2015)

Promedio Temperaturas Medias Diarias [°C]	BCC-CSM	CMCC-CMS	CSIRO	MPI-ESM
<b>Serie completa (1970-2100)</b>	14,5	14,4	14,3	14,8
<b>Histórico (1970-2005)</b>	13,0	13,1	13,1	13,1
<b>F. Cercano (2006-2050)</b>	14,0	13,8	13,9	14,2
<b>F. Lejano (2051-2100)</b>	16,1	15,9	15,5	16,4

Además, se agrega en la Tabla 3.4 la variación de las medias de los caudales medios anuales por periodo en la estación Laguna de la Laja según los 4 modelos que se utilizan en este trabajo.

Tabla 3.4: Caudales medios anuales por periodo para cada uno de los 4 modelos en Laguna de la Laja. (Fuente: Lagos et al. 2015)

Promedio Caudal [m <sup>3</sup> /s]	BCC-CSM	CMCC-CMS	CSIRO	MPI-ESM
<b>Serie completa (1970-2076)</b>	55,9	54,7	52,3	55,1
<b>Histórico (1970-2005)</b>	60,3	59,9	58,4	58,6
<b>F. Cercano (2006-2050)</b>	56,2	55,3	50,8	58,1
<b>F. Lejano (2051-2076)</b>	49,4	46,5	46,4	44,9

Por último, se agrega la Tabla 3.5 con los estadísticos de las precipitaciones máximas diarias para cada periodo.

Tabla 3.5: Estadísticos de las precipitaciones diarias máximas por periodo y modelo. (Fuente: Lagos et al. 2015)

Promedio PP <sub>diaria</sub> Máximas [mm]	BCC-CSM		CMCC-CMS		CSIRO		MPI-ESM	
	Media	$\sigma$	Media	$\sigma$	Media	$\sigma$	Media	$\sigma$
<b>Serie completa (1970-2100)</b>	92,6	33,0	88,6	35,9	82,5	25,9	81,1	25,9
<b>Histórico (1970-2005)</b>	83,0	20,8	84,0	19,9	80,3	21,1	79,5	19,8
<b>F. Cercano (2006-2050)</b>	101,6	38,8	95,7	39,5	80,6	22,8	91,3	25,4
<b>F. Lejano (2051-2100)</b>	91,5	32,3	85,4	40,1	85,8	30,9	72,5	24,8

### 3.2 Cuenca del Río Maule

La cuenca del Río Maule, tal como se muestra en la Figura 3.5, se ubica en la VII<sup>a</sup> región con un área total de 20.295 km<sup>2</sup>, siendo la cuarta más grande a nivel nacional.

Su clima es del tipo mediterráneo con al menos dos meses consecutivos de verano con déficit hídrico dadas las condiciones mostradas en la Figura 3.6. En general los usos de aguas en la cuenca son para actividades agropecuarias e industriales además de la agricultura (DGA, 2004).

En la cuenca del Río Maule, cauce principal de la cuenca, existen grandes cauces tanto en la parte baja como en la parte alta donde destacan los ríos Loncomilla, Claro y Achibueno.

Dentro de la cuenca se encuentran las estaciones “Armerillo” y “Colorado”, las cuales se utilizan en este trabajo para obtener datos de precipitaciones y temperaturas, respectivamente. En este sentido, la Figura 3.6 muestra el contraste entre las temperaturas medias mensuales y la media en las precipitaciones mensuales de las estaciones mencionadas.

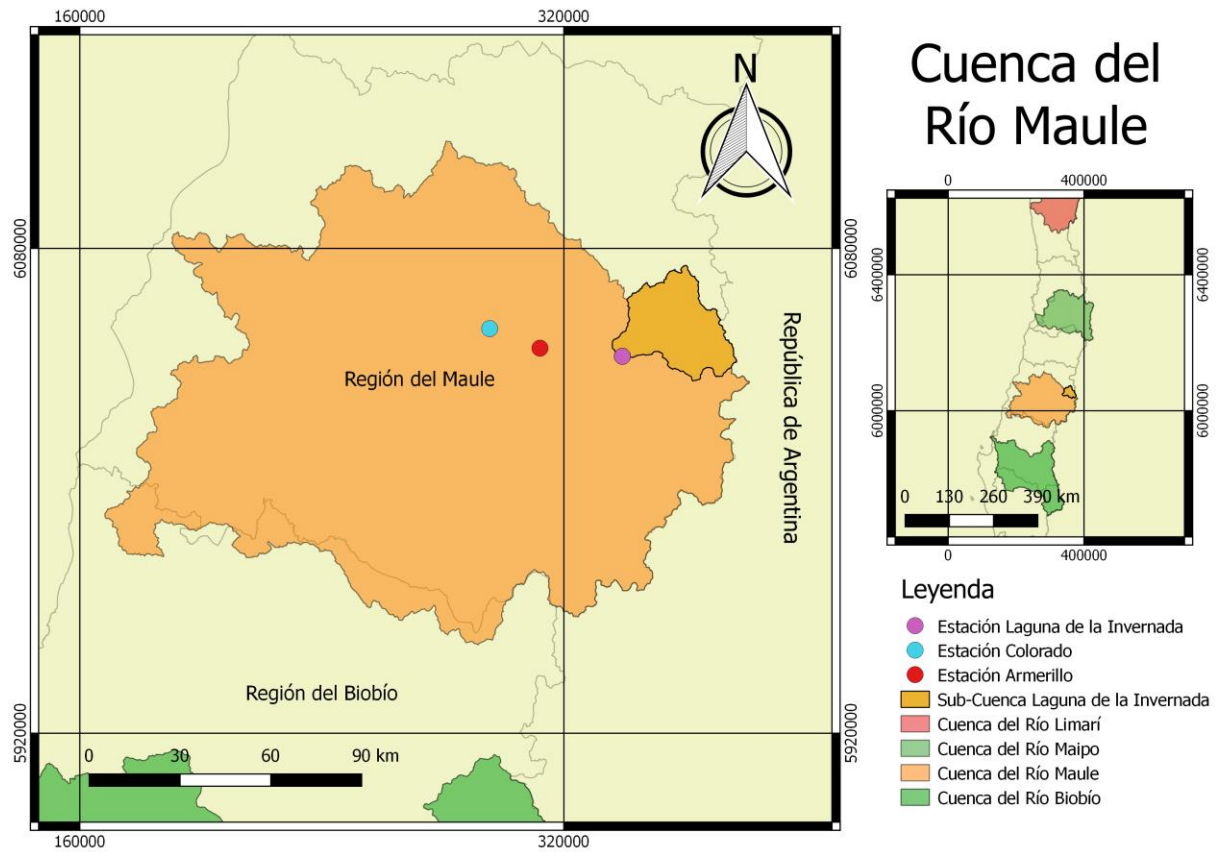


Figura 3.5: Mapa de la cuenca del río Maule y la sub-cuenca Laguna de la Invernada.

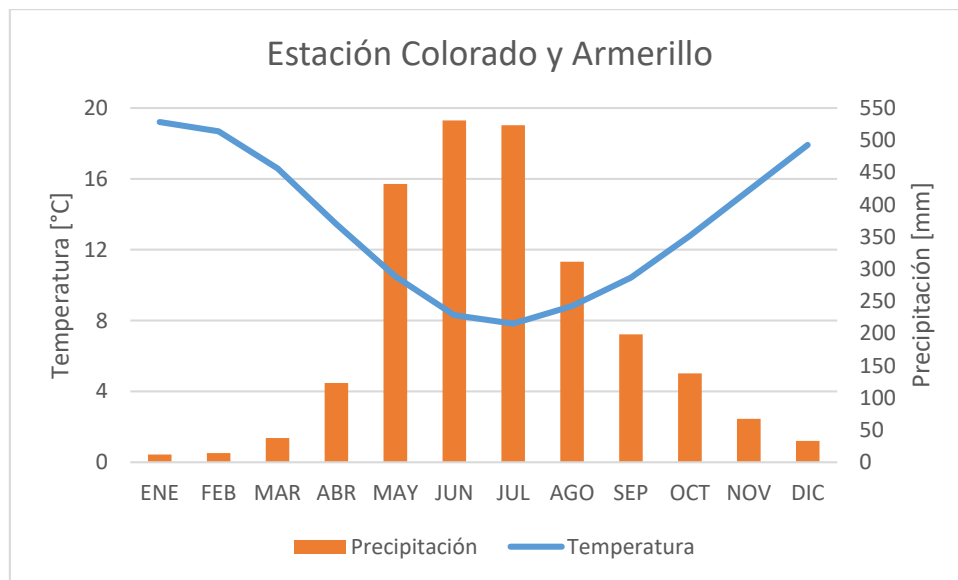


Figura 3.6: Contraste entre las precipitaciones y temperaturas medias mensuales en la cuenca del río Maule.

Dentro de la cuenca del río Maule, se encuentra la estación “Laguna de la Invernada” posicionada a la salida de la Laguna de mismo nombre. Considerando esta como punto de salida, se define una cuenca con las características mostradas en la Tabla 3.6 y con

una curva hipsométrica mostrada en la Figura 3.7. Dicha sub-cuenca se utiliza para realizar cálculos de crecidas e índices ejemplificadores para la cuenca del río Maule.

Tabla 3.6: Características de la cuenca definida por la estación "Laguna Invernada".

Nombre Estación	Laguna de la Invernada
Área drenada [km <sup>2</sup> ]	865
Pendiente Media [m/m]	0,03
Cota Media [m.s.n.m.]	2526,3
Cota Máxima [m.s.n.m]	3947
Largo máximo escurrimiento [km]	31
Este [m]	339254
Norte [m]	6044725

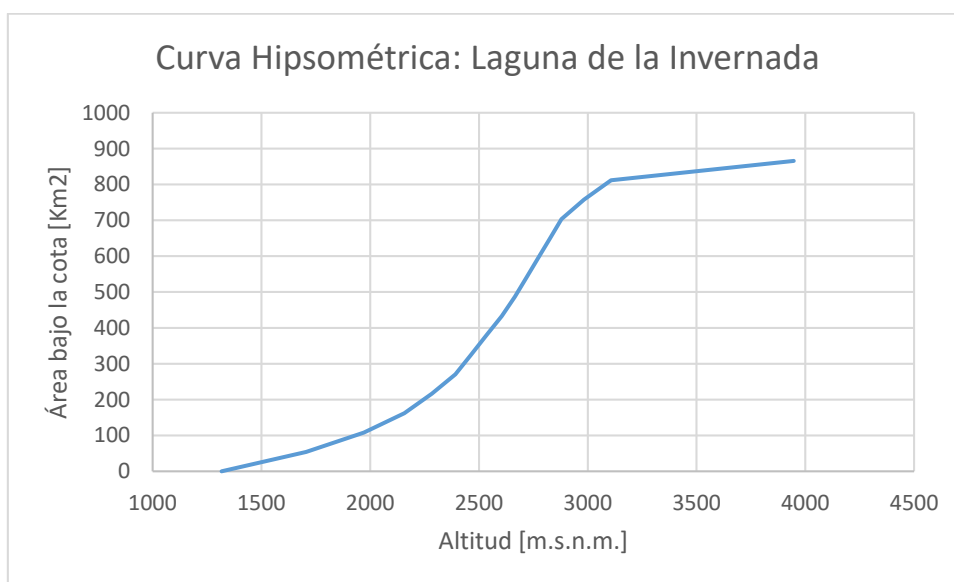


Figura 3.7: Curva hipsométrica de la cuenca que descarga por la estación "Laguna de la Invernada".

En cuanto a los datos de temperatura de la estación Colorado, la Tabla 3.7 muestra la variación del promedio por periodo de las temperaturas medias diarias.

Tabla 3.7: Promedios por periodo de las temperaturas medias diarias. (Fuente: Lagos et al. 2015)

Promedio Temperaturas Medias Diarias [°C]	BCC-CSM	CMCC-CMS	CSIRO	MPI-ESM
<b>Serie completa (1970-2100)</b>	15,3	15,0	14,7	15,4
<b>Histórico (1970-2005)</b>	13,7	13,7	13,6	13,9
<b>F. Cercano (2006-2050)</b>	14,8	14,3	14,3	14,9
<b>F. Lejano (2051-2100)</b>	17,0	16,6	15,8	17,1

Con relación a los datos fluviométricos, se agrega la Tabla 3.8 que muestra el cambio en el caudal medio por periodo para cada uno de los modelos en la estación Laguna de la Invernada.

Tabla 3.8: Caudal medio por periodo en la estación Laguna de la Invernada. (Fuente: Lagos et al. 2015)

Promedio Caudal [m <sup>3</sup> /s]	BCC-CSM	CMCC-CMS	CSIRO	MPI-ESM
<b>Serie completa (1970-2076)</b>	45,1	44,0	42,6	46,5
<b>Histórico (1970-2005)</b>	49,1	48,2	49,4	49,5
<b>F. Cercano (2006-2050)</b>	44,3	46,5	40,6	50,0
<b>F. Lejano (2051-2076)</b>	41,0	33,3	36,4	36,1

Por último, la Tabla 3.9 muestra los estadísticos de los diferentes modelos con respecto a las precipitaciones máximas diarias por periodo en la estación Armerillo.

Tabla 3.9: Estadísticos de las precipitaciones máximas diarias en Armerillo. (Fuente: Lagos et al. 2015)

Promedio PP <sub>Diaria</sub> Máximas [mm]	BCC-CSM		CMCC-CMS		CSIRO		MPI-ESM	
	Media	$\sigma$	Media	$\sigma$	Media	$\sigma$	Media	$\sigma$
<b>Serie completa (1970-2100)</b>	194,8	58,0	191,9	69,6	185,3	58,0	186,6	58,0
<b>Histórico (1970-2005)</b>	197,8	42,4	198,1	59,4	182,2	51,9	197,1	53,0
<b>F. Cercano (2006-2050)</b>	184,4	55,9	179,6	61,7	182,5	54,9	201,5	66,6
<b>F. Lejano (2051-2100)</b>	202,4	67,9	198,7	81,0	190,0	64,3	165,2	53,6

### 3.3 Cuenca del Río Maipo

La cuenca del Río Maipo, tal como se muestra en la Figura 3.8, se encuentra, prácticamente en su totalidad, en la región Metropolitana además de incluir pequeñas partes en la V<sup>a</sup> y la VI<sup>a</sup> región. Su área en desembocadura es de 15.304 km<sup>2</sup>, quedando definida entre los paralelos 32°55'-34°15' latitud sur y los meridianos 69°55'-71°33' longitud oeste.

La cuenca tiene un clima templado de tipo mediterráneo con estación seca prolongada y frío de altura en la Cordillera de los Andes. En cuanto a las precipitaciones, se presenta la Figura 3.9 la cual muestra la distribución de precipitaciones durante el año y las temperaturas medias mensuales en la estación de Pirque. En cuanto a la disponibilidad de recursos hídricos es posible señalar que la evaporación en la cuenca en el sector centro alcanza 1.200 mm/año mientras en la zona alta, esta es del orden de 1.760 mm/año (DGA, 2004).

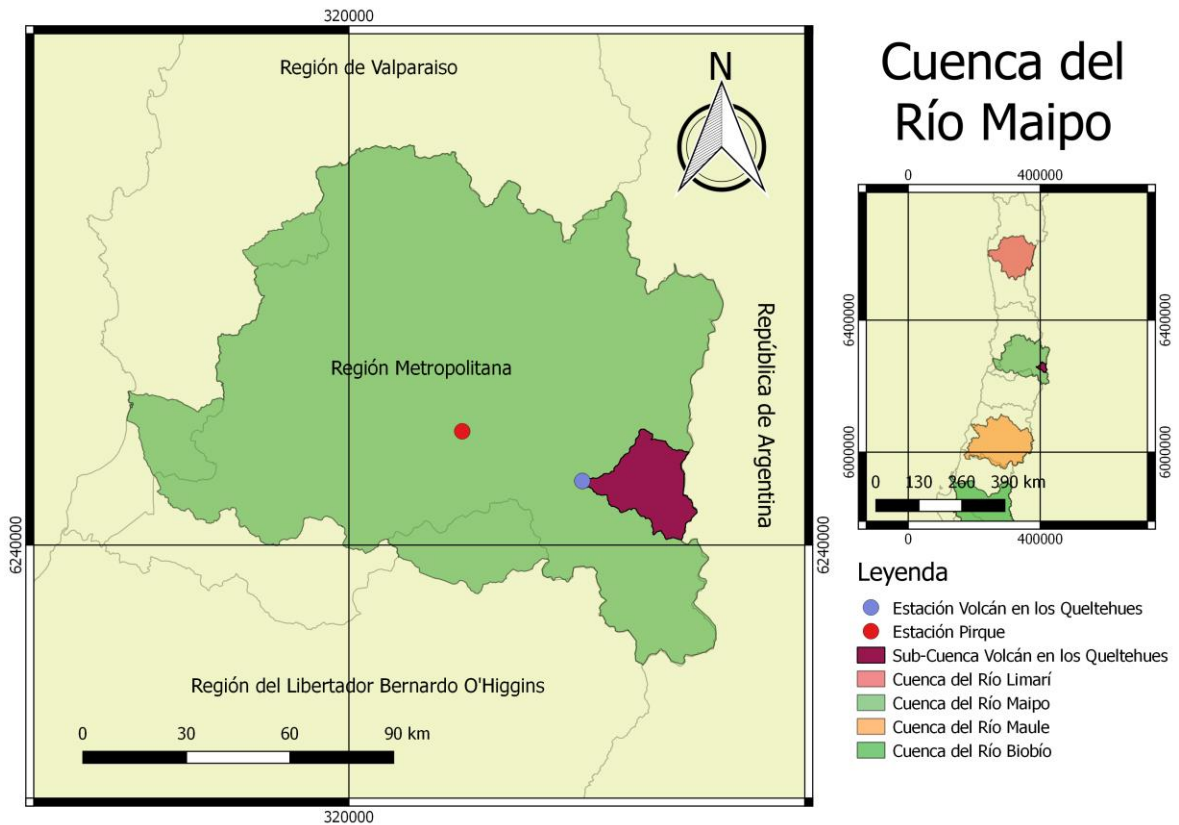


Figura 3.8: Cuenca del río Maipo y la sub-cuenca Río Volcán en Queltehues.

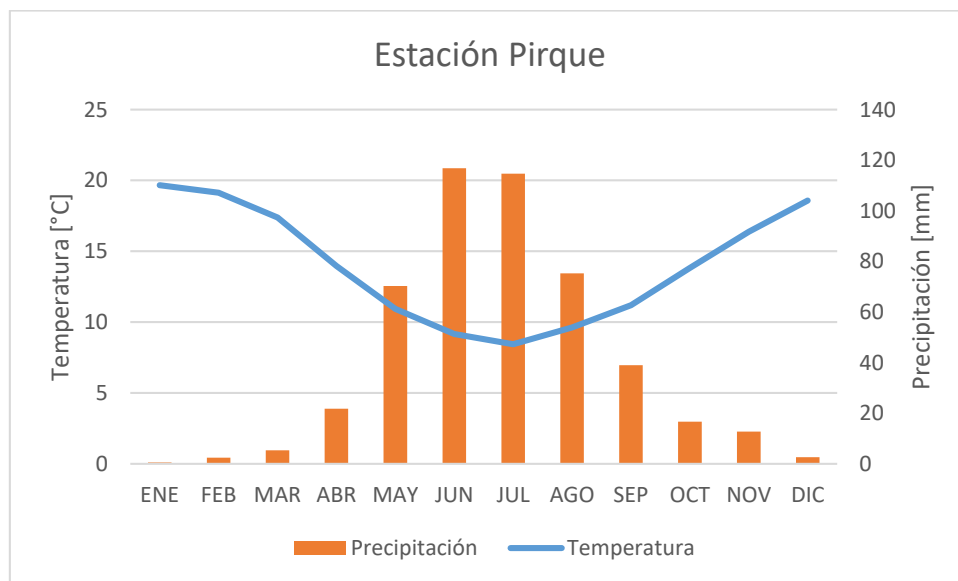


Figura 3.9: Temperatura media mensual y precipitación mensual para cada mes en la estación Pirque.

En cuanto a los cauces, existen varios de considerables tamaños y con gran actividad humana, (agrícola, hidroeléctrica, consumo, etc.). Entre ellos, en la parte alta de la cuenca se destacan los ríos Maipo, Mapocho, yeso y Colorado:

El Río Maipo es el cauce principal de la cuenca con un largo de 250 kilómetros y constituye el principal recurso hídrico de la región Metropolitana. Además, la línea de nieve se encuentra, aproximadamente a los 2.000 m.s.n.m. En la desembocadura, el río Maipo tiene un régimen pluvial (DGA, 2004).

En la parte alta de esta cuenca se encuentra la estación seleccionada para el análisis, llamada "Río Volcán en Queltehues". Utilizando esta estación como punto de salida, se delimita una cuenca de las características mostradas en la Tabla 3.10 cuya curva hipsométrica es mostrada en la Figura 3.10.

Tabla 3.10: Datos de cuenca drenada por la estación "Volcán en los Queltehues".

Nombre Estación	Volcán en los Queltehues
Área drenada [km <sup>2</sup> ]	524
Pendiente Media [m/m]	0,03
Cota Media [m.s.n.m.]	3622
Cota Máxima [m.s.n.m.]	6107
Largo máximo escurrimiento [km]	35,6
Este [m]	387963
Norte [m]	6258303

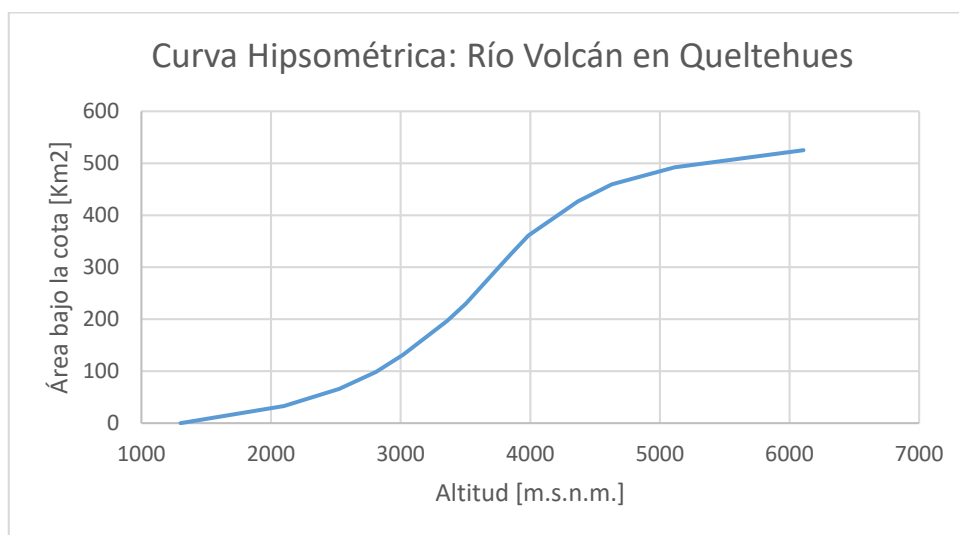


Figura 3.10: Curva hipsométrica de la cuenca delimitada por la estación "Río Volcán en Queltehues".

De los datos de temperatura de los 4 modelos en la estación Pirque se puede extraer la siguiente información en la Tabla 3.11.



Tabla 3.11: Promedios por periodo de las temperaturas medias diarias por modelo. (Fuente: Lagos et al. 2015)

Promedio Temperaturas Medias Diarias [°C]	BCC-CSM	CMCC-CMS	CSIRO	MPI-ESM
<b>Serie completa (1970-2100)</b>	15,7	15,6	15,4	15,7
<b>Histórico (1970-2005)</b>	14,3	14,3	14,3	14,3
<b>F. Cercano (2006-2050)</b>	15,2	14,9	15,0	15,2
<b>F. Lejano (2051-2100)</b>	17,0	17,0	16,6	17,1

Además, se agrega la siguiente Tabla 3.12 la que muestra los caudales promedio por periodo para los cuatro modelos en la estación Río Volcán en Queltehues.

Tabla 3.12: Caudales medios por periodo en la estación Río Volcán en Queltehues. (Fuente: Lagos et al. 2015)

Promedio Caudal [m3/s]	BCC-CSM	CMCC-CMS	CSIRO	MPI-ESM
<b>Serie completa (1976-2076)</b>	16,7	16,3	14,2	17,0
<b>Histórico (1976-2005)</b>	19,0	19,5	18,2	19,5
<b>F. Cercano (2006-2050)</b>	16,6	17,1	13,2	17,3
<b>F. Lejano (2051-2076)</b>	14,0	11,4	11,2	13,5

Finalmente, se agrega la Tabla 3.13 que muestra los estadísticos de las precipitaciones máximas diarias de la estación Pirque.

Tabla 3.13: Estadísticos de las precipitaciones máximas diarias por periodo de la estación Pirque. (Fuente: Lagos et al. 2015)

Promedio $PP_{\text{Diaria}}$ Máximas [mm]	BCC-CSM		CMCC-CMS		CSIRO		MPI-ESM	
	Media	$\sigma$	Media	$\sigma$	Media	$\sigma$	Media	$\sigma$
<b>Serie completa (1970-2100)</b>	61,3	21,8	54,5	18,2	52,0	18,5	58,2	18,5
<b>Histórico (1970-2005)</b>	64,0	20,7	56,8	16,4	55,1	19,3	56,0	16,8
<b>F. Cercano (2006-2050)</b>	56,4	18,7	56,1	19,4	51,4	17,0	66,7	29,8
<b>F. Lejano (2051-2100)</b>	63,8	24,3	51,2	17,9	50,4	18,9	52,0	25,6

### 3.4 Cuenca del Río Limarí

La cuenca del Río Limarí, tal como se muestra en la Figura 3.11 es la cuenca más al norte seleccionada en este estudio y se encuentra en la IV<sup>a</sup> región de Coquimbo; presenta una superficie aproximada de 11.800 km<sup>2</sup> y se encuentra entre el valle del río Elqui y el Choapa.

El caso climático de la cuenca también es más diverso que los anteriores teniendo tres tipos de climas. En la zona costera se presenta como un clima semiárido con nubosidad abundante.

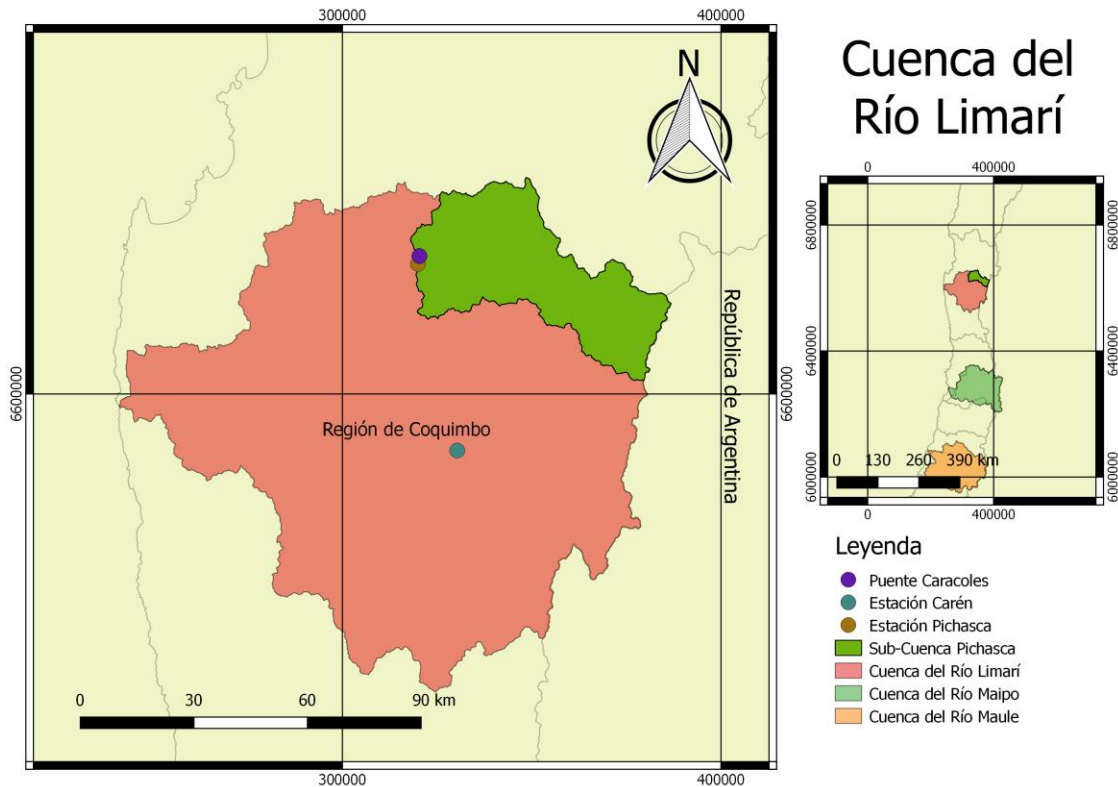


Figura 3.11: Mapa de la cuenca del río Limarí y la sub-cuenca Pichasca.

El valle tiene un clima semiárido templado con lluvias invernales y, por último, un clima semiárido frío con lluvias invernales para la parte alta de la cuenca, por sobre los 3.000 m.s.n.m. Así, se puede ver en la Figura 3.12 la relación entre las temperaturas medias mensuales de la estación Carén y la precipitación mensual media durante el año en la estación Pichasca.

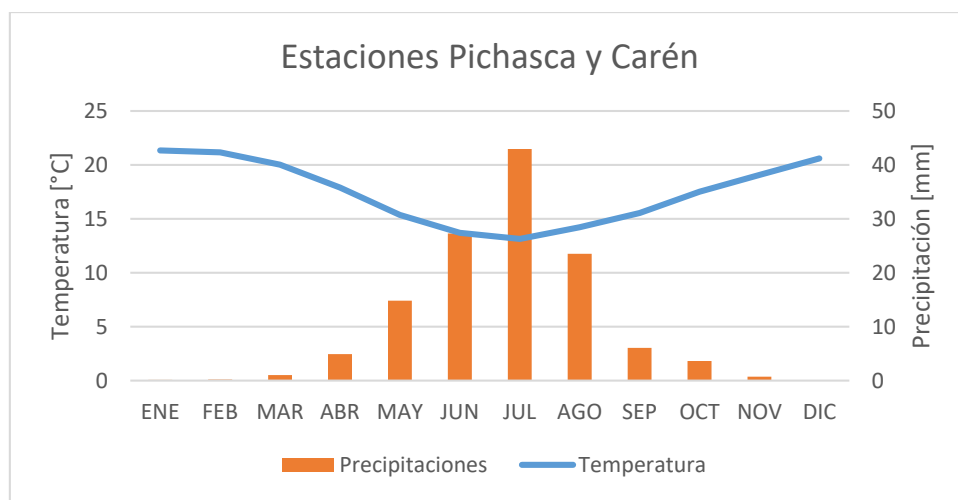


Figura 3.12: Temperaturas medias mensuales y precipitaciones medias mensuales en el Limarí.

El Río Limarí nace de la unión del Río Hurtado y Río Grande, donde es este último el que drena la mayor cantidad de área, siendo casi el doble que el Río Hurtado.

Cerca de la estación meteorológica Pichasca, se encuentra un puente proveniente de la carretera 595 llamado “Puente Caracoles” el cual une las dos laderas del río Hurtado. Utilizando este punto como salida, se define una cuenca, llamada “Pichasca” en este trabajo, con las características mostradas en la Tabla 3.14 y con una curva hipsométrica mostrada en la Figura 3.13. Los cálculos de crecidas e índices de este trabajo se realizan en esta sub-cuenca como representativa a la cuenca del Río Limarí.

Tabla 3.14: Datos de la cuenca que descarga en la estación Pichasca.

Nombre Estación	Pichasca
Área drenada [km <sup>2</sup> ]	1685
Pendiente Media [m/m]	0,04
Cota Media [m.s.n.m.]	2225
Cota Máxima [m.s.n.m.]	4475
Largo máximo escurrimiento [km]	85,7
Este [m]	320345
Norte [m]	6635892

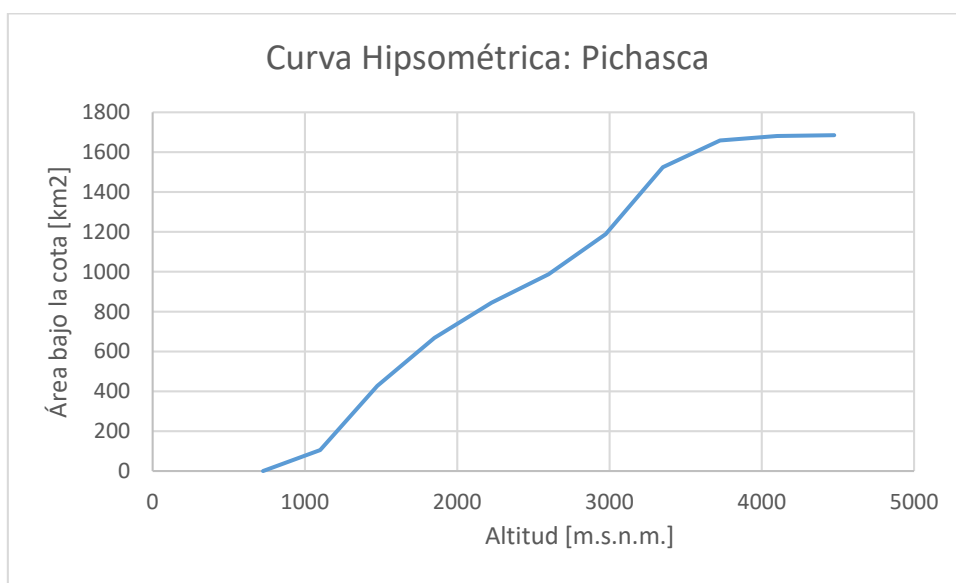


Figura 3.13: Curva hipsométrica de la cuenca que descarga en Pichasca.



## 4. Análisis de la información disponible

Los datos a utilizar en este trabajo se dividen en dos partes. Por un lado, se encuentran los datos de las cuencas del sur y centro de Chile (Biobío, Maule y Maipo) que ya fueron escalados en estudios anteriores (Lagos *et al*, 2015) utilizando cuatro modelos de circulación general (BCC-CSM1.1, CMCC-CMS, CSIRO-Mk3.6.0 y MPI-ESM-LR.) para obtener la temperatura, precipitación en los lugares de interés y usados como datos de entrada al modelo hidrológico WEAP para obtener el caudal medio a una escala diaria en las cuencas seleccionadas. Para la cuenca del río Limarí, para realizar el escalamiento, se eligió el modelo MCG que mejor se ajustaba a los objetivos del trabajo con el fin de encontrar la temperatura y precipitación a una escala diaria. A continuación, se muestran los datos recogidos y los obtenidos a utilizar en los siguientes capítulos.

Además, como parte de este trabajo se realiza un re-cálculo de los factores de la Ecuación 2.3 que permiten estimar los caudales máximos instantáneos<sup>12</sup>. Dichos coeficientes fueron calculados en base a muchas estaciones por cada cuenca, lo que lleva a una mayor dispersión de los datos. Así, se utilizan los mismos datos con los que se calcularon los coeficientes de la tabla, pero solo aquellos que se encuentren en los cauces donde se realizan los cálculos más adelante, o lo más cercano posible. Con ello, los gráficos que muestran la elección de cada nuevo coeficiente se muestran en el anexo<sup>13</sup>. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1: Coeficientes para determinar el caudal máximo instantáneo en base al caudal medio diario.

Río	$\alpha$	$\sigma\alpha$	$\beta$	$\sigma\beta$
Río Biobío	1,202	0,129	1,200	0,198
Río Maule	1,410	0,279	1,188	0,148
Río Maipo	1,417	0,761	1,267	0,215

### 4.1 Cuenca del Río Biobío

En el caso de la cuenca del río Biobío, a base de la información proyectada por Lagos *et al* (2015) se obtienen las tendencias de cada modelo MCG para la temperatura media anual en la estación Quilaco<sup>14</sup> (Figura 4.1), donde se nota una clara tendencia al alza llegando hasta un aumento de entre 4 y 5 grados Celsius.

<sup>12</sup> Anexo, tabla A.2.

<sup>13</sup> Anexo, figuras de C.1 a C.6.

<sup>14</sup> Gráficos de las temperaturas medias diarias para cada modelo en el anexo, figuras C.7 a C.11.

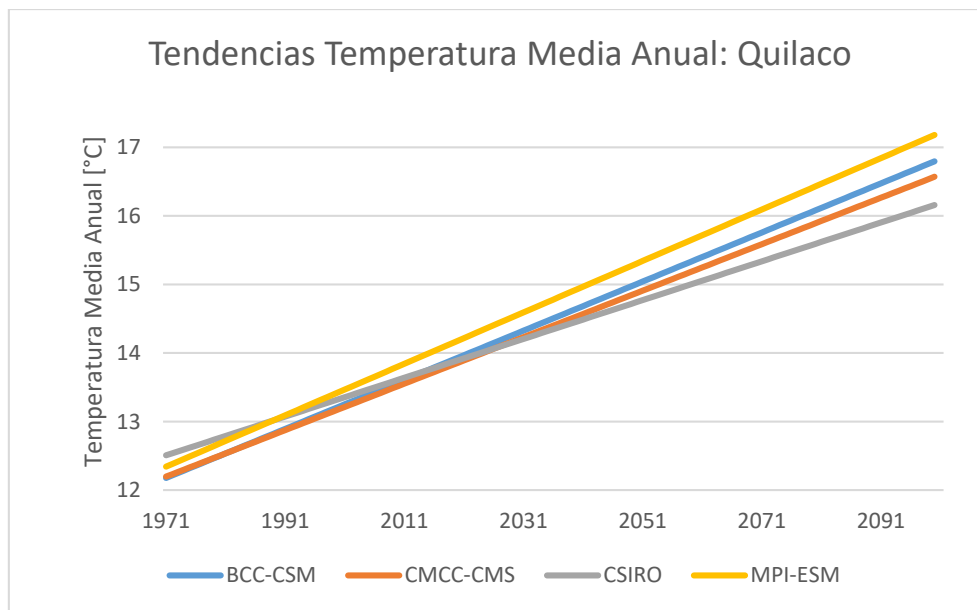


Figura 4.1: Tendencias lineales de la evolución de las temperaturas medias anuales en cada modelo. (Fuente: Lagos et al. 2015)

Por otro lado, la Figura 4.2 muestra las tendencias en precipitación total anual que entrega cada modelo para la estación Quilaco.<sup>15</sup>

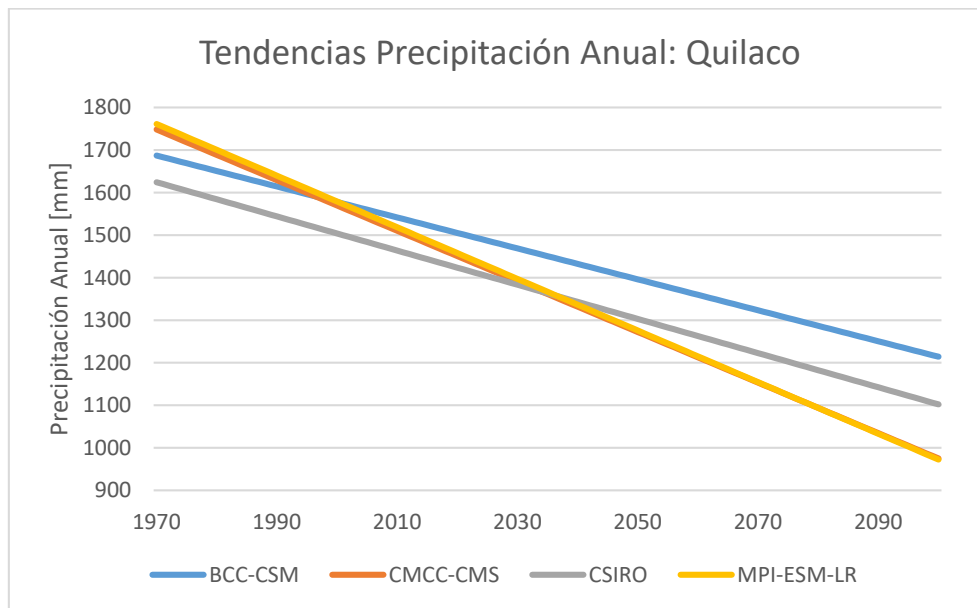


Figura 4.2: Tendencias en las precipitaciones en la estación Quilaco. (MPI-ESM-LR se superpone en casi todo el tramo a CMCC-CMS). (Fuente: Lagos et al. 2015)

Además, se complementa esta información con la Figura 4.3 que gráfica las tendencias de las precipitaciones máximas diarias para cada modelo en todo el periodo de estudio.

<sup>15</sup> Las precipitaciones de cada modelo se muestran en el anexo, figuras C.11, C.12, C.13 y C.14.

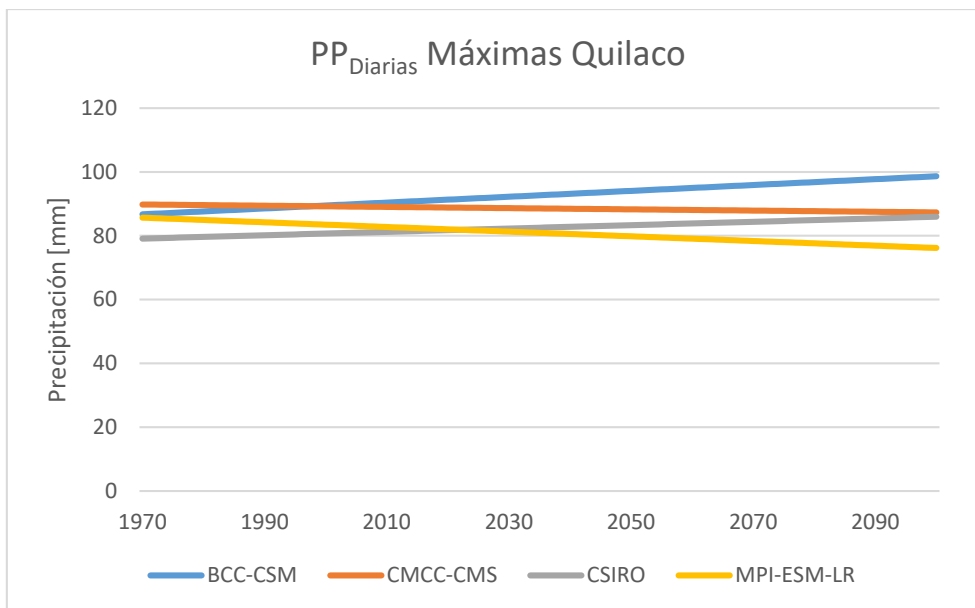


Figura 4.3: Tendencias en las precipitaciones máximas diarias en cada modelo. (Fuente: Lagos et al. 2015)

En cuanto a los datos fluviométricos, se muestran las tendencias de los caudales medios anuales<sup>16</sup> en la estación Laguna de la Laja para cada modelo en la Figura 4.4 y la variación de los caudales con 95% de probabilidad de excedencia diarios con respecto a los calculados en el periodo histórico en la Figura 4.5 donde se muestra el promedio de la variación, la disminución máxima (como mínimo) y el incremento máximo (como máximo). Por último, se muestran los caudales con 85% de probabilidad de excedencia anual de cada modelo en cada periodo en la Figura 4.6.

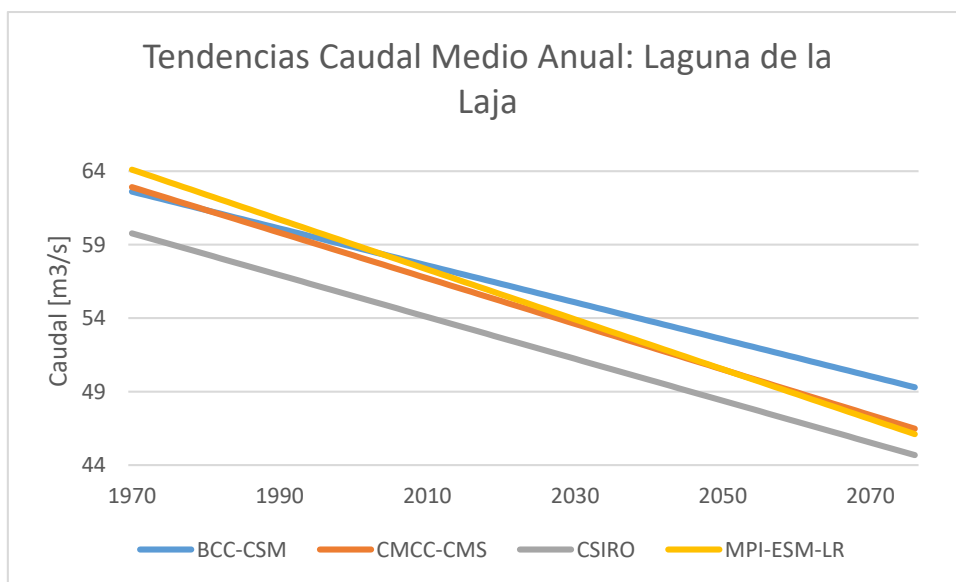


Figura 4.4: Tendencia en las medias anuales de los cuatro modelos. (Fuente: Lagos et al. 2015)

<sup>16</sup> Gráfico de caudales diarios en el anexo figuras C.15 al C.18.

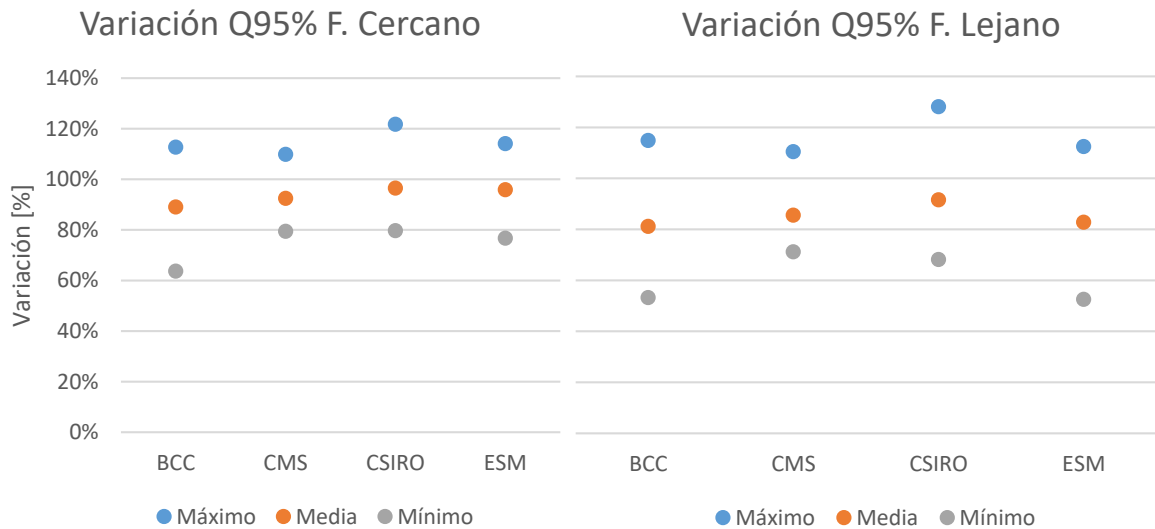


Figura 4.5: Variación del Q95% en Laguna de la Laja. (Fuente: Lagos et al. 2015)

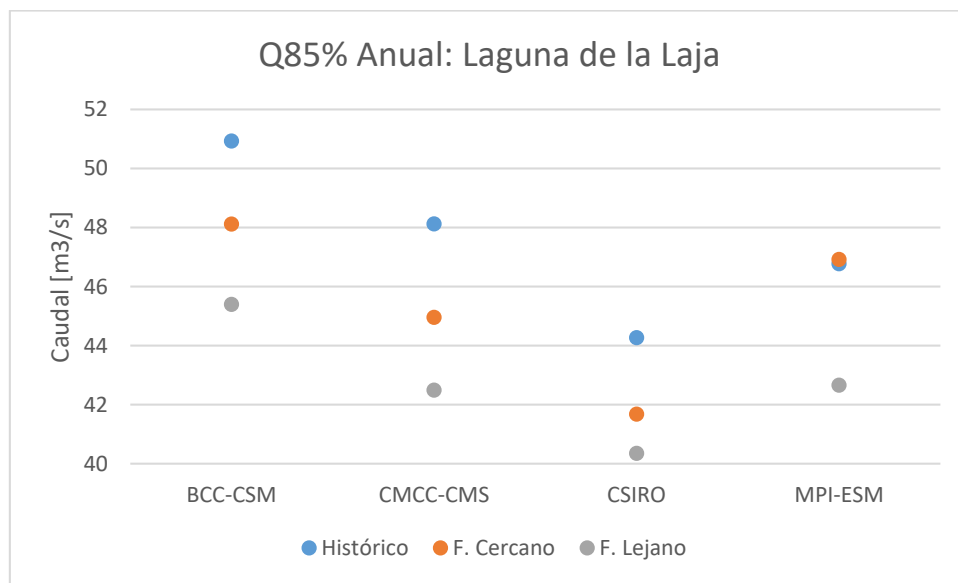


Figura 4.6: Caudal con 85% de excedencia en el tiempo para la estación Laguna de la Laja. (Fuente: Lagos et al. 2015)

## 4.2 Cuenca del Río Maule

Para las temperaturas de la cuenca del Río Maule, se utilizó la estación “Colorado” para realizar la modelación con los 4 MCG. Así, en la Figura 4.7 se muestran las tendencias de la temperatura media anual<sup>17</sup> en la estación mencionada la que, en los cuatro modelos varía entre 3.5 y 5 grados aproximadamente.

<sup>17</sup> Gráficos de series diarias en el anexo, figuras C.19 a C.22.



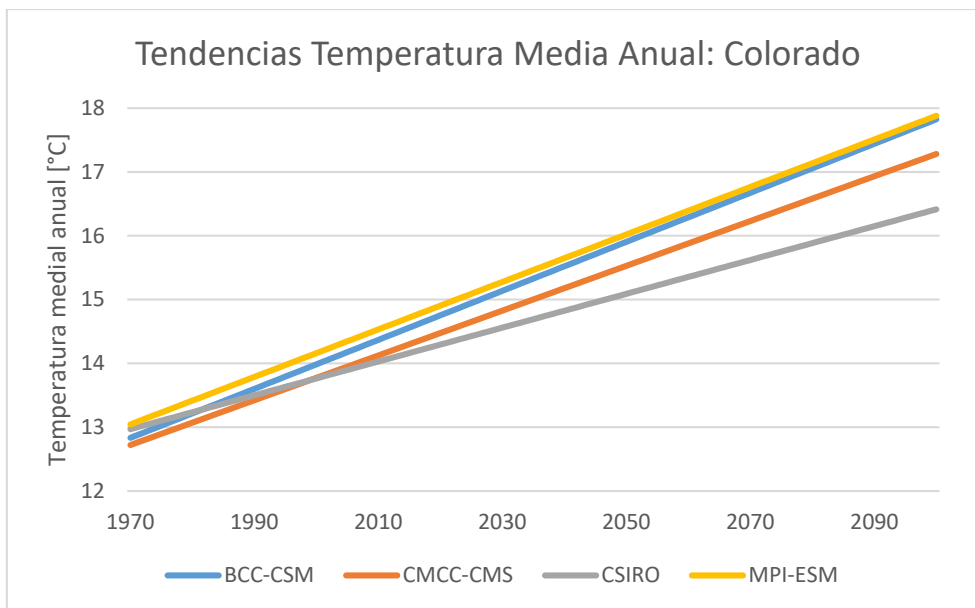


Figura 4.7: Tendencias en las temperaturas medias anuales para la estación Colorado. (Fuente: Lagos et al. 2015)

En el caso de las precipitaciones, la estación utilizada fue la estación Armerillo, en la Figura 4.8, la cual muestra las siguientes tendencias en precipitaciones anuales en cada modelo<sup>18</sup>. En ella se puede notar el menor cambio para el modelo BCC-CSM, a diferencia de los otros 3 modelos, los cuales son más parecidos entre sí.

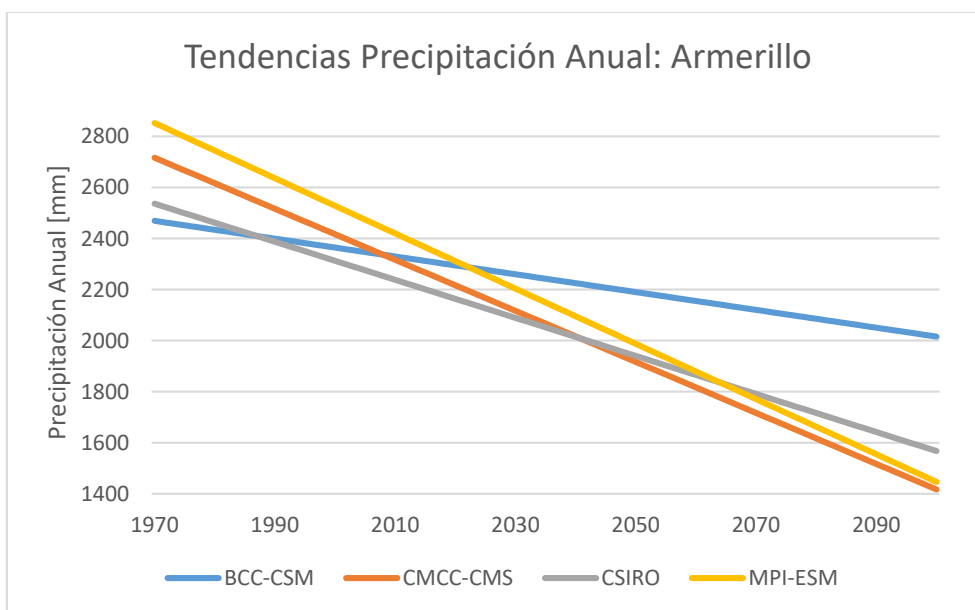


Figura 4.8: Tendencias en las precipitaciones anuales en la estación Armerillo. (Fuente: Lagos et al. 2015)

Complementario a esto, se muestra la Figura 4.9 con las tendencias lineales de las precipitaciones máximas diarias en la estación Armerillo para cada modelo.

<sup>18</sup> Los gráficos de series diarias en el anexo, figuras C.23 a C.26.

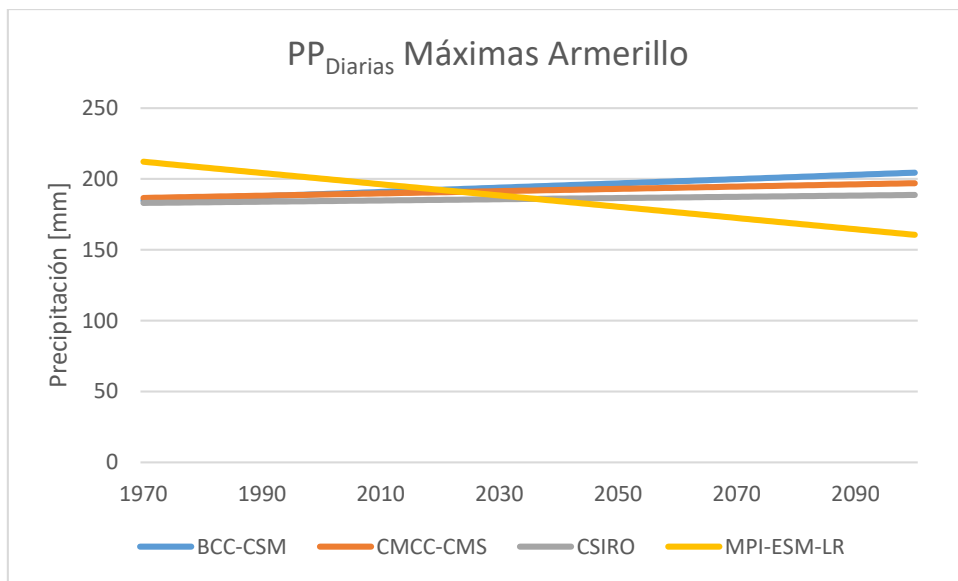


Figura 4.9: Tendencias de las precipitaciones máximas por modelo en la estación Armerillo. (Fuente: Lagos et al. 2015)

Por último, la Figura 4.10 muestra las tendencias en los promedios de caudales medios anuales<sup>19</sup> para la estación “Laguna de la Invernada” y la Figura 4.11 muestra la variación de los caudales de 95% diarios con respecto a los calculados para el periodo histórico donde el promedio de las variaciones, el incremento mayor (máximo) y la mayor disminución (mínimo). Además la Figura 4.12 muestra los caudales con 85% de probabilidad de excedencia para cada modelo en cada periodo.

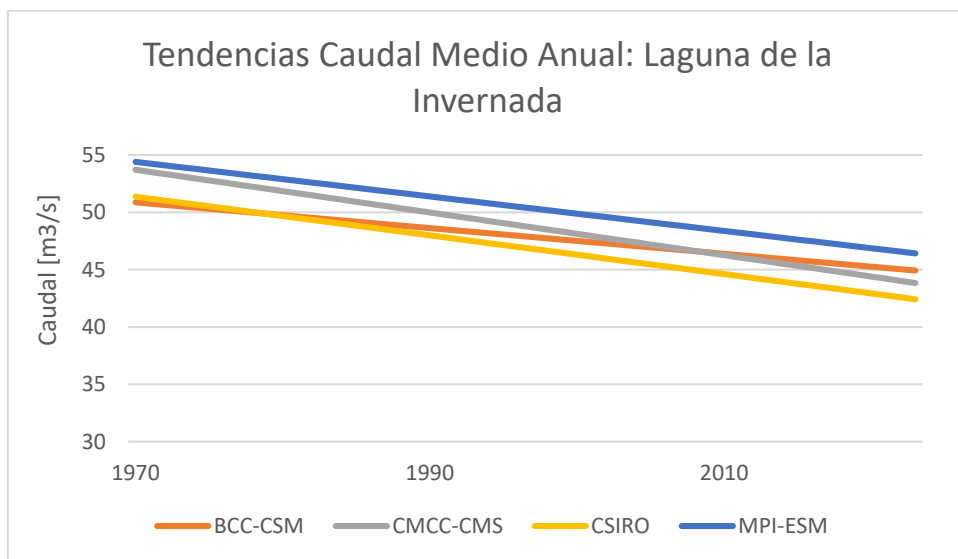


Figura 4.10: Tendencias en el caudal medio anual en la estación "Laguna de la Invernada". (Fuente: Lagos et al. 2015)

<sup>19</sup> Series diarias en anexo, figuras C.27 a C.30.

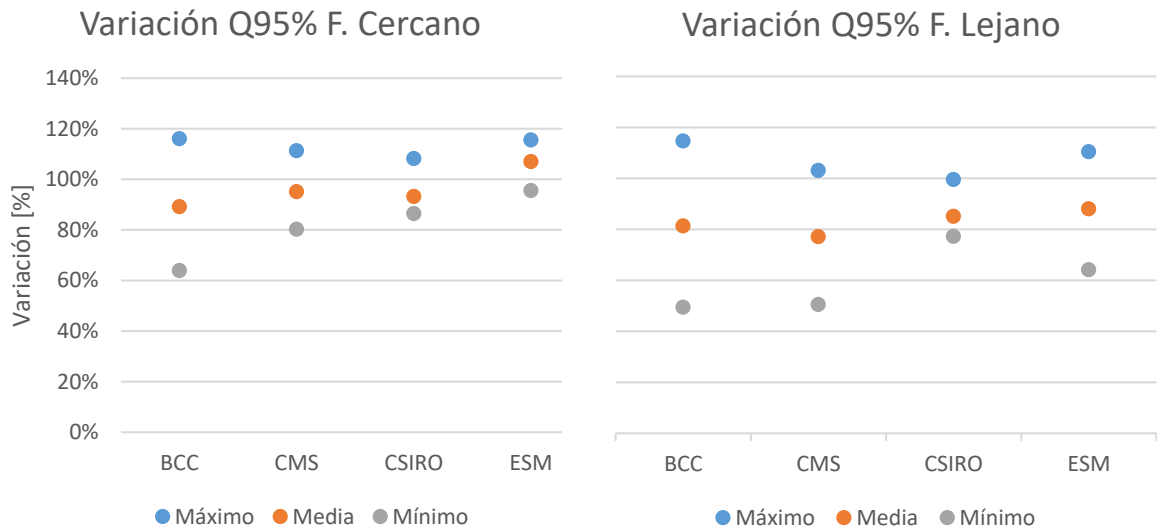


Figura 4.11: Variación de los caudales de 95% diarios con respecto a los históricos. (Fuente: Lagos et al. 2015)

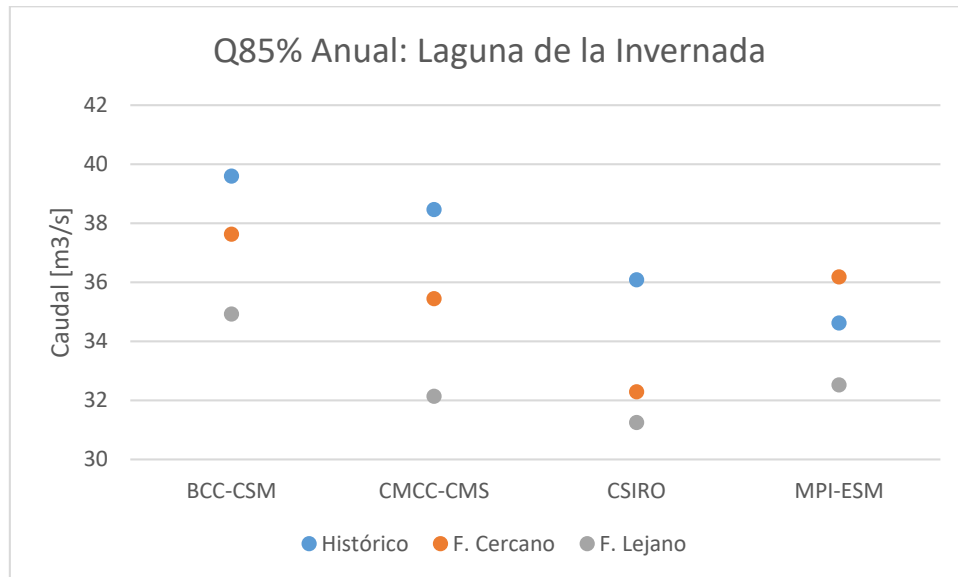


Figura 4.12: Caudal del 85% en Laguna de la Invernada para cada modelo. (Fuente: Lagos et al. 2015)

### 4.3 Cuenca del Río Maipo

Para la cuenca del río Maipo, se tienen datos modelados con los mismos MCG. En el caso de los datos de temperatura, la estación “Pirque” entrega la Figura 4.13 de las tendencias en la temperatura media anual<sup>20</sup>. En este caso, son más parecidas entre ellas que las obtenidas en la cuenca del Biobío.

<sup>20</sup> Gráficos de las temperaturas diarias para cada modelo en el anexo, figuras C.31 a C.34.

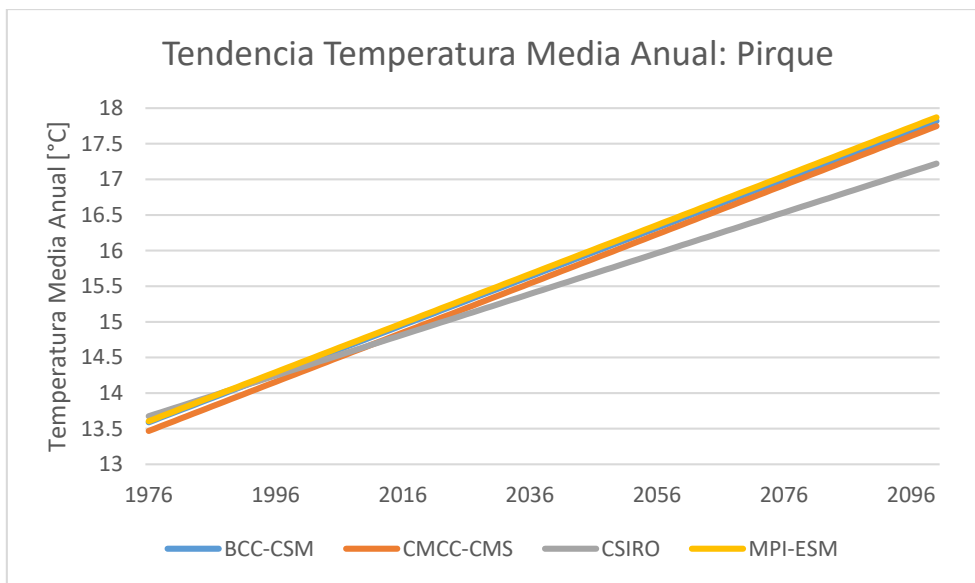


Figura 4.13: Tendencias en las temperaturas medias anuales en la estación Pirque según los cuatro modelos. (Fuente: Lagos et al. 2015)

La estación utilizada para realizar el escalamiento para las precipitaciones en esta cuenca fue, al igual que las temperaturas, en Pirque. La Figura 4.14 presenta las tendencias de las precipitaciones anuales que entrega cada modelo<sup>21</sup>.

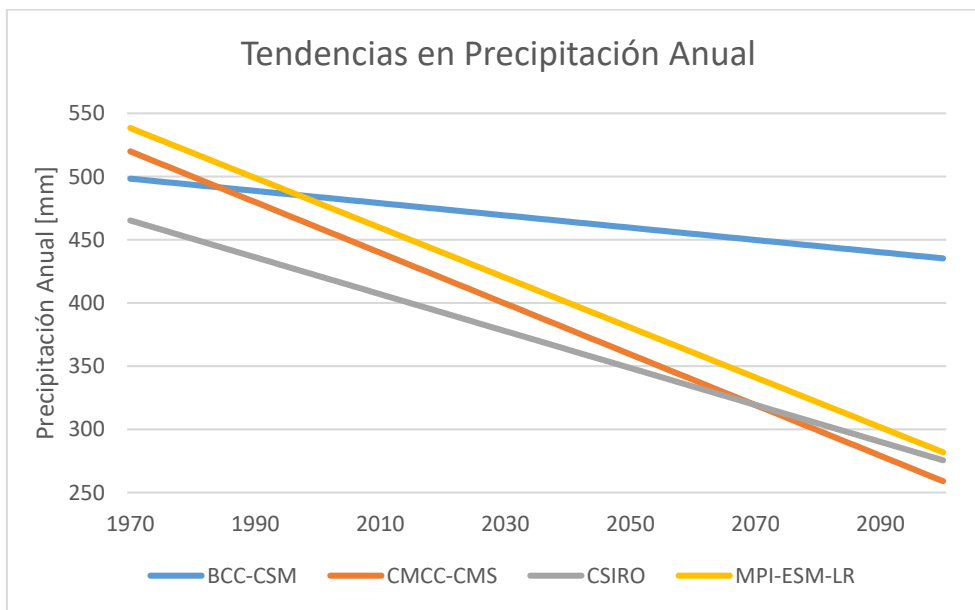


Figura 4.14: Tendencias en las precipitaciones medias anuales para la estación Pirque. (Fuente: Lagos et al. 2015)

Por otro lado, las precipitaciones máximas diarias presentan una tendencia graficada en la Figura 4.15.

<sup>21</sup> Los gráficos de las precipitaciones diarias en el anexo, figuras C.35 a C.38.

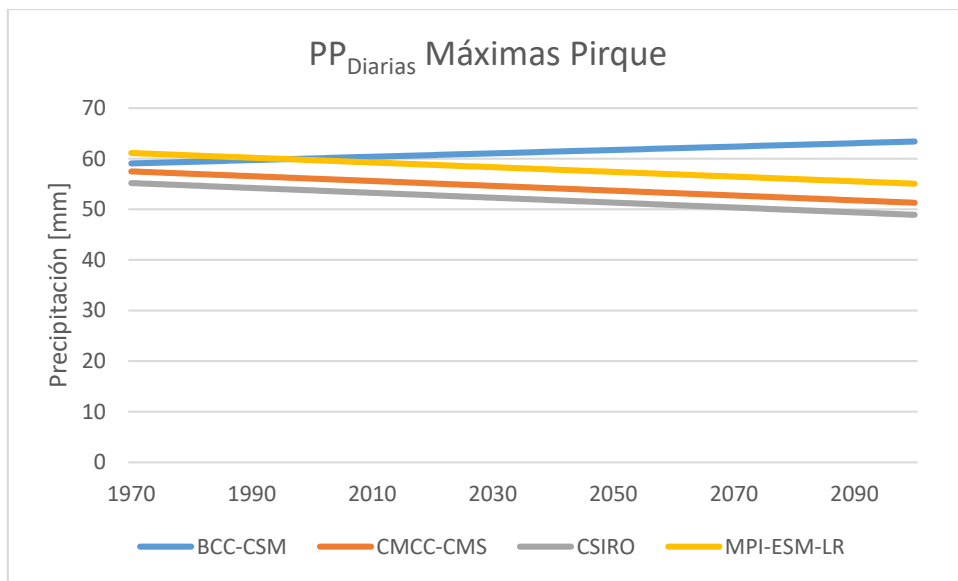


Figura 4.15: Tendencias en las precipitaciones máximas en Pirque. (Fuente: Lagos et al. 2015)

Finalmente, se muestra la Figura 4.16 con las tendencias en los caudales medios anuales<sup>22</sup> para la estación “Río Volcán antes de junta Río Maipo”. Complementario a esto, se presenta la Figura 4.17 donde se presenta el valor promedio de variaciones, el máximo aumento (máximo) y la mayor disminución (mínimo), de los caudales con probabilidad de excedencia para cada día del año en el futuro cercano y lejano con respecto al periodo histórico. Además se agrega la Figura 4.18 con los caudales con 85% de probabilidad de excedencia para cada periodo en cada modelo.

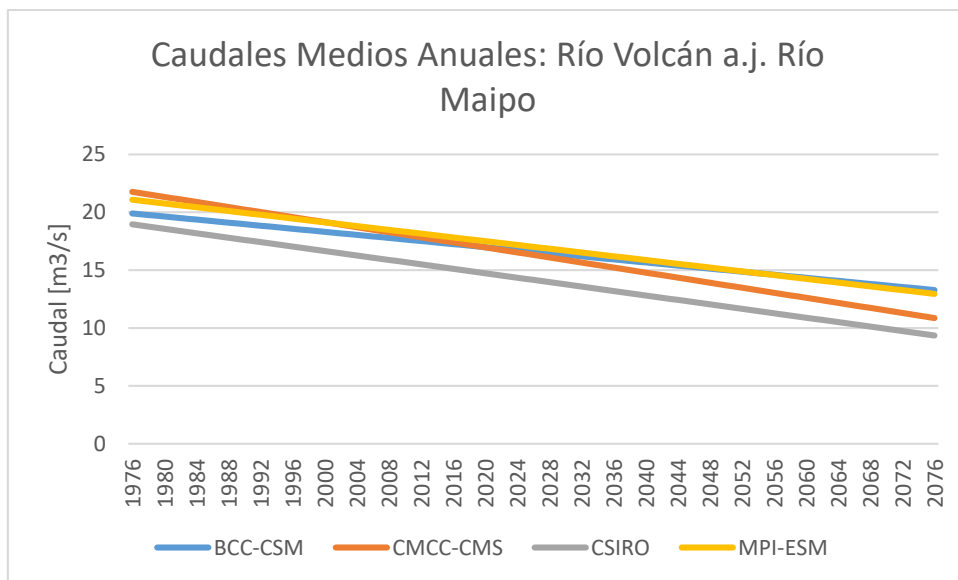


Figura 4.16: Tendencia de los caudales medios anuales de la estación. (Fuente: Lagos et al. 2015)

<sup>22</sup> Datos diarios en el anexo, figuras C.39 a C.42.

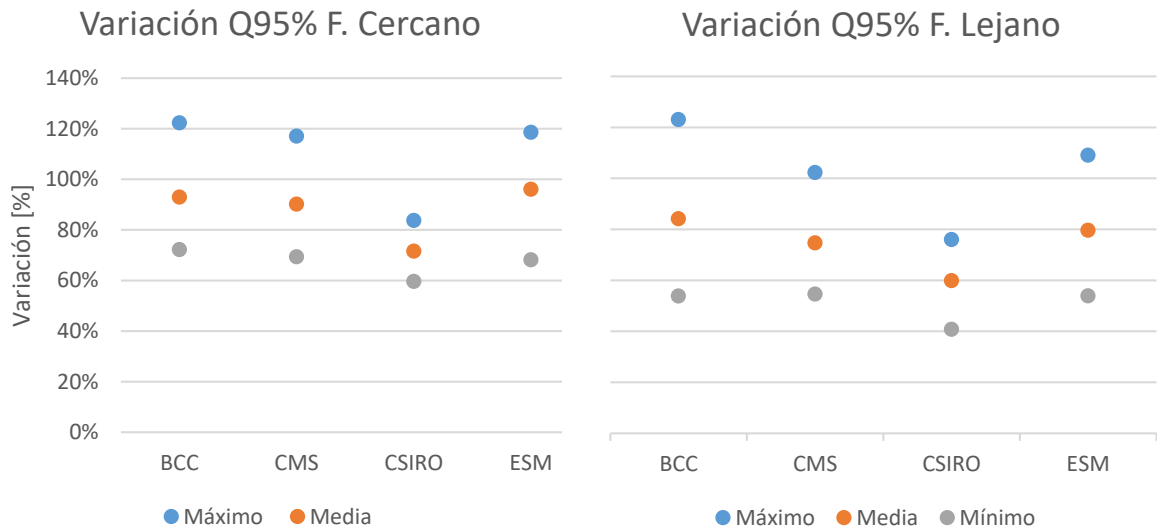


Figura 4.17: Variación de los caudales del 95% de probabilidad de excedencia con respecto a los históricos. (Fuente: Lagos et al. 2015)

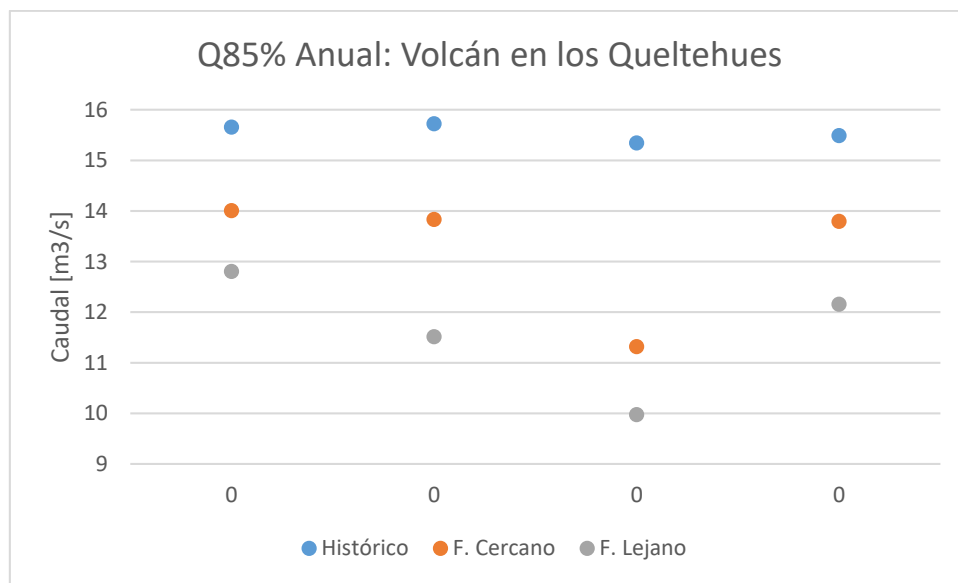


Figura 4.18: Caudal del 85% de probabilidad de excedencia en Volcán en los Queltehues. (Fuente: Lagos et al. 2015)

## 4.4 Cuenca del Río Limarí

### 4.4.1 Elección del MCG

Para la cuenca del Limarí, se debe realizar un escalamiento espacial, como lo muestra la Ecuación 2.1 y, luego, el escalamiento temporal.

Sin embargo, se requiere elegir el modelo MCG que mejor se ajuste a la información de la estación. Con este objetivo se escalan espacialmente, a nivel mensual, todos los datos de precipitación de los modelos.

Considerando que este trabajo se enfoca en los eventos extremos, se comparan las series observados y los modelos en base a la media, máximas y mínimas por cada mes. Utilizando dos índices de error: el  $R^2$  y el error cuadrático medio, (ECM). Estos índices se muestran en la Tabla 4.2, donde se destacan los modelos con mejores resultados en tres o más índices.

Dado el resultado de la tabla, se confecciona la Figura 4.19 con las curvas de duración de las precipitaciones anuales extraídas de estos cinco modelos y se comparan con la real. En la misma se distingue la real (en azul y de línea continua) con la curva de mayor parecido en comportamiento (en rojo y línea continua), del modelo MRI-CGCM3.

Analizando los resultados, se elige el modelo MRI-CGCM3 para la cuenca del Limarí. Con este se realiza un escalamiento espacial con resultados mostrados a continuación en la Figura 4.19.

Tabla 4.2: Índices de error con respecto a la serie real de precipitaciones medias, máximas y mínimas de cada mes.

	Medias		Max		Min	
	$R^2$	ECM [mm <sup>2</sup> ]	$R^2$	ECM [mm <sup>2</sup> ]	$R^2$	ECM [mm <sup>2</sup> ]
ACCESS1-0	0,64	77,90	0,58	4538,09	0,02	0,06
BNU-ESM	0,80	45,00	0,67	5116,53	0,04	2,72
CCSM4	0,74	68,23	0,72	2913,14	0,01	0,00
<b>CESM1-BGC</b>	0,69	70,63	<b>0,90</b>	<b>936,16</b>	<b>1,00</b>	<b>0,00</b>
CNRM-CM5	0,84	40,94	0,54	3987,44	0,01	0,16
CSIRO-Mk3-6-0	0,81	87,55	0,77	6090,82	0,01	0,01
<b>CanESM2</b>	<b>0,82</b>	<b>37,41</b>	<b>0,95</b>	<b>1533,86</b>	0,06	0,30
GFDL-CM3	0,82	49,35	0,56	4431,90	0,02	0,09
GFDL-ESM2G	0,57	94,84	0,15	9622,42	0,02	0,11
GFDL-ESM2M	0,75	55,44	0,80	3777,02	0,02	0,03
IPSL-CM5A-LR	0,80	59,53	0,54	5660,81	0,03	2,70
IPSL-CM5A-MR	0,76	69,73	0,53	4681,45	0,03	0,12
<b>MIROC-ESM-CHEM</b>	<b>0,84</b>	<b>29,66</b>	0,69	3905,15	0,04	0,70
<b>MIROC-ESM</b>	<b>0,90</b>	<b>24,21</b>	0,59	5301,41	0,03	1,63
MIROC5	0,75	76,21	0,54	5636,75	0,01	0,08
MPI-ESM-LR	0,74	55,25	0,45	5364,25	0,03	0,02
<b>MRI-CGCM3</b>	<b>0,95</b>	<b>17,55</b>	<b>0,77</b>	<b>2465,06</b>	<b>1,00</b>	<b>0,00</b>
NorESM1-M	0,62	76,05	0,44	5590,36	0,04	0,42
bcc-csm1-1	0,75	48,52	0,71	3796,99	0,04	2,24
inmcm4	0,68	62,70	0,45	5208,45	0,01	0,07

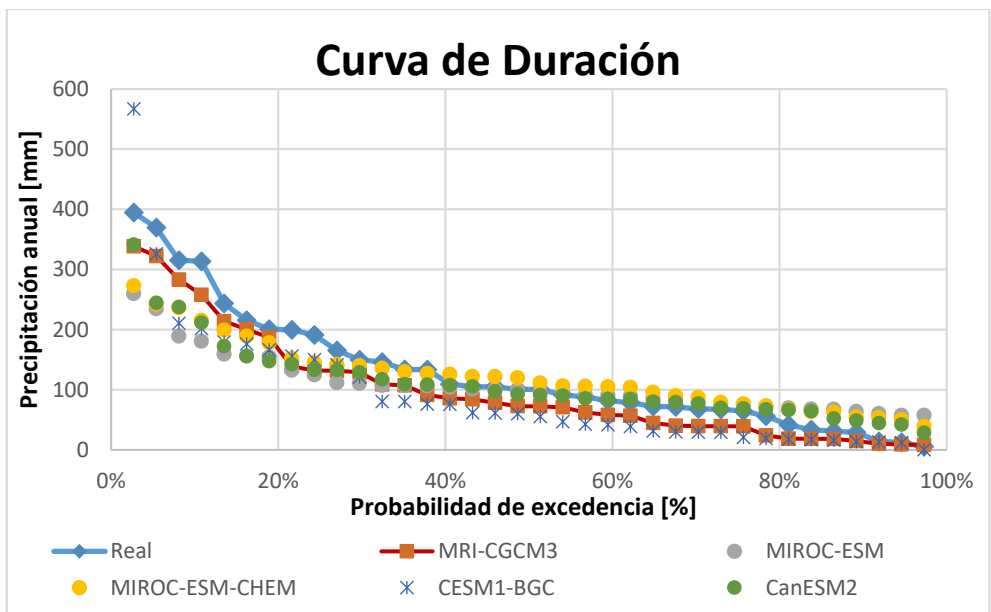


Figura 4.19: Comparación de las curvas de duración de precipitaciones anuales que entrega cada modelo con la real.

#### 4.4.2 Resultados Escalamiento<sup>23</sup>

La Figura 4.20 muestra la tendencia y los datos de temperatura media anual escalados del modelo elegido<sup>24</sup>. En este caso se ve un aumento en la temperatura media menor que en los otros modelos. Sin embargo, esto se relaciona más con una disminución de la temperatura media anual en los últimos años lo que afecta la tendencia completa. Esto se puede notar en la Tabla 4.3 donde se ve el gran aumento en las medias por intervalo de tiempo.

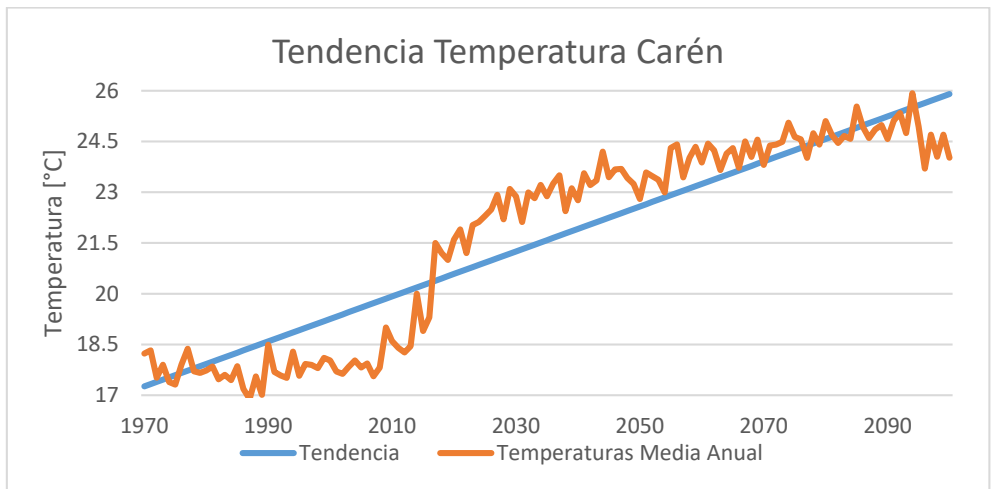


Figura 4.20: Temperatura media anual y su respectiva tendencia en Carén.

<sup>23</sup> Escalamientos para temperaturas medias diarias y precipitaciones diarias en anexo, figuras D.1 a D.8.

<sup>24</sup> Gráfico con las temperaturas medias diarias en el anexo, figura C.43.



Tabla 4.3: Temperaturas medias anuales en los diferentes intervalos de tiempo.

Promedio Temperaturas Medias Diarias [°C]	MRI-CGCM3
<b>Serie completa (1970-2100)</b>	21,5
<b>Histórico (1970-2005)</b>	17,7
<b>F. Cercano (2006-2050)</b>	21,1
<b>F. Lejano (2051-2100)</b>	24,3

Luego, la Figura 4.21 muestra los datos y la tendencia de la precipitación anual<sup>25</sup> extraída de los datos escalados en la estación Pichasca.

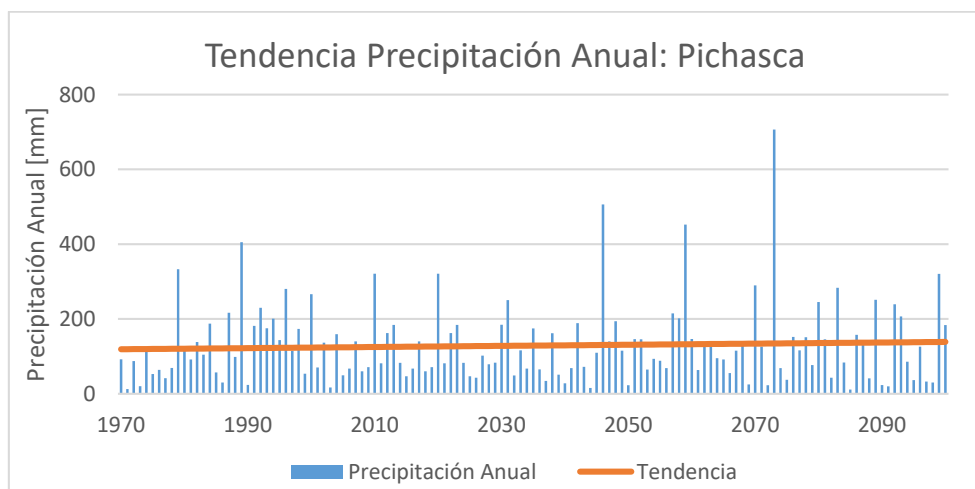


Figura 4.21: Precipitación anual y su tendencial en Pichasca.

Tabla 4.4: Precipitaciones anuales medias para cada periodo en la estación Pichasca.

Promedio Precipitación anual [mm]	MRI-CGCM3
<b>Serie completa (1970-2100)</b>	128,77
<b>Histórico (1970-2005)</b>	128,02
<b>F. Cercano (2006-2050)</b>	119,03
<b>F. Lejano (2051-2100)</b>	138,07

Por último, dado que el enfoque de este trabajo, se realiza un escalamiento especialmente en las máximas precipitaciones diarias por año. Así, la Figura 4.22 muestran los datos obtenidos y su respectiva tendencia.

<sup>25</sup> Figura con precipitaciones diarias en anexo, figura C.44.

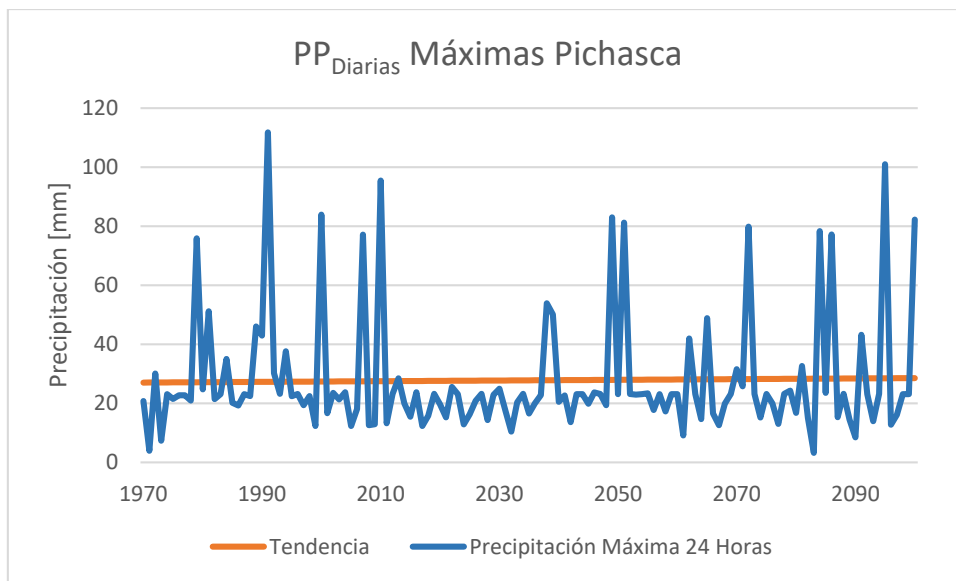


Figura 4.22: Tendencia de las precipitaciones máximas en Pichasca y los datos desde donde se extrajo.

Además, se agrega la Figura 4.8 con los valores promedio por periodo.

Tabla 4.5: Promedio de las precipitaciones máximas diarias por periodo.

Promedio Precipitación anual [mm]	MRI-CGCM3
<b>Serie completa (1970-2100)</b>	27,51
<b>Histórico (1970-2005)</b>	29,50
<b>F. Cercano (2006-2050)</b>	24,89
<b>F. Lejano (2051-2100)</b>	28,43

Utilizando todo lo anterior, entonces, se pueden utilizar las fórmulas y relaciones del capítulo 2 para encontrar las crecidas e índices de interés en este trabajo.

## 5. Cálculo de Caudales Máximos

A continuación, se presentan los cálculos de los caudales máximos con las diferentes metodologías mostradas en el capítulo 2.

### 5.1 Cuenca del Río Biobío: Sub-Cuenca “Laguna de la Laja”<sup>26</sup>

Para las ecuaciones Ecuación 2.2 y Ecuación 2.4 se calcula el área promedio de la cuenca donde cae lluvia líquida para cada periodo, que se calcula como el área de la cuenca bajo la isoterma de los 0°. Para ello se utiliza el promedio de las temperaturas medias diarias de las 30 tormentas más grandes para cada periodo (histórico, futuro cercano y futuro lejano) para cada modelo. Así, el área pluvial promedio por periodo se ve reflejada en la Tabla 5.1.

Tabla 5.1: Área promedio bajo la isoterma de 0° durante tormentas en la cuenca Laguna de la Laja para cada periodo.

Área [km2]	BCC-CSM	CMCC-CMS	CSIRO	MPI-ESM-LR
<b>Histórico</b>	931,96	931,96	928,02	826,01
<b>F. Cercano</b>	924,08	892,64	947,72	936,32
<b>F. Lejano</b>	966,34	955,18	949,38	963,48

### Fórmula de Verni y King

En base al área calculada para cada modelo MCG por cada periodo y las precipitaciones máximas diarias según cada periodo de retorno según la serie caracterizada en la Tabla 3.5, se obtiene la Tabla 5.2 que muestra las variaciones en las crecidas para cada intervalo de tiempo con respecto al periodo histórico de cada modelo.

Tabla 5.2: Variación de las crecidas según la fórmula Verni y King con respecto a caudales históricos: Cuenca Laguna de la Laja.

Modelo	Retorno [años]	2	5	10	20	25	50	100
<b>BCC-CSM [mm]</b>	F. Cercano	1,27	1,35	1,39	1,41	1,42	1,44	1,45
	C. Lejano	1,17	1,28	1,32	1,35	1,36	1,38	1,40
<b>CMCC-CMS [m3/s]</b>	F. Cercano	1,13	1,23	1,27	1,31	1,31	1,34	1,35
	C. Lejano	1,04	1,21	1,28	1,33	1,34	1,38	1,41
<b>CSIRO [m3/s]</b>	F. Cercano	1,02	1,03	1,03	1,04	1,04	1,04	1,04
	C. Lejano	1,11	1,14	1,16	1,17	1,17	1,18	1,19
<b>MPI-ESM-LR [m3/s]</b>	F. Cercano	1,32	1,34	1,34	1,35	1,35	1,35	1,35
	C. Lejano	1,02	1,11	1,14	1,17	1,17	1,19	1,21

<sup>26</sup> Caudales calculados para la cuenca en anexo, tablas B.1 a B.4.

Analizando los resultados se puede notar un gran aumento general entre las crecidas del periodo histórico y el futuro cercano en todos los modelos. Entre ellos, el mayor se ve en el modelo BCC-CSM con un promedio de crecimiento del 40% a diferencia del modelo CSIRO, que aumenta a un 103% en promedio. Sin embargo, no existe un gran cambio entre ambos futuros habiendo valores que, incluso disminuyen el futuro lejano.

#### Fórmula basada en el Caudal Medio Diario

En el caso de la sub-cuenca definida en la estación “Laguna de la Laja”, lo caudales máximos, se ven en su mayoría, en el periodo pluvial del año hidrológico, por lo que se utiliza el coeficiente “alfa” para la sub-cuenca del río Biobío en la Tabla 5.3, donde se muestra la variación de las crecidas con respecto al periodo histórico de cada modelo.

*Tabla 5.3: Variación del caudal máximo instantáneo según diferentes periodos de retorno en la sub-cuenca del Biobío, con respecto a las crecidas del periodo histórico.*

<b>Modelo</b>	<b>Retorno [años]</b>	<b>2</b>	<b>5</b>	<b>10</b>	<b>20</b>	<b>25</b>	<b>50</b>	<b>100</b>
<b>BCC-CSM [mm]</b>	F. Cercano	1,04	1,00	0,98	0,97	0,96	0,95	0,93
	C. Lejano	1,01	0,91	0,86	0,82	0,81	0,78	0,75
<b>CMCC-CMS [m3/s]</b>	F. Cercano	1,01	0,98	0,96	0,94	0,94	0,92	0,91
	C. Lejano	0,83	0,79	0,77	0,75	0,75	0,73	0,72
<b>CSIRO [m3/s]</b>	F. Cercano	1,05	1,04	1,03	1,03	1,03	1,02	1,02
	C. Lejano	1,04	1,03	1,02	1,01	1,01	1,00	1,00
<b>MPI-ESM-LR [m3/s]</b>	F. Cercano	1,27	1,41	1,49	1,56	1,58	1,65	1,70
	C. Lejano	1,02	1,18	1,28	1,36	1,39	1,46	1,53

El mayor cambio se ve en el modelo MPI-ESM-LR alcanzando poco menos del doble del caudal de 100 años en el futuro lejano y con incrementos en todas las crecidas en ambos periodos. Por otra parte, los modelos BCC y CMCC disminuyen en, prácticamente, todas las crecidas. Interesantemente, el caudal con periodo de retorno de 2 años no cambia considerablemente en la gran mayoría de los resultados.

Además de esta tabla, se agrega la Tabla 5.4 con el mismo análisis para el periodo de deshielo. Se destaca como estos resultados muestran una disminución general en los caudales asociados a deshielos. El único modelo que prevé un aumento considerable, y solo para el futuro cercano, es el BCC. El MCG MPI también obtiene resultados de aumentos en el futuro cercano, pero estos son tan pequeños que, en realidad, no se consideran para la visión general de los resultados.

Tabla 5.4: Variaciones de los caudales del periodo de deshielo en la cuenca de la Laguna de la Laja.

Modelo	Retorno [años]	2	5	10	20	25	50	100
BCC-CSM [mm]	F. Cercano	0,91	1,12	1,24	1,36	1,40	1,50	1,61
	C. Lejano	0,78	0,85	0,89	0,93	0,94	0,97	0,99
CMCC-CMS [m3/s]	F. Cercano	0,82	0,84	0,85	0,86	0,86	0,87	0,88
	C. Lejano	0,70	0,68	0,67	0,66	0,66	0,66	0,65
CSIRO [m3/s]	F. Cercano	0,81	0,76	0,74	0,72	0,72	0,70	0,69
	C. Lejano	0,72	0,73	0,73	0,73	0,74	0,74	0,74
MPI-ESM-LR [m3/s]	F. Cercano	1,07	1,04	1,03	1,02	1,02	1,01	1,00
	C. Lejano	0,68	0,74	0,78	0,80	0,81	0,84	0,86

### Hidrograma unitario triangular

Utilizando la fórmula de Grunsky para calcular la precipitación en el tiempo de concentración y considerando las áreas pluviales en la Tabla 5.1 se puede calcular la evolución de los caudales con periodos de retorno de 2, 5, 10, 20, 25, 50 y 100 años en la cuenca de la estación “Laguna de la Laja”. Los resultados se muestran en la Tabla 5.5.

Los resultados muestran un aumento general de los caudales de mayor periodo de retorno, siendo en algunos modelos, un aumento considerable. Cabe destacar que, en 3 de los 4 modelos estas crecidas aumentan hacia el futuro cercano considerablemente más que para el futuro lejano. Por otro lado, los caudales de menor periodo de retorno son bastante parecidos entre el futuro lejano y el periodo histórico.

Tabla 5.5: Variación de los caudales máximos instantáneos según periodo de retorno calculados con el HUT con respecto al caudal histórico de cada modelo.

Modelo	Retorno [años]	2	5	10	20	25	50	100
BCC-CSM [mm]	F. Cercano	1,26	1,47	1,59	1,70	1,73	1,83	1,92
	C. Lejano	1,08	1,21	1,28	1,34	1,36	1,42	1,47
CMCC-CMS [m3/s]	F. Cercano	1,05	1,26	1,39	1,50	1,54	1,64	1,74
	C. Lejano	0,94	1,15	1,27	1,39	1,42	1,53	1,63
CSIRO [m3/s]	F. Cercano	1,02	1,04	1,05	1,06	1,06	1,07	1,08
	C. Lejano	1,06	1,19	1,27	1,33	1,35	1,41	1,46
MPI-ESM-LR [m3/s]	F. Cercano	1,36	1,41	1,43	1,45	1,46	1,47	1,49
	C. Lejano	0,98	1,03	1,06	1,09	1,09	1,11	1,13

## 5.2 Cuenca del Río Maule: Sub-Cuenca “Laguna de la Invernada”<sup>27</sup>

Al igual que en la cuenca anterior, se busca el área promedio bajo la isoterma 0° por cada periodo con la media de las 30 mayores tormentas por cada intervalo y para cada modelo. Con ello, la Tabla 5.6 muestra el área donde cae precipitación en forma líquida durante el periodo de estudio.

Tabla 5.6: Áreas bajo la isoterma 0° en la cuenca definida por la estación “Laguna de la Invernada”.

Área [km <sup>2</sup> ]	BCC-CSM	CMCC-CMS	CSIRO	MPI-ESM-LR
<b>Histórico</b>	450,98	421,56	724,52	276,80
<b>F. Cercano</b>	799,77	522,21	814,26	572,68
<b>F. Lejano</b>	836,79	812,97	845,81	793,33

### Fórmula de Verni y King

En base a la Tabla 5.6 y las precipitaciones caracterizadas en la Tabla 3.9, las variaciones de las crecidas, con respecto a los caudales históricos, se muestran en la Tabla 5.7.

Se puede notar un gran aumento sostenido a medida que pasa el tiempo, en el general de los resultados, siendo el futuro lejano el intervalo con mayores caudales, llegando a valores mayores al doble de los que fueron calculados para el periodo histórico. El modelo que menos varió fue CSIRO, donde la variación fue de un 17%, en promedio, entre el primer y último intervalo y, al contrario, el modelo MPI-ESM-LR varió en aumentó a un 240% del caudal histórico con periodo de retorno de 100 años.

Tabla 5.7: Variación de los caudales calculados con Verni y King para los diferentes periodos.

Modelo	Retorno [años]	2	5	10	20	25	50	100
<b>BCC-CSM [mm]</b>	F. Cercano	1,55	1,65	1,69	1,71	1,72	1,74	1,76
	C. Lejano	1,80	1,94	2,00	2,04	2,05	2,08	2,10
<b>CMCC-CMS [m3/s]</b>	F. Cercano	1,18	1,24	1,27	1,28	1,29	1,30	1,31
	C. Lejano	1,82	1,95	2,00	2,04	2,05	2,07	2,09
<b>CSIRO [m3/s]</b>	F. Cercano	1,05	1,08	1,09	1,09	1,10	1,10	1,11
	C. Lejano	1,10	1,15	1,17	1,18	1,19	1,20	1,21
<b>MPI-ESM-LR [m3/s]</b>	F. Cercano	1,99	2,03	2,05	2,06	2,07	2,07	2,08
	C. Lejano	2,03	2,22	2,29	2,34	2,36	2,39	2,42

<sup>27</sup> Caudales calculados para la cuenca en el anexo, tablas B.5 a B.8.

## Fórmula basada en el Caudal Medio Diario

En la cuenca definida por la estación “Laguna de la Invernada”, para el cálculo del caudal máximo instantáneo, al igual que en el resto de las cuencas, se utiliza el coeficiente “alfa” de la Tabla 4.1. Luego, los resultados se muestran en la Tabla 5.8.

Tabla 5.8: Resultados del caudal medio diario a máximo instantáneo para la cuenca definida por la estación “Laguna de la Invernada”.

Modelo	Retorno [años]	2	5	10	20	25	50	100
BCC-CSM [mm]	F. Cercano	1,04	1,00	0,98	0,97	0,96	0,95	0,93
	C. Lejano	1,01	0,91	0,86	0,82	0,81	0,78	0,75
CMCC-CMS [m3/s]	F. Cercano	1,01	0,98	0,96	0,94	0,94	0,92	0,91
	C. Lejano	0,83	0,79	0,77	0,75	0,75	0,73	0,72
CSIRO [m3/s]	F. Cercano	1,05	1,04	1,03	1,03	1,03	1,02	1,02
	C. Lejano	1,04	1,03	1,02	1,01	1,01	1,00	1,00
MPI-ESM-LR [m3/s]	F. Cercano	1,27	1,41	1,49	1,56	1,58	1,65	1,70
	C. Lejano	1,02	1,18	1,28	1,36	1,39	1,46	1,53

Los resultados de esta fórmula son muy variados, sobre todo en el futuro cercano. Tres de los modelos y se pueden dividir en tres diferentes comportamientos. Por un lado, los modelos BCC y CMCC presentan caudales que disminuyen a medida que pasa el tiempo en casi todos los periodos de retorno con mayores disminuciones hacia las crecidas más grandes. Luego, el modelo CSIRO muestra resultados que predicen casi nulas variaciones para todo el periodo de estudio. Por último, el modelo MPI muestra incrementos en los caudales de hasta 70% para el futuro cercano y 53% en el futuro lejano.

Por otro lado, se agrega la Tabla 5.9 que muestra, con disminuciones para todos los modelos menos el BCC que predice aumentos del 60% para el futuro cercano y del 20% para en el caudal de 100 años.

Tabla 5.9: Caudales máximos del periodo de deshielo en la cuenca de la Laguna de la Invernada.

Modelo	Retorno [años]	2	5	10	20	25	50	100
BCC-CSM [mm]	F. Cercano	0,91	1,12	1,24	1,36	1,40	1,50	1,61
	C. Lejano	0,73	0,87	0,96	1,04	1,06	1,13	1,20
CMCC-CMS [m3/s]	F. Cercano	0,82	0,84	0,85	0,86	0,86	0,87	0,88
	C. Lejano	0,66	0,69	0,71	0,73	0,73	0,75	0,76
CSIRO [m3/s]	F. Cercano	0,81	0,76	0,74	0,72	0,72	0,70	0,69
	C. Lejano	0,68	0,73	0,76	0,78	0,79	0,81	0,83
MPI-ESM-LR [m3/s]	F. Cercano	1,07	1,04	1,03	1,02	1,02	1,01	1,00
	C. Lejano	0,66	0,73	0,77	0,80	0,82	0,85	0,87

## Hidrograma unitario triangular

Utilizando los datos de la Tabla 5.6 se calcula el hidrograma unitario triangular para cada periodo y, con ello, se estiman los caudales de crecidas para los diferentes periodos de retorno en cada modelo y para cada periodo. Con ello, se definen las variaciones con respecto al periodo histórico de cada modelo, lo que se muestra en la Tabla 5.10.

Tabla 5.10: Variación de las crecidas en la sub-cuenca "Laguna de la Invernada" con respecto a la calculada para el periodo histórico de cada modelo.

Modelo	Retorno [años]	2	5	10	20	25	50	100
<b>BCC-CSM [mm]</b>	F. Cercano	1,61	1,71	1,77	1,82	1,84	1,88	1,92
	C. Lejano	1,85	2,10	2,25	2,37	2,41	2,52	2,63
<b>CMCC-CMS [m3/s]</b>	F. Cercano	1,16	1,22	1,25	1,27	1,28	1,30	1,32
	C. Lejano	1,87	2,08	2,20	2,31	2,34	2,43	2,51
<b>CSIRO [m3/s]</b>	F. Cercano	1,01	1,09	1,14	1,17	1,19	1,22	1,25
	C. Lejano	1,07	1,26	1,38	1,48	1,51	1,60	1,69
<b>MPI-ESM-LR [m3/s]</b>	F. Cercano	2,14	2,17	2,18	2,20	2,20	2,21	2,22
	C. Lejano	2,24	2,37	2,44	2,50	2,52	2,57	2,62

En este caso, los cuatro modelos muestran un comportamiento parecido en general. Aumentos sostenidos hacia el futuro lejano con mayores variaciones para los caudales de mayor periodo de retorno. Se destaca que el MCG MPI-ESM-LR varía bastante ya para el futuro cercano a diferencia del resto que, lo más notoriamente para el último periodo.

### 5.3 Cuenca del Río Maipo: Sub-Cuenca "Volcán en los Queltehues"<sup>28</sup>

De igual forma a las cuencas anteriores, se buscan las 30 mayores tormentas por modelo y se calcula el área promedio bajo la isoterma de 0°. El resultado de esto se muestra en la Tabla 5.11.

Tabla 5.11: Variación del área en la sub-cuenca definida por la estación "Volcán en los Queltehues".

Área [km <sup>2</sup> ]	BCC-CSM	CMCC-CMS	CSIRO	MPI-ESM-LR
<b>Histórico</b>	88,18	74,28	64,45	56,73
<b>F. Cercano</b>	112,79	76,60	136,15	137,49
<b>F. Lejano</b>	147,47	162,24	141,90	148,62

<sup>28</sup> Caudales calculados para la cuenca en anexo, tablas B.9 a B.12.



## Fórmula de Verni y King

En base a los datos de la Tabla 5.11 con la variación de las áreas, las precipitaciones con estadísticos mostradas en la Tabla 3.13 y los coeficientes de la fórmula de Verni y King, se calculan las variaciones de las crecidas por cada modelo para cada intervalo de tiempo con respecto al periodo histórico.

Tabla 5.12: Variaciones de los resultados de la fórmula Verni y King en la estación "Volcán en los Queltehues".

Modelo	Retorno [años]	2	5	10	20	25	50	100
<b>BCC-CSM [mm]</b>	F. Cercano	1,11	1,11	1,11	1,11	1,11	1,11	1,11
	C. Lejano	1,58	1,56	1,55	1,55	1,55	1,54	1,54
<b>CMCC-CMS [m3/s]</b>	F. Cercano	1,08	1,12	1,14	1,15	1,15	1,16	1,17
	C. Lejano	1,91	2,05	2,10	2,14	2,15	2,18	2,20
<b>CSIRO [m3/s]</b>	F. Cercano	1,88	1,94	1,96	1,97	1,97	1,98	1,99
	C. Lejano	1,80	1,88	1,91	1,93	1,94	1,95	1,96
<b>MPI-ESM-LR [m3/s]</b>	F. Cercano	2,73	3,01	3,12	3,20	3,22	3,28	3,32
	C. Lejano	2,29	2,69	2,85	2,96	2,99	3,07	3,14

Los resultados de la Tabla 5.12 muestran un comportamiento general hacia el aumento en las crecidas. Sin embargo, dos modelos, el BCC-CSM y CMCC-CMS presentan mayores variaciones hacia el futuro lejano, a diferencia de los otros dos MCG que entregan mayores caudales en el futuro cercano.

## Fórmula basada en el Caudal Medio Diario

En el caso de la estación "Volcán en los Queltehues", se ocupa, de igual forma que en el resto de las cuencas, el coeficiente "alfa" de la Tabla 4.1. Luego, los resultados de las variaciones de los caudales con respecto a las estadísticas históricas son mostrados por modelo, periodo de retorno e intervalo temporal en la Tabla 5.13.

Tabla 5.13: Resultados de caudales máximos instantáneos para la estación "Volcán en los Queltehues".

Modelo	Retorno [años]	2	5	10	20	25	50	100
<b>BCC-CSM [mm]</b>	F. Cercano	1,06	1,00	0,97	0,94	0,94	0,92	0,90
	C. Lejano	1,03	0,90	0,85	0,80	0,79	0,75	0,72
<b>CMCC-CMS [m3/s]</b>	F. Cercano	1,00	0,94	0,91	0,88	0,88	0,86	0,84
	C. Lejano	0,81	0,76	0,73	0,71	0,70	0,68	0,67
<b>CSIRO [m3/s]</b>	F. Cercano	1,06	1,02	1,00	0,99	0,98	0,97	0,96
	C. Lejano	1,06	1,01	0,99	0,97	0,97	0,95	0,94
<b>MPI-ESM-LR [m3/s]</b>	F. Cercano	1,28	1,42	1,51	1,58	1,60	1,66	1,72
	C. Lejano	1,03	1,19	1,29	1,37	1,40	1,48	1,55

Los resultados de este método son bastante consecuentes entre tomando en cuenta que, en tres de los cuatro modelos, las crecidas decrecen o se mantienen en los valores históricos o cercanos a estos. Sin embargo, el MPI muestra aumentos notables en el futuro cercano y lejano, aunque, un poco menores en este último.

Se agrega, además, la Tabla 5.14 que muestra las crecidas para el periodo de deshielo calculado con el coeficiente “beta”. Al igual que en las otras cuencas en estudio, este también presenta disminuciones en la gran mayoría de los MCG con incrementos solo en el modelo BCC, los que son considerables solo para el futuro cercano dado que, para el futuro lejano, estos aumentaron, como máximo, un 15%.

Tabla 5.14: Caudales máximos instantáneos para periodo de deshielo.

Modelo	Retorno [años]	2	5	10	20	25	50	100
BCC-CSM [mm]	F. Cercano	0,88	1,08	1,20	1,31	1,35	1,45	1,55
	C. Lejano	0,71	0,85	0,93	1,00	1,02	1,09	1,15
CMCC-CMS [m3/s]	F. Cercano	0,83	0,86	0,87	0,88	0,88	0,89	0,90
	C. Lejano	0,67	0,71	0,73	0,74	0,75	0,76	0,78
CSIRO [m3/s]	F. Cercano	0,83	0,76	0,73	0,71	0,70	0,68	0,67
	C. Lejano	0,69	0,73	0,75	0,77	0,77	0,79	0,80
MPI-ESM-LR [m3/s]	F. Cercano	1,05	1,01	0,99	0,97	0,97	0,95	0,94
	C. Lejano	0,64	0,70	0,74	0,77	0,78	0,80	0,82

### Hidrograma unitario triangular

Considerando los datos de las variaciones de área bajo la isoterma 0° durante el tiempo, se calculan las crecidas utilizando el HUT y se muestran en la Tabla 5.15.

Tabla 5.15: Variación de los caudales de crecidas calculadas con el HUT para la sub-cuenca en estudio.

Modelo	Retorno [años]	2	5	10	20	25	50	100
BCC-CSM [mm]	F. Cercano	1,00	0,97	0,96	0,95	0,95	0,94	0,93
	C. Lejano	1,41	1,46	1,49	1,51	1,52	1,54	1,56
CMCC-CMS [m3/s]	F. Cercano	1,03	1,26	1,40	1,52	1,56	1,67	1,78
	C. Lejano	1,48	1,91	2,19	2,44	2,52	2,76	3,00
CSIRO [m3/s]	F. Cercano	1,59	1,74	1,83	1,90	1,93	1,99	2,05
	C. Lejano	1,52	1,67	1,75	1,81	1,83	1,89	1,95
MPI-ESM-LR [m3/s]	F. Cercano	2,42	2,87	3,13	3,37	3,44	3,66	3,87
	C. Lejano	1,84	2,37	2,71	3,02	3,12	3,41	3,70

La Tabla 5.15 muestra tres comportamientos diferentes. Por un lado, el modelo BCC-CSM presenta una leve disminución hacia el futuro cercano para luego aumentar hacia el futuro lejano en un 50% en promedio. Luego, el modelo CMCC-CMS tiene un

aumento sostenido en el tiempo con los mayores caudales hacia el futuro lejano. Por último, los últimos dos MCG presentan grandes aumentos hacia el futuro cercano los que luego disminuyen hacia el futuro lejano. Sin embargo, estos últimos dos modelos son los que más varían con caudales de hasta un 387% del caudal histórico, principalmente debido a los cambios en las temperaturas medias diarias en días de tormentas.



## 6. Índices Meteorológicos e Hidrológicos.

A continuación, se muestran los resultados de los diferentes índices, tanto hidrológicos como meteorológicos. Cabe destacar que, en el caso donde se utilizaron cuatro modelos diferentes, los índices que se muestran son los promedios por cuenca de los cuatro modelos<sup>29</sup>. Además de ello, se calculan los índices meteorológicos en dos escenarios: Considerando índices estacionarios, es decir, en base a los datos históricos (1970-2005) y otro escenario considerando índices que varían, actualizándose con los datos meteorológicos desde el año 2005 en adelante.

Se destaca que, en ninguno de los índices meteorológicos se muestran los eventos normales (“Cercanos a normal o Normal” según IPE y PDSI).

Los índices hidrológicos<sup>30</sup> por su parte, se calculan de forma estacionaria, igual que los índices meteorológicos y el escenario no estacionario con variaciones por cada periodo, es decir, por ejemplo, para el futuro cercano, se utilizan los datos del periodo histórico y el mismo futuro cercano.

### 6.1 Cuenca del Río Biobío: Sub-Cuenca “Laguna de la Laja”

#### Índice de precipitación estandarizado

Utilizando los promedios de los 4 modelos, se muestra el IPE para tres periodos, el periodo deshielo en la Figura 6.1 (octubre a marzo), el periodo pluvial en la Figura 6.2 (abril a octubre) y el año hidrológico en la Figura 6.3 (abril a marzo).

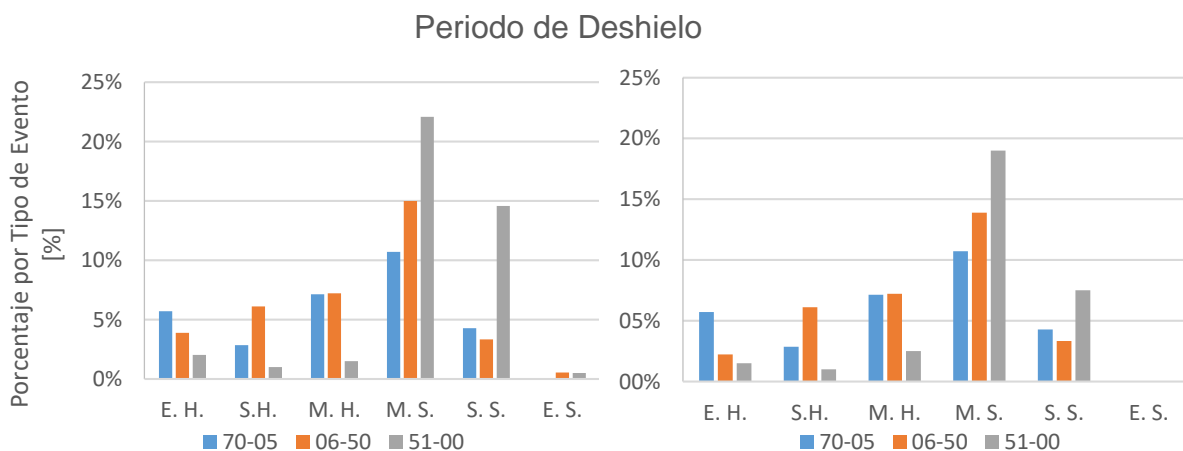


Figura 6.1: IPE para el periodo de deshielo en escenario estacionario (izquierda) y no estacionario (derecha).

<sup>29</sup> Detalles por modelos en anexo. IPE en anexo E y PDSI en anexo F.

<sup>30</sup> Detalles de los índices por modelo en anexo. Índice de caudales bajos en anexo G.

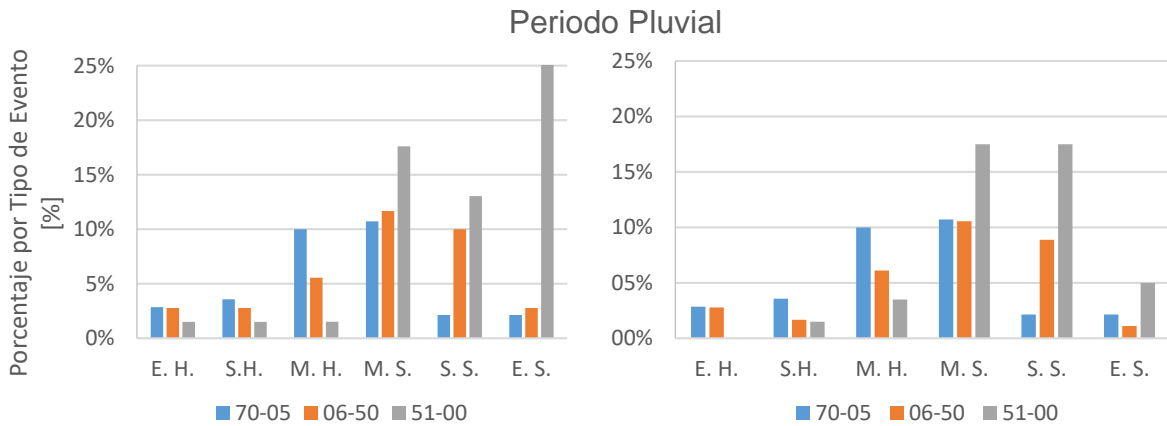


Figura 6.2: IPE para la cuenca estudiada en escenario estacionario (izquierda) y no estacionario (derecha).

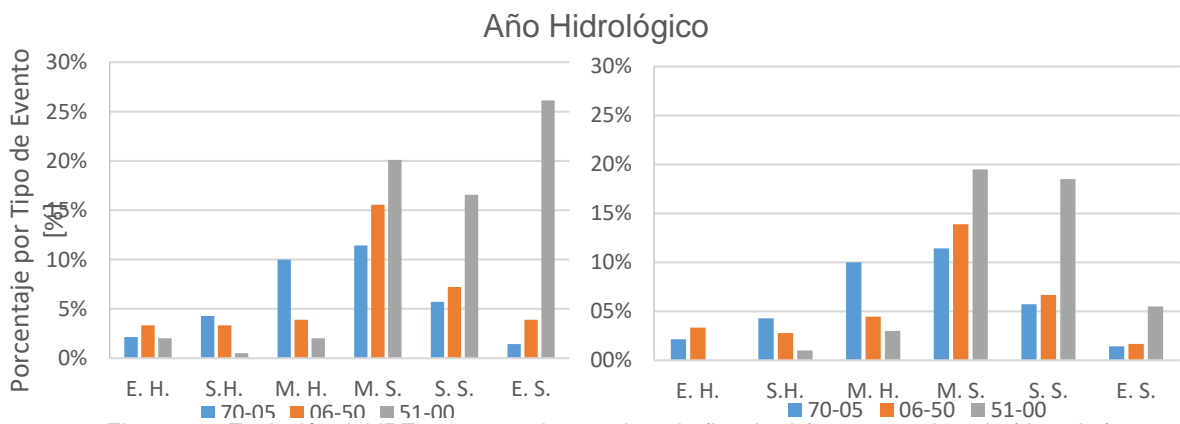


Figura 6.3: Evolución del IPE en escenario estacionario (izquierda) y no estacionario (derecha).

Analizando brevemente lo anterior, se puede notar un aumento considerable en todas las sequías, desde la moderada hasta la extrema y una disminución (aunque no tan notoria) de los periodos húmedos. Esto se puede entender como una tendencia hacia los extremos, con cada vez menos periodos normales, recordando que estos últimos no se muestran en el gráfico. Por otro lado, entre ambos escenarios, estacionario y no estacionario, la única diferencia es la tendencia que tienen los extremos hacia los eventos centrales (moderadamente húmedo y seco), lo cual tiene sentido considerando los cambios en los parámetros para el índice, pero que, aun así, se ve reflejado en un aumento considerable de sequías.

El cambio más extremo se encuentra en el análisis anual, donde, se encontrarán, para un futuro lejano, más de la mitad (60% aprox.) de años secos y un cuarto de ellos, en sequía extrema, si consideramos la sequía con los parámetros históricos.

### Índice de severidad de sequías de Palmer

En el caso del PDSI, al igual que en el IPE, se promediaron las cantidades de eventos en cada modelo y, nuevamente, se compara entre los escenarios de parámetros históricos y no estacionario. Sin embargo, en este caso el análisis es a nivel mensual

por lo que la Figura 6.4 muestra los índices para cada mes en los diferentes periodos de forma porcentual.

En esta se puede ver que la mayoría de los eventos se toman como húmedos, incluso considerando la disminución en las precipitaciones anuales y el aumento de temperaturas en general, siendo siempre muy bajas las sequías. Sin embargo, se pueden apreciar, en el escenario estacionario, un aumento en las sequías con el pasar de los años y, en particular, en las sequías extremas.

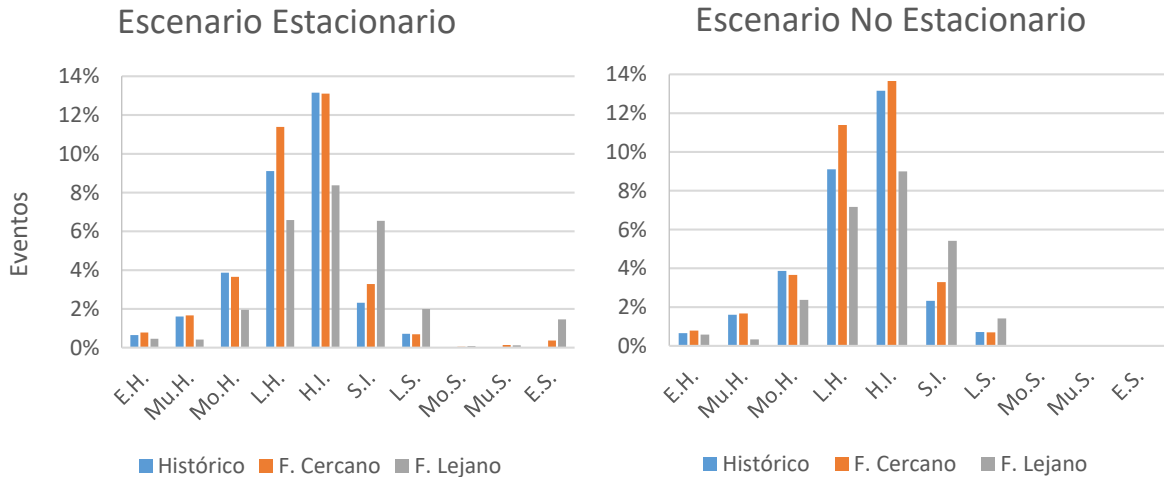


Figura 6.4: Resultados del PDSI en la cuenca definida por la estación "Laguna de la Laja".

### Índice de caudales bajos

En cuanto a índices hidrológicos, la Tabla 6.1 muestra los resultados del índice de caudales bajos para los tres periodos, histórico (1970-2005), futuro cercano (2006-2050) y futuro lejano (2051-2075), los que muestran un aumento considerable en los días de sequía en un escenario estacionario, pasando de un 5% aproximado de días en sequía hasta más de un cuarto de los días en el futuro lejano. Además de ello, aumenta la duración promedio de estas y también la duración de la peor sequía de cada periodo.

Tabla 6.1: Evolución de las sequías hidrológicas en la cuenca del Biobío.

Estacionario	Histórico	F. Cercano	F. Lejano
Cantidad de días de Sequía [días]	565,5	1705,3	2457,8
Parte en sequía [%]	4,3%	10,4%	26,9%
Duración Promedio [días]	8,3	14,0	20,4
Duración Máxima [días]	65,5	162,8	179,8

Luego, en el escenario no estacionario, se utilizan los caudales de 95% en el periodo histórico para el mismo. Luego, para el futuro cercano se utilizan los caudales desde

1970 al 2051 y, por último, para el futuro lejano se utilizan los Q95% de todos los datos. Luego, los resultados de esto se muestran en la Tabla 6.2.

*Tabla 6.2: Escenario no estacionario utilizando el índice de caudales bajos.*

<b>No Estacionario</b>	<b>Histórico</b>	<b>F. Cercano</b>	<b>F. Lejano</b>
<b>Cantidad de días de Sequía [días]</b>	565,5	969,0	1017,5
<b>Parte en sequía [%]</b>	4,3%	5,9%	11,2%
<b>Duración Promedio sequías [días]</b>	8,3	10,6	13,1
<b>Duración Máxima sequía [días]</b>	65,5	125,5	91,0

Nuevamente se nota un aumento en el porcentaje de días de sequía, aunque bastante menor al del escenario de parámetros históricos. Sin embargo, se ve una disminución en la sequía más larga entre el futuro cercano y el futuro lejano con leves aumentos en los promedios.

#### Índice con balance hídrico

Ya elegido el caudal de 85% de probabilidad de excedencia para realizar el balance hídrico en la cuenca definida por la estación “Laguna de la Laja”, se calculan los periodos en los que se tienen déficit y superávit. Estos resultados se ven reflejados en la Figura 6.5 donde las columnas azules muestran el escenario de parámetros históricos, el cual mantiene el caudal límite como el caudal del 85% de probabilidad de excedencia como límite. Por otro lado, las columnas rojas muestran un escenario no estacionario donde, el periodo histórico (delimitado por el primer corte en negro) mantiene el caudal Q85% del periodo estacionario. Luego, el segundo corte, el futuro cercano, se actualiza el caudal de 85% con datos históricos y del mismo periodo. Por último, para el futuro lejano se utiliza el caudal del 85% de todos los datos.

Con ello se puede notar y comprar de formar fácil las diferencias entre los periodos y los escenarios, el cual muestra un gran aumento en las sequías hacia el futuro lejano, tanto en duración como en cantidad, sin grandes cambios en el futuro cercano. Además, ambos escenarios reflejan algo parecido siendo el no estacionario el que tiene menores déficit. También se notan en los tres primeros modelos peaks bastante extremos para el futuro lejano. El tercer modelo (CSIRO), es el que muestra menos cantidad de años en sequía, aunque sin disminuir la intensidad de éstas.



### Índice de caudales bajos: Q85%

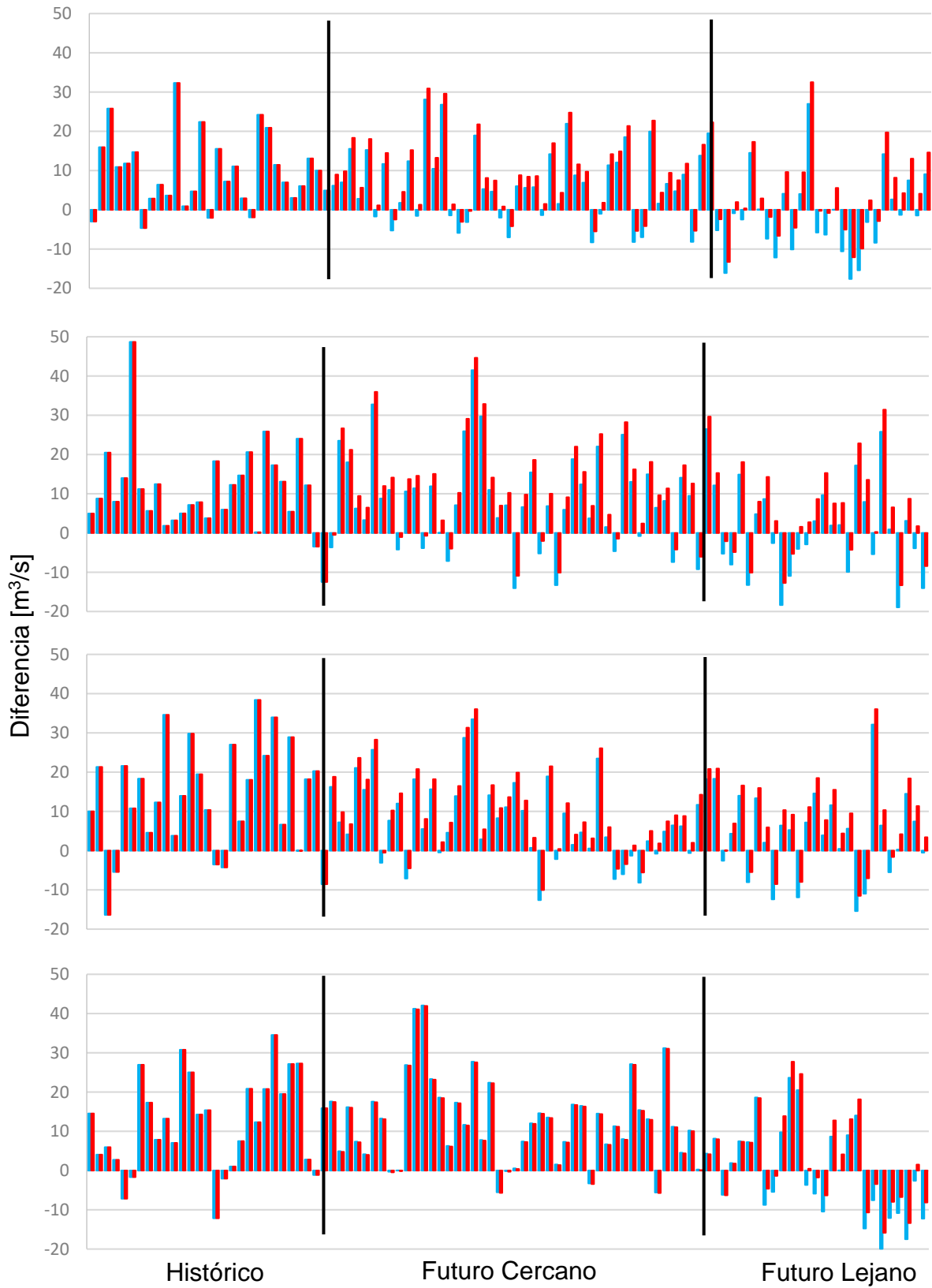


Figura 6.5: Resultados del balance hídrico por cada modelo, BCC-CSM1.1, CMCC-CMS, CSIRO-Mk3.6.0 y MPI-ESM-LR respectivamente.

## 6.2 Cuenca del Río Maule: Sub-Cuenca “Laguna de la Invernada”

### Índice de precipitación estandarizado

Utilizando los promedios de los 4 modelos, se muestra el IPE para tres periodos, deshielo en la Figura 6.6 (octubre a marzo), pluvial en la Figura 6.7 (abril a octubre) y año hidrológico en la Figura 6.8 (abril a marzo).

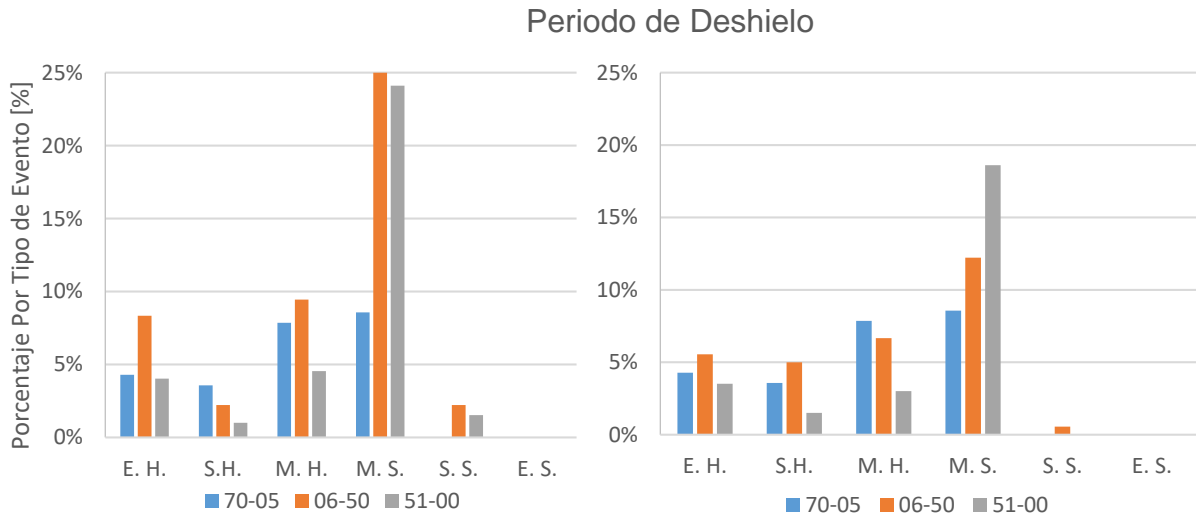


Figura 6.6: Evolución del IPE en escenario estacionario (izquierda) y no estacionario (derecha).

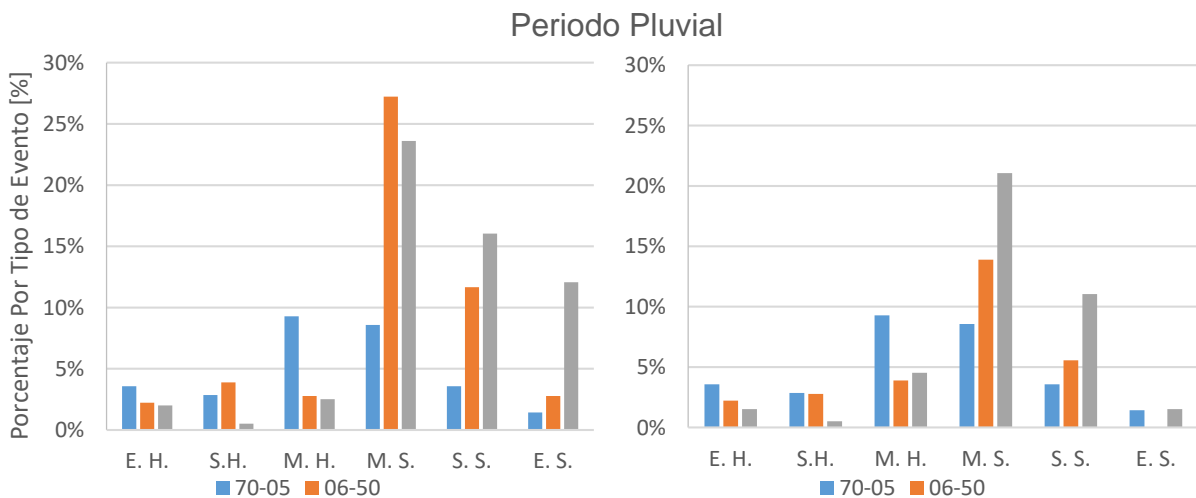


Figura 6.7: El IPE para los distintos intervalos en el periodo pluvial para el caso estacionario (izquierda) y no estacionario (derecha).

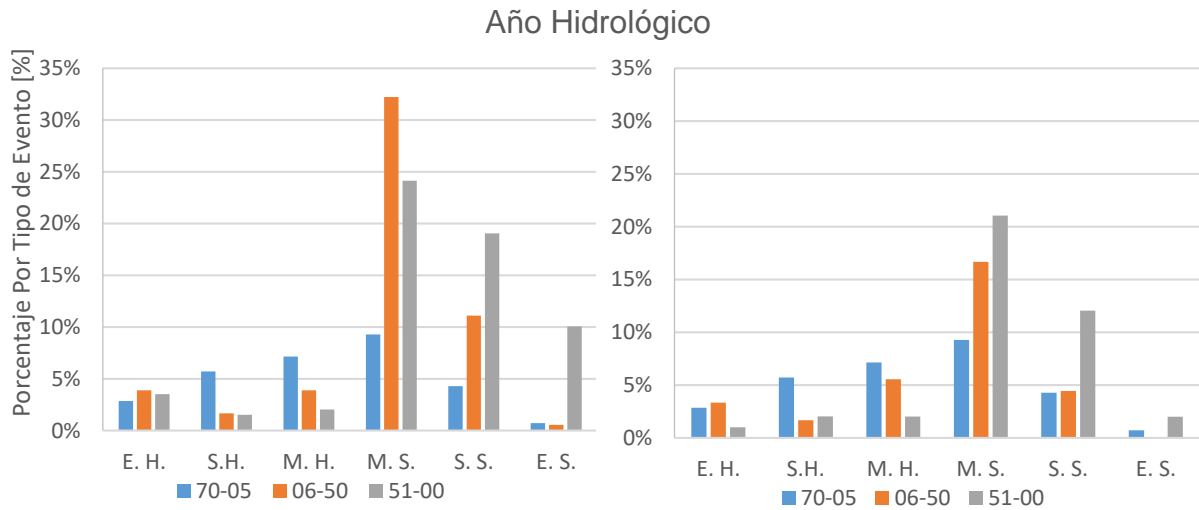


Figura 6.8: Cambios en el IPE para los diferentes intervalos en caso estacionario (izquierda) y no estacionario (derecha).

En este caso, se puede notar la baja influencia del periodo de deshielo sobre las sequias anuales donde aumentan drásticamente las sequías moderadas para el futuro cercano. Finalmente, para el futuro cercano se calculan casi un 50% de sequías para el escenario de parámetros históricos.

Nuevamente el escenario no estacionario refleja una mayor normalidad en los eventos en los eventos reflejándose una disminución general de eventos no normales, aunque con leves diferencias en la cantidad de eventos secos con respecto al escenario de la figura izquierda.

#### Índice de severidad de sequías de Palmer

De igual forma que en otras cuencas, se promedian las cantidades de eventos en cada modelo y, nuevamente, se compara entre los escenarios de parámetros históricos y no estacionario. Cabe destacar que el PDSI realiza un análisis a nivel mensual, lo que se muestra en la Figura 6.9.

En esta no aparece una cantidad de sequías considerables, aunque los eventos húmedos disminuyen hacia el futuro lejano, para el escenario de parámetros históricos. Por ello, en este se mantiene la mayoría de los eventos como húmedos. Lo mismo ocurre en el escenario no estacionario habiendo leves diferencias entre ambos gráficos.

Interesante notar que, en los dos gráficos, los eventos de humedad aumentan hacia el futuro, aunque disminuyen finalmente hacia el futuro lejano.

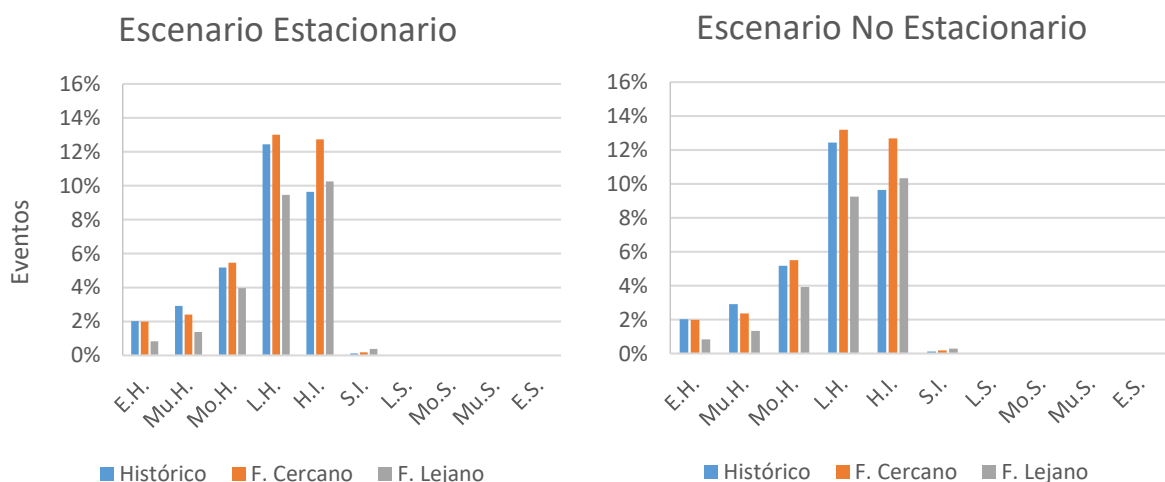


Figura 6.9: Resultados en la cuenca definida por la estación "Laguna de la Invernada".

## Índice de caudales bajos

Para el caso del índice de caudales bajos, se utilizan nuevamente los promedios de los resultados de los diferentes modelos para los tres diferentes periodos, resultados que se muestran en la Tabla 6.3. Así, se muestra un aumento en las sequías muy grande, tanto en cantidad como en duración, llegando a ser casi un tercio del tiempo periodo de sequía, lo que incluso podría aumentar considerando que solo se llega al 2075 con la modelación de caudales y el crecimiento del porcentaje aumenta exponencialmente.

Tabla 6.3: Resultados del índice en el escenario de parámetros históricos

Estacionario	Histórico	F. Cercano	F. Lejano
<b>Cantidad de días de Sequía [días]</b>	570,5	1653,0	2912,3
<b>Parte en sequía [%]</b>	4,4%	10,1%	31,9%
<b>Duración Promedio sequías [días]</b>	13,4	23,3	40,1
<b>Duración Máxima sequía [días]</b>	234,8	218,3	498,8

Por otro lado, la Tabla 6.4 muestra el escenario no estacionario donde, de todas formas, se nota un incremento sostenido de los periodos de sequías, siendo la duración máxima de, aproximadamente, dos tercios del año.

Tabla 6.4: Evolución del índice en escenario no estacionario.

No Estacionario	Histórico	F. Cercano	F. Lejano
<b>cantidad de días de Sequía [días]</b>	570,5	798,0	1354,8
<b>Parte en sequía [%]</b>	4,4%	4,9%	14,8%
<b>Duración Promedio sequías [días]</b>	13,4	14,3	23,8
<b>Duración Máxima sequía [días]</b>	234,8	170,0	313,0

## Índice con balance hídrico

Utilizando el caudal de 85% histórico como límite para las columnas azules y, un caudal que evoluciona con cada periodo para las columnas rojas, la Figura 6.10 muestra los resultados del índice con balance hídrico.

En general, los resultados muestran un pequeño incremento de la cantidad de sequías hacia el futuro cercano en los primeros tres gráficos, creciendo bastante para el último periodo. El cuarto modelo, sin embargo, presenta una disminución en la cantidad e intensidad de las sequías en el segundo periodo, es decir, muestra un aumento de los caudales en este intervalo con los mayores valores de los tres periodos. Aun así, para los últimos años se ve un incremento de déficits cerrando con una sequía continua.

### Índice de caudales bajos: Q85%

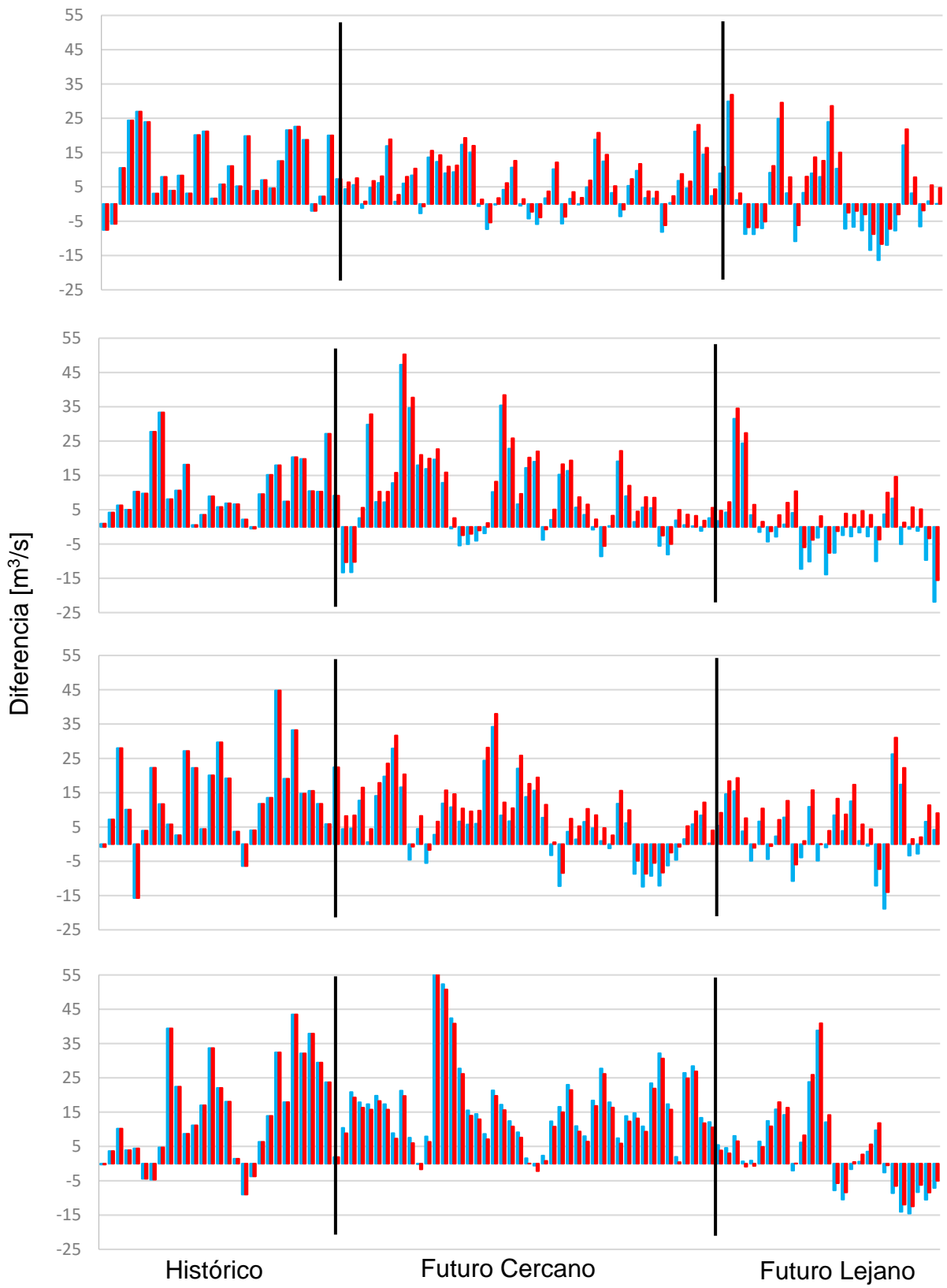


Figura 6.10: Resultados del balance hídrico por cada modelo, BCC-CSM1.1, CMCC-CMS, CSIRO-Mk3.6.0 y MPI-ESM-LR respectivamente.

### 6.3 Cuenca del Río Maipo: Sub-Cuenca “Volcán en los Queltehues”

#### Índice de precipitación estandarizado

Utilizando los datos de la cuenca del Maipo, se muestra el IPE para tres periodos; periodo deshielo en la Figura 6.11 (octubre a marzo), periodo pluvial en la Figura 6.12 (abril a octubre) y año hidrológico en la Figura 6.12 (abril a marzo).

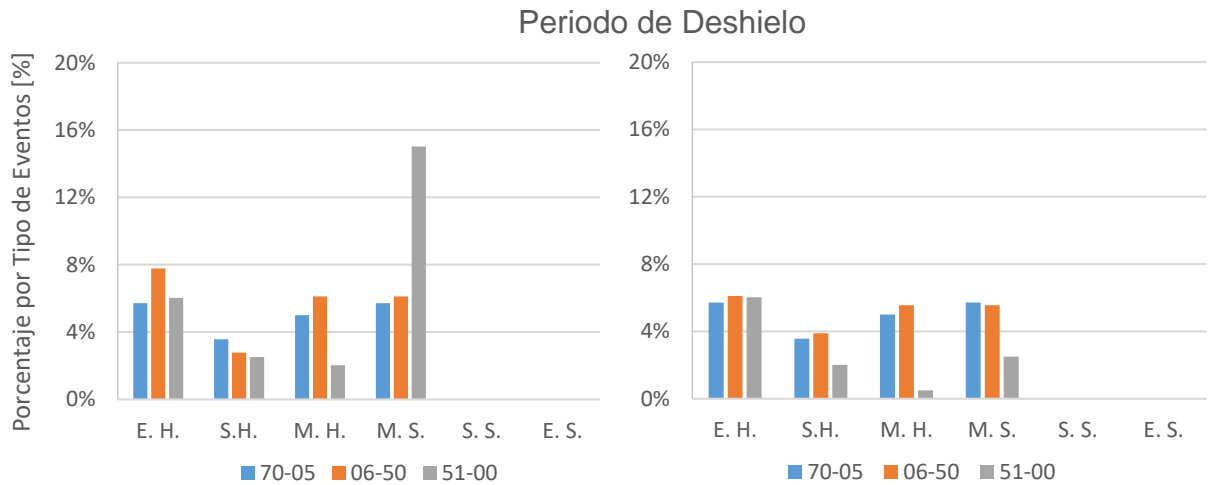


Figura 6.11: IPE para los diferentes intervalos en escenario parámetros históricos (izquierda) y no estacionario (derecha). Período de deshielo. Cuenca Volcán en Queltehues

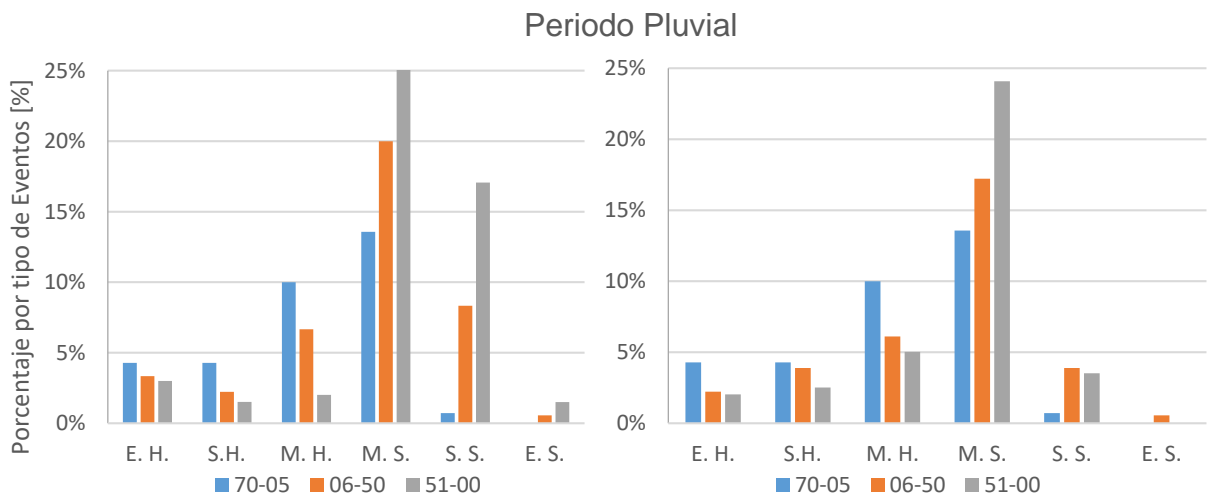


Figura 6.12: Evolución del IPE en la cuenca del Maipo con parámetros estacionarios (izquierda) y no estacionarios (derecha).

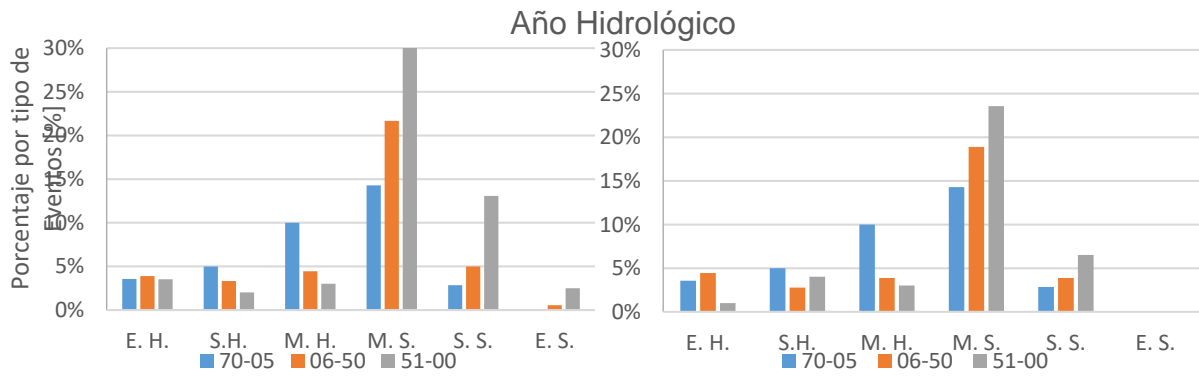


Figura 6.13: IPE en la cuenca del Maipo en escenario estacionario (izquierda) y no estacionario (derecha).

El IPE refleja un leve aumento en las sequías extremas (extrema y severa) y un gran aumento en la sequía moderada en los intervalos anuales y periodos pluviales. Cabe notar los bajos eventos de sequías en el periodo de deshielo, lo cual se puede atribuir a la ya baja cantidad de precipitación en esta época.

### Índice de severidad de sequías de Palmer

La Figura 6.14 muestra los resultados del PDSI promediados para los 4 modelos. En estos se muestran los eventos de sequía y eventos húmedos definidos por el índice, excluyendo los eventos normales o cercanos a normales.

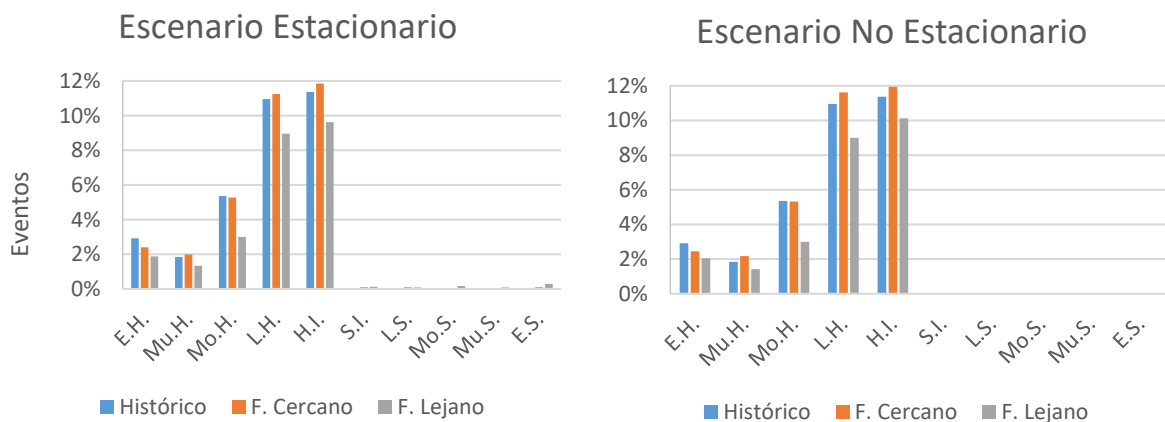


Figura 6.14: Resultados del índice para la cuenca definida por la estación "Río Volcán antes de junta con río Maipo".

Del gráfico se pueden notar eventos húmedos que, aunque poco, van en disminución hacia el futuro lejano. Sin embargo, en el caso estacionario se pueden ver algunos eventos de sequías extremas hacia este último periodo.

### Índice de caudales bajos

El índice de caudales bajos para la cuenca del río Maipo, al igual que en las otras dos cuencas anteriores, se ve en base a los promedios de los 4 modelos para entregar una



idea de la evolución de estos en los tres periodos. Así, los resultados se muestran en la Tabla 6.5 para el escenario estacionario, el cual considera el caudal del 95% tomado para el intervalo histórico. En esta se pueden apreciar grandes cambios ya en el futuro cercano donde existe aproximadamente un quinto de los días del periodo en sequía. Más aun, en el futuro lejano se proyecta un 45% de sequía con grandes máximos de hasta mayores a un año. A pesar de ello, la duración promedio de las sequías muestra que estas tenderían a durar aproximadamente un mes y medio.

*Tabla 6.5: Índice en los diferentes periodos en el escenario estacionario.*

<b>Estacionario</b>	<b>Histórico</b>	<b>F. Cercano</b>	<b>F. Lejano</b>
<b>Cantidad de días de Sequía [días]</b>	719,5	3710,8	4083,8
<b>Parte en sequía [%]</b>	5,5%	22,6%	44,8%
<b>Duración Promedio sequías [días]</b>	9,1	19,4	46,3
<b>Duración Máxima sequía [días]</b>	78,0	198,8	504,3

Por otro lado, el escenario no estacionario en la Tabla 6.6, denota una gran baja en los porcentajes con respecto al escenario estacionario. Esto no hace más que confirmar la rápida evolución de las sequías en el periodo entre el año 2006 y 2050, haciendo “normales” caudales que, según una mirada histórica, parecerían una sequía.

*Tabla 6.6: Escenario no estacionario para el índice de caudales bajos.*

<b>No Estacionario</b>	<b>Histórico</b>	<b>F. Cercano</b>	<b>F. Lejano</b>
<b>Cantidad de días de Sequía [días]</b>	719,5	1232,8	1261,5
<b>Parte en sequía [%]</b>	5,5%	7,5%	13,8%
<b>Duración Promedio sequías [días]</b>	9,1	10,5	15,4
<b>Duración Máxima sequía [días]</b>	78,0	89,8	138,0

### Índice con balance hídrico

Los resultados de los escenarios estacionario (en azul) y no estacionario (en rojo) de la Figura 6.15 muestran un incremento en los peaks del futuro cercano donde, además, se ven un incremento en la cantidad y duración de las sequías.

Sin embargo, para el futuro lejano las sequías se vuelven frecuentes e intensas en el escenario estacionario con una leve diferencia con el no estacionario, donde las intensidades son menores, pero con la gran mayoría de los eventos definidos como sequías.

### Índice de caudales anuales: Q85%

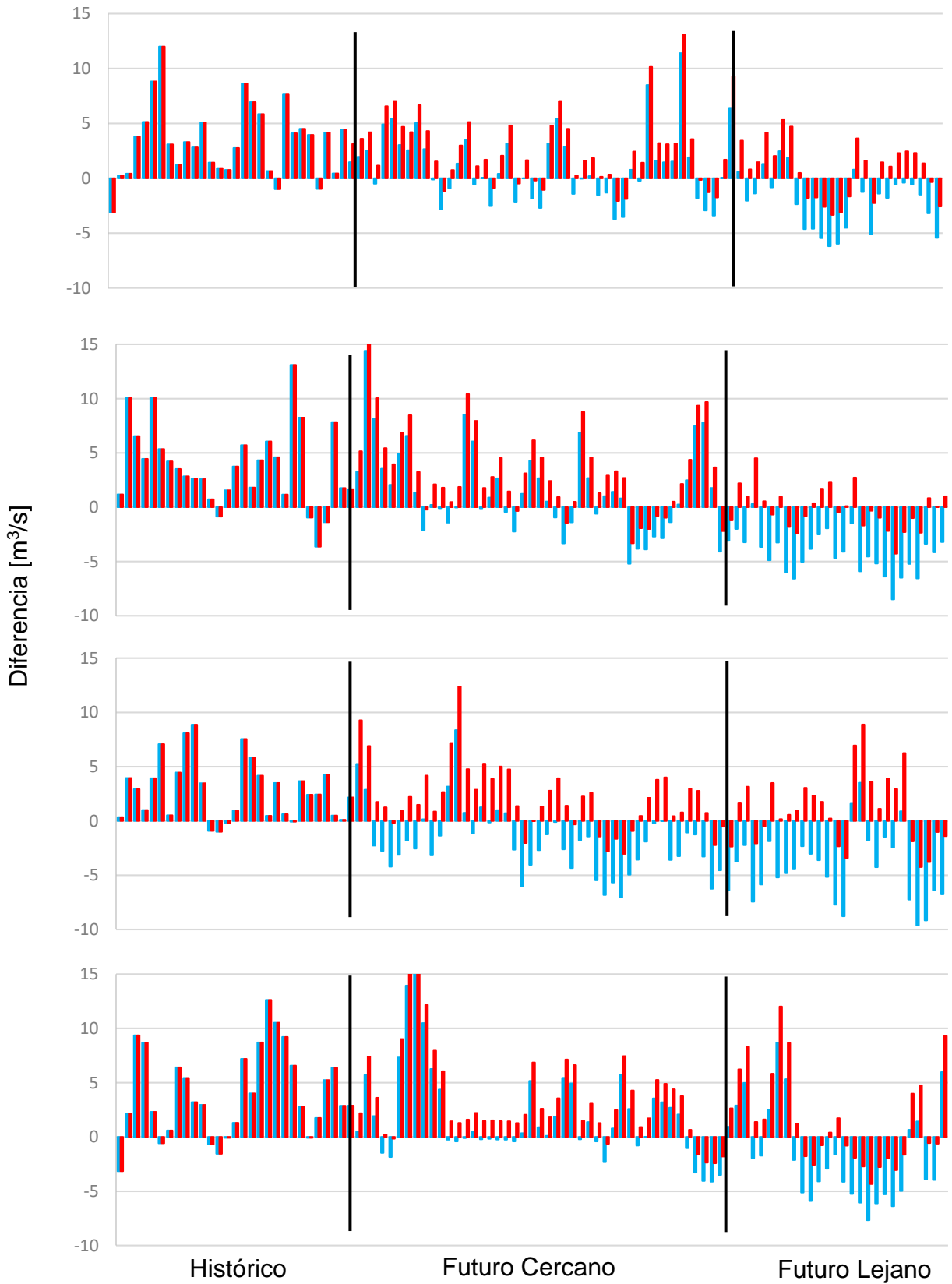


Figura 6.15: Resultados del balance hídrico por cada modelo, BCC-CSM1.1, CMCC-CMS, CSIRO-Mk3.6.0 y MPI-ESM-LR respectivamente.

## 6.4 Cuenca del Río Limarí: Sub-Cuenca “Pichasca”

Para la cuenca del río Limarí solo se utilizaron los datos escalados del modelo MRI-CGCM3, seleccionado en el capítulo 4.

### Índice de precipitación estandarizado

El IPE para a cuenca del río Limarí se presenta a continuación dividido de la misma forma que antes, siendo la Figura 6.16 la que detalla la evolución del periodo de deshielo (octubre a marzo), la Figura 6.17 sobre el IPE en el periodo pluvial (abril a septiembre) y, por último, la Figura 6.18 que muestra los cambios de este índice en el año hidrológico.

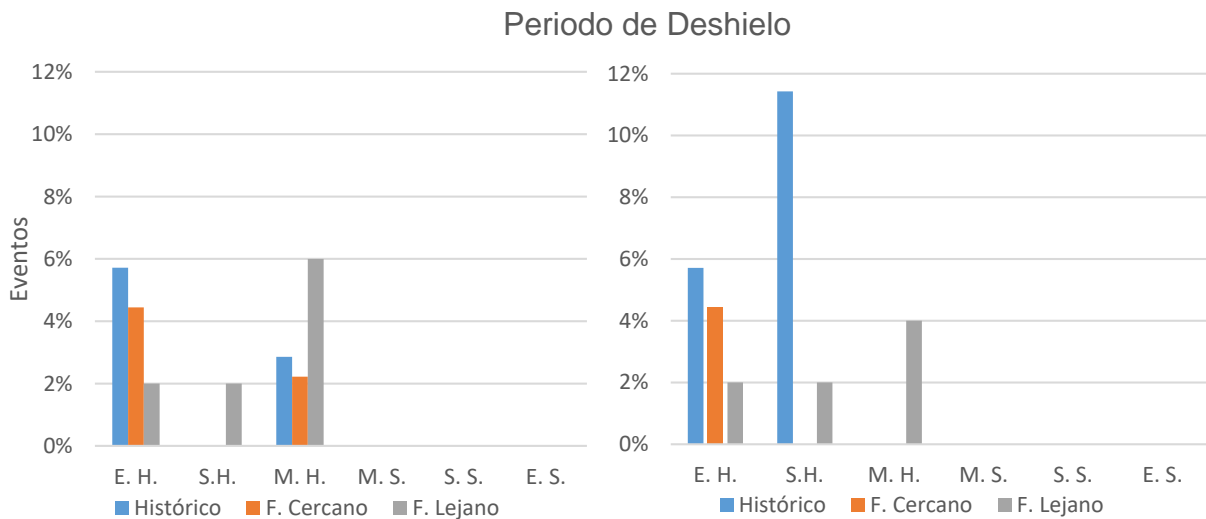


Figura 6.16: IPE en Período de deshielo para el escenario parámetros históricos (izquierda) y no estacionario (derecha). Estación Pichasca

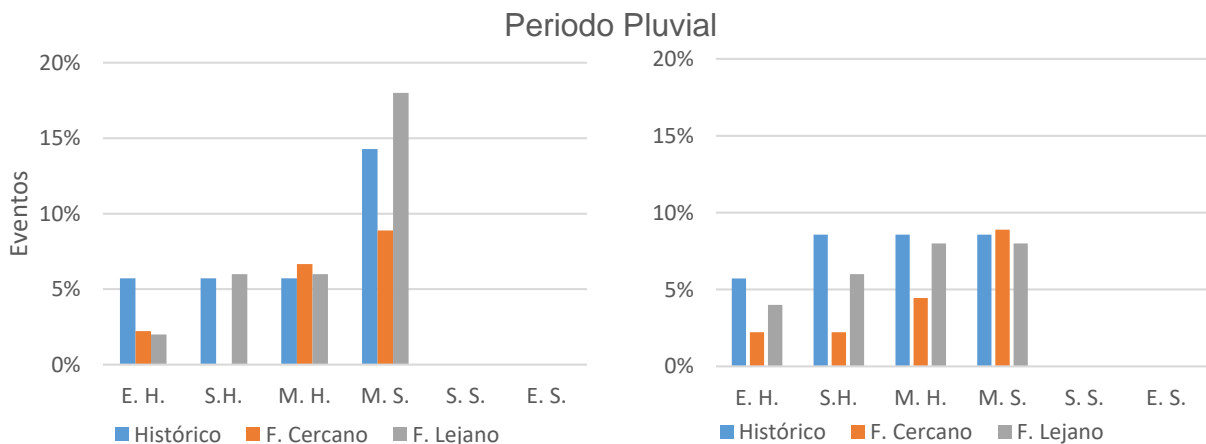


Figura 6.17: Evolución del IPE en Período pluvial para el escenario parámetros históricos (izquierda) y no estacionario (derecha). Estación Pichasca

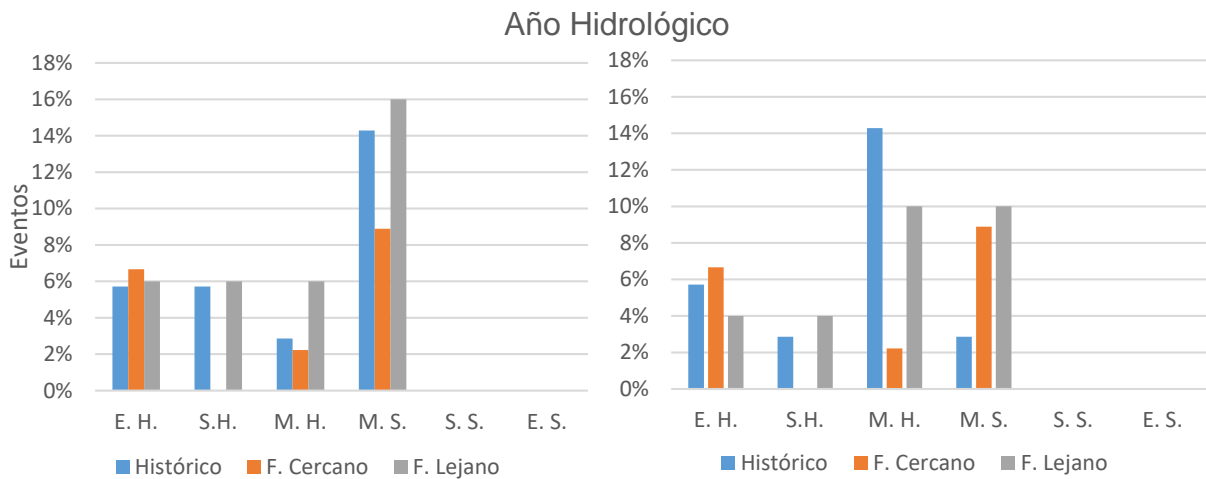


Figura 6.18: IPE para el año hidrológico en la estación "Pichasca".

En este caso, el índice muestra cambios bastante considerables en ambos escenarios y en todos los intervalos. Sin embargo, los más interesantes son los para el periodo anual donde los cambios entre el periodo histórico y el futuro lejano son muy pequeños siendo que, entre el histórico y el futuro cercano cambian bastante. Además, debido al aumento de precipitaciones anuales, el escenario no estacionario muestra un aumento en las sequías hacia los años futuros debido al incremento en la media.

### Índice de severidad de sequías de Palmer

En el caso del Río Limarí, dado que se trabajó con un único modelo, solo se utilizan estos datos para calcular el PDSI, lo que se muestra en la Figura 6.19. Los resultados muestran una tendencia hacia los extremos, aunque con mayor presencia en la zona húmeda. Cabe destacar, sin embargo, que en ambos escenarios las sequías aumentan hacia el futuro cercano con una leve disminución en el futuro lejano.

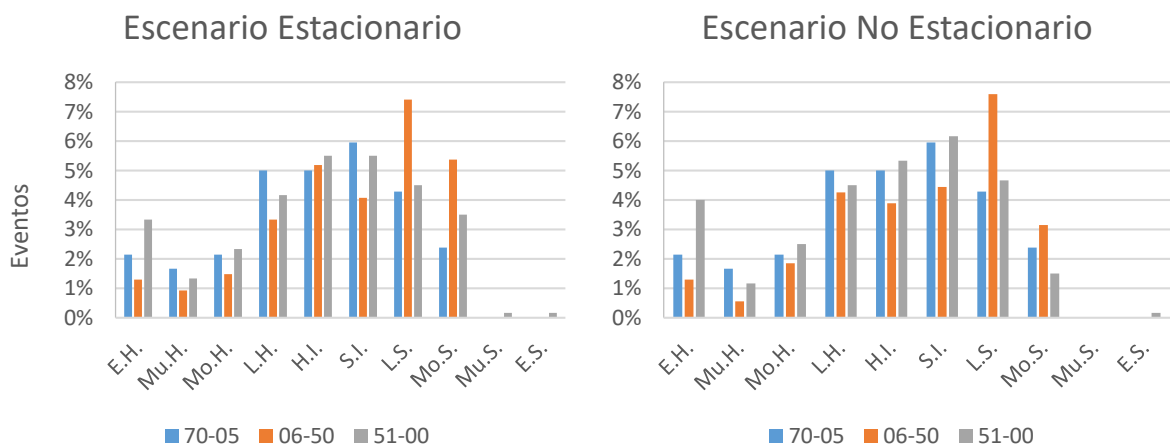


Figura 6.19: PDSI en la estación "Pichasca".

## 7. Análisis y Conclusiones

### 7.1 Comentarios de los datos, índices y modelos

Para llegar a conclusiones válidas, es necesario analizar, en primera instancia, los datos utilizados durante el estudio. Se pueden entender disminuciones generales en las medias de las precipitaciones anuales, siendo la cuenca del Limarí la única que aumenta con el tiempo. Sin embargo, en todas las cuencas se aprecian grandes cambios de la variación, (máximos y mínimos) de las precipitaciones y temperaturas medias diarias, aumentando la desviación estándar llevando a que, por ejemplo, se tengan menos días con precipitaciones, pero, cuando las hay, estas son con cada vez mayores.

En cuanto a los índices meteorológicos investigados, el IPE logra mostrar de forma simple los posibles escenarios de sequía con eventos bien definidos para cada intervalo. Sin embargo, en periodos de pocas lluvias, este índice tiende a ser menos confiable. Por ejemplo, en la época de deshielo en la zona del Limarí, el IPE no muestra eventos de sequía y si varios eventos húmedos, incluso con las bajas precipitaciones en estos periodos. Ello debido a que el rango de precipitaciones que contiene este tipo de eventos es extremadamente acotado y con un promedio muy cercano al 0. Algo similar se podría notar en la misma época en la cuenca del río Volcán.

Por otro lado, el PDSI incluye otra variable, la temperatura, para realizar cálculos bastante más complejos que debiesen proveer una idea más precisa de lo que ocurre en un mes cualquiera tomando en cuenta que, además, considera lo ocurrido en los meses pasados al de estudio, cosa que el IPE no hace. Sin embargo, debido a su complejidad es necesario realizar muchos supuestos que pueden distorsionar el resultado. Por ejemplo, la escorrentía real y superficial, en el índice no toma en cuenta la infiltración real del suelo dado que considera que este tiene una capacidad limitada por la capacidad de campo. Además, la evapotranspiración y la recarga no consideran masas grandes de agua como ocurren en las sub-cuencas del río Maule y Biobío donde las estaciones están fijadas en el desagüe de la Laguna de la Invernada y de la Laja, respectivamente.

En cuanto a los índices de sequías hidrológicas se comenta la simpleza de los cálculos con resultados claros que incluyen, no solo las cantidades de días, sino que, las duraciones máximas de estas y, de quererlo, se podrían calcular las máximas intensidades. Además, las elecciones de los caudales de 85 y 95% de probabilidad de excedencia crean escenarios bien definidos para casos extremos como el estudiado en RCP8.5. Cabe destacar que, en este trabajo, no se utiliza una cualidad del índice del balance hídrico que incluye la espacialidad de las sequías, lo que podría reflejar tendencias en los “movimientos” o patrones en estas, lo que podría ser de utilidad al

poder adelantarse a sequías conociéndose los patrones generales del “movimiento” de estas.

Por último, cabe destacar que existe una gran variedad de modelos de circulación global lo que, según muestra este texto, tienen resultados muy variados. Así, se comenta que podría haber dos soluciones para encontrar resultados más concretos. Utilizar la mayor cantidad de modelos en estos cálculos con el fin de lograr rangos de posibilidades con ciertos intervalos de confianza, o, realizar un trabajo parecido al que se usa en la cuenca del Limarí, incluyendo un análisis a los mismos índices y cálculos de crecidas entre los datos modelados y los observados para lograr un mejor resultado en la predicción.

## 7.2 Cuenca del Río Biobío: Sub-Cuenca “Laguna de la Laja”

En la cuenca definida por la estación “Laguna de la Laja” se ven bajas variaciones en las áreas de los modelos excepto en uno donde aumenta radicalmente, aunque esto no tiene un gran efecto en los cambios en las fórmulas de Verni y King y el HUT con respecto a los otros modelos. En comparación, entre los MCG, existe un amplio rango de variaciones, aunque, se mantiene el orden, de mayores a menos variaciones por modelo, entre cada método. Cabe destacar que la fórmula del caudal medio diario a máximo instantáneo es el que presenta las mayores disminuciones, en particular, para periodos de retorno más bajos. Aun así, los porcentajes de incremento en cada método no tiene grandes diferencias desde un 15% de aumento en los caudales de menor periodo de retorno (sin considerar el resultado del caudal medio diario a máximo instantáneo) hasta un 45% de aumento en los mayores caudales.

En cuanto a los índices de sequías meteorológicas, el IPE y el PDSI, muestran una gran disminución en las precipitaciones para los diferentes intervalos estudiados, con disminuciones drásticas de los eventos húmedos, aunque con diferencias en cuanto a los eventos de sequía. El primero muestra grandes cantidades de eventos de sequías para ambos escenarios, histórico y no estacionario, en todos sus intervalos de tiempo. Sin embargo, el PDSI muestra pocos eventos de sequía en el escenario parámetros históricos y prácticamente nulos para el no estacionario. Ello podría ocurrir debido a las grandes variaciones de la temperatura, las que, a pesar de aumentar en su media anual, pueden estar cambiando de tal forma que, en los meses con muchas lluvias, disminuya, evaporando menos agua de la precipitada.

Por otro lado, los índices de sequías hidrológicas muestran consistencia en el efecto último del CC sobre los caudales, tendiendo a la sequía en aumento, tanto en intensidad como en duración y cantidad. Sin embargo, el índice diario predice un mayor

aumento hacia el futuro cercano mientras que el balance hídrico muestran variaciones mayores hacia el futuro lejano.

### 7.3 Cuenca del Río Maule: Sub-Cuenca “Laguna de la Invernada”

En la sub-cuenca del río Maule las variaciones del área bajo la isoterma de los 0° son bastante intensas llegando a más del doble en el futuro lejano con respecto al periodo histórico en algunos modelos. Ello afecta en que las dos fórmulas que utilizan el área pluvial, aumenten de forma sostenida a medida que el análisis pasa del periodo histórico al futuro cercano y luego al lejano. Además, a esto se atribuyen las grandes diferencias que existen entre las fórmulas del caudal medio diario a máximo instantáneo con respecto a Verni y King y el HUT. Por un lado, el método del caudal medio diario a máximo instantáneo muestra, en dos de los modelos, aumentos importantes en los caudales de mayor periodo de retorno y con pocas variaciones, y hasta disminuciones, para los caudales bajos. Los otros dos modelos muestran alzas mayores en las crecidas para el futuro cercano que para el lejano.

Este último comportamiento solo se observa en un modelo en el hidrograma unitario triangular. Todo el resto de los resultados muestra un aumento sostenido en todas las crecidas para todos los modelos donde, las crecidas de 100 años en el futuro lejano llegan a alcanzar magnitudes de más del doble que las encontradas para el periodo histórico.

En cuanto a las sequías meteorológicas, el IPE muestra un severo aumento en las sequías del periodo pluvial y anual con más de un 50% de eventos secos para el escenario de parámetros históricos y un 35% para el no estacionario y, disminuyendo a su vez los eventos húmedos.

Por el contrario, el PDSI muestra eventos secos despreciables con leves aumentos en los eventos húmedos en el futuro cercano los que finalmente disminuyen en el futuro lejano.

Los índices hidrológicos en la sub-cuenca muestran pequeños aumentos en la cantidad de sequías en los escenarios de parámetros históricos y no estacionarios. Al contrario, al avanzar al siguiente intervalo de tiempo, las sequías aumentan drásticamente en cantidad duplicando las duraciones máximas de sequías diarias y con déficits más grandes en los caudales medios anuales. Sin embargo, este último muestra caudales máximos parecidos a los de los periodos anteriores.

#### 7.4 Cuenca del Río Maipo: Sub-Cuenca “Volcán en los Queltehues”

En primer lugar, el cambio en el área pluvial a través de los años es considerable llegando a ser, para un futuro lejano, el doble del calculado en el periodo histórico, lo que ocurre en todos los modelos.

Esta cuenca es, sin duda, la que presenta mayores diferencias de variaciones entre los métodos HUT y Verni y King con respecto al caudal medio diario a máximo instantáneo. Este último presenta, como comportamiento general, disminuciones en las crecidas de bajos periodos de retorno con aumentos para algunos caudales de mayor periodo. Contrario a esto, los otros dos métodos predicen aumentos considerables, de más de un 350%, en las crecidas de 100 años.

En cuanto a los índices meteorológicos, existe una fuerte tendencia a la sequía, aunque menos marcada que en otras cuencas. Esto se puede ver en el IPE, donde, para el año hidrológico, en el escenario histórico existe menos de un 3% de eventos de extrema sequía lo que, además, desaparece en un escenario no estacionario. De igual forma, el PDSI alcanza a mostrar pocos eventos de sequía en el escenario de parámetros históricos y solo se aprecian disminuciones en los eventos húmedos.

Por último, en el caso de los índices hidrológicos, considerando todas las cuencas, esta debe presentar el aumento más considerable de sequías. Los aumentos de porcentaje y duración máxima son bastante grandes lo que refleja que, en un futuro lejano, considerando el caudal del 95% del periodo histórico, habrá, casi la mitad del tiempo, sequía. Más aun, en el índice con balance hídrico, los modelos solo difieren en la rapidez de la evolución del índice dado que dos de ellos muestran largas y constantes sequías ya en el futuro cercano. Con esto, para el último periodo prácticamente no se ven caudales mayores al 85% histórico. Considerando el escenario no estacionario, los resultados tampoco presentan resultados favorables dado que, en los momentos en que no se consideran sequías, algunos modelos muestran que el superávit sobrepasa este límite levemente.

#### 7.5 Cuenca del Río Limarí: Sub-Cuenca “Pichasca”

Dado lo comentado en la revisión bibliográfica, y en estas mismas conclusiones, el IPE no es confiable en escenarios con bajas precipitaciones, a diferencia del PDSI. Este presenta un comportamiento bastante claro en la evolución del tiempo donde, para el futuro cercano, aumentan los escenarios secos y disminuyen los húmedos. Al contrario, para el futuro lejano, los índices vuelven prácticamente a los mismos valores del período histórico observándose un pequeño incremento en las sequías. Esto último



puede predecir que, en realidad, los aumentos de las precipitaciones logran equiparar la tendencia de la temperatura para un balance de agua en el suelo.

## 7.6 Comentarios generales

Analizando de forma general el trabajo realizado, existe una seria tendencia, para el escenario RCP8.5, hacia periodos cada vez menos húmedos, y cada vez de mayores sequías, más largas y más intensas. Esto, no solo a nivel meteorológico si no que, principalmente, a nivel hidrológico, lo cual es aún más preocupante considerando que los cauces son importantes fuentes de agua potable y trabajo en Chile.

Sin embargo, el hecho de que las crecidas aumenten año a año debiese ser un motivo de estudio cada vez más minucioso con el fin de poder aminorar los impactos de las sequías. Obras capaces de contener volúmenes considerables y resguardarlos por largos tiempos serán, en caso de continuar en este escenario, útiles y necesarios en un futuro.

Así mismo, es necesario establecer ciertos parámetros para la aplicación de estas fórmulas que logren incluir el CC a los resultados. Por ejemplo, en este trabajo se revisaron dos tipos de escenarios para los índices, donde uno solo tomaba los datos históricos y el otro, consideraba todos los datos hacia el pasado. Con esto, se alza la pregunta acerca de si, quizás, se debiese estudiar la posibilidad de una opción diferente, como, por ejemplo, establecer una cantidad definida de años con datos a utilizar para definir los parámetros de los índices en base a las tendencias las precipitaciones, temperaturas, etc.

Esto último aplica de igual forma a las construcciones que se harán a futuro donde el estudio a nivel histórico ya no tendrá validez. Esto ya que, al considerar operaciones de 50 años o más, se deberá realizar un pronóstico incluyendo las variaciones del clima y, por consiguiente, las crecidas respectivas. Además de ello, esto sería aún más necesario en los lugares donde se ven disminuciones de los caudales en general haciendo inviables grandes proyectos que solo fueron proyectados en base a los datos históricos o, proyectos que, dentro de sus estudios, incluyeron datos de años tan antiguos que, para ese momento, ya no representen la realidad meteorológica ni hidrológica de la zona.



## Bibliografía

- Alley, W. M. (1984). The Palmer Drought Severity Index: Limitations and Assumptions. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 23(7), 1100–1109. [http://doi.org/10.1175/1520-0450\(1984\)023<1100:TPDSIL>2.0.CO;2](http://doi.org/10.1175/1520-0450(1984)023<1100:TPDSIL>2.0.CO;2)
- Arias, C. S. (2011). Análisis de los Efectos de Distintos Escenarios de Registro Histórico en la Estimación de Caudales de Crecida. Aplicación a Obras Hidráulicas de la Cuenca del Río Maule. *Tesis, Universidad de Chile*, 133. Retrieved from [http://www.thesis.uchile.cl/tesis/uchile/2011/cf-arias\\_cr/pdfAmont/cf-arias\\_cr.pdf](http://www.thesis.uchile.cl/tesis/uchile/2011/cf-arias_cr/pdfAmont/cf-arias_cr.pdf)
- Collier, M. A., Jeffrey, S. J., Rotstayn, L. D., Wong, K. K.-H., Dravitzki, S. M., Moeseneder, C., ... Atif, M. (2011). The CSIRO-Mk3.6.0 Atmosphere-Ocean MCG: Participation in CMIP5 and data publication. *MODSIM 2011 - 19th International Congress on Modelling and Simulation - Sustaining Our Future: Understanding and Living with Uncertainty*, (December), 2691–2697.
- Dirección General de Aguas (DGA). (2004). Diagnóstico y Clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad. Cuenca del río Limarí. *Manual*.
- Dirección General de Aguas (DGA). (2004). Diagnóstico y Clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad. Cuenca del río Biobío. *Manual*.
- Dirección General de Aguas (DGA). (2004). Diagnóstico y Clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad. Cuenca del Río Maule, 152.
- Dirección General de Aguas (DGA). (2004). Diagnóstico y Clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad. Cuenca del Maipo, 195.
- Dirección General de Aguas (DGA). (2012). Antecedentes para aplicación de metodología de evaluación de cambio climático. *Manual*.
- Dirección General de Aguas (DGA). (1995). Análisis de eventos hidrometeorológicos extremos en el país. Caudales máximos y mínimos. *Manual*, 1, 1–222.
- DPA, R. N. (1993). Índice Estandarizado De Precipitación. *Departamento Provincial de Aguas, Río Negro*, 1–3.
- Fernández, B. (1997). Identificación y Caracterización de Sequías Hidrológicas en Chile Central. *Ingeniería Del Agua*, 4(diciembre), 37–46.
- Guha-sapir, D., Hoyois, P., & Below, R. (2014). Annual Disaster Statistical Review 2013: The numbers and trends. *Review Literature And Arts Of The Americas*, 1–50. <http://doi.org/10.1093/rof/rfs003>
- Herring, S., Hoerling, M., Peterson, T., & Stott, P. (2014). Explaining Extreme Events of 2013 Events of 2013 From a. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 95(9), 1–96.
- Instituto Español de Oceanografía. (2007). Cambio climático en el Mediterráneo español. *Madrid: Impresos Y Revistas, Instituto Español de Oceanografía, Ministerio de Educación Y Ciencia*, 32–41. Retrieved from <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Cambio+clim?tico=en+el+Mediterr?neo+espa?ol#0>
- IPCC. (2001). Anexo B. Glosario de términos. *Informe de Síntesis - Cambio Climático 2001*, 27. Retrieved from <https://www.ipcc.ch/pdf/glossary/tar-ipcc-terms-sp.pdf>

Ippc. (2013). Working Group I Contribution to the IPCC Fifth Assessment Report, Climate Change 2013: The Physical Science Basis. *IPCC, AR5*(March 2013), 2014. <http://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.Summary>

José, A., & Coronata, R. (2006). ANÁLISIS CRÍTICO DE LOS MODELOS PARA ESTIMAR CAUDALES EN CUENCAS SIN REGISTRO FLUVIOMÉTRICO Y PROPUESTAS DE AJUSTES PARA SU APLICACIÓN EN CUENCAS DEL SUR DE CHILE. *Tesis, Universidad Austral de Chile*, 123.

Lagos, M., Bobadilla, M. P., Vargas, X., Cepeda, J., Silva, V., Uribe, F., & Vásquez, N. (2015). Proyecciones De Crecidas En Cuencas Andinas Bajo Distintos Modelos De Circulación General. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(9), 1689–1699. <http://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

Melrose, J., Perroy, R., & Careas, S. (2015). *Hydrological aspects of drought. Statewide Agricultural Land Use Baseline 2015* (Vol. 1). <http://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

Miao, C., Duan, Q., Sun, Q., Huang, Y., Kong, D., Yang, T., ... Gong, W. (2014). Assessment of CMIP5 climate models and projected temperature changes over Northern Eurasia. *Environmental Research Letters Environ. Res. Lett*, 9, 55007–12. <http://doi.org/10.1088/1748-9326/9/5/055007>

Monroy, J. C. (2010). Análisis del ajuste, sensibilidad e incertidumbre de los parámetros del modelo del SCS. *Pontificia Universidad Javeriana*, 157.

Murthy, C. S. (n.d.). Analysis of Standardized Precipitation Index (SPI) data for drought assessment. *National Remote Sensing Centre*.

Naciones Unidas. (1992). Convención marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático. *Convención Marco de Las Naciones Unidas Sobre El ...*, 62301, 98. Retrieved from <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Convenci?n+marco+de+las+na ciones+unidas+sobre+el+cambio+clim?tico#1>

Ollero, A. (1997). Crecidas e inundaciones como riesgo hidrológico un planteamiento didáctico. *Lurralde Inves. Esp*.

Rojas, O. (2015). Cambios Ambientales y Dinámica de Inundaciones Fluviales en una Cuenca Costera del Centro Sur de Tesis para optar al grado de Doctor en Ciencias Ambientales con mención en Sistemas Acuáticos Continentales OCTAVIO ENRIQUE ROJAS VILCHES CONCEPCIÓN-CHILE. *Tesis, Universidad de Concepción*, 152.

SILVA, V. (2015). IMPACTO DE LAS PROYECCIONES METEOROLÓGICAS PARA MEDIADOS DEL SIGLO XXI DEL MODELO DE CIRCULACIÓN GLOBAL MK EN LOS RECURSOS HÍDRICOS DE CUENCAS PLUVIALES DE LA REGIÓN DEL BIOBÍO, CHILE. *Memoria Para Optar Al Título de Ingeniero Civil. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile*.

SVOBODA, M., HAYES, M., & WOOD, D. (2012). Índice Normalizado De Precipitación. *Guía Del Usuario*, 1–23.

Valiente, Ó. M. (2001). Sequía: Definiciones, Tipologías Y Métodos De Cuantificación. *Investigaciones Geográficas*, 26, 59–80.

Vicario, L., García, C. M., Teich, I., & Carlos, J. (2015). Caracterización de las sequías meteorológicas en la región central de la Argentina. *Universidad Nacional de Córdoba, Argentina*, VI, 153–165.

- Von Storch, H., Zorita, E., & Cubasch, U. (1993). Downscaling of global climate change estimates to regional scales: an application to Iberian rainfall in wintertime. *Journal of Climate*. [http://doi.org/10.1175/1520-0442\(1993\)006<1161:DOGCCE>2.0.CO;2](http://doi.org/10.1175/1520-0442(1993)006<1161:DOGCCE>2.0.CO;2)
- Wilby, R. L., & Wigley, T. M. L. (1997). Downscaling general circulation model output: a review of methods and limitations. *Progress in Physical Geography*, 21(4), 530–548. <http://doi.org/10.1177/030913339702100403>
- Wilhite, D. A., & Glantz, M. H. (1985). Understanding: the Drought Phenomenon: The Role of Definitions. *Water International*, 10(3), 111–120. <http://doi.org/10.1080/02508068508686328>
- Wu, H., Svoboda, M. D., Hayes, M. J., Wilhite, D. A., & Wen, F. (2007). Appropriate application of the Standardized Precipitation Index in arid locations and dry seasons. *International Journal of Climatology*, 27(1), 65–79. <http://doi.org/10.1002/joc.1371>
- Wu, T., Song, L., Li, W., Wang, Z., Zhang, H., Xin, X., ... Zhou, M. (2013). An overview of BCC climate system model development and application for climate change studies. *Journal of Meteorological Research*. Retrieved from <http://download.springer.com/static/pdf/374/art%3A10.1007%2Fs13351-014-3041-7.pdf?originUrl=http://link.springer.com/article/10.1007/s13351-014-3041-7&token2=exp=1433156007~acl=/static/pdf/374/art%253A10.1007%252Fs13351-014-304>
- Profesor Sr. Luis Arrau del C. (1923). Curso de Ingeniería de Riego. In *Apunte de Clases*.
- Publicas, M. D. E. O., & Aguas, D. G. D. E. (1995). MANUAL DE CALCULO DE CRECIDAS Y CADUALES MINIMOS EN CUENCAS SIN INFORMACION FLUVIOMETRICA.
- Mcphee, J. (n.d.). Método Curva Número. In *Clase Hidrología*.
- Román, F. J. S. S. (2009). Calculo de la Precipitación Neta mediante el método del S.C.S., 1–12.
- Román, F. J. S. S. (2010). Evapotranspiración (pp. 1–8).



## **Anexo A. Tablas DGA**

Tabla A.1: Coeficientes de Verni y King. (Fuente: DGA, 1995)

Periodo de Retorno [años]	Biobío	Maule	Maipo	Limarí
2	0,8	0,7	0,15	0,1
5	0,8	0,72	0,26	0,149
10	0,79	0,71	0,29	0,183
20	0,77	0,7	0,32	0,213
25	0,77	0,7	0,34	0,228
50	0,76	0,68	0,37	0,251
100	0,74	0,66	0,41	0,276

Tabla A.2: Coeficientes alfa y beta para calcular caudal máximo instantáneo.

Río	$\alpha$	$\sigma\alpha$	$\beta$	$\sigma\beta$
Río Biobío	1,33	0,175	1,210	-
Río Maule	1,43	0,199	1,400	0,191
Río Maipo	1,63	0,404	1,190	0,071



## **Anexo B. Caudales Calculados**

## B.1 Cuenca del Río Biobío

Tabla B.1: Caudales calculados para Verni y King.

Modelo	Retorno [años]	2	5	10	20	25	50	100
<b>BCC-CSM [mm]</b>	Histórico	486	616	678	718	735	773	795
	F. Cercano	615	834	941	1014	1043	1111	1154
	C. Lejano	566	787	896	971	1000	1070	1115
<b>CMCC-CMS [m3/s]</b>	Histórico	494	618	677	714	730	766	786
	F. Cercano	555	761	863	932	959	1024	1065
	C. Lejano	515	749	867	950	981	1057	1108
<b>CSIRO [m3/s]</b>	Histórico	465	596	658	699	716	755	778
	F. Cercano	474	614	681	725	743	785	809
	C. Lejano	515	682	763	818	839	890	922
<b>MPI-ESM-LR [m3/s]</b>	Histórico	415	525	577	611	625	657	676
	F. Cercano	549	702	775	823	842	888	914
	C. Lejano	424	581	659	713	733	783	815

Tabla B.2: Caudales calculados con el caudal medio diario a máximo instantáneo en periodo de lluvias.

Modelo	Retorno [años]	2	5	10	20	25	50	100
<b>BCC-CSM [mm]</b>	Histórico	165	216	249	280	290	320	349
	F. Cercano	149	241	310	381	404	480	561
	C. Lejano	129	184	222	259	271	309	347
<b>CMCC-CMS [m3/s]</b>	Histórico	168	229	269	308	320	358	396
	F. Cercano	138	193	230	266	277	312	348
	C. Lejano	117	156	181	204	212	235	258
<b>CSIRO [m3/s]</b>	Histórico	141	203	246	288	301	344	387
	F. Cercano	114	155	182	208	216	242	267
	C. Lejano	101	147	180	211	222	254	287
<b>MPI-ESM-LR [m3/s]</b>	Histórico	168	230	272	311	324	363	402
	F. Cercano	180	240	280	318	329	366	402
	C. Lejano	115	171	211	250	263	304	346

Tabla B.3: Caudales máximos instantáneos para el periodo de deshielo.

<b>Modelo</b>	<b>Retorno [años]</b>	<b>2</b>	<b>5</b>	<b>10</b>	<b>20</b>	<b>25</b>	<b>50</b>	<b>100</b>
<b>BCC-CSM [mm]</b>	Histórico	165	216	249	280	290	320	349
	F. Cercano	149	241	310	381	404	480	561
	C. Lejano	129	184	222	259	271	309	347
<b>CMCC-CMS [m3/s]</b>	Histórico	168	229	269	308	320	358	396
	F. Cercano	138	193	230	266	277	312	348
	C. Lejano	117	156	181	204	212	235	258
<b>CSIRO [m3/s]</b>	Histórico	141	203	246	288	301	344	387
	F. Cercano	114	155	182	208	216	242	267
	C. Lejano	101	147	180	211	222	254	287
<b>MPI-ESM-LR [m3/s]</b>	Histórico	168	230	272	311	324	363	402
	F. Cercano	180	240	280	318	329	366	402
	C. Lejano	115	171	211	250	263	304	346

Tabla B.4: Caudales calculados con el hidrograma unitario triangular.

<b>Modelo</b>	<b>Retorno [años]</b>	<b>2</b>	<b>5</b>	<b>10</b>	<b>20</b>	<b>25</b>	<b>50</b>	<b>100</b>
<b>BCC-CSM [mm]</b>	Histórico	615	826	963	1094	1135	1262	1389
	F. Cercano	777	1214	1532	1857	1964	2306	2663
	C. Lejano	666	998	1234	1470	1547	1790	2041
<b>CMCC-CMS [m3/s]</b>	Histórico	687	916	1065	1206	1250	1387	1522
	F. Cercano	721	1154	1477	1810	1921	2276	2651
	C. Lejano	643	1049	1355	1674	1780	2122	2487
<b>CSIRO [m3/s]</b>	Histórico	635	869	1024	1173	1220	1366	1512
	F. Cercano	646	902	1074	1241	1294	1460	1627
	C. Lejano	676	1038	1299	1562	1649	1924	2211
<b>MPI-ESM-LR [m3/s]</b>	Histórico	561	753	879	998	1036	1151	1267
	F. Cercano	764	1060	1257	1448	1508	1697	1886
	C. Lejano	551	779	933	1083	1132	1282	1433

## B.2 Cuenca del Río Maule

Tabla B.5: Caudales para Verni y King.

Modelo	Retorno [años]	2	5	10	20	25	50	100
<b>BCC-CSM [mm]</b>	Histórico	860	1071	1155	1220	1244	1276	1298
	F. Cercano	1336	1764	1948	2093	2143	2225	2285
	C. Lejano	1551	2076	2305	2486	2549	2652	2731
<b>CMCC-CMS [m3/s]</b>	Histórico	801	1060	1171	1259	1290	1339	1376
	F. Cercano	948	1317	1483	1615	1660	1740	1801
	C. Lejano	1456	2065	2341	2563	2638	2773	2879
<b>CSIRO [m3/s]</b>	Histórico	1270	1690	1871	2015	2065	2146	2207
	F. Cercano	1331	1818	2033	2204	2263	2364	2441
	C. Lejano	1393	1941	2188	2384	2452	2570	2661
<b>MPI-ESM-LR [m3/s]</b>	Histórico	566	753	834	898	921	957	984
	F. Cercano	1126	1532	1711	1853	1902	1986	2049
	C. Lejano	1148	1669	1910	2104	2169	2290	2385

Tabla B.6: Crecidas calculadas con el caudal medio diario a máximo instantáneo en periodo pluvial.

Modelo	Retorno [años]	2	5	10	20	25	50	100
<b>BCC-CSM [mm]</b>	Histórico	193	254	293	329	340	376	410
	F. Cercano	176	283	364	447	475	564	659
	C. Lejano	141	222	280	341	361	424	491
<b>CMCC-CMS [m3/s]</b>	Histórico	197	269	317	362	376	421	465
	F. Cercano	162	227	270	312	325	367	409
	C. Lejano	130	187	226	264	276	314	353
<b>CSIRO [m3/s]</b>	Histórico	166	239	289	338	354	404	454
	F. Cercano	134	183	214	245	254	284	314
	C. Lejano	112	174	219	264	279	326	376
<b>MPI-ESM-LR [m3/s]</b>	Histórico	197	270	319	366	381	427	473
	F. Cercano	211	283	329	373	387	430	473
	C. Lejano	130	198	246	294	310	361	413

Tabla B.7: Crecidas de los diferentes periodos de retorno en periodo de deshielo.

<b>Modelo</b>	<b>Retorno [años]</b>	<b>2</b>	<b>5</b>	<b>10</b>	<b>20</b>	<b>25</b>	<b>50</b>	<b>100</b>
<b>BCC-CSM [mm]</b>	Histórico	193	254	293	329	340	376	410
	F. Cercano	176	283	364	447	475	564	659
	C. Lejano	141	222	280	341	361	424	491
<b>CMCC-CMS [m3/s]</b>	Histórico	197	269	317	362	376	421	465
	F. Cercano	162	227	270	312	325	367	409
	C. Lejano	130	187	226	264	276	314	353
<b>CSIRO [m3/s]</b>	Histórico	166	239	289	338	354	404	454
	F. Cercano	134	183	214	245	254	284	314
	C. Lejano	112	174	219	264	279	326	376
<b>MPI-ESM-LR [m3/s]</b>	Histórico	197	270	319	366	381	427	473
	F. Cercano	211	283	329	373	387	430	473
	C. Lejano	130	198	246	294	310	361	413

Tabla B.8: Crecidas calculadas con el HUT.

<b>Modelo</b>	<b>Retorno [años]</b>	<b>2</b>	<b>5</b>	<b>10</b>	<b>20</b>	<b>25</b>	<b>50</b>	<b>100</b>
<b>BCC-CSM [mm]</b>	Histórico	1323	1676	1897	2101	2164	2357	2544
	F. Cercano	2124	2872	3362	3829	3977	4433	4887
	C. Lejano	2454	3526	4263	4985	5218	5945	6686
<b>CMCC-CMS [m3/s]</b>	Histórico	1202	1671	1984	2287	2384	2684	2986
	F. Cercano	1396	2033	2474	2909	3050	3492	3944
	C. Lejano	2252	3480	4369	5273	5569	6515	7501
<b>CSIRO [m3/s]</b>	Histórico	2026	2820	3351	3864	4028	4537	5049
	F. Cercano	2048	3077	3807	4538	4777	5531	6311
	C. Lejano	2167	3559	4613	5714	6082	7272	8540
<b>MPI-ESM-LR [m3/s]</b>	Histórico	807	1124	1336	1542	1607	1811	2016
	F. Cercano	1729	2438	2918	3384	3534	3999	4470
	C. Lejano	1807	2663	3262	3856	4049	4656	5279

### B.3 Cuenca del Río Maipo

Tabla B.9: Crecidas calculadas con Verni y King.

<b>Modelo</b>	<b>Retorno [años]</b>	<b>2</b>	<b>5</b>	<b>10</b>	<b>20</b>	<b>25</b>	<b>50</b>	<b>100</b>
<b>BCC-CSM [mm]</b>	Histórico	25	59	75	92	101	118	140
	F. Cercano	28	65	84	102	112	131	156
	C. Lejano	39	92	117	142	156	183	216
<b>CMCC-CMS [m3/s]</b>	Histórico	18	40	49	59	64	75	87
	F. Cercano	20	45	56	68	74	86	102
	C. Lejano	35	82	104	127	138	162	192
<b>CSIRO [m3/s]</b>	Histórico	16	36	45	55	60	70	82
	F. Cercano	30	69	88	108	118	138	163
	C. Lejano	28	67	86	106	115	136	161
<b>MPI-ESM-LR [m3/s]</b>	Histórico	15	33	41	50	54	63	74
	F. Cercano	40	99	128	159	174	206	246
	C. Lejano	33	88	117	147	162	193	232

Tabla B.10: Crecidas calculadas con el caudal medio diario a máximo instantáneo para el periodo pluvial.

<b>Modelo</b>	<b>Retorno [años]</b>	<b>2</b>	<b>5</b>	<b>10</b>	<b>20</b>	<b>25</b>	<b>50</b>	<b>100</b>
<b>BCC-CSM [mm]</b>	Histórico	350	505	612	717	751	857	965
	F. Cercano	371	505	593	677	704	786	868
	C. Lejano	359	457	518	575	592	646	698
<b>CMCC-CMS [m3/s]</b>	Histórico	366	538	657	775	814	934	1058
	F. Cercano	365	504	596	685	714	802	890
	C. Lejano	297	406	478	548	570	638	706
<b>CSIRO [m3/s]</b>	Histórico	341	505	619	733	770	886	1006
	F. Cercano	362	516	621	724	757	860	965
	C. Lejano	361	511	612	711	743	842	943
<b>MPI-ESM-LR [m3/s]</b>	Histórico	312	393	443	489	503	547	589
	F. Cercano	399	559	667	772	805	909	1014
	C. Lejano	322	469	571	672	705	807	912

Tabla B.11: Crecidas para el periodo de deshielo.

<b>Modelo</b>	<b>Retorno [años]</b>	<b>2</b>	<b>5</b>	<b>10</b>	<b>20</b>	<b>25</b>	<b>50</b>	<b>100</b>
<b>BCC-CSM [mm]</b>	Histórico	179	235	272	306	317	349	382
	F. Cercano	158	255	327	402	427	507	592
	C. Lejano	127	199	252	306	324	381	441
<b>CMCC-CMS [m3/s]</b>	Histórico	175	238	279	318	331	370	408
	F. Cercano	146	204	243	280	292	330	368
	C. Lejano	117	168	203	237	248	282	317
<b>CSIRO [m3/s]</b>	Histórico	146	215	262	310	325	373	422
	F. Cercano	121	164	193	220	229	255	282
	C. Lejano	101	156	196	237	251	293	338
<b>MPI-ESM-LR [m3/s]</b>	Histórico	181	252	299	345	360	405	451
	F. Cercano	190	254	296	335	348	386	425
	C. Lejano	117	178	221	265	279	324	371

Tabla B.12: Crecidas calculadas con el hidrograma unitario triangular.

<b>Modelo</b>	<b>Retorno [años]</b>	<b>2</b>	<b>5</b>	<b>10</b>	<b>20</b>	<b>25</b>	<b>50</b>	<b>100</b>
<b>BCC-CSM [mm]</b>	Histórico	77	123	157	191	203	240	279
	F. Cercano	77	120	150	182	192	225	259
	C. Lejano	109	180	234	290	309	369	434
<b>CMCC-CMS [m3/s]</b>	Histórico	61	86	104	121	126	143	160
	F. Cercano	63	109	145	183	196	239	285
	C. Lejano	90	165	227	294	318	395	480
<b>CSIRO [m3/s]</b>	Histórico	49	79	103	127	135	161	189
	F. Cercano	77	139	188	242	260	321	388
	C. Lejano	74	132	179	231	248	306	369
<b>MPI-ESM-LR [m3/s]</b>	Histórico	46	71	90	109	115	136	157
	F. Cercano	111	205	282	368	397	496	605
	C. Lejano	84	169	244	329	360	462	580





## **Anexo C. Análisis de la Información Disponible**

C.1 Coeficientes del caudal medio diario a máximo instantáneo

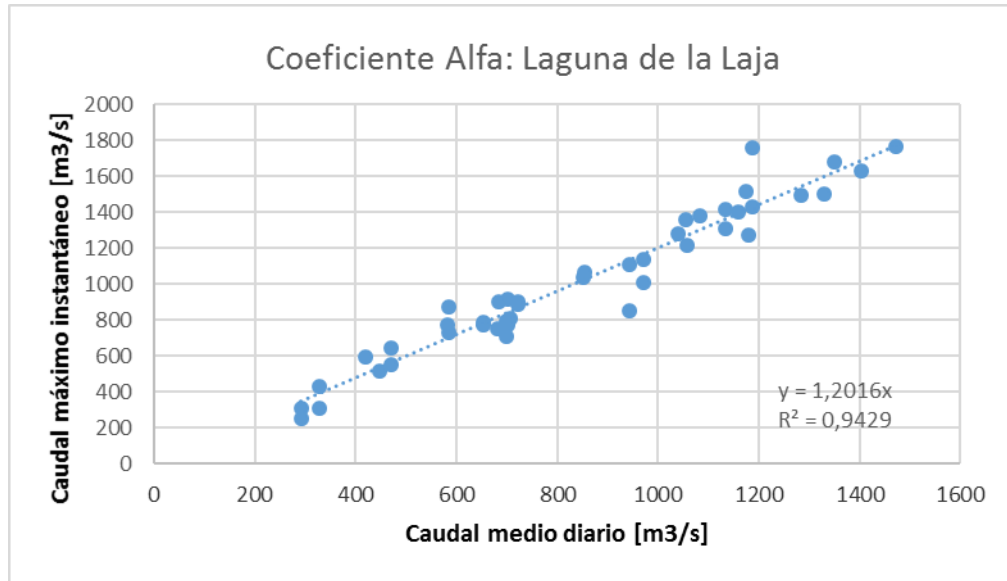


Figura C.1: Cálculo de coeficiente "alfa" en la Laguna de la Laja.

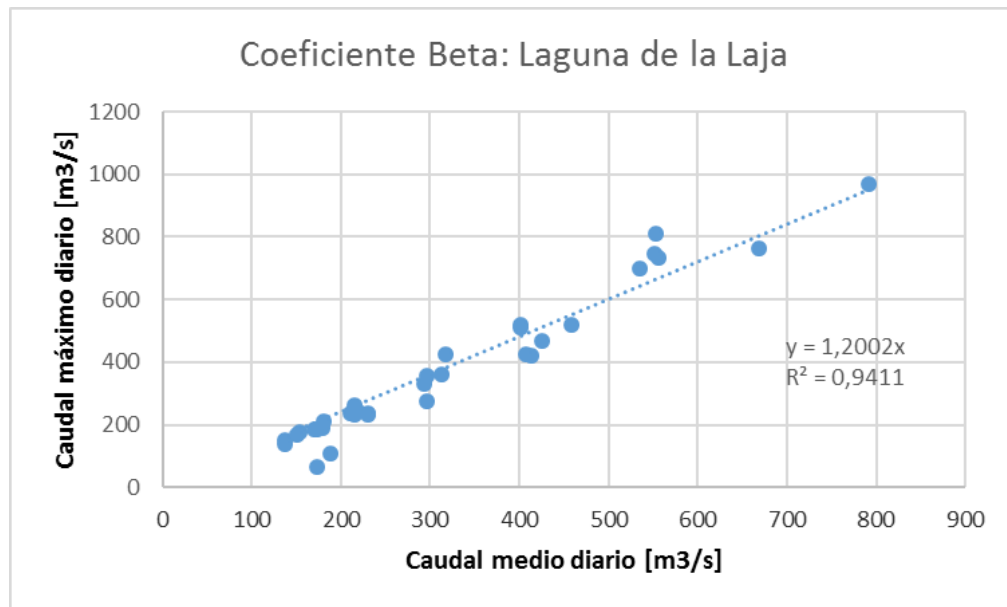


Figura C.2: Cálculo del coeficiente "beta" en la Laguna de la Laja.

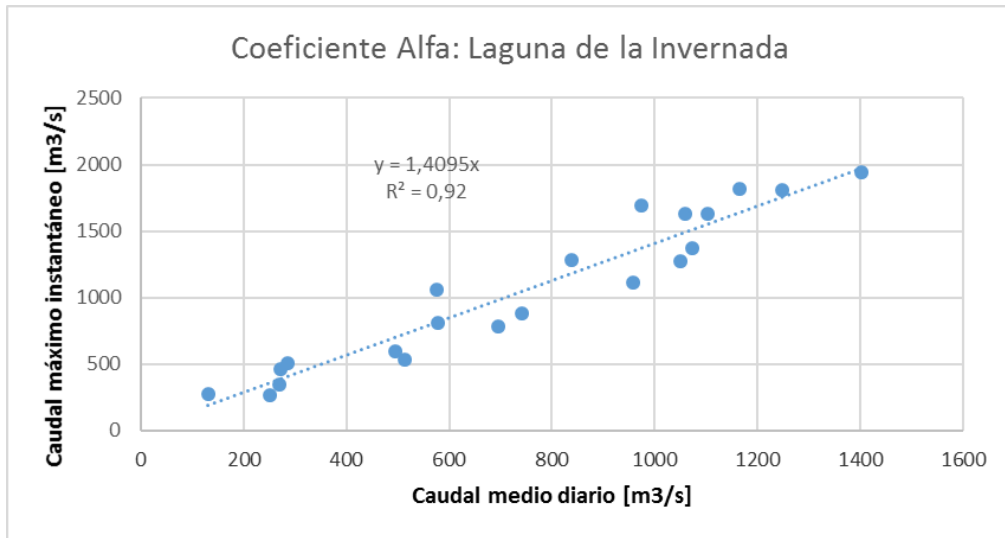


Figura C.3: Cálculo del coeficiente "alfa" para la estación "Laguna de la Invernada".

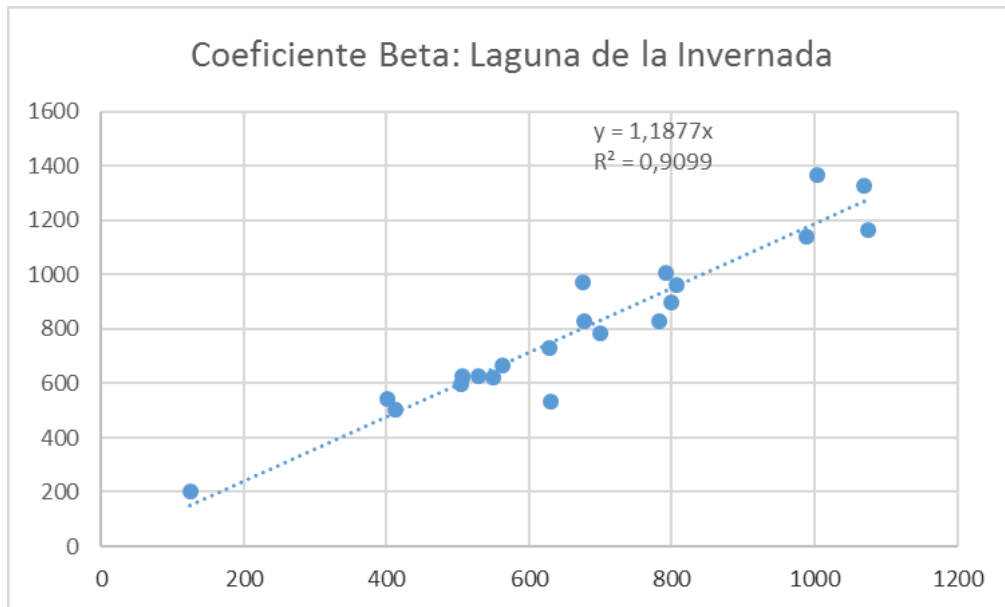


Figura C.4: Cálculo del coeficiente "beta" para la estación "Laguna de la Invernada".

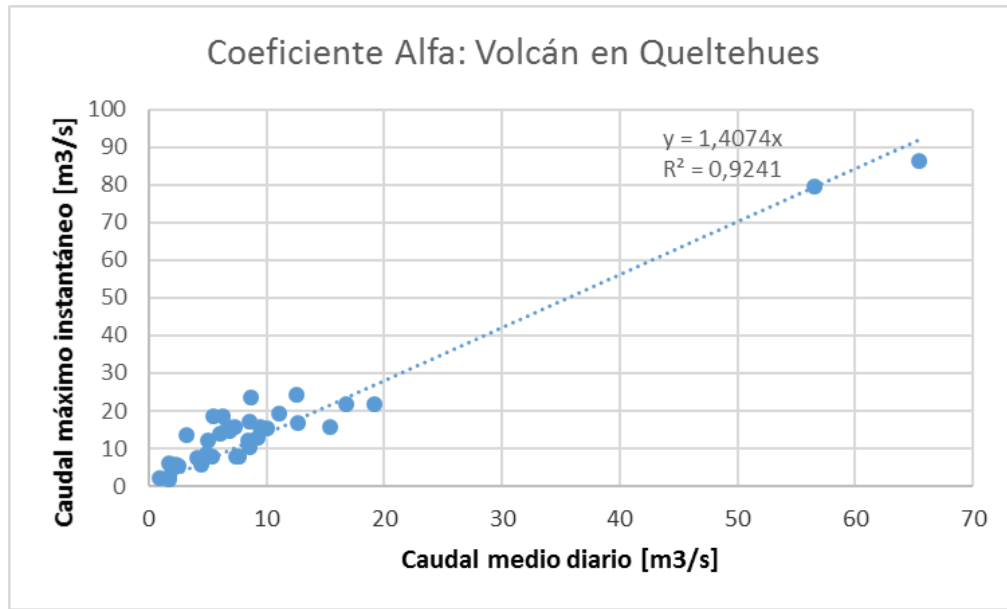


Figura C.5: Coeficiente "alfa" para la sub-cuenca del río Maipo.

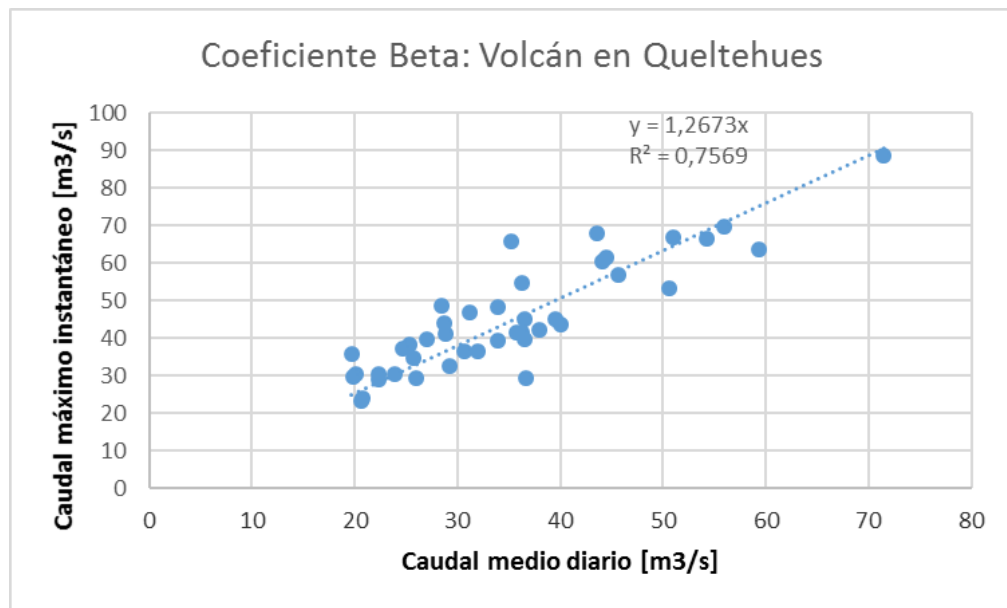


Figura C.6: Coeficiente "beta" en "Volcán en Queltehues".

## C.2 Cuenca del Río Biobío

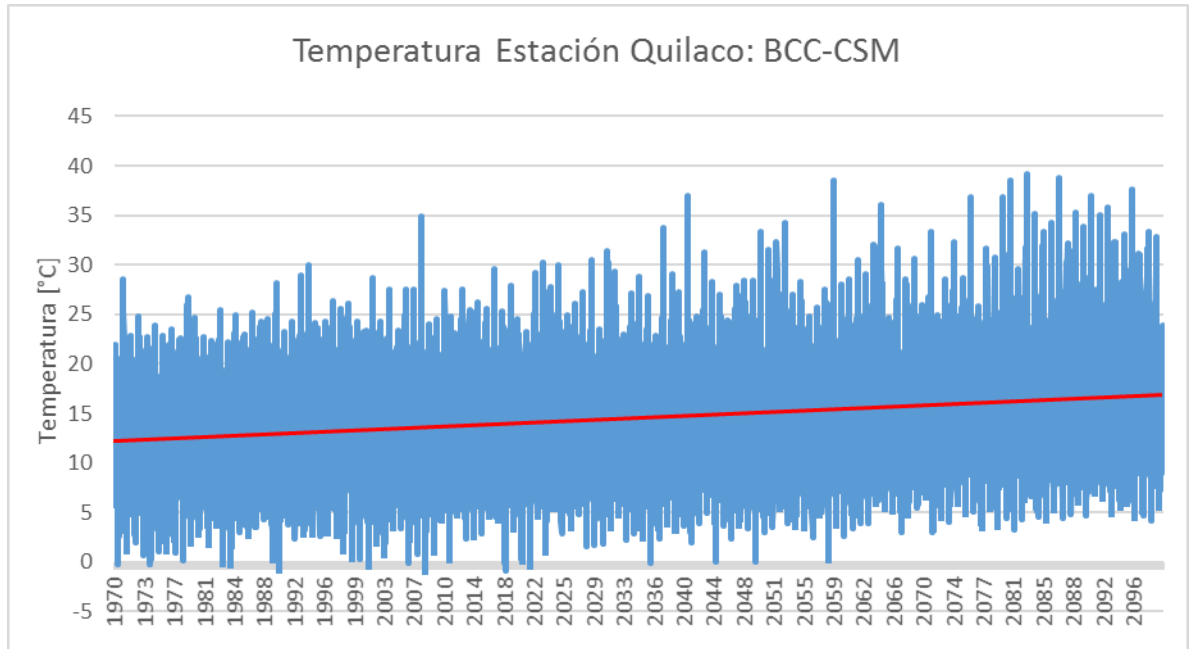


Figura C.7: Gráfico de temperaturas medias diarias en modelo BCC-CSM1.1.

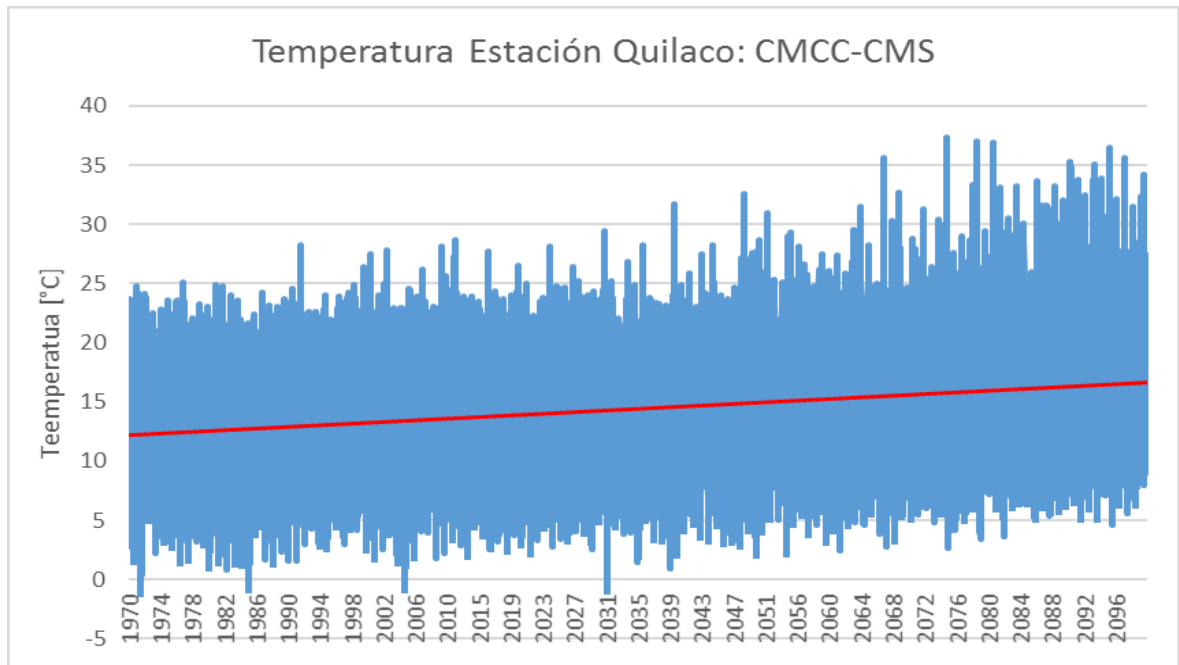


Figura C.8: Gráfico de temperaturas medias diarias para modelo CMCC-CMS.

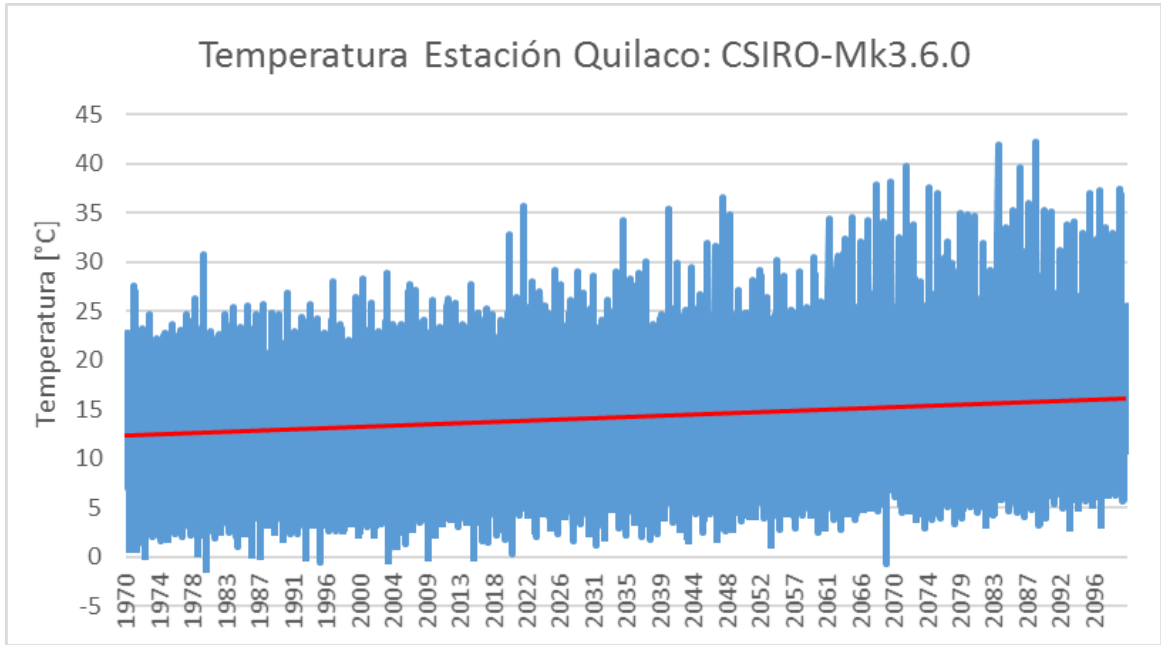


Figura C.9: Gráfico de las temperaturas medias diarias según modelo CSIRO-Mk3.6.0

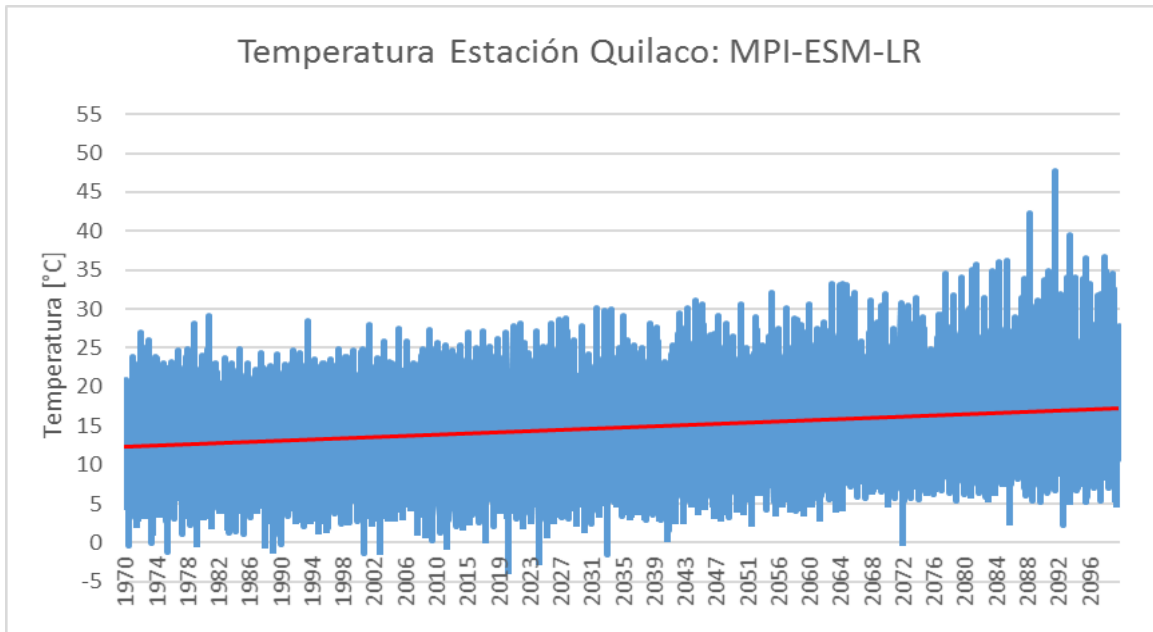


Figura C.10: Gráfico de las temperaturas medias según modelo MPI-ESM-LR.

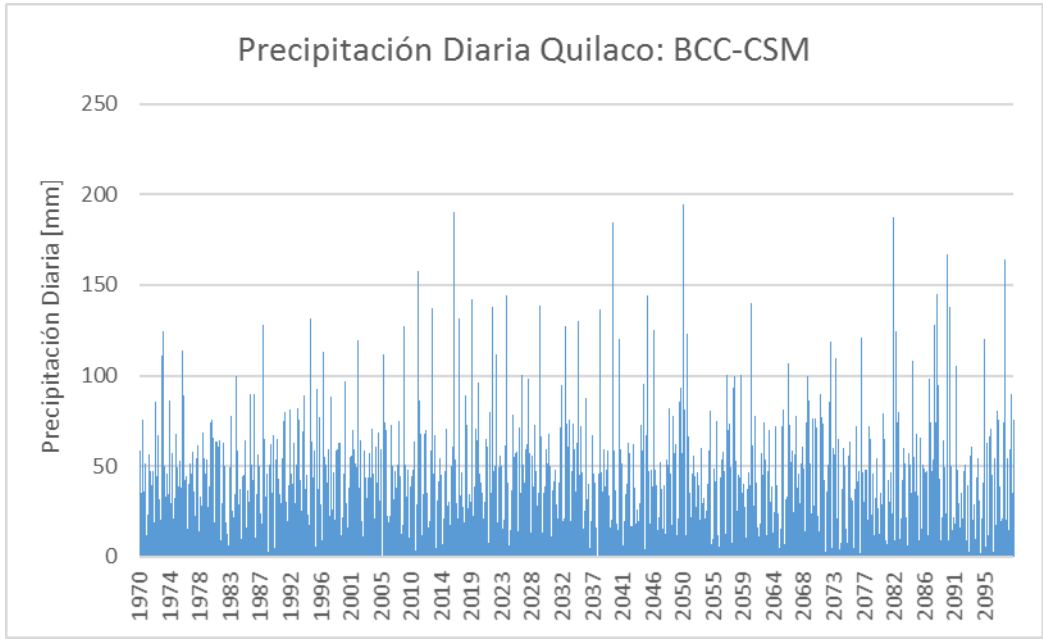


Figura C.11: Precipitaciones diarias según el modelo BCC-CSM.

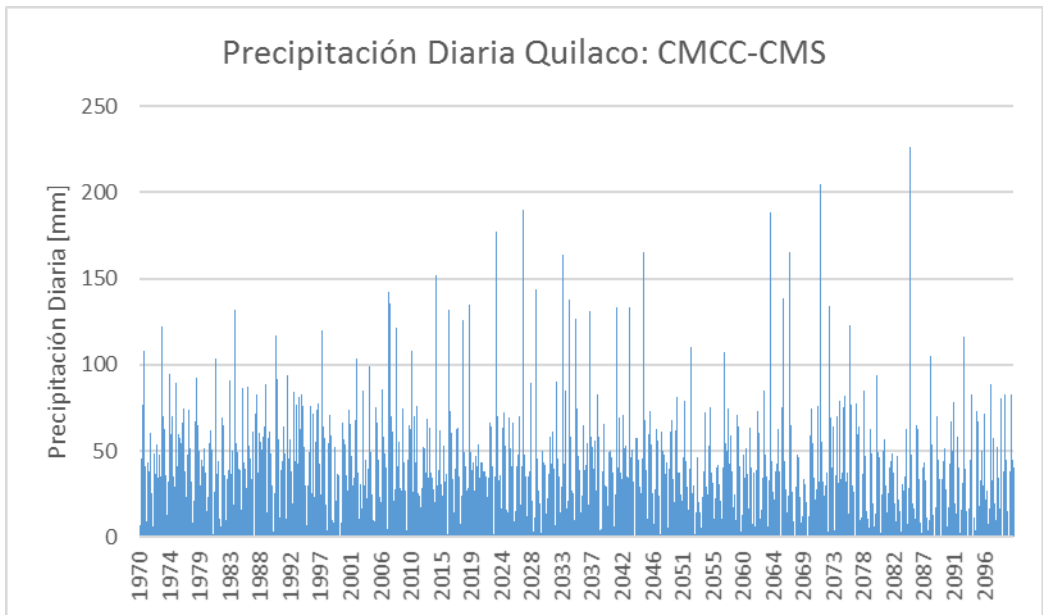


Figura C.12: Precipitaciones diarias según el modelo CMCC-CMS en la estación Quilaco.

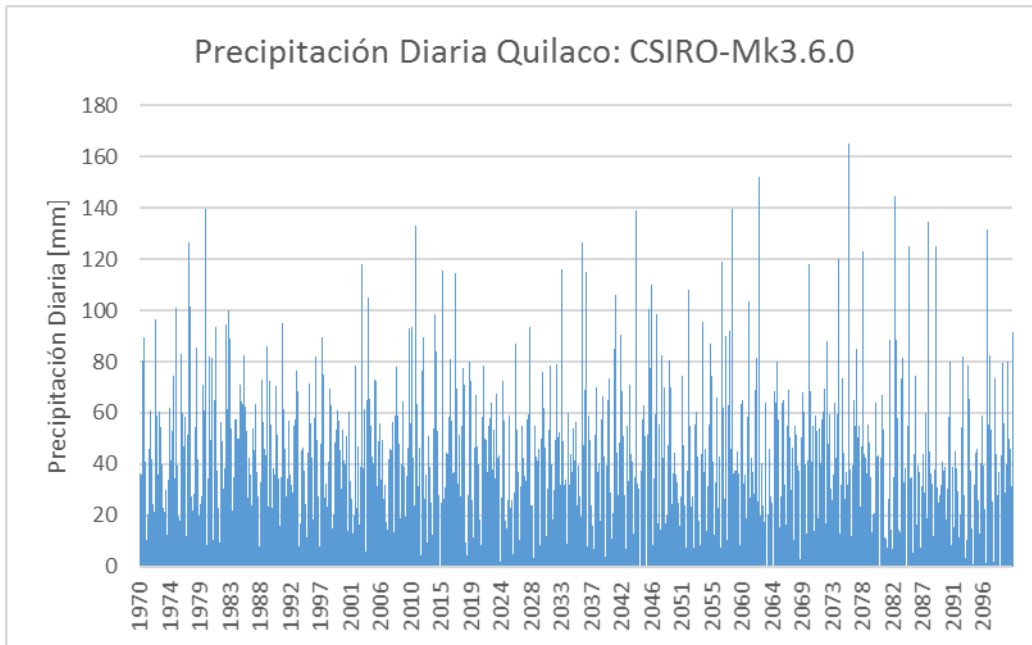


Figura C.13: Precipitación diaria en la estación Quilaco según el modelo CSIRO.

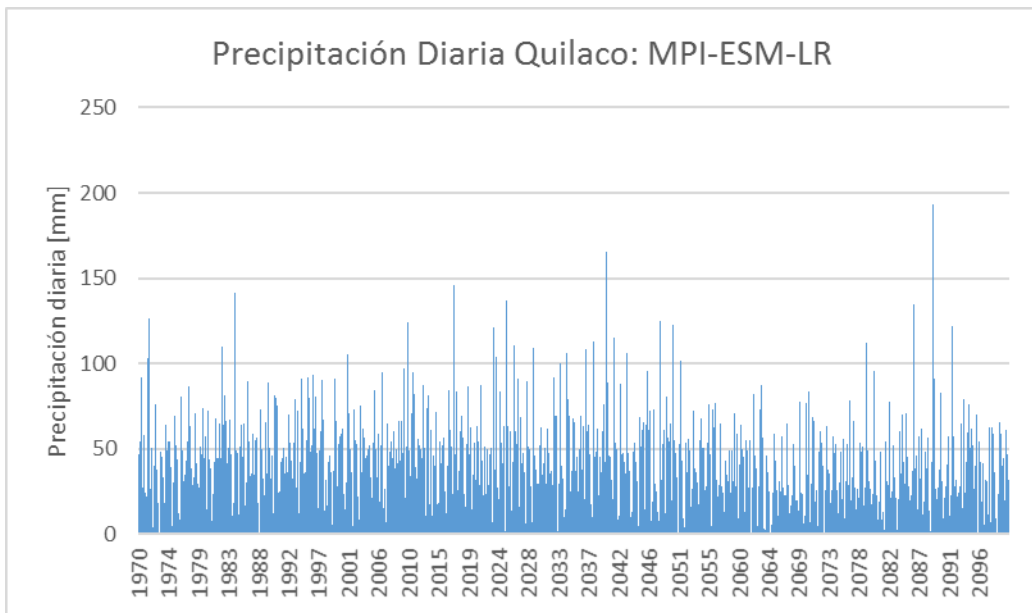


Figura C.14: Precipitación diaria en la estación Quilaco según el modelo MPI-ESM-LR..



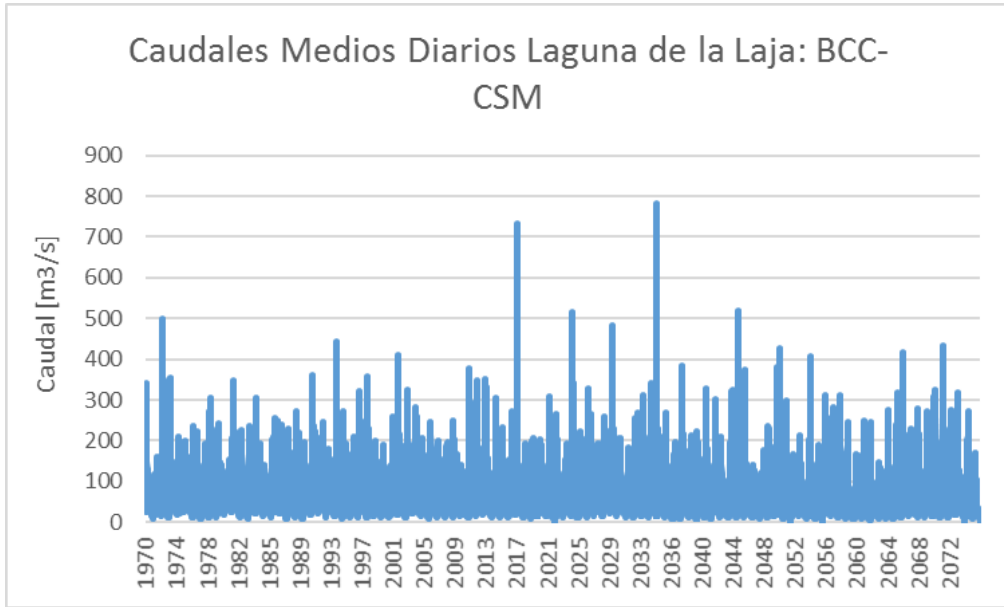


Figura C.15: Caudales medios diarios en la estación Laguna de la Laja con el modelo BCC-CSM.

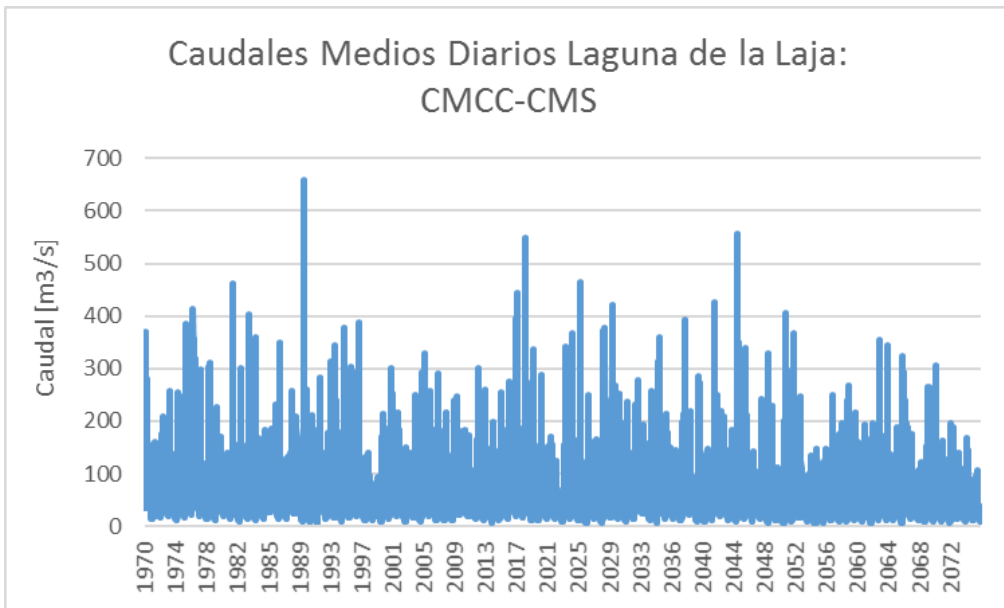


Figura C.16: Caudales medios diarios para el modelo CMCC-CMS.

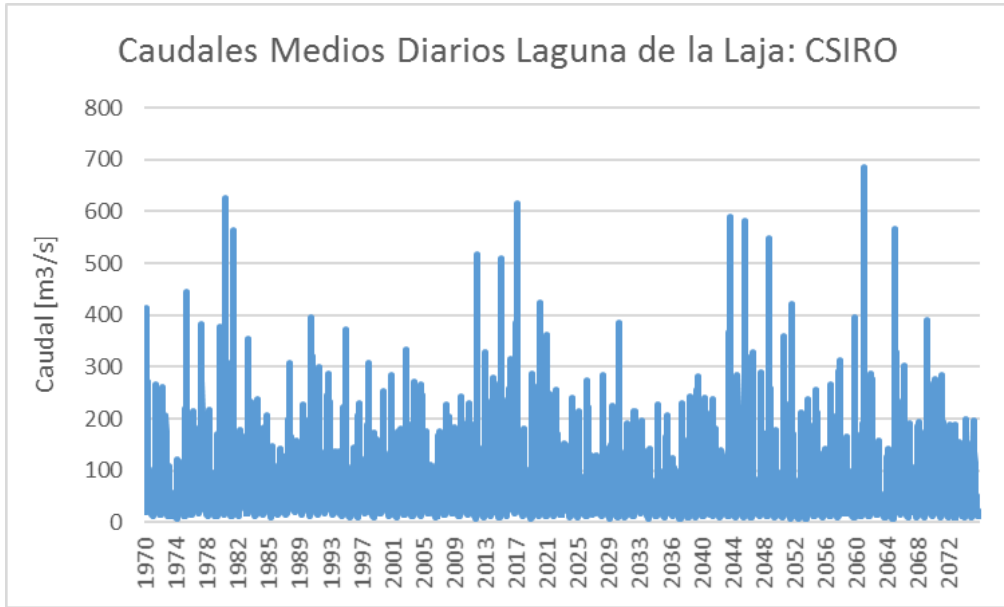


Figura C.17: Caudales medios diarios para el modelo CSIRO.

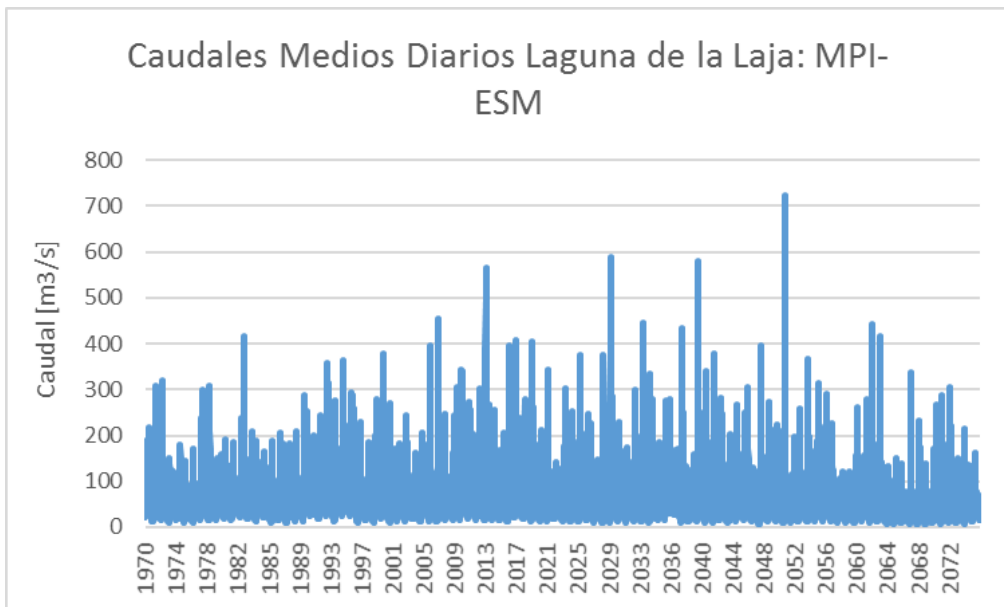


Figura C.18: Caudales medios diarios con el modelo MPI-ESM.

### C.3 Cuenca del Río Maule

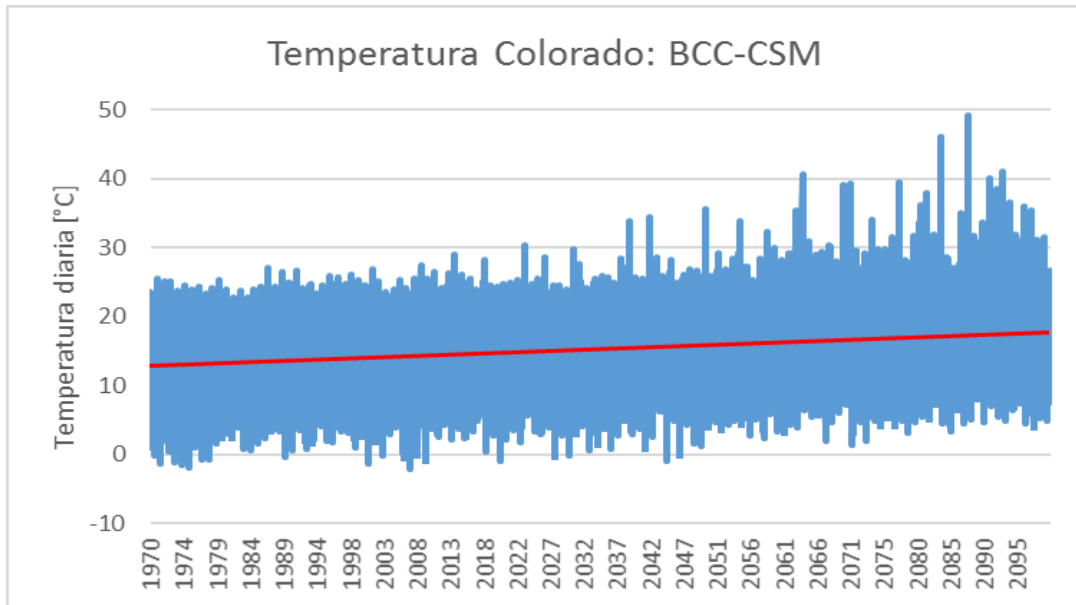


Figura C.19: Temperaturas medias diarias en la estación Colorado según el modelo BCC-CSM.

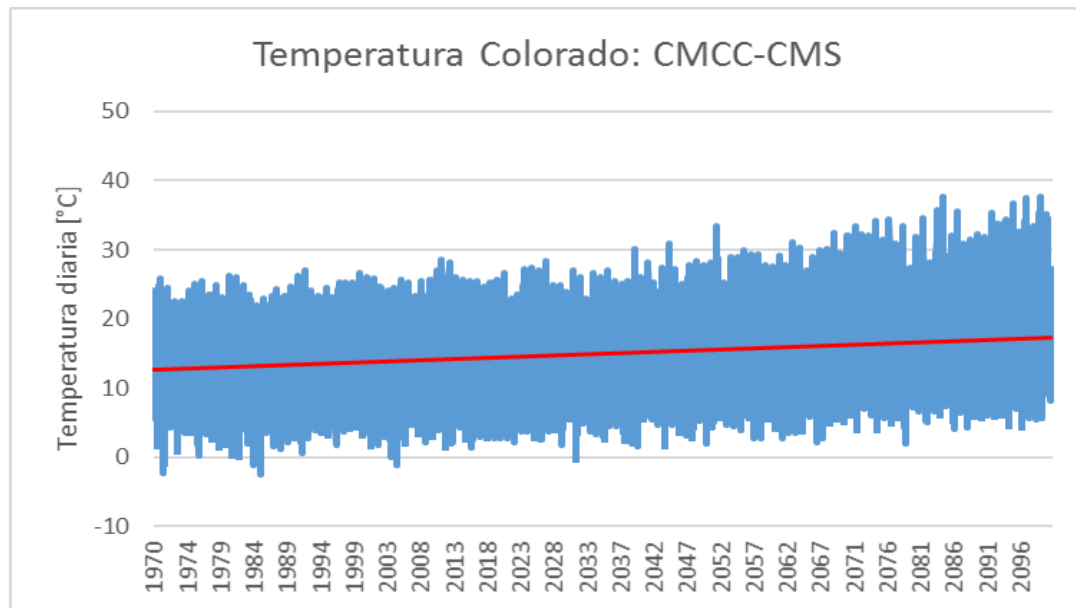


Figura C.20: Temperaturas medias diarias en la estación Colorado según el modelo CMCC-CMS.

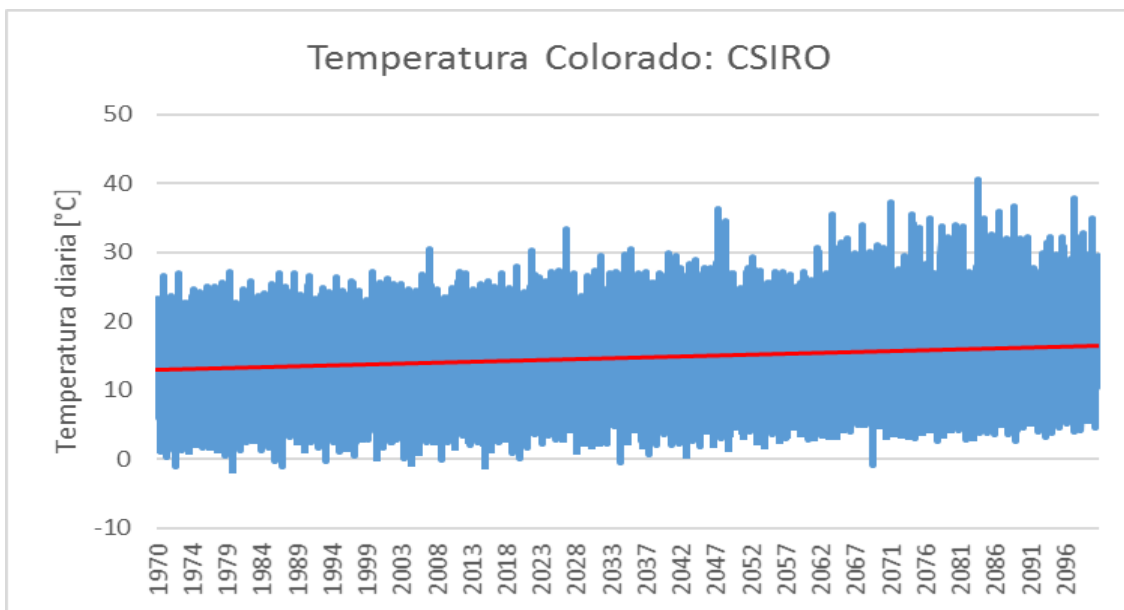


Figura C.21: Temperaturas medias diarias en la estación Colorado según el modelo CSIRO-Mk3.6.0.

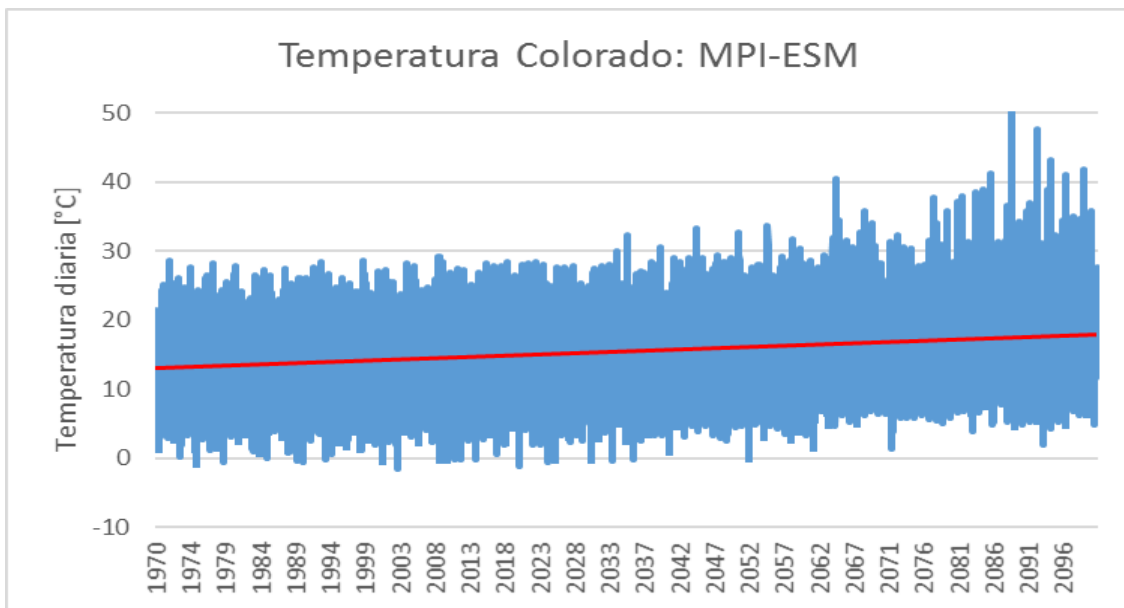


Figura C.22: Temperaturas medias diarias en la estación Colorado según el modelo MPI-ESM.

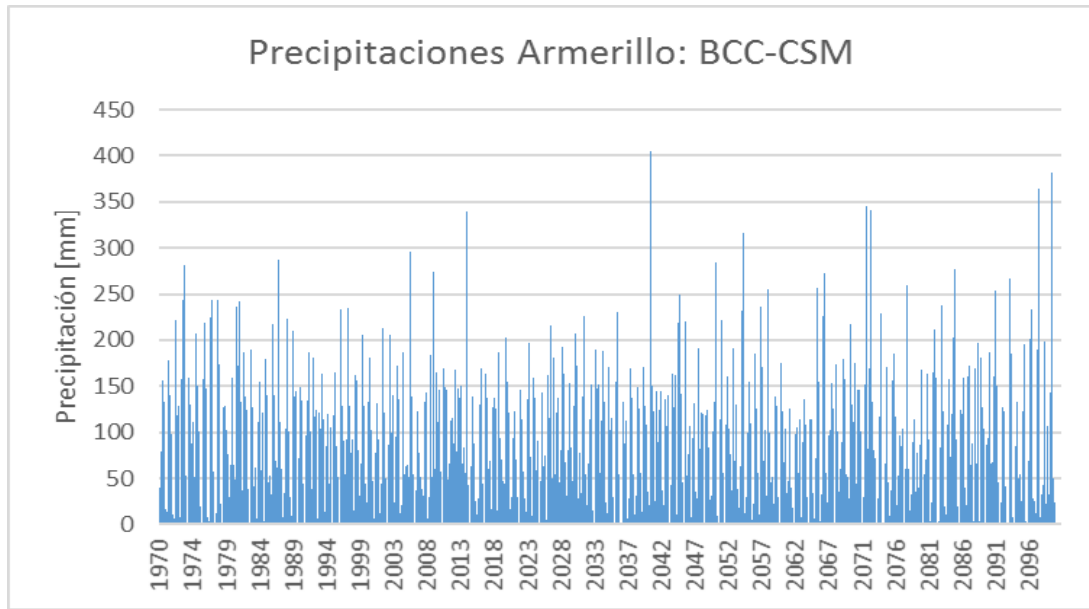


Figura C.23: Precipitaciones diarias en la estación Armerillo según el modelo BCC-CSM.

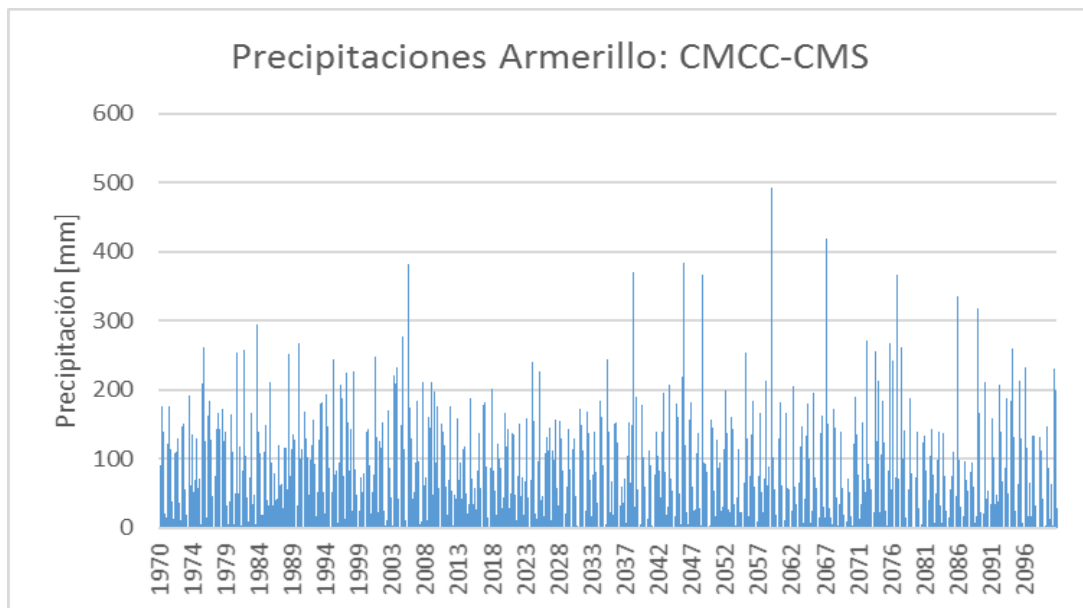


Figura C.24: Precipitaciones diarias en la estación Armerillo según el modelo CMCC-CMS.

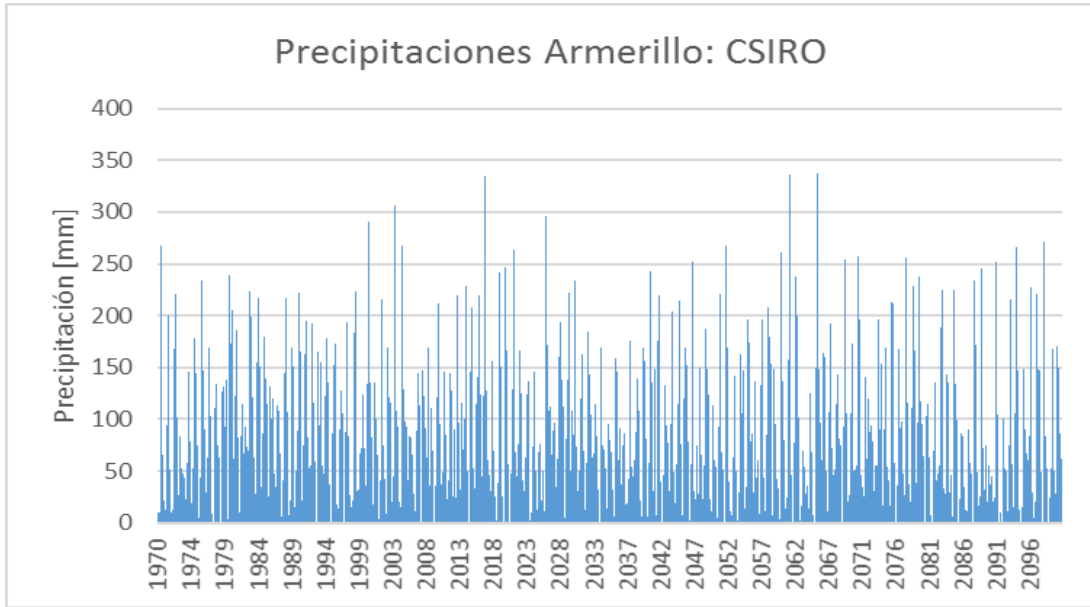


Figura C.25: Precipitaciones diarias en la estación Armerillo según el modelo CSIRO-M.k.3.6.0.

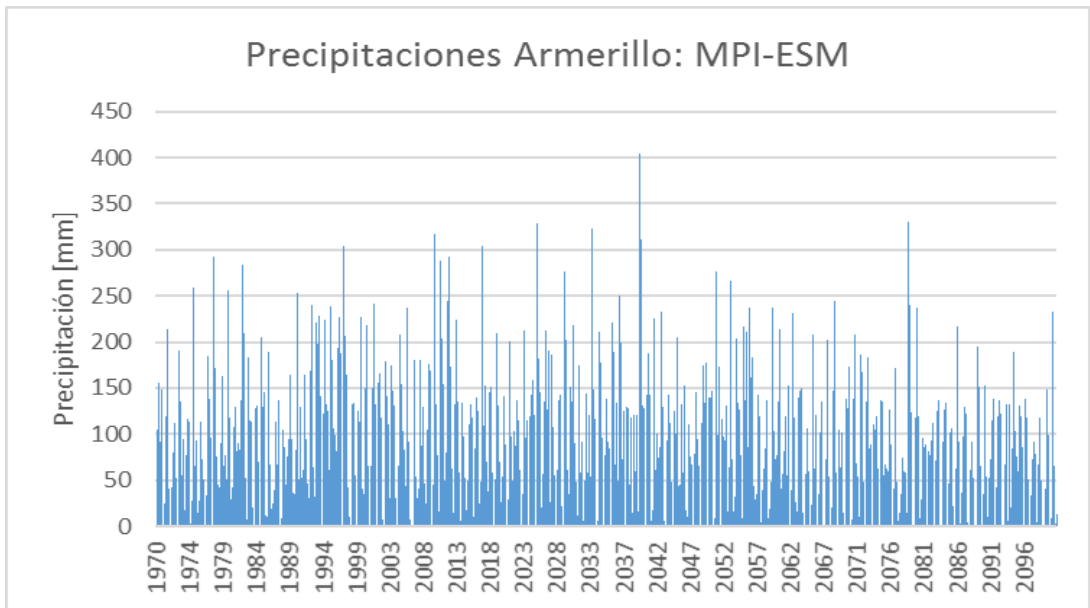


Figura C.26: Precipitaciones diarias en la estación Armerillo según el modelo MPI-ESM.

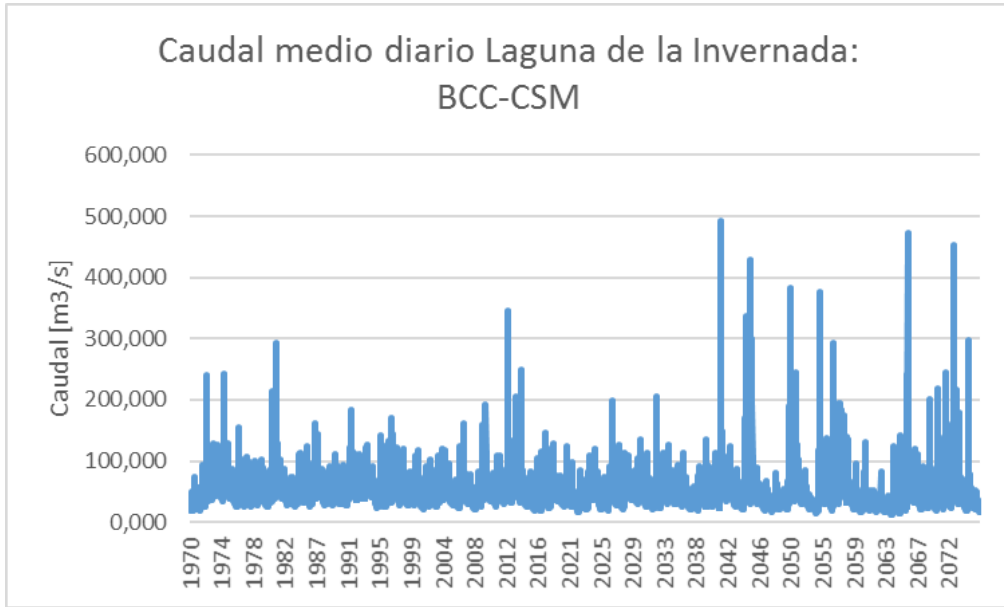


Figura C.27: Caudales medios diarios en la laguna de la invernada para el modelo BCC-CSM.

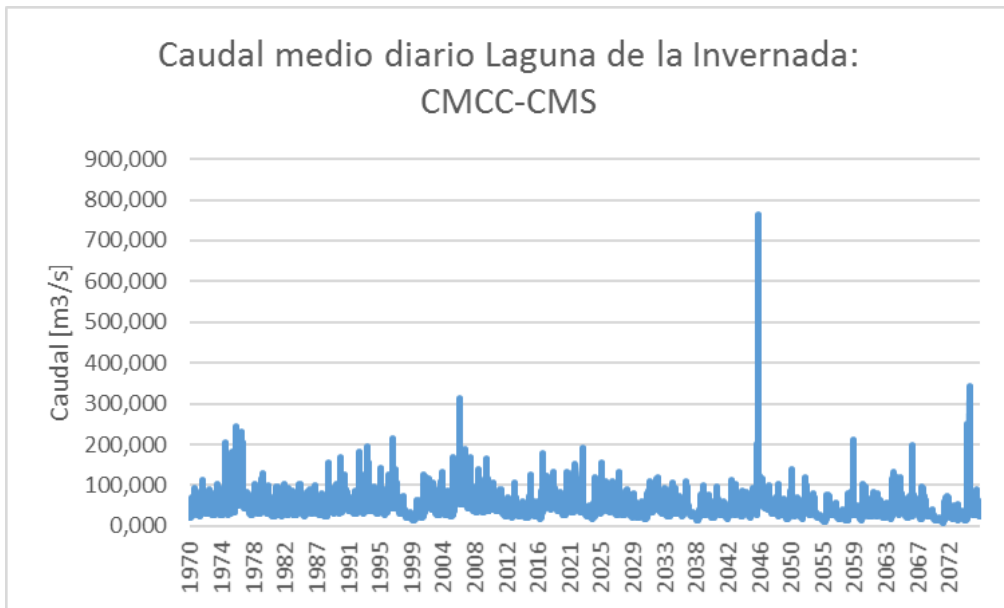


Figura C.28: Caudales medios diarios en la laguna de la invernada para el modelo CMCC-CMS.

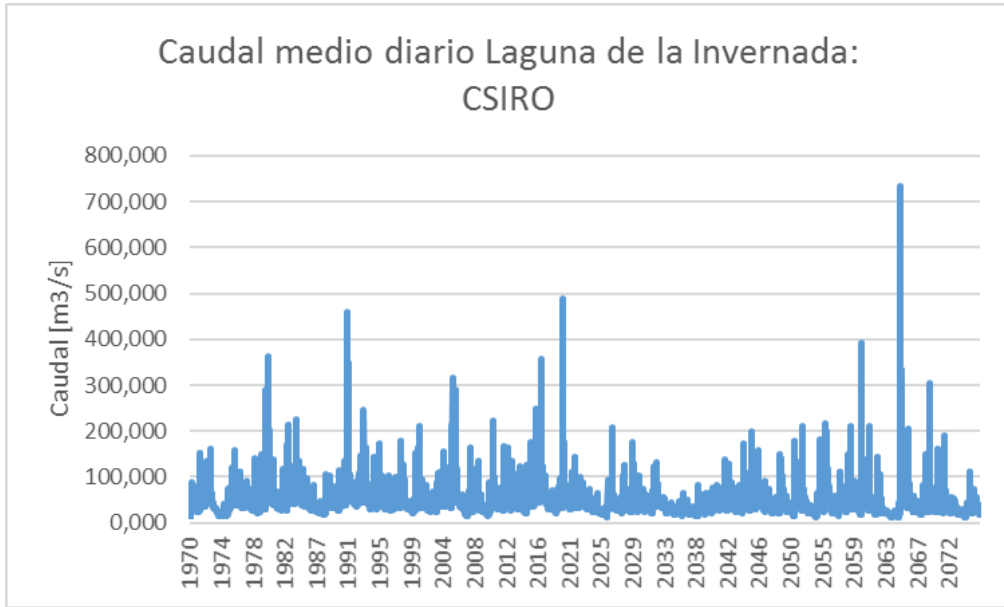


Figura C.29: Caudales medios diarios para el modelo CSIRO-Mk3.6.0.

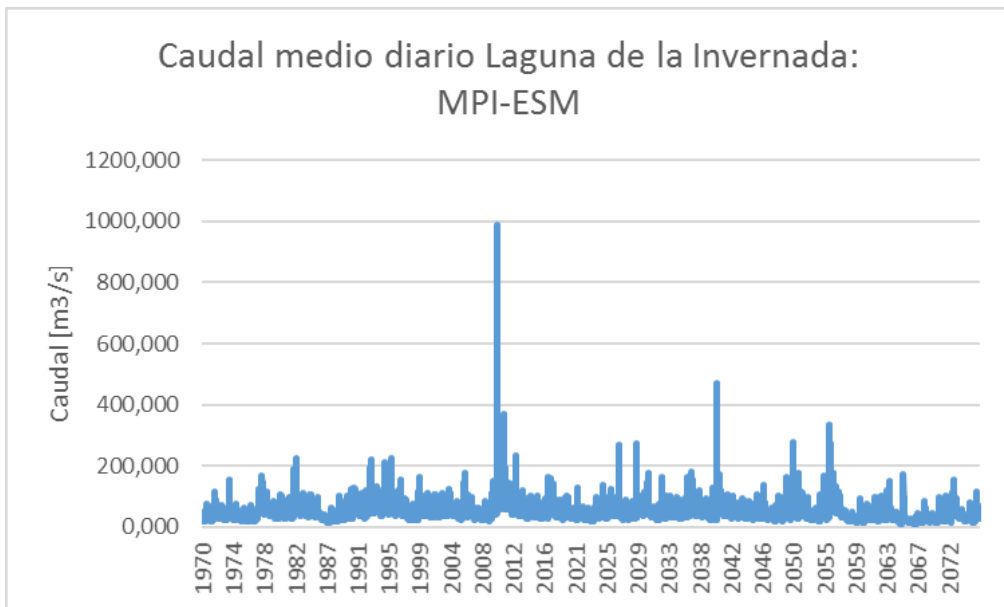


Figura C.30: Caudales medios diarios para el modelo MPI-ESM.



#### C.4 Cuenca del Río Maipo

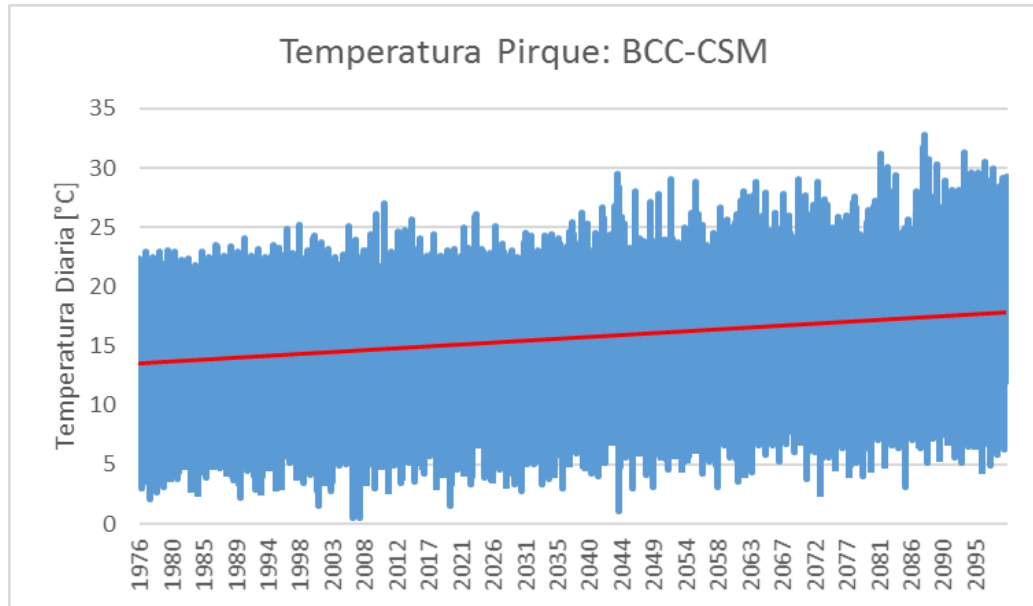


Figura C.31: Temperaturas medias en la estación Pirque según el modelo BCC-CSM.

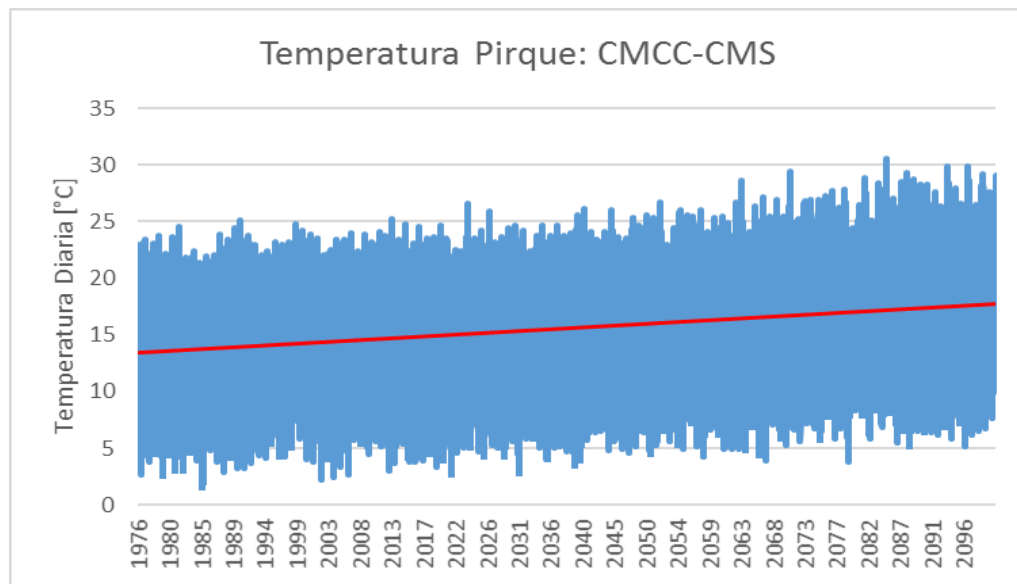


Figura C.32: Temperaturas medias en la estación Pirque según el modelo CMCC-CMS.

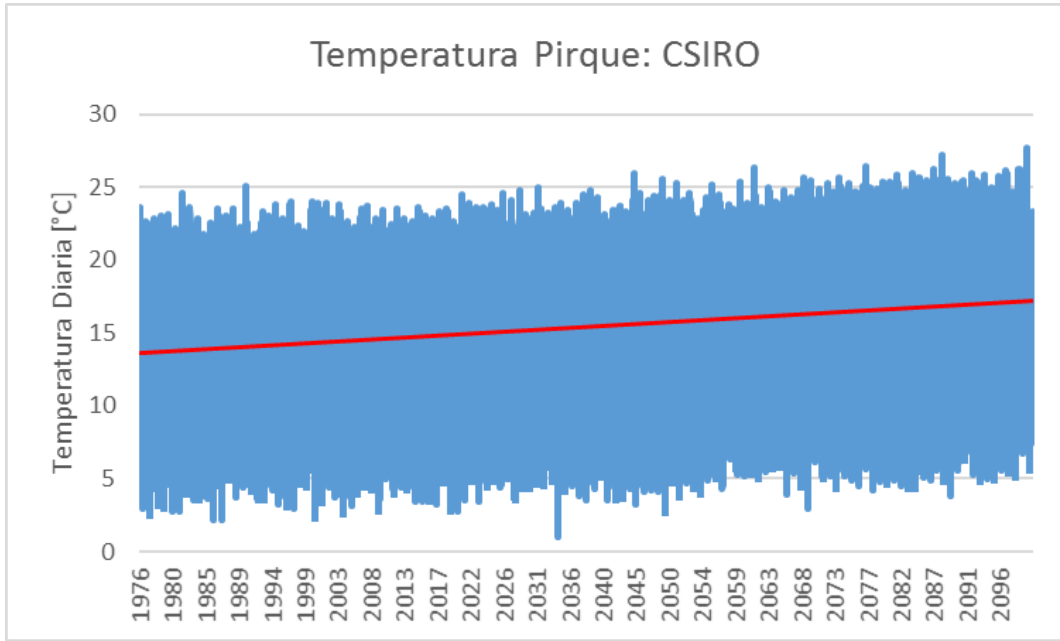


Figura C.33: Temperaturas medias diarias en la estación Pirque según el modelo CSIRO-Mk3.6.0.

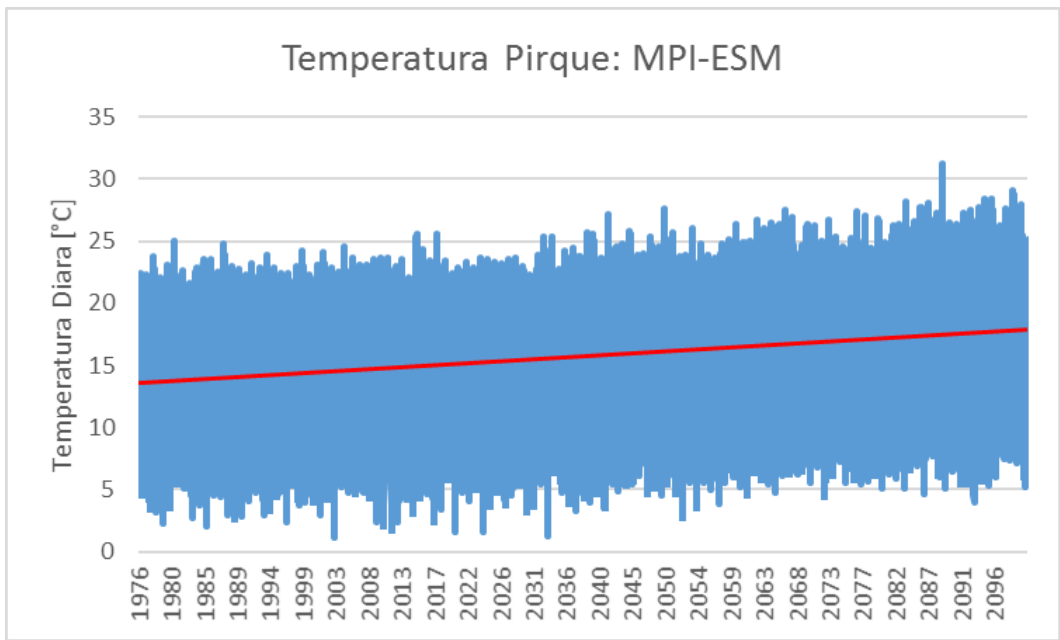


Figura C.34: Temperaturas medias diarias en la estación Pique según el modelo MPI-ESM-LR.

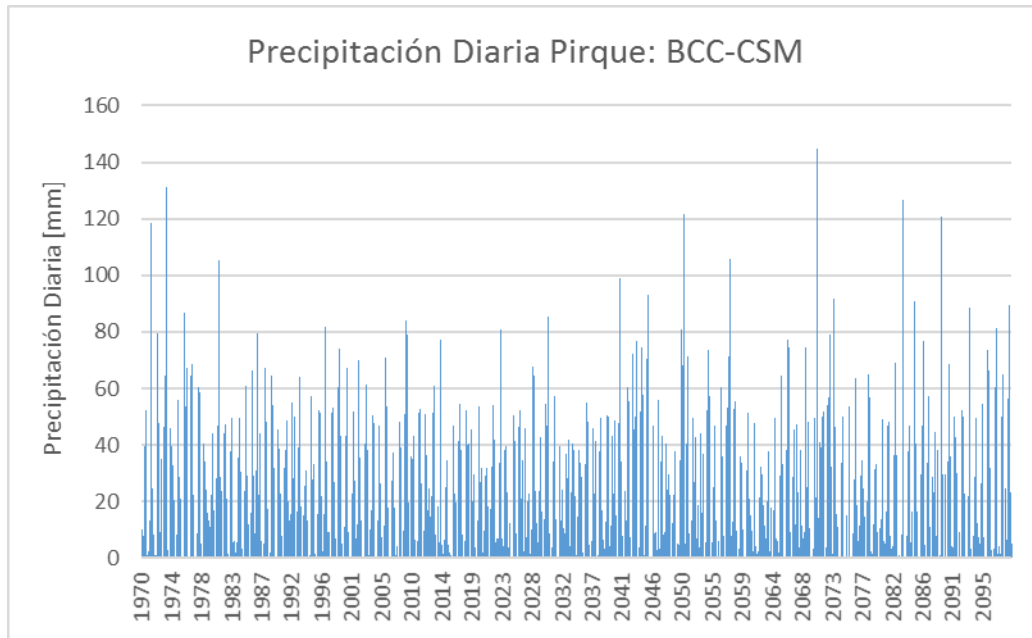


Figura C.35: Precipitaciones diarias en Pirque según el modelo BCC-CSM.

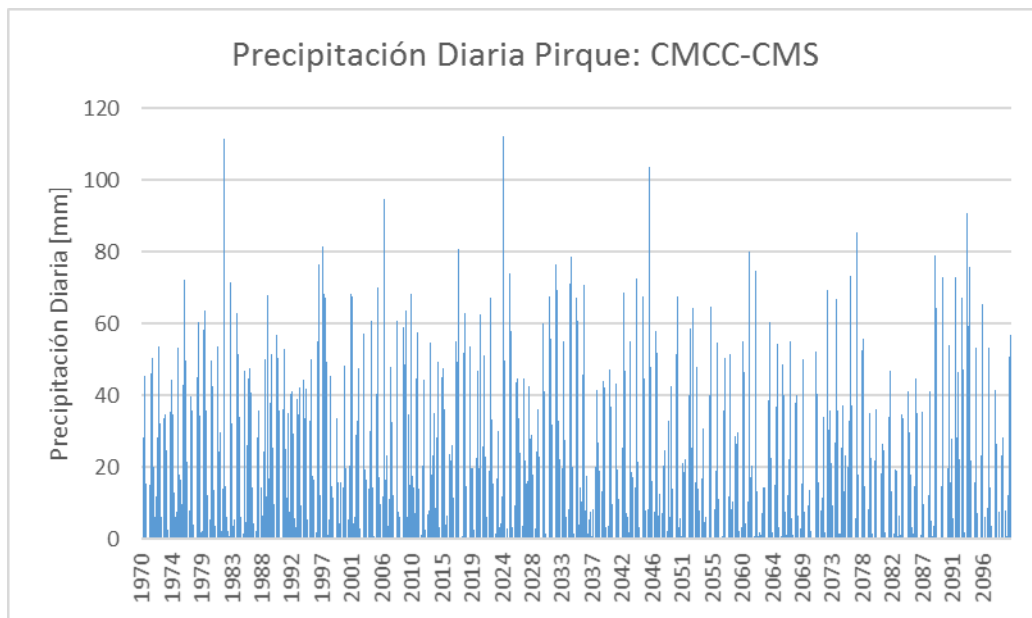


Figura C.36: Precipitaciones diarias en Pirque por el modelo CMCC-CMS.

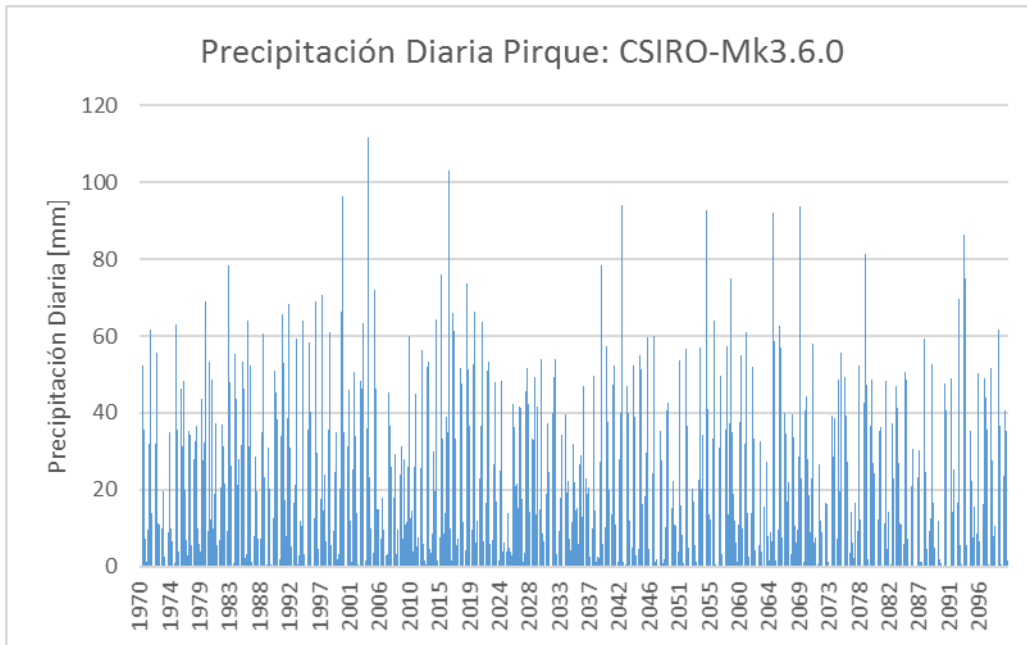


Figura C.37: Precipitaciones diarias en Pirque por el modelo CSIRO-Mk3.6.0.

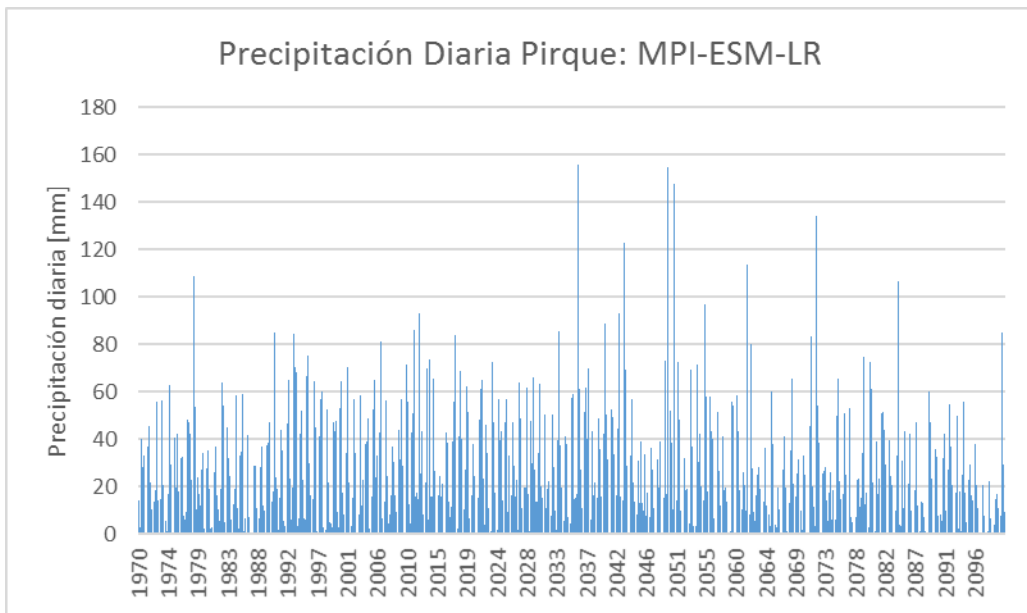


Figura C.38: Precipitaciones diarias en Pirque según el modelo MPI-ESM-LR.

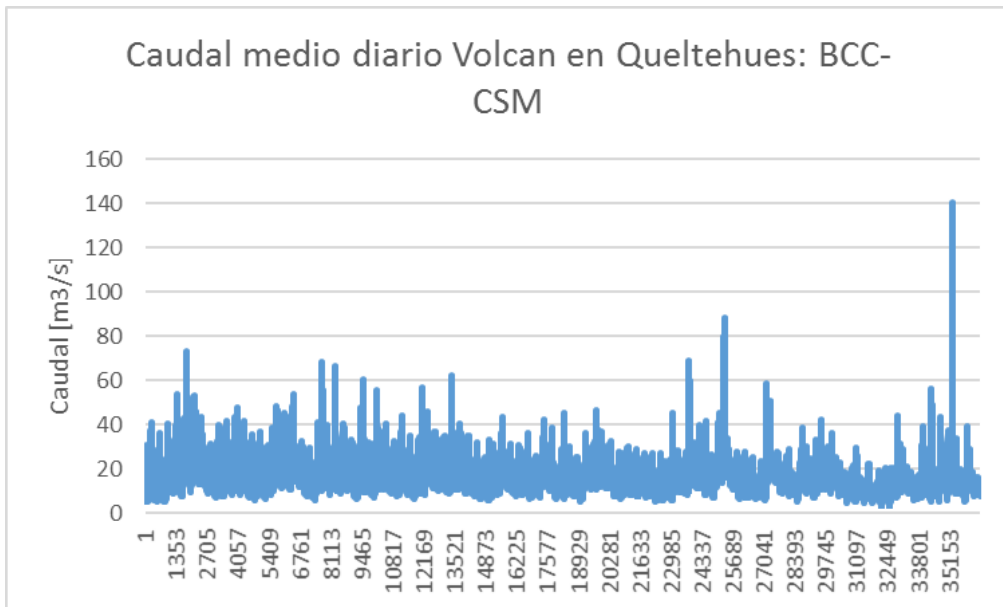


Figura C.39: Caudal medio en la estación "Volcán en Queltehues" para el modelo BCC-CSM.

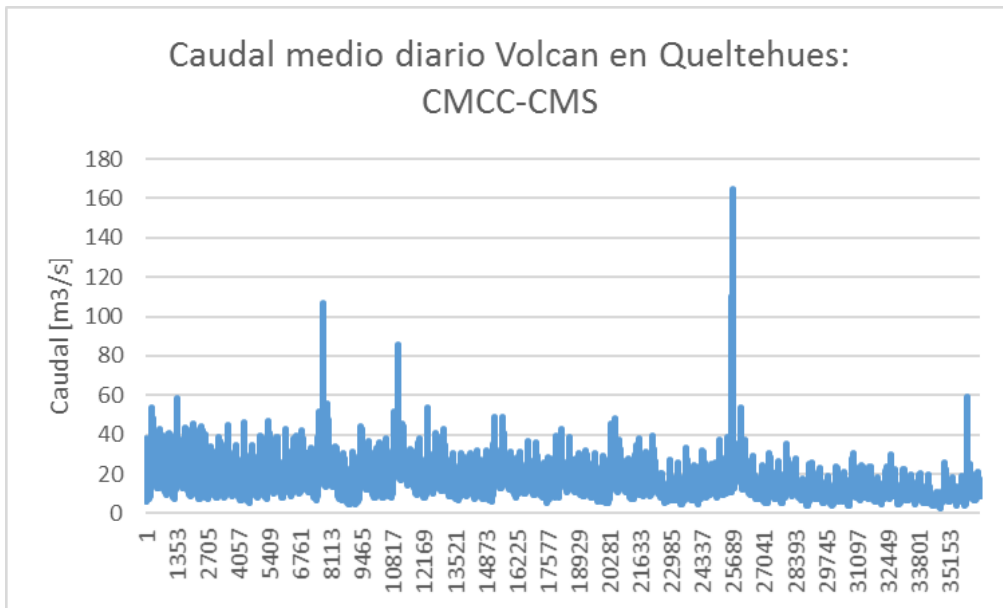


Figura C.40: Caudales medios diarios para el modelo CMCC-CMS.

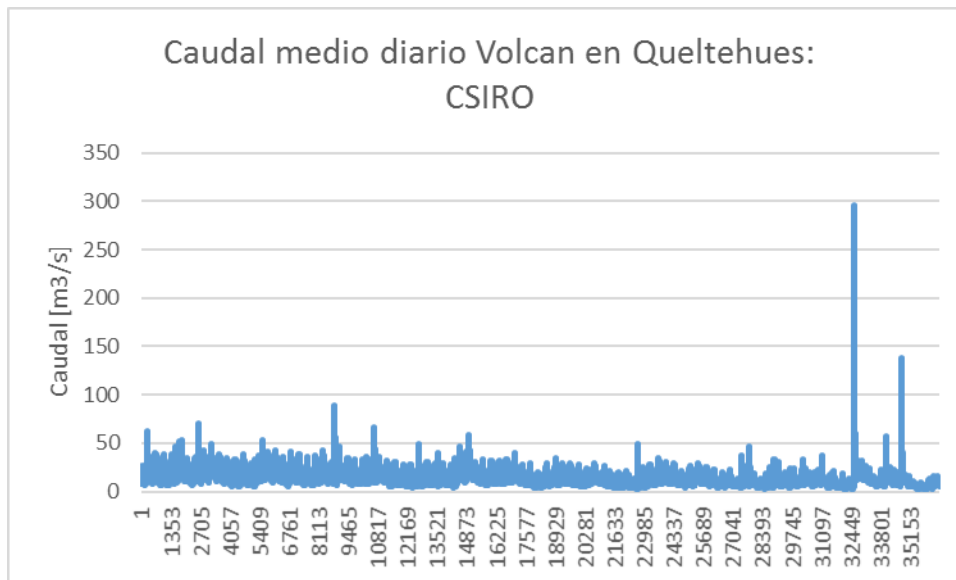


Figura C.41: Caudales medios diarios en "Volcán en Queltehues" para el modelo CSIRO.

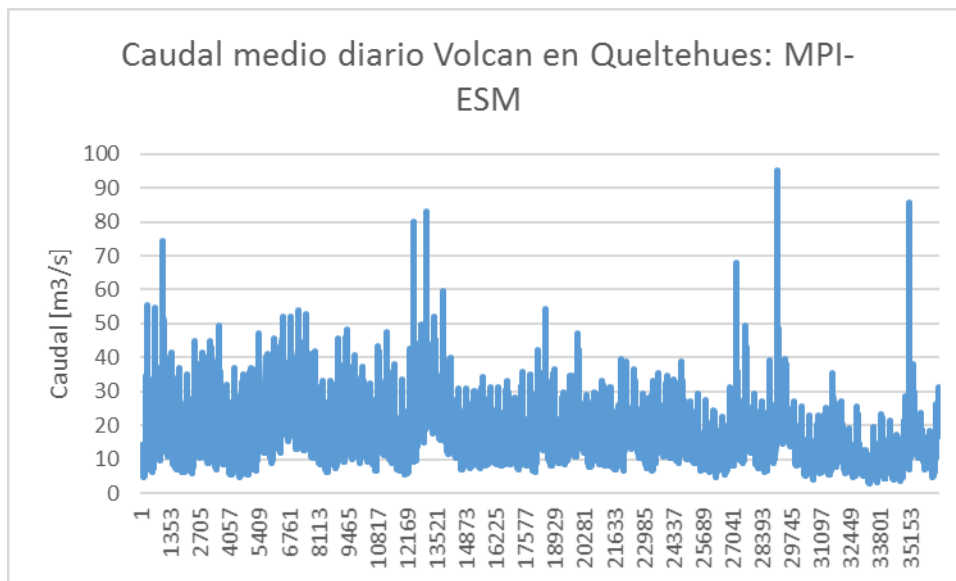


Figura C.42: Caudales medios diarios para el modelo MPI-ESM en "Volcán en Queltehues".

### C.5 Cuenca del Río Limarí

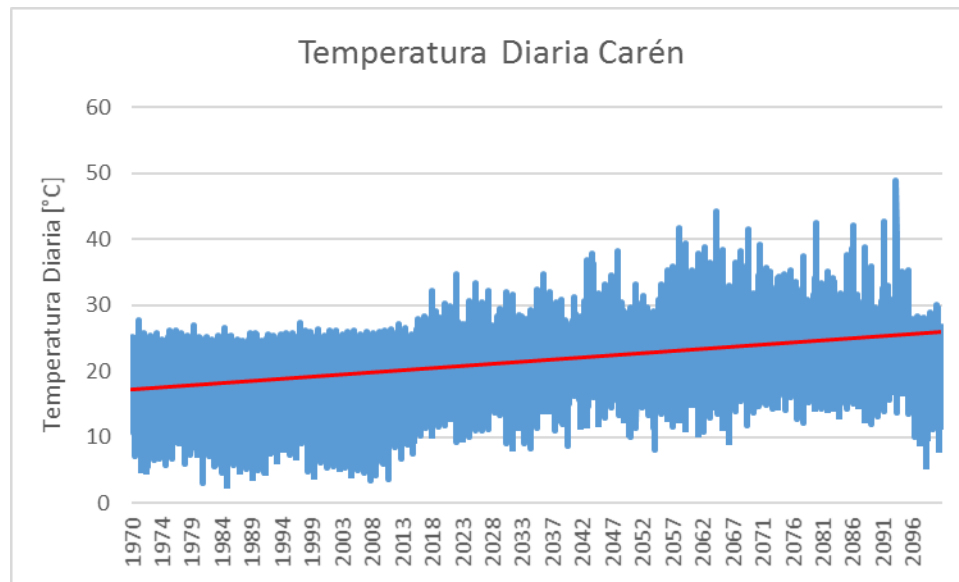


Figura C.43: Temperaturas medias diarias en la estación Carén.

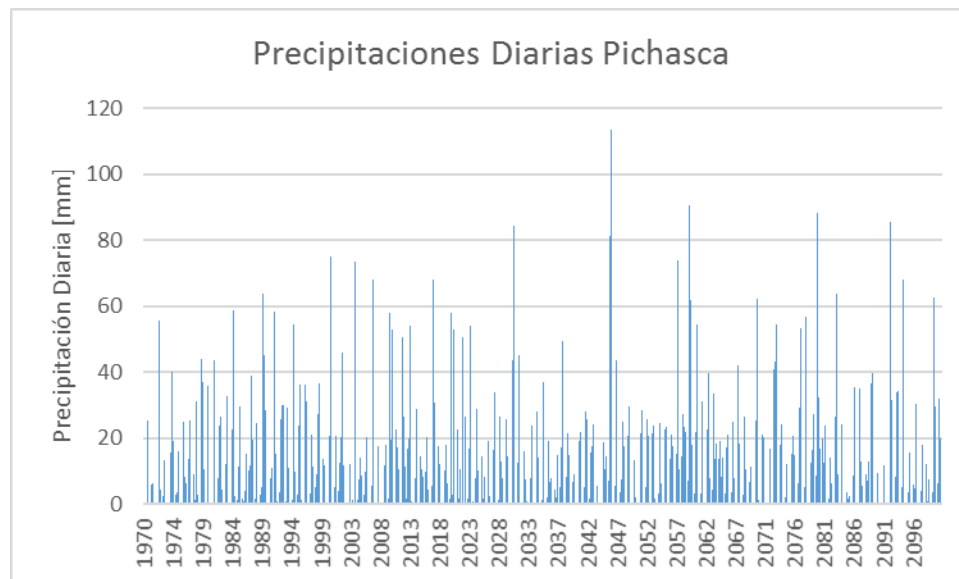


Figura C.44: Precipitaciones diarias para la estación Pichasca.





## **Anexo D. Escalamiento Limarí**

## D.1 Precipitación

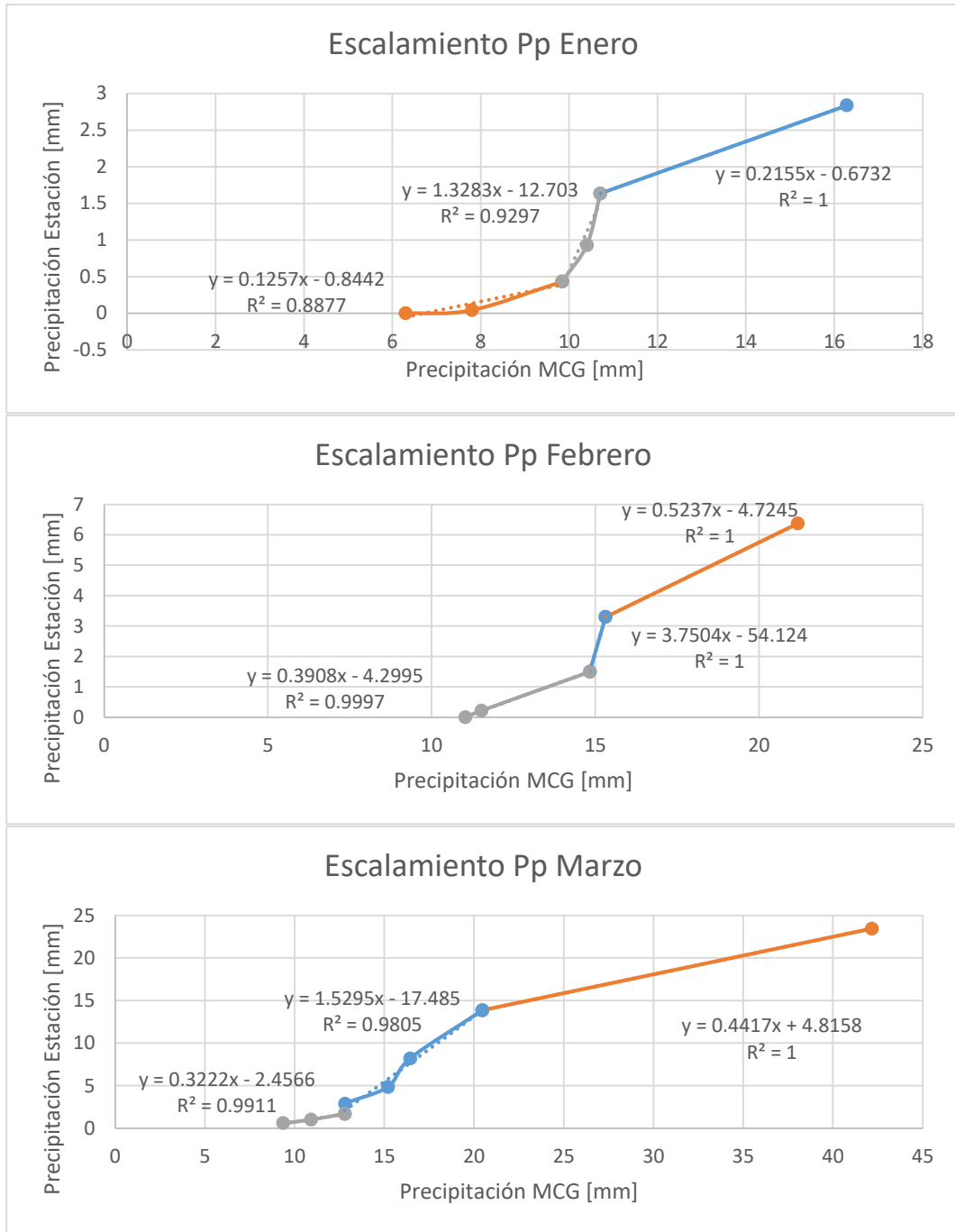


Figura D.1: Escalamiento de las precipitaciones de los tres primeros meses del año.

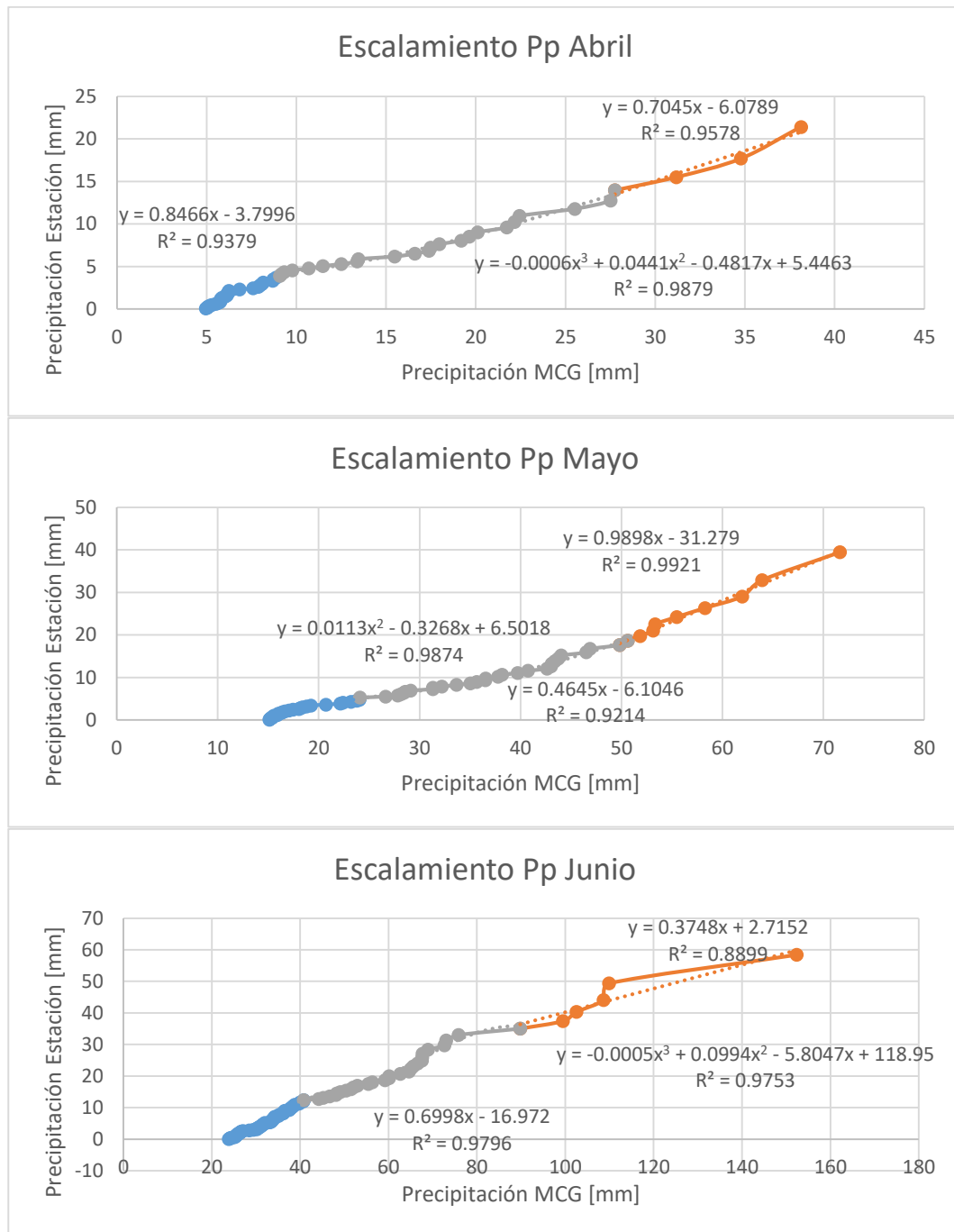


Figura D.2: Escalamiento de precipitaciones diarias para los meses de abril a junio.

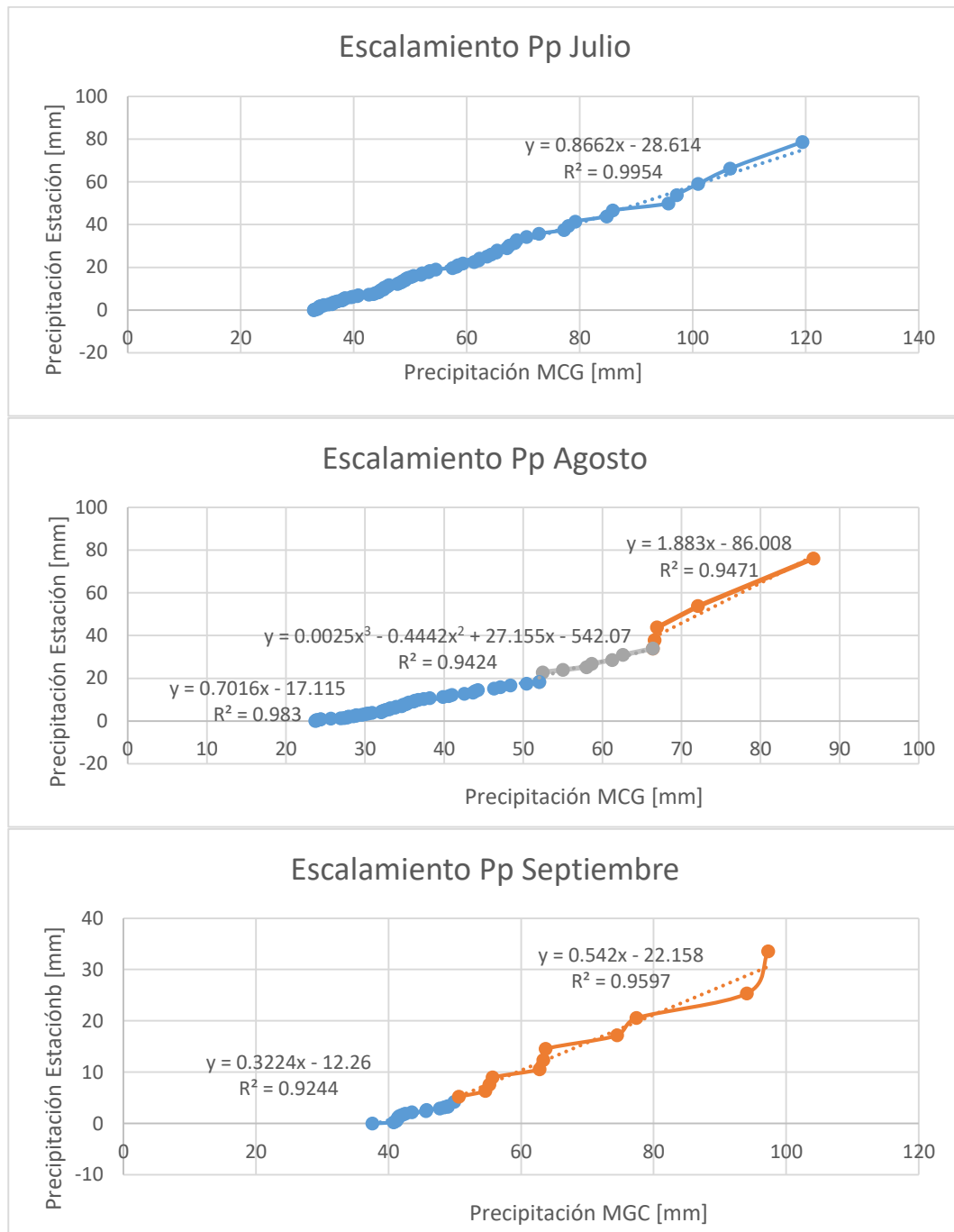


Figura D.3: Escalamiento de las precipitaciones diarias para los meses de julio a septiembre.

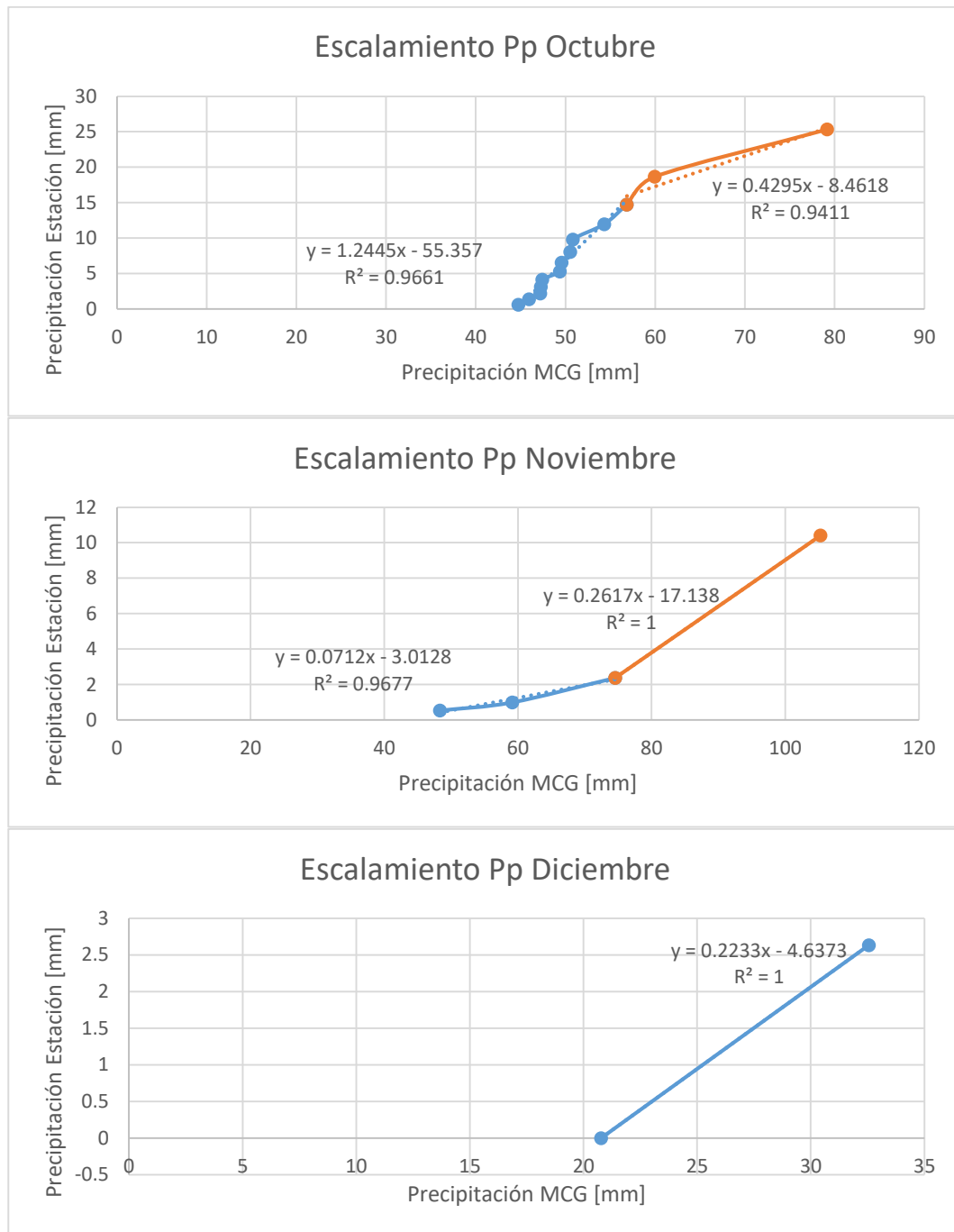


Figura D.4: Escalamiento de las precipitaciones diarias para los últimos tres meses del año.

## D.2 Temperatura

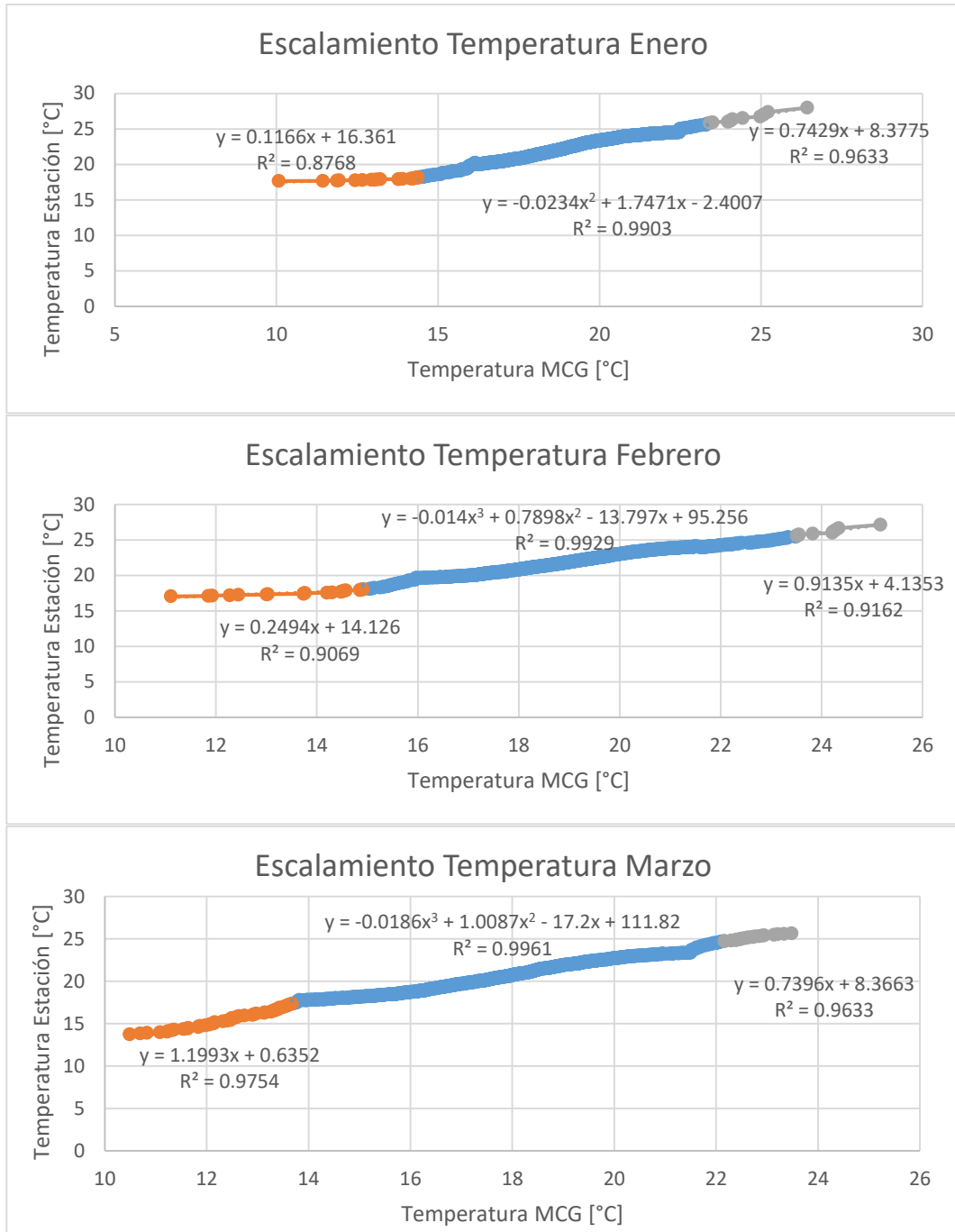


Figura D.5: Escalamiento para temperaturas medias diarias en los primeros tres meses del año.

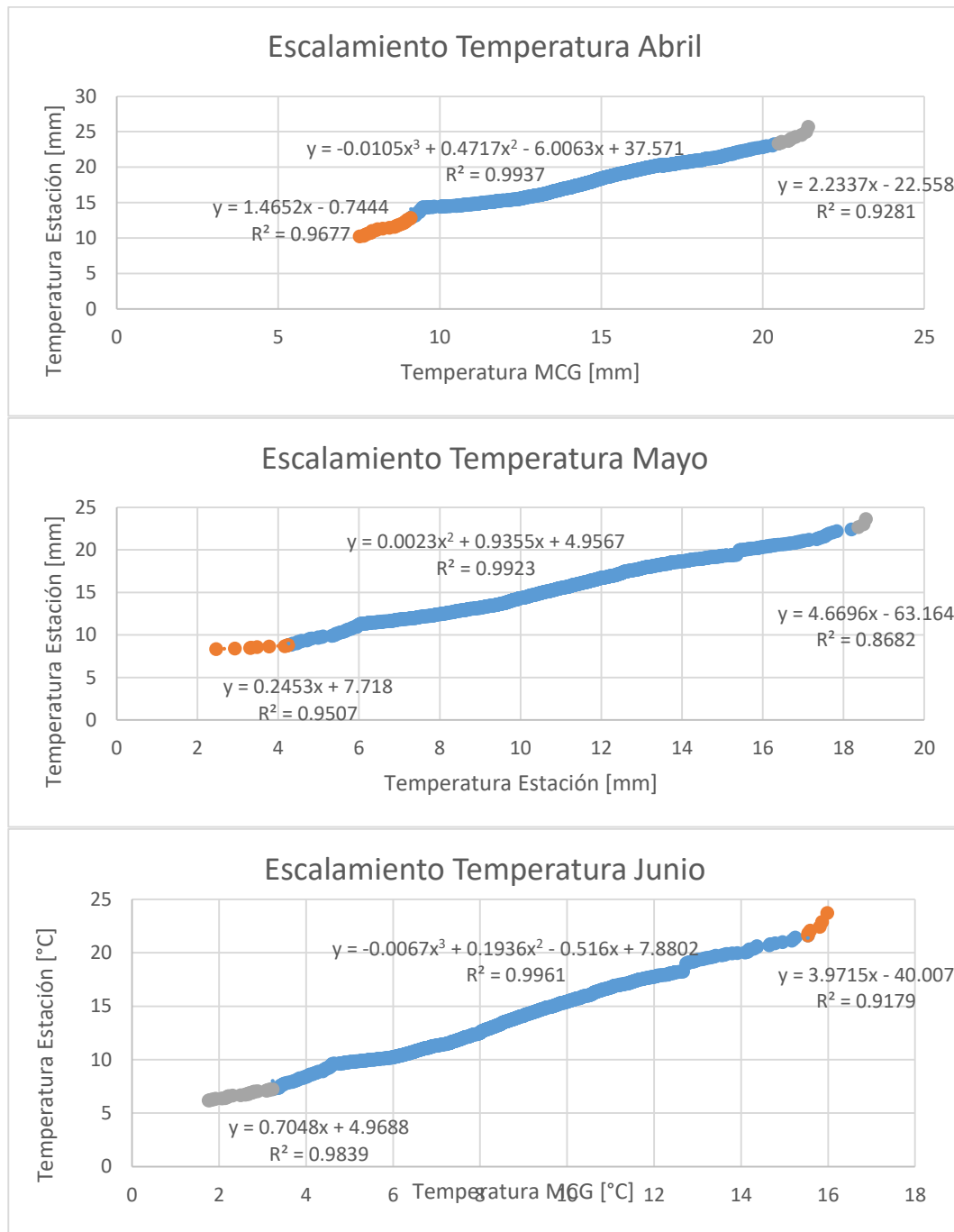


Figura D.6: Escalamiento de temperaturas medias diarias para los meses entre abril y junio.

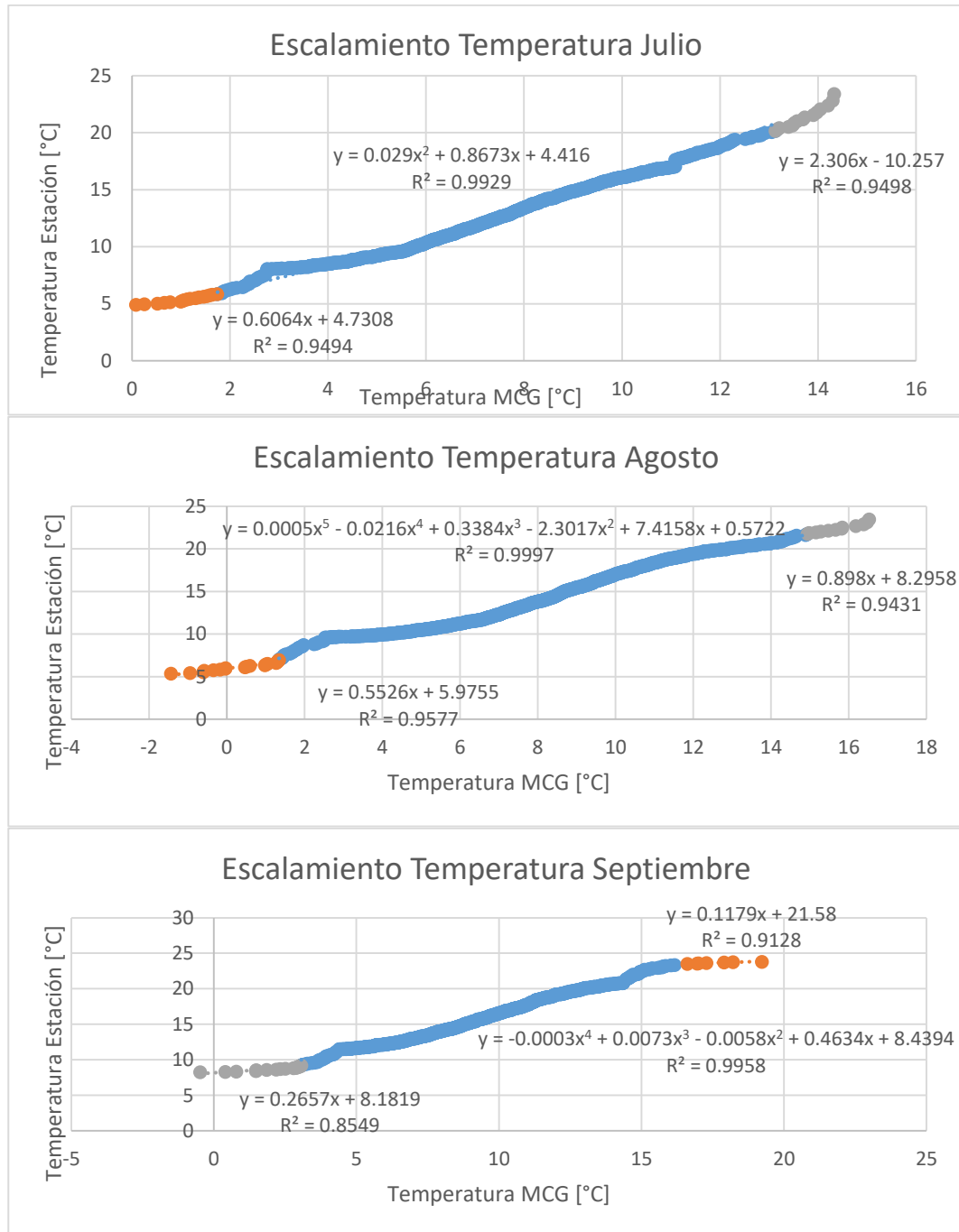


Figura D.7: Escalamiento de temperaturas medias para los meses entre julio y septiembre.



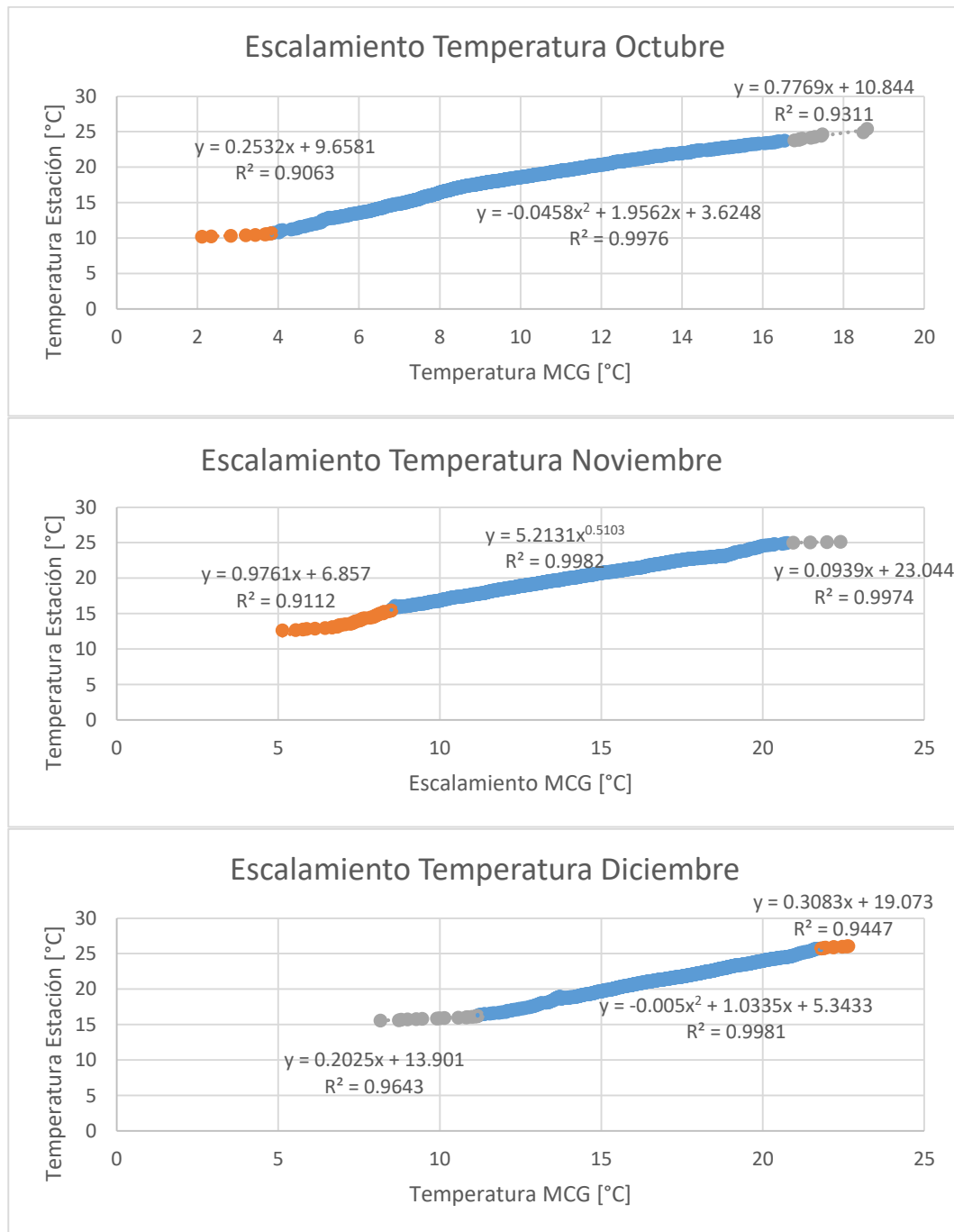


Figura D.8: Escalamiento de temperaturas medias diarias para los últimos tres meses del año.



## **Anexo E. Índices de Precipitación Estandarizado**

## E.1 Cuenca Laguna de la Laja

Tabla E.1: Resultados para los modelos BCC-CSM y CMCC-CMS en escenario estacionario.

Modelo	BCC-CSM			CMCC-CMS		
	Deshielo	Pluvial	Anual	Deshielo	Pluvial	Anual
<b>Histórico</b>						
<b>Extremadamente Húmedo</b>	5,7%	2,9%	2,9%	5,7%	5,7%	5,7%
<b>Muy Húmedo</b>	2,9%	8,6%	5,7%	2,9%	0,0%	0,0%
<b>Moderadamente Húmedo</b>	11,4%	5,7%	8,6%	8,6%	14,3%	2,9%
<b>Normal o Aproximadamente Normal</b>	71,4%	68,6%	68,6%	71,4%	74,3%	80,0%
<b>Moderadamente Seco</b>	5,7%	11,4%	8,6%	11,4%	5,7%	11,4%
<b>Severamente Seco</b>	5,7%	5,7%	8,6%	2,9%	0,0%	0,0%
<b>Extremadamente Seco</b>	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	2,9%	2,9%
<b>Futuro Cercano</b>						
<b>Extremadamente Húmedo</b>	6,7%	2,2%	2,2%	2,2%	4,4%	4,4%
<b>Muy Húmedo</b>	6,7%	6,7%	4,4%	2,2%	0,0%	0,0%
<b>Moderadamente Húmedo</b>	4,4%	2,2%	8,9%	8,9%	4,4%	2,2%
<b>Normal o Aproximadamente Normal</b>	48,9%	62,2%	60,0%	64,4%	71,1%	60,0%
<b>Moderadamente Seco</b>	26,7%	11,1%	8,9%	15,6%	8,9%	24,4%
<b>Severamente Seco</b>	4,4%	13,3%	8,9%	6,7%	8,9%	4,4%
<b>Extremadamente Seco</b>	2,2%	2,2%	6,7%	0,0%	2,2%	4,4%
<b>Futuro Lejano</b>						
<b>Extremadamente Húmedo</b>	6,1%	2,0%	2,0%	0,0%	4,0%	4,0%
<b>Muy Húmedo</b>	2,0%	2,0%	2,0%	0,0%	0,0%	0,0%
<b>Moderadamente Húmedo</b>	2,0%	4,1%	4,1%	2,0%	0,0%	0,0%
<b>Normal o Aproximadamente Normal</b>	53,1%	42,9%	34,7%	44,0%	38,0%	30,0%
<b>Moderadamente Seco</b>	18,4%	18,4%	20,4%	28,0%	24,0%	10,0%
<b>Severamente Seco</b>	16,3%	8,2%	12,2%	24,0%	20,0%	32,0%
<b>Extremadamente Seco</b>	2,0%	24,5%	26,5%	0,0%	16,0%	26,0%

Tabla E.2: Resultados del IPE en escenario estacionario para CSIRO y MPI-ESM.

Modelo	CSIRO-Mk3.6.0.			MPI-ESM		
	Histórico	Deshielo	Pluvial	Anual	Deshielo	Pluvial
<b>Extremadamente Húmedo</b>	5,7%	2,9%	0,0%	5,7%	0,0%	0,0%
<b>Muy Húmedo</b>	2,9%	2,9%	2,9%	2,9%	2,9%	8,6%
<b>Moderadamente Húmedo</b>	2,9%	11,4%	17,1%	5,7%	8,6%	11,4%
<b>Normal o Aproximadamente Normal</b>	74,3%	74,3%	62,9%	71,4%	68,6%	60,0%
<b>Moderadamente Seco</b>	11,4%	8,6%	14,3%	14,3%	17,1%	11,4%
<b>Severamente Seco</b>	5,7%	0,0%	2,9%	2,9%	2,9%	11,4%
<b>Extremadamente Seco</b>	0,0%	2,9%	2,9%	0,0%	2,9%	0,0%
Futuro Cercano	Deshielo	Pluvial	Anual	Deshielo	Pluvial	Anual
<b>Extremadamente Húmedo</b>	0,0%	0,0%	2,2%	6,7%	4,4%	4,4%
<b>Muy Húmedo</b>	4,4%	2,2%	2,2%	11,1%	2,2%	6,7%
<b>Moderadamente Húmedo</b>	4,4%	6,7%	2,2%	11,1%	8,9%	2,2%
<b>Normal o Aproximadamente Normal</b>	77,8%	68,9%	62,2%	64,4%	55,6%	68,9%
<b>Moderadamente Seco</b>	11,1%	11,1%	17,8%	6,7%	15,6%	11,1%
<b>Severamente Seco</b>	2,2%	8,9%	8,9%	0,0%	8,9%	6,7%
<b>Extremadamente Seco</b>	0,0%	2,2%	4,4%	0,0%	4,4%	0,0%
Futuro Lejano	Deshielo	Pluvial	Anual	Deshielo	Pluvial	Anual
<b>Extremadamente Húmedo</b>	2,0%	0,0%	2,0%	0,0%	0,0%	0,0%
<b>Muy Húmedo</b>	0,0%	0,0%	0,0%	2,0%	4,0%	0,0%
<b>Moderadamente Húmedo</b>	0,0%	2,0%	2,0%	2,0%	0,0%	2,0%
<b>Normal o Aproximadamente Normal</b>	68,0%	56,0%	40,0%	62,0%	24,0%	28,0%
<b>Moderadamente Seco</b>	22,0%	20,0%	36,0%	20,0%	8,0%	14,0%
<b>Severamente Seco</b>	6,0%	10,0%	6,0%	12,0%	14,0%	16,0%
<b>Extremadamente Seco</b>	0,0%	10,0%	14,0%	0,0%	50,0%	38,0%

Tabla E.3: IPE para el escenario no estacionario de los modelos BCC-CSM y CMCC-CMS.

Modelo	BCC-CSM			CMCC-CMS		
	Deshielo	Pluvial	Anual	Deshielo	Pluvial	Anual
<b>Histórico</b>						
<b>Extremadamente Húmedo</b>	5,7%	2,9%	2,9%	5,7%	5,7%	5,7%
<b>Muy Húmedo</b>	2,9%	8,6%	5,7%	2,9%	0,0%	0,0%
<b>Moderadamente Húmedo</b>	11,4%	5,7%	8,6%	8,6%	14,3%	2,9%
<b>Normal o Aproximadamente Normal</b>	71,4%	68,6%	68,6%	71,4%	74,3%	80,0%
<b>Moderadamente Seco</b>	5,7%	11,4%	8,6%	11,4%	5,7%	11,4%
<b>Severamente Seco</b>	5,7%	5,7%	8,6%	2,9%	0,0%	0,0%
<b>Extremadamente Seco</b>	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	2,9%	2,9%
<b>Futuro Cercano</b>						
<b>Extremadamente Húmedo</b>	4,4%	2,2%	2,2%	2,2%	4,4%	4,4%
<b>Muy Húmedo</b>	8,9%	4,4%	4,4%	2,2%	0,0%	0,0%
<b>Moderadamente Húmedo</b>	4,4%	4,4%	8,9%	11,1%	4,4%	2,2%
<b>Normal o Aproximadamente Normal</b>	57,8%	64,4%	60,0%	62,2%	73,3%	71,1%
<b>Moderadamente Seco</b>	20,0%	13,3%	11,1%	17,8%	8,9%	15,6%
<b>Severamente Seco</b>	4,4%	8,9%	11,1%	4,4%	8,9%	4,4%
<b>Extremadamente Seco</b>	0,0%	2,2%	2,2%	0,0%	0,0%	2,2%
<b>Futuro Lejano</b>						
<b>Extremadamente Húmedo</b>	4,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
<b>Muy Húmedo</b>	2,0%	2,0%	2,0%	0,0%	0,0%	0,0%
<b>Moderadamente Húmedo</b>	4,0%	6,0%	6,0%	4,0%	4,0%	0,0%
<b>Normal o Aproximadamente Normal</b>	64,0%	56,0%	52,0%	58,0%	52,0%	46,0%
<b>Moderadamente Seco</b>	18,0%	12,0%	16,0%	30,0%	26,0%	32,0%
<b>Severamente Seco</b>	6,0%	16,0%	20,0%	6,0%	12,0%	14,0%
<b>Extremadamente Seco</b>	0,0%	6,0%	2,0%	0,0%	4,0%	6,0%

Tabla E.4: Resultados del IPE para los modelos CSIRO y MPI-ESM en el escenario no estacionario.

Modelo	CSIRO-Mk3.6.0.			MPI-ESM		
	Histórico	Deshielo	Pluvial	Anual	Deshielo	Pluvial
<b>Extremadamente Húmedo</b>	5,7%	2,9%	0,0%	5,7%	0,0%	0,0%
<b>Muy Húmedo</b>	2,9%	2,9%	2,9%	2,9%	2,9%	8,6%
<b>Moderadamente Húmedo</b>	2,9%	11,4%	17,1%	5,7%	8,6%	11,4%
<b>Normal o Aproximadamente Normal</b>	74,3%	74,3%	62,9%	71,4%	68,6%	60,0%
<b>Moderadamente Seco</b>	11,4%	8,6%	14,3%	14,3%	17,1%	11,4%
<b>Severamente Seco</b>	5,7%	0,0%	2,9%	2,9%	2,9%	11,4%
<b>Extremadamente Seco</b>	0,0%	2,9%	2,9%	0,0%	2,9%	0,0%
Futuro Cercano	Deshielo	Pluvial	Anual	Deshielo	Pluvial	Anual
<b>Extremadamente Húmedo</b>	0,0%	0,0%	2,2%	2,2%	4,4%	4,4%
<b>Muy Húmedo</b>	4,4%	2,2%	2,2%	8,9%	0,0%	4,4%
<b>Moderadamente Húmedo</b>	4,4%	6,7%	2,2%	8,9%	8,9%	4,4%
<b>Normal o Aproximadamente Normal</b>	80,0%	73,3%	68,9%	68,9%	64,4%	68,9%
<b>Moderadamente Seco</b>	8,9%	8,9%	13,3%	8,9%	11,1%	15,6%
<b>Severamente Seco</b>	2,2%	8,9%	8,9%	2,2%	8,9%	2,2%
<b>Extremadamente Seco</b>	0,0%	0,0%	2,2%	0,0%	2,2%	0,0%
Futuro Lejano	Deshielo	Pluvial	Anual	Deshielo	Pluvial	Anual
<b>Extremadamente Húmedo</b>	2,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
<b>Muy Húmedo</b>	0,0%	0,0%	2,0%	2,0%	4,0%	0,0%
<b>Moderadamente Húmedo</b>	0,0%	4,0%	2,0%	2,0%	0,0%	4,0%
<b>Normal o Aproximadamente Normal</b>	78,0%	70,0%	70,0%	66,0%	34,0%	34,0%
<b>Moderadamente Seco</b>	14,0%	8,0%	10,0%	14,0%	24,0%	20,0%
<b>Severamente Seco</b>	4,0%	10,0%	10,0%	14,0%	32,0%	30,0%
<b>Extremadamente Seco</b>	0,0%	6,0%	4,0%	0,0%	4,0%	10,0%

## E.2 Cuenca Laguna de la Invernada

Tabla E.5: IPE para los modelos BCC-CSM y CMCC-CMS en escenario estacionario.

Modelos	BCC-CSM			CMCC-CMS		
	Deshielo	Pluvial	Anual	Deshielo	Pluvial	Anual
<b>Histórico</b>						
<b>Extremadamente Húmedo</b>	2,9%	5,7%	5,7%	8,6%	5,7%	5,7%
<b>Muy Húmedo</b>	5,7%	0,0%	2,9%	2,9%	2,9%	2,9%
<b>Moderadamente Húmedo</b>	8,6%	8,6%	8,6%	2,9%	5,7%	0,0%
<b>Normal o Aproximadamente Normal</b>	71,4%	74,3%	77,1%	82,9%	80,0%	82,9%
<b>Moderadamente Seco</b>	14,3%	11,4%	8,6%	5,7%	5,7%	8,6%
<b>Severamente Seco</b>	0,0%	2,9%	0,0%	0,0%	2,9%	2,9%
<b>Extremadamente Seco</b>	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
<b>Futuro Cercano</b>						
<b>Extremadamente Húmedo</b>	8,9%	0,0%	2,2%	4,4%	4,4%	4,4%
<b>Muy Húmedo</b>	0,0%	6,7%	6,7%	2,2%	2,2%	0,0%
<b>Moderadamente Húmedo</b>	13,3%	4,4%	4,4%	6,7%	2,2%	2,2%
<b>Normal o Aproximadamente Normal</b>	64,4%	57,8%	53,3%	68,9%	66,7%	68,9%
<b>Moderadamente Seco</b>	13,3%	15,6%	22,2%	17,8%	20,0%	20,0%
<b>Severamente Seco</b>	0,0%	13,3%	11,1%	0,0%	4,4%	4,4%
<b>Extremadamente Seco</b>	0,0%	2,2%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
<b>Futuro Lejano</b>						
<b>Extremadamente Húmedo</b>	6,1%	0,0%	2,0%	4,0%	4,0%	4,0%
<b>Muy Húmedo</b>	0,0%	2,0%	4,1%	0,0%	0,0%	0,0%
<b>Moderadamente Húmedo</b>	8,2%	2,0%	6,1%	2,0%	2,0%	0,0%
<b>Normal o Aproximadamente Normal</b>	57,1%	49,0%	40,8%	40,0%	46,0%	40,0%
<b>Moderadamente Seco</b>	22,4%	22,4%	26,5%	52,0%	32,0%	28,0%
<b>Severamente Seco</b>	6,1%	8,2%	10,2%	0,0%	14,0%	24,0%
<b>Extremadamente Seco</b>	0,0%	12,2%	10,2%	0,0%	4,0%	6,0%



Tabla E.6: IPE para los modelos CSIRO y MPI-ESM en escenario estacionario.

Modelos	CSIRO-Mk3.6.0.			MPI-ESM		
	Histórico	Deshielo	Pluvial	Anual	Deshielo	Pluvial
<b>Extremadamente Húmedo</b>	2,9%	0,0%	0,0%	2,9%	2,9%	0,0%
<b>Muy Húmedo</b>	2,9%	5,7%	8,6%	2,9%	2,9%	8,6%
<b>Moderadamente Húmedo</b>	5,7%	11,4%	8,6%	14,3%	11,4%	11,4%
<b>Normal o Aproximadamente Normal</b>	91,4%	71,4%	68,6%	68,6%	68,6%	62,9%
<b>Moderadamente Seco</b>	0,0%	5,7%	5,7%	14,3%	11,4%	14,3%
<b>Severamente Seco</b>	0,0%	5,7%	8,6%	0,0%	2,9%	5,7%
<b>Extremadamente Seco</b>	0,0%	2,9%	2,9%	0,0%	2,9%	0,0%
Futuro Cercano	Deshielo	Pluvial	Anual	Deshielo	Pluvial	Anual
<b>Extremadamente Húmedo</b>	2,2%	0,0%	0,0%	17,8%	4,4%	8,9%
<b>Muy Húmedo</b>	4,4%	0,0%	0,0%	2,2%	6,7%	0,0%
<b>Moderadamente Húmedo</b>	4,4%	0,0%	2,2%	13,3%	4,4%	6,7%
<b>Normal o Aproximadamente Normal</b>	77,8%	71,1%	64,4%	57,8%	57,8%	68,9%
<b>Moderadamente Seco</b>	11,1%	15,6%	17,8%	8,9%	15,6%	13,3%
<b>Severamente Seco</b>	0,0%	13,3%	15,6%	0,0%	8,9%	2,2%
<b>Extremadamente Seco</b>	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	2,2%	0,0%
Futuro Lejano	Deshielo	Pluvial	Anual	Deshielo	Pluvial	Anual
<b>Extremadamente Húmedo</b>	4,0%	0,0%	0,0%	2,0%	4,0%	8,0%
<b>Muy Húmedo</b>	0,0%	0,0%	0,0%	4,0%	0,0%	2,0%
<b>Moderadamente Húmedo</b>	4,0%	0,0%	0,0%	4,0%	6,0%	2,0%
<b>Normal o Aproximadamente Normal</b>	82,0%	52,0%	54,0%	74,0%	22,0%	28,0%
<b>Moderadamente Seco</b>	8,0%	24,0%	20,0%	14,0%	16,0%	22,0%
<b>Severamente Seco</b>	0,0%	14,0%	16,0%	0,0%	28,0%	26,0%
<b>Extremadamente Seco</b>	0,0%	6,0%	6,0%	0,0%	26,0%	18,0%

Tabla E.7: IPE para el escenario no estacionario para los modelos BCC-CSM y CMCC-CMS.

Modelos	BCC-CSM			CMCC-CMS		
	Deshielo	Pluvial	Anual	Deshielo	Pluvial	Anual
<b>Histórico</b>						
<b>Extremadamente Húmedo</b>	2,9%	5,7%	5,7%	8,6%	5,7%	5,7%
<b>Muy Húmedo</b>	5,7%	0,0%	2,9%	2,9%	2,9%	2,9%
<b>Moderadamente Húmedo</b>	8,6%	8,6%	8,6%	2,9%	5,7%	0,0%
<b>Normal o Aproximadamente Normal</b>	71,4%	74,3%	77,1%	82,9%	80,0%	82,9%
<b>Moderadamente Seco</b>	14,3%	11,4%	8,6%	5,7%	5,7%	8,6%
<b>Severamente Seco</b>	0,0%	2,9%	0,0%	0,0%	2,9%	2,9%
<b>Extremadamente Seco</b>	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
<b>Futuro Cercano</b>	Deshielo	Pluvial	Anual	Deshielo	Pluvial	Anual
<b>Extremadamente Húmedo</b>	8,9%	0,0%	2,2%	4,4%	4,4%	4,4%
<b>Muy Húmedo</b>	0,0%	4,4%	4,4%	4,4%	2,2%	0,0%
<b>Moderadamente Húmedo</b>	11,1%	6,7%	8,9%	6,7%	2,2%	2,2%
<b>Normal o Aproximadamente Normal</b>	66,7%	66,7%	60,0%	66,7%	75,6%	68,9%
<b>Moderadamente Seco</b>	13,3%	13,3%	17,8%	17,8%	11,1%	20,0%
<b>Severamente Seco</b>	0,0%	8,9%	6,7%	0,0%	4,4%	4,4%
<b>Extremadamente Seco</b>	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
<b>Futuro Lejano</b>	Deshielo	Pluvial	Anual	Deshielo	Pluvial	Anual
<b>Extremadamente Húmedo</b>	4,1%	4,1%	2,0%	4,0%	0,0%	0,0%
<b>Muy Húmedo</b>	2,0%	2,0%	6,1%	2,0%	0,0%	0,0%
<b>Moderadamente Húmedo</b>	2,0%	6,1%	4,1%	2,0%	4,0%	2,0%
<b>Normal o Aproximadamente Normal</b>	69,4%	63,3%	65,3%	62,0%	62,0%	56,0%
<b>Moderadamente Seco</b>	22,4%	12,2%	10,2%	28,0%	26,0%	26,0%
<b>Severamente Seco</b>	0,0%	8,2%	10,2%	0,0%	6,0%	10,0%
<b>Extremadamente Seco</b>	0,0%	4,1%	2,0%	0,0%	0,0%	4,0%

Tabla E.8: El IPE para los modelos CSIRO y MPI-ESM en escenario no estacionario.

Modelos	CSIRO-Mk3.6.0.			MPI-ESM		
	Histórico	Deshielo	Pluvial	Anual	Deshielo	Pluvial
<b>Extremadamente Húmedo</b>	2,9%	0,0%	0,0%	2,9%	2,9%	0,0%
<b>Muy Húmedo</b>	2,9%	5,7%	8,6%	2,9%	2,9%	8,6%
<b>Moderadamente Húmedo</b>	5,7%	11,4%	8,6%	14,3%	11,4%	11,4%
<b>Normal o Aproximadamente Normal</b>	91,4%	71,4%	68,6%	68,6%	68,6%	62,9%
<b>Moderadamente Seco</b>	0,0%	5,7%	5,7%	14,3%	11,4%	14,3%
<b>Severamente Seco</b>	0,0%	5,7%	8,6%	0,0%	2,9%	5,7%
<b>Extremadamente Seco</b>	0,0%	2,9%	2,9%	0,0%	2,9%	0,0%
<b>Futuro Cercano</b>	Deshielo	Pluvial	Anual	Deshielo	Pluvial	Anual
<b>Extremadamente Húmedo</b>	2,2%	0,0%	0,0%	6,7%	4,4%	6,7%
<b>Muy Húmedo</b>	2,2%	0,0%	0,0%	13,3%	4,4%	2,2%
<b>Moderadamente Húmedo</b>	6,7%	2,2%	4,4%	2,2%	4,4%	6,7%
<b>Normal o Aproximadamente Normal</b>	77,8%	75,6%	75,6%	68,9%	68,9%	68,9%
<b>Moderadamente Seco</b>	11,1%	15,6%	13,3%	6,7%	15,6%	15,6%
<b>Severamente Seco</b>	0,0%	6,7%	6,7%	2,2%	2,2%	0,0%
<b>Extremadamente Seco</b>	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
<b>Futuro Lejano</b>	Deshielo	Pluvial	Anual	Deshielo	Pluvial	Anual
<b>Extremadamente Húmedo</b>	4,0%	2,0%	2,0%	2,0%	0,0%	0,0%
<b>Muy Húmedo</b>	2,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	2,0%
<b>Moderadamente Húmedo</b>	4,0%	0,0%	2,0%	4,0%	8,0%	0,0%
<b>Normal o Aproximadamente Normal</b>	80,0%	66,0%	70,0%	76,0%	42,0%	42,0%
<b>Moderadamente Seco</b>	8,0%	14,0%	12,0%	16,0%	32,0%	36,0%
<b>Severamente Seco</b>	0,0%	16,0%	12,0%	0,0%	14,0%	16,0%
<b>Extremadamente Seco</b>	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	2,0%	2,0%

### E.3 Cuenca Volcán en Queltehues

Tabla E.9: Resultados del IPE para escenario estacionario.

Modelo	BCC-CSM			CMCC-CMS		
	Deshielo	Pluvia	Deshielo	Pluvia	Deshielo	Pluvia
<b>Histórico</b>						
<b>Extremadamente Húmedo</b>	2,9%	8,6%	5,7%	8,6%	5,7%	5,7%
<b>Muy Húmedo</b>	5,7%	0,0%	2,9%	2,9%	5,7%	5,7%
<b>Moderadamente Húmedo</b>	5,7%	5,7%	5,7%	8,6%	5,7%	5,7%
<b>Normal o Aproximadamente Normal</b>	88,6%	77,1%	74,3%	77,1%	74,3%	74,3%
<b>Moderadamente Seco</b>	0,0%	11,4%	14,3%	5,7%	11,4%	8,6%
<b>Severamente Seco</b>	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	2,9%
<b>Extremadamente Seco</b>	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
<b>Futuro Cercano</b>						
<b>Extremadamente Húmedo</b>	2,2%	0,0%	6,7%	4,4%	4,4%	2,2%
<b>Muy Húmedo</b>	2,2%	8,9%	6,7%	2,2%	0,0%	2,2%
<b>Moderadamente Húmedo</b>	8,9%	8,9%	6,7%	6,7%	8,9%	4,4%
<b>Normal o Aproximadamente Normal</b>	84,4%	51,1%	46,7%	71,1%	66,7%	71,1%
<b>Moderadamente Seco</b>	2,2%	17,8%	28,9%	15,6%	15,6%	15,6%
<b>Severamente Seco</b>	0,0%	11,1%	4,4%	0,0%	4,4%	4,4%
<b>Extremadamente Seco</b>	0,0%	2,2%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
<b>Futuro Lejano</b>						
<b>Extremadamente Húmedo</b>	6,1%	0,0%	6,1%	0,0%	4,0%	2,0%
<b>Muy Húmedo</b>	2,0%	2,0%	4,1%	4,0%	0,0%	0,0%
<b>Moderadamente Húmedo</b>	6,1%	2,0%	4,1%	0,0%	0,0%	0,0%
<b>Normal o Aproximadamente Normal</b>	81,6%	59,2%	53,1%	52,0%	52,0%	50,0%
<b>Moderadamente Seco</b>	4,1%	16,3%	20,4%	42,0%	40,0%	40,0%
<b>Severamente Seco</b>	0,0%	14,3%	14,3%	0,0%	6,0%	8,0%
<b>Extremadamente Seco</b>	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%

Tabla E.10: IPE para el escenario estacionario de los modelos CSIRO y MPI-ESM.

Modelo	CSIRO-Mk3.6.0.			MPI-ESM		
	Histórico	Deshielo	Pluvia	Deshielo	Pluvia	Deshielo
Extremadamente Húmedo	5,7%	0,0%	0,0%	5,7%	2,9%	2,9%
Muy Húmedo	0,0%	8,6%	8,6%	5,7%	2,9%	2,9%
Moderadamente Húmedo	0,0%	14,3%	14,3%	5,7%	14,3%	14,3%
Normal o Aproximadamente Normal	97,1%	62,9%	54,3%	68,6%	65,7%	65,7%
Moderadamente Seco	0,0%	14,3%	20,0%	17,1%	17,1%	14,3%
Severamente Seco	0,0%	2,9%	5,7%	0,0%	0,0%	2,9%
Extremadamente Seco	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
<b>Futuro Cercano</b>	Deshielo	Pluvia	Deshielo	Pluvia	Deshielo	Pluvia
Extremadamente Húmedo	2,2%	0,0%	2,2%	22,2%	8,9%	4,4%
Muy Húmedo	2,2%	0,0%	0,0%	4,4%	0,0%	4,4%
Moderadamente Húmedo	0,0%	2,2%	0,0%	8,9%	6,7%	6,7%
Normal o Aproximadamente Normal	95,6%	60,0%	60,0%	57,8%	57,8%	66,7%
Moderadamente Seco	0,0%	22,2%	24,4%	6,7%	24,4%	17,8%
Severamente Seco	0,0%	15,6%	11,1%	0,0%	2,2%	0,0%
Extremadamente Seco	0,0%	0,0%	2,2%	0,0%	0,0%	0,0%
<b>Futuro Lejano</b>	Deshielo	Pluvia	Deshielo	Pluvia	Deshielo	Pluvia
Extremadamente Húmedo	10,0%	0,0%	2,0%	8,0%	8,0%	4,0%
Muy Húmedo	2,0%	0,0%	0,0%	2,0%	4,0%	4,0%
Moderadamente Húmedo	0,0%	2,0%	4,0%	2,0%	4,0%	4,0%
Normal o Aproximadamente Normal	86,0%	56,0%	48,0%	72,0%	26,0%	32,0%
Moderadamente Seco	0,0%	12,0%	22,0%	14,0%	32,0%	38,0%
Severamente Seco	0,0%	26,0%	18,0%	0,0%	22,0%	12,0%
Extremadamente Seco	0,0%	0,0%	4,0%	0,0%	6,0%	6,0%

Tabla E.11: IPE para el escenario no estacionario en la cuenca.

Modelo	BCC-CSM			CMCC-CMS		
	Histórico	Deshielo	Pluvia	Deshielo	Pluvia	Deshielo
<b>Extremadamente Húmedo</b>	2,9%	8,6%	5,7%	8,6%	5,7%	5,7%
<b>Muy Húmedo</b>	5,7%	0,0%	2,9%	2,9%	5,7%	5,7%
<b>Moderadamente Húmedo</b>	5,7%	5,7%	5,7%	8,6%	5,7%	5,7%
<b>Normal o Aproximadamente Normal</b>	88,6%	77,1%	74,3%	77,1%	74,3%	74,3%
<b>Moderadamente Seco</b>	0,0%	11,4%	14,3%	5,7%	11,4%	8,6%
<b>Severamente Seco</b>	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	2,9%
<b>Extremadamente Seco</b>	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
<b>Futuro Cercano</b>	Deshielo	Pluvia	Deshielo	Pluvia	Deshielo	Pluvia
<b>Extremadamente Húmedo</b>	2,2%	0,0%	6,7%	4,4%	4,4%	4,4%
<b>Muy Húmedo</b>	6,7%	11,1%	6,7%	2,2%	0,0%	0,0%
<b>Moderadamente Húmedo</b>	8,9%	8,9%	6,7%	6,7%	8,9%	4,4%
<b>Normal o Aproximadamente Normal</b>	75,6%	55,6%	51,1%	80,0%	66,7%	68,9%
<b>Moderadamente Seco</b>	6,7%	15,6%	24,4%	6,7%	15,6%	17,8%
<b>Severamente Seco</b>	0,0%	6,7%	4,4%	0,0%	4,4%	4,4%
<b>Extremadamente Seco</b>	0,0%	2,2%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
<b>Futuro Lejano</b>	Deshielo	Pluvia	Deshielo	Pluvia	Deshielo	Pluvia
<b>Extremadamente Húmedo</b>	6,1%	6,1%	2,0%	2,0%	0,0%	0,0%
<b>Muy Húmedo</b>	2,0%	4,1%	6,1%	2,0%	0,0%	0,0%
<b>Moderadamente Húmedo</b>	0,0%	6,1%	4,1%	2,0%	6,0%	2,0%
<b>Normal o Aproximadamente Normal</b>	91,8%	63,3%	71,4%	90,0%	68,0%	60,0%
<b>Moderadamente Seco</b>	0,0%	16,3%	12,2%	2,0%	22,0%	32,0%
<b>Severamente Seco</b>	0,0%	4,1%	4,1%	0,0%	2,0%	4,0%
<b>Extremadamente Seco</b>	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%

Tabla E.12: Escenario no estacionario para los modelos CSIRO y MPI-ESM.

Modelo	CSIRO-Mk3.6.0.			MPI-ESM		
	Histórico	Deshielo	Pluvia	Deshielo	Pluvia	Deshielo
<b>Extremadamente Húmedo</b>	5,7%	0,0%	0,0%	5,7%	2,9%	2,9%
<b>Muy Húmedo</b>	0,0%	8,6%	8,6%	5,7%	2,9%	2,9%
<b>Moderadamente Húmedo</b>	0,0%	14,3%	14,3%	5,7%	14,3%	14,3%
<b>Normal o Aproximadamente Normal</b>	97,1%	62,9%	54,3%	68,6%	65,7%	65,7%
<b>Moderadamente Seco</b>	0,0%	14,3%	20,0%	17,1%	17,1%	14,3%
<b>Severamente Seco</b>	0,0%	2,9%	5,7%	0,0%	0,0%	2,9%
<b>Extremadamente Seco</b>	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
<b>Futuro Cercano</b>	Deshielo	Pluvia	Deshielo	Pluvia	Deshielo	Pluvia
<b>Extremadamente Húmedo</b>	2,2%	0,0%	2,2%	15,6%	4,4%	4,4%
<b>Muy Húmedo</b>	0,0%	0,0%	0,0%	6,7%	4,4%	4,4%
<b>Moderadamente Húmedo</b>	2,2%	4,4%	0,0%	4,4%	2,2%	4,4%
<b>Normal o Aproximadamente Normal</b>	95,6%	68,9%	68,9%	64,4%	73,3%	75,6%
<b>Moderadamente Seco</b>	0,0%	22,2%	22,2%	8,9%	15,6%	11,1%
<b>Severamente Seco</b>	0,0%	4,4%	6,7%	0,0%	0,0%	0,0%
<b>Extremadamente Seco</b>	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
<b>Futuro Lejano</b>	Deshielo	Pluvia	Deshielo	Pluvia	Deshielo	Pluvia
<b>Extremadamente Húmedo</b>	12,0%	2,0%	2,0%	4,0%	0,0%	0,0%
<b>Muy Húmedo</b>	0,0%	2,0%	4,0%	4,0%	4,0%	6,0%
<b>Moderadamente Húmedo</b>	0,0%	2,0%	2,0%	0,0%	6,0%	4,0%
<b>Normal o Aproximadamente Normal</b>	86,0%	64,0%	66,0%	82,0%	50,0%	44,0%
<b>Moderadamente Seco</b>	0,0%	22,0%	12,0%	8,0%	36,0%	38,0%
<b>Severamente Seco</b>	0,0%	6,0%	12,0%	0,0%	2,0%	6,0%
<b>Extremadamente Seco</b>	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%

E.4 Cuenca Pichásca

Tabla E.13: IPE en el escenario estacionario.

Modelo	MRI-CGCM3			
	Histórico	Deshielo	Pluvial	Deshielo
<b>Extremadamente Húmedo</b>		5,7%	5,7%	5,7%
<b>Muy Húmedo</b>		0,0%	5,7%	5,7%
<b>Moderadamente Húmedo</b>		2,9%	5,7%	2,9%
<b>Normal o Aproximadamente Normal</b>		94,3%	71,4%	74,3%
<b>Moderadamente Seco</b>		0,0%	14,3%	14,3%
<b>Severamente Seco</b>		0,0%	0,0%	0,0%
<b>Extremadamente Seco</b>		0,0%	0,0%	0,0%
	Futuro Cercano	Deshielo	Pluvial	Deshielo
<b>Extremadamente Húmedo</b>		4,4%	2,2%	6,7%
<b>Muy Húmedo</b>		0,0%	0,0%	0,0%
<b>Moderadamente Húmedo</b>		2,2%	6,7%	2,2%
<b>Normal o Aproximadamente Normal</b>		93,3%	82,2%	82,2%
<b>Moderadamente Seco</b>		0,0%	8,9%	8,9%
<b>Severamente Seco</b>		0,0%	0,0%	0,0%
<b>Extremadamente Seco</b>		0,0%	0,0%	0,0%
	Futuro Lejano	Deshielo	Pluvial	Deshielo
<b>Extremadamente Húmedo</b>		2,0%	2,0%	6,0%
<b>Muy Húmedo</b>		2,0%	6,0%	6,0%
<b>Moderadamente Húmedo</b>		6,0%	6,0%	6,0%
<b>Normal o Aproximadamente Normal</b>		88,0%	62,0%	64,0%
<b>Moderadamente Seco</b>		0,0%	18,0%	16,0%
<b>Severamente Seco</b>		0,0%	0,0%	0,0%
<b>Extremadamente Seco</b>		0,0%	0,0%	0,0%



Tabla E.14: IPE en escenario no estacionario para la sub-cuenca del Limarí.

Modelo	MRI-CGCM3			
	Histórico	Deshielo	Pluvial	Deshielo
<b>Extremadamente Húmedo</b>		5,7%	5,7%	5,7%
<b>Muy Húmedo</b>		11,4%	8,6%	2,9%
<b>Moderadamente Húmedo</b>		0,0%	8,6%	14,3%
<b>Normal o Aproximadamente Normal</b>		82,9%	68,6%	74,3%
<b>Moderadamente Seco</b>		0,0%	8,6%	2,9%
<b>Severamente Seco</b>		0,0%	0,0%	0,0%
<b>Extremadamente Seco</b>		0,0%	0,0%	0,0%
	Futuro Cercano	Deshielo	Pluvial	Deshielo
<b>Extremadamente Húmedo</b>		4,4%	2,2%	6,7%
<b>Muy Húmedo</b>		0,0%	2,2%	0,0%
<b>Moderadamente Húmedo</b>		0,0%	4,4%	2,2%
<b>Normal o Aproximadamente Normal</b>		95,6%	82,2%	82,2%
<b>Moderadamente Seco</b>		0,0%	8,9%	8,9%
<b>Severamente Seco</b>		0,0%	0,0%	0,0%
<b>Extremadamente Seco</b>		0,0%	0,0%	0,0%
	Futuro Lejano	Deshielo	Pluvial	Deshielo
<b>Extremadamente Húmedo</b>		2,0%	4,0%	4,0%
<b>Muy Húmedo</b>		2,0%	6,0%	4,0%
<b>Moderadamente Húmedo</b>		4,0%	8,0%	10,0%
<b>Normal o Aproximadamente Normal</b>		90,0%	72,0%	70,0%
<b>Moderadamente Seco</b>		0,0%	8,0%	10,0%
<b>Severamente Seco</b>		0,0%	0,0%	0,0%
<b>Extremadamente Seco</b>		0,0%	0,0%	0,0%



## **Anexo F. Índice de severidad de sequías de Palmer**

## F.1 Cuenca Laguna de la Laja

Tabla F.1: PDSI para la Laguna de la Laja en ambos escenarios para todos los modelos.

BCC	Estacionario			No Estacionario		
	Histórico	F. Cercano	F. Lejano	Histórico	F. Cercano	F. Lejano
<b>Extremadamente Húmedo</b>	2	4	2	2	4	3
<b>Muy Húmedo</b>	9	7	2	9	7	1
<b>Moderadamente Húmedo</b>	17	18	14	17	18	17
<b>Levemente Húmedo</b>	33	64	49	33	65	48
<b>Humedad Incipiente</b>	59	69	50	59	76	53
<b>Sequía Incipiente</b>	4	18	33	4	22	30
<b>Levemente Seco</b>	1	4	9	1	4	8
<b>Moderadamente Seco</b>	0	0	0	0	0	0
<b>Muy Seco</b>	0	0	0	0	0	0
<b>Extremadamente Seco</b>	0	0	0	0	0	0
<b>CMCC</b>						
<b>Extremadamente Húmedo</b>	3	3	3	3	3	5
<b>Muy Húmedo</b>	3	9	2	3	9	1
<b>Moderadamente Húmedo</b>	16	22	6	16	21	12
<b>Levemente Húmedo</b>	41	62	28	41	65	40
<b>Humedad Incipiente</b>	54	59	36	54	61	55
<b>Sequía Incipiente</b>	7	15	30	7	12	21
<b>Levemente Seco</b>	3	6	19	3	6	10
<b>Moderadamente Seco</b>	0	0	2	0	0	0
<b>Muy Seco</b>	0	2	3	0	0	0
<b>Extremadamente Seco</b>	0	5	35	0	0	0
<b>CSIRO</b>						
<b>Extremadamente Húmedo</b>	3	2	3	3	2	3
<b>Muy Húmedo</b>	10	10	3	10	10	3
<b>Moderadamente Húmedo</b>	15	17	18	15	18	19
<b>Levemente Húmedo</b>	35	55	42	35	54	43
<b>Humedad Incipiente</b>	48	67	53	48	73	56
<b>Sequía Incipiente</b>	13	18	33	13	18	26
<b>Levemente Seco</b>	4	4	11	4	3	9
<b>Moderadamente Seco</b>	0	1	0	0	0	0
<b>Muy Seco</b>	0	1	0	0	0	0
<b>Extremadamente Seco</b>	0	3	0	0	0	0

	Estacionario			No Estacionario		
<b>MPI</b>						
<b>Extremadamente Húmedo</b>	3	8	3	3	8	3
<b>Muy Húmedo</b>	5	10	3	5	10	3
<b>Moderadamente Húmedo</b>	17	22	9	17	22	9
<b>Levemente Húmedo</b>	44	65	39	44	62	41
<b>Humedad Incipiente</b>	60	88	62	60	85	52
<b>Sequía Incipiente</b>	15	20	61	15	19	53
<b>Levemente Seco</b>	4	1	9	4	2	7
<b>Moderadamente Seco</b>	0	0	0	0	0	0
<b>Muy Seco</b>	0	0	0	0	0	0
<b>Extremadamente Seco</b>	0	0	0	0	0	0

## F.2 Cuenca Laguna la Invernada

Tabla F.2: PDSI para todos los modelos en ambos escenarios en la Laguna de la Invernada.

	Estacionario			No Estacionario		
	Histórico	F. Cercano	F. Lejano	Histórico	F. Cercano	F. Lejano
<b>BCC-CSM</b>						
Extremadamente Húmedo	2	4	2	2	4	3
Muy Húmedo	9	7	2	9	7	1
Moderadamente Húmedo	17	18	14	17	18	17
Levemente Húmedo	33	64	49	33	65	48
Humedad Incipiente	59	69	50	59	76	53
Sequía Incipiente	4	18	33	4	22	30
Levemente Seco	1	4	9	1	4	8
Moderadamente Seco	0	0	0	0	0	0
Muy Seco	0	0	0	0	0	0
Extremadamente Seco	0	0	0	0	0	0
<b>CMCC</b>						
Extremadamente Húmedo	3	3	3	3	3	5
Muy Húmedo	3	9	2	3	9	1
Moderadamente Húmedo	16	22	6	16	21	12
Levemente Húmedo	41	62	28	41	65	40
Humedad Incipiente	54	59	36	54	61	55
Sequía Incipiente	7	15	30	7	12	21
Levemente Seco	3	6	19	3	6	10
Moderadamente Seco	0	0	2	0	0	0
Muy Seco	0	2	3	0	0	0
Extremadamente Seco	0	5	35	0	0	0
<b>CSIRO</b>						
Extremadamente Húmedo	3	2	3	3	2	3
Muy Húmedo	10	10	3	10	10	3
Moderadamente Húmedo	15	17	18	15	18	19
Levemente Húmedo	35	55	42	35	54	43
Humedad Incipiente	48	67	53	48	73	56
Sequía Incipiente	13	18	33	13	18	26
Levemente Seco	4	4	11	4	3	9
Moderadamente Seco	0	1	0	0	0	0
Muy Seco	0	1	0	0	0	0
Extremadamente Seco	0	3	0	0	0	0
<b>MPI-ESM</b>						
Extremadamente Húmedo	3	8	3	3	8	3
Muy Húmedo	5	10	3	5	10	3
Moderadamente Húmedo	17	22	9	17	22	9

	<b>Estacionario</b>			<b>No Estacionario</b>		
<b>Levemente Húmedo</b>	44	65	39	44	62	41
<b>Humedad Incipiente</b>	60	88	62	60	85	52
<b>Sequía Incipiente</b>	15	20	61	15	19	53
<b>Levemente Seco</b>	4	1	9	4	2	7
<b>Moderadamente Seco</b>	0	0	0	0	0	0
<b>Muy Seco</b>	0	0	0	0	0	0
<b>Extremadamente Seco</b>	0	0	0	0	0	0

### F.3 Cuenca de Volcán en Queltehues

Tabla F.3: PDSI para los escenarios estacionario y no estacionario de todos los modelos.

	Estacionario			No Estacionario		
	Histórico	F. Cercano	F. Lejano	Histórico	F. Cercano	F. Lejano
<b>BCC-CSM</b>						
Extremadamente Húmedo	2	4	2	2	4	3
Muy Húmedo	9	7	2	9	7	1
Moderadamente Húmedo	17	18	14	17	18	17
Levemente Húmedo	33	64	49	33	65	48
Humedad Incipiente	59	69	50	59	76	53
Sequía Incipiente	4	18	33	4	22	30
Levemente Seco	1	4	9	1	4	8
Moderadamente Seco	0	0	0	0	0	0
Muy Seco	0	0	0	0	0	0
Extremadamente Seco	0	0	0	0	0	0
<b>CMCC</b>						
Extremadamente Húmedo	3	3	3	3	3	5
Muy Húmedo	3	9	2	3	9	1
Moderadamente Húmedo	16	22	6	16	21	12
Levemente Húmedo	41	62	28	41	65	40
Humedad Incipiente	54	59	36	54	61	55
Sequía Incipiente	7	15	30	7	12	21
Levemente Seco	3	6	19	3	6	10
Moderadamente Seco	0	0	2	0	0	0
Muy Seco	0	2	3	0	0	0
Extremadamente Seco	0	5	35	0	0	0
<b>CSIRO</b>						
Extremadamente Húmedo	3	2	3	3	2	3
Muy Húmedo	10	10	3	10	10	3
Moderadamente Húmedo	15	17	18	15	18	19
Levemente Húmedo	35	55	42	35	54	43
Humedad Incipiente	48	67	53	48	73	56
Sequía Incipiente	13	18	33	13	18	26
Levemente Seco	4	4	11	4	3	9
Moderadamente Seco	0	1	0	0	0	0
Muy Seco	0	1	0	0	0	0
Extremadamente Seco	0	3	0	0	0	0
<b>MPI</b>						
Extremadamente Húmedo	3	8	3	3	8	3
Muy Húmedo	5	10	3	5	10	3
Moderadamente Húmedo	17	22	9	17	22	9



	<b>Estacionario</b>			<b>No Estacionario</b>		
<b>Levemente Húmedo</b>	44	65	39	44	62	41
<b>Humedad Incipiente</b>	60	88	62	60	85	52
<b>Sequía Incipiente</b>	15	20	61	15	19	53
<b>Levemente Seco</b>	4	1	9	4	2	7
<b>Moderadamente Seco</b>	0	0	0	0	0	0
<b>Muy Seco</b>	0	0	0	0	0	0
<b>Extremadamente Seco</b>	0	0	0	0	0	0

#### F.4 Cuenca “Pichásca”

Tabla F.4: PDSI para la cuenca definida por la estación Pichásca.

	Estacionario			No Estacionario		
	Histórico	F. Cercano	F. Lejano	Histórico	F. Cercano	F. Lejano
<b>Extremadamente Húmedo</b>	9	7	20	9	7	24
<b>Muy Húmedo</b>	7	5	8	7	3	7
<b>Moderadamente Húmedo</b>	9	8	14	9	10	15
<b>Levemente Húmedo</b>	21	18	25	21	23	27
<b>Humedad Incipiente</b>	21	28	33	21	21	32
<b>Sequía Incipiente</b>	25	22	33	25	24	37
<b>Levemente Seco</b>	18	40	27	18	41	28
<b>Moderadamente Seco</b>	10	29	21	10	17	9
<b>Muy Seco</b>	0	0	1	0	0	0
<b>Extremadamente Seco</b>	0	0	1	0	0	1

## **Anexo G. Índice de Caudales Diarios bajos**

## G.1 Cuenca Laguna de la Laja

Tabla G.1: Índice de caudales bajos para ambos escenarios y los cuatro modelos.

<b>Histórico</b>	<b>Escenario Estacionario</b>				<b>Escenario No Estacionario</b>			
	BCC	CMCC	CSIRO	MPI	BCC	CMCC	CSIRO	MPI
<b>Cantidad de días</b>	623	543	576	520	623	543	576	520
<b>%</b>	4,8%	4,2%	4,4%	4,0%	4,8%	4,2%	4,4%	4,0%
<b>Duración Promedio</b>	8,7	7,3	9,1	8,1	8,7	7,3	9,1	8,1
<b>Duración Max</b>	94	48	72	48	94	48	72	48
<b>Futuro Cercano</b>	BCC	CMCC	CSIRO	MPI	BCC	CMCC	CSIRO	MPI
<b>Cantidad de días</b>	1828	1634	2100	1259	1028	1093	915	840
<b>%</b>	11,1%	9,9%	12,8%	7,7%	6,3%	6,7%	5,6%	5,1%
<b>Duración Promedio</b>	15,0	16,5	13,5	11,0	12,5	12,4	7,5	9,9
<b>Duración Max</b>	178	197	121	155	176	129	67	130
<b>Futuro Lejano</b>	BCC	CMCC	CSIRO	MPI	BCC	CMCC	CSIRO	MPI
<b>Cantidad de días</b>	2714	2014	2072	3031	924	870	968	1308
<b>%</b>	29,7%	22,1%	22,7%	33,2%	10,1%	9,5%	10,6%	14,3%
<b>Duración Promedio</b>	20,3	21,4	18,5	21,3	11,0	16,3	10,5	14,7
<b>Duración Max</b>	186	188	159	186	68	152	74	70

## G.2 Cuenca Laguna de la Invernada

Tabla G.2: Índice de caudales bajos para los dos escenarios en todos los modelos.

<b>Histórico</b>	<b>Escenario Estacionario</b>				<b>Escenario No Estacionario</b>			
	BCC	CMCC	CSIRO	MPI	BCC	CMCC	CSIRO	MPI
<b>Cantidad de días</b>	556	559	618	500	556	559	618	500
<b>%</b>	4,3%	4,3%	4,7%	3,8%	4,3%	4,3%	4,7%	3,8%
<b>Duración Promedio</b>	10,7	11,4	15,1	10,9	10,7	11,4	15,1	10,9
<b>Duración Max</b>	117	223	228	227	117	223	228	227
<b>Futuro Cercano</b>	BCC	CMCC	CSIRO	MPI	BCC	CMCC	CSIRO	MPI
<b>Cantidad de días</b>	3156	1641	1344	191	1324	786	946	440
<b>%</b>	19,2%	10,0%	8,2%	1,2%	8,1%	4,8%	5,8%	2,7%
<b>Duración Promedio</b>	30,9	34,9	18,8	15,9	20,3	23,8	20,1	17,6
<b>Duración Max</b>	189	236	182	125	159	236	182	153
<b>Futuro Lejano</b>	BCC	CMCC	CSIRO	MPI	BCC	CMCC	CSIRO	MPI
<b>Cantidad de días</b>	3759	2988	2129	2502	1352	1652	1148	1369
<b>%</b>	41,2%	32,7%	23,3%	27,4%	14,8%	18,1%	12,6%	15,0%
<b>Duración Promedio</b>	48,9	44,8	40,9	39,1	27,5	34,4	25,0	25,8
<b>Duración Max</b>	244	284	288	273	171	280	181	273

### G.3 Cuenca Volcán en Queltehues

Tabla G.3: Resultados del índice de caudales bajos para ambos escenarios.

<b>Histórico</b>	<b>Escenario Estacionario</b>				<b>Escenario No Estacionario</b>			
	BCC	CMCC	CSIRO	MPI	BCC	CMCC	CSIRO	MPI
<b>Cantidad de días</b>	502	483	1301	592	502	483	1301	592
<b>%</b>	3,8%	3,7%	10,0%	4,5%	3,85%	3,70%	9,97%	4,54%
<b>Duración Promedio</b>	7,7	8,9	11,3	8,5	7,7	8,9	11,3	8,5
<b>Duración Max</b>	42	79	135	56	42	79	135	56
<b>Futuro Cercano</b>	BCC	CMCC	CSIRO	MPI	BCC	CMCC	CSIRO	MPI
<b>Cantidad de días</b>	2924	3227	6777	1915	920	1454	1820	737
<b>%</b>	17,80%	19,65%	41,26%	11,66%	5,60%	8,85%	11,08%	4,49%
<b>Duración Promedio</b>	15,7	17,0	27,7	17,3	7,7	12,0	12,6	9,7
<b>Duración Max</b>	142	141	354	158	87	101	106	65
<b>Futuro Lejano</b>	BCC	CMCC	CSIRO	MPI	BCC	CMCC	CSIRO	MPI
<b>Cantidad de días</b>	3525	4506	4449	3855	1065	1179	1246	1556
<b>%</b>	38,6%	49,4%	48,8%	42,2%	11,67%	12,92%	13,65%	17,05%
<b>Duración Promedio</b>	38,0	43,3	62,0	41,9	10,0	12,0	22,3	17,3
<b>Duración Max</b>	225	580	1030	182	101	164	141	146

## **Anexo H. Otras Tablas**

Tabla H.1: Modelos Climáticos Globales participantes del CMIP5.

<b>Modelo</b>	<b>Resolución [Km x Km]</b>	<b>Lugar de origen</b>
<b>BCC-CSM 1.1</b>	64x128	Beijing Climate Center,
<b>BCC-CSM1.1 (m)</b>	160x320	China Meteorological Administration, China
<b>BNU-ESM</b>	64x128	Beijing Normal University, China
<b>CanESM2</b>	64x128	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis, Canada
<b>CCSM4</b>	192x288	National Center for Atmospheric Research (NCAR), USA
<b>CNRM-CM5</b>	128x256	Centre National de Recherches Meteorologiques, France
<b>CSIRO- Mk3.6.0</b>	96x192	Australian Common-wealth Scientific and Industrial Research Organisation
<b>FGOALS-g2</b>	108x128	Institute of Atmospheric Physics, Chinese; Academy of Sciences, China
<b>FIO-ESM</b>	64x128	The First Institute of Oceanography, SOA, China
<b>GFDL-CM3</b>	90x144	Geophysical Fluid
<b>GFDL-ESM2G</b>	90x144	Dynamics Laboratory
<b>GISS-E2-H</b>	90x144	Goddard Institute for Space
<b>GISS-E2-R</b>	90x144	Studies (NASA), USA
<b>HadGEM2-ES</b>	145x192	Met Office Hadley Centre, UK
<b>IPSL-CM5A- LR</b>	96x96	Institut Pierre-Simon  Laplace, France
<b>IPSL-CM5A- MR</b>	143x144	
<b>MIROC5</b>	128x256	Atmosphere and Ocean Research Institute, University of Tokyo, Japan
<b>MIROC-ESM</b>	64x128	



<b>MIROC-ESM-CHEM</b>	64x128	Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Atmosphere and Ocean Research Institute (The University of Tokyo), Japan
<b>MPI-ESM-LR</b>	96x192	Max Planck Institute for
<b>MPIR-ESM-MR</b>	96x192	Meteorology (MPI-M), Germany
<b>MRI-CGCM3</b>	160x320	Meteorological Research Institute, Japan
<b>NorESM1-M</b>	96x144	Norwegian Climate
<b>NorESM1-ME</b>	96x144	Centre, Norway