



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

**IMPACTOS DEL CAMBIO DE COBERTURA DE SUELO EN LA  
HIDROLOGÍA DE LA CUENCA DEL RÍO BÍO BÍO EN EL PERIODO  
1850-2014 MEDIANTE SIMULACIONES HIDROLÓGICAS Y  
RECONSTRUCCIÓN DENDROCRONOLÓGICA**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL

MIJAL Yael BARON ZAGAL

PROFESOR GUÍA:  
MIGUEL LAGOS ZÚÑIGA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
PABLO MENDOZA ZÚÑIGA  
ARIEL MUÑOZ NAVARRO  
CHRISTIÁN BASAEZ VILLAGRÁN

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por:  
Programa de pueblos indígenas de la Universidad de Chile

SANTIAGO DE CHILE  
2022

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR  
AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL  
POR: MIJAL YAEL BARON ZAGAL  
FECHA: 2022  
PROF. GUÍA: MIGUEL LAGOS ZÚÑIGA

## **IMPACTOS DEL CAMBIO DE COBERTURA DE SUELO EN LA HIDROLOGÍA DE LA CUENCA DEL RÍO BÍO BÍO EN EL PERIODO 1850-2014 MEDIANTE SIMULACIONES HIDROLÓGICAS Y RECONSTRUCCIÓN DENDROCRONLÓGICA**

La cuenca del Río Bío bío, ubicada en el Sur de Chile ( $36^{\circ}\text{S}$ - $39^{\circ}\text{S}$ ), es una de las más importantes a nivel histórico-geográfico, indígena y forestal, siendo además frontera natural entre el pueblo mapuche y el ejercito de conquista española. Existen registros pluviométricos desde 1876 que indican una disminución de precipitaciones de -2.6 milímetros por año entre 1876 y 2014, y un acrecentamiento de -8.2 milímetros entre 1980 y 2014, la que, en conjunto con los incrementos de temperatura de  $0.001^{\circ}\text{C}$  anual se ha traducido en cambios de la escorrentía, impactando directamente a su disponibilidad para usos domésticos y productivos, afectando además el pilar fundamental de la cosmovisión mapuche: el medio ambiente.

Esta cuenca alberga la mayor diversidad de árboles de clima templado en Sudamérica, lo cual motiva el estudio de las coberturas vegetales y su rol en la hidrología de la cuenca. Para ayudar a comprender el impacto del avance progresivo de la industria forestal en la región, se realizan simulaciones hidrológicas basadas en los resultados obtenidos en el Balance Hídrico Nacional (BHN) para el escenario de cobertura actual y escenarios de aumento de cobertura de bosque nativo (BN) o plantaciones forestales (PF), utilizando tres Modelos de Circulación General (MCG), los cuales alimentan el modelo hidrológico VIC previamente construido en la cuenca, con el fin de evaluar los efectos del clima pasado en la generación de escorrentía. Además se analizaron mediante *Change Point Anlysis* la serie dendrocronológica, las observaciones en una subcuenca en régimen natural y las precipitaciones de los MCG, y se desarrolló un modelo de regresión lineal múltiple (MRLM), con el fin de hacer un análisis de cambios de tendencia y cuantificación de cambios en la varianza del caudal medio anual por la precipitación y la temperatura.

Se identificó que el aumento de PF para una cobertura del 87% de la cuenca genera una disminución del caudal medio anual de 18,5 mm/año, junto con cambios en el régimen hidrológico ante una mayor incorporación de especies nativas de hoja caduca y un adelanto del centroide del hidrograma de casi tres semanas. Además, se determinó que un 42% de los cambios en la varianza del caudal medio anual no se explican por variaciones de precipitación o temperatura, y que han existido quiebres de tendencia tanto en los caudales medios anuales observados como en la reconstrucción dendrocronológica de Muñoz *et al.*, (2016) después de 1990.

*El espíritu del agua moviéndose sobre el lecho pedregoso,  
el agua emergiendo desde los ojos de la tierra.  
Cada año corría yo a la montaña para asistir a la maravillosa  
ceremonia de la Naturaleza.  
Luego llegaba el invierno a purificar la tierra  
para el inicio de los nuevos Sueños y sembrados.*

***Elicura Chihuailaf.***

# Agradecimientos

En primer lugar, quisiera agradecerle a mi profesor guía Miguel Lagos Zúñiga por su apoyo con la temática, su incondicionalidad y apoyo ante todas las adversidades presentadas en el desarrollo de la memoria. También al profesor Ariel Muñoz por instruirme en la dendrocronología y la creación de ciencias exactas desde la naturaleza. Y en último, pero no menos importante, al profesor Pablo Mendoza por guiarme con respecto a la hidrología desde el tercer año de la universidad y potenciando el interés en esta hermosa ciencia.

Luego, quisiera agradecer a mis ma-padres Paula y Gabriel, por inculcarme desde pequeña la metodología, el cuestionamiento y la creatividad, permitiéndome verlas como un conjunto y no como limitantes entre ellas.

También debo agradecer a mis hermanos Maxi y Nico, dado que ellos me empujan en la creación y ejercicio de todas los proyectos que me he propuesto. Junto con Francisca y Franco, que me han permitido desarrollarme para ser quien soy hoy.

En torno a la familia, quisiera agradecer a las matriarcas de la familia Oma Susy, Oma María Inés y Kelly, por mostrarme que las mujeres generamos cambios en la sociedad y somos indispensables para generar un mundo mejor.

No puede faltar un espacio de agradecimiento al infinito conocimiento que me otorgaron las comunidades mapuches de Alto Bío bío, las cuales me acogieron y enseñaron sobre su cultura y forma de vivir, permitiéndome resignificar la simpleza y la espiritualidad con el medio ambiente.

En este marco, agradezco el apoyo y financiamiento del Programa de Pueblos Indígenas, Dirección de Diversidad y Género, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile. En especial, por los talleres que realizaron para reducir las barreras a la hora de comunicarnos con gente de culturas distintas a la propia.

Demás esta decir que debo agradecer enormemente a los amigos y compañeros que me aconsejaron y enseñaron en la universidad: a Cote, Javi, Ale, Mila, Barbi, Caro, Chio, Gigi, Fani, Guille, José, Maxi.P, Felipe, María, Diego, Jero, Maxi.H, entre muchos otros. En especial a Felipe y Álvaro, que me acompañaron con dedicación durante el desarrollo de la memoria. Y al final, un agradecimiento a Eduardo, por su enorme voluntad y por ser un

profesor co-guía en este estudio y en los ramos cursados que permitieron el desarrollo de este informe.

Finalmente, debo agradecer a todas aquellas personas que se han formado en mi familia no convencional: Yuyu, Ilan, Cata, Cani, Palo y Akira. Por entregarle alegría, amor y amistad en todo momento.

# Tabla de Contenido

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Motivación . . . . .	1
1.2. Objetivos . . . . .	2
1.3. Estructura del informe . . . . .	3
<b>2. Marco Teórico</b>	<b>4</b>
2.1. Historia de la zona . . . . .	4
2.2. Breve introducción a la cosmovisión mapuche . . . . .	9
2.3. Reconstrucción de caudales utilizando anillos de árboles . . . . .	11
2.4. Modelos de Circulación General . . . . .	13
2.5. Escalamiento estadístico . . . . .	14
2.6. Modelación Hidrológica . . . . .	15
2.6.1. Modelo Variable Infiltration Capacity (VIC) . . . . .	16
2.6.2. Balance Hídrico Nacional 2018 . . . . .	21
2.7. Sobre la Industria Forestal y el Bosque Nativo . . . . .	22
2.8. Sociohidrología . . . . .	23
<b>3. Dominio de Estudio</b>	<b>25</b>
3.1. Características de la cuenca . . . . .	27
3.1.1. Información climática. . . . .	27
3.1.2. Información hidrológica . . . . .	28
<b>4. Datos y Métodos</b>	<b>32</b>
4.1. Datos . . . . .	32
4.2. Metodología . . . . .	40
4.2.1. Generación de forzantes meteorológicas para el modelo VIC . . . . .	40
4.2.1.1. Escalamiento espacial de precipitación y temperatura . . . . .	40
4.2.2. Desagregación temporal . . . . .	41
4.2.2.1. Estimación de precipitación . . . . .	41
4.2.2.2. Estimación de temperatura . . . . .	42
4.2.2.3. Estimación de humedad relativa y velocidad del viento . . . . .	43
4.2.3. Generación de Simulaciones . . . . .	44
4.2.3.1. Definición de escenarios . . . . .	44
4.2.3.2. Determinación de parámetros vegetacionales . . . . .	46

4.2.4.	Comparación con series Dendrocronológicas . . . . .	48
4.2.5.	Análisis de Estacionalidad . . . . .	49
4.2.5.1.	Change Point Analysis . . . . .	50
4.2.6.	Regresión Lineal Múltiple . . . . .	50
4.2.7.	Análisis socio-hidrológico . . . . .	52
<b>5.</b>	<b>Resultados</b>	<b>53</b>
5.1.	Comparación de Caso 0 con reconstrucción de anomalías . . . . .	53
5.2.	Análisis de casos 0, 1, 2.a y 2.b. . . . .	57
5.2.1.	Análisis de caudales extremos . . . . .	62
5.2.2.	Ciclo de Caudales Anuales y Curva de Variación Estacional . . . . .	67
5.2.3.	Análisis de Evapotranspiración . . . . .	70
5.3.	Análisis de Tendencias y MRLM . . . . .	73
5.4.	Entrevistas . . . . .	78
<b>6.</b>	<b>Discusión y Conclusiones</b>	<b>81</b>
	<b>Bibliografía</b>	<b>85</b>
	<b>ANEXOS</b>	<b>92</b>
	<b>Anexo A. Análisis de Simulaciones.</b>	<b>92</b>
A.1.	Curvas de Variación Estacional . . . . .	93
A.2.	Ciclo de Caudales Anuales . . . . .	110
A.3.	Curvas de duración de caudales medios diarios . . . . .	112
	<b>Anexo B. Análisis del predictando</b>	<b>119</b>
B.1.	Modelo de regresión lineal múltiple . . . . .	119
	<b>Anexo C. Transcripción de Entrevistas</b>	<b>123</b>
C.1.	Entrevista 1 . . . . .	123
C.2.	Entrevista 2 . . . . .	127
C.3.	Entrevista 3 . . . . .	129

# Índice de Tablas

2.1.	NSE y KGE para subcuencas calibradas en la cuenca del Río Bío bío en la Actualización del Balance Hídrico Nacional en las cuencas de la macrozona sur y parte norte de la zona austral (DGA,2019. . . . .	22
3.1.	Información Geográfica de la Cuenca del Río Bío bío. . . . .	27
4.1.	Características de los Modelos de Circulación General MPI, Nor y Can. . . . .	35
4.2.	Valores de LAI mensuales . . . . .	47
4.3.	Parámetros vegetacionales para BN y PF . . . . .	48
B.1.	Test de Kolmogorov-Smirnov(KS) y Anderson Darling (AD). . . . .	119
B.2.	Métricas de desempeño de los modelos de regresión líneal múltiple. . . . .	120
B.3.	Test de ANOVA . . . . .	121

# Índice de Figuras

2.1.	Línea de tiempo. . . . .	8
2.2.	Sitios de significación cultural comunidad Kilape Lopez. . . . .	10
2.3.	Esquema de crecimiento del tronco del pino según nacimiento, incendios, años húmedos y secos. Fuente: Casado, 2019. . . . .	11
2.4.	Grilla de ejemplo para un Modelo de Circulación Global. . . . .	14
2.5.	Componentes de un modelo hidrológico según Liu <i>et al.</i> ,2007. . . . .	15
2.6.	Respresentación de los principales procesos físicos representados por VIC. Modificado por Liang <i>et al.</i> (1994). Fuente: DGA,2019. . . . .	18
2.7.	Extensión forestal en base a datos del CENSO de 2007 (INE), y la localización de los títulos de merced en tierra mapuche catastrados por Corporación Nacional de Desarrollo Indígena (CONADI). Fuente: Mansilla, 2020. . . . .	24
3.1.	Cauces principales de la cuenca del Río Bío bío. . . . .	26
3.2.	Climograma de precipitación y temperatura media mensual entre 1979 y 2014 para la Río Bío bío En Desembocadura. Fuente: Datos CR2MET adquiridos desde CAMELS-CL (Alvarez Garreton et al., 2018) . . . . .	28
3.3.	Curva de variación estacional entre 1982 y 2014 para la Río Bío bío En Desembocadura. Fuente: DGA. . . . .	29
3.4.	Curva de duración de caudales diarios entre 1983 y 2014 para la Río Bío bío En Desembocadura. Fuente: DGA. . . . .	30
3.5.	Cuenca del Río Bío bío, estaciones meteorológicas y fluviométricas. . . . .	31
4.1.	Subcuencas del Río Bío bío utilizadas en Muñoz <i>et al.</i> 2016. Fuente: Shapefiles adquiridos desde CAMELS-CL (Alvarez Garreton et al., 2018) . . . . .	33
4.2.	Serie de anomalía de caudal entre 1850 y 2003. Fuente: Muñoz <i>et al.</i> , 2016. . . . .	34
4.3.	temperaturas medias anuales, regresión lineal y pendiente de los modelos de circulación general MPI, Nor y Can entre 1850 y 2014 para la cuenca río Bío bío en desembocadura.) . . . . .	36
4.4.	Precipitaciones medias anuales, regresión lineal y pendiente de los modelos de circulación general MPI, Nor y Can entre 1850 y 2014 para la cuenca río Bío bío en desembocadura.) . . . . .	37
4.5.	Cobertura de suelo de bosque nivel 2 según la cobertura de Zhao et al. (2016), en Cuenca del río Bío bío, con acercamientos a cuencas utilizadas en la reconstrucción de caudales. . . . .	39
4.6.	Metodología de elaboración de series sintéticas de humedad relativa (HR) y velocidad del viento (VV) para el modelo hidrológico VIC. . . . .	43

4.7.	Esquema de simulaciones realizadas para la cuenca del río Bío bío entre 1850 y 2014 para MPI, Nor y Can. . . . .	45
5.1.	Gráfico de cajas de anomalías de caudal para serie dendrocronológica y simulaciones de casos 0, 1, 2.a y 2.b, utilizado MCG MPI entre 1850 y 2014 para cuencas en régimen natural utilizadas en Muñoz <i>et al.</i> ,2016. . . . .	53
5.2.	Gráfico de cajas de anomalías de caudal medio anual para serie dendrocronológica y simulaciones de casos 0, 1, 2.a y 2.b, utilizado MCG Nor entre 1850 y 2014 para cuencas en régimen natural utilizadas en Muñoz <i>et al.</i> ,2016. . . . .	54
5.3.	Gráfico de cajas de anomalías de caudal para serie dendrocronológica y simulaciones de casos 0, 1, 2.a y 2.b, utilizado MCG Can entre 1850 y 2014 para cuencas en régimen natural utilizadas en Muñoz <i>et al.</i> ,2016. . . . .	55
5.4.	Gráfico de cajas de anomalías de caudal para serie dendrocronológica y simulaciones de casos 0 y 1 entre 1979 y 2014 para cuencas en régimen natural utilizadas en Muñoz <i>et al.</i> ,2016. . . . .	55
5.5.	Gráfico de cajas de anomalías de caudal para serie dendrocronológica y simulaciones de casos 2.a y 2.b entre 1979 y 2014 para cuencas en régimen natural utilizadas en Muñoz <i>et al.</i> ,2016. . . . .	56
5.6.	Gráfico de cajas de caudales anuales para simulaciones de casos 0, 1, 2.a y 2.b, utilizado MPI, Nor y Can entre 1850 y 2014. . . . .	58
5.7.	Gráfico de cajas de caudales mensuales para simulaciones de casos 0, 1, 2.a y 2.b, utilizado MPI, Nor y Can entre 1850 y 2014. . . . .	59
5.8.	Gráfico de cajas de centro del hidrograma en simulaciones de casos 0, 1, 2.a y 2.b, para los MCG MPI, Nor y Can, entre 1979 y 2014 para cuenca del Río Bío bío. . . . .	60
5.9.	Gráfico de cajas de índice de estacionalidad invierno-año en simulaciones de casos 0, 1, 2.a y 2.b, para los MCG MPI, Nor y Can, entre 1979 y 2014 para cuenca del Río Bío bío. . . . .	61
5.10.	Gráfico de cajas de índice de estacionalidad invierno-verano en simulaciones de casos 0, 1, 2.a y 2.b, para los MCG MPI, Nor y Can, entre 1979 y 2014 para cuenca del Río Bío bío. . . . .	62
5.11.	Curva de duración para casos 2.a y 2.b, utilizado MPI, Nor y Can entre 1850 y 1900. . . . .	63
5.12.	Curva de duración para casos 2.a y 2.b, utilizado MPI, Nor y Can entre 1901 y 1950. . . . .	63
5.13.	Curva de duración para casos 2.a y 2.b, utilizado MPI, Nor y Can entre 1951 y 2000. . . . .	64
5.14.	Curva de duración para casos 2.a y 2.b, utilizado MPI, Nor y Can entre 2001 y 2013. . . . .	64
5.15.	Curva de duración para casos 0 y 1, utilizado MPI, Nor y Can entre 1850 y 1900. . . . .	65
5.16.	Curva de duración para casos 0 y 1, utilizado MPI, Nor y Can entre 1901 y 1950. . . . .	66
5.17.	Curva de duración para casos 0 y 1, utilizado MPI, Nor y Can entre 1951 y 2000. . . . .	66
5.18.	Curva de duración para casos 0 y 1, utilizado MPI, Nor y Can entre 2001 y 2013. . . . .	67
5.19.	Ciclo anual de caudales para caso 0 utilizado MPI, Nor y Can entre 2001 y 2014. . . . .	68

5.20.	Curva de variación estacional caso 0 para modelos MPI, Nor y Can entre 2001 y 2013. . . . .	69
5.21.	Gráfico de cajas de evapotranspiración anual obtenida en simulaciones de casos 0, 1, 2.a y 2.b, para los MCG MPI, Nor y Can, entre 1979 y 2014 para cuenca del Río Bío bío. . . . .	71
5.22.	Gráfico de cajas de evapotranspiración anual obtenida en simulaciones de casos 2.a y 2.b, para los MCG MPI, Nor y Can, entre 1979 y 2014 para cuenca del Río Bío bío. . . . .	72
5.23.	Gráfico de cajas de evapotranspiración mensual obtenida en simulaciones de casos 2.a y 2.b, para los MCG MPI, Nor y Can, entre 1979 y 2014 para cuenca del Río Bío bío. . . . .	73
5.24.	Change Point Analysis para serie dendrocronológica de Muñoz et al., 2016. . .	74
5.25.	Change Point Analysis para observaciones en estación río Lirquén en cerro El Padre entre 1979 y 2014. . . . .	75
5.26.	Change Point Analysis para precipitaciones de modelos de circulación general MPI, Nor y Can entre 1850 y 2014. . . . .	76
5.27.	Regresión lineal simple entre anomalías de caudal observado y precipitación de CR2MET (a) y entre caudal observado y temperatura de CR2MET (b) entre 1979 y 2014 para estación río Lirquén en Cerro el padre (BNA 8317002). . . .	77
5.28.	Modelo de regresión lineal múltiple para el la anomalía de caudal observado en la estación Rio Lirquen En Cerro El Padre (BNA 8317002) entre 1979 y 2014. . . .	78
5.29.	Entrevistas a personas mapuche de la cuenca del río Bío bío. . . . .	79
A.1.	Curva de variación estacional observaciones y BHN entre 1979 y 2014. . . . .	93
A.2.	Curva de variación estacional caso 0 para modelos MPI, Nor y Can entre 1850 y 1900. . . . .	94
A.3.	Curva de variación estacional caso 0 para modelos MPI, Nor y Can entre 1901 y 1950. . . . .	95
A.4.	Curva de variación estacional caso 0 para modelos MPI, Nor y Can entre 1951 y 2000. . . . .	96
A.5.	Curva de variación estacional caso 0 para modelos MPI, Nor y Can entre 2001 y 2013. . . . .	97
A.6.	Curva de variación estacional caso 1 para modelos MPI, Nor y Can entre 1850 y 1900. . . . .	98
A.7.	Curva de variación estacional caso 1 para modelos MPI, Nor y Can entre 1901 y 1950. . . . .	99
A.8.	Curva de variación estacional caso 1 para modelos MPI, Nor y Can entre 1951 y 2000. . . . .	100
A.9.	Curva de variación estacional caso 1 para modelos MPI, Nor y Can entre 2001 y 2013. . . . .	101
A.10.	Curva de variación estacional caso 2.a para modelos MPI, Nor y Can entre 1850 y 1900. . . . .	102
A.11.	Curva de variación estacional caso 2.a para modelos MPI, Nor y Can entre 1901 y 1950. . . . .	103

A.12.	Curva de variación estacional caso 2.a para modelos MPI, Nor y Can entre 1951 y 2000. . . . .	104
A.13.	Curva de variación estacional caso 2.a para modelos MPI, Nor y Can entre 2001 y 2013. . . . .	105
A.14.	Curva de variación estacional caso 2.b para modelos MPI, Nor y Can entre 1850 y 1900. . . . .	106
A.15.	Curva de variación estacional caso 2.b para modelos MPI, Nor y Can entre 1901 y 1950. . . . .	107
A.16.	Curva de variación estacional caso 2.b para modelos MPI, Nor y Can entre 1951 y 2000. . . . .	108
A.17.	Curva de variación estacional caso 2.b para modelos MPI, Nor y Can entre 2001 y 2013. . . . .	109
A.18.	Ciclo de caudales anuales para MPI, Nor y Can, VIC con entradas de BHN y Observaciones entre 1850 y 1900 para la cuenca del río Bío bío. . . . .	110
A.19.	Ciclo de caudales anuales para MPI, Nor y Can, VIC con entradas de BHN y Observaciones entre 1901 y 1950 para la cuenca del río Bío bío. . . . .	110
A.20.	Ciclo de caudales anuales para MPI, Nor y Can, VIC con entradas de BHN y Observaciones entre 1951 y 2000 para la cuenca del río Bío bío. . . . .	111
A.21.	Ciclo de caudales anuales para MPI, Nor y Can, VIC con entradas de BHN y Observaciones entre 2001 y 2014 para la cuenca del río Bío bío. . . . .	111
A.22.	Curva de duración para casos 0, 1, 2.a y 2.b entre 1850 y 1900 modelo MPI. .	112
A.23.	Curva de duración para casos 0, 1, 2.a y 2.b entre 1901 y 1950 modelo MPI. .	113
A.24.	Curva de duración para casos 0, 1, 2.a y 2.b entre 1951 y 2000 modelo MPI. .	113
A.25.	Curva de duración para casos 0, 1, 2.a y 2.b entre 2001 y 2013 modelo MPI. .	114
A.26.	Curva de duración para casos 0, 1, 2.a y 2.b entre 1850 y 1900 modelo Nor. .	114
A.27.	Curva de duración para casos 0, 1, 2.a y 2.b entre 1901 y 1950 modelo Nor. .	115
A.28.	Curva de duración para casos 0, 1, 2.a y 2.b entre 1951 y 2000 modelo Nor. .	115
A.29.	Curva de duración para casos 0, 1, 2.a y 2.b entre 2001 y 2013 modelo Nor. .	116
A.30.	Curva de duración para casos 0, 1, 2.a y 2.b entre 1850 y 1900 modelo Can. .	116
A.31.	Curva de duración para casos 0, 1, 2.a y 2.b entre 1901 y 1950 modelo MPI. .	117
A.32.	Curva de duración para casos 0, 1, 2.a y 2.b entre 1951 y 2000 modelo Can. .	117
A.33.	Curva de duración para casos 0, 1, 2.a y 2.b entre 2001 y 2013 modelo Can. .	118
B.1.	Histograma, gráfico cuantil-cuantil y gráfico de caja de anomalías de caudal estacional río Lirquén en Cerro El Padre (BNA 8317002) entre 1979 y 2014, para distribuciones normal y log-normal. . . . .	120
B.2.	Distancia de Cook para el modelo de regresión lineal múltiple de anomalías de caudal entre 1997 y 2014. . . . .	121
B.3.	Análisis de normalidad de residuos. . . . .	122

# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1. Motivación

La cuenca del río Bío Bío ha sido históricamente la frontera natural entre el pueblo mapuche y el ejército de conquista español, y posteriormente, el Estado chileno. Hoy alberga a centenares de comunidades mapuche, las cuales han visto con preocupación el desarrollo forestal en la zona (Cayuqueo, P. 2017). La superficie acumulada de bosque nativo es de 14.737.486 hectáreas (Ha), mientras que la superficie acumulada de plantaciones forestales en 2020 alcanza las 2.321.357 Ha (INFOR). En cuanto al aporte económico, la región del Bío bío representa el 60 % del PIB forestal, seguida por la Región de La Araucanía con 10,5 % y las regiones del Maule y de Los Ríos con 10,1 % cada una (Biblioteca del Congreso Nacional de Chile, 2021). Además, este sector industrial ha proporcionado empleo a 10.269 personas en la industria primaria, y fomentado el desarrollo tanto local como nacional.

Existe evidencia científica respaldando que distintos tipos de vegetación presentan diferentes consumos hídricos, y en gran escala pueden generar cambios en la escorrentía (Álvarez-Garretón *et al.*, 2019). Además, existen efectos negativos asociados a la plantación de especies exóticas en ecosistemas autóctonos, lo cual ha incentivado la reforestación de especies nativas en lugares que antiguamente fueron perturbados, detectándose modificaciones en la escorrentía similares a las condiciones originales (Lara *et al.*, 2019).

Por otro lado, la concepción moderna del agua no puede abstraer su estudio de las componentes sociales, culturales, religiosas, históricas y políticas (Anderson *et al.*, 2019). Es por que esto que se desarrolló una ciencia que integra el estudio de comunidades, en conjunto con los recursos hídricos, bajo la base de una perspectiva de la gestión hídrica. Esta ciencia se llama Sociohidrología (Sivapalan *et al.*, 2012), y tiene como objetivo observar, entender y predecir trayectorias futuras de co-evolución de el sistema acoplado humano-agua.

*Aquellas y aquellos que estudian las ciencias naturales, por mucho tiempo han ignorado el factor humano, y los hidrólogos, lo son una excepción en esto.* (Sivapalan *et al.*, 2012). Es por esto que tanto la historia, la sociología y la ciencia son relevantes a la hora de efectuar estudios hidrológicos con atribuciones en los cambios de cobertura de suelo, en zonas con conflictos sociales.

En cuanto a los estudios de atribución, la variabilidad climática y la perturbación del bosque son comúnmente reconocidas como las dos causas principales que generan cambios de caudal en cuencas de gran escala con alta presencia de forestación. Con todo, suele ser un desafío separar el efecto en el caudal asociado a la variabilidad climática de los cambios en la cobertura vegetal (Wei *et al.*, 2010). Sin embargo, existen estudios que han comprobado la contribución antropogénica y climática a cambios de precipitación y caudal, como el decaimiento de precipitaciones por la mega sequía en Chile Central (Boisier *et al.*, 2016) y la contribución de las perturbaciones en bosques y variabilidad climática en la cuenca del río Willow, Canada (Wei *et al.*, 2010).

Según Lara *et al.*, 2021, en la zona centro-sur de Chile la reforestación en zonas que presentaban plantaciones forestales con especies de bosque nativo, ha derivado en un aumento de un 40% en la esorrentía anual. Analizando bosques *Nothofagus* secundario y esclerófilos, en la región del Bío bío y Maule, se atribuyen impactos negativos a la expansión de plantaciones forestales de *Pinus Radiata* y *Eucalyptus*, como la desforestación y la pérdida de biodiversidad, potenciando dichos efectos cuando las plantaciones son sobre bosque nativo (Nahuelhual *et al.*, 2011). Por otro lado, se evidenció un decaimiento de la esorrentía anual ante el incremento de plantaciones forestales (Álvarez-Garretón *et al.*, 2019).

Aunque existe evidencia del impacto negativo en la esorrentía al aumentar las plantaciones de pino y eucalipto, hasta la fecha no se ha desarrollado un estudio que permita dilucidar el efecto que se tiene hoy en día producto de los cambios en la cobertura de suelo desde la hidrología, en conjunto con las ciencias sociales. De este modo, se utilizan herramientas hidrológicas y sociológicas, para poder identificar consecuencias del incremento de las plantaciones forestales en cuenca del río Bío bío con una mirada integral hacia el sistema conformado por los seres humanos y el ciclo hidrológico.

## 1.2. Objetivos

El objetivo principal de esta memoria corresponde al análisis de los cambios hidrológicos en el río Bío bío desde 1850, utilizando distintas herramientas que permitan representar las condiciones de clima pasadas y los potenciales cambios en la hidrología de la cuenca como respuesta a los cambios de cobertura entre bosque nativo y plantación forestal.

Los objetivos específicos son:

- Atribuir cambios en la esorrentía, expresada como caudal medio anual del río Bío bío

a variaciones en el clima.

- Analizar cambios en los caudales medios anuales por cambios en la cobertura de suelo en la cuenca del Bío bío, realizando simulaciones con el modelo hidrológico VIC con entradas de series climáticas históricas (1850-2014), y contrastando escenarios de régimen natural con la cobertura actual mediante el estudio de los puntos de cambio de las series dendrocronológicas e impactos asociados a la cobertura de suelo.
- Evaluar respuestas de los procesos hidrológicos frente a escenarios de aumento de cobertura de plantación forestal y bosque nativo para las subcuencas en régimen natural utilizadas en el estudio dendrocronológico aplicado de Muñoz *et al.*, (2016).

### 1.3. Estructura del informe

En el Capítulo 2, se presentan los antecedentes bibliográficos, incluyéndose la historia de la zona de estudio, la cosmovisión mapuche, la reconstrucción de caudales utilizando anillos de árboles (dendrocronología), los modelos de circulación general, y el posterior escalamiento espacial y desagregación temporal de las variables precipitación y temperatura. Luego, se describe el modelo hidrológico VIC y cómo este permite realizar simulaciones de caudal con cambios en el uso de suelo y el Balance Hídrico Nacional. Después, se exponen los principios básicos detrás de la sociohidrología. Finalmente, se contextualizará respecto a la industria forestal y el bosque nativo.

En el Capítulo 3, se muestran las principales características geográficas, climáticas e hidrológicas de la zona de estudio. En el Capítulo 4, se detalla la metodología empleada el proceso de escalamiento espacial y desagregación temporal. Posteriormente, se detallan los escenarios de los experimentos sintéticos, la determinación de parámetros vegetacionales y la generación de entradas para el modelo hidrológico VIC. Finalmente, se detalla el procedimiento de análisis de tendencias y quiebres en las mismas, junto con la elaboración de un modelo de regresión lineal múltiple.

En el Capítulo 5, se muestran los resultados obtenidos para las simulaciones generadas con VIC, el análisis de evapotranspiración, la comparación con los datos dendrocronológicos, *Change Point Analysis* con énfasis en hitos históricos relevantes en la historia de las plantaciones forestales y el modelo de regresión lineal múltiple. En el Capítulo 6, se presentan las conclusiones, discusiones y comentarios finales.

# Capítulo 2

## Marco Teórico

Antes de detallar los antecedentes del estudio, es relevante distinguir entre cobertura de suelo y uso de suelo. Según la FAO (*Food and Agriculture Organization* de la Organización de las Naciones Unidas), la cobertura de suelo hace referencia a las coberturas biológicas o físicas presentes en la superficie de la tierra (FAO,2000), como lo son la vegetación de matorrales, bosque o herbácea (tipo biológica) y el pavimento de las calles (tipo física). Cuando la sociedad utiliza un sector para obtener un beneficio, generar un cambio o mantener su condición, se habla de uso de suelo. Algunos ejemplos del último son los terrenos comerciales, residenciales, industriales, agrícolas y de conservación de la naturaleza. Un uso de suelo no implica una determinada cobertura de suelo, y viceversa.

A continuación, se comenta la historia de la zona en torno a hitos relevantes en el estudio (Sección 2.1), se introduce a la cosmovisión mapuche dada las numerosas comunidades presentes en la cuenca del río Bío bío (Sección 2.2), se informa respecto a herramientas utilizadas para el desarrollo como la dendrocronología (Sección 2.3), los modelos de circulación general (MCG) (Sección 2.4), el escalamiento estadístico (Sección 2.5), la modelación hidrológica (Sección 2.6) y el modelo hidrológico utilizado (Sección 2.6.1), junto con la contextualización del Balance Hídrico Nacional (Sección 2.6.2) y su implicancia para el desarrollo de la memoria. También, se comenta respecto a la importancia de la industria forestal en la economía nacional, junto con las clasificaciones de bosque nativo(Sección 2.7) y se define la sociohidrología y los métodos que utiliza esta disciplina (Sección 2.8).

### 2.1. Historia de la zona

El río Bío bío es uno de los ríos con mayor relevancia en el territorio nacional. En la Figura 2.1 se presentan los principales acontecimientos o periodos históricos, forestales, sociales y energéticos con incidencia a la zona de estudio.

Uno de los primeros grandes hitos que suceden en este río es el tratado de Tapihue, acontecido el 7 de Enero de 1825. En este, se incorpora Arauco al territorio chileno fijando el río Bío bío como la frontera entre ambos pueblos. Además, por primera única vez se reconoce

la autonomía del pueblo mapuche al sur del Bío bío. El artículo contemplaba auxilio mutuo en caso de guerra externa, extradición de fugitivos, devolución de familias cautivas y libre tránsito de viajeros y comerciantes, entre otros (Cayuqueo, 2017). Lo suscribió el Capitán Pedro Barrenechea, en representación del Congreso de la República y del presidente Ramón Freire. Por parte del pueblo mapuche firmaron las principales autoridades de las confederaciones guerreras o Butalmapus (Téllez, 2011).

Los primeros años de la Independencia presentaron serios problemas de inseguridad en la zona sur provenientes de grupos de bandoleros que asolaban haciendas y fundos, así como la sublevación de las autoridades de Concepción hacia el gobierno central apoyando las revoluciones de 1851 y 1859. Este período también vio florecer grupos mapuches que otorgaron su apoyo a ideas colonialistas causando preocupación en el gobierno. El auge de la producción de cereal, fomentada por el descubrimiento de oro en California desde 1848, favoreció la adquisición y compra de tierras mapuches, existiendo numerosos conflictos por las estafas realizadas a los antiguos propietarios (Pinto, 2020). El gobierno central ordenó una campaña al mando de Cornelio Saavedra con el fin de ocupar, incorporar y favorecer el asentamiento en la región de la Araucanía, entendiendo que para lograr dicho objetivo se requería el sometimiento de las tribus mapuches. Dichas campañas se iniciaron en 1862 logrando acuerdos transitorios y permaneciendo grupos beligerantes en la zona. Una segunda campaña más brutal ocurrió entre 1867 a 1869 consolidando la frontera en el río Malleco en 1870.

Posteriormente, la Guerra del Pacífico (1879 - 1884) obligó a trasladar tropas al extremo norte, situación que aprovecharon grupos de guerreros mapuches para reocupar poblados perdidos en las primeras campañas. Esto rompió la tregua pactada y entre 1881 a 1883 se vieron combates que finalizaron la ocupación y reconstrucción de Villarrica.

La creciente necesidad de recursos madereros debido al proceso de industrialización favoreció la incorporación de especies no autóctonas como el *Pinus radiata* en 1886. Al no existir regulación para su uso, se fueron ocupando zonas previamente cubiertas de Bosque Nativo produciendo graves efectos ambientales.

Después de la ocupación militar de la Araucanía, el Estado chileno procedió a la expansión y otorgamiento de tierras a colonos y extranjeros que redujo el espacio habitado por el pueblo Mapuche. El remate, la venta y la toma ilegítima de tierras, condujeron a la división de las comunidades indígenas, lo que provocó la degradación y pérdida de la calidad y productividad de dichas tierras (Memoria Chilena, 2021). La tierra ocupada por el Estado chileno fue rematada para su aprovechamiento productivo, y muchas fueron usurpadas, y luego, legalizadas bajo procedimientos fraudulentos en el Conservador de Bienes Raíces (Pinto, 2020). Posteriormente, se crea la Ley Indígena (1927) produciendo la división de las comunidades mapuches al designar la tierra como propiedad particular.

La crisis de la actividad agrícola originada en Chile por el desinterés de los grandes latifundistas en utilizar en forma eficiente sus tierras proporcionó las bases para la creación de

una Reforma Agraria. Ésto implicó que decenas de organizaciones mapuches estimaran que no existía un marco jurídico para solucionar el conflicto por vías legales o pacíficas llevando a tomas de terrenos como vía para encontrar una solución a la recuperación de tierras (Memoria Chilena, 2021).

La ley N° 15.020 (promulgada en 1962) no logró en su comienzo el efecto deseado sino hasta julio de 1967, año en que Eduardo Frei Montalva promulgó la ley de Reforma Agraria N° 16.640 y la Ley de sindicalización campesina N° 16.625, buscando la incorporación del campesinado a la propiedad de las tierras que trabajaban, la vida social, cultural y política y al mejoramiento de la productividad agrícola, a la reforma del sistema de manejo y aprovechamiento del agua y la consiguiente reestructuración de las organizaciones gubernamentales relacionadas a la agricultura. Hasta el año 1970 se expropiaron cerca de 1.300 predios con más de 3 millones de hectáreas durante el período de preparación de entre 3 a 5 años (BCN, 2017).

El fin del gobierno de Salvador Allende y la ascensión del gobierno dictatorial de la Junta de Gobierno al mando del General Augusto Pinochet Ugarte da inicio al proceso conocido como Contrarreforma Agraria. Este periodo es conocido por la devolución de aquellas tierras que fueron expropiadas previamente con a fin de modernizar la producción. Un cuarto de las tierras expropiadas se devolvieron a sus antiguos dueños, un 41,1% fueron entregadas o asignadas en parcelas, predios forestales, reservas comunitarias, casas-sitios, transacciones judiciales y ventas directas a campesinos, un 16,2% se subastaron en remates públicos, un 9% se transfirió a instituciones públicas (siendo beneficiadas principalmente las Fuerzas Armadas, CONAF, CORFO y el Ministerio de Bienes raíces), y el resto fueron restituidas y entregadas como ampliación de reservas a sus antiguos propietarios (Fuentes, 2017). Junto con ello, en 1974 se promulga el decreto de ley D.L. 701, el cual fija el régimen legal para los terrenos forestales y las normas sobre la materia (BNC,2010).

Con la llegada de la democracia en 1989, la industrialización y creciente necesidad de generación energética inició el proceso de creación de centrales hidroeléctricas, siendo el proyecto de generación de energía hidroeléctrica de Pangué el primero en desarrollarse, el cual tuvo la tenaz resistencia de grupos ambientalistas y de la población mapuche, llegando a la Corte Suprema, donde se dictaminó a favor de Pangué S.A, procediendo a su construcción. Este fue el primer proyecto aprobado por CONAMA (Comisión Nacional del Medio Ambiente) y se determinó que en base a la recientemente promulgada "Ley Indígena", la relocalización de la población sólo se llevaría a efecto con el consentimiento de los afectados, De esta forma, ocurre la permutación de terrenos bajo la autorización de CONADI (Corporación Nacional de Desarrollo Indígena), institución creada en 1993 en el marco de la promulgación de la Ley Indígena (Memoria Chilena, 2021). Pese a los esfuerzos de las directivas de dichos proyectos hidroeléctricos, cuatro familias se negaron a dejar sus tierras, entre ellas la de Nicolasa Quintreman (una de las hermanas Quintreman), activista mapuche que finalmente apareció muerta por supuesto ahogamiento en 2013 (El Desconcierto, 2013).

Ante el impacto que tuvo el fomento a la industria forestal, se promulga la ley N° 20.283 sobre la Recuperación del Bosque Nativo y Fomento Forestal. Es una de las leyes que más ha tardado en tramitarse , iniciando su proceso en 1992 y siendo promulgada el 11 de julio de 2008 bajo el mandato de Michelle Bachelet. Contiene artículos que regulan el plan de manejo forestal, normas de protección ambiental, crea el fondo de conservación, recuperación y manejo sustentable del bosque nativo. Además, fija recursos para investigación y, a su vez, establece el marco regulatorio jurídico y las sanciones a dichas disposiciones (CONAF, 2008).

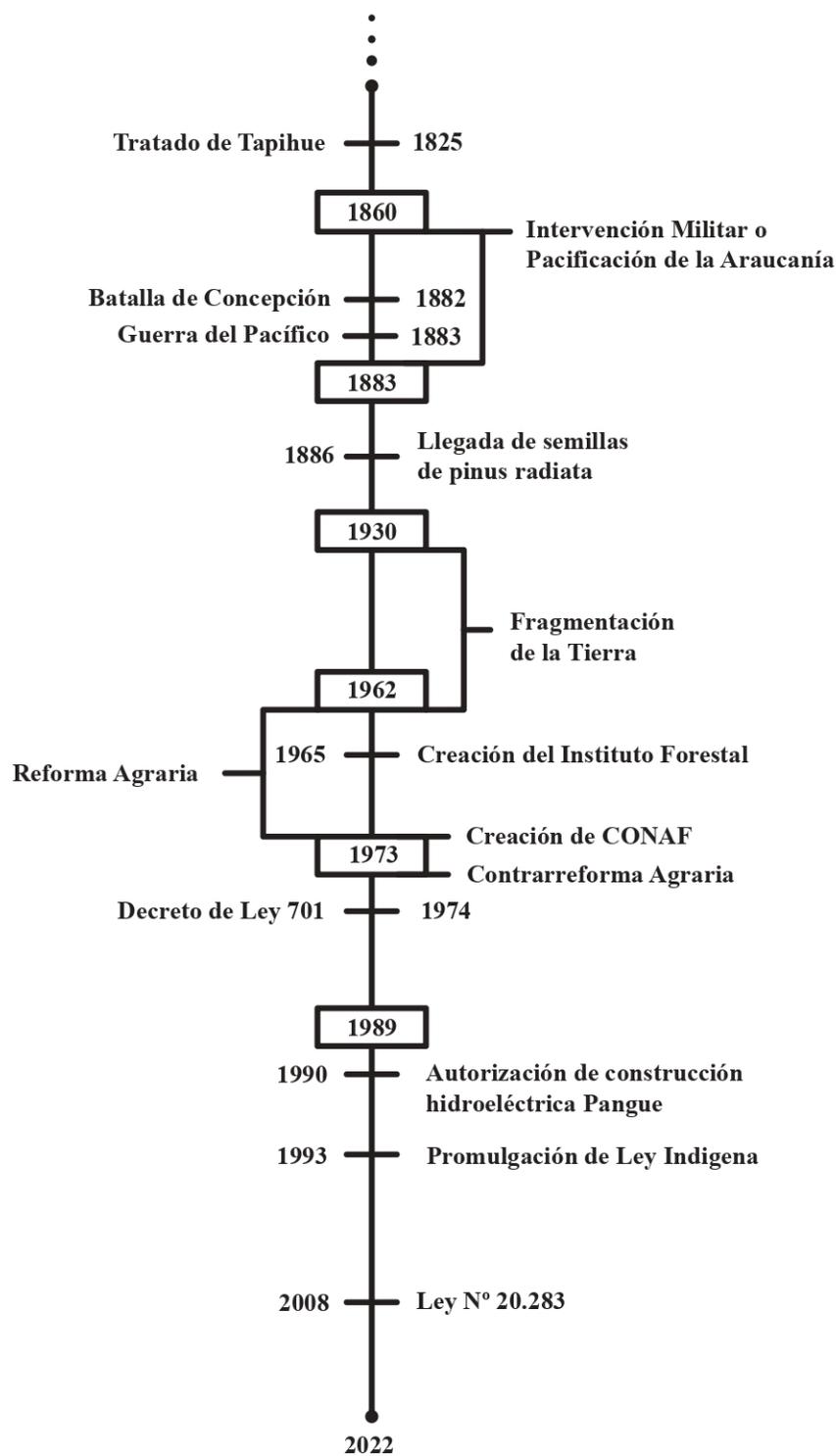


Figura 2.1: Línea de tiempo.

## 2.2. Breve introducción a la cosmovisión mapuche

El pueblo mapuche es el pueblo indígena más numeroso de Chile (1.8 millones de personas según el Censo de 2017). Se ubica principalmente en la zona centro y sur de Chile (*Gulumapu*), y zonas del suroeste occidental de la Argentina (*Puelmapu*).

La cosmovisión mapuche habla de tres espacios distintos: el *Wenu Mapu* (tierra de arriba) donde coexisten las energías positivas y negativas, el *Nag Mapu*, la tierra en que el ser humano se desenvuelve, y el *Minche Mapu* (tierra de abajo). Estos espacios, siempre interconectados, forman parte del relato mapuche del origen del mundo. Alguna vez coexistieron estas energías en el *Wenu Mapu*, y se creó el mundo actual como fruto del enfrentamiento de los dipolos de energía. La separación de estos espacios explican el origen de volcanes, cordilleras, ríos, lagos, mares y aquello relativo a los distintos ecosistemas. Finalmente, se crea el hombre con la sonrisa de la mujer, reafirmando la dualidad de la cosmovisión mapuche, y originando así, la vida del ser humano (Cayuqueo, 2017).

En relación a la meteorología y la hidrología, el pueblo mapuche ha forjado una cultura ciertamente ligada al agua (). Un ejemplo de esto son los fundamentos que explican el origen de las estaciones. Mientras en la sociedad judeo-cristiana las estaciones se rigen por los solsticios y equinoccios, en la cultura mapuche los cambios estacionales se explican por el ciclo de cultivo. Elicura Chihuailaf cita "...Vagando entre riachuelos, bosques y nubes veo pasar las estaciones: Brotes de Luna Fría (invierno), Luna de verdor (primavera), Luna de los primeros frutos (fin de primavera y comienzo de verano), Luna de los frutos abundantes (verano), y Luna de los brotes cenicientos (otoño)." (Chihuailaf, 2015).

Otra diferencia que cabe mencionar es la determinación del comienzo de un nuevo año. A diferencia del mundo occidental, el pueblo mapuche comienza su año con la época de mayor abundancia de precipitaciones y caudales, llamado *We Tripantu* (Chihuailaf, 2015).

Las cartografías desarrolladas por Mansilla *et al.* (2017) (Figura 2.2) ilustran de cómo las distintas componentes del ciclo hidrológico han sido de los principales factores en la denominación de lugares. Otra evidencia de ello son los diversos topónimos en la zona de estudio. Algunos ejemplos son:

- Penco (*Pen* <encontrar> / *Co* <agua> )
- Arauco (*Raü* <greda> / *Co* <agua> )
- Antuco (*Antü* <sol> / *Co* <agua> )
- Quilleco (*Külleñ* <lagrimas> / *Co*<agua> )
- Coihueco (*Koiwe* <árbol> / *Co* <agua> )

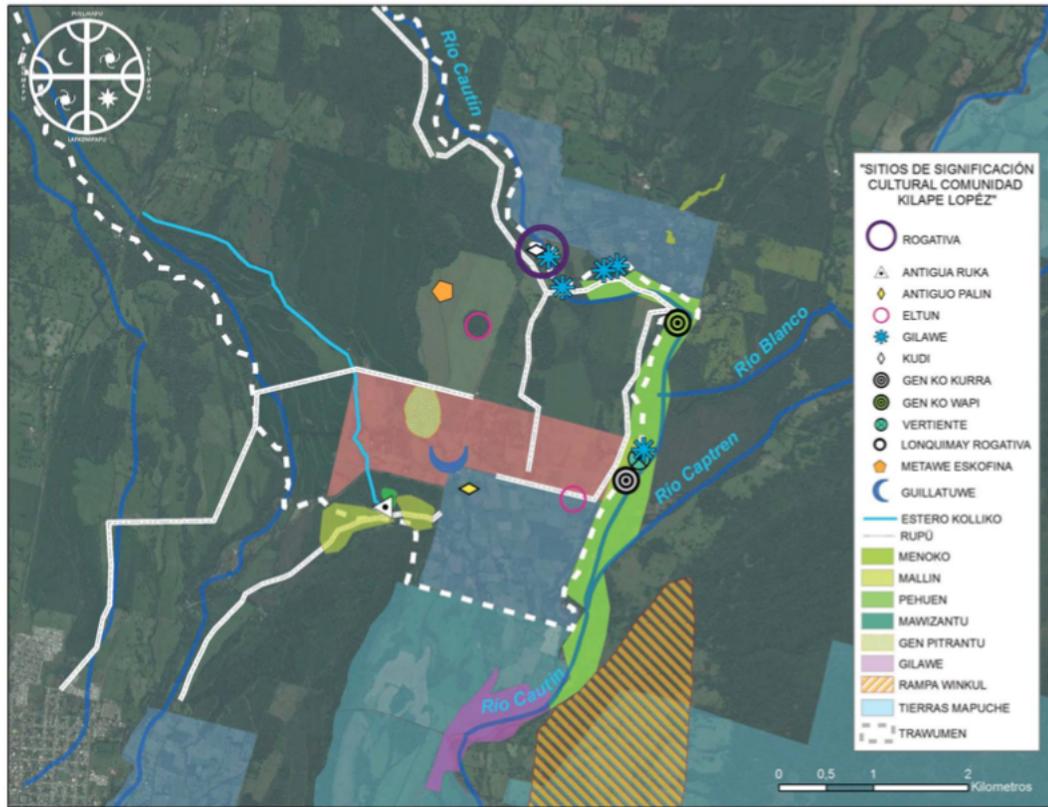


Figura 2.2: Sitios de significación cultural comunidad Kilape Lopez.

La forma de relacionarse con el agua también tiene su lugar en ceremonias como el *Guillatún* y *Machitún*, junto con usos medicinales. Por medio de enseñanzas ancestrales, los hombres y mujeres mapuche procuran recoger de la naturaleza no más de lo necesario, respetando el ecosistema del que forman parte y procurando su correcta preservación. Además, existe el uso ritual y ceremonial de especies arbustivas y arbóreas (como el roble, alerce, araucaria, canelo, etc.), lo cual constituye un regulador social de la explotación de dichas especies. De esta forma, se establecen relaciones entre el agua, diversas especies botánicas y las personas mapuche, conformando su identidad (Skewes *et al.*, 2013). En cuanto a las comunidades *pewenche* (poblaciones mapuche cordilleranas) los árboles intermedian su relación con las aguas y demás fuerzas naturales, constituyéndose no solo en vehículos de la memoria sino también en puentes que unen lo natural con lo sobrenatural y lo cotidiano con lo sagrado (Skewes *et al.*, 2014).

## 2.3. Reconstrucción de caudales utilizando anillos de árboles

La palabra dendrocronología deriva del griego *dendron* (árbol), *crono* (tiempo) y *logo* (conocimiento), denotando una estrecha relación entre los árboles y el tiempo. Corresponde a una disciplina científica dotada de principios, técnicas y métodos que permiten estudiar los cambios que ha experimentado un conjunto de árboles en relación a diferentes factores que han influido en su crecimiento (Gutiérrez, 2009). El objetivo principal corresponde a establecer cronologías combinando la toma de datos *in situ* con modelos matemáticos estadísticos que permiten reconstruir series de caudal o anomalías de caudal anuales o estacionales. Esta herramienta es fundamental para poder obtener información en épocas con escaso registro fluviométrico, puesto que entrega información del rango de tiempo de crecimiento que presente un conjunto de árboles. En la Figura 2.3 se presenta un esquema de crecimiento para un pino, donde se identifican los cambios que pueden existir en los anillos de los árboles tanto por su edad como por factores externos (incendios, época lluviosa, época de sequía, desfases climáticos).

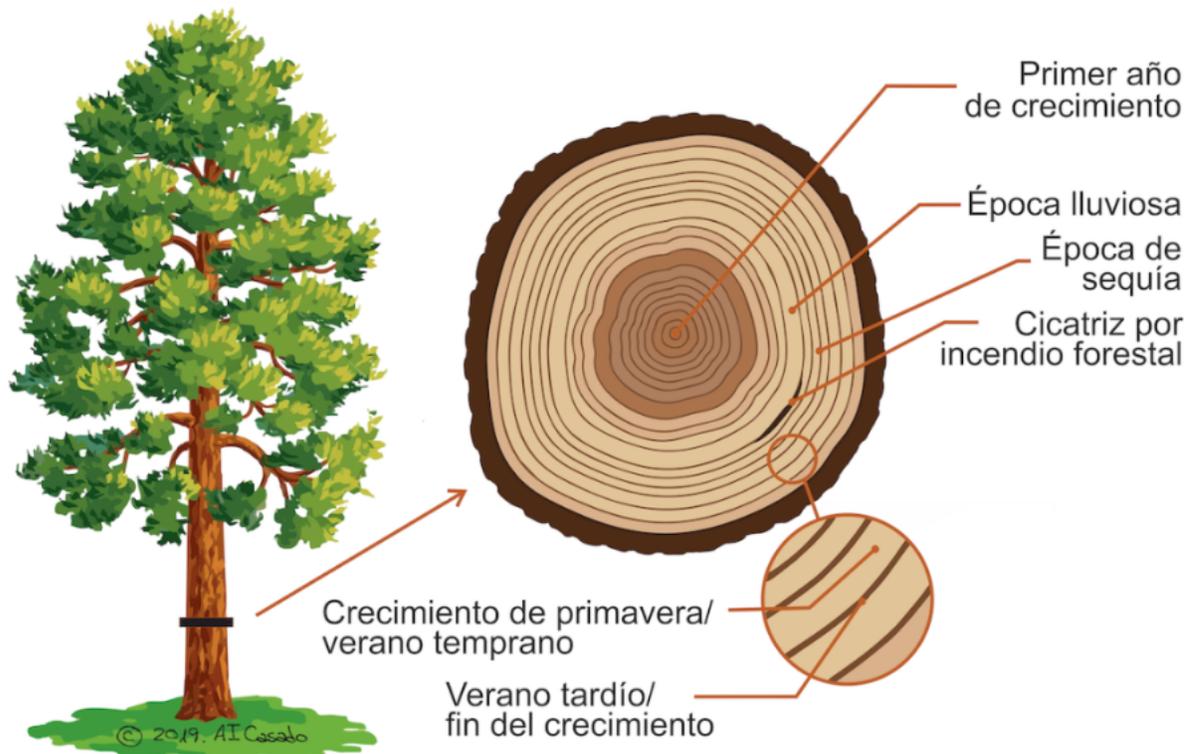


Figura 2.3: Esquema de crecimiento del tronco del pino según nacimiento, incendios, años húmedos y secos. Fuente: Casado, 2019.

Esta disciplina se basa en dos principios (Jiménez, 2013):

- Los árboles crecen de forma estacional formando un anillo de madera, observable en una sección transversal al tronco, que recubre a los anillos previos, y que es fácilmente distinguible de ellos. De esta forma, el patrón de crecimiento de un árbol viene determinado por la serie anual de grosor de los anillos.
- Aquellos árboles situados en una misma región y con la misma edad, tendrán efectos climáticos que muestran una variación sincrónica en la tasa de crecimiento anual, es decir, las series de grosor relativo de anillos siguen un mismo patrón.

En cuanto al método, este se basa en construir un modelo matemático que replique las anomalías de crecimiento de un conjunto de cronologías, las cuales corresponden a anchos de anillos de árboles para una población determinada. Cada cronología es un posible predictor en un modelo de regresión lineal múltiple (u otro tipo de modelo), y el conjunto de cronologías utilizadas se determinará por la baja multicolinealidad que presenten las electas, determinada por el índice VIF (*Variance Inflation Factor*) (Ecuación 2.1).

- *Variance Inflation Factor* (Theil,1971): esta métrica se utiliza para detectar la presencia de relaciones lineales entre dos o más variables independientes (es decir, colinealidad) en la regresión lineal múltiple (Salmerón, 2015). Sus valores se ubican entre 1 e infinito. Al obtener valores cercanos a 1 del índice VIF, se hablará de que existe una baja multicolinealidad, mientras que un valor sobre 10 indica existencia de esta. En consecuencia, no se utilizan predictores con información redundante para el modelo desarrollado (Muñoz, 2016).

$$VIF = \frac{1}{1 - R^2} \quad (2.1)$$

Donde:  $R^2$  corresponde al coeficiente de determinación entre dos series de posibles predictores.

Se han realizado numerosas reconstrucciones con anillos de árboles en Chile y el mundo. Algunos ejemplos en Chile corresponden a la reconstrucción de la parte alta del río Bío bío (Barría *et al.*, 2018), aquella realizada en la cuenca del Maule (Lara *et al.*, 2008) y en la cuenca del río Puelo (Urrutia *et al.*, 2011). Ejemplos en el extranjero son las reconstrucciones de la cuenca alta del río Colorado (EE.UU.) (Woodhouse *et al.*, 2006) y en la cuenca del río Amarillo (China) (Gou *et al.*, 2007). También, existen estudios hidrológicos que incorporan series dendrocronológicas como el estudio de variabilidad del caudal medio anual de la cuenca del río Maule entre 1600 y 2000 (Huichaquén, 2017).

## 2.4. Modelos de Circulación General

Los Modelos de Circulación General (MCG) son modelos numéricos que buscan representar procesos físicos de la atmósfera, el océano, la criósfera y la superficie terrestre, junto con la respuesta del sistema climático global al aumento de gases de efecto invernadero. Para el análisis de la respuesta a dichos cambios, se crean distintos escenarios futuros con consistencia física y geográfica en donde existen variaciones de emisiones de gases de efecto invernadero, temperatura, erupciones volcánicas, entre otras (Intergovernmental Panel on Climate Change, s.f.). A estos escenarios se les denomina "Vías de Concentración Representativas" (o RCP por sus siglas en inglés). En su última versión del *Climate Model Intercomparison Project* (CMIP6) se incorporan nuevos escenarios futuros basados en proyecciones socioeconómicas de cómo crece y se desarrolla la sociedad global, los cuales se denominan *Shared Socioeconomic Pathways* (SSP) (CarbonBrief, 2018).

Los MCG son de carácter grillado y suelen tener una resolución espacial gruesa ( $>50$  km) por lo que presentan falta de representatividad a escalas pequeñas. En la Figura 2.4 se presenta un esquema de división del globo terráqueo, el cual representa el producto final de los MCG. En cada una de las celdas se almacena información de la/ variable/s de interés por medio de la identificación de los procesos físicos, químicos o biológicos que influyen sobre dicha variable, y la posterior, determinación de esta.

## Esquema de un Modelo Global de Atmósfera

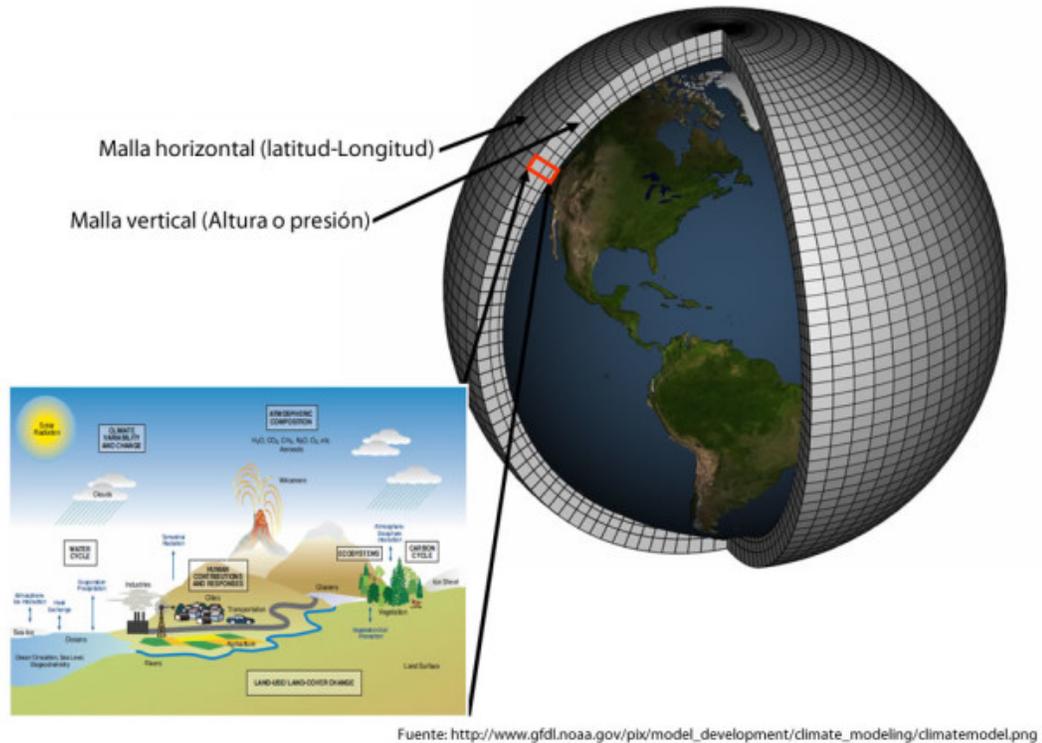


Figura 2.4: Grilla de ejemplo para un Modelo de Circulación Global.

## 2.5. Escalamiento estadístico

Este procedimiento consta de dos etapas: escalamiento espacial y corrección de sesgo. La primera, se basa en la generación de una matriz con datos a escala fina derivados de la información de los MCG (escala gruesa), por medio de relaciones matemáticas. La segunda parte, se basa en la replicación de las heterogeneidades de la variable en la zona de estudio mediante estadísticas de las observaciones o productos que representen el clima local con los MCG. Se utilizan métodos como *Quantile Delta Mapping* (QDM) (Cannon *et al.*, 2015) y *Multivariate BIAS Correction* (MBCn) (Cannon *et al.*, 2018).

El método de QDM se basa en la generación de funciones de distribución acumulada (CDF) de observaciones, MCG históricos, y MCG proyectados, para posteriormente corregir los MCG históricos, por cuantil, utilizando la CDF de los datos observados. Finalmente, se calcula la variación relativa entre cada cuantil de MCG históricos y proyectados, y se escalan las proyecciones futuras a partir de dichas variaciones. Mientras que el método de escalamiento MBCn incorpora  $n$  variables para la generación de las CDF, generando funciones de  $n$ -distribución de probabilidad.

Para la implementación de MBC se utilizó el producto CR2MET (Centro de Ciencia del Clima y Cambio Climático). Este proporciona información espacial de precipitación y temperatura media con resolución espacial de  $0.05^\circ \times 0.05^\circ$  (escala fina) para el período 1979-2020. Fue elaborado en el proyecto DGA(2017) y perfeccionado en 2018. Se obtiene a partir de un modelo lineal múltiple que tiene predictores derivados de información de reanálisis atmosférico (ERA5) y productos de percepción remota. Luego, se utilizan dichas ecuaciones para extrapolar y obtener información en el período de estudio (Boisier *et al.*, 2018).

Se observó que el producto CR2MET logra replicar la variabilidad espacial de la precipitación. Esto se evidencia en la capacidad de representación del gradiente latitudinal de aumento de precipitación, además de efectos topográficos que influyen en la precipitación orográfica (DGA, 2019). En consecuencia, se utiliza este producto para el proceso de corrección de sesgo a modo de “observaciones”.

## 2.6. Modelación Hidrológica

Un modelo hidrológico corresponde a una representación simplificada del ciclo hidrológico, con el cual se busca reproducir los procesos que afectan dicho ciclo mediante expresiones analíticas que definen relaciones entre las variables de entrada (como lo son la precipitación, la temperatura, humedad relativa y velocidad del viento) y los flujos de salida (escorrentía, flujo sub superficial, evapotranspiración, acumulación y derretimiento de nieve, entre otros), para condiciones de borde determinadas. En la Figura 2.5 se presentan las principales componentes de un modelo hidrológico según Liu *et al.*, (2007), donde:

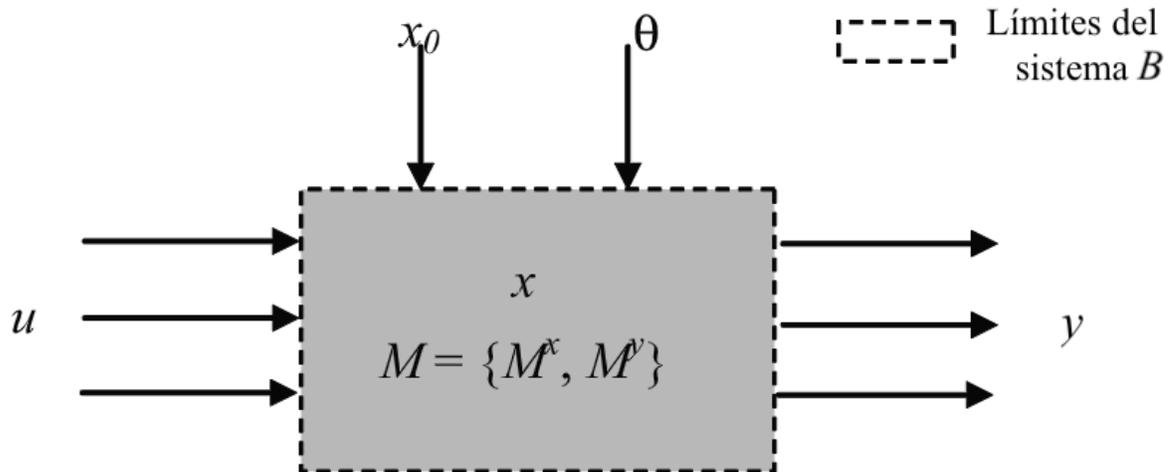


Figura 2.5: Componentes de un modelo hidrológico según Liu *et al.*,2007.

Donde:

- $B$ : Límite del sistema en estudio.
- $u$ : Entradas. Son flujos de masa y/o energía a través del borde  $B$ , variables en el tiempo.
- $x_o$ : Condiciones iniciales.
- $\theta$ : Parámetros. Son propiedades características del sistema constantes en el tiempo.
- $x$ : Estados de masa y/o energía almacenadas dentro del borde  $B$ , variables en el tiempo.
- $y$ : Salidas.
- $M$ : Estructura. De esta forma,  $M^x$  y  $M^y$  son relaciones no lineales que mapean entradas y salidas (respectivamente).

Existen diversas categorías para clasificar un modelo hidrológico (Hrachowit *et al.*, 2017):

- Simplificación del sistema: se establecen relaciones de carácter físico (intenta representar la complejidad de los procesos internos del sistema) o matemático (descripción a macro escala del sistema hidrológico).
- Simplificación espacial: alude a la capacidad de analizar distintas capas y/o puntos de una zona. Se ubican los concentrados (no existe discretización espacial), distribuidos (se establecen relaciones explícitas de heterogeneidad natural, la cual se puede conseguir con entradas y/o parámetros espacialmente distribuidos) y semi distribuidos (un híbrido entre las categorías anteriores).
- Arquitectura del modelo: modelos continuos o basados en estanques (elementos de almacenamiento).
- Escala del modelo: de razonamiento inductivo (*Bottom-up* en inglés) o deductivo (*Top-down* en inglés).

### 2.6.1. Modelo Variable Infiltration Capacity (VIC)

En el contexto de la actualización del Balance Hídrico Nacional se utilizó el modelo VIC (Liang *et al.*, 1994), el cual corresponde a un modelo hidrológico distribuido, de base física con una resolución espacial diseñada para zonas de extensión mayor a  $1 \text{ km}^2$  y resolución temporal diaria o subdiaria. El modelo permite incorporar diversos usos de suelo dentro de un píxel, con el fin de poder representar la heterogeneidad de la zona.

Con el fin de representar la heterogeneidad espacial, el modelo hidrológico VIC tiene como unidad de trabajo la celda, una superficie cuadrada definida según la grilla de las forzantes meteorológicas. Al ingresar las entradas del modelo hidrológico, se pudo incorporar categorías de cobertura de suelo vegetal. Cada una de estas categorías, tiene asociada parámetros

vegetacionales relevantes para poder distinguir el comportamiento de la cobertura vegetativa en términos hídricos. Algunos de los parámetros principales son la resistencia mínima arquitectónica, la distribución de raíces en profundidad y densidad en las distintas capas del modelo, el índice de área foliar (conocido como LAI por sus siglas en inglés - *Leaf Area Index*), entre otros.

Las forzantes meteorológicas en el presente estudio corresponden a precipitación, temperatura, velocidad del viento y humedad relativa. Se obtuvieron en base a los criterios otorgados por el/la modelador/a, e ingresaron a escala de celda. Además, se dispuso de una librería con los tipos de coberturas de suelo y un archivo que detalla la fracción de cobertura para cada píxel. Adicionalmente, se cuenta con bandas de nieve y parámetros de suelo (conductividad hidráulica, contenido de humedad inicial, etc.).

El modelo hidrológico VIC posee cuatro restricciones predominantes:

- Se ignora el flujo entre celdas, por lo que el agua ingresa sólo desde la atmósfera.
- No se considera en el balance energético la interacción entre celdas, bajo el supuesto de que los flujos verticales tienen mayor importancia que aquellos horizontales.
- No se incorpora en la modelación de los flujos subterráneos, dado el supuesto de que los flujos superficiales son mayores a los subterráneos, y los flujos subsuperficiales provenientes de cuerpos de agua, no presentan aportes en la escorrentía.
- No puede representar el comportamiento de embalses o grandes cuerpos de agua, derivado de la desconexión entre celdas, por lo que se imposibilita la representación de la red de drenaje.

Los principales flujos determinados por VIC a escala de celda correspondieron a la evapotranspiración, la generación de flujo base y escorrentía superficial, la acumulación y derretimiento de nieve, y la infiltración. En la Figura 2.6 se presenta un esquema de los procesos físicos primordiales del modelo VIC donde se distinguen tres capas de suelo (lado izquierdo) y los distintos usos de suelo (lado derecho).

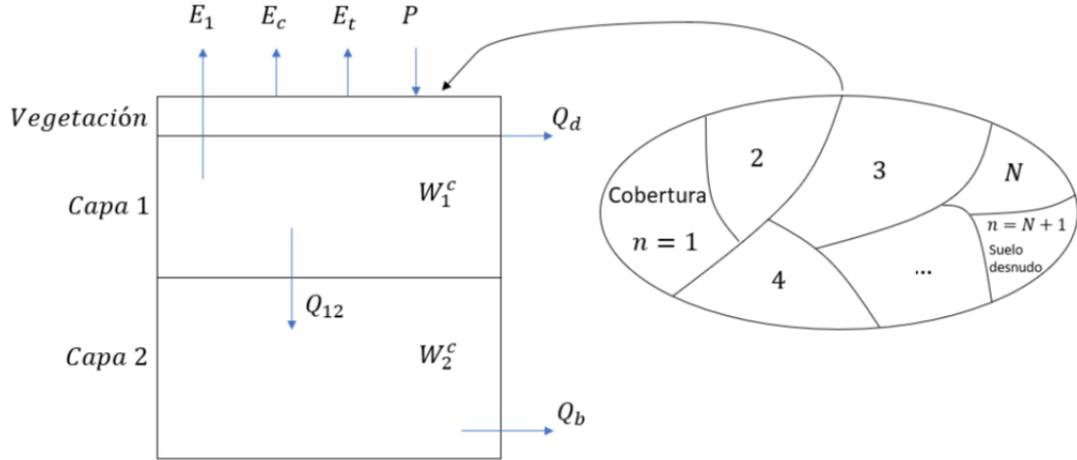


Figura 2.6: Respresentación de los principales procesos físicos representados por VIC. Modificado por Liang *et al.* (1994). Fuente: DGA,2019.

Las componentes presentadas en la Figura 2.6 corresponden a:

- $E_1$ : evaporación desde suelo desnudo.
- $E_c$ : agua interceptada por el follaje.
- $E_t$ : transpiración.
- $P$ : precipitación.
- $Q_d$ : escorrentía producto de la precipitación en exceso.
- $Q_b$ : flujo base.
- $Q_{12}$ : traspaso de agua entre las distintas capas de suelo.
- $W_1^c$ : Es la humedad del suelo en la capa 1.
- $W_2^c$ : Es la humedad del suelo en la capa 2.
- $n$ : tipo de uso de suelo o vegetación.

Para determinar el balance hídrico en cada lapso de tiempo se utilizó la Ecuación 2.2, donde  $\frac{dS}{dt}$  corresponde a la variación de almacenamiento en el periodo  $t$ ,  $P$  a la precipitación acumulada,  $Q$  a la escorrentía y  $ET$  a la evapotranspiración para el mismo paso temporal.

$$\frac{dS}{dt} = P - Q - ET \quad (2.2)$$

En áreas con vegetación, se determinó el balance de agua para la interceptación del follaje de cada cobertura de suelo  $n$  mediante la Ecuación 2.3.  $\frac{dW_i[n]}{dt}$  corresponde a la variación de la cantidad de agua interceptada por la superficie vegetal en el periodo de tiempo  $t$ , la cual,

se determina como la resta de la precipitación con la evaporación desde follaje ( $Evap_{Canopy}$ ) y el exceso de precipitación ( $P_t[n]$ ). La condición para que exista exceso de precipitación, corresponde a que la cantidad de agua interceptada por la superficie vegetal ( $W_i[n]$ ) exceda a la cantidad máxima de agua que puede ser interceptada para dicha cobertura ( $W_{im}[n]$ ).

$$\frac{dW_i[n]}{dt} = P - Evap_{Canopy} - P_t[n] \quad (2.3)$$

Para  $0 \leq W_i[n] \leq W_{im}[n]$

La cantidad máxima de agua que puede ser interceptada para una superficie con tipo de cobertura  $n$  depende del *Leaf Area Index* ( $LAI$ ) y de la constante de Dickinson de 1984 ( $K_L$ ), adoptando el valor de 0,2 mm. Se presenta la relación de las variables en la Ecuación 2.4.

$$W_{im}[n] = K_L \quad (2.4)$$

La evapotranspiración calculada en VIC corresponde a evapotranspiración real ( $ET$ ). Esta se determina por medio de la Ecuación 2.5, la cual define la evapotranspiración real como la suma de la evaporación desde el follaje debido a la intercepción de la precipitación ( $Evap_{Canopy}$ ), la transpiración vegetativa ( $Evap_{TransVeg}$ ) y la evaporación desde suelo desnudo ( $Evap_{Bare}$ ).

$$ET = Evap_{Canopy} + Evap_{TransVeg} + Evap_{Bare} \quad (2.5)$$

Las tres componentes de la  $ET$  dependen de la evapotranspiración potencial ( $EP$ ) definida por Penman-Monteith, presentada en la Ecuación 2.6.

$$EP = \frac{0,408 \cdot \Delta \cdot (R_n - G) + \gamma \cdot \frac{900}{T+273} \cdot U_2 \cdot (e_a - e_d)}{\Delta + \gamma \cdot (1 + 0,34 \cdot U_2)} \quad (2.6)$$

Donde:

- $EP$ : corresponde a la evapotranspiración potencial [mm/d].
- $\Delta$ : es la pendiente de la curva de presión de vapor [KPa/°C].
- $R_n$ : alude a la radiación neta en la superficie del planeta [MJ/m<sup>2</sup>d].
- $G$ : es el flujo térmico del suelo [MJ/m<sup>2</sup>d].
- $\gamma$ : corresponde a la constante psicrométrica [KPa/°C].
- $T$ : compete a la temperatura media [°C].
- $U_2$ : es la velocidad del viento medida a 2 metros de altura [m/s].
- $e_a$  es la presión de vapor saturado a la temperatura del aire [KPa].
- $e_d$ : presión real de vapor [KPa].

La evapotranspiración se obtiene a partir de tres tipos de evaporación: la evaporación desde el follaje obtenida por la intercepción de la precipitación (Ecuación 2.7), la transpiración de la vegetación (Ecuación 2.8) y la evaporación desde el suelo desnudo.

$$Evap_{Canopy} = \left(\frac{W_i[n]}{W_{im}}\right)^{\frac{2}{3}} \cdot E_p[n] \cdot \frac{r_w[n]}{r_w[n] + r_o[n]} \quad (2.7)$$

Donde  $W_i[n]$  representa el agua interceptada por el follaje,  $W_{im}$  es la máxima cantidad de agua que puede ser interceptada por el follaje,  $n$  es la cobertura de suelo,  $E_p[n]$  es la evaporación potencial definida por Penman-Monteith para la cobertura,  $n, r_o[n]$  es la resistencia producida por la variación del gradiente de humedad específica entre las hojas y el aire sobre el follaje, y  $r_w[n]$  corresponde a la resistencia aerodinámica producida por la transferencia de agua.

$$E_T[n] = \left(1 - \left(\frac{W_i[n]}{W_{im}[n]}\right)^2\right) \cdot E_p \cdot \frac{r_w[n]}{r_w[n] + r_o[n] + r_c[n]} \quad (2.8)$$

Donde  $r_c$  es la resistencia estomática definida según la Ecuación 2.9

$$r_c[n] = \frac{r_{min}[n] \cdot g_{sm}[n]}{LAI[n, m]} \quad (2.9)$$

Donde  $r_{min}$  es la resistencia mínima estomática, la cual esta asociada a la resistencia de las plantas por liberar el agua almacenada en las distintas estructuras que posee (tallos, raíces, hojas, frutos, etc.). Este se determina como el mínimo valor de resistencia estomática registrado en el ciclo diario. Corresponde a un parámetro de suma relevancia en el estudio debido a la alta sensibilidad con respecto a cambios en el clima (Sepúlveda,2021).

Continuando,  $g_{sm}$  es un factor asociado al contenido de humedad del suelo, el cual depende de la cantidad de agua disponible en el subsuelo. En caso de que la humedad de una capa de suelo sea mayor a la humedad crítica de dicha capa, la transpiración es alimentada desde la capa inferior. Luego, la transpiración se determina según los aportes de cada capa (Ecuación 2.10).

$$E_t[n] = f_1[n] \cdot E_1^t[n] + f_2[n] \cdot E_2^t[n] \quad (2.10)$$

Donde  $E_1^t[n]$  y  $E_2^t[n]$  corresponden a la transpiración de las capas 1 y 2, respectivamente, mientras que  $f_1[n]$  y  $f_2[n]$  corresponden a la proporción de raíces de la cobertura  $n$  para las capas de suelo 1 y 2.

La evapotranspiración desde suelo desnudo ( $Evap_{Bare}$ ) obtiene agua a partir de la primera capa de suelo. En caso de que dicha capa esté saturada, la  $Evap_{Bare}$  es equivalente a la evapotranspiración potencial de suelo desnudo. En caso de que no esté saturada, la tasa de evapotranspiración varía debido a la heterogeneidad de la infiltración, relieve y otras carac-

terísticas. En consecuencia,  $Evap_{Bare}$  dependerá de la capacidad de infiltración, la capacidad máxima de infiltración, la fracción del área en donde se tiene una tasa de infiltración menor a la máxima y un parámetro de forma. Además, se determinó la evapotranspiración potencial (PET), la cual se refiere a un escenario actual sin limitaciones de humedad de suelo, déficit en la presión de vapor, temperatura o insolación.

## 2.6.2. Balance Hídrico Nacional 2018

El Balance Hídrico Nacional (BHN) tiene como objetivo determinar el balance hídrico en cuencas hidrográficas que se encuentren en Chile. En su primera versión de la actualización, se calibraron 5 cuencas, y en la versión de 2019, se determinó el balance en la zona centro-sur para cuencas ubicadas entre la región del Bío bío y parte norte de la región de Aysén.

En la actualización del BHN de 2019 (DGA,2019), se calibraron 18 subcuencas ubicadas dentro de la cuenca del río Bío bío. Los criterios de elección de dichas cuencas se fundamentan en que sean cuencas en régimen natural (la suma de los derechos consuntivos superficiales sea inferior al 5 % del caudal medio anual medido por su estación fluviométrica), que no existan grandes obras hidráulicas en su interior y que presente registros por cinco años.

Para aquellas subcuencas no calibradas directamente (alto grado de intervención), se transfirieron parámetros para los píxeles mediante la regionalización por medio de la clasificación de píxeles basada en los atributos físicos/meteorológicos. Esta transferencia se realizó por criterios de similitud espacial (i), física (ii), climática (iii) y física y climática (iv). Debido a que una clase de píxeles puede obtener por criterio parámetros de más de un candidato, se utilizan los índices de disimilitud de (Beck et al.,2016), para identificar aquel conjunto más similar. En la Tabla 2.1 se presentan las métricas de desempeño de la calibración de 18 subcuencas en régimen natural ubicadas en la zona de estudio.

Tabla 2.1: NSE y KGE para subcuencas calibradas en la cuenca del Río Bío bío en la Actualización del Balance Hídrico Nacional en las cuencas de la macrozona sur y parte norte de la zona austral (DGA,2019).

BNA	Cuenca	NSE	KGE
8220001	Río Andalién Camino A Penco	0,51	0,77
8307002	Río Biobío En Llanquén	0,79	0,89
8308000	Río Lomín En Puente La Junta	-4,17	-2,13
8313000	Río Pangue En Captación	0,61	0,77
8316002	Río Huequecura Aguas Arriba De Emb. Angostura	0,64	0,64
8317002	Río Lirquén En Cerro El Padre	0,65	0,77
8323002	Río Duqueco En Villucura	0,69	0,79
8324002	Estero Paillihue En Ex Longitudinal Sur	0,08	-4,95
8330001	Río Mulchén En Mulchén	0,8	0,9
8332001	Río Bureo En Mulchén	0,67	0,79
8342001	Río Renaico En Longitudinal	0,58	0,73
8343001	Río Mininco En Longitudinal	0,75	0,87
8351001	Río Malleco En Collipulli	0,7	0,81
8356001	Río Rahue En Quebrada Culén	0,78	0,89
8362001	Río Nicodahue En Pichún	0,73	0,87
8366002	Estero Quilque En Los Ángeles	-1,04	-0,32
8385001	Río Claro En Camino Yumbel-Estación	0,65	0,83
8393002	Estero Hualqui En Desembocadura	0,63	0,81

## 2.7. Sobre la Industria Forestal y el Bosque Nativo

La industria forestal se conoce como el sector de la industria especializado en la elaboración de madera desde su crecimiento a su exportación. Según el Anuario INFOR (2020), el sector forestal aportó el 1,9 % del PIB nacional, con tres subsectores aportantes (silvicultura, industria de la madera y productos de madera, y celulosa, papel y productos de papel). La región del Bío bío representa el 60,0 % del PIB forestal, seguida por la Región de La Araucanía con 10,5 % y las regiones del Maule y de Los Ríos con 10,1 % cada una (Biblioteca del Congreso Nacional de Chile, 2021).

Por otro lado, la región del Bío bío posee el 41 % de plantación forestal de Chile, seguido por la región de La Araucanía con un 20.5 %, y luego, la región del Maule con un 19.7 %. Además, las cifras oficiales del catastro de CONAF de 2017 identifican que el 58 % de uso de suelo de la cuenca corresponde a bosques, donde el 58 % de esta superficie corresponde a plantaciones forestales, 39 % a bosque nativo y 3 % a bosque mixto. El bosque nativo en la zona de estudio se compone principalmente de roble, raulí y coihue (61 %), mientras que las plantaciones forestales presentan como dominantes las especies *Pinus Radiata* (62 %) y

*Eucalyptus* (34%).

En cuanto a la clasificación vegetacional de la Cuenca del río Bío bío, se identifican cuatro regiones predominantes: bosque andino patagónico, matorral y bosque esclerófilo, región del bosque caducifolio y bosque laurifolio, con formaciones de estepa altoandina sub húmeda, bosque caducifolio alto andino de la cordillera de Chillán, bosque caducifolio alto andino con araucaria, bosque esclerófilo de los arenales, bosque caducifolio de Concepción, bosque caducifolio de La Frontera, bosque caducifolio andino del Bío Bío y bosque laurifolio Valdiviano. (Gajardo *et al.*, 1994)

## 2.8. Sociohidrología

Dada la considerable presencia del sector forestal en la zona de estudio, y la relevancia histórica y cultural del río Bío bío, en conjunto con las comunidades mapuches, es que se torna fundamental la inclusión en el análisis hidrológico de las componentes sociales, como postula la sociohidrología. En la Figura 2.7 se contrasta la plantación de pino y eucalipto, con la compra de tierras y títulos de merced mapuche.

La sociohidrología es una ciencia que estudia la co-evolución del sistema acoplado humano-agua. Emerge de la idea de que el ser humano no puede seguir siendo considerado como uno más de los agentes externos en las condiciones de borde de los sistemas hidrológicos. Las interacciones y retribuciones entre las acciones del ser humano y las dinámicas del ciclo de agua, combinadas con la evolución de los valores y normas del ser humano con respecto al agua emergen problemas de gran magnitud. (Sivapalan *et al.*, 2015).

En el estudio de Anderson *et al.*, (2019) se examinan cinco casos de estudio a lo largo del mundo respecto a la conceptualización de los flujos medioambientales. Se comprende cómo estos soportan culturas, economías, formas de vida sustentable y el buen vivir, con lo cual, se necesita generar un análisis que proteja el recurso hídrico comprendiendo todos los soportes que este provee. De este modo, se recomienda la combinación de herramientas hidrológicas y sociológicas.

En cuanto a la hidrología, existen tres focos de análisis para un estudio socio-hidrológico:

- Socio-hidrología histórica: analizar en qué etapa hidrometeorológica se sitúa el estudio.
- Socio-hidrología comparativa: examinar similitudes con cuencas cercanas u otras partes de una misma cuenca (en caso de que el estudio se realice en una de gran extensión).
- Procesos de la socio-hidrología: cómo han respondido las comunidades a los cambios identificados en los puntos anteriores, y en base a ello, cómo se espera que se comporten en escenarios futuros.

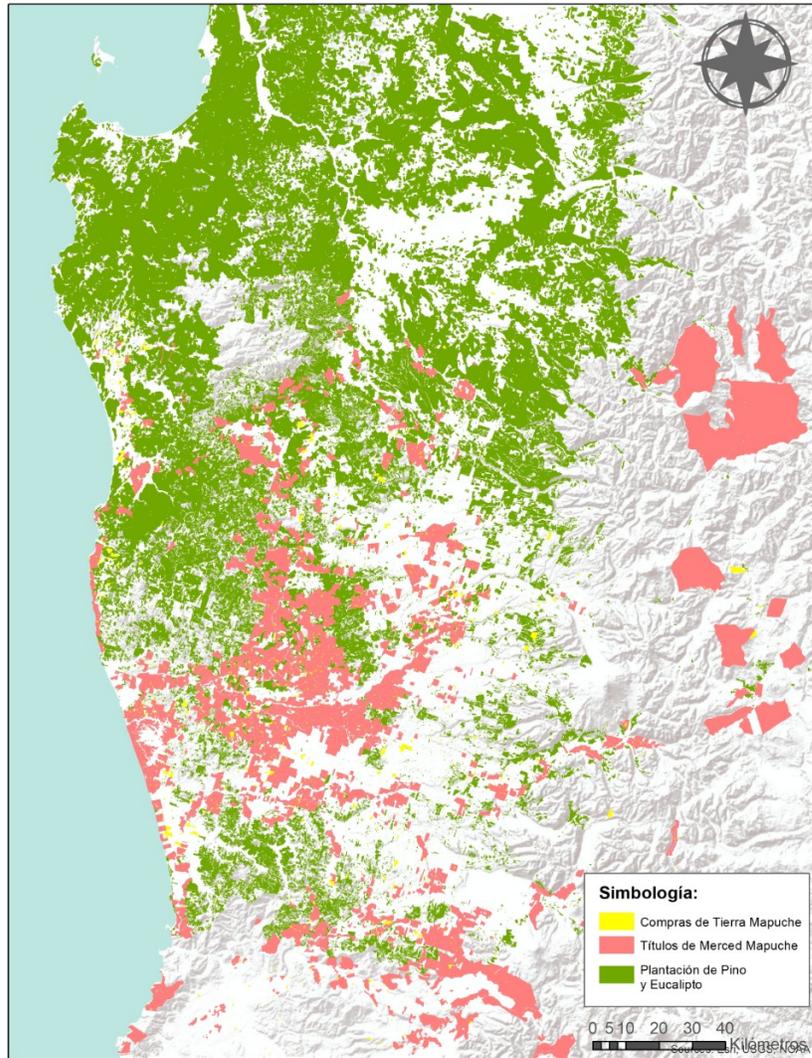


Figura 2.7: Extensión forestal en base a datos del CENSO de 2007 (INE), y la localización de los títulos de merced en tierra mapuche catastrados por Corporación Nacional de Desarrollo Indígena (CONADI). Fuente: Mansilla, 2020.

# Capítulo 3

## Dominio de Estudio

La zona de estudio corresponde a la cuenca del río Bío bío, ubicada entre la zona centro y sur de Chile Central, en la Región del Bío bío y parte de la región de la Araucanía. Es una de las cuencas de mayor superficie (24.269,9 Km<sup>2</sup>) y caudal del país. Su cauce principal corresponde al segundo más largo de Chile, con 380 km de extensión, y al más ancho del territorio nacional, alcanzando valores entre 1 y 2 kilómetros entre San Pedro y su desembocadura. Tiene como afluentes la laguna Gallutué, el lago Icalma y los ríos Laja, Malleco, Ranquil, Queuco, Lirquén, Duqueco, Bureo, Vergara, entre otros. Su desembocadura es en el océano a la altura de la ciudad de Concepción (DGA, 2004). En la Figura 3.1 se presentan los principales cauces de la cuenca del río Bío bío.



Figura 3.1: Cauces principales de la cuenca del Río Bío bío.

La geología de la cuenca comprende rocas de depósitos aluvionales y rocas terciarias. En ella se ubican los volcanes Antuco, Callaqui, Lonquimay, Copahue y Tolhuaca, junto con cuatro morfoestructuras predominantes: Llanuras estuario-deltaico litorales, Cordillera de la Costa o Cordillera de Nahuelbuta, Depresión Central y Cordillera de los Andes (DGA, 2011). En la Tabla 3.1 se detalla la información geográfica de la zona de estudio (Alvarez-Garretton et al., 2018).

Tabla 3.1: Información Geográfica de la Cuenca del Río Bío bío.

Característica	Valor
Cota máxima	3.509 m.s.n.m.
Cota media	801 m.s.n.m.
Cota mínima	14 m.s.n.m.
Área	24.269,9 [km <sup>2</sup> ]
Índice de aridez	0.6
Precipitación media anual	1.330 [mm/año]
Latitud punto de salida	-36,84
Longitud punto de salida	-73,06

En cuanto a las actividades económicas, esta cuenca es reconocida en el territorio nacional por su producción forestal, generación de energía eléctrica, etc. En junio de 2021 contribuyó con el 19,5 % de la matriz energética nacional, con un 54,4 % de energía hidráulica, un 43,5 % de energía térmica y un 2,1 % con otros tipos de energía. (INE, 2021)

## 3.1. Características de la cuenca

### 3.1.1. Información climática.

La cuenca del río Bío bío se ubica en una zona de transición climática desde el clima Mediterráneo subtropical en el norte (35°S-38°S), caracterizada por 3-4 meses secos, y un clima húmedo-templado en el sur. (Miller *et al.*, 1976; Pezoa *et al.*, 2003). Existen fenómenos climáticos de gran escala que generan gradientes latitudinales en la cuenca del río Bío bío como El Niño Southern Oscillation (ENSO), Southern Annular Mode (SAM) y Pacific Decadal Oscillation (PDO). El primero, tiene impactos en los regímenes de temperatura y precipitación a lo largo de la cordillera de los Andes, explicando parte de la variabilidad en la precipitación interanual entre las latitudes 35°S-40°S, mientras que el segundo tiene mayor incidencia desde la latitud 40°S. El tercero, tiene incidencia en el almacenamiento de nieve y la generación de escorrentía. También, se ha identificado influencia en la estacionalidad del Anticiclón del Pacífico y la climatología de vientos del oeste (Garreaud *et al.*, 2009; Villalba *et al.*, 2012).

En la Figura 3.2 se presenta el climograma de precipitación mensual y temperatura media mensual para la estación Río Bío bío En Desembocadura entre 1982 y 2014, utilizando el producto de CR2MET. En este se observa que existe un aumento de precipitaciones medias mensuales entre mayo y agosto, alcanzando valores de 350 mm/mensuales, junto con una disminución de temperatura media mensual llegando a valores inferiores a los 6°C. A su vez, en los meses de primavera y verano (octubre-marzo) se observan las mayores temperaturas medias mensuales (10°C-16°C), junto con las menores precipitaciones medias mensuales (40mm/mes - 100mm/mes).

### Climograma CR2MET Cuenca Río Bío bío (BNA=8394001)

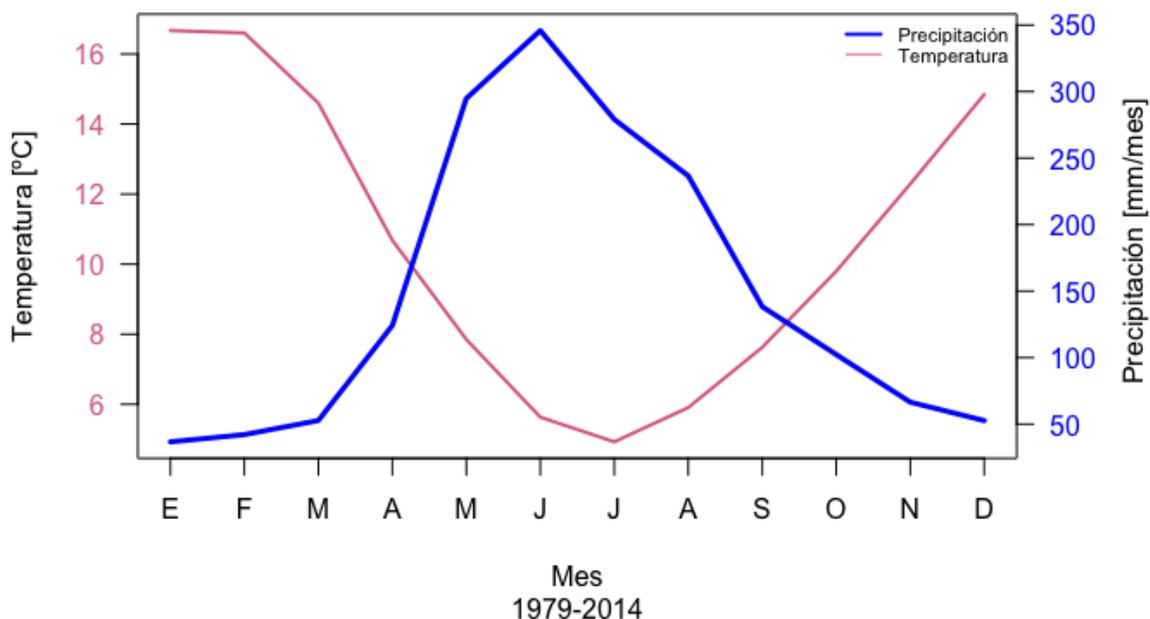


Figura 3.2: Climograma de precipitación y temperatura media mensual entre 1979 y 2014 para la Río Bío bío En Desembocadura. Fuente: Datos CR2MET adquiridos desde CAMELS-CL (Alvarez Garreton et al., 2018)

### 3.1.2. Información hidrológica

El régimen hidrológico de la cuenca es pluvio-nival. La zona alta de la cuenca esta representada por una fuerte componente nival a raíz del derretimiento de nieve de los Andes, mientras que las elevaciones bajas como el Valle Central y las zonas costeras se representan por medio de una componente pluvial. En la curva de variación estacional para la estación Río Bío bío En Desembocadura (Figura 3.3) se identifica el aporte pluvial al caudal medio anual para los caudales con alta y baja probabilidad de excedencia. Además, se aprecia que para aquellos caudales con baja probabilidad de excedencia existe una mayor presencia del aporte nival que en los caudales con alta probabilidad de excedencia, alcanzando los 280 milímetros mensuales en primavera para probabilidades de excedencia del 5 %.

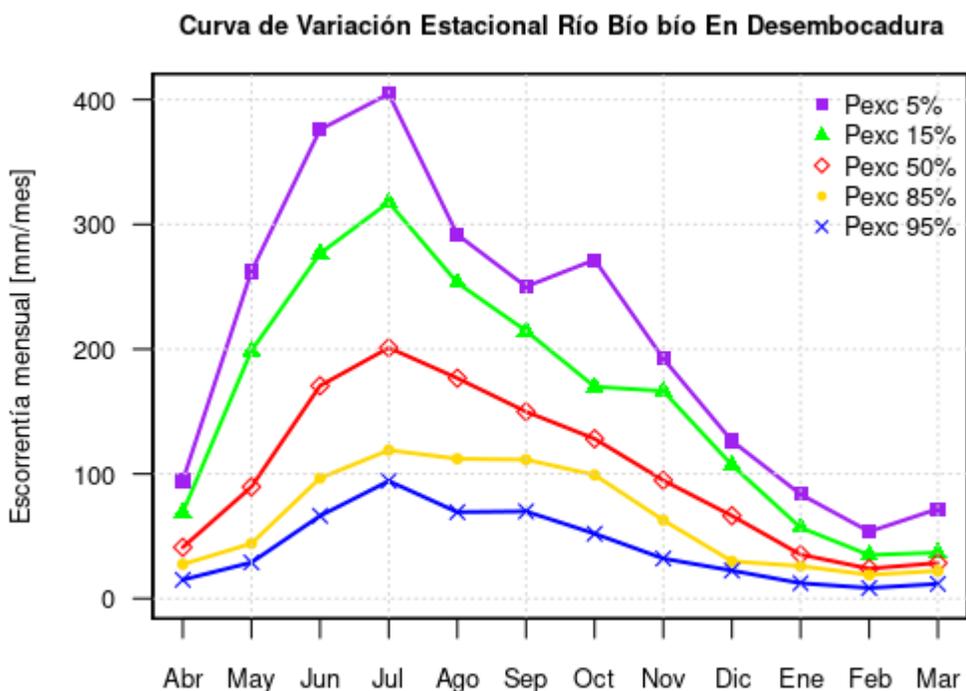


Figura 3.3: Curva de variación estacional entre 1982 y 2014 para la Río Bío bío En Desembocadura. Fuente: DGA.

Además, se presenta la curva de duración de caudales diarios para la estación del río Bío bío en desembocadura (Figura 3.4), donde se pueden identificar valores máximos de escorrentía diaria de 49 mm/día para probabilidades de excedencia inferiores a 5% , junto con valores mínimos de 0,45 mm/día para probabilidades de excedencia superiores a 95%. Mientras que, para caudales con probabilidades de excedencia de 20% y 70% se presentan valores de 5,6 y 1,4 milímetros diarios, respectivamente.

**Curva de Duración Estación Río Bío bío En Desembocadura**

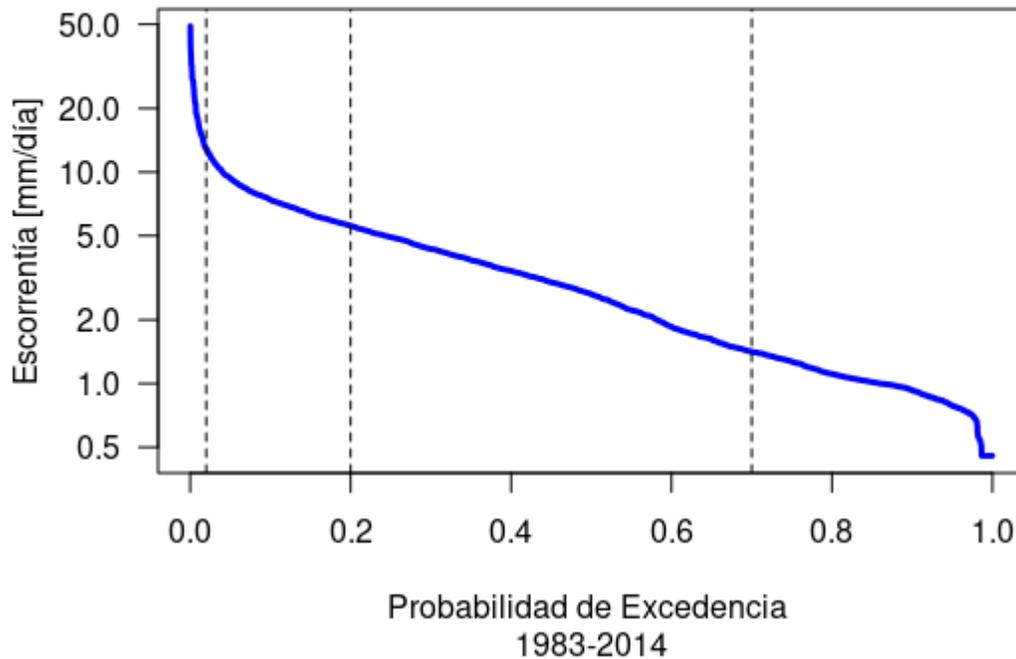


Figura 3.4: Curva de duración de caudales diarios entre 1983 y 2014 para la Río Bío bío En Desembocadura. Fuente: DGA.

En esta cuenca se caracteriza por el alto número de proyectos hidroeléctricos y centrales de paso, junto con un grado de intervención humana de 0,76 (DGA, 2016a), el cual se define como el caudal medio anual dividido por los derechos de agua consuntivos. Aquellas cuencas con grados de intervención superiores a 0,05 se consideran altamente intervenidas, con lo cual, la cuenca del río Bío bío cae en esta categoría. En la Figura 3.5 se presenta la ubicación de la cuenca del río Bío bío, junto con las estaciones fluviométricas y meteorológicas ubicadas en su interior. Se aprecia que existe una alta presencia de estaciones fluviométricas en los principales cauces de la zona de estudio, junto con una distribución de estaciones meteorológicas tanto en la parte alta como en la parte baja de la cuenca.

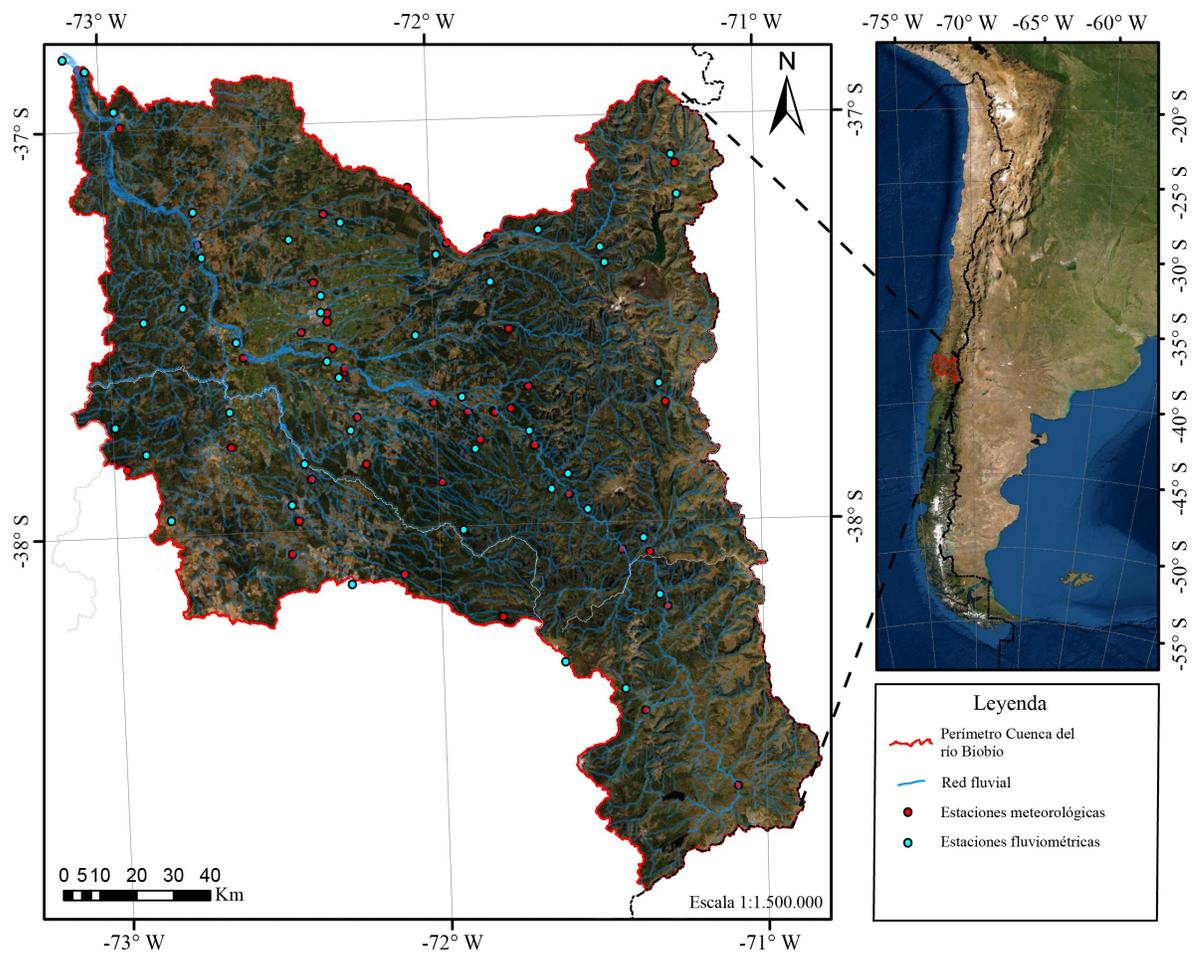


Figura 3.5: Cuenca del Río Bío bío, estaciones meteorológicas y fluviométricas.

# Capítulo 4

## Datos y Métodos

En el presente capítulo, se explican los datos utilizados para el desarrollo del estudio (Sección 4.1) y la metodología empleada para su análisis (Sección 4.2).

### 4.1. Datos

**Reconstrucción dendrocronológica:** En primer lugar, se utilizó la reconstrucción de anomalías de caudal medio anual de Muñoz *et al.* (2016), donde a partir de un conjunto de 25 cronologías de árbol, se escogieron 5 para el modelo de regresión lineal múltiple de tipo *stepwise* y la serie instrumental de caudales como predictando. Este modelo se calibró con observaciones de caudal del periodo 1943 a 2003, y se validó por medio del método *leave one out* y EPS (*Expressed Population Signal*). El último mide la fuerza de una señal común entre cronologías y cuantifica el grado de representación de una cronología hipotéticamente perfecta, utilizando ventanas de 50 años con 25 años de superposición entre ventanas adyacentes. Además, se comparó la serie obtenida con registros fluviométricos comprendidos en el periodo 1943 a 2000, obteniéndose correlaciones significativas con índices de eventos climáticos interanuales, como El Niño (ENSO), la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO) y el Anillo Modular del Sur (SAM), reflejando dependencias con dichos fenómenos. Por otro lado, se obtuvo un valor de  $R^2$  ajustado de 0,45, lo cual significa que un 45 % de la varianza en la anomalía de caudal se explica por el modelo. En la Sección 4.1 se presentan las cuencas utilizadas en la reconstrucción del río Bío bío de Muñoz *et al.*, 2016.

Las cronologías utilizadas se ubican en las subcuencas de Río Duqueco en Villacura, Río Lirquén en Cerro El Padre, Río Bureo en Mulchén y Río Mulchén en Mulchén (Figura 4.1 ). En el Figura 5.24 se presentan los valores de anomalías de caudal entre 1850 y 2003 obtenidas en el estudio de Muñoz *et al.* (2016).

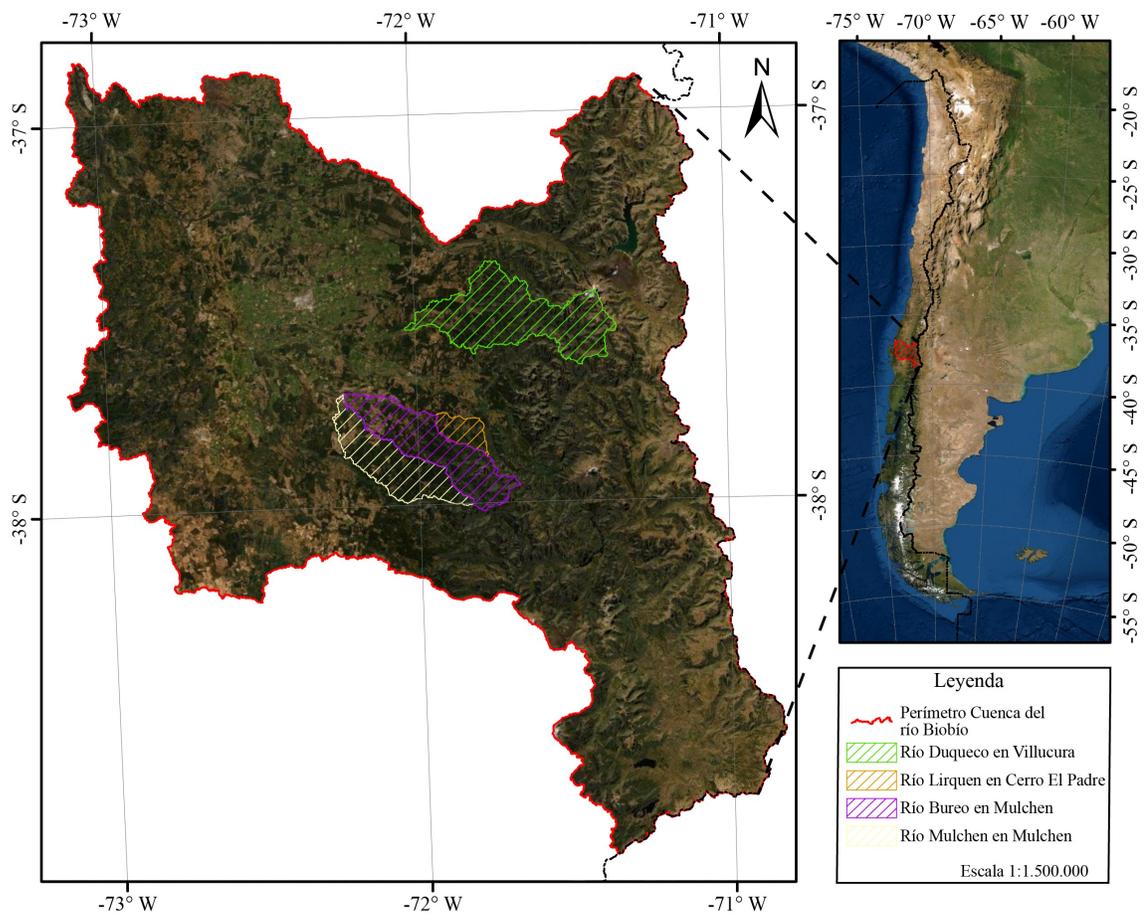


Figura 4.1: Subcuencas del Río Bío bío utilizadas en Muñoz *et al.* 2016.  
 Fuente: Shapefiles adquiridos desde CAMELS-CL (Alvarez Garreton et al., 2018)

## Serie Dendrocronológica de Anomalía de Caudal

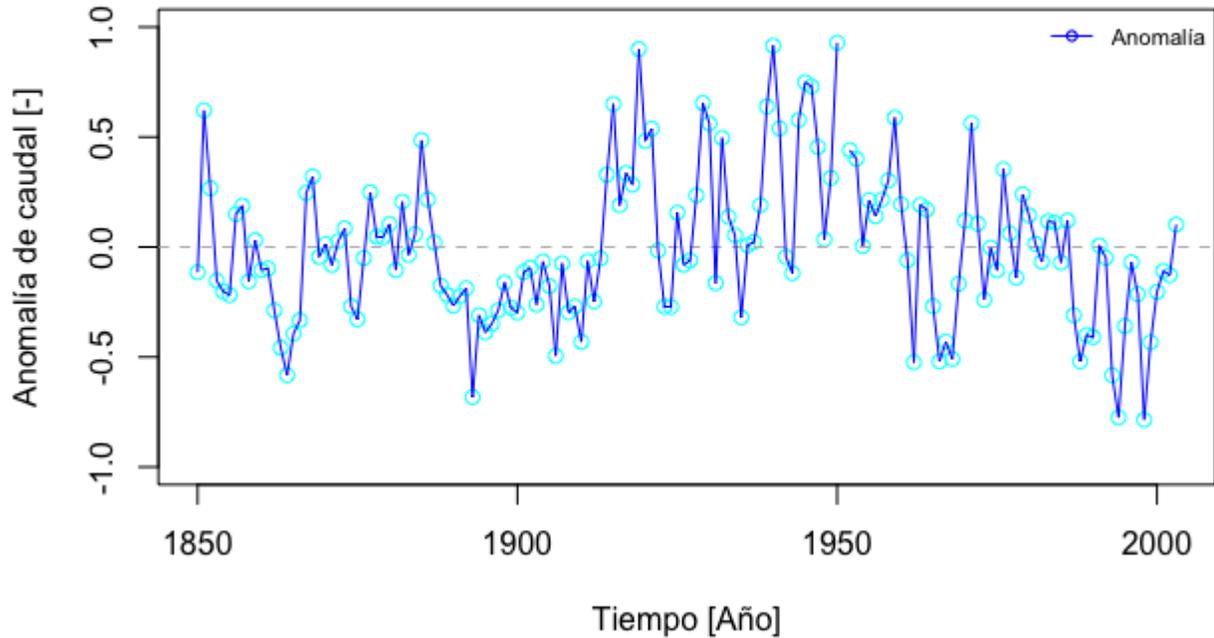


Figura 4.2: Serie de anomalía de caudal entre 1850 y 2003. Fuente: Muñóz *et al.*, 2016.

**Modelos de Circulación General (MCG):** se seleccionaron aquellos con resolución temporal diaria y presentaban información de precipitación, temperatura mínima diaria y temperatura máxima diaria. Dada la escasez de productos con data desde 1825, se acortó el período de estudio al abarcado entre 1850 y 2014, obteniéndose solamente tres MCG desarrollados por el *Max Planck Institute for Meteorology* (MPI), *Norwegian Earth System Model* (Nor) y *Canadian Earth System Model* (Can) (Tabla 4.1). Los experimentos históricos que abarcan el período en donde existen observaciones climáticas, reflejan cómo los MCG simulan el clima pasado y pueden ser utilizados como referencia temporal para simular escenarios futuros.

- **MPI-ESM1** (Gutjahr *et al.*, 2018): corresponde a la primera versión del *Max Planck Institute Earth System Model* (MPI-ESM1.2) para el *High-Resolution Model Intercomparison Project* (HighResMIP). Analiza los efectos del incremento de resolución horizontal del océano (de  $0.4^\circ$  a  $0.1^\circ$ ) y la atmósfera en su conjunto, cambios en el esquema de cobertura vegetal, entre otros.

- **Nor-ESM2** (Seland *et al.*, 2020): corresponde a la segunda versión del *Norwegian Earth System Model*. Se basa en la segunda versión de *CESM2 Community Earth System Model*, con distintas entradas de modelos de océano y bioquímica, una nueva modelación de aerosoles en la atmósfera con largas interacciones entre aerosol, radiación y nubes, junto con cambios asociados a la formulación de energía, el esquema de convección y conservación de momentum angular, modificaciones de albedo y flujos turbulentos entre el aire y el océano. Además, posee cambios menores en los modelos de uso de suelo y hielo. Este modelo es menos sensible a forzantes de gases de efecto invernadero que sus predecesores y considera la respuesta a futuros escenarios socioeconómicos del *Scenario Model Intercomparison Project* definido por CMIP6.
- **Can-ESM5** (Swart *et al.*, 2019): corresponde a la quinta versión del *Canadian Earth System Model*. Corresponde a un MCG desarrollado para simular cambios históricos en el clima y su variabilidad, con el propósito de crear proyecciones para escenarios futuros de cambio climático, y así poder generar predicciones estacionales a escala de décadas.

Tabla 4.1: Características de los Modelos de Circulación General MPI, Nor y Can.

Modelo de Circulación General	MPI	Nor	Can
Resolución Espacial	$\sim 0.93^\circ \times \sim 0.93^\circ$	$\sim 2.5^\circ \times \sim 2.5^\circ$	$\sim 2.8^\circ \times \sim 2.8^\circ$
Resolución Temporal	Diaria	Diaria	Diaria
Año Bisiesto	Sí	No	No
Unidades Precipitación	kg m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup>	kg m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup>	kg m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup>
Unidades Temperatura	[K]	[K]	[K]

En la Figura 4.3 se presentan la serie de temperatura media anual para los tres modelos de circulación general previo al escalamiento estadístico, junto con las regresiones lineales obtenidas entre 1850 y 2014 en año gregoriano. Se identifica que para los MCG MPI y Nor existe un aumento de temperatura en el tiempo, mientras que el MCG Can describe disminuciones de temperatura en el periodo estudiado. Además, se presentan las precipitaciones medias anuales para los tres MCG estudiados (Figura 4.4), donde se identifica que los tres modelos proyectan disminuciones de precipitación entre 1850 y 2014. Lo último, coincide con el estudio de González *et al.*, (2020), donde se analiza una serie temporal de precipitación regional formada por siete registros meteorológicos de Chile centro-sur (37°-42° S) que cubren el periodo 1900-2019, y concluye que existe una disminución de eventos húmedos de precipitación desde 1950 a la fecha.

### Temperatura media anual MCG

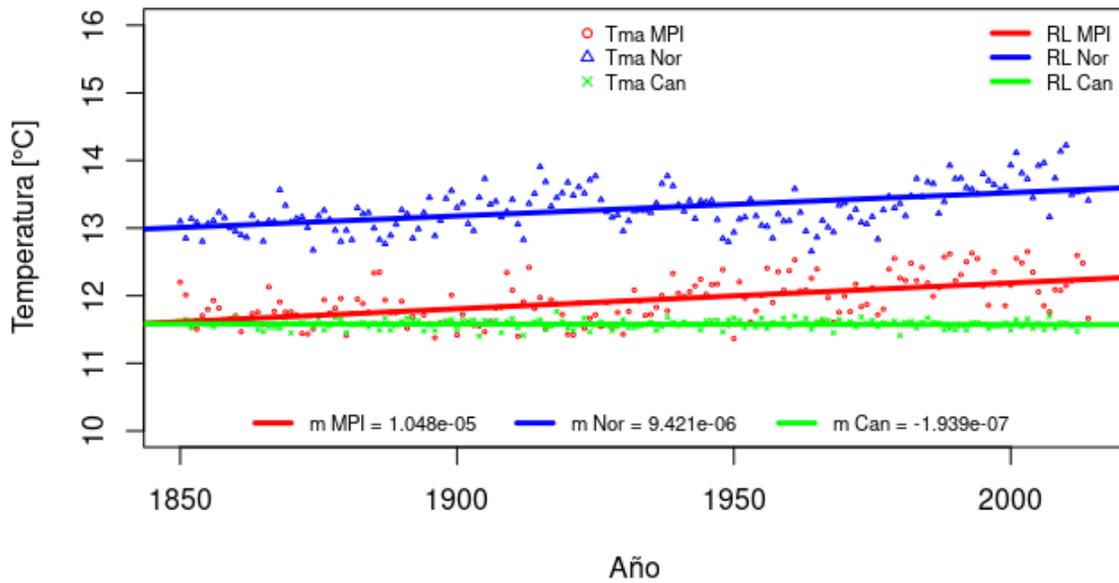


Figura 4.3: temperaturas medias anuales, regresión lineal y pendiente de los modelos de circulación general MPI, Nor y Can entre 1850 y 2014 para la cuenca río Bío bío en desembocadura.)

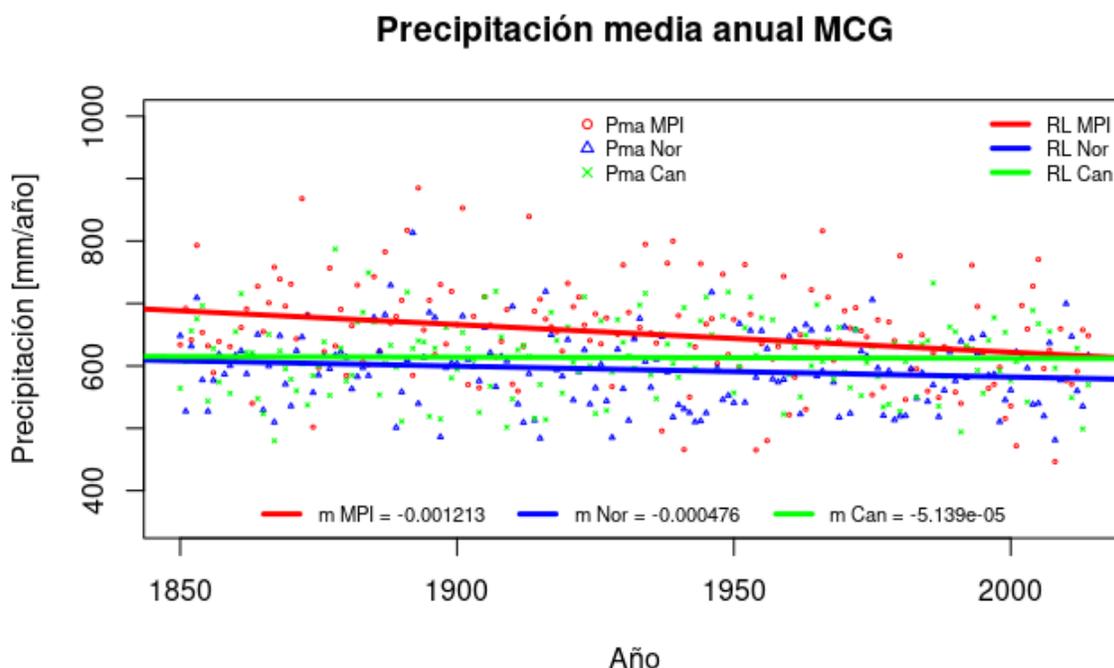


Figura 4.4: Precipitaciones medias anuales, regresión lineal y pendiente de los modelos de circulación general MPI, Nor y Can entre 1850 y 2014 para la cuenca río Bío Bío en desembocadura.)

**Cobertura de suelo:** se utiliza el mapa de cobertura de Zhao *et al.* (2016). Este fue desarrollado utilizando imágenes de Landsat 8, y suplementado con el índice de vegetación mejorado de MODIS, imágenes de Google Earth y el modelo de elevación digital del Radar Topography Mission.

El producto tiene resolución espacial de 30 metros e identifica 3 niveles de coberturas de suelo para Chile continental. El primero, se refiere de forma generalizada a los tipos e cobertura (cultivos, bosques, pastizales, matorrales, humedales, cuerpos de agua, superficies impermeables, suelo desnudo, hielo y nieve, y nubes). El segundo nivel, desagrega dichas categorías en coberturas más específicas y, el tercero, en categorías aún más específicas. Por ejemplo, la cobertura de bosque de nivel 1 (clase 200) se separa en cinco categorías: nativo de hoja ancha (clase 210), nativo de coníferas (clase 220), mixtos (clase 230), plantaciones de hoja ancha (clase 240) y plantaciones de coníferas (clase 250). Luego, en el nivel 3 subdivide las categorías de bosque nativo en primarios (XX1) y renovales (XX2), y las plantaciones en adultas (XX1) y cosechas (XX2). Esto permite obtener un total de 10 clases de cobertura de suelo de nivel 1, 30 clases de nivel 2 y 35 clases en el nivel 3.

En el BHN se utilizaron las clases de cobertura de nivel 1, asignando parámetros vegetacionales para cada una de las 10 coberturas de suelo. En el presente estudio, se añaden

dos coberturas a partir del producto mencionado, agrupando en bosque nativo las clases 210 y 220, y en plantaciones forestales las clases 240 y 250. En la Sección 4.2.3.2 se detalla la metodología utilizada para la determinación de los parámetros vegetacionales de ambas clases.

En la Figura 4.5 se presentan las coberturas de suelo del producto de Zhao *et al.*, 2016 de nivel 2 para bosque en la cuenca del río Bío bío, identificando tres de las cuencas utilizadas en la reconstrucción con anillos de árboles y mostrando un acercamiento a su cobertura.

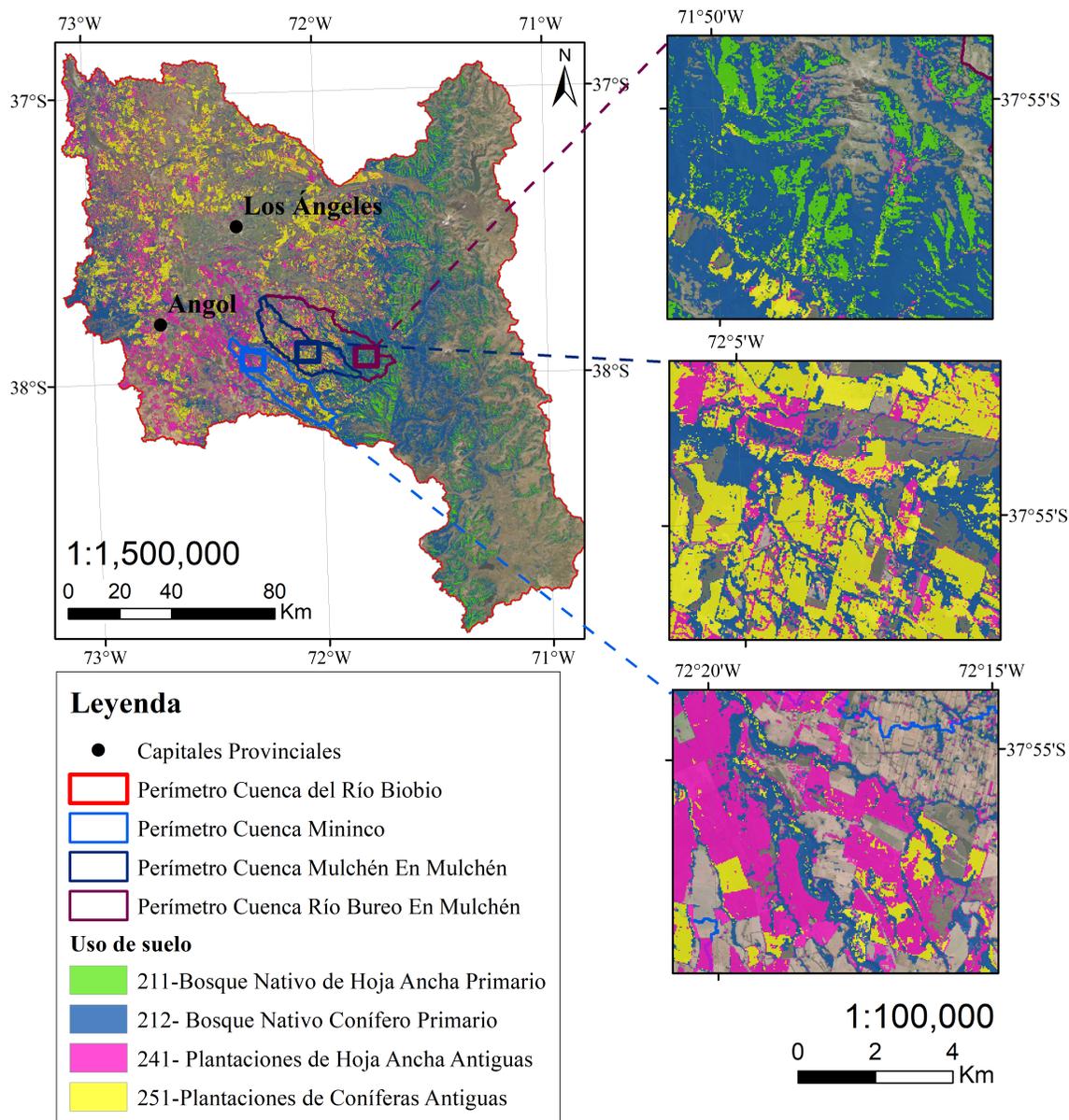


Figura 4.5: Cobertura de suelo de bosque nivel 2 según la cobertura de Zhao et al. (2016), en Cuenca del río Bío bío, con acercamientos a cuencas utilizadas en la reconstrucción de caudales.

## 4.2. Metodología

### 4.2.1. Generación de forzantes meteorológicas para el modelo VIC

El modelo hidrológico VIC utiliza cuatro tipos de información: archivos de parámetros globales (son aquellos que definen las rutas del modelo para identificar la ubicación de los otros archivos y conjuntos de datos, junto con las fechas de inicio y termino de las simulaciones, los modos de operación, etc.), las forzantes meteorológicas (grilladas y con resolución temporal tri-horaria), los archivos de parámetros (distribuidos espacialmente y que permiten representar las coberturas, como las capas de suelo y su interacción) y los archivos necesarios para iniciar el modelo VIC (dominio del modelo). La calibración, junto con los parámetros de suelo, vegetación (nivel 1), precipitación y nieve utilizados, corresponden a aquellos obtenidos de la Actualización del Balance Hídrico Nacional (DGA,2018).

A continuación, se explica la metodología utilizada para la generación de forzantes meteorológicas para el modelo hidrológico VIC.

#### 4.2.1.1. Escalamiento espacial de precipitación y temperatura

Se utilizó *Multivariate Quantile Mapping Bias Correction* (Cannon *et al.*, 2018). Este método corresponde a la actualización del método Método Quantil Delta Mapping (QDM) (Cannon *et al.*, 2015), en donde se realiza una corrección de sesgo multivariable utilizando QDM y la función transformada de densidad de probabilidad N-dimensional.

Los datos se descargan en formato de netCDF, un formato de archivo en donde cada paso temporal posee una grilla espacial con el valor de la variable en estudio, para cada celda. Para poder manipular los datos en una resolución más fina, se realizó el procedimiento de *downscaling* o escalamiento espacial, el cual permite obtener información a una resolución más fina.

La primera parte, se basa en poder generar archivos raster con resolución espacial fina (equivalente a CR2MET - 0.05°) a partir de los MCG, los cuales tienen resolución horizontal gruesa (4.1). Esto se realiza utilizando la Ecuación 4.1, la cual genera un valor de una variable (precipitación diaria, temperatura media diaria o temperatura máxima diaria) para una celda de escala fina, a partir de los valores de los cuatro píxeles más cercanos de la grilla gruesa para la misma variable.

$$X_{rf,i} = \frac{\sum_{n=1}^4 \frac{X_{rg,i}}{d_i}}{\sum \frac{1}{d_i}} \quad (4.1)$$

Donde:

- $X_{rf,i}$  corresponde al valor obtenido para la variable  $i$  a partir de los píxeles de los archivos raster de los MCG en la grilla de resolución espacial fina.

- $X_{rg,i}$  corresponde al valor generado por los MCG en resolución gruesa para la variable  $i$  en la grilla de resolución espacial gruesa.
- $d_i$  corresponde a la distancia entre el centroide el pixel  $n$ .

Luego, se realiza la corrección de sesgo utilizando el método *Multivariate Quantile Mapping Bias Correction* de Cannon *et al.* (2018), descrito en la Sección 2.5. Con lo anterior, se obtienen series diarias de precipitación, temperatura máxima y mínima con corrección de sesgo. En la Sección 4.2.2 se detalla la metodología empleada para generar series tri horarias de precipitación, temperatura, humedad relativa y velocidad del viento.

## 4.2.2. Desagregación temporal

Después de realizar el escalamiento espacial de los MCG a la grilla de CR2MET, se analizan las distribuciones de la precipitación y temperatura en rangos tri-horarios, con el fin de encontrar relaciones estadísticas para generar series tri horarias a partir de datos diarios. En el caso de la precipitación, se determinaron coeficientes mensuales cada tres horas, y en el caso de la precipitación, se utilizó el método de Mendoza *et al.*, 2010.

Para la precipitación y la temperatura se utilizaron las series obtenidas para cada MCG (MPI, Nor y Can) a partir de MBCn, descrito en la Sección 4.2.1.1. Previo a la desagregación temporal, se completaron los datos de los días 29 de febrero en los años bisiestos de los MCG Nor y Can. Determinando dichos valores como el promedio simple entre la variable del día 28 de febrero y el 1 de marzo de aquellos años bisiestos.

En el caso de la humedad relativa y velocidad del viento se utilizaron las forzantes del Balance Hídrico Nacional en el periodo histórico (1979-2014) obtenidas a partir de ERA5, con el objetivo de generar series sintéticas utilizando un método estadístico en el periodo proyectado(1850-1978). El método se describe en la Sección 4.2.2.3

### 4.2.2.1. Estimación de precipitación

Para la generación de series tri-horarias de precipitación a partir de valores diarios se determinaron coeficientes de precipitación tri horaria a nivel mensual en base al producto grillado de CR2MET utilizado en el Balance Hídrico Nacional, con el fin de tener una aproximación de distribución intra-diaria para los días de lluvia. Estos coeficientes se obtuvieron utilizando la Ecuación 4.2:

$$C_{i,j} = \frac{\sum PP_{i,j}}{\sum PP_{m_j}} \quad (4.2)$$

Donde:

- $C_{i,j}$  corresponde al coeficiente de precipitación acumulada en un entre un periodo tri horario  $i$  para un mes  $j$ .

- $PP_{i,j}$  es la precipitación acumulada observada entre un periodo tri horario  $i$  para un mes  $j$ , obtenida de las entradas del BHN.
- $PPm_j$  corresponde a la precipitación acumulada en el mes  $j$ .

Luego, se generan las series de precipitación tri horarias multiplicando los valores diarios de precipitación obtenidos para los tres MCG tras la corrección de sesgo y relleno de datos (29 de febrero) con los coeficientes determinados previamente. Esto se realiza por medio de la Ecuación 4.3:

$$PP_{i,j} = PPd_j \cdot C_{i,j} \quad (4.3)$$

Donde:

- $PP_{d,i,j}$  es la precipitación acumulada para el día  $d$ , en el periodo tri horario  $i$  en el mes  $j$ .
- $PPd_{d,j}$  es la precipitación acumulada diaria para el día  $d$  en el mes  $j$ .
- $C_{i,j}$  corresponde al coeficiente de precipitación acumulada en un entre un periodo tri horario  $i$  para el mes  $j$ , determinado en la Ecuación 4.2.

#### 4.2.2.2. Estimación de temperatura

Para la desagregación tri horaria de la temperatura se utilizó el método de desagregación temporal de temperatura descrito por Hreinsson *et al.* (2008), el cual considera una distribución sinusoidal de la temperatura a lo largo del día. De esta forma, la temperatura máxima y la temperatura mínima tendrán una diferencia de 12 horas. Se utilizaron las series de temperatura máxima y mínima diaria obtenidos tras la corrección de sesgo y el relleno de datos (años bisiestos) para los tres MCG, empleando la Ecuación 4.4 para generar valores tri-horarios de temperatura:

$$T(t) = -\frac{1}{2} \sin\left(\frac{2\pi}{24}(t + \varphi)\right)(T_{max} - T_{min}) + \frac{1}{2}(T_{max} + T_{min}) \quad (4.4)$$

Donde:

- $T(t)$  corresponde a la temperatura para la hora  $t$  en un día.
- $\varphi$  es un parámetro de ajuste de ocurrencia de temperaturas extremas.
- $T_{max}$  corresponde a la temperatura máxima diaria.
- $T_{min}$  corresponde a la temperatura mínima diaria.

Mediante el análisis de las series de temperaturas diarias utilizadas en el Balance Hídrico Nacional se identificó que las temperaturas mínimas y máximas tenían registro a las 03:00 y las 15:00, respectivamente. En base a lo anterior, se determinó que  $\varphi$  es igual 3.4, lo cual permite fijar los mínimos y máximos de la curva sinusoidal de temperatura a las horas observadas, lo cual coincide con aquellas identificadas por Hreinsson *et al.* (2008).



Los pasos del método son:

- Identificación de la función de distribución de probabilidad que mejor se adecue al comportamiento de la variable (HR y VV) en el periodo histórico utilizando inspección visual e índices estadísticos como el test de Kolmogorov-Smirnov y Anderson-Darling, junto con criterios de ajuste como el criterio de Akaike y Bayesiano. Se utilizaron las funciones de distribución de probabilidad normal, log-normal y gamma.
- Para cada una de las celdas de la zona de estudio se generan cuatro matrices. Estas poseen valores tri horario y mensual (8 columnas y 12 filas) de promedio y desviación estándar para días de lluvia y días secos, tanto para HR como para VV en el periodo histórico, obteniendo un total de ocho matrices por pixel.
- Una vez que se obtiene la distribución de probabilidad que mejor se adecua, el promedio de HR y VV, y la desviación estándar de ambas a nivel tri-horario mensual, se procede a generar para cada pixel las series sintéticas de las variables en estudio en el periodo proyectado, utilizando las matrices de promedio y desviación estándar de día seco o con lluvia (según la información proveniente de la serie de precipitación diaria obtenida tras la corrección de sesgo y el relleno de datos).

En base al análisis mencionado, se utilizó la función de distribución log-normal para la velocidad del viento y normal para la humedad relativa.

### 4.2.3. Generación de Simulaciones

Para la generación de simulaciones se generaron cuatro experimentos para cada MCG, junto con dos coberturas de suelo para plantaciones forestales (PF) y bosque nativo (BN). La metodología se detalla a continuación:

#### 4.2.3.1. Definición de escenarios

Para cada MCG se realizaron cuatro simulaciones (Figura 4.7). Los casos se describen a continuación:

- **Caso 0:** en este experimento se utiliza la cobertura de bosque y los parámetros vegetacionales de VIC desarrollada en la actualización del Balance Hídrico Nacional (BHN). Esta categoría no distingue entre plantaciones forestales, y presenta parámetros como *Leaf Area Index* (LAI), distribución y largo de raíces con discretización espacial (es decir, no todas las celdas utilizan los mismos valores).
- **Caso 1:** en este caso, se identifican las celdas de bosque del Caso 0 en las que existe mayor proporción de plantaciones forestales (PF) utilizando producto de Zhao *et al.*, 2016, el cual permite distinguir cuatro categorías de bosque. Aquellas celdas identificadas como celdas de PF corresponden a las que presenten mayor cobertura de plantaciones de coníferas y plantaciones de árboles de hoja ancha (ambas monocultivo) que bosque

nativo de hoja ancha y bosque nativo de coníferas. Para las simulaciones de este caso, se mantuvieron las fracciones de clases de cobertura de suelo obtenidas de BHN. Por otro lado, se crearon dos categorías de clases de cobertura de suelo, asociadas a las plantaciones forestales (PF) y bosque nativo (BN), descritas previamente en la Tabla 4.3.

- **Caso 2.a:** este experimento sintético se basa en la idea de representar la máxima cobertura permitida en caso de que cada píxel que en los casos 0 y 1, aumentase su cobertura al máximo permitido, es decir, que la totalidad de la celda posea cobertura de bosque nativo. Se utilizaron los parámetros vegetacionales obtenidos para bosque nativo (BN), presentados en la Tabla 4.3.
- **Caso 2.b:** al igual que el experimento 2.b, intenta representar el escenario de máxima cobertura permitida al aumentar a su totalidad la fracción de píxel de bosque utilizada en los casos 0 y 1, y utilizando los parámetros vegetacionales de plantación forestal (PF) presentados en la Tabla 4.3.

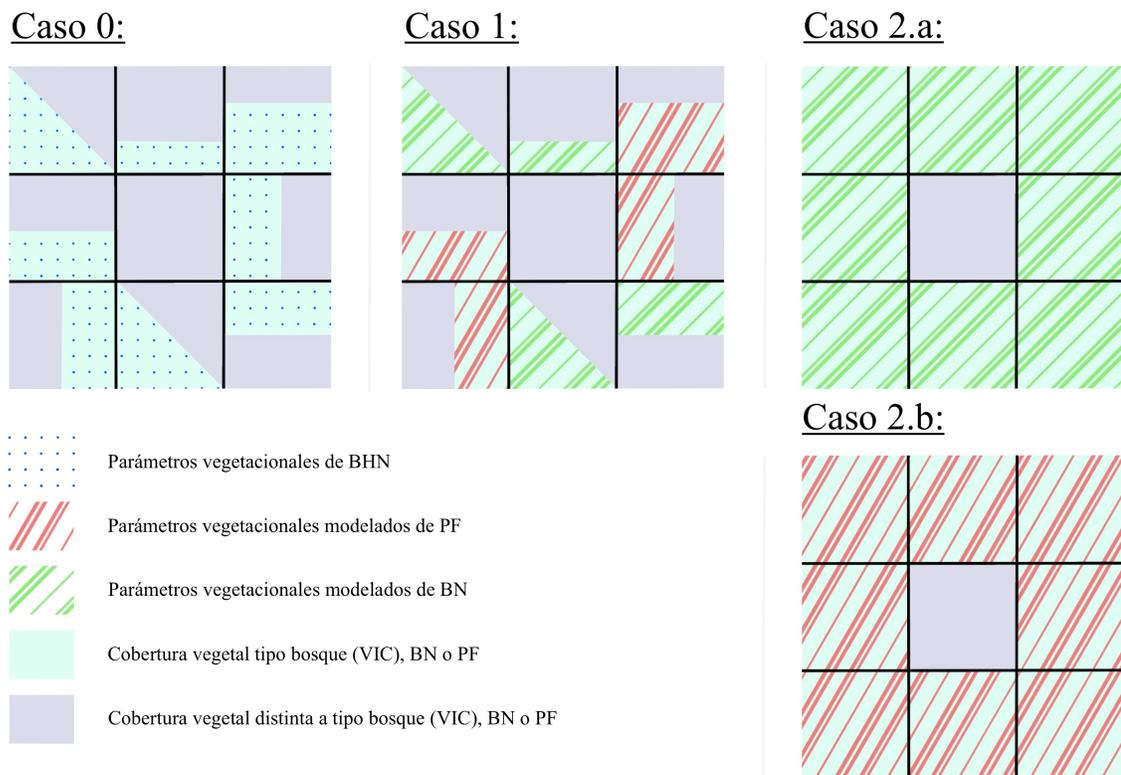


Figura 4.7: Esquema de simulaciones realizadas para la cuenca del río Bío Bío entre 1850 y 2014 para MPI, Nor y Can.

#### 4.2.3.2. Determinación de parámetros vegetacionales

Ante la escasez de información disponible de parámetros vegetacionales para las cuatro clases de cobertura de bosque identificadas en la Figura 4.5, se optó por la optimización de dichos parámetros en base a la reducción de cuatro clases a dos: bosque nativo y plantación forestal. Donde se supone que las clases 210 y 220 representan BN, mientras que las clases 240 y 250 se asocian a PF.

Asimismo, Sepúlveda *et al.*, (2021), analizó la sensibilidad de 43 parámetros de suelo, vegetación y nieve para 101 cuencas que representan la variabilidad hidro climática en Chile, utilizando el método DELSA. Se identificó mediante un análisis de correlación que variables climáticas como la precipitación media anual y el índice de aridez controlan la sensibilidad de parámetros. Específicamente, en ambientes húmedos se identificó que la resistencia arquitectónica mínima ( $R_{min}$ ) y el índice de área foliar (LAI) son los parámetros vegetales de mayor sensibilidad. Por lo que se enfatizó en la obtención de dichos parámetros.

Para determinar el índice de área foliar, se analizaron los valores de en las celdas de VIC en régimen natural (Figura 4.1) que Zhao *et al.*, (2016), identifica como plantaciones de coníferas o bosque nativo de hoja ancha. Para ello, se determinaron los píxeles del producto de cobertura vegetal dentro de cada pixel de la grilla de CR2MET, siguiendo los siguientes criterios:

- Se considera que el LAI de la celda representa BN, en caso de que la suma de las clases 210 (bosque nativo de hoja ancha) y 220 (bosque nativo conífero), sea superior a la suma de las clases 240 (plantaciones de árboles de hoja ancha) y 250 (plantaciones de coníferas), y que además, se cumpla que la cantidad de celdas de clase 210 sea mayor a la cantidad de celdas de la clase 220.
- Se considera que el LAI de la celda representa PF, en caso de que la suma de las clases 240 y 250, sea superior a la suma de las clases 210 y 220, y que además, se cumpla que la cantidad de celdas de clase 250 sea mayor a la cantidad de celdas de la clase 240.

En base a lo anterior, se determina a nivel mensual la mediana de los valores obtenidos para LAI de PF y BN. Los resultados se presentan en la Tabla 4.2. Los valores obtenidos se contrastaron con estudios de *Leaf Area Index* de Xie *et al.*, (2007) (BN) y Peduzzi *et al.*, (2011) (PF). El primero, señala que los valores mensuales de LAI para un bosque de hoja caduca varía entre 1,52 y 5,00, variación ligada al desprendimiento de las hojas en invierno. El segundo, identifica que el rango de variación para el LAI mensual en cuencas de Carolina del Norte y Virginia (clima sub-húmedo) es entre 0,45 y 4,91.

Tabla 4.2: Valores de LAI mensuales

Tipo de Cobertura / LAI	Bosque Nativo	Plantación Forestal
LAI Enero	5.05	3.64
LAI Febrero	4.68	3.28
LAI Marzo	4.14	3.05
LAI Abril	2.80	2.77
LAI Mayo	1.50	2.28
LAI Junio	0.76	1.52
LAI Julio	0.75	1.89
LAI Agosto	0.95	2.25
LAI Septiembre	1.57	3.07
LAI Octubre	2.68	3.84
LAI Noviembre	4.30	4.20
LAI Diciembre	4.98	3.90

En base a la literatura, se observa que los valores de LAI mensual obtenidos para PF se ubican dentro del rango identificado en Peduzzi *et al.*, (2011), mientras que el BN tiene valores inferiores entre junio y agosto a los identificados por Xie *et al.*, (2007) entre junio y agosto.

Con respecto a la resistencia de  $R_{min}$ , estos fueron obtenidos en base a estudios de bosque siempreverde de hoja de aguja *Needleleaf* para el caso de monocultivo, y bosque de hoja caduca para bosque nativo. Esta suposición se realiza en base a que más del 60% de las plantaciones forestales son de *Pinus Radiata*, y más del 60% del bosque nativo tiene hojas caducas. Además, se agregaron parámetros asociados a las densidades y profundidades de las raíces, y la resistencia estomática ( $R_{arc}$ ). Los valores utilizados y su referencia se presentan en la Tabla 4.3.

Tabla 4.3: Parámetros vegetacionales para BN y PF

Parámetro/ Tipo de Bosque	rmin	rarc	Densidad de raíces	Profundidad de raíces
Valor Bosque Hoja Caduca (BN)	125	60	1	0.36 [m]
Referencia Bosque Hoja Caduca (BN)	(Xie, 2006)	(Xie, 2006)	(Reyes, 2007)	(Reyes, 2007)
Valor Siempreverde de Hoja-Aguja (PF)	250	60	0.83 0.16 0.001	0.5 [m] 1 [m] 2.5 [m]
Referencia Siempreverde de Hoja-Aguja (PF)	(Xie, 2007)	(Xie, 2007)	(Huber, 2000)	(Huber, 2000)

De acuerdo a la clasificación realizada por Gajardo(1994) , en la cuenca del río Bío Bío se describen 8 formaciones vegetacionales con sus respectivas comunidades. Estas formaciones pertenecen a 4 regiones vegetacionales del país: bosque andino patagónico, matorral y bosque esclerófilo, bosque caducifolio y bosque laurifolio.

#### 4.2.4. Comparación con series Dendrocronológicas

Para la comparación de las series dendrocronológicas con los resultados de las simulaciones de escenarios de cobertura actual y con aumento de plantación forestal o bosque nativo, primero se subdividió el periodo de estudio en cuatro periodos: 1850-1900, 1901-1950, 1951-2000 y 2001 a 2013. Luego, se realizó una suma ponderada del valor de caudal diario de los píxeles ubicados en las cuencas de la Figura 4.1 con la fracción de dicha celda en la subcuenca.

La serie de anomalías nos entrega un acercamiento a las variaciones de anomalías de caudal anual entre 1850 y 2003. Para la comparación de las simulaciones obtenidas con la reconstrucción de Muñoz *et al.*, (2016) con aquellas obtenidas en los casos 0, 1, 2.a y 2.b, se generaron series de anomalías de caudal siguiendo la relación de la Ecuación 4.5. Estas anomalías se determinaron utilizando la misma ecuación empleada en el estudio mencionado, manteniendo constante el periodo de tiempo en el que se determinó el promedio y la desviación estándar (1943 a 2003).

$$AQ_i = \frac{Q_{obs_i} - Q_{promedio}}{sd(Q_{obs})} \quad (4.5)$$

Donde:

- $AQ_i$ : corresponde a la anomalía de caudal determinada para el año hidrológico  $i$ .
- $Q_{obs_i}$ : corresponde al caudal simulado con VIC en el año  $i$ .
- $Q_{promedio}$ : corresponde al promedio de la serie de caudales medios anuales obtenidas con VIC entre 1943 y 2003.
- $sd(Q_{obs})$ : corresponde a la desviación estándar de la serie de caudales medios anuales obtenida con VIC entre 1943 y 2003.

#### 4.2.5. Análisis de Estacionalidad

Para el análisis estacionalidad se utilizaron tres métricas: el centroide del hidrograma, índice de estacionalidad invierno-verano e índice de estacionalidad invierno-anual. Estos se definen a continuación:

- Centroide del hidrograma: dentro de un año hidrológico (iniciando el primero de abril y terminando el 31 de marzo del año posterior), corresponde al día en el que ha escurrido la mitad del caudal medio anual. Para su determinación, se realiza un vector con la suma acumulada de los caudales medios diarios (en año hidrológico). Aquel día más cercano a la mitad del caudal anual, se identificará como el centro del hidrograma.
- Índice de estacionalidad invierno-verano (Ecuación 4.6): se determina como la división del caudal medio en los días de invierno por el caudal medio en los días de verano (para un mismo año hidrológico). Este nos permite cuantificar la ponderación de caudales estacionales en la zona de estudio.

$$EIV = \frac{Q_{Ii}}{Q_{Vi}} \quad (4.6)$$

Donde:

- $Q_{Ii}$ : corresponde al caudal acumulado entre abril y septiembre para el año hidrológico  $i$ .
- $Q_{Vi}$ : corresponde al caudal acumulado entre octubre y marzo para el año hidrológico  $i$ .
- Índice de estacionalidad invierno-anual (Ecuación 4.7): se determina como la división del caudal medio en los días de invierno por el caudal medio anual (del mismo año hidrológico).

$$EIA = \frac{Q_{Ii}}{Q_{Ai}} \quad (4.7)$$

Donde:

- $Q_{Ti}$ : corresponde al caudal acumulado entre abril y septiembre para el año hidrológico  $i$ .
- $Q_{Ai}$ : corresponde al caudal media anual para el año hidrológico  $i$ .

#### 4.2.5.1. Change Point Analysis

El *Change Point Analysis* es un método que se utiliza cuando existe una serie de datos con una marcada discontinuidad. Para esto se detectan los puntos de quiebre de tendencia (*Change Points*) en base a diferencias cuadráticas entre la pendiente "por la izquierda" de una serie de datos en un punto, con los la pendiente "a la derecha" de la serie en el mismo punto. La Ecuación 4.8 determina aquel valor  $\Delta^2$ . Cuando este valor es mayor a cero, entonces ese punto presenta un quiebre en la serie de datos.

$$\Delta^2 = \left( \frac{(dA)^+}{dt} - \frac{(dA)^-}{dt} \right)^2 \quad (4.8)$$

Donde:

- $\frac{(dA)^+}{dt}$ : es la pendiente hacia el lado derecho de la serie de valores de A con respecto al tiempo  $t$ .
- $\frac{(dA)^-}{dt}$ : es la pendiente hacia el lado izquierdo de la serie de valores de A con respecto al tiempo  $t$ .
- A: corresponde a la serie de anomalías de caudal de Muñoz *et al.*, 2016.

El método mencionado se realizó para la serie dendrocronológica, pues esta representa temporalidad a diferencia de los Modelos de Circulación General, que no necesariamente están diseñados para replicar el periodo en estudio.

#### 4.2.6. Regresión Lineal Múltiple

Corresponde a un método sencillo que permite establecer una relación lineal entre posibles predictores (anomalías de temperatura mínima, máxima, precipitación observadas y temperatura media) y un predictando (en este caso, la anomalía de caudal observado). Este método tiene como supuestos la no colinealidad de los predictores y la normalidad del predictando. Además, el promedio de los residuos es nulo, distribuye normal con respecto a cero y posee varianza constante. Para la generación del modelo de regresión lineal múltiple, se utilizaron los datos de caudales medios anuales de la subcuenca río Lirquén en cerro El Padre (BNA 8317002), la cual posee un bajo índice de intervención antrópica ( $>0.005$ ), posee una superficie de  $103.4 \text{ km}^2$ , y precipitación media anual de  $2299 \text{ mm}$ , su punto de salida se ubica en la latitud  $-37.78$  y longitud  $-71.86$ . En esta, se verificó la normalidad del predictando,

analizando las funciones de distribución y probabilidad normal y log-normal.

Las anomalías de caudal, precipitación y temperatura se determinaron utilizando las ecuaciones 4.9, 4.10 y 4.11, respectivamente.

$$AQ_i = \frac{Q_{obs_i}}{Q_{promedio}} \quad (4.9)$$

$$AP_i = \frac{P_{CR2MET_i}}{P_{promedio}} \quad (4.10)$$

$$AT_i = \frac{T_{CR2MET_i}}{T_{promedio}} \quad (4.11)$$

Donde:

- $AQ_i$ ,  $AP_i$  y  $AT_i$ : corresponden a las anomalías de caudal, precipitación y temperatura (respectivamente) para el año hidrológico  $i$ .
- $Q_{obs_i}$ : es el caudal medio anual acumulado en año hidrológico entre 1983 y 2013, para el año  $i$ .
- $P_{CR2MET_i}$  y  $T_{CR2MET_i}$ : son las precipitaciones anuales acumuladas y las temperaturas promedio anuales (respectivamente) para el año hidrológico  $i$ .
- $Q_{promedio}$ ,  $P_{promedio}$  y  $T_{promedio}$ : corresponden al promedio de los caudales anuales observados, precipitación acumulada de CR2MET y temperatura media de CR2MET (respectivamente), entre 1883 y 2013.

Se evaluaron siete posibles modelos y se midió su desempeño en base a cuatro métricas: *Predicted Residual Error Sum of Squares* (Ecuación 4.12), criterio de información de Akaike (Ecuación 4.13), *Residual Sum of Squares* (Ecuación 4.2.6) y *Generalized Cross Validation* (Ecuación 4.15). El modelo electo será aquel que presente los menores valores de dichos índices.

- *Predicted Residual Error Sum of Squares* (PRESS): es una forma de validación cruzada utilizada en el análisis de regresión lineal múltiple. Valores cercanos a cero indican un mejor desempeño del modelo.

$$PRESS = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_{-i})^2 = \sum_{i=1}^n \frac{e_i^2}{1 - h_{ii}} \quad (4.12)$$

- Criterio de información de Akaike: es una medida comparativa entre modelos donde los valores cercanos a 0 indican un mejor ajuste y una mayor parsimonia.

$$AIC = -2 \cdot \log(llh) + 2 \cdot p \quad (4.13)$$

Donde:

- $p$ : es el número de parámetros en el modelo estadístico.
  - $llh$ : es el máximo valor de la función de verosimilitud para el modelo estimado
- Residual Sum of Squares (RSS): corresponde a la suma de residuos al cuadrado. El valor óptimo es cero.

$$RSS = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2$$

(4.14)

Donde:

- $y_i$ : corresponde al valor obtenido por el modelo.
  - $\hat{y}_i$ : corresponde al valor observado.
- *Generalized Cross Validation* (GCV): obtiene valores óptimos cuando su valor es cercano a cero.

$$GCV = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{e_i^2}{n}}{(1 - p/n)} \quad (4.15)$$

### 4.2.7. Análisis socio-hidrológico

Con el fin de representar el último punto de los nexos fundamentales, en un estudio socio-hidrológico se realizaron entrevistas a tres comuneros mapuches de distintas localidades de Alto Bío bío. Los entrevistados y la entrevistada se encuentran en el rango etario de entre 24 a 65 años. El propósito de la inclusión de estas entrevistas es la obtención de información de comunidades mapuche que tienen un legado histórico transmitido por vía oral.

La estructura de las entrevistas es de tipo semi estructurado y la pauta de preguntas tiene como objetivo la identificación de variaciones en el río Bío bío, el efecto de las plantaciones de monocultivo y la valoración de especies nativas en la cosmovisión mapuche. Además, se intentó obtener entrevistas de trabajadores de empresas forestales de la zona de estudio, sin embargo, no se obtuvieron testimonios.

La transcripción de estas se encuentra en el Anexo C.

# Capítulo 5

## Resultados

### 5.1. Comparación de Caso 0 con reconstrucción de anomalías

En las Figuras 5.1, 5.2 y 5.3 se contrastan las anomalías de caudal obtenidas para los Modelos de Circulación General MPI, Nor y Can (respectivamente), junto con las reconstrucción de anomalías de caudal de Muñóz *et al.*, 2016. Las series generadas comprenden la zona abarcada en el estudio dendrocronológico (detalladas en la Figura 5.1). Se aprecia que entre 1850 y 2000 el rango intercuartil de las simulaciones es entre 2 y 4 veces el rango intercuartil de la reconstrucción de caudales, mientras que en el último periodo es 9 veces mayor el rango intercuartil de las simulaciones, con respecto a la serie dendrocronológica.

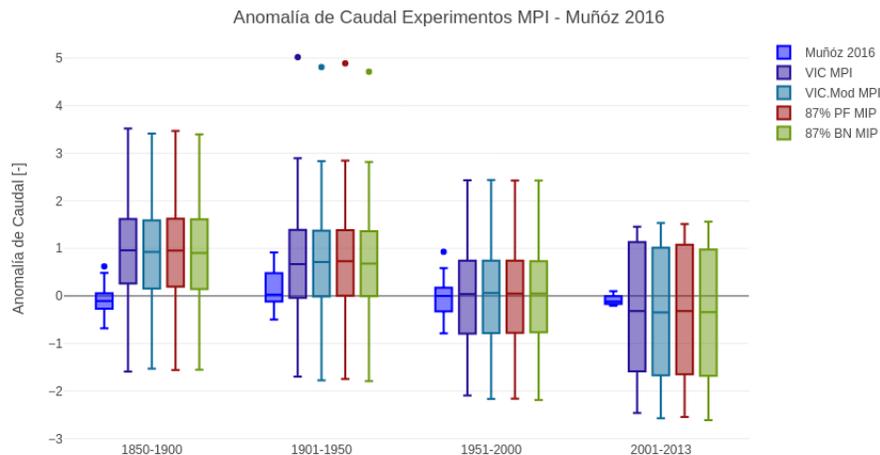


Figura 5.1: Gráfico de cajas de anomalías de caudal para serie dendrocronológica y simulaciones de casos 0, 1, 2.a y 2.b, utilizado MCG MPI entre 1850 y 2014 para cuencas en régimen natural utilizadas en Muñóz *et al.*, 2016.

En la Figura 5.1 se evidencia que el modelo MPI sobrestima los caudales con respecto a la serie dendrocronológica entre 1850 y 1950, mientras que entre 1951 y 2000 presenta tendencias similares en la mediana, y en el periodo más reciente una subestimación de la misma. En cuanto a la dispersión de los cuartiles, se identifica que el último periodo presenta la mayor dispersión entre el primer y tercer cuartil.

En la Figura 5.2 se identifica que (al igual que en el modelo MPI) existe una subestimación de anomalía generada por el modelo VIC al utilizar el MCG Nor como forzante climática durante 1850 y 1900. A diferencia del modelo MPI, el modelo Nor presenta una mayor cercanía con la serie de anomalía entre 1901 y 1950, junto con el periodo 1951-2000. Sin embargo, también subestima la anomalía entre 2001 y 2013.

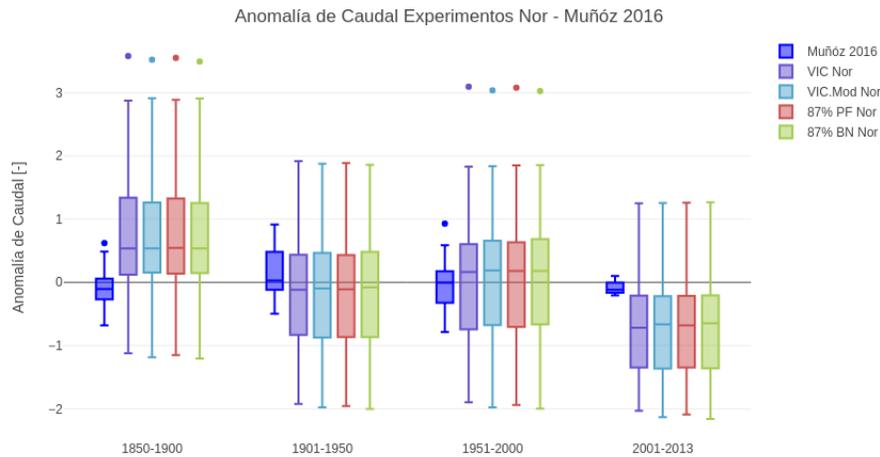


Figura 5.2: Gráfico de cajas de anomalías de caudal medio anual para serie dendrocronológica y simulaciones de casos 0, 1, 2.a y 2.b, utilizado MCG Nor entre 1850 y 2014 para cuencas en régimen natural utilizadas en Muñoz *et al.*, 2016.

En la Figura 5.3 se identifica que las anomalías de caudal anual del modelo Can presentan cercanías en torno a la mediana con respecto a las anomalías de caudal anual de la serie dendrocronológica para los cuatro épocas y casos estudiados. Entre 1901 y 2000, sin embargo presentan variaciones del rango intercuartil entre 2 (1901-1950) a 5 (2001-2013) veces superiores para el caso de las simulaciones.

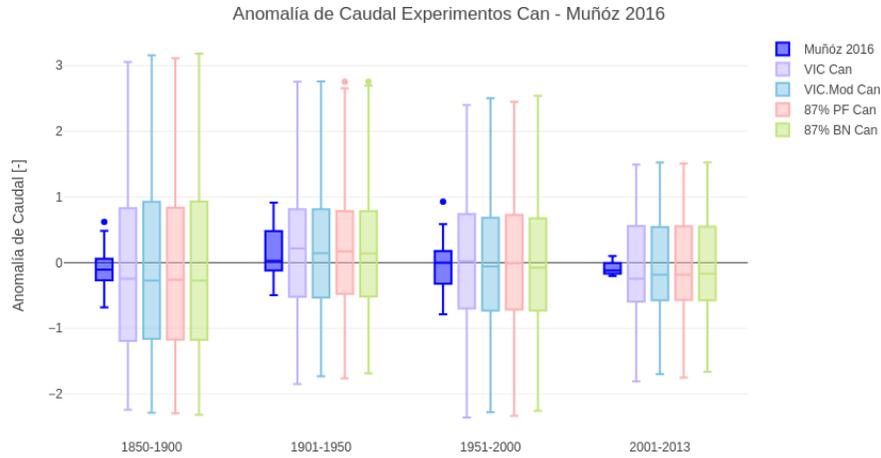


Figura 5.3: Gráfico de cajas de anomalías de caudal para serie dendrocronológica y simulaciones de casos 0, 1, 2.a y 2.b, utilizado MCG Can entre 1850 y 2014 para cuencas en régimen natural utilizadas en Muñóz *et al.*,2016.

En la Figura 5.4, se presentan las anomalías de caudal para los tres MCG en los casos 0 y 1. Se identifica que el periodo en el que existe más cercanía entre las medianas de anomalía de caudal para los tres MCG en los casos 0 y 1 corresponde a 1951-2000 y presentan desviaciones similares en torno al primer y tercer quintil de la muestra. Además, se reconoce que no existen variaciones relevantes en términos de anomalías entre los casos 0 y 1 cuando las forzantes climáticas son las mismas.

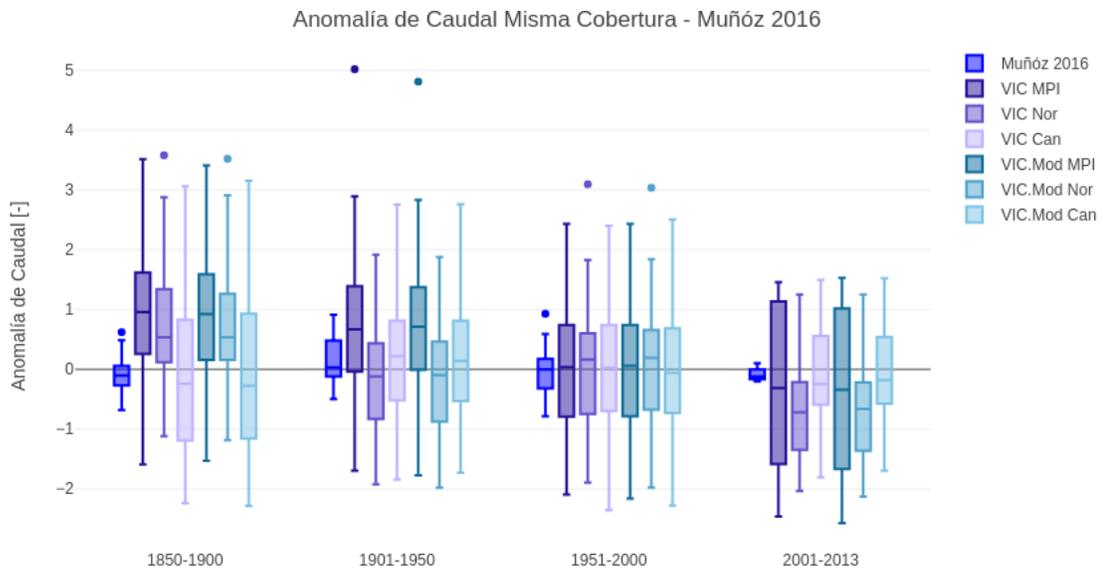


Figura 5.4: Gráfico de cajas de anomalías de caudal para serie dendrocronológica y simulaciones de casos 0 y 1 entre 1979 y 2014 para cuencas en régimen natural utilizadas en Muñóz *et al.*,2016.

En la Figura 5.5, se presentan las anomalías de caudal para los tres MCG en los casos de aumento de bosque nativo (2.a) y aumento de plantaciones forestales (2.b). Se identifica que el MCG más cercano en mediana a las anomalías de reconstrucción de caudal es Can. En cuanto MPI, este sobrestima las anomalías entre 1850 y 1950, y se subestiman entre 2001 y 2014. Con respecto al modelo Nor, este subestima las anomalías de caudal denrocronológicas entre 1850 y 1900. Asimismo, se observa que no existen diferencias en términos de anomalía de caudal entre los casos 2.a y 2.b cuando las forzantes climáticas son las mismas.

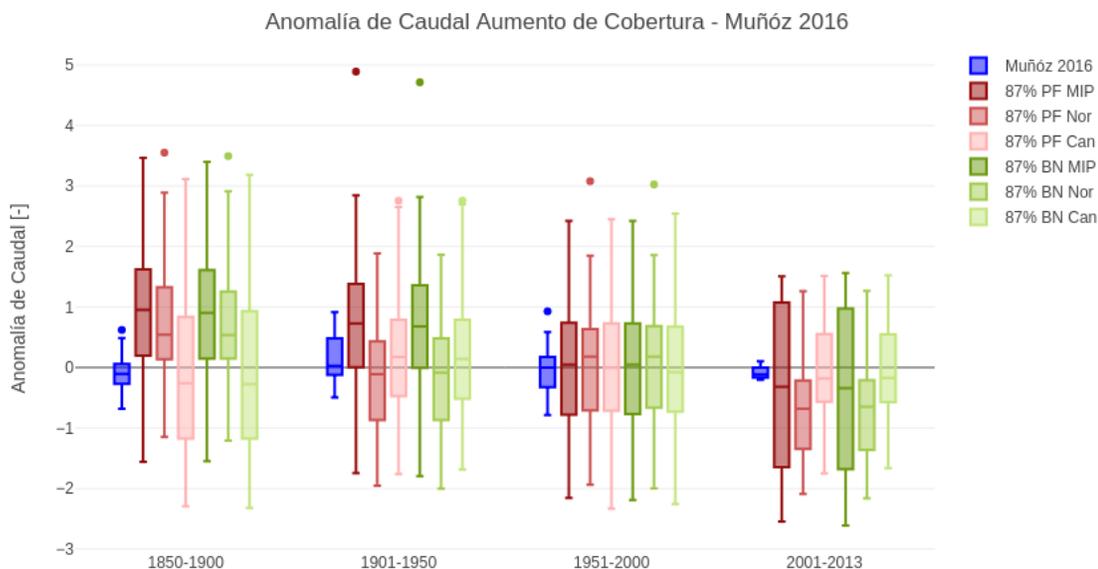


Figura 5.5: Gráfico de cajas de anomalías de caudal para serie dendrocronológica y simulaciones de casos 2.a y 2.b entre 1979 y 2014 para cuencas en régimen natural utilizadas en Muñoz *et al.*, 2016.

## 5.2. Análisis de casos 0, 1, 2.a y 2.b.

En la Figura 5.6 se presenta un gráfico de caja con los caudales medios anuales para los casos 0, 1, 2.a y 2.b para los 3 MCG durante cuatro periodos de interés. En primer lugar, se aprecia una disminución sostenida de caudal medio anual en los distintos periodos evaluados para los tres modelos de circulación general utilizados. A su vez, se observa que existe una tendencia al aumento de caudal medio anual para el experimento sintético con aumento de bosque nativo a una cobertura de 87% (caso 2.a, cajas verdes), con respecto a los otros casos. Al comparar el caso 2.a con el 2.b (cajas rojas), se identifica que a una misma fracción de cobertura de suelo se tiene un alza promedio de +121 mm/año (MPI), +117mm/año (Nor) y +116mm/año (Can) para el experimento de aumento de cobertura de bosque nativo, en comparación al experimento de aumento de cobertura de plantaciones forestales.

Por otro lado, se aprecia que la incorporación de nuevas coberturas de suelo a las categorías de cobertura vegetal obtenidas en el BHN dan como resultado un aumento de caudales medios anuales, con un promedio de +70 milímetros anuales. Esto se identifica al comparar las cajas de color morado (caso 0) y azul (caso 1), donde cada una de las cajas azules representa un alza con respecto a la caja morada (para un mismo MCG durante un mismo periodo).

Asimismo, al comparar el caso 1 (VIC modificado) con el caso 2.b (aumento de cobertura forestal a 87%) se reconoce que para los tres GCM es menor el caudal medio anual en el caso 2.b, con respecto al caso 1. La mediana se reduce en promedio 18,5 mm/año para MPI, 24 mm/año para Nor y 21 mm/año para Can. Mientras que, al comparar el caso 1 con el caso 2.b (aumento de cobertura de bosque nativo) se aprecia un incremento en el caudal medio anual, para el MCG MPI se tiene un alza de 103 mm/año promedio, para Nor 94 mm/año y para Can 94 mm/año. Hay que considerar que en el caso 1 se presenta un 22.44% de cobertura forestal y 26.09% de bosque nativo, mientras que en los casos 2.a y 2.b, se presenta un 87% de BN y PF, respectivamente.

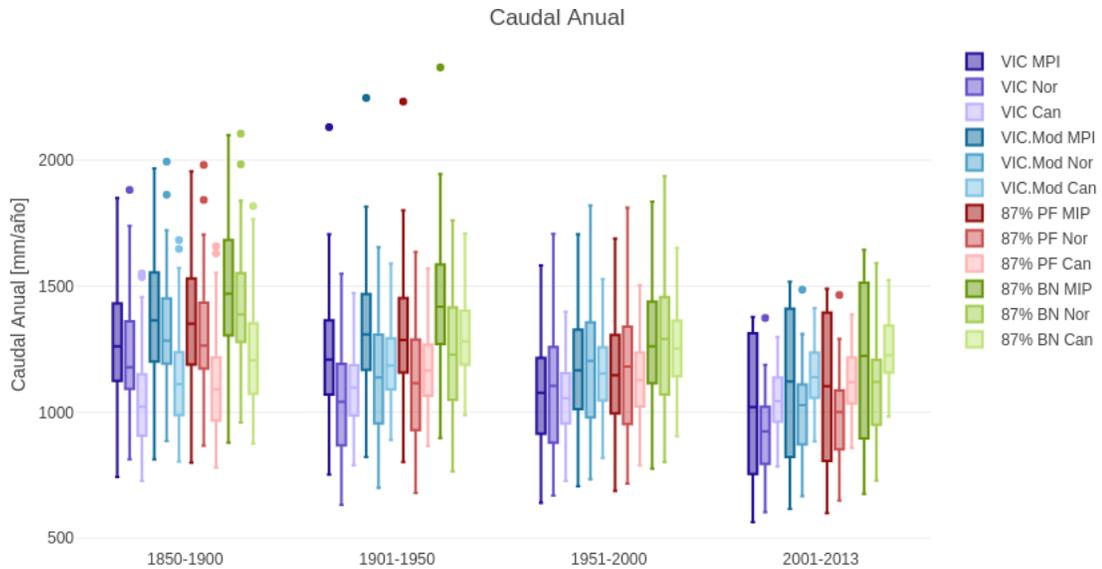


Figura 5.6: Gráfico de cajas de caudales anuales para simulaciones de casos 0, 1, 2.a y 2.b, utilizado MPI, Nor y Can entre 1850 y 2014.

En la Figura 5.7 se observa un gráfico de cajas con valores de caudales mensuales para los cuatro casos, utilizando los tres MCG entre 1850 y 2013. Se observa que existe un incremento en el caudal medio mensual para el escenario de aumento de cobertura de BN al 87% (caso 2.a) entre mayo y septiembre. En relación a los casos 1 (VIC con parámetros modificados) y 2.b (aumento de cobertura de plantaciones forestales), existe un aumento en caudal mensual en mayo y junio con respecto al caso 0 (VIC con parámetros del BHN). En verano, los valores de caudal medio mensual son similares para todos los casos, mientras que, en primavera el escenario de aumento de bosque nativo (caso 2.a) presenta disminuciones en el caudal medio mensual con respecto a los casos 0, 1 y 2.b. Esto indica cambios en la estacionalidad en el caso 2.a. durante el periodo comprendido entre 1850 y 2013, con respecto a los casos 0, 1 y 2.b, reduciendo la componente nival del régimen hidrológico presente en la cuenca del río Bío bío.

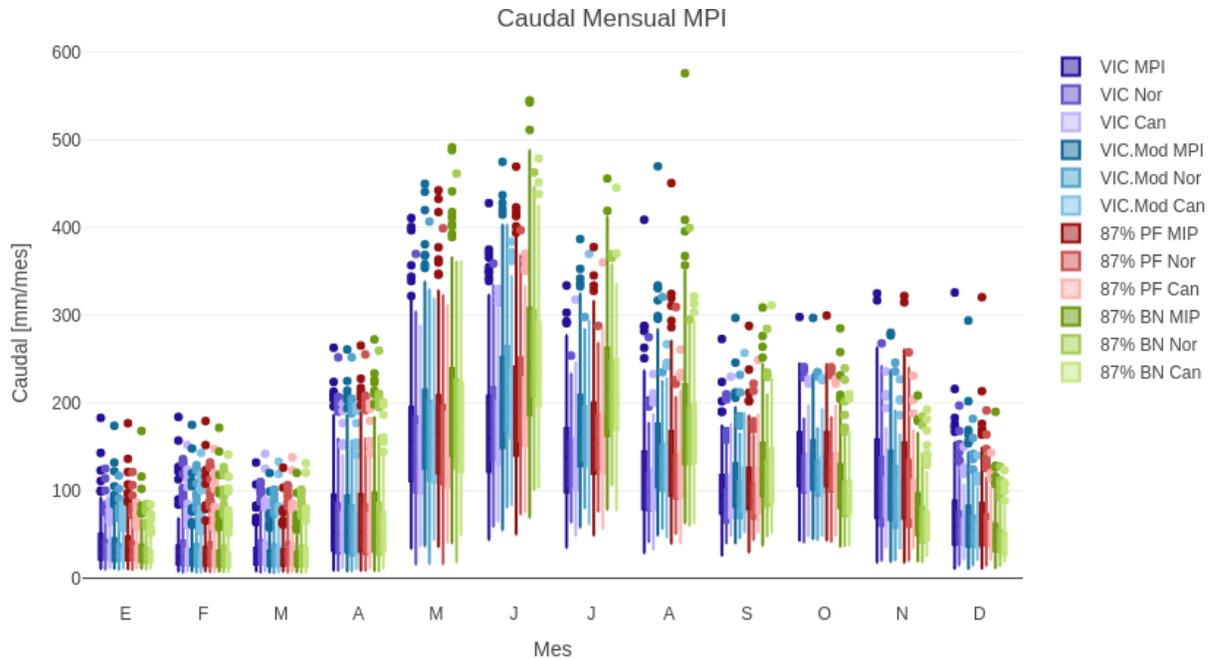


Figura 5.7: Gráfico de cajas de caudales mensuales para simulaciones de casos 0, 1, 2.a y 2.b, utilizado MPI, Nor y Can entre 1850 y 2014.

Con el propósito de analizar cambios en la estacionalidad para los cuatro subperiodos estudiados, se presentan tres gráficos de caja con métricas relacionadas a la forma de los hidrogramas resultantes de las simulaciones: ubicación del centro del hidrograma (Figura 5.8), Índice de estacionalidad invierno-anual (Figura 5.9) e índice de estacionalidad invierno-verano (Figura 5.10).

En la Figura 5.8, se identifica un adelanto de tres semanas entre 1850 y 1950 de la mediana del centro del hidrograma ante el aumento de cobertura vegetal (caso 2.a) con respecto a los casos 0,1 y 2.b, junto con el avance de dos semanas del mismo para el periodo 2001 a 2013 y de una semana durante 1951 a 2000. En cuanto a los casos 0, 1 y 2.b (aumento de cobertura forestal), la mediana del centro del hidrograma del caso 1 se aleja más de la mediana del centro del hidrograma del caso 0 que la del caso 2.b.

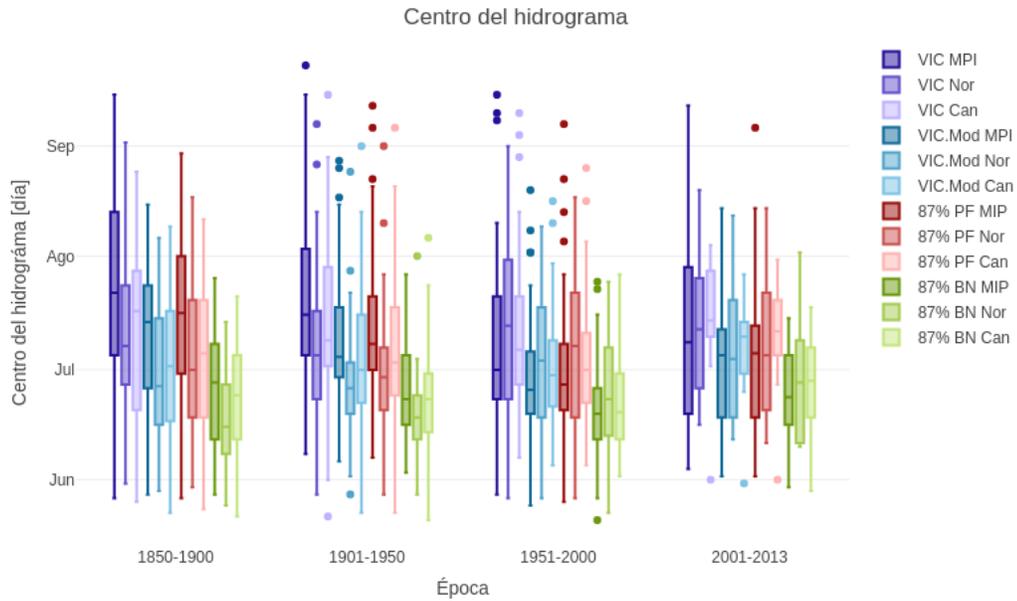


Figura 5.8: Gráfico de cajas de centro del hidrograma en simulaciones de casos 0, 1, 2.a y 2.b, para los MCG MPI, Nor y Can, entre 1979 y 2014 para cuenca del Río Bío Bío.

En la Figura 5.9 se identifica que la proporción de caudal de invierno aumenta hasta en un 34 % ante el aumento de bosque nativo (caso 2.a) con respecto al aumento de plantaciones forestales (caso 2.b) para el modelo MPI durante el periodo 1850-1900. Por otro lado, se evidencia una mayor dispersión en dicha métrica en el último período, alcanzando rangos intercuartiles de 0.18 para caso 0 con el MCG MPI, mientras que en el resto de los periodos el rango intercuartil varía entre 0.04 y 0.1. Esto, se puede asociar a la alta dispersión de los caudales medios anuales durante 2001 a 2013, donde el rango intercuartil varía entre 512 mm/año y 557 mm/año y la desviación estándar varía entre 229 mm/año y 321 mm/año para todos los casos con forzante el MCG MPI.

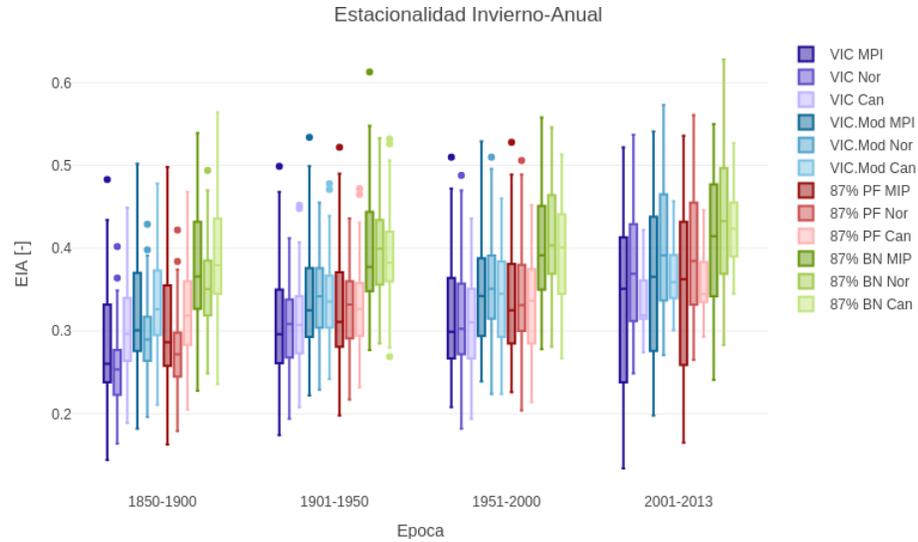


Figura 5.9: Gráfico de cajas de índice de estacionalidad invierno-año en simulaciones de casos 0, 1, 2.a y 2.b, para los MCG MPI, Nor y Can, entre 1979 y 2014 para cuenca del Río Bío Bío.

En la Figura 5.10, se identifica un aumento del índice de estacionalidad invierno-verano en el caso de aumento de bosque nativo (2.a), con respecto a los otros casos. Existe un incremento de un 70 % del índice EIV para el caso 2.a con respecto al escenario de aumento de plantaciones forestales (caso 2.b) durante 2001 y 2013 para el MCG MPI, junto con un aumento de un 27 % a un 50 % para el caso 2.a con respecto al 2.b en los periodos y MCG restantes. Al igual que en el índice de estacionalidad invierno año (Figura 5.9), se evidencia una mayor dispersión durante el periodo 2001 a 2013 para los MCG MPI y Nor, la cual se puede asociar a la alta dispersión de caudales medios anuales durante el mismo periodo. En este caso, se obtiene un rango intercuartil que varía entre 5 (caso 0 Nor) y 10 (caso 2.a Nor) para los MCG MPI y Nor.

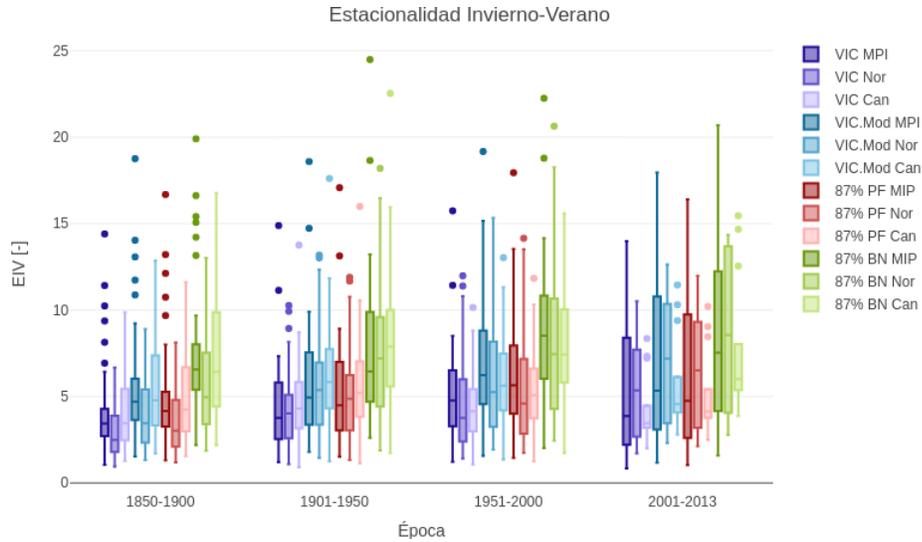


Figura 5.10: Gráfico de cajas de índice de estacionalidad invierno-verano en simulaciones de casos 0, 1, 2.a y 2.b, para los MCG MPI, Nor y Can, entre 1850 y 2014 para cuenca del Río Bío Bío.

### 5.2.1. Análisis de caudales extremos

En cuanto a los escenarios de aumento de cobertura de plantaciones forestales (2.b) y bosque nativo (2.a), se identifica un aumento de escorrentía diaria entre 1850 y 2013 para caudales con probabilidades de excedencia de 20 % (periodo de retorno de 5 años) para el escenario 2.a (aumento de bosque nativo) en comparación al caso 2.b (aumento de plantaciones forestales), obteniendo diferencias de +0,78, +0,85, +0,85 y +0,72 milímetros por día promedio para los tres MCG, en los periodos comprendidos entre 1850 y 1900 (Figura 5.11), 1901 y 1950 (Figura 5.12), 1951 y 2000 (Figura 5.13) y 2001 y 2013 (Figura 5.14), respectivamente. Mientras que para caudales con probabilidades de excedencia de 70 % (periodo de retorno de 1 año y 5 meses), se identificaron disminuciones de escorrentía diaria en el caso 2.a en contraste al escenario 2.b de -0.17, 0.2, -0.21 y -0.21 milímetros diarios promedio para los tres MCG analizados, en los periodos comprendidos entre 1850 y 1900, 1901 y 1950, 1951 y 2000 y 2001 y 2013, respectivamente.

Con respecto a las observaciones y los resultados del BHN (Figura 5.14), se aprecia que ambos coinciden para escorrentías diarias con probabilidades de excedencia del 70 % durante 2001 a 2013, y que a su vez, distan en promedio 0,07 y 0,28 milímetros diarios para dicha probabilidad de excedencia en las simulaciones con los tres MCG en los escenarios de aumento de cobertura 2.a y 2.b, respectivamente.

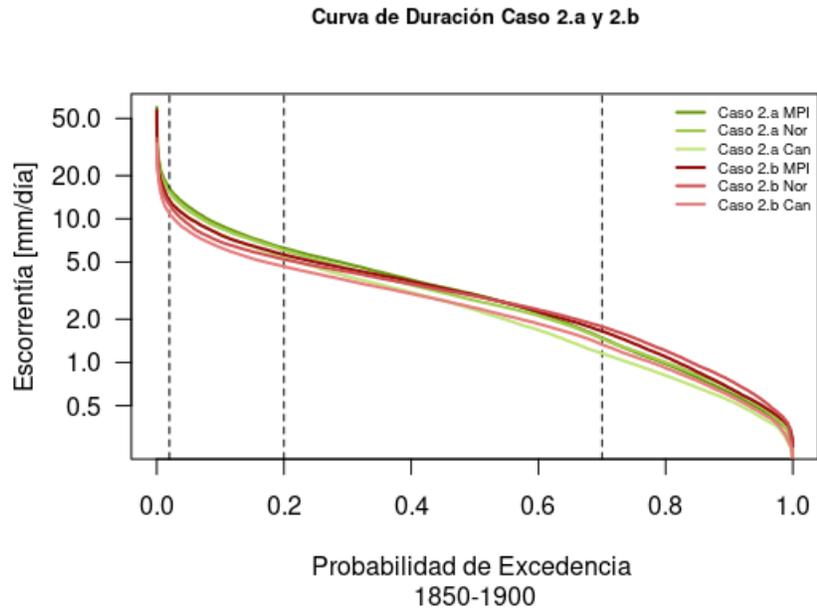


Figura 5.11: Curva de duración para casos 2.a y 2.b, utilizado MPI, Nor y Can entre 1850 y 1900.

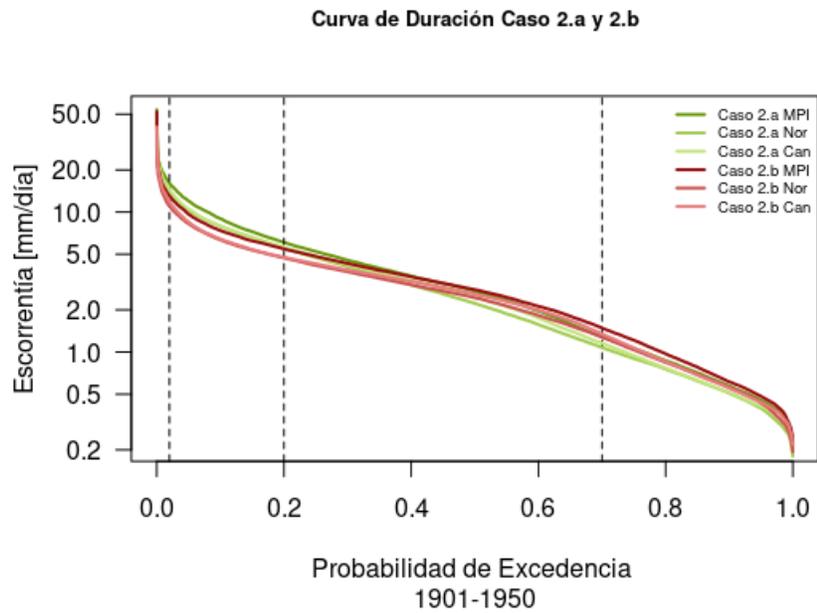


Figura 5.12: Curva de duración para casos 2.a y 2.b, utilizado MPI, Nor y Can entre 1901 y 1950.

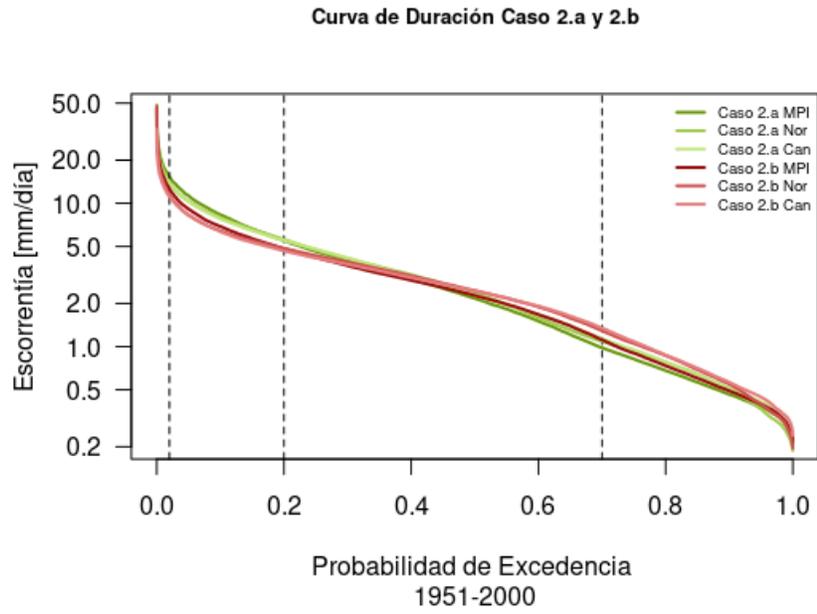


Figura 5.13: Curva de duración para casos 2.a y 2.b, utilizado MPI, Nor y Can entre 1951 y 2000.

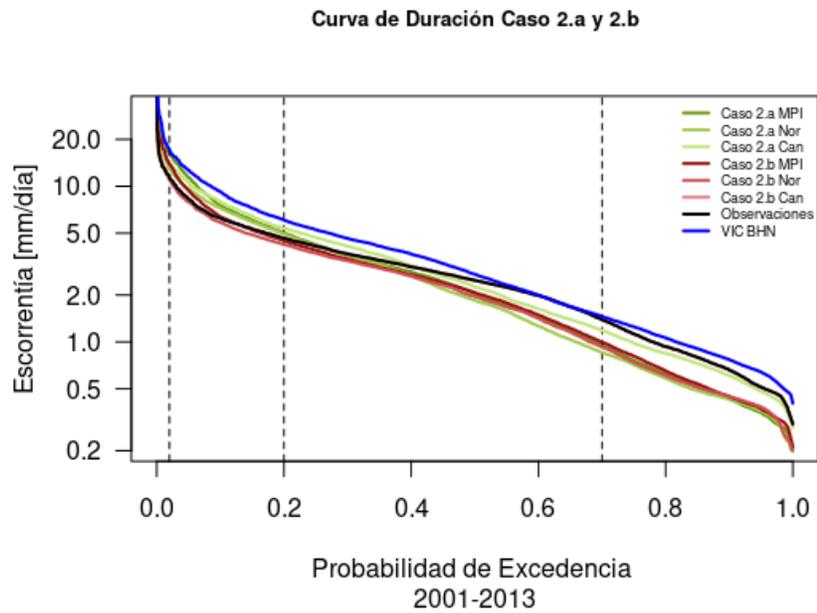


Figura 5.14: Curva de duración para casos 2.a y 2.b, utilizado MPI, Nor y Can entre 2001 y 2013.

En relación a los casos 0 y 1, se identifica que para probabilidades de excedencia de 20 % existe una mayor escorrentía diaria en el caso 1 que en el caso 0, obteniendo diferencias de +1,37 (Figura 5.15), +1,12 (Figura 5.16) , +0,63 (Figura 5.17) y +0,27 (Figura 5.18) milímetros diarios promedio para los tres MCG, en los periodos comprendidos entre 1850 y 1900 (Figura 5.15), 1901 y 1950, 1951 y 2000 y 2001 y 2013, respectivamente. Con respecto a la escorrentía diaria con probabilidad de excedencia de 70 %, se presenta que en los dos primeros periodos existe una mayor escorrentía diaria en el caso 1 que en el caso 0, obteniendo diferencias promedio para los tres MCG de +0,31 y +0,07 milímetros diarios, en 1850 a 1900 y 1901 a 1950 ,respectivamente. Mientras que, para los subperiodos comprendidos entre 1951 y 2000, y 2001 a 2013, se presentan -0,29 y -0,44 milímetros diarios como promedio de los resultados de los tres MCG para el caso 1 con respecto al caso 0.

Al comparar los resultados de los casos 0 y 1 con el resultado del BHN y las observaciones, se identifica que existe una subestimación de la escorrentía diaria con probabilidades de excedencia ubicadas en el rango 1 % a 100 % al utilizar como forzantes climáticas los MCG MPI y Nor. Por otro lado, el MCG Can representa valores similares a los observados para escorrentías diarias ubicadas en el rango 50 % a 80 %. Con respecto al mismo, se identifica que los nuevos parámetros (caso 1), inducen valores más cercanos a los observados para valores de escorrentía diaria con probabilidad de excedencia superior al 65 %, en comparación a los obtenidos con los parámetros del BHN (caso 0). En Anexo A.3 se presentan curvas de duración para los tres MCG en los cuatro periodos estudiados.

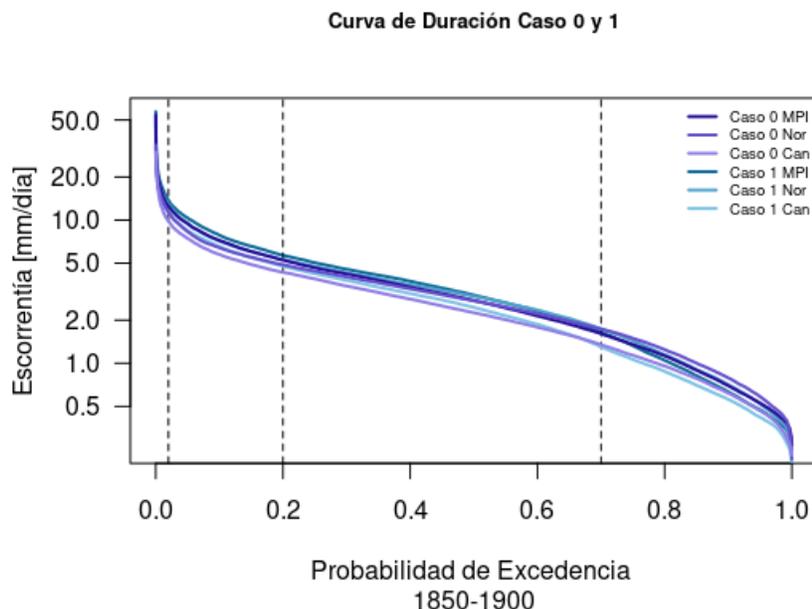


Figura 5.15: Curva de duración para casos 0 y 1, utilizado MPI, Nor y Can entre 1850 y 1900.

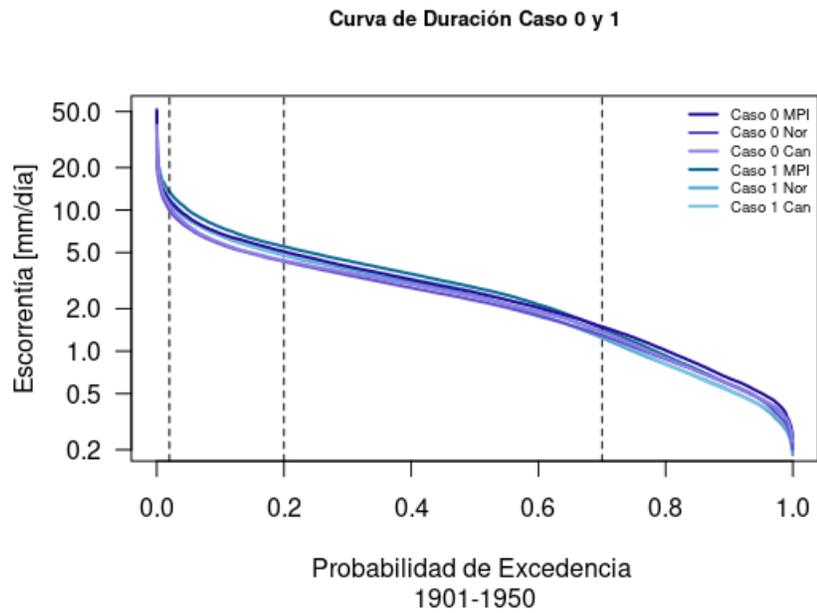


Figura 5.16: Curva de duración para casos 0 y 1, utilizado MPI, Nor y Can entre 1901 y 1950.

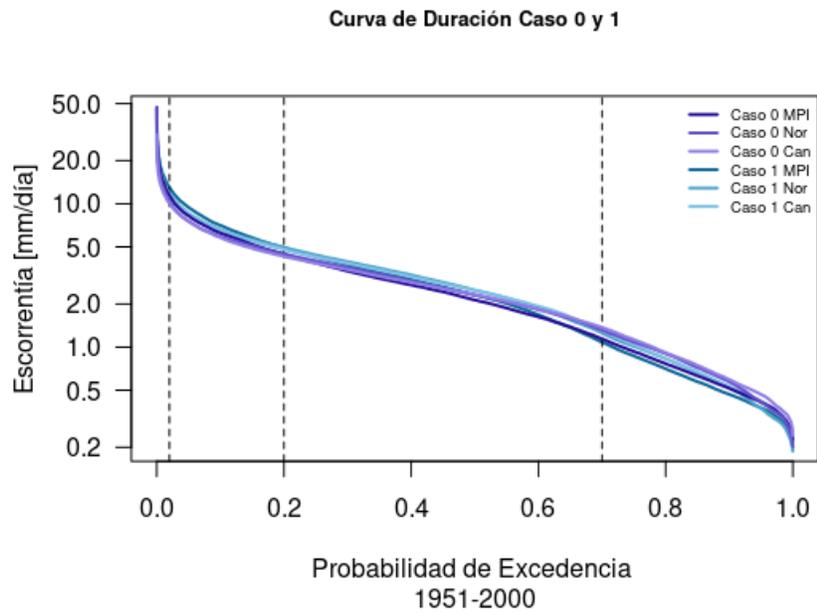


Figura 5.17: Curva de duración para casos 0 y 1, utilizado MPI, Nor y Can entre 1951 y 2000.

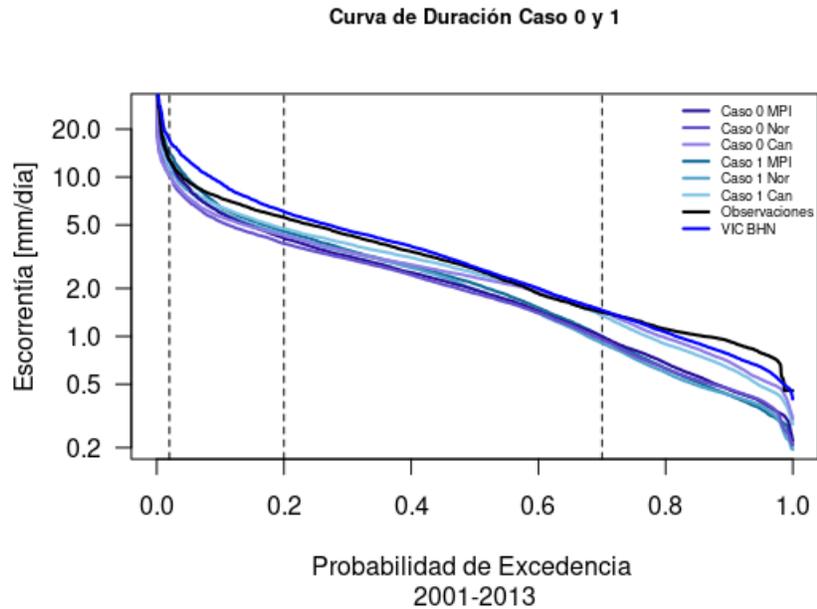


Figura 5.18: Curva de duración para casos 0 y 1, utilizado MPI, Nor y Can entre 2001 y 2013.

### 5.2.2. Ciclo de Caudales Anuales y Curva de Variación Estacional

En las figuras 5.19 y 5.20 se presentan el ciclo de caudales anuales y la curva de variación estacional entre 2001 y 2014 para el caso 0 utilizando como forzantes climáticas los modelos MPI, Nor y Can.

Respecto al ciclo anual de caudales (Figura 5.19), se identifica que no existe una relación en cuanto a magnitud entre los MCG y las observaciones. En el caso de VIC con entradas de BHN, se observa que se acerca el resultado de las observaciones a las simulaciones, sin embargo, se subestima la magnitud de la componente pluvial. A modo de recuerdo, las simulaciones VIC BHN, MPI, Nor y Can se realizan bajo el supuesto de régimen natural, mientras que las observaciones se ven intervenidas por los factores antropogénicos como la regulación de embalses ubicados en el interior de la cuenca.

**Ciclo Anual de Caudales (2001-2014)**

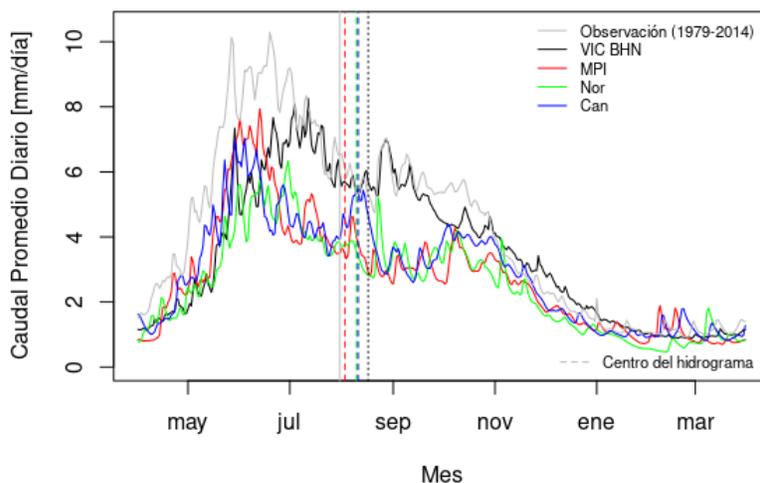


Figura 5.19: Ciclo anual de caudales para caso 0 utilizado MPI, Nor y Can entre 2001 y 2014.

En base a la curva de variación estacional (Figura 5.20), se identifica que para altas probabilidades de excedencia se distingue en menor proporción la componente nival del régimen hidrológico de la cuenca del río Bío bío (Figura 3.3). El modelo MPI es el que representa con mayor cercanía los valores obtenidos en la curva de variación estacional observada. Por otro lado, a mayores probabilidades de excedencia, en el MCG Can se identifica una componente nival en los caudales de primavera.

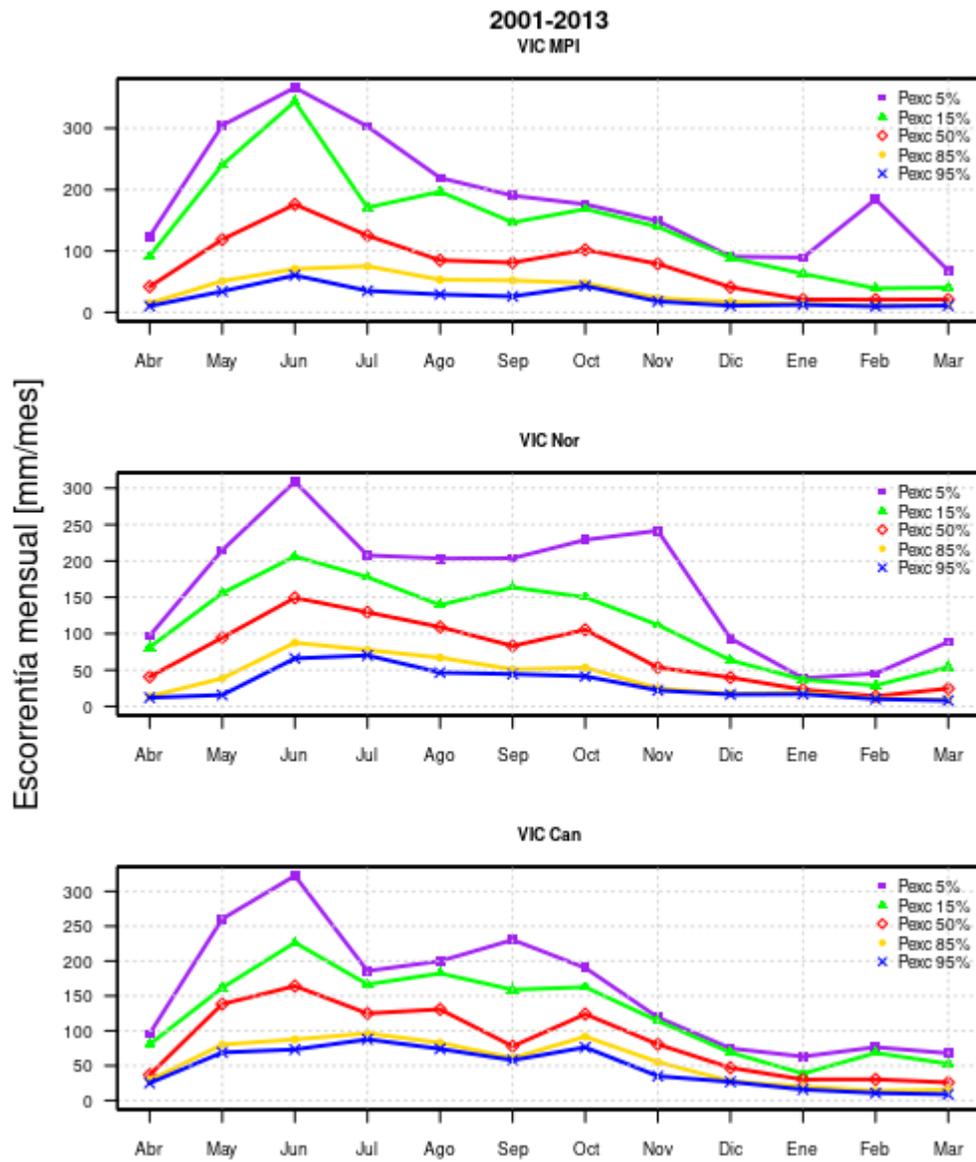


Figura 5.20: Curva de variación estacional caso 0 para modelos MPI, Nor y Can entre 2001 y 2013.

### 5.2.3. Análisis de Evapotranspiración

Con el fin de analizar los cambios en el caudal medio anual, se analiza la variación de la evapotranspiración debido a que es una de las principales componentes del ciclo hidrológico con posibles impactos por el cambio de cobertura vegetal. Al considerar un balance hídrico simple (sin intervención antrópica), se puede aproximar el análisis a que la diferencia de la precipitación con la evapotranspiración corresponde al caudal, de este modo, se establece una relación inversa entre la ET y el caudal. A continuación, se presentan gráficos de caja para la evapotranspiración (ET) en los 4 casos de estudio sobre los cuatro pasos temporales analizados (Figura 5.21), para los casos 2.a y 2.b en los periodos de estudio (Figura 5.22) y para los últimos dos casos a nivel mensual entre 1850 y 2014 (Figura 5.23).

En relación a la Figura 5.21, se identifica que durante las cuatro etapas estudiadas, todos los MCG identifican que el caso 2.a. (aumento de cobertura de bosque nativo a 87%) contribuyen a una menor evapotranspiración (526 mm/año en promedio), en comparación a los casos 2.b (645 mm/año en promedio), 1 (625 mm/año en promedio) y 0 (723 mm/año en promedio). Además, se puede apreciar para los MCG utilizados, la ET ha disminuido entre 1850 a 2014. En el caso de MPI se presenta una disminución promedio de 0,86 mm/año, similar es el caso del modelo Nor con una reducción de 0,82 mm/año. Mientras que, el MCG Can presenta una disminución promedio para los cuatro casos de 0,01 mm/año. Por otro lado, al contrastar el caso 1 con los escenarios de aumento de cobertura de bosque nativo (2.a) y plantaciones forestales (2.b), se identifica que existe un aumento de evapotranspiración de 20 milímetros anuales al aumentar la cobertura forestal, mientras que se detecta una disminución de 99 milímetros anuales al cambiar y aumentar la cobertura a bosque nativo.

Otro punto de interés es la disminución de la variación del modelo Can entre 1901 y 2013, versus el periodo 1850 a 1900. Esto, se corrobora con una disminución de 8 milímetros en el rango intercuartil tras 1900 (de 125 mm/año a 117 mm/año), junto con la disminución de la desviación estándar de 88,8 mm/año en el primer periodo, versus 84,8 mm/año en los tres periodos restantes.

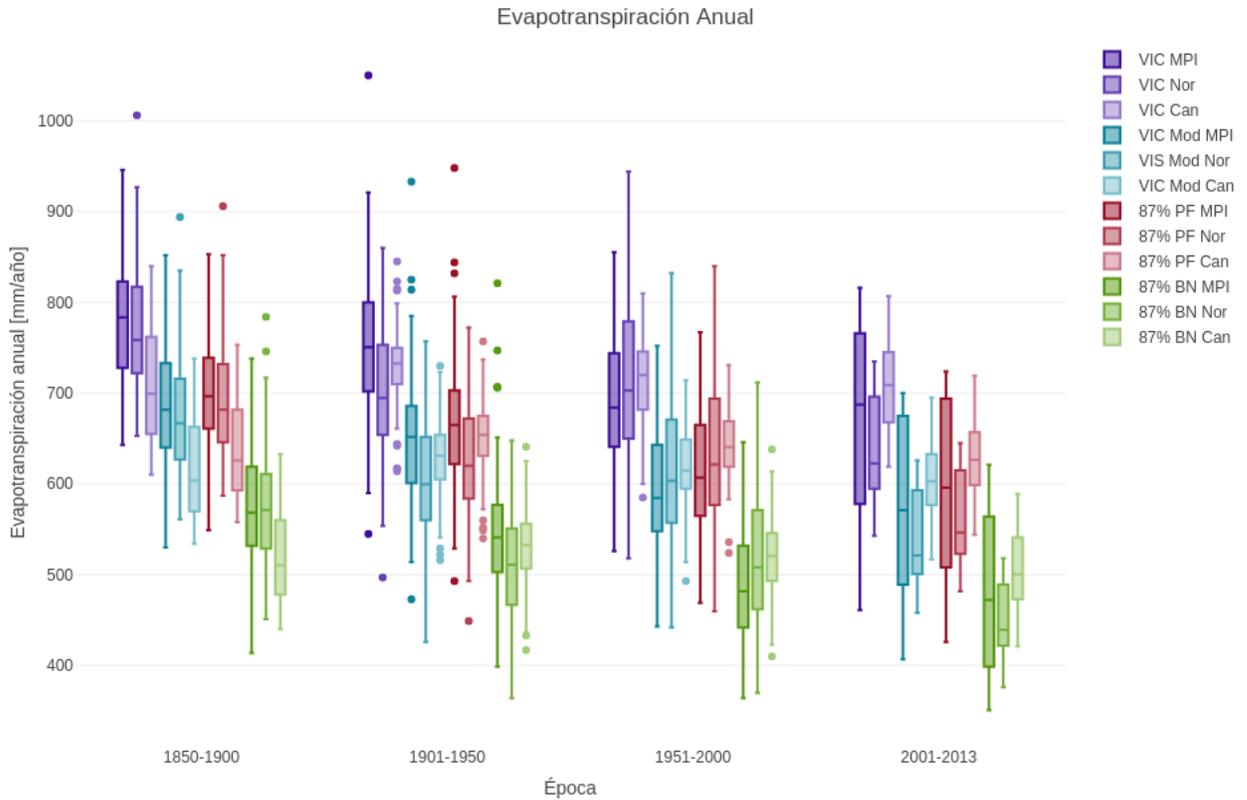


Figura 5.21: Gráfico de cajas de evapotranspiración anual obtenida en simulaciones de casos 0, 1, 2.a y 2.b, para los MCG MPI, Nor y Can, entre 1979 y 2014 para cuenca del Río Bío bío.

Con respecto a las simulaciones de aumento de cobertura de bosque nativo (2.a) y plantaciones forestales (2.b) (Figura 5.22) se identifica que para un mismo periodo de análisis y MCG, no existen un cambio en la magnitud de la diferencia entre el caso 2.a y 2.b, obteniendo un promedio en los cuatro periodos de  $-116$  mm/año (resta de 2.a con 2.b) respecto a la media. Al desagregar dicho dato según MCG, se observa que existen diferencias según la elección del modelo. Por un lado, el MCG MPI arroja diferencias de  $+124$  milímetros anuales entre los casos 2.b y 2.a, mientras que los MCG Nor y Can presentan diferencias de  $+110$  mm/año y  $+115$  mm/año, respectivamente.



Figura 5.22: Gráfico de cajas de evapotranspiración anual obtenida en simulaciones de casos 2.a y 2.b, para los MCG MPI, Nor y Can, entre 1979 y 2014 para cuenca del Río Bío bío.

Con respecto a los cambios en la evapotranspiración a nivel mensual, esta permite identificar cambios en la estacionalidad producto de cambios en la cobertura vegetal (Figura 5.23). Se identifica que en otoño (abril-junio) e invierno (julio-septiembre) existe mayor evapotranspiración en el escenario de aumento de cobertura de plantaciones forestales (2.b) que en el caso 2.a, con un aumento de 11 mm/mes y 22 mm/mes en otoño e invierno, respectivamente. En contraste, se aprecia un aumento promedio en la ET mensual de verano (enero-marzo) de 4 mm/mes en el caso 2.a, con respecto al caso 2.b para los tres MCG. En primavera (octubre-diciembre), no existen mayores diferencias promedio por estación (+1 mm/mes caso 2.b), sin embargo, a nivel mensual se presentan diferencias de hasta 7 milímetros promedio en el mes de octubre.

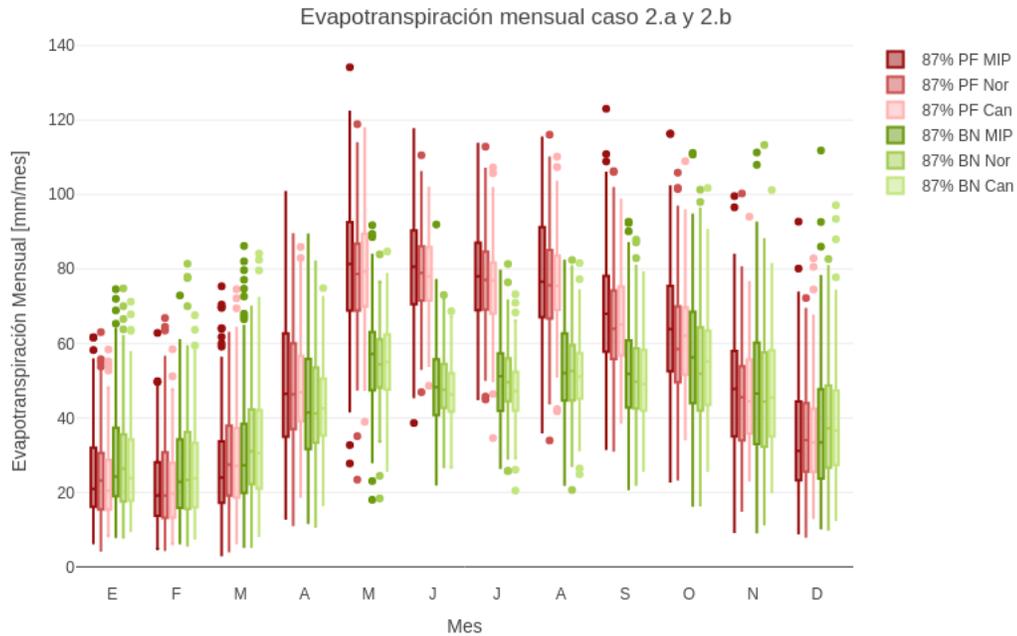


Figura 5.23: Gráfico de cajas de evapotranspiración mensual obtenida en simulaciones de casos 2.a y 2.b, para los MCG MPI, Nor y Can, entre 1979 y 2014 para cuenca del Río Bío bío.

### 5.3. Análisis de Tendencias y MRLM

El método de (*Change Point Analysis*) (CPA) indica la existencia de cambios en la pendiente de una serie y los modelos de regresión lineal múltiple (MRLM) permiten identificar los cambios en la varianza explicados por los cambios en el clima. A continuación, se presentan los resultados del CPA para las anomalías de caudal de la reconstrucción dendrocronológica (1850-2003) (Figura 5.24), los caudales medidos en la estación río Lirquén en cerro El Padre (1979-2014) (Figura 5.25) y las precipitaciones de los tres MCG utilizados (Figura 5.26), junto con el MRLM para la subcuenca de la estación río Lirquén en cerro El Padre.

#### Change Point Analysis

En la Figura 5.24 se presenta el valor del  $\Delta^2$  de *Change Point Analysis*(CPA) para la serie de anomalías de caudal dendrocronológicas entre 1850 y 2003. Se evidencia que previo a 1930 existen mayores valores a una mayor distancia de separación, mientras que después de 1930 existe una mayor frecuencia de variación de pendiente, junto con una disminución de magnitud de cambios en la pendiente antes y después de dicho año.

### Change Point Analysis Serie Dendrocronológica

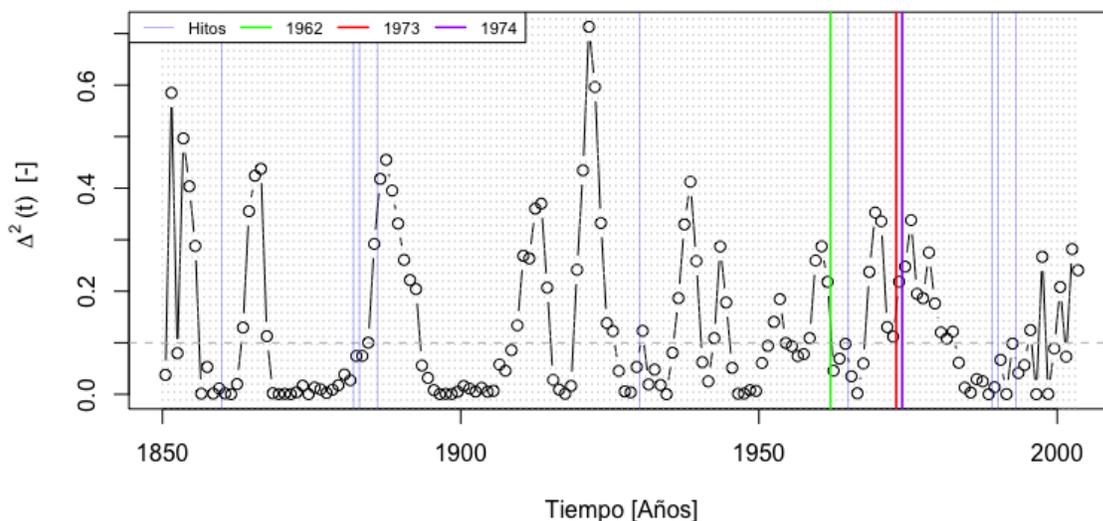


Figura 5.24: Change Point Analysis para serie dendrocronológica de Muñoz et al., 2016.

Con el fin de comparar los resultados de CPA para la reconstrucción de caudales de Muñoz *et al.*, 2016, se desarrolla el mismo procedimiento para la serie de caudales medios anuales en la cuenca de río Lirquén en cerro El Padre entre 1979 y 2014 (Figura 5.25), la cual presenta un bajo grado de intervención antrópica ( $>0.05$ ). Se identifica que después de 1990 existen 7 cambios de pendiente pronunciados y otros de menor magnitud. Cómo se identificó en la Figura 2.1, en 1990 se autoriza la construcción de la central hidroeléctrica de Pangue. Con respecto a la serie dendrocronológica, esta presenta un aumento de quiebres en las tendencias entre 1993 y 2003 (último tramos), lo cual coincide con el análisis de CPA para las observaciones de la subcuenca en régimen natural estudiada.

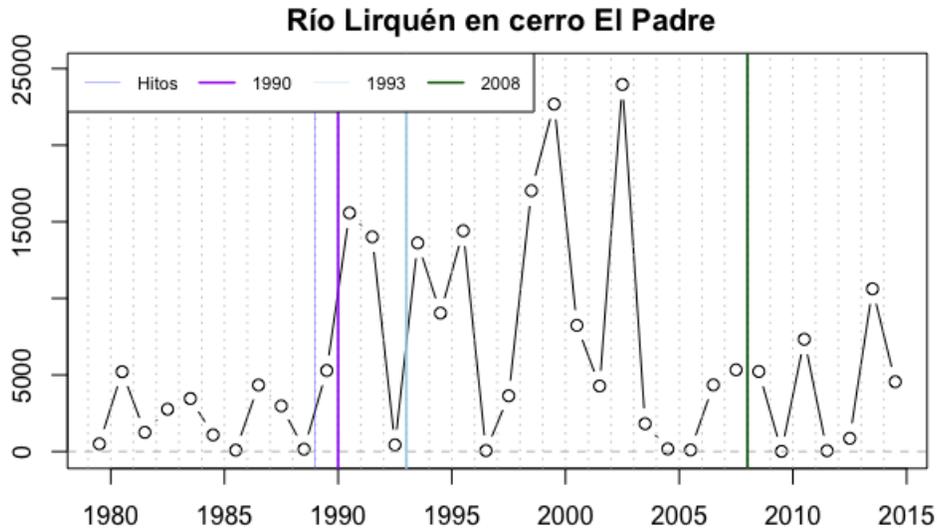


Figura 5.25: Change Point Analysis para observaciones en estación río Lirquén en cerro El Padre entre 1979 y 2014.

Para poder distinguir si los cambios en la serie de anomalías de caudal tienen relación con factores climáticos, se presenta el resultado del método de *Change Point Analysis* para las precipitaciones de los tres MCG (Figura 5.26). Se identifica que no existen grandes cambios en las pendientes de las series de precipitación de los MCG entre 1890 y 1962, pese a ello, en 1886 se identifica que existe un cambio en la pendiente de la serie de precipitación del MCG Can, el cual calza con la llega de semillas de *pinus radiata* al país. Además, tanto en el modelo MPI como Nor identifican un cambio en la pendiente de las series de precipitación en 1993, año en el cual se promulga la Ley Indígena.

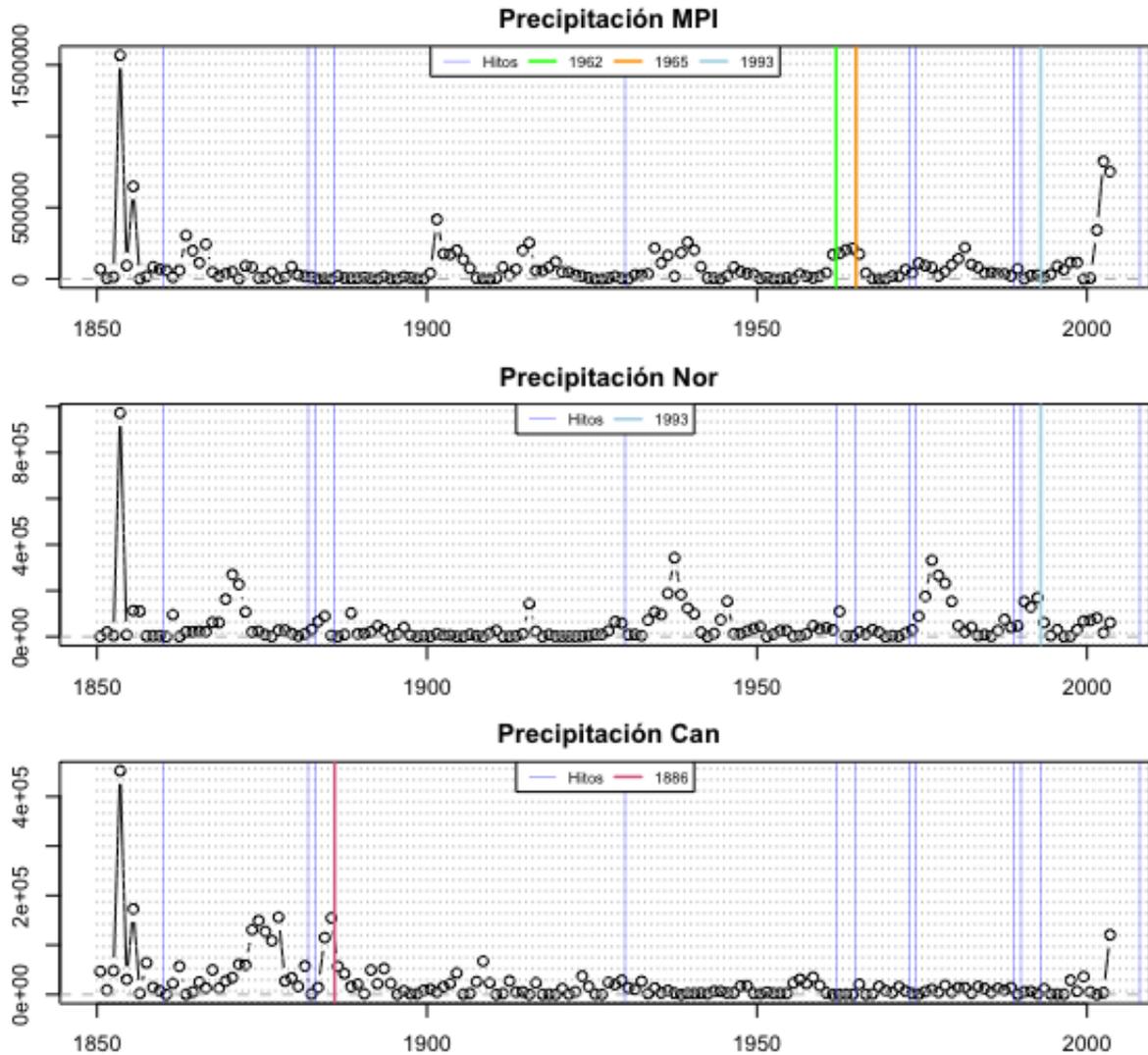


Figura 5.26: Change Point Analysis para precipitaciones de modelos de circulación general MPI, Nor y Can entre 1850 y 2014.

### Modelo de regresión lineal múltiple

Previamente, se verificó que existen puntos de quiebre de tendencia en las anomalías de caudal y en las precipitaciones históricas de los MCG. Ahora se indagará en qué medida afectan los cambios en los factores climáticos en las series de caudales medios anuales. En la Figura 5.27 se presenta la relación entre la anomalía de caudal y precipitación (Figura 5.27.a), y entre la anomalía de caudal y la anomalía de temperatura para una subcuenca de la cuenca del río Bío Bío en régimen natural, correspondiente a la estación Río Lirquén en cerro El Padre entre 1979 y 2014 (Figura 5.27.b). Se identifica que el coeficiente de determinación en el caso de la precipitación es igual a 0.86, mientras que en el caso de la temperatura es de -22%, junto con que la desviación estándar para la anomalía de precipitación es 0.19,

mientras que para la anomalía de temperatura es de 0.025, siendo la primera 7,6 veces la segunda, indicando una mayor dispersión en las precipitaciones. De esta forma, cambios en la precipitación tendrían un efecto directo en la generación de escorrentía, mientras que pequeños cambios en la temperatura media anual generan cambios en los caudales medios anuales.

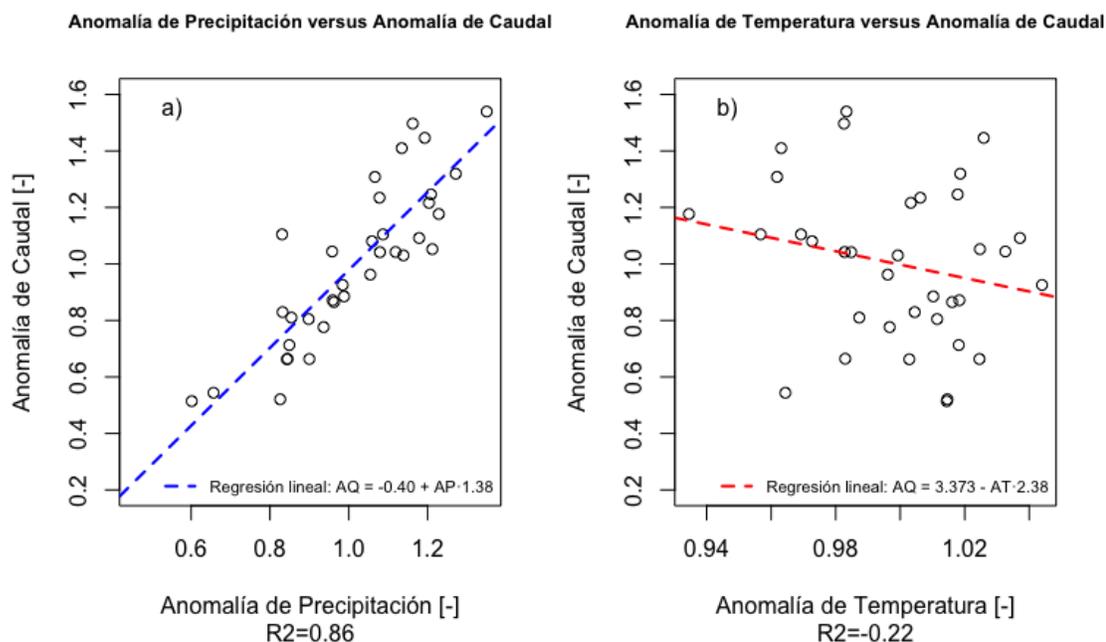


Figura 5.27: Regresión lineal simple entre anomalías de caudal observado y precipitación de CR2MET (a) y entre caudal observado y temperatura de CR2MET (b) entre 1979 y 2014 para estación río Lirquén en Cerro el padre (BNA 8317002).

El modelo de regresión lineal múltiple obtenido corresponde a aquel que utiliza como predictores la anomalía de precipitación de CR2MET y la anomalía del promedio de las temperaturas máximas y mínimas de CR2MET. Se obtuvo un valor de  $R^2$  ajustado igual a 0.58, lo cual significaría que un 58 % de los cambios en la varianza de la serie de caudales medios anuales se explican por variaciones en las precipitaciones y temperaturas medias anuales. Quedando un 42 % que puede estar asociado a otras variables climáticas y/o factores antropogénicos. En la Figura 5.28 se presentan los valores simulados por el modelo de regresión lineal múltiple para las anomalías de caudal, a partir, de las anomalías de precipitaciones y temperaturas anuales de CR2MET. Se aprecia que este modelo no logra replicar las anomalías de caudal superiores a 1,2. El análisis del predictando y la verificación de los supuestos de regresión lineal múltiple se presentan en el Anexo B.

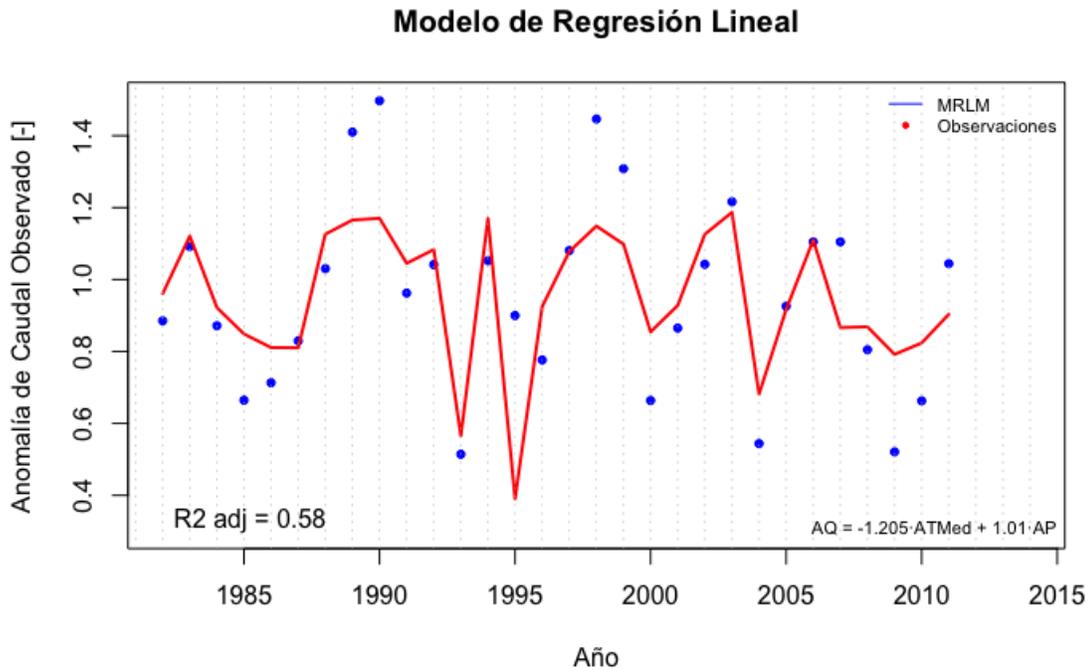


Figura 5.28: Modelo de regresión lineal múltiple para el la anomalía de caudal observado en la estación Río Lirquen En Cerro El Padre (BNA 8317002) entre 1979 y 2014.

## 5.4. Entrevistas

En base al método sociohidrológico se incorpora en el estudio hídrico el relato de personas mapuche en torno a los ríos, el agua, sus impactos, la industria forestal y el bosque nativo. A continuación se presentan las principales conclusiones obtenidas a través de las tres entrevistas realizadas a personas mapuche de la cuenca del río Bío bío (Figura 5.29).

Pregunta	Entrevistada 1	Entrevistado 2	Entrevistado 3
Edad	Treinta y tres	Veinticuatro	Sesenta y cinco
Ubicación	Alto Bío-Bío	Queuco	Cerca del nacimiento del Bío-Bío
¿Cuál es tu nexa con respecto a la comunidad?	Participante de la comunidad.	Siente que siempre tiene que volver al territorio y a la comunidad donde nació. Como persona joven le toca tener un rol activo en la enseñanza de la lengua, de la crianza de los animales y suceder a las generaciones anteriores.	Parte de la comunidad. La comunidad es parte de su cultura.
El río Bío bío es de los más largos de Chile, ¿cómo te han contado tus ante-pasados que era antes?, ¿han habido cambios?	Antes era más caudaloso y ahora trae menos agua.	El cauce del Bío-Bío y de las vertientes que ingresan a él ha ido disminuyendo. Anteriormente se cuidaba mucho el agua, pues existe una conexión espiritual con ella, ya que es utilizada por la comunidad para ceremonias y usos cotidianos. Alto Bío-Bío tiene gran variedad de árboles nativos, por lo que la plantación de monocultivos también ha provocado una disminución de los cauces.	El río ha cambiado bastante. La central hidroeléctrica ha perjudicado al río. Afirma que el agua puede producir enfermedades ya que pasa mucho tiempo detenida, en la central le agregan químicos y desmorona la tierra. Cuando deja de llover por dos o tres meses no hay agua suficiente. Plantea que las personas cayeron en lo que les ofrecieron los empresarios y que ahora tienen que oponerse a los nuevos proyectos.

Figura 5.29: Entrevistas a personas mapuche de la cuenca del río Bío bío.

Pregunta	Entrevistada 1	Entrevistado 2	Entrevistado 3
¿Han existido actividades que se han visto afectadas por la disminución de agua?, ¿cuáles?, ¿Cómo se han organizado?	La agricultura. Se mantiene menos la humedad, hay problemas en las napas subterráneas y se nota menos corriente en el río en verano. Según ella, en general la gente ha sido más bien pasiva en cuanto a organizarse, pero últimamente se ha visto más conciencia en torno al cuidado del medio ambiente y a la resistencia a proyectos que perjudiquen al mismo.	El río se ha visto amenazado por las represas y también por la tala de araucarias, que ayudaban a mantener la nieve. Luego llegaron las forestales (dañando las napas subterráneas). Plantea que dichas empresas se aprovecharon de la ignorancia de las comunidades (hasta hace poco el nivel de analfabetismo era bastante alto). Debido a esto los jóvenes se han organizado y han tomado un rol más activo en la protección del territorio.	Afirma que toda la comunidad se ha visto perjudicada y plantea como solución la recuperación de tierras.
¿Cuál es tu opinión respecto a la industria forestal?	Afecta al terreno, pues no existe mucha biodiversidad dentro de los monocultivos y no hay mucha vida. Además producen sequía.	Para él, el tema de las forestales es bastante fuerte y comienza con el despojo de tierras a través de engaños y matanzas. Comenta que zonas del Alto Bío-Bío, donde antes abundaba la naturaleza, ahora están con crisis de agua.	Asegura que las plantaciones de eucalipto secaron vertientes y dejaron a muchos sectores sin agua. En estos lugares, personas que antes tenían huertas y ahora tienen que comprar hortalizas de afuera. Afirma que en algunos sectores la escasez de agua es extrema.
¿Podrías describirnos lo que significan especies como el canelo y la araucaria (ambas nativas) para ti?	Ambos son árboles sagrados, el canelo por su uso medicinal y la araucaria porque entrega alimentación (a través de los piñones). Además, Alto Bío-Bío se encuentra en el territorio denominado <i>pehuén-mapu</i> , es decir, "tierra de araucarias".	El canelo, aunque también es sagrado, es más importante para comunidades de territorios más al sur, donde no hay araucarias. Para los pehuenche el árbol más importante es la araucaria (que en mapudugún es <i>pehuén</i> , convirtiendo a los <i>pehuenche</i> en la "gente de la araucaria").	Ambos son árboles sagrados, de ellos viene la fuerza de los mapuche. Explica brevemente una parte de su cosmovisión: los árboles se organizan y tienen un jefe, y cuando las personas se portan mal el jefe se molesta. El agua "se arranca" porque las personas han hecho cosas indebidas.

# Capítulo 6

## Discusión y Conclusiones

### Sobre los parámetros vegetacionales

Con respecto a los parámetros vegetacionales se identifica que en el caso de  $R_{min}$ , el largo y la densidad de raíces, se logran reflejar las características predominantes que distinguen las coberturas de suelo analizadas, como por ejemplo, la mayor evapotranspiración en plantaciones forestales y mayor caudal anual en bosque nativo. Lo anterior se traduce en que al aumentar el largo de las raíces en la cobertura de PF, se aumenta el aporte a la ET, puesto que se evapotranspira agua de las tres capas de suelo, a diferencia del bosque nativo, el cual evapotranspira agua desde la primera capa de suelo (ahí se concentran sus raíces). Esto coincide con el comportamiento empírico de ambas especies, incluso en el caso de las plantaciones de *Pinus Radiata* se habla de que estas funcionan como "bombas hidráulicas" junto con los *Eucalyptus* debido a su alta capacidad de evapotranspirar el agua del que se abastecen.

En cuanto a *Leaf Area Index*, se obtienen resultados satisfactorios en el caso de plantaciones forestales, sin embargo, se subestiman en invierno para bosque nativo. Se recomienda re evaluar el método, con el fin de representar de forma más cercana el índice de área foliar para bosque nativo de hoja caduca.

Finalmente, se limita la creación de las clases -bosque nativo de hoja perenne- y -monocultivo de hoja ancha- debido a la escasez de datos disponibles. Sin esa limitante, se podría simular con mayor exactitud el escenario actual de cobertura de suelo.

### Sobre la comparación de las simulaciones con la serie dendrocronológica

En cuanto a la anomalías, el modelo dendrocronológico desarrollado por Muñoz *et al.*, (2016) presenta mayor dispersión entre 1850 y 1950, lo cual se explica por la alta variación de las precipitaciones en los modelos MPI y Nor producto de la capacidad de representación de fenómenos climáticos de gran escala. Además, los estudios dendrocronológicos suelen representar con menor incertidumbre los periodos de sequía que aquellos húmedos. En base a lo anterior, se puede explicar la dispersión entre 1900 y 1950 debido a que era un periodo de

mayores precipitaciones (González, 2020).

La serie de anomalías presenta un valor de  $R^2$  ajustado de 0,45, lo cual significa que existe un 45 % de la varianza explicada por el modelo. Hay que considerar la existencia de limitaciones en la metodología utilizada para la obtención de la serie debido a que se analizaron exclusivamente modelos de regresión lineal múltiple. Por otro lado, en el modelo regresión lineal múltiple, se identifica que posee un valor de  $R^2$  ajustado de 0.58, lo cual permitiría explicar el 58 % de los cambios en la varianza por cambios en la precipitación y la temperatura media anual. Sumado a lo anterior, hay que considerar que ambos modelos abarcan distintos pasos temporales y reflejan distintas componentes que afectan el ciclo hidrológico.

Si bien los escenarios de aumento de cobertura de bosque nativo y plantación forestal hasta el 87 % de la superficie no son realistas, estos son útiles pues permiten inspeccionar en posibles efectos de dichos escenarios de cobertura vegetal. Sin embargo, se recomienda en un futuro estudio discretizar temporalmente la cobertura de suelo, con el fin de representar de forma coherente a la realidad los cambios históricos en las coberturas de suelo.

### **Sobre los cambios en los caudales por el clima**

El modelo Can es el que presenta mayor cercanía a la serie dendrocronológica para los cuatro casos de estudio y en los cuatro pasos temporales. Es de interés, ya que, que este modelo no representa ciclos interanuales como ENSO, sin embargo, se cree que al tomar rangos de tiempo de 50 años, el efecto de dicho fenómeno se puede anular (suma y resta de impactos). Además, este modelo no concuerda con el aumento de temperatura y disminución de precipitaciones observado entre 1850 y 2014.

En cuanto a la estacionalidad, se identifica que entre 1850 y 2000, el centro del hidrograma se adelantó para los MCG MPI y Nor(Figura 5.8), junto con un aumento en los índices de estacionalidad de invierno-anual (Figura 5.9) e invierno-verano (Figura 5.10). Esto se asocia al aumento de temperatura histórico por los dos MCG, afectando directamente a la componente nival del régimen hidrológico de la cuenca de río Bío bío.

### **Sobre las variaciones en los caudales por el cambio de la cobertura y efectos en la ET**

Se identifica que existe un aumento de caudal medio anual bajo el escenario de aumento de bosque nativo (2.a) con respecto al aumento de plantaciones forestales (2.b), junto con un adelanto de estacionalidad en hasta tres semanas y la reducción de los caudales medios mensuales en la época de deshielo. Esto se puede atribuir a la modelación de bosque nativo, donde se asume que todo el bosque es de hoja caduca, lo que se traduce en un menor almacenamiento de nieve en invierno, pasando directamente a escorrentía, disminuyendo así el caudal de primavera en relación al caudal de invierno. Sumado a lo anterior, se presentan inviernos más húmedos ante el aumento de bosque nativo, lo cual se refleja en los índices

invierno-anual e invierno-verano.

Por otro lado, el bosque nativo presenta una mayor coexistencia entre especies, lo cual podría disminuir la escorrentía ante la mayor intercepción, y en consecuencia, un aumento en la evapotranspiración. Esta característica no es representada por el modelo hidrológico utilizado, con lo cual podría disminuir la diferencia de los caudales medios anuales entre los casos 2.a y 2.b, ante su incorporación.

### **Sobre el análisis de tendencia y atribución**

Respecto al análisis de tendencia, se concluye que existe un aumento de puntos de quiebre en la tendencia de anomalías de caudal, lo cual coincide con el aumento de políticas de cambios en el uso de suelo como la reforma agraria, contrarreforma agraria y DL. 701, sin embargo, también existen quiebres en la serie de anomalías de precipitaciones (la cual presenta relación directa con la serie de anomalías de caudales medios anuales), por lo que el efecto no es atribuible directamente a los hitos históricos mencionados.

En base al modelo de regresión lineal desarrollado, se concluye que los cambios en la anomalía de caudal son explicados principalmente por cambios en la temperatura y la precipitación; sin embargo, existe un 42% de la varianza que puede ser explicada por factores climáticos distintos a la precipitación y la temperatura, junto con factores antropogénicos.

### **Sobre la sociohidrología**

Con respecto a las entrevistas, se identifica que los tres relatos coinciden en que existe una disminución en el caudal del río Bío bío, lo cual es validado por las simulaciones del caso 0 con las tres forzantes climáticas utilizadas (MPI, Nor, Can). Además, se hace énfasis en la repercusión de los proyectos hidroeléctricos locales, los que no pudieron ser estudiados por limitaciones del modelo hidrológico utilizado. En la entrevista 3, se señala que esto presenta externalidades negativas directas en los recursos alimenticios, debido a que ciertas comunidades no tienen los recursos hídricos suficientes para cosechar sus alimentos, ante lo cual deben comprarlos. Lo anterior, en el marco de que la comuna de Alto Bío bío presenta uno de los mayores índices de pobreza a escala nacional, por lo que, agudizaría la situación la compra de alimentos.

En cuanto a la cosmovisión, se destaca en la primera entrevista que *el agua es como la sangre* para los mapuches, lo cual reivindica la importancia de este recurso hídrico desde un plano espiritual. También, se menciona su relevancia cultural (se utiliza y agradece en todas las ceremonias), para consumo humano y regadío. Junto con ello, se hace énfasis en que existen árboles sagrados como la araucaria, los cuales fueron talados en algunas plantaciones forestales y reemplazados con pino y eucalipto. De esta forma, se concluye que además de los cambios hidrológicos como la disminución del caudal medio anual ante el aumento de plantaciones forestales, existe un conflicto entre la plantación de pino y eucalipto y la cos-

movisión mapuche. Existe evidencia que respalda el hecho de que la forestación con especies exóticas implica una reducción en el caudal, y que las externalidades se potencian cuando estas plantaciones se realizan en lugares que solían tener bosque nativo (Álvarez-Garretón, 2019).

Finalmente, se concluye que los procesos climáticos son más poderosos que los cambios en la cobertura de suelo, sin embargo, se demostró que el aumento de plantaciones forestales impacta tanto en la estacionalidad de los caudales como en su magnitud.

# Bibliografía

Alvarez-Garreton, C., Mendoza, P. A., Pablo Boisier, J., Addor, N., Galleguillos, M., Zambrano-Bigiarini, M., Lara, A., Puelma, C., Cortes, G., Garreaud, R., McPhee, J., Ayala, A. (2018). The CAMELS-CL dataset: Catchment attributes and meteorology for large sample studies-Chile dataset. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(11), 5817–5846. <https://doi.org/10.5194/hess-22-5817-2018>

Alvarez-Garreton, C., Lara, A., Boisier, J. P., Galleguillos, M. (2019). The impacts of native forests and forest plantations on water supply in Chile. *Forests*, 10(6), 1–18. <https://doi.org/10.3390/f10060473>

Anderson, E., Jackson, S., Tharme, R., Douglas, M., Flotemersch, J., Zwarteveen, M., Lokgariwar, C., Montoya, M., Wali, A., Tipa, G., Jardine, T., Olden, J., Cheng, L., Conallin, J., Cosens, B., Dickens, C., Garrick, D., Groenfeldt, D., Kabogo, J., Roux, D., Ruhi, A., Arthington, A. (2019). Understanding rivers and their social relations: A critical step to advance environmental water management. Wiley. <https://doi.org/10.1002/wat2.1381>

Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. (2017). *Reforma Agraria Chilena 50 años: Historia y reflexiones*. Ediciones Biblioteca del Congreso Nacional de Chile.

Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. (2021). *Historia de la Ley N° 20.488*. Disponible en <https://www.bcn.cl/historiadelaley/historia-de-la-ley/vista-expandida/4615/>

Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. (2021). *Industria Forestal de Chile. Serie Minutas N°68-21*: Santiago, Chile.

Boisier, J. P., R. Rondanelli, R. D. Garreaud, and F. Muñoz. (2016). Anthropogenic and natural contributions to the Southeast Pacific precipitation decline and recent megadrought in central Chile. *Geophys. Res. Lett.*, 43, DOI:10.1002/2015GL067265.

Boisier, J. P., Alvarez-Garreton, C., Cepeda, J., Osses, A., Vásquez, N., Rondanelli, R. (2018). CR2MET: A high-resolution precipitation and temperature dataset for hydroclimatic research in Chile. In *EGU General Assembly Conference Abstracts*, volume 20, page 19739. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2018EGUGA..2019739B/abstract>. REVISAR CITA

- CarbonBrief. (2018). *How do climate models work?*. How do climate models work?
- Chihuailaf, E. (2015). Recado confidencial a los chilenos. LOM ediciones: Santiago, Chile.
- Cannon, A.J. (2018). Multivariate quantile mapping bias correction: An N-dimensional probability density function transform for climate model simulations of multiple variables. *Climate Dynamics*, 50(1-2):31-49. DOI:10.1007/s00382-017-3580-6.
- Cannon, A.J. (2016). Multivariate bias correction of climate model output: Matching marginal distributions and inter-variable dependence structure. *Journal of Climate*, 29:7045-7064. DOI:10.1175/JCLI-D-15-0679.1.
- Cannon, A.J., S.R. Sobie, and T.Q. Murdock. (2015). Bias correction of simulated precipitation by quantile mapping: How well do methods preserve relative changes in quantiles and extremes? *Journal of Climate*, 28:6938-6959. DOI:10.1175/JCLI-D-14-00754.1.
- Casado, A. (2019). Extraída de Georaman, A., (2019). Dendrocronología: contando anillos. *Geología de Ávila*. Disponible en <https://geolodiaavila.com/2019/12/17/dendrocronologia-contando-anillos/>
- Corporación Nacional Forestal (CONAF). (2008). Ley sobre recuperación del bosque nativo y fomento forestal y sus reglamentos. Ministerio de Agricultura.
- Cayuqueo, P. (2017). Historia Secreta Mapuche. Catalonia.
- Dirección General de Aguas (DGA). (2004). Diagnostico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad - Región del Bío bío. Ministerio de Obras Públicas.
- Dirección General de Aguas (DGA). (2011). Estudio hidrogeológico cuencas Bío bío e Itata. (p. 21). Ministerio de Obras Públicas.
- Dirección General de Aguas (DGA). (2016). Atlas del Agua – Chile 2016a. Ministerio de Obras Públicas.
- Dirección General de Aguas (DGA). (2017). Actualización del Balance Hídrico Nacional. Ministerio de Obras Públicas.
- Dirección General de Aguas (DGA). (2019). Aplicación de la metodología de actualización del Balance Hídrico Nacional en la Macrozona Sur y parte Norte de la Macrozona Austral. SIT N° 441. Ministerio de Obras Públicas.

El Desconcierto. (2013). Nicolasa Quintreman: el profundo legado de la luchadora ñaña pehuenche. El Desconcierto. Disponible en <https://www.eldesconcierto.cl/bienes-comunes/-2013/12/26/nicolasa-quinterman-el-profundo-legado-de-la-luchadora-nana-pehuenche.html>

FAO. (2000). Land Cover Classification System (LCCS): Classification Concepts and User Manual. UN: Roma, Italia. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura

Fuentes, N.(2017). Tenencia de la tierra, “Contrarreforma” Agraria y desigualdad en la comuna de Molina (1973-1979). Universidad De Chile.

Gajardo, R. (1994). La Vegetación Natural de Chile: Clasificación y Distribución Geográfica. Editorial Universitaria: Santiago, Chile.

Garreaud, RD., Vuille, M., Compagnucci, R., Marengo, J. (2009). Present day South American climate. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol* 281:180–195. DOI:10.1016/j.palaeo.2007.10.032

Hrachowitz, M., Clark, M. P. (2017). HESS Opinions: The complementary merits of competing modelling philosophies in hydrology. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(8), 3953–3973. <https://doi.org/10.5194/hess-21-3953-2017>

Hreinsson, E.(2008). Assimilation of a snow covered area into a hydrologic model. Thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the Degree of Master of Science in Geography. University of Canterbury. New Zealand.

Huichaquelén, C., (2017). Variabilidad del caudal medio anual en el periodo hidtórico 1600 - 2000 en la cuenca del Maule, Chile. Uso de información de experimento 3.6 del CMIP5. Universidad de Chile.

Jiménez, J. (2013). Movimientos de ladera en la vertiente meridional de Sierra Nevada (Granada, España): identificación, análisis y cartografía de susceptibilidad y peligrosidad mediante SIG. Universidad de Granada. Anexos. [<http://hdl.handle.net/10481/23770>]

Gutjahr, O., Putrasahan, D., Lohmann, K., Jungclaus, J. H., Von Storch, J. S., Brüggemann, N., Haak, H., Stössel, A. (2017). Max Planck Institute Earth System Model (MPI-ESM1.2) for the High-Resolution Model Intercomparison Project (HighResMIP). *Geoscientific Model Development*, 12(7), 3241–3281. <https://doi.org/10.5194/gmd-12-3241-2019>

González-Reyes, Á., Jacques-Coper, M., Muñoz, A. A. (2021). Seasonal precipitation in south-central Chile: Trends in extreme events since 1900. *Atmosfera*, 34(4), 371–384. <https://doi.org/10.20937/ATM.52871>

Gou, X., Chen, F., Cook, E., Jacoby, G., Yang, M., Li, J. (2007). Streamflow variations of the Yellow River over the past 593 years in western China reconstructed from tree rings. *Water Resources Research*: Volume 43, Issue. DOI 10.1029/2006WR005705.

Gutiérrez, E. (2009) La dendrocronología: métodos y aplicaciones. En “Arqueología náutica mediterránea” X. Nieto i M.A. Cau (eds.). Monografies del CASC. Generalitat de Catalunya. pp. 309-322.

Intergovernmental Panel on Climate Change, (s.f.). *What is a GCM?*. [https://www.ipcc-data.org/guidelines/pages/gcm\\_guide.html](https://www.ipcc-data.org/guidelines/pages/gcm_guide.html)

Lara, A., R. Villalba, and R. Urrutia. (2008). A 400-year tree-ring record of the Puelo River summer–fall streamflow in the Valdivian rainforest ecoregion. *Climatic Change*. 86:331–356. DOI 10.1007/s10584-007-9287-7.

Lara, A. (2021). Streamflow response to native forest restoration in former Eucalyptus plantations in south central Chile.

Liang, X., Lettenmaier, D. P., Wood, E. F., Burges, S. J. (1994). A simple hydrologically based model of land surface water and energy fluxes for general circulation models. *Journal of Geophysical Research*, 99(D7). <https://doi.org/10.1029/94jd00483>

Liu, Y., Gupta, H. V. (2007). Uncertainty in hydrologic modeling: Toward an integrated data assimilation framework. *Water Resources Research*, 43(7), 1–18. <https://doi.org/10.1029/2006WR005756>

Mansilla, P. (2020). El mapa que muestra cómo la expansión forestal presiona a los mapuche en la provincia de Arauco. [Mapa]. Recuperado de <https://interferencia.cl/articulos/el-mapa-que-muestra-como-la-expansion-forestal-presiona-los-mapuche-en-la-provincia-de>

Mansilla, P. (2017). *Descolonizando el Mapa del Wallmapu: Construyendo Cartografía Cultural en Territorio Mapuche*. Pu Lof Editores: Temuco, Chile.

Memoria Chilena - Biblioteca Nacional de Chile. (2021). El movimiento mapuche y el Estado en el siglo XX. Disponible en <http://www.memoriachilena.gob.cl/602/w3-printer-602.html>

Memoria Chilena - Biblioteca Nacional de Chile. (2021). Pangué y Ralco. Disponible en <http://www.memoriachilena.gob.cl/602/w3-article-96731.html>

Miller, A. (1976) The climate of Chile. In: Schwerdtfeger W (ed) *World survey of climatology. Climates of Central and South America*. Elsevier, Amsterdam, pp 113–131

Muñoz, A.A., González-Reyes, A., Lara, A. et al. (2016). Streamflow variability in the Chilean Temperate-Mediterranean climate transition (35°S–42°S) during the last 400 years

inferred from tree-ring records. *Clim Dyn* 47, 4051–4066. DOI 10.1007/s00382-016-3068-9.

Nahuelhual, L., Carmona, A., Lara, A., Echeverría, C., González, M. E. (2012). Land-cover change to forest plantations: Proximate causes and implications for the landscape in south-central Chile. *Landscape and Urban Planning*, 107(1), 12–20. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2012.04.006>

Peduzzi, A., Wynne, R. H., Fox, T. R., Nelson, R. F., Thomas, V. A. (2012). Estimating leaf area index in intensively managed pine plantations using airborne laser scanner data. *Forest Ecology and Management*, 270, 54–65. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2011.12.048>

Pezoa, L. (2003) Recopilación y análisis de la variación de las temperaturas (período 1965–2001) y las precipitaciones (período 1931–2001) a partir de la información de estaciones meteorológicas de Chile entre los 33° y 53° de latitud sur. Tesis Escuela de Ingeniería Forestal. Universidad Austral de Chile

Pinto, J., (2020). La Araucanía: cinco siglos de historia y conflictos no resueltos. Pehuén.

Reyes G, R., Gerding, V., Donoso Z, C. (2007). Crecimiento de una plantación de *Nothofagus nervosa* durante 20 años en Valdivia. *Bosque*, 28(2), 129–138. <https://doi.org/10.4067/s0717-92002007000200005>

Salmerón, R., García, J., Del Mar, M. Garcia, M., García, C. (2016). Collinearity diagnostic applied in ridge estimation through the variance inflation factor, *Journal of Applied Statistics*, DOI: 10.1080/02664763.2015.1120712

Sepúlveda, U., Mendoza, P. A., Mizukami, N., and Newman, A. J. (2021). Revisiting parameter sensitivities in the Variable Infiltration Capacity model, *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.* [preprint]. DOI 10.5194/hess-2021-550: in review.

Seland, Ø., Bentsen, M., Seland Graff, L., Olivié, D., Toniazzo, T., Gjermundsen, A., Debernard, J. B., Gupta, A. K., He, Y., Kirkevåg, A., Schwinger, J., Tjiputra, J., Schancke Aas, K., Bethke, I., Fan, Y., Griesfeller, J., Grini, A., Guo, C., Ilicak, M., ... Schulz, M. (2020). The Norwegian Earth System Model, NorESM2 – Evaluation of the CMIP6 DECK and historical simulations. *Geoscientific Model Development Discussions*, February, 1–68. <https://doi.org/10.5194/gmd-2019-378>

Sivapalan, M., Savenije, H. H. G., Blöschl, G. (2012). Socio-hydrology: A new science of people and water. *Hydrological Processes*, 26(8), 1270–1276. <https://doi.org/10.1002/hyp.8426>

Sivapalan, M. (2015), Debates - Perspectives on socio-hydrology: Changing water systems and the “tyranny of small problems”—Socio-hydrology, *Water Resour. Res.*, 51, 4795–4805, doi:10.1002/2015WR017080.

Skewes, J. C., Guerra, D. E. (2013). Sobre arboles y personas: La presencia del roble (*Nothofagus obliqua*) en la vida cordillerana mapuche de la cuenca del rio Valdivia.

Skewes, J. C., Guerra, D. E. (2013). Sobre arboles, volcanes y lagos: algunos giros ontologicos para comprender la geografia mapuche cordillerana del sur de Chilea.

Swart, N. C., Cole, J. N. S., Kharin, V. V., Lazare, M., Scinocca, J. F., Gillett, N. P., Anstey, J., Arora, V., Christian, J. R., Hanna, S., Jiao, Y., Lee, W. G., Majaess, F., Saenko, O. A., Seiler, C., Seinen, C., Shao, A., Sigmund, M., Solheim, L., von Salzen, K., Yang, D., and Winter, B.: The Canadian Earth System Model version 5 (CanESM5.0.3), *Geosci. Model Dev.*, 12, 4823–4873, <https://doi.org/10.5194/gmd-12-4823-2019>, 2019.

Télez, E., Silva, O., Carrier, A., Rojas, V. (2011). El tratado de Tapihue entre ciertos linajes mapuches y el gobierno de Chile [1825]. Disponible en <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/139580>

Urrutia R, Lara A, Villalba R, Christie D, Le Quesne C, Cuq A (2011) Multicentury tree ring reconstruction of annual streamflow for the Maule River Watershed in South Central Chile. *Water Resour Res.* DOI 10.1029/2010WR009562.

Villalba R, Lara A, Masiokas MH, Urrutia RB, Luckman BH, Marshall GJ, Mundo IA, Christie DA, Cook ER, Neukom R, Allen K, Fenwick P, Boninsegna JA, Srur AM, Morales MS, Araneo D, Palmer JG, Cuq E, Aravena JC, Holz A, Le Quesne C (2012) Unusual Southern Hemisphere tree growth patterns induced by changes in the Southern Annular Mode. *Nat Geosci.* DOI:10.1038/NGEO1613

Villagran, C. Hinojosa, L.F. (1997). Historia de los bosques del Sur de Sudamerica, II: analisis fitogeografico. *Revista Chilena de Historia Natural*, 70:241–267: Santiago, Chile.

Wei, X., and M. Zhang .(2010). Quantifying streamflow change caused by forest disturbance at a large spatial scale: A single watershed study. *Water Resour. Res.*, 46, W12525, DOI 10.1029/2010WR009250.

Woodhouse, C. A., Lukas, J. J. (2006). Multi-century tree-ring reconstructions of Colorado streamflow for water resource planning. *Climatic Change*, 78(2). DOI 10.1007/s10584-006-9055-0.

Xie, Z., Yuan, F. (2006). A parameter estimation scheme of the land surface model VIC using the MOPEX databases. *IAHS-AISH Publication*, 307, 169–179.

Xie, Z., Yuan, F., Duan, Q., Zheng, J., Liang, M., Chen, F. (2007). Regional parameter estimation of the VIC land surface model: Methodology and application to river basins in

China. *Journal of Hydrometeorology*, 8(3), 447–468. <https://doi.org/10.1175/JHM568.1>

Zhao, Y., Feng, D., Yu, L., Wang, X., Chen, Y., Bai, Y., Hernández, H. J., Galleguillos, M., Estades, C., Biging, G. S., Radke, J. D., Gong, P. (2016). Detailed dynamic land cover mapping of Chile: Accuracy improvement by integrating multi-temporal data. *Remote Sensing of Environment*, 183, 170–185. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.05.016>

# ANEXOS

## Anexo A

### Análisis de Simulaciones.

El presente anexo tiene como propósito presentar gráficos hidrológicos con desagregación para distintas combinaciones de MCG y periodos. Se presentan curvas de variación estacional, ciclos de caudales anuales y curvas de duración de caudales medios diarios.

## A.1. Curvas de Variación Estacional

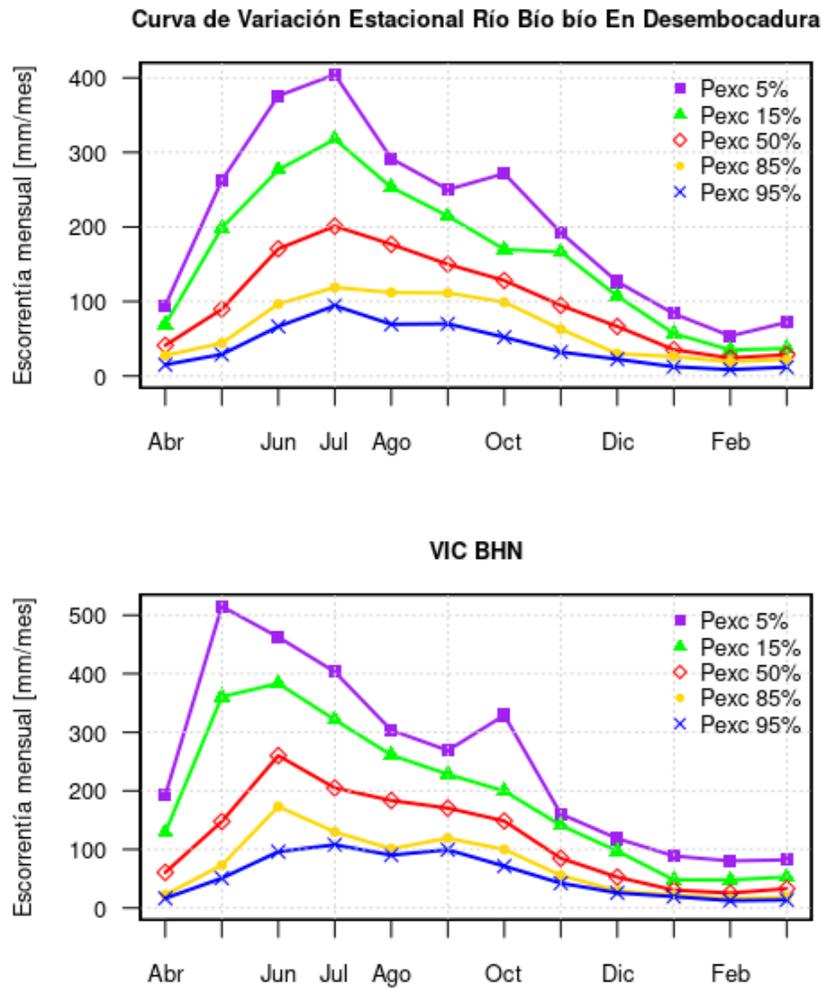


Figura A.1: Curva de variación estacional observaciones y BHN entre 1979 y 2014.

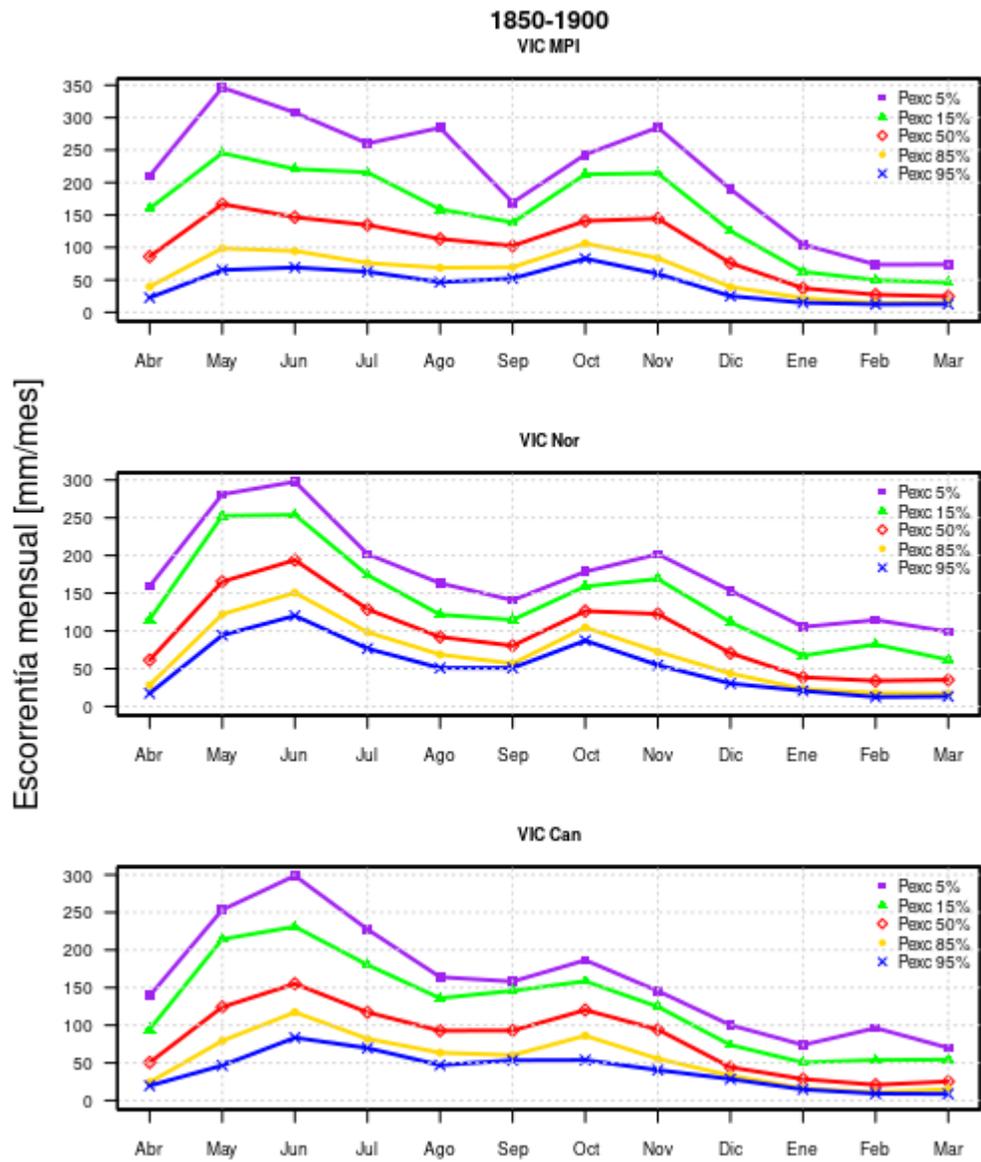


Figura A.2: Curva de variación estacional caso 0 para modelos MPI, Nor y Can entre 1850 y 1900.

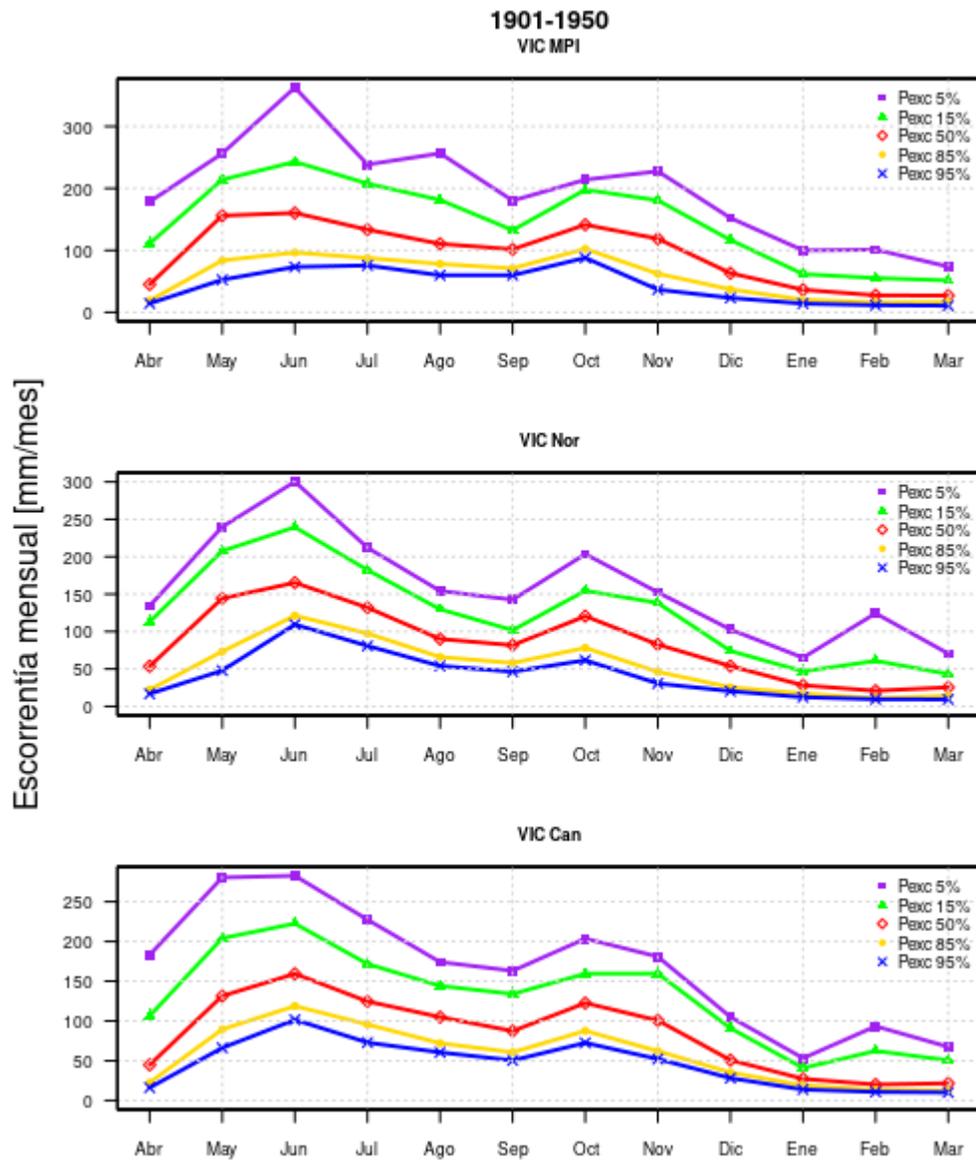


Figura A.3: Curva de variación estacional caso 0 para modelos MPI, Nor y Can entre 1901 y 1950.

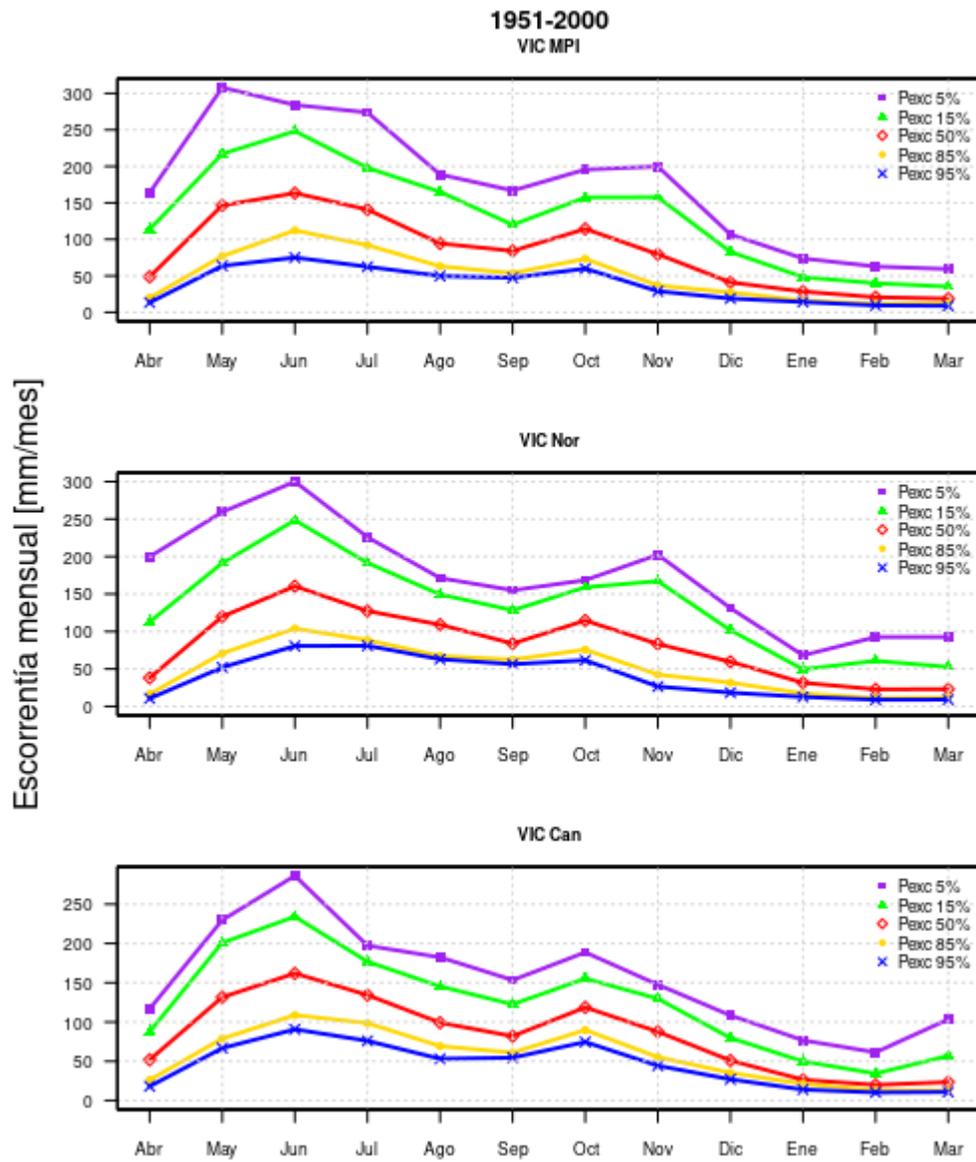


Figura A.4: Curva de variación estacional caso 0 para modelos MPI, Nor y Can entre 1951 y 2000.

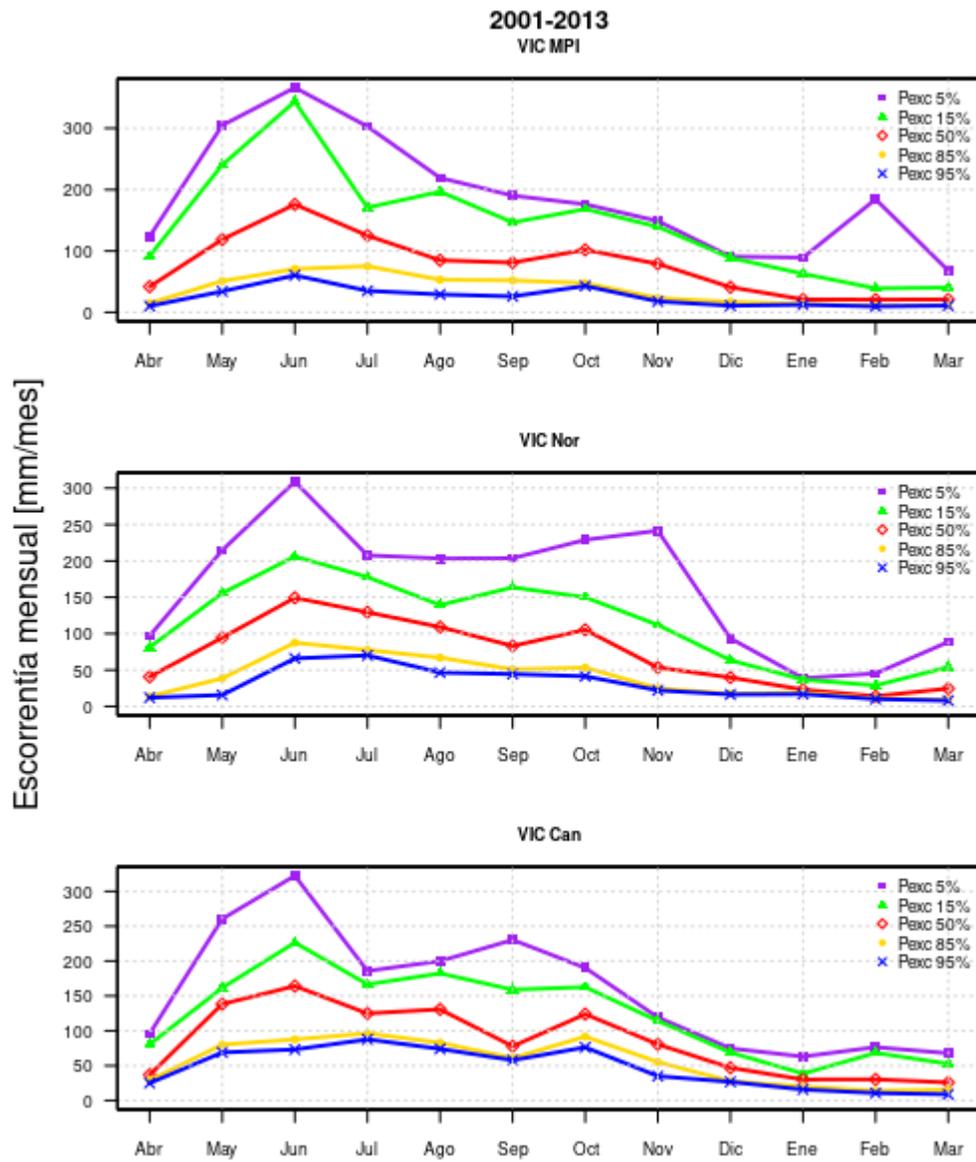


Figura A.5: Curva de variación estacional caso 0 para modelos MPI, Nor y Can entre 2001 y 2013.

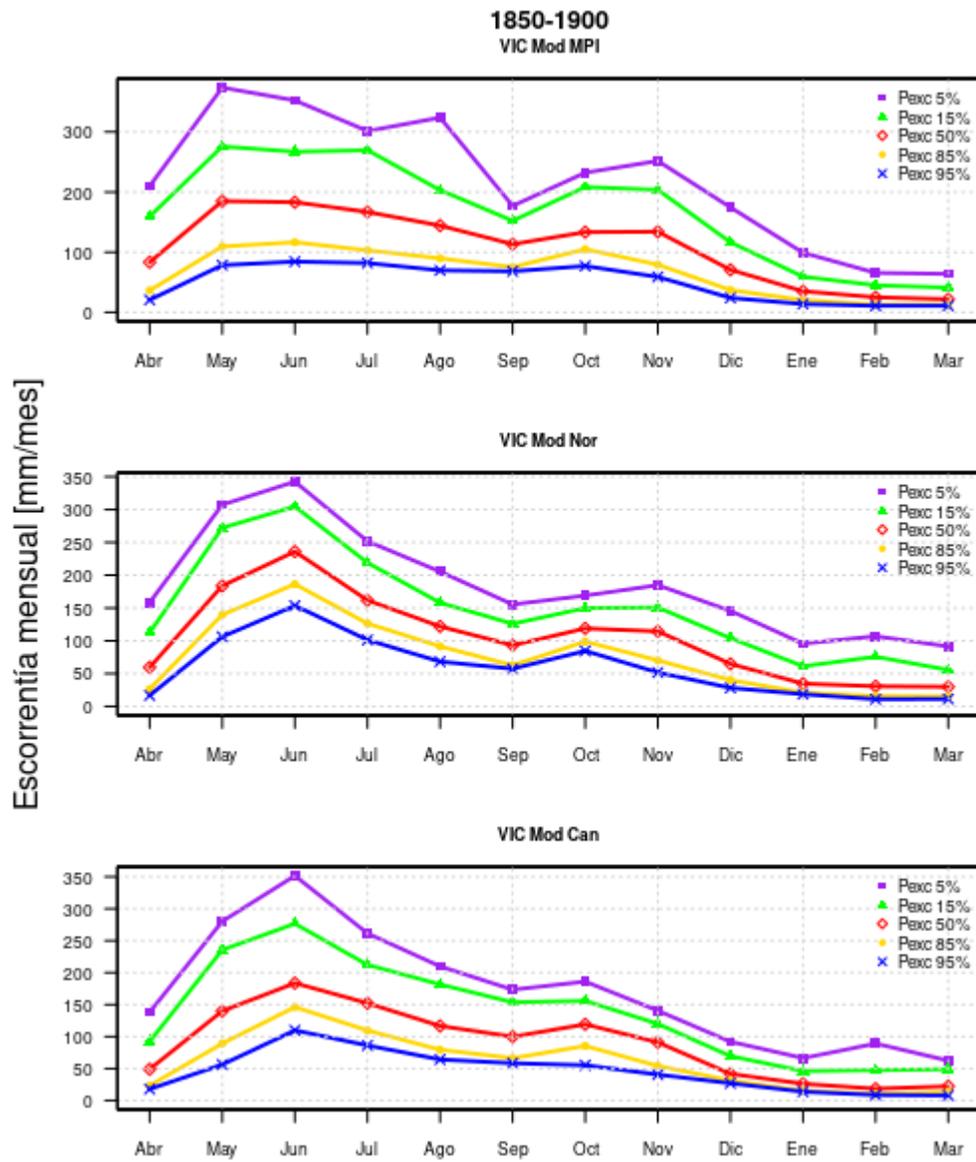


Figura A.6: Curva de variación estacional caso 1 para modelos MPI, Nor y Can entre 1850 y 1900.

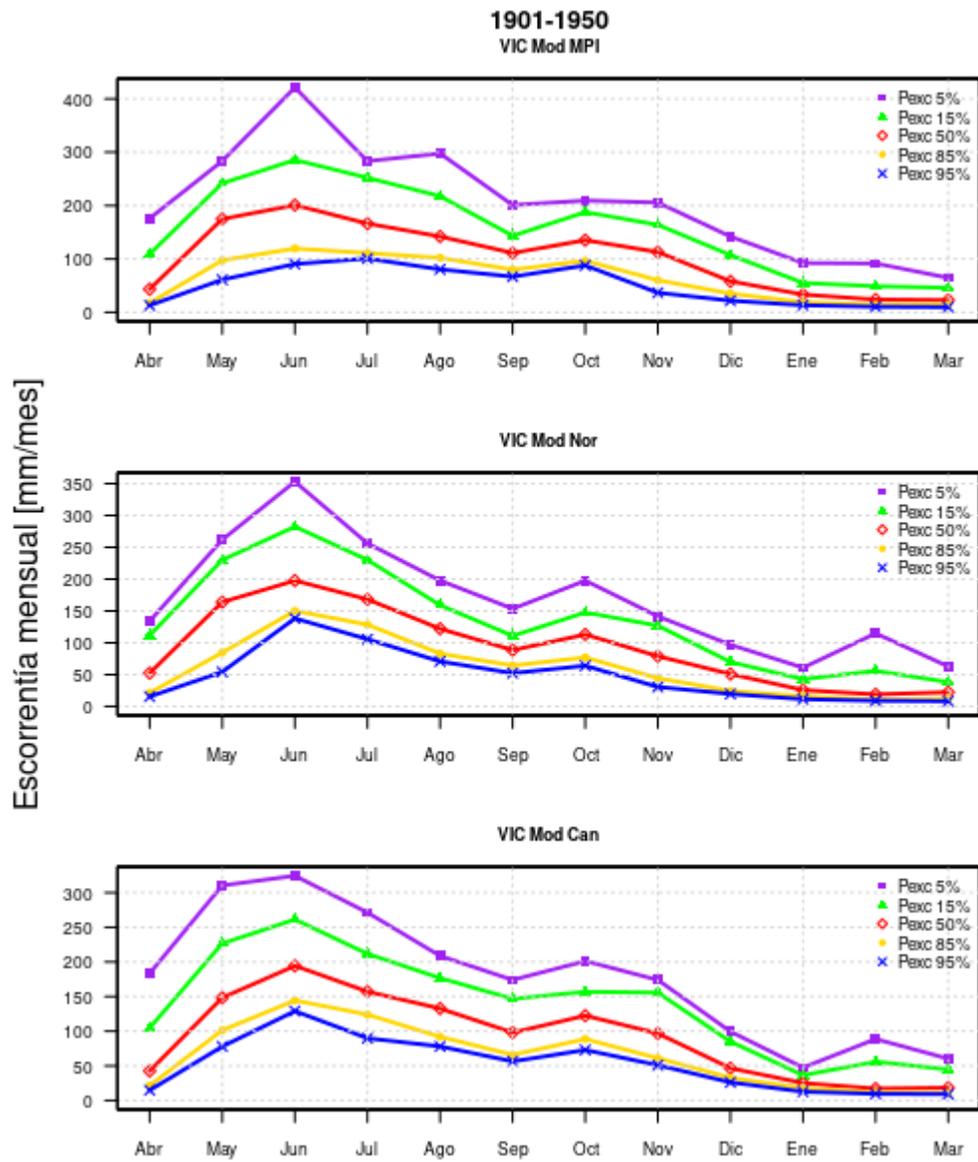


Figura A.7: Curva de variación estacional caso 1 para modelos MPI, Nor y Can entre 1901 y 1950.

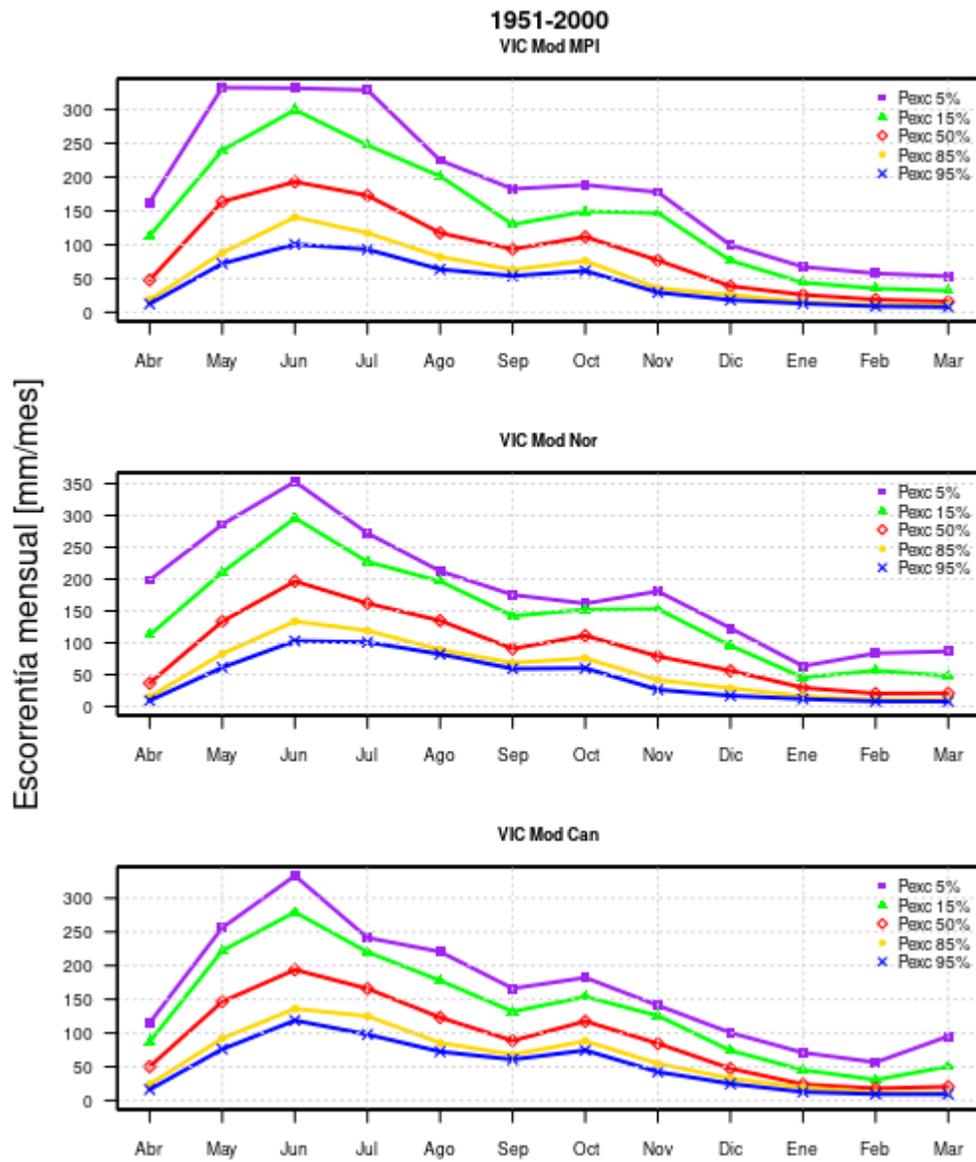


Figura A.8: Curva de variación estacional caso 1 para modelos MPI, Nor y Can entre 1951 y 2000.

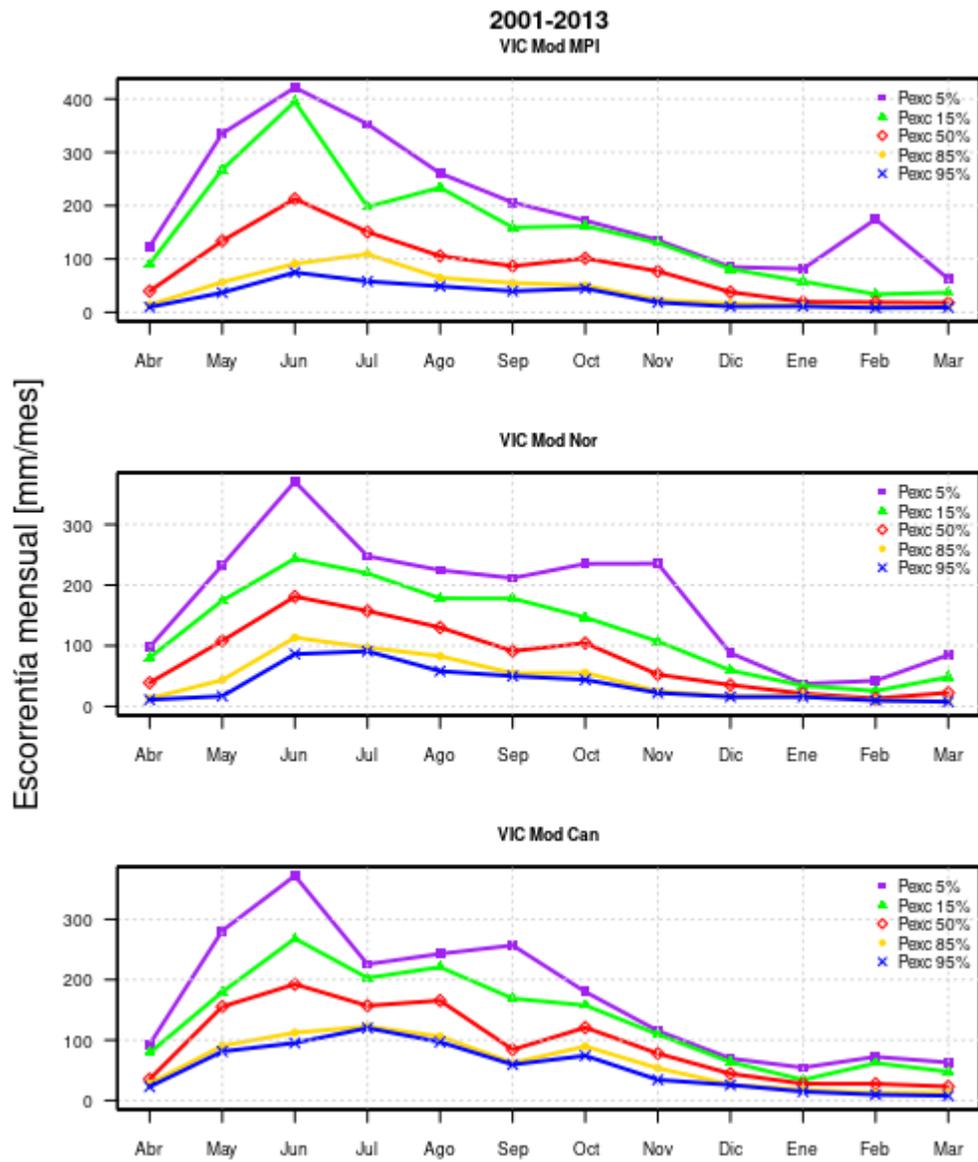


Figura A.9: Curva de variación estacional caso 1 para modelos MPI, Nor y Can entre 2001 y 2013.

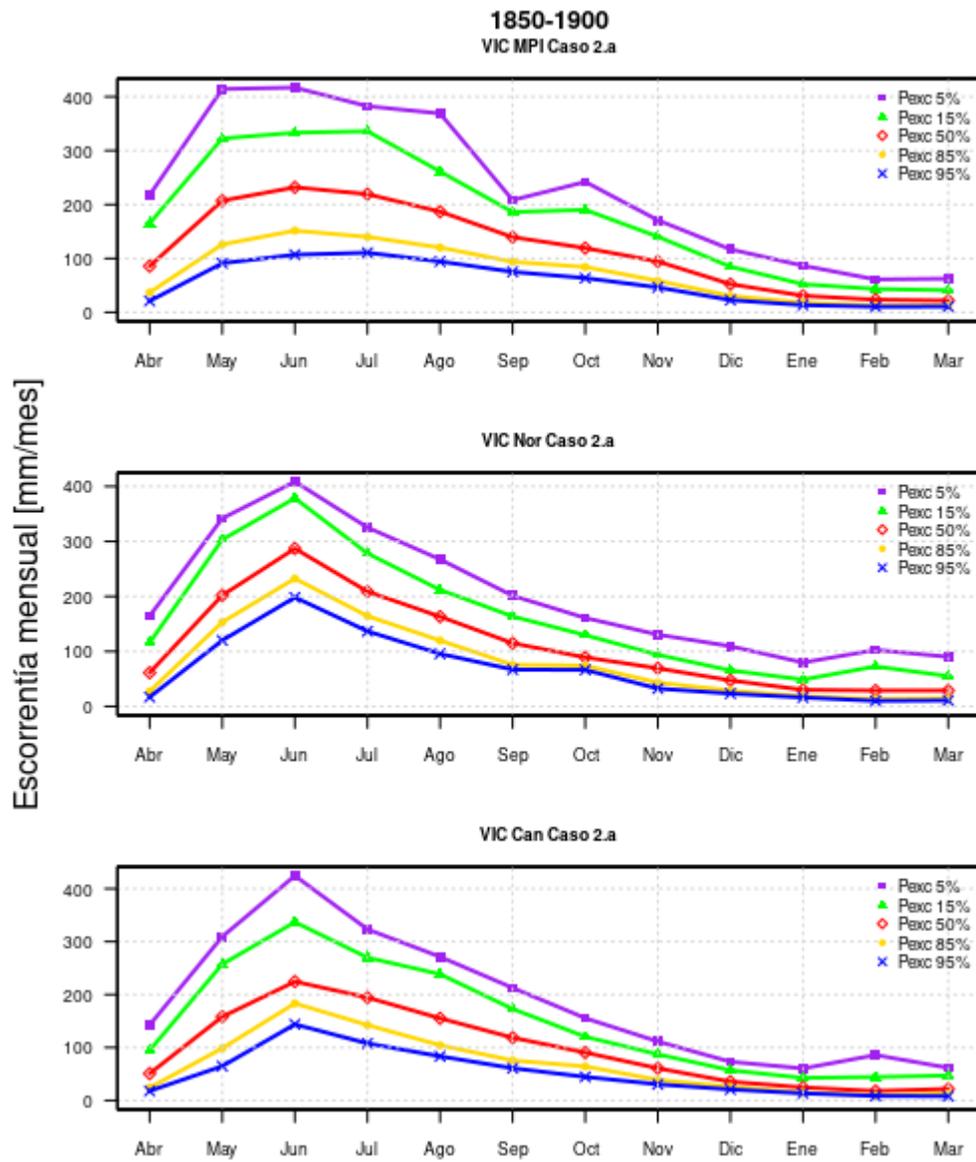


Figura A.10: Curva de variación estacional caso 2.a para modelos MPI, Nor y Can entre 1850 y 1900.

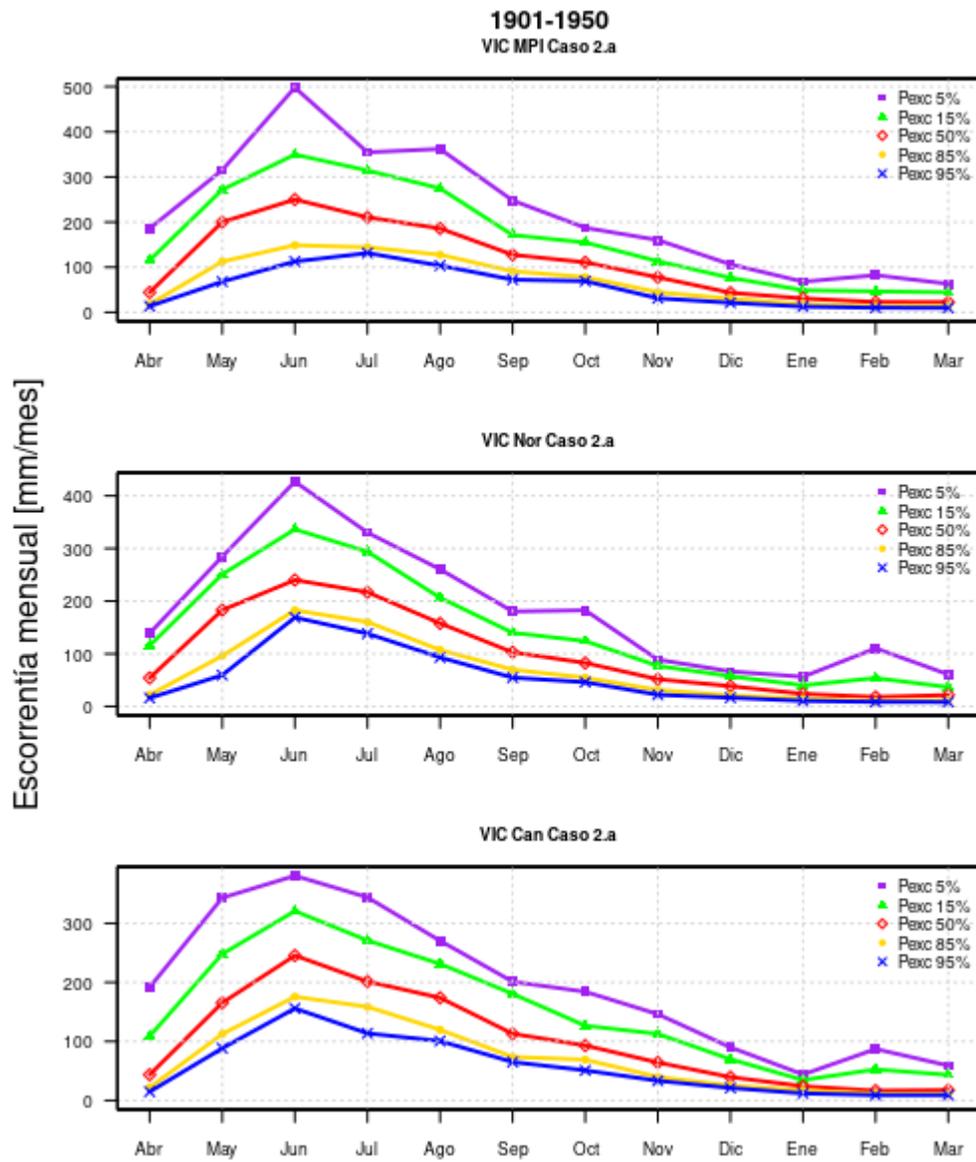


Figura A.11: Curva de variación estacional caso 2.a para modelos MPI, Nor y Can entre 1901 y 1950.

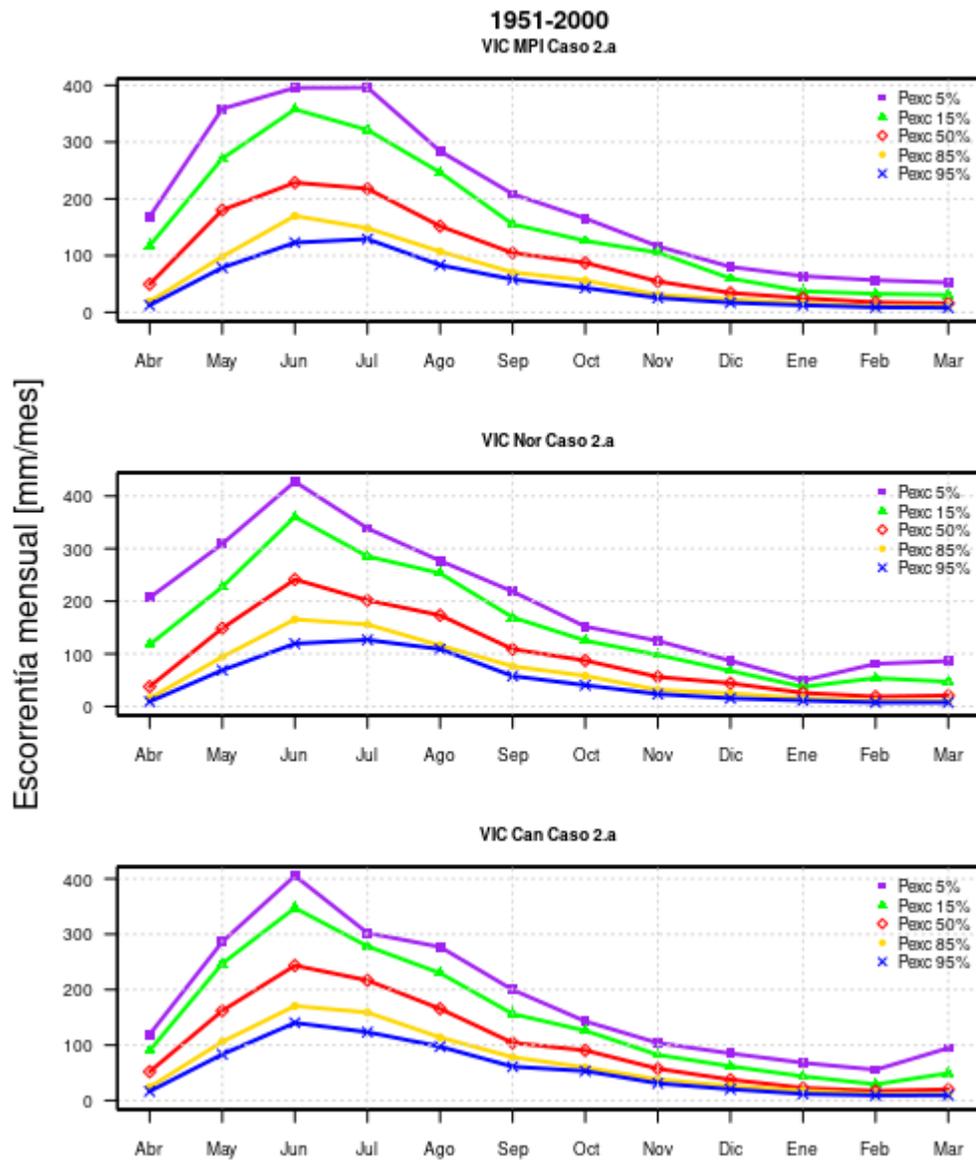


Figura A.12: Curva de variación estacional caso 2.a para modelos MPI, Nor y Can entre 1951 y 2000.

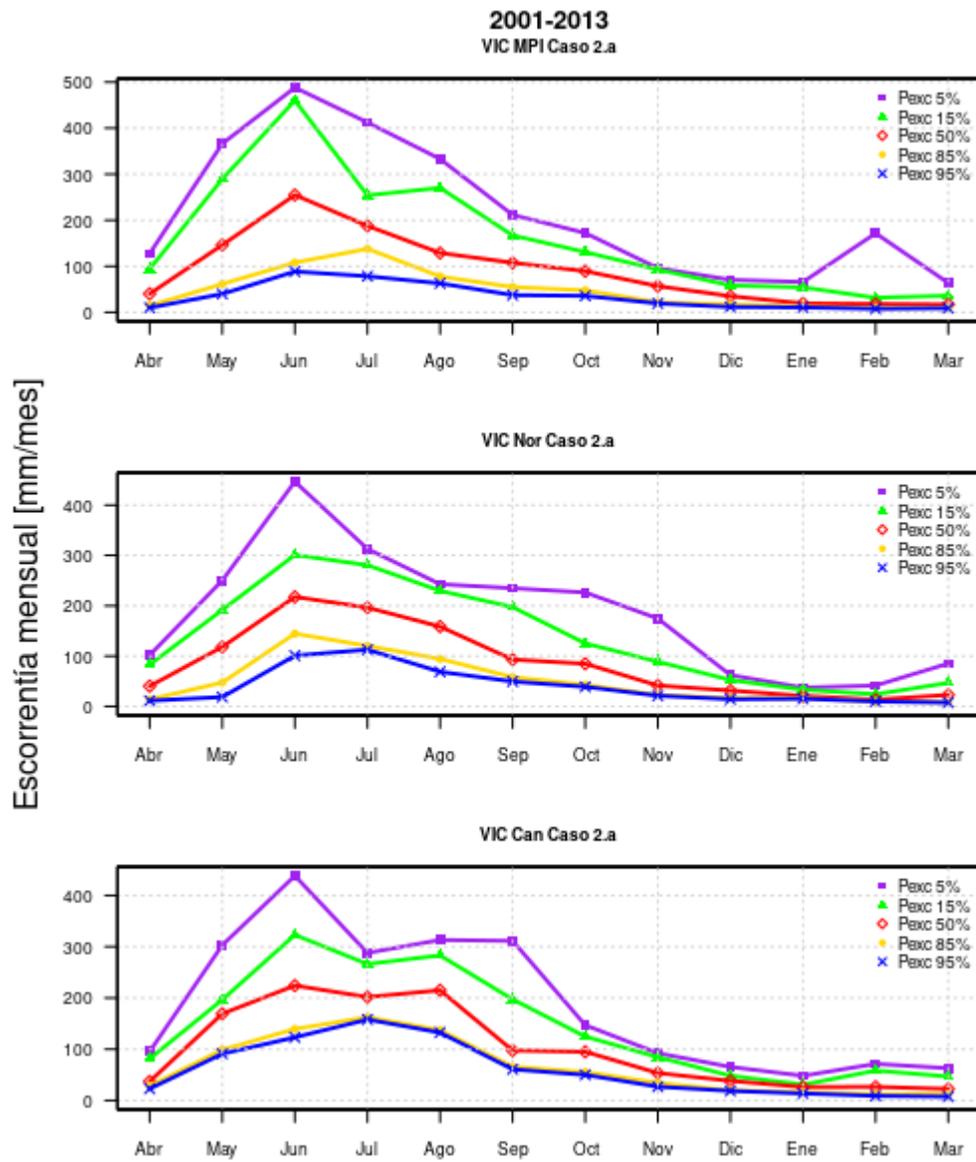


Figura A.13: Curva de variación estacional caso 2.a para modelos MPI, Nor y Can entre 2001 y 2013.

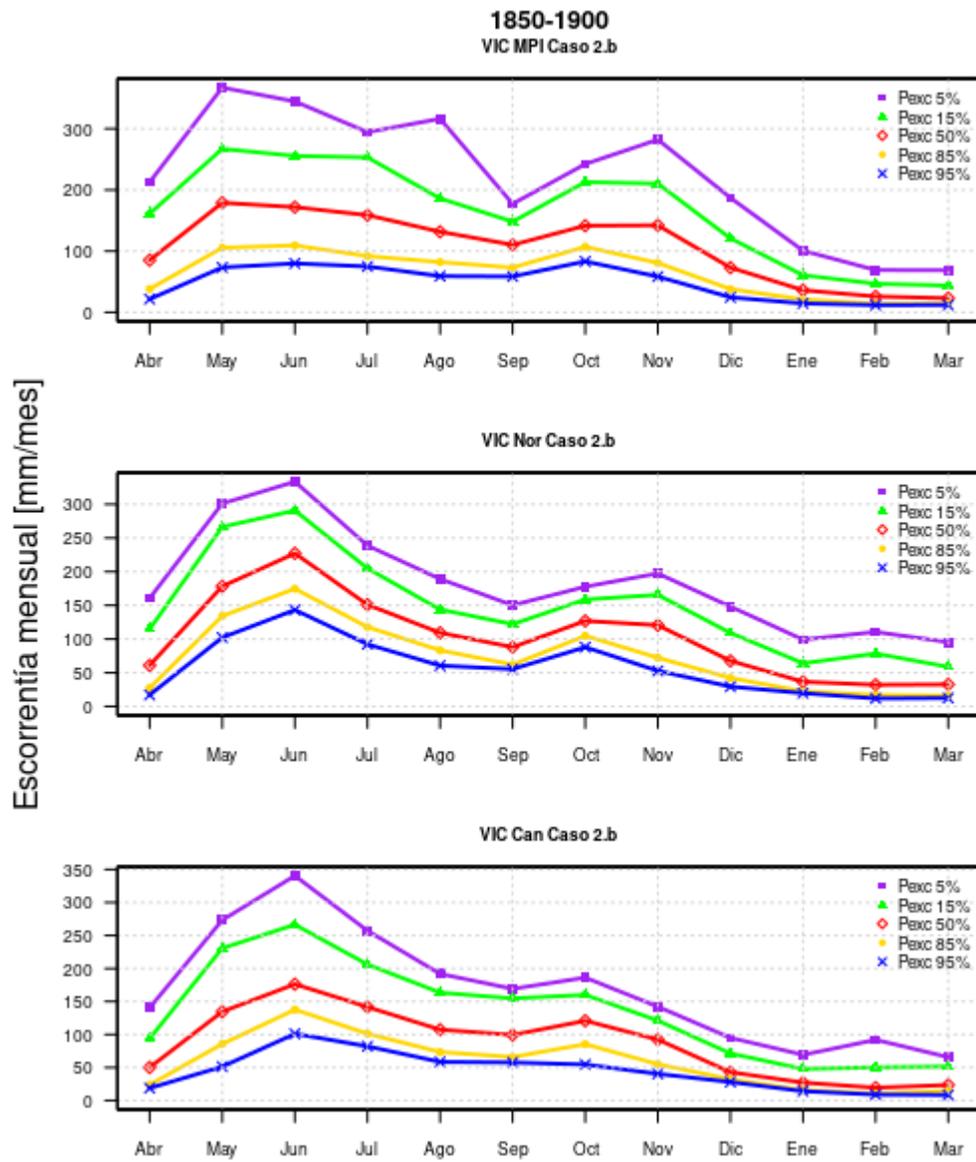


Figura A.14: Curva de variación estacional caso 2.b para modelos MPI, Nor y Can entre 1850 y 1900.

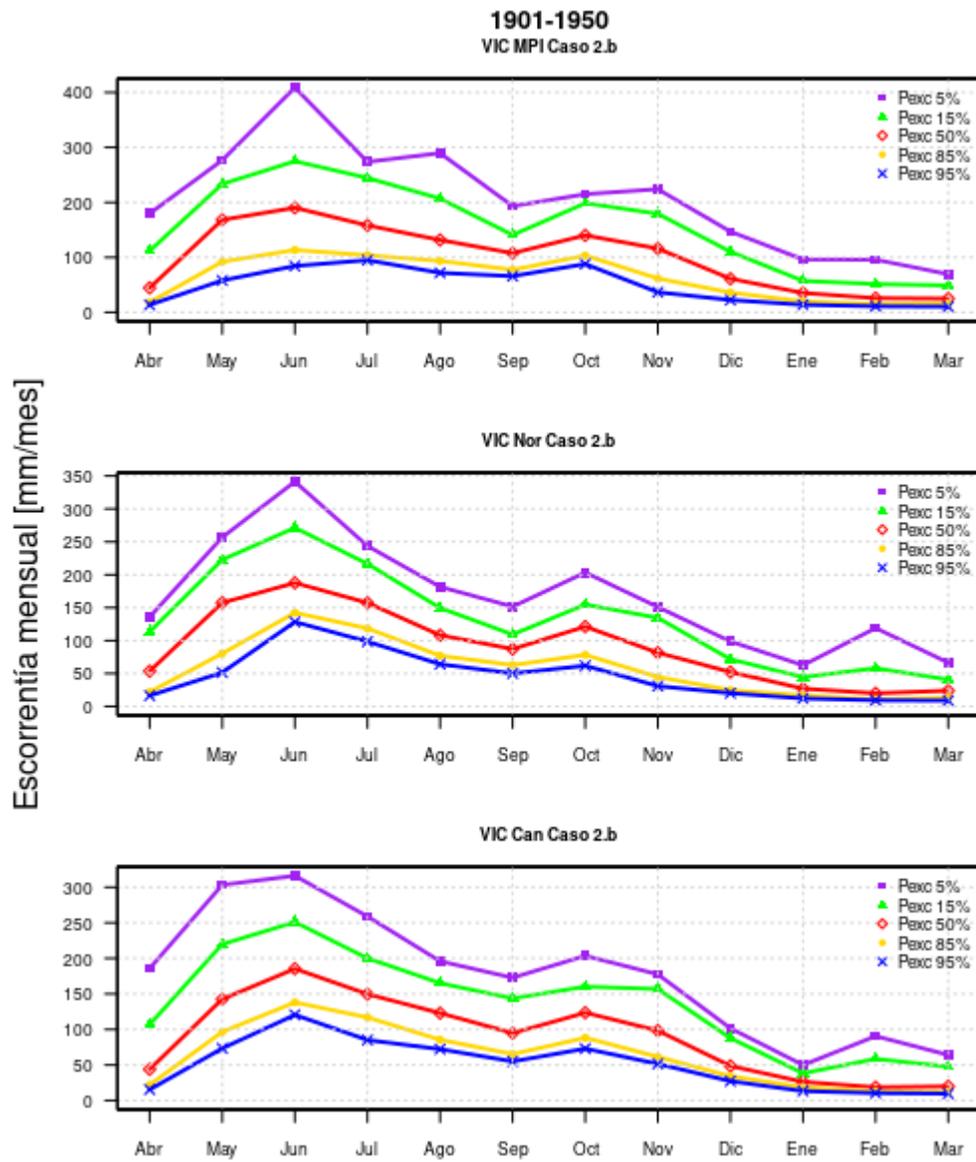


Figura A.15: Curva de variación estacional caso 2.b para modelos MPI, Nor y Can entre 1901 y 1950.

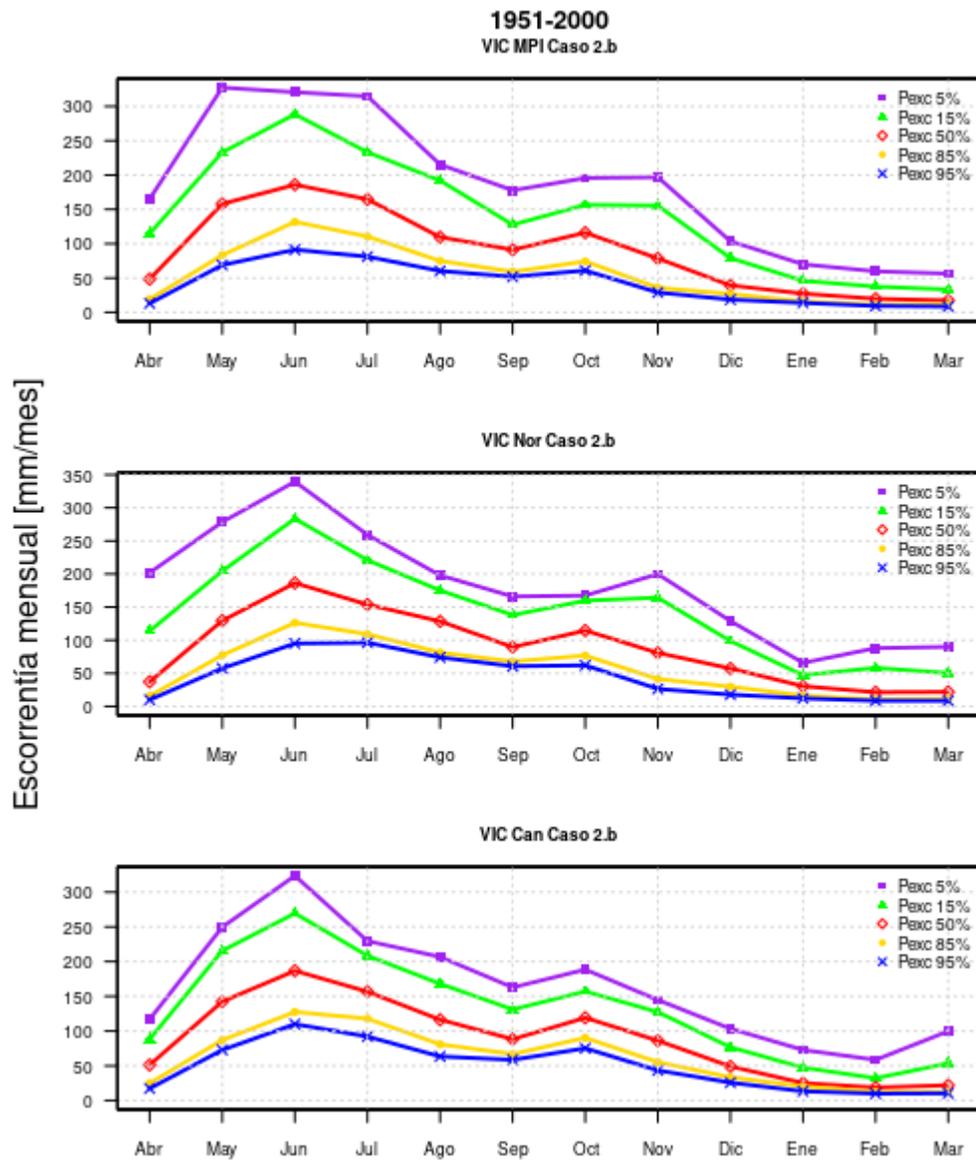


Figura A.16: Curva de variación estacional caso 2.b para modelos MPI, Nor y Can entre 1951 y 2000.

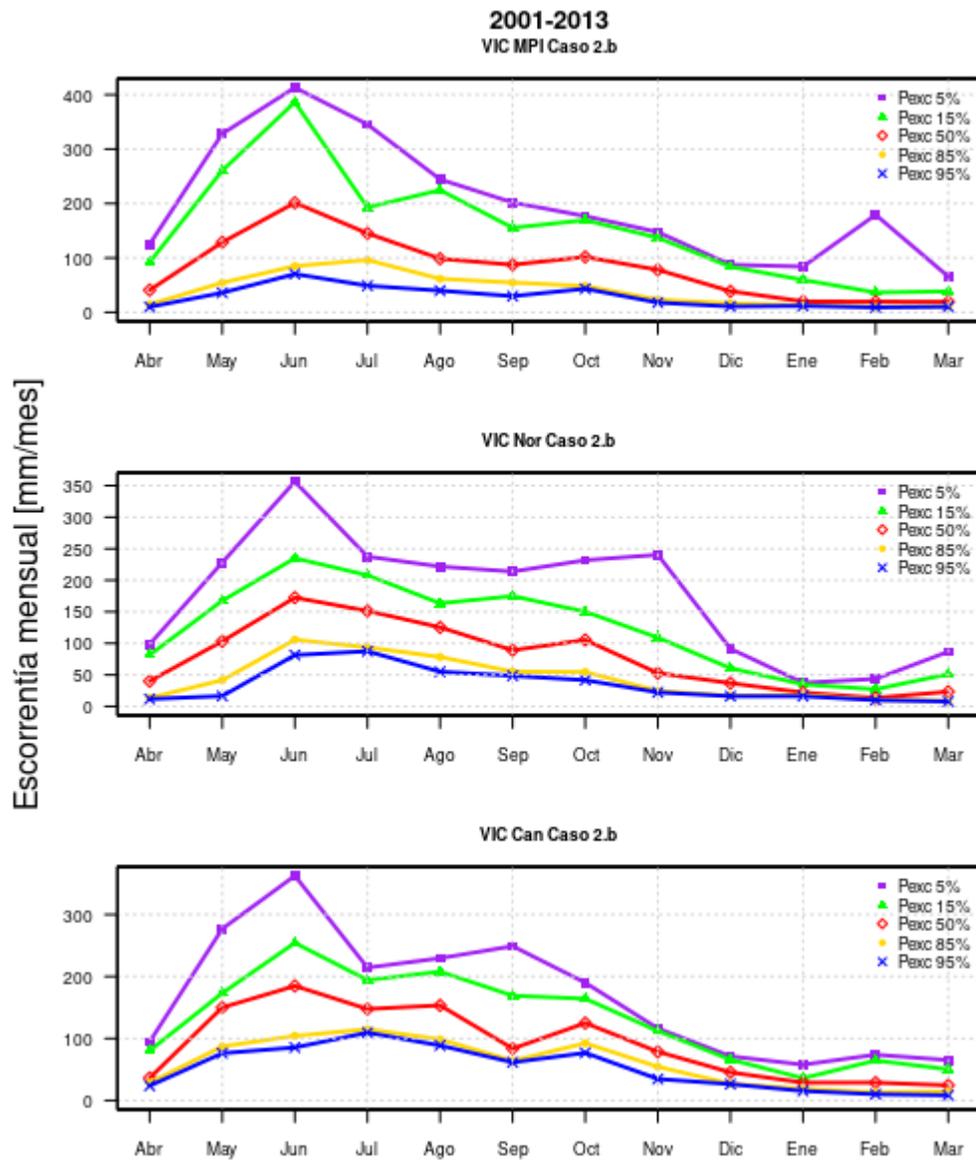


Figura A.17: Curva de variación estacional caso 2.b para modelos MPI, Nor y Can entre 2001 y 2013.

## A.2. Ciclo de Caudales Anuales

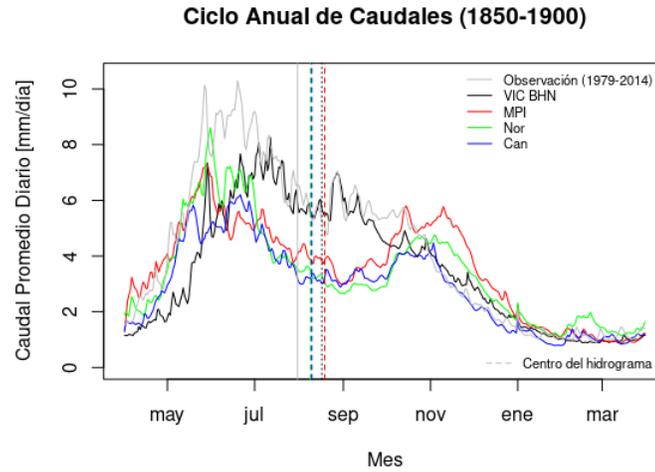


Figura A.18: Ciclo de caudales anuales para MPI, Nor y Can, VIC con entradas de BHN y Observaciones entre 1850 y 1900 para la cuenca del río Bío bío.

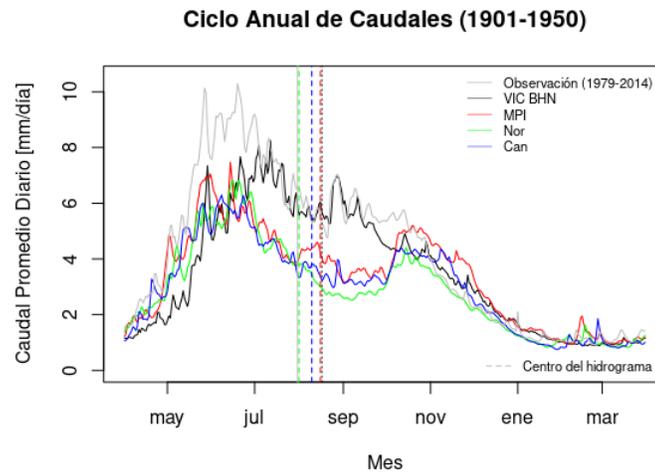


Figura A.19: Ciclo de caudales anuales para MPI, Nor y Can, VIC con entradas de BHN y Observaciones entre 1901 y 1950 para la cuenca del río Bío bío.

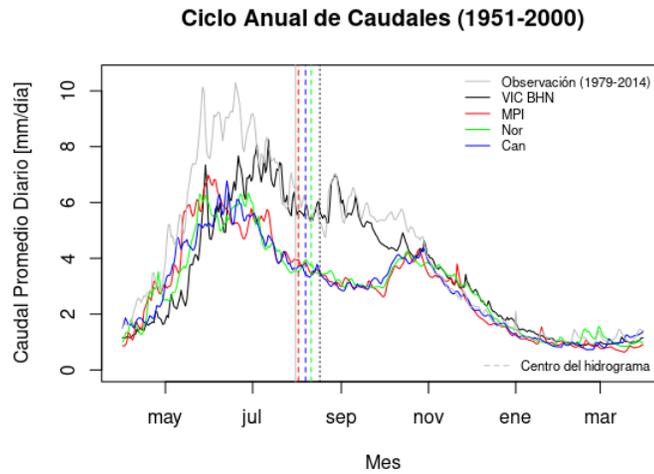


Figura A.20: Ciclo de caudales anuales para MPI, Nor y Can, VIC con entradas de BHN y Observaciones entre 1951 y 2000 para la cuenca del río Bío bío.

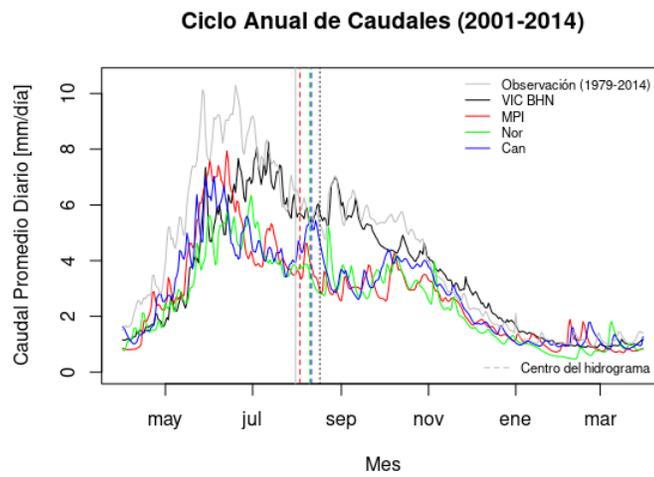


Figura A.21: Ciclo de caudales anuales para MPI, Nor y Can, VIC con entradas de BHN y Observaciones entre 2001 y 2014 para la cuenca del río Bío bío.

### A.3. Curvas de duración de caudales medios diarios

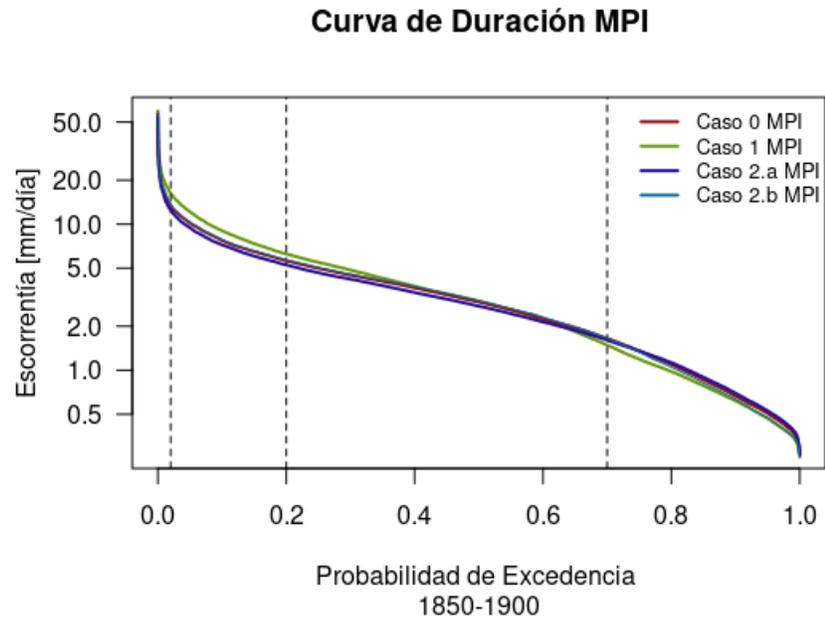


Figura A.22: Curva de duración para casos 0, 1, 2.a y 2.b entre 1850 y 1900 modelo MPI.

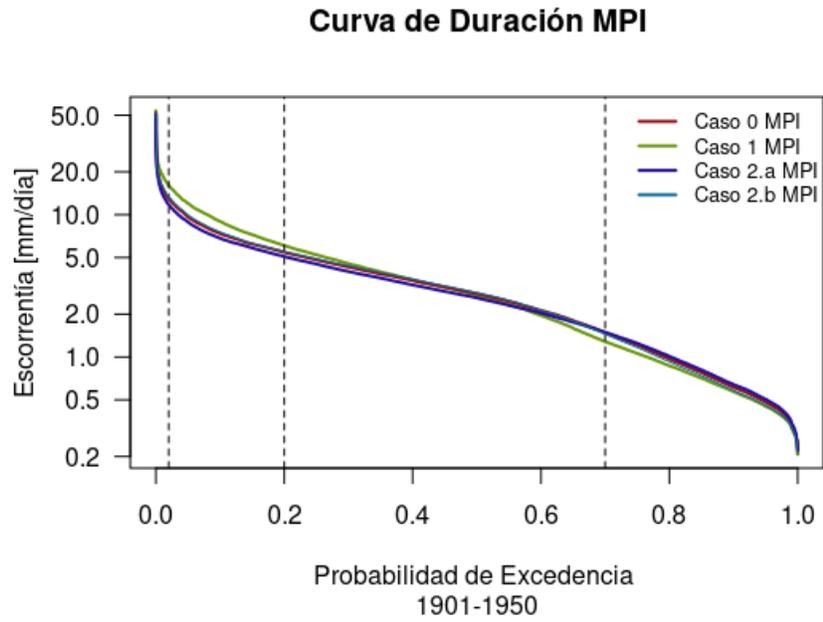


Figura A.23: Curva de duración para casos 0, 1, 2.a y 2.b entre 1901 y 1950 modelo MPI.

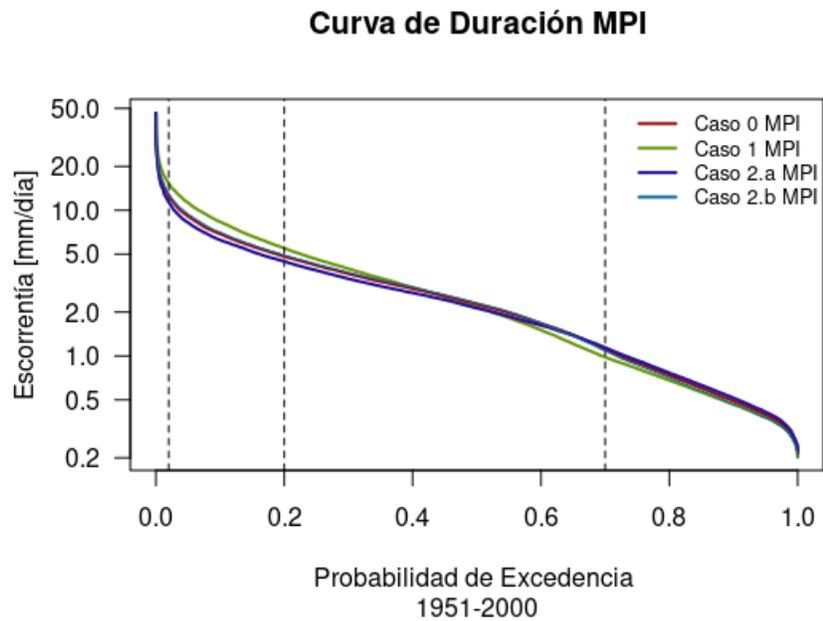


Figura A.24: Curva de duración para casos 0, 1, 2.a y 2.b entre 1951 y 2000 modelo MPI.

### Curva de Duración MPI

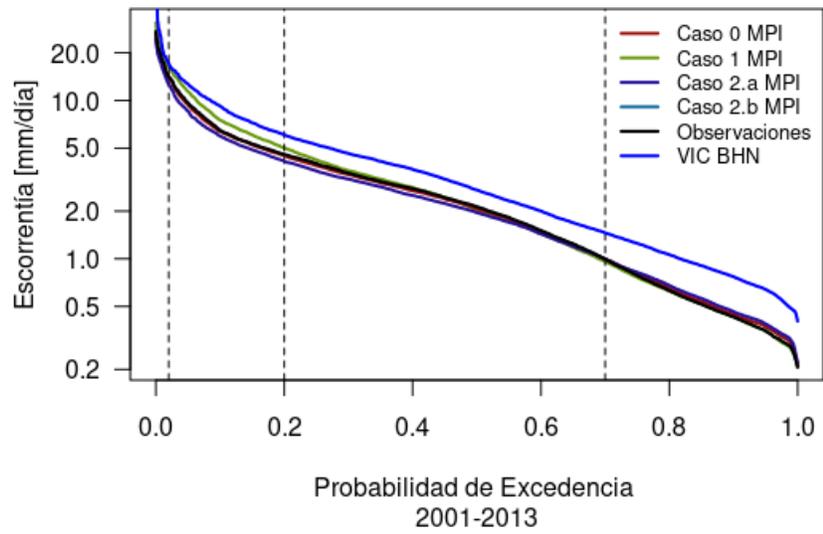


Figura A.25: Curva de duración para casos 0, 1, 2.a y 2.b entre 2001 y 2013 modelo MPI.

### Curva de Duración Nor

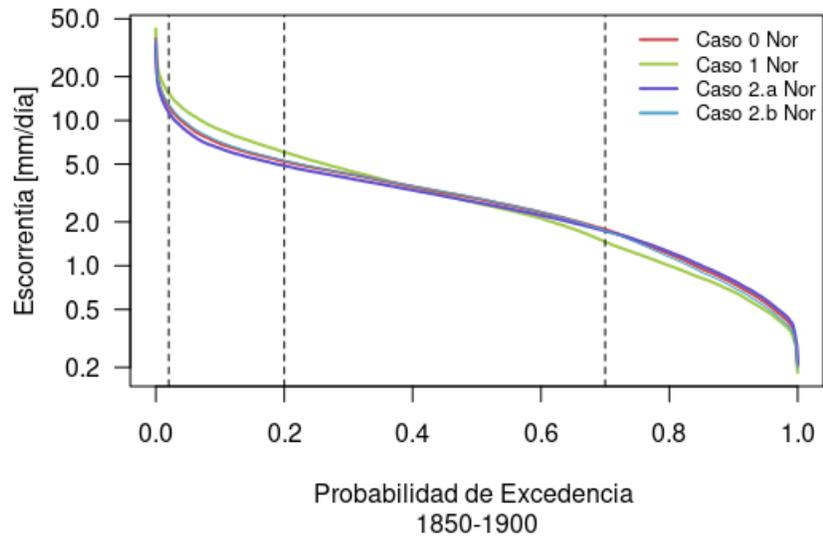


Figura A.26: Curva de duración para casos 0, 1, 2.a y 2.b entre 1850 y 1900 modelo Nor.

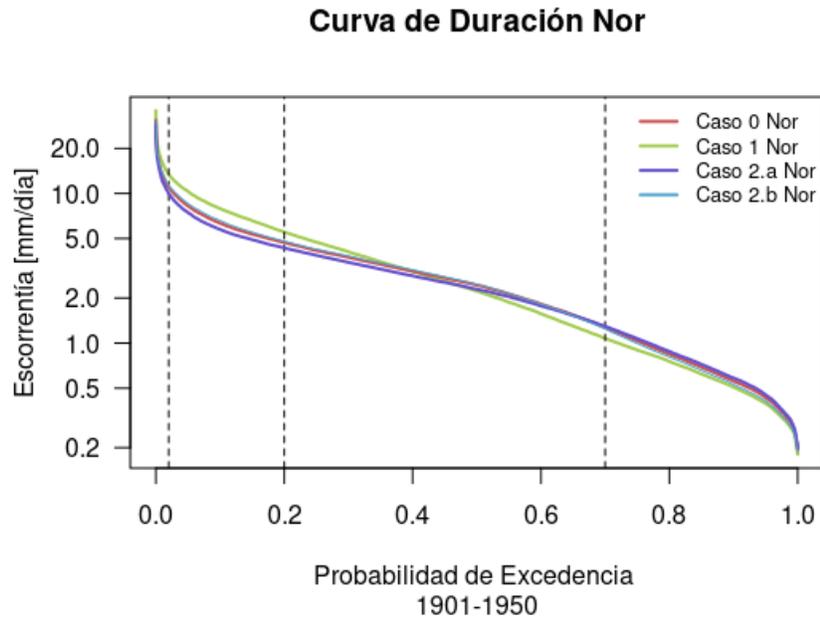


Figura A.27: Curva de duración para casos 0, 1, 2.a y 2.b entre 1901 y 1950 modelo Nor.

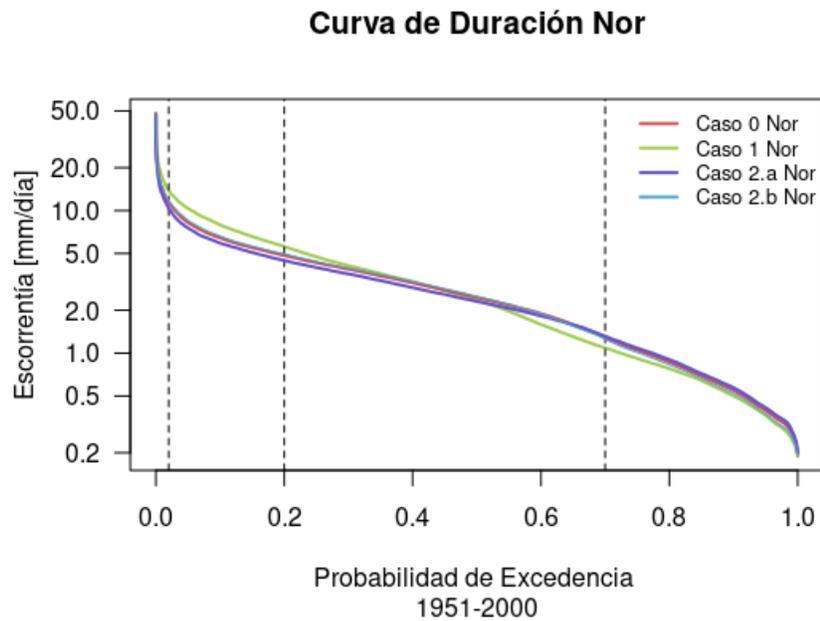


Figura A.28: Curva de duración para casos 0, 1, 2.a y 2.b entre 1951 y 2000 modelo Nor.

### Curva de Duración Nor

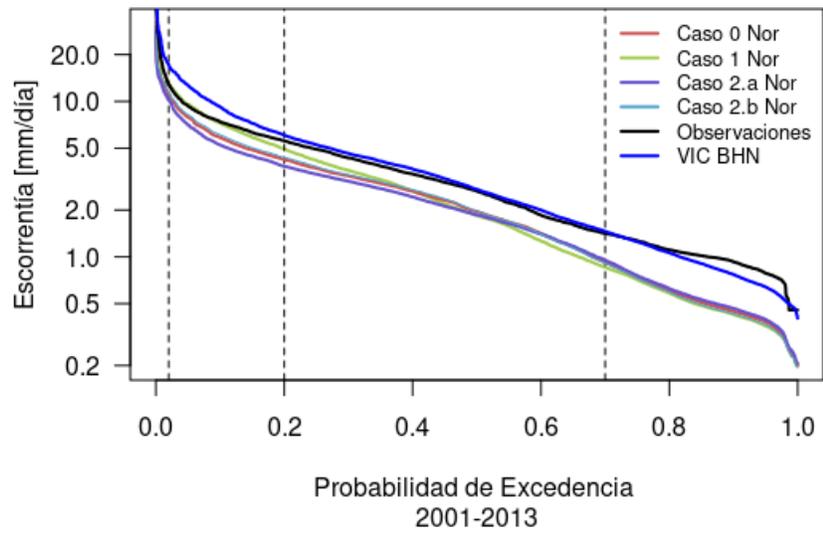


Figura A.29: Curva de duración para casos 0, 1, 2.a y 2.b entre 2001 y 2013 modelo Nor.

### Curva de Duración Can

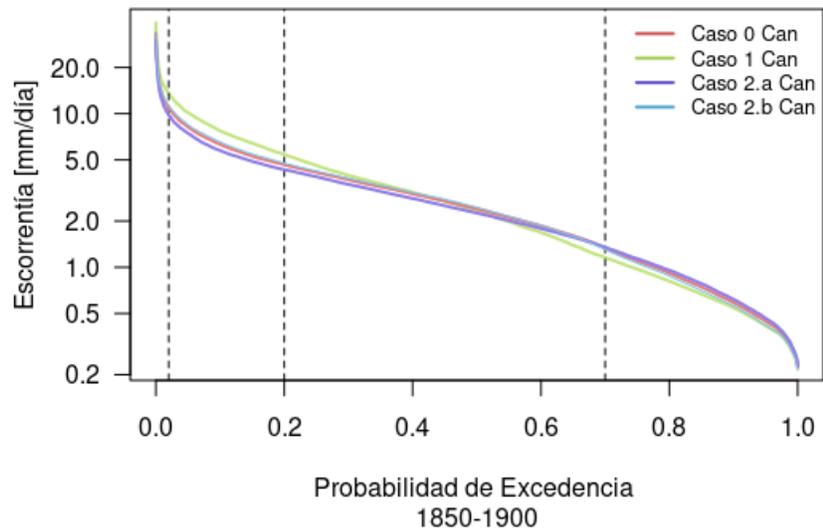


Figura A.30: Curva de duración para casos 0, 1, 2.a y 2.b entre 1850 y 1900 modelo Can.

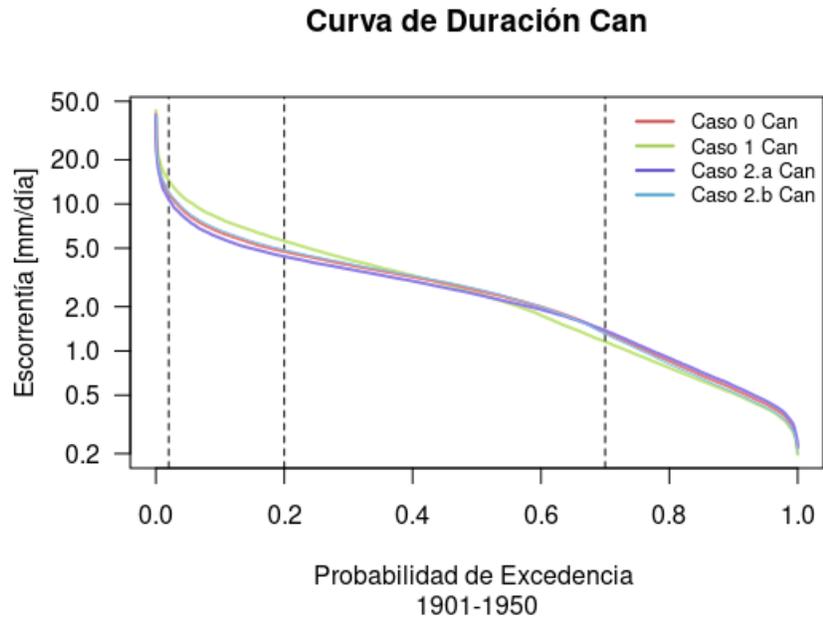


Figura A.31: Curva de duración para casos 0, 1, 2.a y 2.b entre 1901 y 1950 modelo MPI.

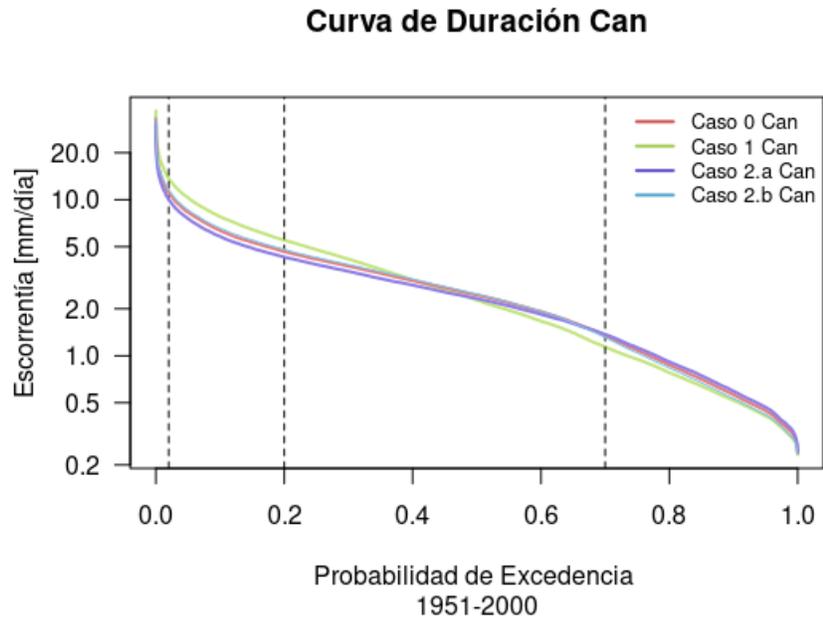


Figura A.32: Curva de duración para casos 0, 1, 2.a y 2.b entre 1951 y 2000 modelo Can.

### Curva de Duración Can

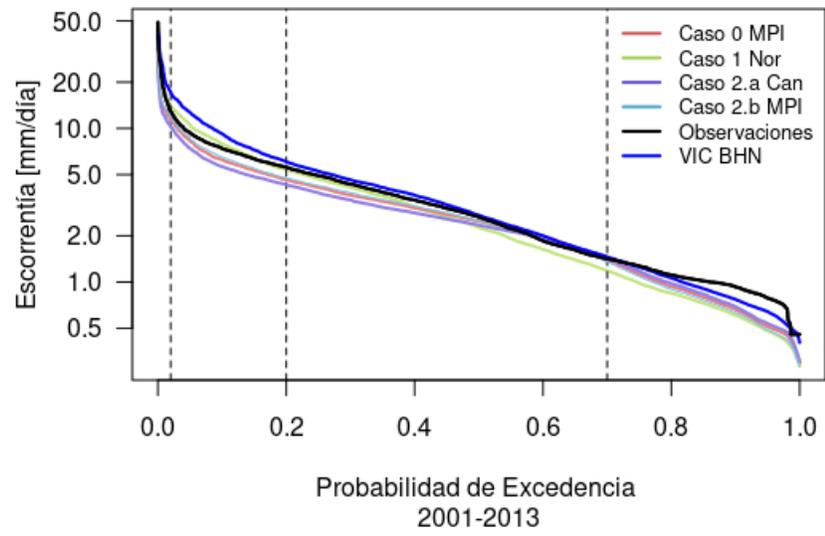


Figura A.33: Curva de duración para casos 0, 1, 2.a y 2.b entre 2001 y 2013 modelo Can.

# Anexo B

## Análisis del predictando

### B.1. Modelo de regresión lineal múltiple

Con el fin de verificar la normalidad del predictando (caudal medio anual en la estación de río Lirquén en cerro El Padre entre 1979 y 2014), se muestran los histogramas, gráficos cuantil-cuantil y gráfico de caja para ambas distribuciones (Figura B.1). En términos cualitativos, se identifica que ambas funciones presentan desviaciones empíricas en el histograma, sin embargo, el ajuste a la normal refleja una relación más similar a la distribución normal.

Con respecto a los gráficos Q-Q en la Figura B.1, estos inducen que no existe una representatividad del modelo en los valores altos, y una baja representación de los valores bajos. Por otro lado, el gráfico de caja refleja que la distribución de los datos se desvía en concentración hacia los máximos valores en el caso de log-normal.

Tabla B.1: Test de Kolmogorov-Smirnov(KS) y Anderson Darling (AD).

Distribución	Valor de KS	p-valor de KS (%)	Valor de AD	p-valor de AD (%)
Normal	0.08	97.39	0.23	97.80
Log-Normal	0.13	66.31	0.36	88.53

Los resultados del test de bondad de Kolmogorov-Smirnov (KS) y Anderson-Darling(AD) indican que ambas funciones de distribución de probabilidad son candidatas, puesto que entregan una significancia estadística mayor al 95 % (p-valor menor al 5 %). En base al test de Kolmogorov-Smirnov y Anderson Darling (Tabla B.1), se identifica que la distribución de probabilidad log-normal presenta menor valor en el test de Anderson-Darling y en términos cualitativos esta función simula de forma más cercana los valores del histograma de anomalías de caudal.

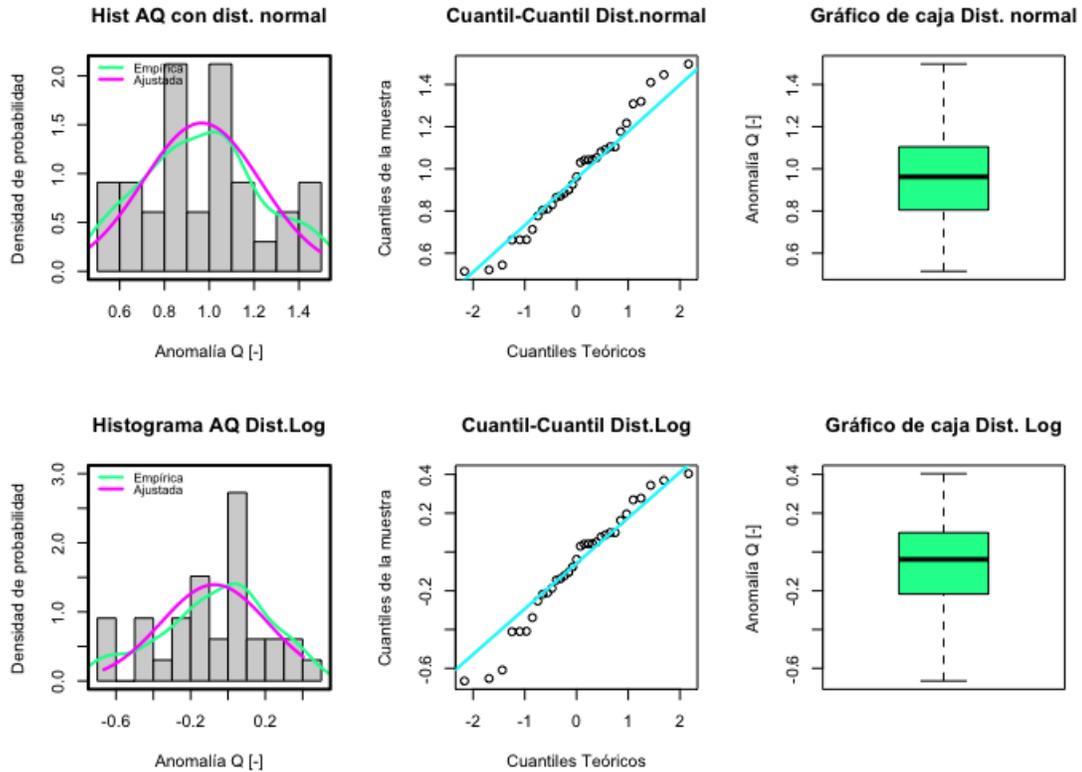


Figura B.1: Histograma, gráfico cuantil-cuantil y gráfico de caja de anomalías de caudal estación río Lirquén en Cerro El Padre (BNA 8317002) entre 1979 y 2014, para distribuciones normal y log-normal.

Los resultados del análisis en el desempeño del modelo se presentan en la Tabla B.2. En base a los valores obtenidos, se concluye que el modelo que mejor representa las variaciones en las anomalías de caudal es el que utiliza como predictores la temperatura media anual y la precipitación. Esto se deduce dados los menores valores en los índices PRESS, RSS y GCV, junto con el segundo menor para AIC y el máximo valor de la tabla para R2.

Tabla B.2: Métricas de desempeño de los modelos de regresión lineal múltiple.

Predictores	PRESS	RSS	AIC	GCV	R2	R2adj
TMin	2.5	2.2	10.5	0.1	0	0
TMax	2.2	1.9	6	0.1	0.1	0.1
TProm	2.3	2.1	8.5	0.1	0.1	0
Pp	1.3	1	-16.7	0	0.6	0.5
Tmin+Pp	1.3	0.9	-17.4	0	0.6	0.6
Tmax+Pp	1.4	1	-15	0	0.6	0.5
TProm + Pp	1.3	0.9	-15.9	0	0.6	0.5

En cuanto al análisis de la varianza del modelo escogido, se realizó un análisis ANOVA (Fisher *et al.*, 1930). Los resultados se presentan en la Tabla B.3, donde se identifica que F-Ratio es mucho mayor a uno, de forma que se rechaza la hipótesis nula.

Tabla B.3: Test de ANOVA

Fuente de variación	Grados de libertad	SS	ME	F-Ratio
Regresión	2	1.27	0.64	20.37
Error	30	0.94	0.03	-
Total	32	2.21	-	-

Para evaluar la presencia de valores atípicos (*outliers*), calculamos la distancia de Cook. Los valores que superan la línea roja en la Figura B.2, se identifican como atípicos. Se identifica un valor que tiene una alta distancia de Cook (17), correspondiente al año 1995.

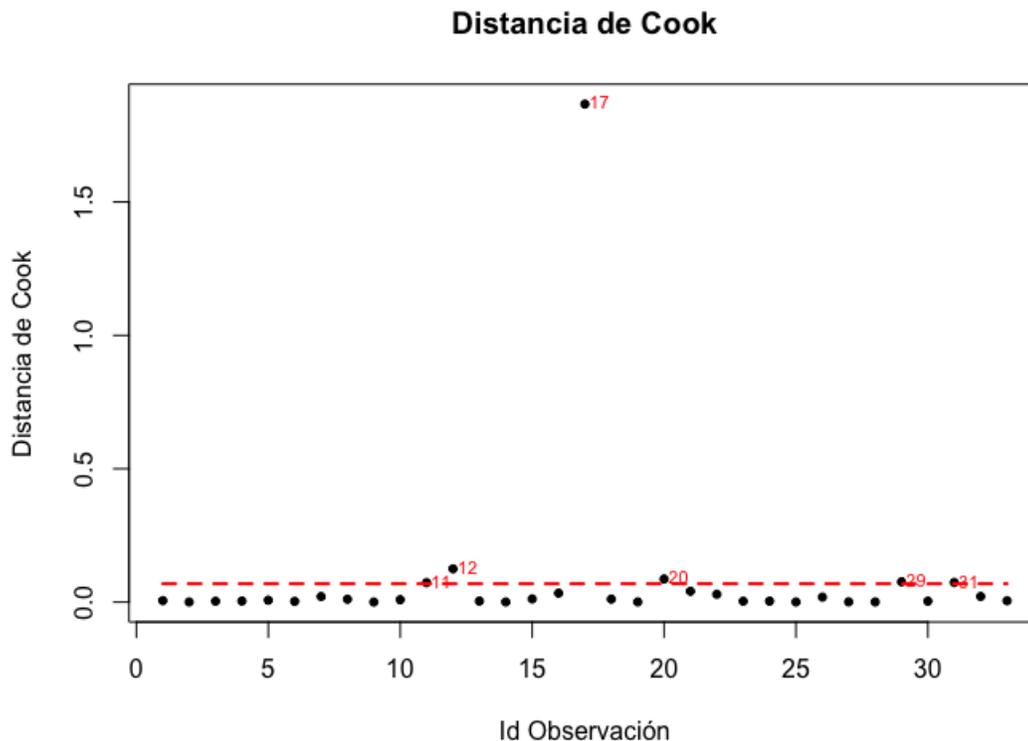


Figura B.2: Distancia de Cook para el modelo de regresión lineal múltiple de anomalías de caudal entre 1997 y 2014.

En cuanto a la normalidad del residuo, esta se analiza cualitativamente. En la Figura B.3 se presentan gráficos de dispersión, histograma, gráficos Q-Q y correlación para los residuos del modelo generado.

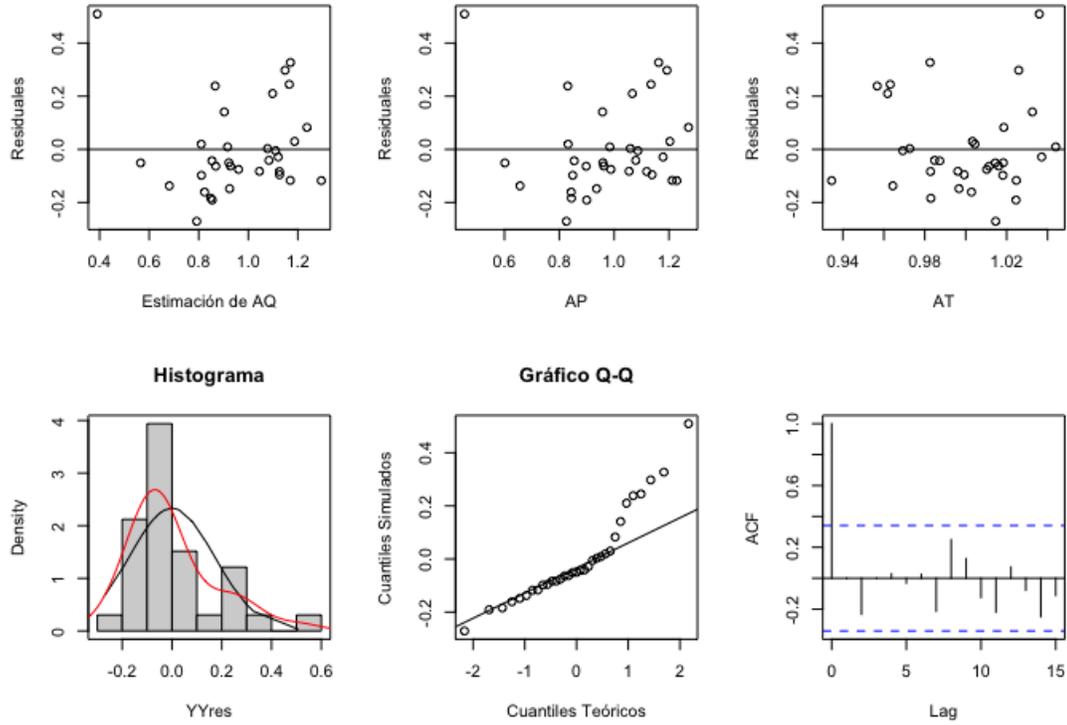


Figura B.3: Análisis de normalidad de residuos.

En base a la Figura B.3, se deduce que no existe tendencia o correlación de los residuos respecto al predictando y predictores (gráficos primera fila), los residuos se ajustan bien a una distribución normal (histograma), existe dispersión a nivel de cuantiles en el primer y último cuantil (gráfico Q-Q) y no existe autocorrelación entre los residuos. Con lo cual, se concluye que se cumple con los supuestos de regresión lineal múltiple.

# Anexo C

## Transcripción de Entrevistas

### C.1. Entrevista 1

M: Vamos a partir con la entrevista. Más que recordar que, cualquier cosa que no quieras responder, no la respondes y me dices ¿Cuántos años tienes?

D: Tengo veinticuatro años.

M: ¿Y por qué parte del Bío-Bío vives? ¿O por dónde transcurres, normalmente? ¿La zona alta...?

D: Mira, el Alto Bío-Bío tiene... el Alto Bío-Bío es como la cordillera alta de la región del Bío-Bío, como la zona más alejada. Y el Alto Bío-Bío se divide en dos partes, como en dos cajones, se podría decir, como en dos valles. Y yo vivo para el lado del Queuco, le llaman. Vivo por ese lado, donde pasa el río Queuco.

M: Perfecto. ¿Cuál es tu nexa con la comunidad?

D: Mi nexa desde pequeño uno nace con la idea de volver siempre, siempre de dónde viene uno, y es lo que nos conecta a nosotros como, como mapuche o pehuenche que somos con la cordillera. Yo creo que hay algo que nos conecta mucho y hace que siempre estemos pendientes del territorio en sí. Como que nunca nos desconectamos. Es parte de.

M: ¿Y tienes algún rol en tu comunidad? ¿Te toca dirigir alguna ceremonia o algo de ese estilo?

D: Actualmente hay gente que está preparada, que ya ha... con... a la vez es como... es como aleatorio también de gente preparada que viene desde hace mucho ya y tienen ese rol importante, pero nosotros como jóvenes estamos ya, o en algún momento ya tenemos que... obedecer algunos... algunos puestos que nos tocan en la comunidad. Como de cumplir un rol bien importante en la comunidad. Como de ser alguien activo en la enseñanza de la lengua, en la enseñanza de la crianza, como eran antes. La crianza de los animales, la crianza de... de diferentes cosas de cómo se vivía antes, de no... de no sobrevivir tampoco, porque la gente antes en el Alto Bío-Bío era muy independiente, y de hecho vivía muy bien. Y hoy en día igual, ya el asistencialismo ha entrado bastante. Pero dentro de la comunidad nosotros ya, como jóvenes al menos, hay muchos jóvenes que están como al tanto ya de volver a las comunidades, de cumplir su rol, como de tomar algunas partes que los viejos van dejando, que los antiguos nos van dejando, entonces en algún momento nosotros vamos a ser quienes

lleveamos eso.

M: Perfecto.

D: Esos roles.

M: El río Bío-Bío es de los más largos de Chile y de los que tienen más caudal. ¿Cómo te han contado tus antepasados que era antes? ¿Han habido cambios, por lo que te cuentan ellos y lo que ves tú?

D: Mi abuelo es... o sea, ha habido una disminución tremenda de los ríos. Tanto del Bío-Bío como de los cauces que ingresan a esos ríos, esos riachuelos que ingresan al río, esas vertientes, han disminuido bastante y otras han ido desapareciendo. Antiguamente existía mucho el tema de la protección de los ríos, desde... desde la conexión espiritual que tenía la gente con los ríos, desde el respeto. Existía mucho eso, la... el respeto del agua, en sí, porque nosotros... el agua para nosotros es como la vida. Los usamos para las ceremonias, para todo lo usamos, nosotros. Desde las ceremonias hasta el uso... uso común que tenemos como, como personas en el Alto. Y ha disminuido bastante, bastante, bastante. ¿Te acuerdas cuando fuimos a la junta donde estaba el Bío-Bío con el Queuco?

M: Sí.

D: Ahí había una... una demostración de cómo era el río antiguamente, ¿cachai? Y así ha sido con el río Queuco también, el río [ininteligible] también es un río bastante gigante, pero... pero ha estado en diferentes amenazas también. Amenazas de proyectos de... que están como ya realizados, que están como previstos para, a futuro realizarlos. Entonces todo ese tema de la hidroeléctrica en sí, como... como los varios proyectos han entrado acá es...

M: Claro. Y, por ejem... Ah, perdón, sigue.

D: De ser como... De hecho, como el Alto Bío-Bío posee una gran cantidad de... de árboles nativos y todo, pero, como te digo la... el tema de la represa y el tema del monocultivo en sí, han hecho mucho daño en el sentido de las... de la fluidez que debe tener el río. En los fluidos de todo el ese, ese tema.

M: Y, una pregunta, antes mencionaste que el agua se usa en ceremonias ¿podrías describir alguna ceremonia que recuerdes en la que se usa agua?

D: En todas las ceremonias usamos agua, nosotros acá. En todas.

M: En el Nguillatún, el Machitún...

D: En el Nguillatún y en los Machitunes se hace el tema del agua. Se hacen las ceremonias con agua. Tanto para tomar, tanto para... para hacer la... las ceremonias, las rogativas con el agua.

M: Perfecto.

D: Se ocupa mucho en ese sentido. En el lado espiritual el agua es como algo primordial que no debe de faltar en las ceremonias de los mapuche acá en el territorio pehuenche.

M: Perfecto. ¿Han existido actividades que hayan afectado esta disminución del agua? Y, si han habido, ¿la comunidad se ha organizado? ¿Han tenido como que cambiar alguna forma en la que ustedes se conectan con el agua, dado que hay menos agua?

D: Mira, la... la amenaza del... del (ininteligible, algo con ísmo") empezaron con el tema de las represas. O quizás desde mucho antes también, desde... En el territorio del Alto Bío-Bío empezaron muchas extracciones de, de diferentes minerales, de diferentes recursos naturales en el Alto Bío-Bío, como también lo hicieron con la tala de las araucarias. Hubo un tiempo en

que se taló mucha araucaria en el Alto Bío-Bío, que es donde más araucarias hay en el... casi en la región, o sea, en Chile en sí. Alto Bío-Bío tiene una gran cantidad de araucarias y en su historia han sido taladas, fueron taladas muchas araucarias. Y eso disminuyó harto también. Eso también tiene conectividad con el tema del agua, porque las araucarias de cierta forma, lo que hacían con la nieve... lo que hacen es mantener la nieve, la araucaria como que mantiene la nieve en el territorio de la alta cordillera. Eso es lo que hacía. Por eso en la cordillera, donde hay nieve, siempre van a haber araucarias, porque eso también lo ayuda a mantener. Luego partieron el tema de las forestales eso, que ya fue hace poco, del año noventa, dos mil ya estaban con la intención de hacer el tema de las forestales conjuntamente con el tema de los nativos, o sea, de los árboles, del eucalipto y del pino, que entraron por todos lados esos proyectos a través de las municipalidades del territorio. Y en el tema de las hidroeléctricas, yo creo que... de cierta forma se aprovecharon mucho de la... del nivel de... de poco, a ver cómo te puedo decir, del nivel de... de comprensión del sistema en sí de la gente, porque imagínate que antes la gente no sabía leer. Existía mucho eso. Y en el año dos mil todavía, el nivel de... ¿cómo es la palabra esa que...? ¿Alfabetismo?

M: Analfabetismo.

D: Analfabetos.

M: Sí.

D: Era muy elevado en el Alto Bío-Bío, muy elevado. Yo creo que como el ochenta por ciento de la gente era... no sabía leer ni escribir. Imagínate cómo a la gente la engañaron a través de los viajes, de las reuniones, de la plata, ¿cachai? Y todo ese tema, cómo fueron engañados. Entonces... Y existió mucho eso, aunque uno no crea todo ese tema, la gente antes cambiaba su tierra, su pedazo de tierra por un saco de trigo, imagínate. Entonces hay esos relatos en los antiguos donde, puta, hay muchos relatos antiguos en donde la gente se acuerda de eso todavía, cómo cambiaban las tierras a los colonos, a los gringos, a los alemanes que llegaban acá, ¿cachai? Pero, pero a la actualidad de hoy en día los jóvenes han cumplido un rol bastante, bastante organizativo acá, en el Alto Bío-Bío. Se han organizado bastante bien, han aprendido bastante, han defendido mucho. Pero las amenazas siempre están. El tema de los... de los eucaliptos y de los pinos, imagínate que hubo un tiempo en que se aceptaron estos proyectos a través de las municipalidades y fueron años de plantaciones de eucaliptos, ¿cachai? Hasta que en el 2002, creo, en el 2004, por ahí, no recuerdo bien, se disparó el tema de la plantación de eucaliptos porque se dieron cuenta tempranamente que estaban dañando las napas subterráneas. Imagínate, se dieron cuenta, ¿cachai? Y no aceptaron más ese tipo de proyectos. Por otro lado, la gente lo hizo bien, ¿cachai? Y los eucaliptos que ven, o que viste tú cuando viniste para acá son plantaciones que son de esa época, de esos años, de esa temporada en que se plantó esos pinos. Pero gracias a Dios se ha parado un poco el tema ese.

M: Ya. Y, con respecto a la industria forestal, ¿cuál es tu opinión? Tanto como persona, como desde la cosmovisión mapuche.

D: Mira, el tema de las... el tema de las forestales acá en la octava región y en la novena región es un tema bastante fuerte. Como... de cómo los grandes empresarios se quedaron con nuestra tierra a través del engaño, de la falta de lectura, de ideas que tenía antes la gente, se aprovechaban en ese sentido de todo eso. Por eso quitaron muchas tierras así, a través de las matanzas, de los ejércitos que Chile tenía se quitaron muchas tierras. Y, puta, a la actualidad

lo que nos han dicho los viejos, los antiguos a nosotros es que ese sistema de los eucaliptos en algún momento va a caer. Pero va a provocar un daño gigante en el tema de las aguas, de las napas. O sea, ya estamos en un problema de crisis hídrica en el territorio, imagínate, en uno de los territorios en donde antiguamente abundaba la naturaleza, imagínate. Antes no había problemas de agua en ningún territorio, y ahora hay sectores pequeños, de la cordillera incluso, de acá del Alto Bío-Bío, de Malleco, de todos lados, están con problemas de crisis. Y es un tema que también se habla en las ceremonias. Se habla, las machis lo han dicho, los lonkos lo han dicho, porque la gente debe despertar y tiene que conectarse con la naturaleza más. Y en algún momento la gente joven tiene que volver al campo, ¿cachai? Y con eso yo creo que la gente mapuche en sí están con la intención, o siempre van a hacer esas intenciones de, en algún momento, de volver al campo.

M: Claro. Y, la última pregunta, ¿podrías describir qué significan las especies como el canelo y la araucaria, que ambas son nativas, para ti?

D: ¿La araucaria y el...?

M: Y el canelo.

D: Mira, el canelo es como más descendientes de territorio nag, que se podría decir, como el territorio de Temuco, ¿cachai?

M: Sí.

D: Mira, lo que pasa es que el territorio mapuche, como te decía, se divide en varios sectores, como depende del territorio o de la parte geográfica, que se podría decir. Entonces el territorio pehuenche, su árbol sagrado, el árbol más sagrado que tenemos, o sea, el canelo también es un árbol sagrado para nosotros, ¿cachai?, para los pehuenches. Pero, el que nosotros lo ocupamos en nuestras ceremonias, el más sagrado para nosotros es la araucaria, ¿cachai?

M: Sí.

D: Y .<sup>a</sup>raucaria.<sup>en</sup> mapudungún significa... o sea, .<sup>a</sup>raucaria.<sup>en</sup> mapudungún se dice pehuén. Entonces de ahí viene la palabra pehuenche. "Gente de la araucaria". Che es gente. Entonces, para nosotros, los pehuenches, el árbol más sagrado sería la araucaria. El territorio mapuche del... más bajo, como en el lado de Temuco donde... nag se dice como ese territorio, que es como "territorio bajo", "territorio bajo y plano". Ese... en ese lugar no hay araucarias, entonces en ese lugar el árbol sagrado es el canelo, ese es el árbol sagrado de los peñi de ese territorio. Y así como en diferentes lados, ahí cada uno tiene su árbol sagrado, pero para todos nosotros, todos los árboles sagrados que tienen en cada territorio, para nosotros también es sagrado ese, ese árbol. No quiere decir que lo miramos en menos, de hecho lo miramos con mucho respeto de acuerdo al lugar que vayamos.

M: Perfecto. Ahí terminaron las preguntas, igual te dejo un espacio por si quisieras decir algo en torno a lo que hemos hablado.

D: Sí. Yo creo que, al menos la gente en la actualidad, yo creo que hay muchas cosas que el pueblo mapuche ha predicho y que están pasando y desde hace mucho tiempo hay cosas que están predichas en el pueblo mapuche. Como el tema de la crisis, crisis humanitaria, de los virus que hay, esas cosas han sido predichas en el mundo mapuche. Y... y se supone que de toda esa enseñanza que deberíamos tener es volver a nuestro territorio. De que, si pasa algo, hay un... no sé, hay una gran enfermedad en la ciudad, de cierta forma nosotros tenemos que

volver al campo. Y así como vienen otras enfermedades más al futuro. Entonces, a lo que debemos mirar es que debemos generar un cambio, en el sentido de cómo...

M: ¿De cómo qué? Que se cortó la grabación ahí. [Aquí hay un problema con la llamada y se escucha cómo M intenta llamar por teléfono a D].

M: Ya. Continuemos.

D: Yo creo que en la actualidad la gente, al menos los jóvenes o en las generaciones que vienen futuras de la ciudad y desde el territorio mapuche son identidades bastante diferentes de cómo vemos la naturaleza. Yo creo que los jóvenes, desde la ciudad, tienen que empezar a generar ciertos cambios en contexto a la naturaleza y como, como lo es con el territorio, con la tierra, con el agua, contaminación del aire, en cierta forma tienen que generarse algunos cambios. [ruidos de fondo].

M: Claro.

D: O sea...

M: ¿Aló? [problemas con la llamada].

D: A lo que voy es que, en algún momento el sistema que ha creado el humano a nivel... nacional, global y todo lo que tenga que ver, va acabando con la vida de... de todo, o sea, es fácil darse cuenta, es fácil, cómo estamos dañando el mundo para... para generar esos cambios. Entonces, yo creo que más allá de estudiar algo también, como estudiaste, también te puedo decir que hay que ir a... construyendo también, entonces a eso instamos. Y eso, M. Eso es parte de... de nosotros, como, al menos como lo vemos nosotros como... como mapuche, el tema de los recursos, en sí, que no es parte de nuestros... de nuestros pilares económicos en nuestra vida. Lo vemos más allá como una forma de vida, de, como, de sobre... de vivencia del mundo mapuche, de todas las (ininteligible).

M: Perfecto. Muchas gracias, D, por tu entrevista. Voy a cortar la grabación ahora.

## C.2. Entrevista 2

M: Entonces, como lo mencioné recién, todo lo que usted no quiera responder en esta entrevista no lo responde. Esta entrevista está orientada en el marco de la tesis de M y toda la información es confidencial, se van a usar algunas citas para el estudio, pero no más que eso. Entonces, lo primero que le voy a preguntar, MP, ¿cuántos años tiene?

MP: Treinta y tres.

M: Ya. ¿Y por qué parte del Bío-Bío vive o transcurre normalmente?

MP: El Alto Bío-Bío.

M: Alto Bío-Bío. ¿Cuál es su nexa con respecto a la comunidad?

MP: Participante de la comunidad. Soy parte de la comunidad. Es una comunidad de Alto Bío-Bío.

M: Perfecto. El río Bío-Bío es de los más largos de Chile, ¿cómo te han contado tus antepasados que era antes? ¿Han habido cambios con lo que es ahora?

MP: Sí, sí hay cambios. El río, años anteriores era más caudaloso, traía agua en abundancia. Y sí, en relación a eso sí ha habido cambios. Ahora él trae menos agua.

M: Ya, perfecto. ¿Han visto actividades que se han visto afectadas por esa disminución de agua? En ese caso, ¿cuáles y cómo se han organizado para resolverlo?

MP: Bueno, más que nada en el tema de la agricultura puede ser, que se ha ido afectada porque no... se mantiene mucho menos el tema de la humedad, las napas subterráneas. También en relación a... puede ser que, al haber menos... menos corriente de agua durante el verano hay menos... o sea, me imagino que hay más sequía, en realidad, en el verano se nota mucho más.

M: Claro. Y...

MP: Pero alrededor o cerca de lo que... de las comunidades o comunas que están aledañas al río Bío-Bío.

M: Perfecto. ¿Y han hecho algo para... para que no afecte tanto esa disminución? ¿Se han podido organizar? ¿O están plantando menos, por ejemplo, algo de ese estilo?

MP: Más que nada... No es mucho lo que se ha hecho, en realidad, en las comunidades. Más bien se ha portado de forma pasiva la gente del Alto Bío-Bío, en este caso. No hay mucho, mucha reacción frente a eso. Y de asumir que el tema es de la sequía sin tanto cuestionar por qué está ocurriendo. Y eso. Pero hasta el último... en el último tiempo se ha podido ver como más trabajo de conciencia en relación al cuidado del medio ambiente, resistencia a otros proyectos que puedan afectar el tema del agua, ya sea centrales de paso y otro tipo de proyectos que van dirigidos al aprovechamiento del agua.

M: Perfecto. Lo otro, ¿cuál es tu opinión respecto a la industria forestal como MP y también desde la cosmovisión mapuche? ¿Cómo las forestales y la plantación de pinos y eucaliptos pueden afectar, ya sea positiva o negativamente, en sus territorios como mapuche?

MP: Claramente afecta el tema de lo que es el... el terreno más que nada. Porque se ve que afecta directamente a la tierra porque, viendo un poco las plantaciones, da cuenta de que no existe mucha vida dentro de los bosques, entre comillas, como se llaman. No hay... se ve a simple vista que no hay muchos ecosistemas, no hay mucha biodiversidad dentro de... de estos bosques artificiales. Y eso sí afecta realmente el sistema ahí dentro de ese territorio. También la sequía, siendo que sí existen estudios que... que avalan y que respaldan este... esto de que las forestales sí consumen mucha agua. Como la de eucalipto, por ejemplo. Y eso produce sequía también.

M: Claro. ¿Y podrías describir que significan especies como el canelo y la araucaria para ti y para la cosmovisión mapuche?

MP: Son ambos árboles de... que son sagrados para el... para la cosmovisión mapuche. El canelo es un... es un árbol sagrado de parte de la medicina y la araucaria, principalmente en Alto Bío-Bío tiene un gran significado porque es un árbol que nos entrega alimentación. Y en algún momento fueron árboles que le entregaron a muchas comunidades alimento como para sobrevivir en las hambrunas y pobreza que existía anteriormente. Y eso hace que sea un árbol sagrado y que se encuentra inserto en donde hay varias comunidades, en Alto Bío-Bío. Incluso que, se denomine el territorio "Pehuén-mapuçon la araucaria, que es el pehuén.

M: Y, ¿cómo comen la araucaria?

MP: ¿Cómo?

M: ¿Cómo se come la araucaria? ¿Se prepara? ¿Se come el fruto directamente?

MP: La araucaria es la planta y el fruto es el piñón. Así que la araucaria es el árbol y lo que finalmente se come es el piñón, ese es el fruto. Ese es una semilla, es la semilla que produce la araucaria. Y en tiempos de verano estas caen y son recogidas para hacerlos, ya

sea en... para consumirla cocida o hacer harina y otro tipo de alimentos.

M: Perfecto. Y lo otro, ¿me podrías contar un poco de la parte espiritual que tienen con el agua? Por ejemplo en el Nguillatún, en el Machitún o en otras ceremonias... he escuchado que se le reza al agua, como si me podrías contar un poco sobre eso.

MP: Sí, el agua es... es importante así como un árbol, así como el gusano, así como los animales, todo lo que coexiste con nosotros, el ser humano, más que nada. Y es importante y se... es un ser también, es un ser viviente el agua. Y el agua es el... es lo que nos mantiene a nosotros vivos, no existe alguien en la humanidad que pueda vivir sin el agua. Y que para nosotros es... el agua es lo que nos mantiene vivos.

M: Perfecto. Y... Bueno, ahí ya terminé con la ronda de preguntas, de todas formas dejo un espacio por si quisieras decir algo a propósito de lo que hemos estado conversando.

MP: No, más que nada, decir cuán importante es el tema del agua, por ejemplo que... que es un, como le digo, es algo fundamental en el ser humano y en la tierra también. Es el agua el que mantiene los ecosistemas, los árboles, las plantas, sobreviven los animales bebiendo agua, nosotros también y... y creo que el agua no es un... no es algo que uno pudiera vender o no es algo que uno pueda materializar en temas de recursos... recursos, como podría decir, ¿no? Yo no veo que el agua sea un recurso que se pueda aprovechar y generar dinero con ello. Porque es algo que... es algo que nos mantiene y que hay que proteger y cuidar, que es... el agua es como la... la sangre o, ¿cómo podría decirlo? Lo que mantiene esta vida de la tierra.

M: Completamente. Bueno, eso, muchas gracias por la entrevista.

### C.3. Entrevista 3

M: ¿Cuántos años tiene?

P: Sesenta y cinco.

M: ¿En qué parte del Bío-Bío vive?

P: Por la [Ininteligible. Costa o cuesta 00:16]. Siempre al... Siempre por donde nace el Bío-Bío. Por esa parte.

M: Ya. ¿Cuál es su nexa con respecto a la comunidad?

P: Bueno, bueno.

M: ¿Usted forma parte de la comunidad hace mucho tiempo? ¿Tiene algún rol a nivel de organizar las ceremonias, por ejemplo, o algo así?

P: Sí. Siempre ha sido de la parte de las ceremonias, cultural.

M: Ya. Bueno, el río Bío-Bío es de los más largos de Chile. ¿Cómo te han contado tus antepasados que era antes? ¿Has visto cambios con respecto de lo que ellos te decían?

P: Es mucho. Bastante el cambio, porque no está como antes, anterior, porque el [ininteligible. rosario u osario o resabio 01:13] que tengo yo no era así y ahora está todo cambiado. Con la misma central, han hecho muchas cosas y siguen tratando de hacer otras cosas más dentro del río y eso no está bueno para nosotros porque el Bío-Bío tiene que tener su... sus caudales libres y la naturaleza igual, no perjudicarlo, porque en estos centrales que hicieron fue una tremenda... tremenda perjudicación que pasó. Así que... y eso, y eso perjudica para todos. También, sobre todo, puede... puede suceder cualquier enfermedad porque, usted sabe que cuando hay agua detenida, nunca... no es una agüita limpia y siempre ha sido, eh, se

contamina con la misma... con los mismos... con las mismas, ¿cómo le dijera yo? Aparte de eso, porque todas las compuertas que han hecho, las cortinas que han hecho, no van así no más y tienen muchas cosas...mucho... muchas cosas que le tienen puesto, sobre todo para la formación de la presa porque no es cosa natural. En todo eso, todos llevan su químico y eso puede causar mucha enfermedad para... sobre todo para los llamos y también para los niños y también para las mujeres. Y así también puede ser para los animales. Porque el agua no está nunca cien por cien limpio, y también que va circulando la tierra, por los lados. En vez de afirmarse la tierra, no se afirma, porque va desmoronando tiempo a tiempo, día a día, meses y meses.

M: Claro. ¿Y usted ha visto que el río lleva más agua, menos agua, la misma agua que antes?

P: Bueno, cuando deja de llover, sus dos meses, tres meses, en este tiempo, los lagos que están hechos ya no tienen la misma agua suficiente como cuando recién se construyeron los embalses. Y así que se nota mucho y... y cada año creo yo que van a ir disminuyendo. Y... y también... y también creo yo que la naturaleza está un poco... un poco preocupado, porque nosotros también, en una parte, como que también dimos la mano para lo que hacen estas centrales, para los grandes empresarios, las empresas eléctricas y también nos emborracharon.

M: Mhm.

P: Porque nos dieron muchas... muchas tonteras y... y hablando puras cosas buenas y a la final caímos muchos, muchos peñi caímos ahí. Caímos, mujeres y hombres caímos y ahora nos damos cuenta, es detestable, detestable. Y... y ojalá por mi parte mía, que no se volvieran a hacer centrales aquí en Bío-Bío, en ninguna parte ojalá. En ninguna parte ojalá que no haiga una perjudicación a los... a lo que llevan agua, los canales de agua de natural. Por ejemplo en Queuco, acá en Alto Bío-Bío y por el lado de las comunidades de Rauco Lepoy y de Ralico. Hay aguas que están libres, pero según se escucha que tienen programados proyectos de antes y eso quieren... quieren ejecutar ese proyecto y... y para eso nosotros tenemos que oponernos, para que no pase eso y tampoco vuelvan a hacer algunos mini centrales en algunas partes y en Alto Bío-Bío para que no... no sigamos con las mismas cosas.

M: Mhm. Y, usted dijo que ha...ha habido una disminución de agua en los años. ¿Eso ha afectado actividades de ustedes? Como actividades del día a día, de su entorno, y, si es que las han afectado, ¿se han podido organizar para ver qué hacer con el agua?

P: Sí, pero creo yo que, con tal de... o sea, ya hemos estado conversando con las comunidades que tengo yo contacto y aquellos peñi que estamos en... en recuperación de tierras, y eso estamos conversando, no dejar más que sigan haciendo algunas cosas dentro del río, de cualquier parte aquí de Alto Bío-Bío. Porque es una perjudicación para todos. Que en recuperación o persona que no esté, igual va a ser perjudicado, pero mucha gente que no están dentro de la... dentro de esa parte de la recuperación que no está ni ahí. Creo yo que piensan en puro dinero, que avancen algunas cosas de los, del país, y así que... y así que me creo yo que el... el país o el Estado, ojalá que toda la gente estén avivando la cueca. Pero que, en el fondo, a la final, aquí salimos todos perjudicados.

M: Claro. ¿Y cuál es su opinión respecto a la industria forestal, a la plantación de pino y eucalipto?

P: Acá no puedo decirle que fueron muy... mucha planta. Fueron más o menos pocas.

Y... en Alto Bío-Bío. Por lo poco que plantaron eucalipto, algunos peñi y también algunos colonos están sin agua en este momento. Y todos reclaman que no tienen agua, y todos llegan a la municipalidad a pedirles agua. Y, pero la culpa lo tienen ellos. Y... y así que todas las vertientes, donde plantaron eucalipto todas quedaron como a treinta metros del lecho, algunas cincuenta, pero igual se perjudicó. Igual se secaron las vertientes. Ahí había algunas vertientes que permanecían. Vuelta el año tenían agua la gente, pero en este momento ya jodieron. Ya hace como diez años y poquito más que están sin agua ellos.

M: ¿Y por qué cree usted que... que con esas plantaciones hay menos agua?

P: Porque el... la planta de eucalipto es una... es un veneno para las vertientes de agua. Porque, me creo yo que... aquí misma se da usted cuenta porque tiene mucho más... más conocimiento de occidental y... y nosotros no tenemos mucho conocimiento de esa planta. Y esa planta tampoco, no es de acá. Y esa planta viene de otros países.

M: Mhm.

P: Y así que acá se perjudicó también muchas partes, en muchos sectores, porque claro que no plantaron su... por hectárea, por hectárea no puedo... no puedo decir que llegaron o plantaron cinco, cuatro hectáreas, no, fue poco, en algunas partes media hectárea y en otras partes una hectárea y así, en algunas partes dos hectáreas o una hectárea y media, sí. Pero igual las comunidades de Rauco Lepuy tiene mucha escasez de agua en este momento, ahora.

M: Y sus animales, su huerta, ¿ha tenido cambios porque hay menos agua? ¿Crecen menos cosas?

P: Sí, en Rauco Lepuy, claro. Porque ya, ahí algunos no tienen huerta, ya hacen como... así como de diez a cinco... o sea, diez o doce años, ya no tienen la huerta como tenían, como antes. Ya no cosechan las papas, ya no cosechan las habas, ya no cosechan las arvejas. Ya no se ve esa hortaliza bonita, aunque sea... aunque hubiera así poca pero... se veía. Pero ahora no.

M: ¿Y qué... qué hacen las personas que están sin huerta? Por ejemplo, ¿ahora colaboran con los vecinos...?

P: Le entran a puro comprar no más. Esperan los pagos de los pensionados, como vienen negociantes de afuera, de la ciudad, de distintas ciudades, de Santa Bárbara, de Los Ángeles, Mulchen y, yo sé que, ahí se mantienen de verduras.

M: Mhm.

P: Pero están igual que la gente de la ciudad. Que nada más que se cambian o que llegan al mes no más.

M: Claro.

P: Y... y otra cosa que también, como corre el bus todos los días, cuando ya se le escasean las verduras ya encargan y por ahí también, lo más tiempo que estén comprando la verdura.

M: Mhm.

P: Y también hay negociantes. Negociantes ambulantes en camioneta. Salen a vender de la ciudad, de la ciudad salen a vender al campo, a las cordilleras. Cada quince días. Y así que está cómoda la gente. Yo sé que en este momento no se motivan porque no hay agua, en primer lugar. No en todos los sectores. Hay algunos sectores que están con una escasez de agua grande. De cien por ciento.

M: Claro. ¿Y...?