



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

**PROYECCIÓN DE SEQUÍAS HIDROLÓGICAS EN EL  
ESCENARIO SSP5-8.5 EN LA CUENCA DEL RÍO CAUTÍN,  
MEDIANTE EL USO DE LA PLATAFORMA FUSE**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL  
MANUEL IGNACIO MUÑOZ VILLA

PROFESORA GUÍA:  
XIMENA VARGAS MESA

PROFESOR CO-GUÍA:  
NICOLÁS VÁSQUEZ PLACENCIA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
PABLO MENDOZA ZÚÑIGA  
CATALINA JEREZ TOLEDO

SANTIAGO DE CHILE  
2024

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR  
AL TÍTULO DE:** Ingeniero Civil

**POR:** Manuel Ignacio Muñoz Villa

**FECHA:** 2024

**PROFESORA GUÍA:** Ximena Vargas Mesa

**PROYECCIÓN DE SEQUÍAS HIDROLÓGICAS EN EL ESCENARIO SSP5-8.5 EN LA CUENCA DEL RÍO CAUTÍN, MEDIANTE EL USO DE LA PLATAFORMA FUSE**

El cambio climático es una realidad cada vez más palpable en la vida cotidiana. En Chile, fenómenos como precipitaciones extremas y sequías se están volviendo más frecuentes e intensos. Por esta razón, es crucial anticiparse a estas situaciones, y una forma de hacerlo es a través de simulaciones hidrológicas basadas en proyecciones del escenario SSP5-8.5. La sigla SSP (Shared Socioeconomic Pathways) hace referencia a distintos caminos socioeconómicos futuros que influyen en las emisiones de gases de efecto invernadero, siendo el SSP5-8.5 uno de los escenarios más pesimistas, asociado a un alto nivel de emisiones y escaso control climático (O'Neill, Eyring, Friedlingstein, Hurtt, & Sanderson, 2016).

En este trabajo se utilizaron 20 combinaciones de estructuras del modelo hidrológico FUSE, que fueron calibradas y validadas para la cuenca del río Cautín en Cajón (Región de la Araucanía, Chile), así como para las subcuencas de Collín en Codahue y Muco en Puente Muco. A partir de estas combinaciones, se seleccionaron las tres mejores para cada cuenca. Posteriormente, estas estructuras se emplearon para proyectar los efectos del cambio climático en estas cuencas bajo el escenario climático SSP5-8.5, permitiendo así evaluar el cambio hidrológico futuro en la región.

La calibración de parámetros del modelo FUSE se llevó a cabo utilizando datos observados de precipitación, escorrentía, evapotranspiración potencial y temperatura, todo previamente escalado y corregido. Una vez calibradas las estructuras, se utilizaron las tres mejores por cuenca para simular la escorrentía. Los datos de precipitación, evapotranspiración y temperatura se emplearon para calcular índices asociados a las sequías meteorológicas, como el RAI (Índice de Anomalía de Precipitación), el SPEI (Índice Estandarizado de Precipitación y Evapotranspiración) y el SPI (Índice Estandarizado de Precipitación). Por otro lado, la escorrentía simulada permitió obtener el SSFI (Índice normalizado de los caudales fluviales), utilizado para identificar y analizar las sequías hidrológicas en la región.

Los resultados obtenidos, revelaron que la cuenca del río Cautín en Cajón experimentará un incremento en la frecuencia e intensidad de las sequías. El análisis de los índices de sequía mostró que, hacia el final del siglo XXI, las sequías meteorológicas severas y extremas se volverán más frecuentes. Para el periodo 2051-2085, se proyectó una disminución en las precipitaciones de hasta un 52% en algunos modelos de circulación global y aumentos de hasta 2,87 °C en la temperatura media, lo que explica las condiciones de sequía.

*El que abandona,  
no tiene premio.*

# Agradecimientos

Hoy, al finalizar esta etapa, no puedo dejar de agradecer a quienes me acompañaron en este viaje, brindándome su apoyo en cada paso.

A mis padres, por su amor y constante apoyo incondicional. Ustedes han sido la fuerza que me ha impulsado en cada momento, los que siempre creyeron en mí, incluso cuando yo dudaba. Gracias por enseñarme con su ejemplo lo que significa la perseverancia y el esfuerzo.

A mis hermanas, por estar siempre ahí, con su cariño y sus palabras de aliento, en los días buenos y en los días difíciles. Su compañía ha sido clave en este camino, y cada una de ustedes ha aportado su luz en mi vida.

A mi abuela Inés, por cuidar de mí en mi infancia y ser un pilar fundamental en mi vida, apoyándome siempre, incluso en mis errores. A mi abuela Ana y a mi abuelo Víctor, por creer en mí en todos los aspectos, tanto académicos como personales, y por estar presentes en mi vida, a pesar de la distancia.

A mis amigos del colegio, por ser quienes me acompañaron desde el principio. Aunque los años pasen y nuestros caminos hayan sido diferentes, siempre me hacen sentir que nada ha cambiado. A mis amigos de la universidad, gracias por estar a mi lado en cada desafío, por las risas, el apoyo y los recuerdos que sé que en el futuro recordaremos con alegría.

A mis profesores, especialmente a la profesora Ximena, por su dedicación y paciencia, a Danny Saavedra, por su orientación y generosidad, y a la comisión, por sus valiosas contribuciones que ayudaron a que este trabajo llegara a buen puerto.

También quiero agradecer a todas las personas que en algún momento estuvieron presentes en mi vida y, por una u otra razón, ya no lo están. Cada una ha dejado una huella en mí y, de una forma u otra, han contribuido a mi crecimiento personal.

Y como dice el Pity Álvarez:

*“Me agrada esa gente que con gesto demuestra bien su expresión. Esta canción la hice para todos mis queridos amigos con este humilde ritmo. Les digo, los admiro y necesito, y voy a dejar que las palabras salgan solas”*

# Tabla de Contenido

Capítulo 1 : Introducción .....	1
1.1. Motivación .....	1
1.2. Objetivos .....	2
1.2.1. Objetivo general .....	2
1.2.2. Objetivos específicos .....	2
1.3. Estructura del documento.....	2
Capítulo 2 : Marco Teórico .....	3
2.1. Modelos hidrológicos.....	3
2.2. Plataforma FUSE .....	4
2.3. Índices de sequías.....	5
2.4. Cambio climático .....	10
2.5. Escenarios climáticos .....	12
2.6. Escalamiento .....	13
Capítulo 3 : Caracterización zona de estudio .....	15
3.1. Antecedentes generales .....	15
3.2. Clima .....	17
3.3. Topografía .....	19
3.4. Cobertura y tipos de suelo.....	20
Capítulo 4 : Metodología .....	23
4.1. Metodología general.....	23
4.2. Plataforma hidrológica FUSE .....	24
4.3. Obtención y tratamiento de la información.....	26
4.3.1. Obtención de datos y forzantes .....	26
4.3.2. Escalamiento y corrección de datos .....	27
4.4. Estrategia de calibración mediante FUSE.....	27
4.5. Índices de sequía y sus interpretaciones .....	29
Capítulo 5 : Resultados y discusión .....	32
5.1. Obtención y tratamiento de información .....	32

5.1.1. Escalamiento y corrección de datos .....	32
5.1.2. Estrategia de calibración mediante FUSE .....	35
5.1.3. Simulación de escorrentía mediante FUSE .....	39
5.2. Índices de sequías y sus interpretaciones .....	52
<b>Capítulo 6 : Conclusiones y comentarios .....</b>	<b>67</b>
<b>Bibliografía.....</b>	<b>69</b>
<b>Anexos.....</b>	<b>73</b>
<b>Anexo A : Metodología.....</b>	<b>73</b>
A.1. Estructuras de modelo FUSE no modificados .....	73
A.2. Ecuaciones SPI y SPEI.....	74
A.3. Resolución y dimensiones para descarga de GCMs en Copernicus .....	75
A.4. Tabla de parámetros FUSE. ....	75
<b>Anexo B : Resultados y discusión .....</b>	<b>78</b>
B.1. Promedios logarítmicos de datos observados de escorrentía para las cuencas en estudio. ....	78
B.2. CVE cuencas anidadas, promedios GCM crudos y estadísticos por cuenca con GCM CMCC_ESM2. ....	78
B.3. Análisis de balance en periodo de calibración y validación.....	81
B.4. Selección de GCM y gráficos de líneas RAI y SPI.....	95
B.5. Gráficos de duración y área de los índices RAI, SPI, SPEI y SSFI .....	101

# Índice de Tablas

Tabla 2-1: Semáforo de aplicación de índices de sequías (OMM, 2016). .....	6
Tabla 2-2: Índices asociados a la meteorología (OMM, 2016). .....	7
Tabla 2-3: Índices asociados a la meteorología (OMM, 2016). .....	7
Tabla 2-4: Índices asociados a la hidrología (OMM, 2016). .....	8
Tabla 2-5: Clasificación según el valor del índice SPEI. Fuente: Modificado de McKee, Doesken, & Kleist (1993). .....	8
Tabla 2-6: Clasificación según valor del índice SPI. Fuente: modificado de (McKee, Doesken, & Kleist, 1993). .....	9
Tabla 2-7: Clasificación según valor del índice SSFI. Fuente: modificado de (Zalokar, Kobold, & Sraj, 2021). .....	9
Tabla 2-8: Clasificación según índice RAI. Fuente: modificado de (Van Roy, 1965). ....	10
Tabla 3-1: Características cuencas en estudio. ....	15
Tabla 3-2: Porcentaje de suelo según tipo de cobertura. Fuente: CONAF. ....	20
Tabla 4-1: Ejemplo de combinación de opciones de modelos de una estructura FUSE en la segunda fila y su posición respectiva en la primera fila. ....	24
Tabla 4-2: Combinaciones FUSE utilizadas. ....	25
Tabla 4-3: Estructuras de modelo y sus opciones para FUSE (Clark, y otros, 2008), traducido y modificado de (Saavedra, Mendoza, Addor, Llauca, & Vargas, 2021)..	25
Tabla 4-4: Distribución de periodos. ....	27
Tabla 4-5: Criterios de eficiencia definidos para la evaluación del modelo (obtenido y modificado de Muñoz (2019)) .....	28
Tabla 5-1: Promedios climatológicos de forzantes para cada GCM. Cuenca: Cautín en Cajón. ....	34
Tabla 5-2: Variación porcentual de forzantes para modelos y estación Cautín en Cajón.	34
Tabla 5-3: Distancias Euclidianas de las 10 mejores combinaciones de estructuras FUSE al óptimo (1,1, para la etapa de calibración y validación. ....	37
Tabla 5-4: Estructuras de FUSE a utilizar por cada cuenca. ....	38
Tabla 5-5: Estructuras presentadas en la Figura 5-7. ....	42
Tabla 5-6: Valores de parámetros para la estructura 231222111 en Collín en Codahue, tras su calibración y validación. ....	43

Tabla 5-7: Variación porcentual de escorrentía con respecto al periodo histórico de los GCMs, estructura 211132111, Cautín en Cajón. ....	48
Tabla 5-8: Variación porcentual de escorrentía con respecto al periodo histórico de los GCMs, estructura 231122111, Cautín en Cajón. ....	49
Tabla 5-9: Índice SPEI en las tres ventanas temporales (1979-2014, 2015-2050 y 2051-2085), cuenca Cautín en Cajón. ....	57
Tabla 5-10: Índice SSFI, cuenca Cautín en Cajón, estructura 211132111, para los GCM CMCC_ESM2. ....	59
Tabla 5-11: Índice SSFI, cuenca Cautín en Cajón, estructura 231122111, para los GCM CMCC_ESM2. ....	60
Tabla 5-12: Índice RAI, Cautín en Cajón.....	61
Tabla 5-13: Índice SPI, Cautín en Cajón.....	61

## Índice de Figuras

Figura 2-1: Clasificación de modelos hidrológicos de acuerdo con la naturaleza de los algoritmos.....	4
Figura 2-2: Aumento de las temperaturas y de gases de efecto invernadero en la superficie terrestre. Fuente: (IPCC, 2023). ....	11
Figura 2-3: Aumento de gases de efecto invernadero por actividad humana. Fuente: (IPCC, 2023) .....	11
Figura 2-4: Caracterización de RCP y tasas de gases de efecto invernadero (CIIFEN, 2022). ....	12
Figura 2-5: Escenarios de emisiones de carbono utilizados por el IPCC (University, Oregon State, 2019). ....	13
Figura 2-6: Escalamiento estadístico (Comisión nacional de energía, 2020). ....	14
Figura 3-1: Ubicación de cuencas en estudio en el espacio. Basado en Google Earth. ....	16
Figura 3-2: Ubicación y elevación de la cuenca. Fuente: Mendoza (2010).....	17
Figura 3-3: Curva de variación estacional de precipitación para las cuencas en estudio. Datos obtenidos de CR2 CAMELS Explorer (2021).....	18
Figura 3-4: Curva de variación estacional de escorrentía para las cuencas en estudio. Datos obtenidos de CR2 CAMELS Explorer (2021).....	19
Figura 3-5: Curvas hipsométricas de las cuencas en estudio. ....	20

Figura 3-6: Representación gráfica de la cobertura de suelo por tipo (CONAF, 2019). ..	21
Figura 3-7: Tipos de suelo en la cuenca de estudio (NASA, 2020) .....	21
Figura 4-1: Diagrama de flujo de metodología general. ....	23
Figura 4-2: Esquema de un evento hipotético de sequía (Podestá, Skansi, Herrera, & Veiga, 2020).....	31
Figura 5-1: Curvas de Variación estacional de precipitación, periodos climatológicos desde 1979 hasta 2085. Cuenca: Cautín en Cajón. ....	32
Figura 5-2: Curvas de Variación estacional de evapotranspiración potencial, periodos desde 1979 hasta 2085. Cuenca: Cautín en Cajón. ....	33
Figura 5-3: Combinación de métrica KGE (Q) con KGE_log(Q) de las distintas estructuras FUSE con respecto al óptimo (1,1) para la cuenca de Cautín en Cajón..	36
Figura 5-4: Combinación de métrica KGE (Q) con KGE_log(Q) de las distintas estructuras FUSE con respecto al óptimo (1,1) para la cuenca de Collín en Codahue. ....	36
Figura 5-5: Combinación de métrica KGE (Q) con KGE_log(Q) de las distintas estructuras FUSE con respecto al óptimo (1,1) para la cuenca de Muco en puente Muco. ....	37
Figura 5-6: Escorrentía simulada en el periodo histórico (1979-2014), con estructuras FUSE seleccionadas calibradas con datos observados como input. ....	39
Figura 5-7: Partición de la precipitación en escorrentía y evapotranspiración para las mejores estructuras de FUSE en Cautín en Cajón, durante el periodo de Calibración y Validación. ....	40
Figura 5-8: Partición de la precipitación en escorrentía y evapotranspiración para las mejores estructuras de FUSE en Collín en Codahue, durante el periodo de Calibración y Validación. ....	40
Figura 5-9: Partición de la precipitación en escorrentía y evapotranspiración para las mejores estructuras de FUSE en Muco en Puente Muco, durante el periodo de Calibración y Validación. ....	41
Figura 5-10: Escorrentía simulada en el periodo histórico (1979-2014) a base de las forzantes de los GCMs seleccionados, usando estructuras compartidas en cuenca Cautín en Cajón y cuencas anidadas Collín en Codahue y Muco en puente Muco...	45
Figura 5-11: Curva de variación estacional para escorrentía, durante el primer (2015-2050) y segundo periodo (2051-2085), por cada par de estructuras compartidas para Collín en Codahue y Cautín en Cajón.....	46

Figura 5-12: Curva de variación estacional para escorrentía, durante el primer (2015-2050) y segundo periodo (2051-2085), por cada par de estructuras compartidas para Muco en Puente Muco y Cautín en Cajón. ....	47
Figura 5-13: Curva de duración de escorrentía para estructuras de Cautín en Cajón, sin GCMs durante el periodo histórico, a través de datos observados y simulados por FUSE. ....	50
Figura 5-14: Curvas de duración para el periodo histórico, para todos los GCMs en Cautín en Cajón, y el simulado histórico con las estructuras elegidas. ....	50
Figura 5-15: Curvas de duración para los periodos futuros, para todos los GCMs en Cautín en Cajón, con la estructura 211132111. ....	51
Figura 5-16: Curvas de duración para los periodos futuros, para todos los GCMs en Cautín en Cajón, con la estructura 231122111. ....	51
Figura 5-17: Comportamiento del índice SPEI en el periodo histórico (Datos Observados) en Cautín en Cajón, para la escala de 9 y 12 meses. ....	52
Figura 5-18: Comportamiento del índice SPEI en el periodo histórico (Datos Observados) en Collín en Codahue, para la escala de 9 y 12 meses. ....	52
Figura 5-19: Comportamiento del índice SPEI en el periodo histórico (Datos Observados) en Muco en Puente Muco, para la escala de 9 y 12 meses. ....	52
Figura 5-20: Comportamiento del índice SSFI en el periodo histórico en Cautín en Cajón, para la escala de 9 y 12 meses, mediante datos observados y simulados con estructuras FUSE. ....	53
Figura 5-21: Comportamiento del índice SSFI en el periodo histórico en Collín en Codahue, para la escala de 9 y 12 meses mediante datos observados y simulados con estructuras FUSE. ....	53
Figura 5-22: Comportamiento del índice SSFI en el periodo histórico en Muco en Puente Muco, para la escala de 9 y 12 meses, mediante datos observados y simulados con estructuras FUSE. ....	54
Figura 5-23: Curva envolvente de precipitación, en donde se presenta el máximo y mínimo de los GCMs del estudio, lo observado y del GCM CMCC_ESM2 escogido para la cuenca de Collín en Codahue. ....	55
Figura 5-24: Curva envolvente de precipitación, en donde se presenta el máximo y mínimo de los GCMs del estudio, lo observado y del GCM CMCC_ESM2 escogido para la cuenca de Muco en Puente Muco. ....	55
Figura 5-25: Índice SPEI para escalas de 9 y 12 meses en la cuenca de Cautín en Cajón, para el GCM CMCC-ESM2. ....	56
Figura 5-26: Variación índice SPEI para escalas de 9 y 12 meses en la cuenca de Collín en Codahue, para el GCM CMCC_ESM2. ....	56

Figura 5-27: Variación índice SPEI para escalas de 9 y 12 meses en la cuenca de Muco en Puente Muco, para el GCM CMCC_ESM2.	56
Figura 5-28: Evolución temporal proyectada del índice SSFI para escalas de 9 y 12 meses en la cuenca de Cautín en Cajón, para el GCM CMCC_ESM2 y las estructura 211132111.....	58
Figura 5-29: Evolución temporal proyectada del índice SSFI para escalas de 9 y 12 meses en la cuenca de Cautín en Cajón, para el GCM CMCC_ESM2 y las estructura 231122111.....	58
Figura 5-30: Evolución temporal proyectada del índice SSFI para escalas de 9 y 12 meses en la cuenca de Collín en Codahue, para el GCM CMCC_ESM2 para la estructura 211132111.....	58
Figura 5-31: Evolución temporal proyectada del índice SSFI para escalas de 9 y 12 meses en la cuenca de Muco en Puente Muco, para el GCM CMCC_ESM2 para la estructura 231122111.....	59
Figura 5-32: Distribución del índice SPEI, en la cuenca de Cautín en Cajón, para el periodo de 2051 a 2085, CMCC_ESM2, escala de 9 y 12 meses (2051-2085).....	63
Figura 5-33: Distribución del índice SSFI, estructura 211132111, Cautín en Cajón, CMCC_ESM2, escalas de 9 y 12 meses (2051-2085).....	64
Figura 5-34: Distribución del índice SSFI, estructura 231122111, Cautín en Cajón, CMCC_ESM2, escalas de 9 y 12 meses (2051-2085).....	65

# Capítulo 1: Introducción

## 1.1. Motivación

El cambio climático es una realidad cada vez más palpable en la vida cotidiana. En Chile, fenómenos como precipitaciones extremas y sequías se están volviendo más frecuentes e intensos. Por esta razón, es crucial anticiparse a estas situaciones, por lo que una forma de hacerlo es a través de simulaciones hidrológicas. La sigla SSP (*Shared Socioeconomic Pathways*) hace referencia a distintos caminos socioeconómicos futuros que influyen en las emisiones de gases de efecto invernadero, siendo el SSP5-8.5 uno de los escenarios más pesimistas, asociado a un alto nivel de emisiones y escaso control climático (O'Neill, Eyring, Friedlingstein, Hurtt, & Sanderson, 2016).

La identificación de la estructura del modelo hidrológico para un problema dado, así como la cuantificación de la incertidumbre en la estructura de este, siguen siendo desafíos de investigación pendientes para la disciplina de la hidrología. Para avanzar en estos problemas es necesario comprender la naturaleza de las diferencias entre los modelos (Clark, y otros, 2008), testeando distintas estructuras. Por esto, resulta atractivo el uso de la plataforma FUSE (*Framework for Understanding Structural Errors*), que permite utilizar la representación de procesos usando estructuras de distintos modelos y así obtener la combinación más adecuada de éstos, de manera de robustecer tanto la etapa de selección como la de calibración.

El uso de escenarios pesimistas, como el SSP5-8.5, que proyecta un futuro con alta dependencia de combustibles fósiles, elevado crecimiento económico además de un alto desarrollo humano ofrece una valiosa oportunidad para la toma de decisiones que impacten directamente al medio ambiente. Este enfoque promueve la adopción de medidas más restrictivas y conservadoras, orientadas a mitigar los efectos adversos del cambio climático (CIIFEN, 2022).

Por lo tanto, resulta de gran interés estudiar la cuenca del río Cautín en Cajón, una zona que en los últimos años ha mostrado una tendencia a la disminución de las precipitaciones (Baeza, 2019). Esta reducción puede afectar significativamente la disponibilidad futura de recursos hídricos y aumentar la frecuencia de eventos hidrológicos extremos, como las sequías, lo cual es especialmente relevante en un escenario pesimista como el SSP5-8.5.

## 1.2. Objetivos

### 1.2.1. Objetivo general

Analizar proyecciones de índices de sequías en la cuenca del río Cautín en Cajón, bajo el escenario SSP5-8.5 usando la plataforma FUSE para la simulación de los recursos hídricos.

### 1.2.2. Objetivos específicos

1. Implementar modelos hidrológicos en la plataforma FUSE para la cuenca de Cautín en Cajón.
2. Determinar proyecciones de forzantes meteorológicas en la cuenca considerando el escenario SSP5-8.5.
3. Determinar índices de sequía en el periodo histórico y futuro.

## 1.3. Estructura del documento

Capítulo 2: Se presenta el marco teórico, tales como la modelación hidrológica, la plataforma de modelación hidrológica FUSE y el escalamiento y corrección de forzantes provenientes de modelos de circulación general.

Capítulo 3: Se presenta la caracterización de la zona de estudio, iniciando con una descripción general de antecedentes, y una descripción de los atributos de la cuenca: clima, topografía y tipos de suelo con sus usos.

Capítulo 4: Se presenta la metodología para el escalamiento y corrección de datos, para finalmente abarcar la calibración mediante FUSE y la posterior obtención de índices de sequía.

Capítulo 5: Se presentan los resultados obtenidos, partiendo por el proceso de calibración de FUSE, la obtención de datos calibrados y corregidos (curvas de variación estacional) y las simulaciones realizadas mediante FUSE. Finalmente se presenta la obtención de los índices y sus respectivas interpretaciones.

Capítulo 6: Se presentan y analizan las principales conclusiones del estudio, revisando el cumplimiento de objetivos y posibles comentarios.

# Capítulo 2: Marco Teórico

## 2.1. Modelos hidrológicos

Entender el ciclo hidrológico requiere un análisis continuo de cómo una cuenca responde a factores como las forzantes climáticas, cambios en su geomorfología y la intervención humana. Estos elementos son clave en la modelación hidrológica, la cual busca representar los procesos que ocurren dentro de las cuencas y su entorno. La precisión predictiva de los modelos depende en gran medida de la forma en que estos factores se integran y estructuran (Clark, y otros, 2008).

Asimismo, resulta esencial comprender las interacciones entre los distintos componentes del sistema hidrológico. Para ello, es necesario identificar los procesos más relevantes y los mecanismos físicos involucrados, considerando que muchos de estos procesos presentan una naturaleza no lineal.

El primer paso de toda modelación hidrológica es establecer un “modelo perceptual”, es decir, decidir cuáles son los principales procesos y variables que intervienen en la generación de escorrentía. Este proceso implica observar y analizar las características del suelo, subsuelo y clima, como sus elementos principales y determinar cuáles son los procesos más importantes que intervienen en la formación de escorrentía. Una vez reconocidos, se deben relacionar estos procesos y variables principales entre sí por medio de ecuaciones, obteniéndose un modelo conceptual (Cabrera, 2012).

Los modelos hidrológicos se pueden clasificar en tres tipos diferentes (Hrachowitz & P. Clark, 2017):

- De acuerdo con la conceptualización de los procesos básicos; pueden ser empíricos, conceptuales o basados en procesos.
- De acuerdo con la naturaleza de los algoritmos básicos; pueden ser determinísticos o estocásticos.
- De acuerdo con su representación espacial; pueden ser concentrados o distribuidos.

Los de tipo determinístico corresponden a aquellos modelos que dependen de variables medidas in situ y los resultados son puntuales, pero tienen limitaciones en el momento de reproducir resultados en cortos espacios de tiempo (Camargo, 2015), dichas variables y parámetros se presentan a continuación:

- Variables de entrada: Series espaciotemporales de precipitación, temperatura, etc.
- Parámetros: Parámetros considerados constantes en el modelo, por ejemplo, la conductividad hidráulica, la velocidad de infiltración del suelo saturado, etc.

- Variables de estado: series espaciotemporales de los almacenamientos del modelo las cuales permitan establecer condiciones iniciales.
- Variables de salidas: Evapotranspiración y escorrentía superficial y subterránea.

Dentro de las principales fuentes de incertidumbre asociadas a los modelos hidrológicos se cuentan, principalmente, cuatro grupos, estos son (Cabrera, 2012):

- Errores sistemáticos o aleatorios en los datos de ingreso: No necesariamente son datos de terreno.
- Errores sistemáticos o aleatorios en los datos observados: Son errores propios de la medición en campo de las diferentes variables hidro-meteorológicas.
- Errores debido a valores no óptimos de parámetros: Referido a los errores ocasionados por la suposición de valores de los parámetros del modelo que no son la consecuencia de un proceso de optimización.
- Errores debido a la estructura del modelo: Errores propios del modelo y que no pueden ser eliminados sin modificar la estructura de este.

A modo de resumen, en la Figura 2-1 se presentan los principales tipos de modelos y sus categorías correspondientes:

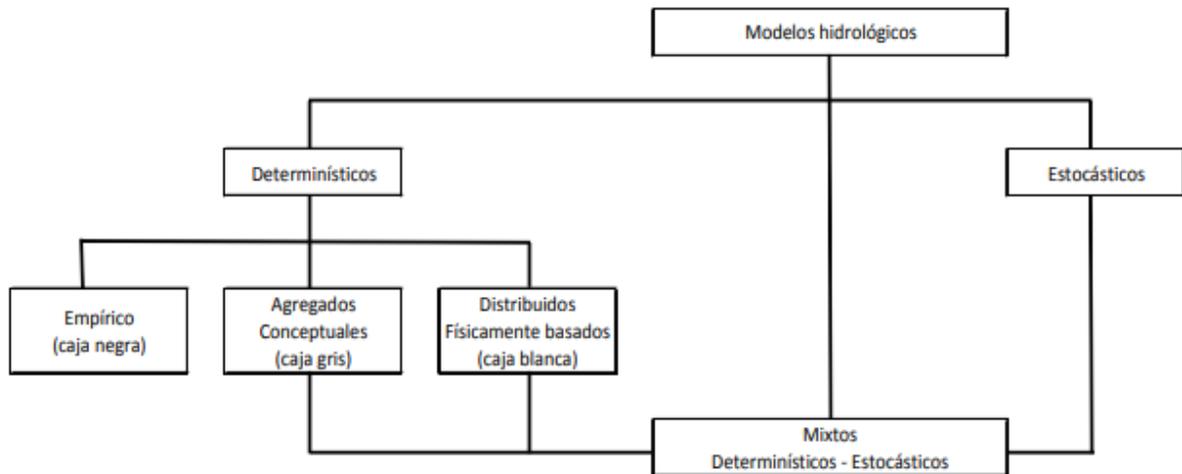


Figura 2-1: Clasificación de modelos hidrológicos de acuerdo con la naturaleza de los algoritmos Básicos. Fuente: Modificado de Refsgaard (1996).

## 2.2. Plataforma FUSE

La precisión de las simulaciones de escorrentía en cuencas naturales siempre estará limitada por representaciones de modelos simplificados del mundo real, así como por la disponibilidad y calidad

de las mediciones hidrológicas. Los desafíos pendientes de la investigación son identificar la estructura del modelo más apropiado para un problema determinado y cuantificar la incertidumbre predictiva en las simulaciones de modelos hidrológicos (Travisany & Mendez, 2022).

La plataforma “*Framework for Understanding Structural Errors*” más conocida como FUSE (Clark, y otros, 2008), corresponde a un marco modular para diagnosticar diferencias entre estructuras de modelos hidrológicos. Dicha plataforma fue desarrollada por la existencia de problemas a la hora de identificar la estructura de modelo más apropiada para un problema dado y poder cuantificar la incertidumbre asociada al estudio que se quiere llevar a cabo (Clark, y otros, 2008).

Dicha plataforma incluye 1248 estructuras de modelos hidrológicos, entre las cuales se encuentran algunos modelos bien establecidos para simulaciones de escorrentía superficial, tales como PRMS<sup>1</sup>, SACRAMENTO, TOPMODEL y ARNO/VIC. Cada modelo se caracteriza por una arquitectura diferente de las capas de suelo superior e inferior y la parametrización de procesos como: evaporación, percolación vertical, flujo interno, flujo base y escorrentía superficial (Clark, y otros, 2008).

FUSE toma como entrada series temporales de lluvia y evapotranspiración potencial y devuelve una serie temporal simulada de escorrentía. Se puede utilizar para comprender la variabilidad de las respuestas hidrológicas esperadas, basadas en las estructuras del modelo (Vitolo, 2016).

FUSE puede trabajar con múltiples funciones objetivos, entre ellas se encuentra la “raíz del error cuadrático medio” (RMSE, por sus siglas en inglés), la cual tiene como valor óptimo  $RMSE = 0$  y busca reducir la diferencia entre las predicciones de los modelos y los valores observados (Camarillo-Peñaranda, Saavedra-Montes, & Ramos-Paja, 2013). Esta plataforma se caracteriza por trabajar mediante el algoritmo llamado *Shuffled Complex Evolution* (SCE), el cual consta de un proceso estocástico y estrategias evolutivas y de búsqueda global (soluciones óptimas) mediante iteraciones (Duan, Gupta, & Sorooshian, 1993).

## 2.3. Índices de sequías

Las sequías son un fenómeno natural que forma parte de la variabilidad hidroclimática de los sistemas, y pueden ocurrir en todos los regímenes climáticos, desde desiertos hasta bosques lluviosos. Son uno de los desastres naturales más costosos, ya que afectan a numerosos sectores económicos y personas (OMM, 2016).

Las sequías pueden caracterizarse por su gravedad, localización, duración y desarrollo en el tiempo. Pueden ser ocasionadas por varios procesos hidrometeorológicos que disminuyen la precipitación o limitan la disponibilidad de agua superficial y/o subterránea, de manera que se produzcan condiciones mucho más secas de lo normal. Es por esto que resulta de alta importancia tener indicadores

---

<sup>1</sup> PRMS: *Precipitation Runoff Modeling System*.

e índices que evidencien la gravedad, localización, duración, aparición y el cese de estos fenómenos (OMM, 2016).

Por un lado, se tienen las variables, como la precipitación, la temperatura y la escorrentía, que describen las condiciones ambientales relevantes para las sequías. A partir de estas variables se derivan los indicadores, que son medidas específicas utilizadas para evaluar diferentes aspectos de las sequías. Por otro lado, los índices, que son representaciones numéricas de la gravedad de las sequías, se calculan a partir de datos climáticos o hidrometeorológicos. Estos índices permiten analizar el estado de las sequías en un entorno durante un período determinado (Necco & Aiello, 2021).

Se deben llevar a cabo estudios previos con el fin de determinar qué indicadores o índices son los más apropiados según el desarrollo cronológico, la zona, el tipo de clima y sequía. La adopción de decisiones a partir de valores basados en índices cuantitativos es esencial para una evaluación apropiada de la gravedad de las sequías (OMM, 2016).

La organización Meteorológica Mundial (OMM, 2016), presenta diversos índices hidrológicos, a los que acorde a su dificultad de aplicación y obtención, se le atribuyen colores de semáforo (ver Tabla 2-1), donde el verde indica una aplicación más sencilla que el rojo, aunque se destaca que a pesar de que el índice sea de color verde, no indica que sea el más idóneo de aplicar. Entre la Tabla 2-2 y la Tabla 2-4 se presentan dichos indicadores.

*Tabla 2-1: Semáforo de aplicación de índices de sequías (OMM, 2016).*

**Verde:** Se asigna el color verde a un índice si cumple al menos uno de los siguientes criterios:

- Existe un código o programa de fácil acceso y de libre utilización para ejecutar el índice.
- No hacen falta datos diarios.
- Se puede ejecutar aunque falten datos.
- El producto del índice ya se genera de forma operativa y se puede consultar en línea.

*Nota:* Aunque el color verde asignado a un indicador o índice puede significar que sea el más sencillo de conseguir o utilizar, esto no implica que sea el idóneo para una determinada región o lugar. La decisión respecto de los indicadores o índices que se utilizarán tiene que ser tomada por el usuario y depende de las aplicaciones concretas.

**Amarillo:** Se asigna el color amarillo a un índice si cumple al menos uno de los siguientes criterios:

- Hacen falta distintas variables o datos de entrada para los cálculos.
- Hay un código o programa para ejecutar el índice que no es del dominio público.
- Es posible que solo se necesite un dato de entrada o variable, pero no hay ningún código disponible.
- La complejidad de los cálculos necesarios para producir el índice es mínima.

**Rojo:** Se asigna el color rojo a un índice si cumple al menos uno de los siguientes criterios:

- Sería necesario desarrollar un código para calcular el índice a partir de la metodología presentada en los trabajos publicados.
- El índice o los productos derivados no son de fácil acceso.
- El índice es poco claro y no se emplea de forma generalizada, pero se puede utilizar.
- El índice contiene datos modelados o forma parte de los cálculos.

Tabla 2-2: Índices asociados a la meteorología (OMM, 2016).

Meteorología	Página	Facilidad de uso	Parámetros de entrada	Información adicional
Índice de anomalía de la aridez (AAI)	11	Verde	P, T, ETP, ET	Disponible con fines operativos para India
Deciles	11	Verde	P	Fácil de calcular; los ejemplos de Australia resultan útiles
Índice de sequía de Keetch-Byram (KBDI)	12	Verde	P, T	Los cálculos se basan en el clima de la zona de interés
Porcentaje de precipitación habitual	12	Verde	P	Cálculos sencillos
Índice normalizado de precipitación (SPI)	13	Verde	P	Marcado por la OMM como punto de partida para la vigilancia de sequías meteorológicas
Anomalía ponderada y normalizada de la precipitación (WASP)	15	Verde	P, T	Utiliza datos reticulares para vigilar la sequía en regiones tropicales
Índice de aridez (AI)	15	Amarillo	P, T	También se puede utilizar en clasificaciones climáticas
Índice Z de China (CZI)	16	Amarillo	P	Concebido para mejorar los datos del SPI

Tabla 2-3: Índices asociados a la meteorología (OMM, 2016).

Meteorología	Página	Facilidad de uso	Parámetros de entrada	Información adicional
Índice de humedad de los cultivos (CMI)	16	Amarillo	P, T	Se necesitan valores semanales
Índice de zonas de sequía (DAI)	17	Amarillo	P	Ofrece un indicio de la evolución en la estación del monzón
Índice de reconocimiento de sequías (DRI)	17	Amarillo	P, T	Se necesitan valores mensuales de temperatura y precipitación
Índice de sequía efectiva (EDI)	18	Amarillo	P	Programa disponible mediante contacto directo con el autor
Coefficiente hidrotérmico de Selyaninov (HTC)	19	Amarillo	P, T	Cálculos fáciles y varios ejemplos de la Federación de Rusia
Índice de sequía de la NOAA (NDI)	19	Amarillo	P	Es mejor utilizarlo en aplicaciones agrícolas
Índice de severidad de sequía de Palmer (PDSI)	20	Amarillo	P, T, CAD	No se le ha asignado el color verde debido a la complejidad de los cálculos y a la necesidad de disponer de datos de series completas
Índice Z de Palmer	20	Amarillo	P, T, CAD	Uno de los numerosos productos de los cálculos del PDSI
Índice de anomalía pluviométrica (RAI)	21	Amarillo	P	Se necesitan datos de series completas
Índice autocalibrado de severidad de sequía de Palmer (sc-PDSI)	22	Amarillo	P, T, CAD	No se le ha asignado el color verde debido a la complejidad de los cálculos y a la necesidad de disponer de datos de series completas
Índice normalizado de anomalías (SAI)	22	Amarillo	P	Se utilizan datos puntuales para describir las condiciones regionales
Índice estandarizado de precipitación y evapotranspiración (SPEI)	23	Amarillo	P, T	Se necesitan datos de series completas; productos similares al SPI, pero con componente de temperatura
Índice de sequía de referencia para la agricultura (ARID)	23	Rojo	P, T, Mod	Producido en el sureste de Estados Unidos de América; no se ha probado lo suficiente fuera de esta región
Índice de sequía específico para cultivos (CSDI)	24	Rojo	P, T, TPR, V, Rad, CAD, Mod, CD	Se necesitan datos de calidad de muchas variables, lo que dificulta su uso
Índice para reclamaciones por sequía (RDI)	25	Rojo	P, T, MN, EM, CF	Similar al índice del abastecimiento de las aguas superficiales, pero contiene un componente de temperatura

Tabla 2-4: Índices asociados a la hidrología (OMM, 2016).

Hidrología	Página	Facilidad de uso	Parámetros de entrada	Información adicional
Índice de sequía hidrológica de Palmer (PHDI)	27	Amarillo	P, T, CAD	Se necesitan datos de series completas
Índice normalizado del suministro de embalses (SRSI)	28	Amarillo	RD	Cálculos similares al SPI con datos de embalses
Índice normalizado de los caudales fluviales (SSFI)	29	Amarillo	SF	Utiliza el programa del SPI junto con datos sobre los caudales fluviales
Índice normalizado del nivel del agua (SWI)	29	Amarillo	GW	Cálculos similares a los del SPI, pero utilizando datos sobre las aguas subterráneas o del nivel de los pozos en lugar de datos de precipitación
Índice de sequía de los caudales fluviales (SDI)	30	Amarillo	SF	Cálculos similares a los del SPI, pero utilizando datos sobre los caudales fluvia-les en lugar de datos de precipitación
Índice del abastecimiento de las aguas superficiales (SWSI)	30	Amarillo	P, EM, CF, MN	Se pueden utilizar muchas metodologías y productos derivados, pero las comparaciones entre cuencas están sujetas al método elegido
Índice agregado de sequía (ADI)	31	Rojó	P, ET, CF, EM, CAD, MN	Carece de código, pero las cuestiones matemáticas están explicadas en las publicaciones correspondientes
Índice normalizado de la fusión de la nieve y la lluvia (SMRI)	32	Rojó	P, T, CF, Mod	Se puede utilizar con o sin información sobre el manto de nieve

Algunos índices de relevancia hidrológica se describen a continuación:

Índice estandarizado de precipitación y evapotranspiración (SPEI): El SPEI (Vicente-Serrano, Beguería, & Lopez-Moreno, 2010) es un índice climático mensual calculado a partir de la diferencia entre la precipitación acumulada en un período de tiempo y la evapotranspiración potencial acumulada en el mismo periodo de tiempo. Puede ser calculado a diferentes escalas temporales (1 a 48 meses) lo cual afecta al comportamiento del índice en el periodo escogido (Scordo, Piccolo, & Perillo, 2018).

Los rangos de valores del índice SPEI indican las condiciones meteorológicas y de demanda de la atmósfera, la cual se presenta en la Tabla 2-5.

Tabla 2-5: Clasificación según el valor del índice SPEI. Fuente: Modificado de McKee, Doesken, & Kleist (1993).

SPEI	Clasificación
$\geq 2,00$	Extremadamente Húmedo
1,50 a 1,99	Severamente Húmedo
1,00 a 1,49	Moderadamente Húmedo
0 a 0,99	Ligeramente Húmedo (cercano a lo normal)
0 a -0,99	Sequía Ligera (cercano a lo normal)
-1,00 a -1,49	Sequía Moderada
-1,50 a -1,99	Sequía Severa
$\leq -2,00$	Sequía Extrema

Índice normalizado de precipitación (SPI): Este índice consiste en la conversión de los datos de precipitación a probabilidades basadas en registros de precipitación a largo plazo. Las probabilidades se transforman en series normalizadas con un promedio de 0 y una desviación estándar de 1, además, dicho índice permite la identificación de los tipos de sequía, ya que diferentes sistemas naturales y sectores económicos pueden responder a las condiciones de sequía en escalas de tiempo muy diferentes (Serrano, y otros, 2016)

Los rangos de valores del índice SPI indican las condiciones meteorológicas y de demanda de la atmósfera, la cual se presenta en la Tabla 2-6.

*Tabla 2-6: Clasificación según valor del índice SPI. Fuente: modificado de (McKee, Doesken, & Kleist, 1993).*

<b>SPEI</b>	<b>Clasificación</b>
≥2,00	Extremadamente Húmedo
1,50 a 1,99	Severamente Húmedo
1,00 a 1,49	Moderadamente Húmedo
0 a 0,99	Ligeramente Húmedo (cercano a lo normal)
0 a -0,99	Sequía Ligera (cercano a lo normal)
-1,00 a -1,49	Sequía Moderada
-1,50 a -1,99	Sequía Severa
≤-2,00	Sequía Extrema

Índice normalizado de los caudales fluviales (SSFI): Corresponde a un índice desarrollado por medio de valores mensuales de los caudales de una cuenca. Se puede calcular con datos de observaciones, y proporciona una perspectiva de los períodos de niveles altos y bajos de caudal asociados a las crecidas y las sequías. Para su cálculo se requieren datos diarios o mensuales de los caudales y sirve como un indicador para la vigilancia de las condiciones hidrológicas en distintas escalas temporales (OMM, 2016). Los intervalos de este índice y sus respectivos valores se presentan en la Tabla 2-7.

*Tabla 2-7: Clasificación según valor del índice SSFI. Fuente: modificado de (Zalokar, Kobold, & Sraj, 2021).*

<b>SSFI</b>	<b>Clasificación</b>
≥2,00	Extremadamente Húmedo
1,50 a 1,99	Severamente Húmedo
1,00 a 1,49	Moderadamente Húmedo
0 a 0,99	Ligeramente Húmedo (cercano a lo normal)
0 a -0,99	Sequía Ligera (cercano a lo normal)
-1,00 a -1,49	Sequía Moderada
-1,50 a -1,99	Sequía Severa
≤-2,00	Sequía Extrema

Índice de anomalía pluviométrica (RAI): El índice de anomalía pluviométrica (*Rainfall Anomaly Index*), corresponde a una variante del índice hidrológico SPI, el cual depende de datos en relación a la precipitación media mensual los cuales corresponden a una cuenca o sector en particular. Dicho índice tiene como umbral superior a 3 y como umbral inferior a -3 (Van Roy, 1965). Su clasificación se presenta en la Tabla 2-8.

*Tabla 2-8: Clasificación según índice RAI. Fuente: modificado de (Van Roy, 1965).*

<b>RAI</b>	<b>Clasificación</b>
$\geq 3,00$	Extremadamente Húmedo
2,00 a 2,99	Muy Húmedo
1,00 a 1,99	Moderadamente Húmedo
0,50 a 0,99	Ligeramente Húmedo
0,49 a -0,49	Casi Normal
-0,50 a -0,99	Ligeramente Seco
-1,00 a -1,99	Moderadamente Seco
-2,00 a -2,99	Muy Seco
$\leq -3,00$	Extremadamente Seco

## 2.4. Cambio climático

Como consecuencia de la segunda revolución industrial, los combustibles fósiles han jugado un rol importante dentro del sector energético y productivo de las principales naciones industrializadas. La utilización de éstos trae como consecuencia la generación de gases como el monóxido y el dióxido de carbono, los que eran y siguen siendo liberados a la atmósfera del planeta (Cerda, 2014).

El fenómeno del cambio climático abarca las transformaciones a largo plazo de las temperaturas del planeta. Si bien estos cambios pueden tener un origen natural, como variaciones en la actividad solar o grandes erupciones volcánicas, desde el siglo XIX, el efecto antropogénico ha sido el principal impulsor de este cambio. Esto se debe principalmente a la quema de combustibles fósiles como el carbón, el petróleo y el gas; la combustión de estos produce emisiones de gases de efecto invernadero, atrapando el calor del sol y aumentando las temperaturas de la superficie terrestre, tal como se observa en la Figura 2-2.

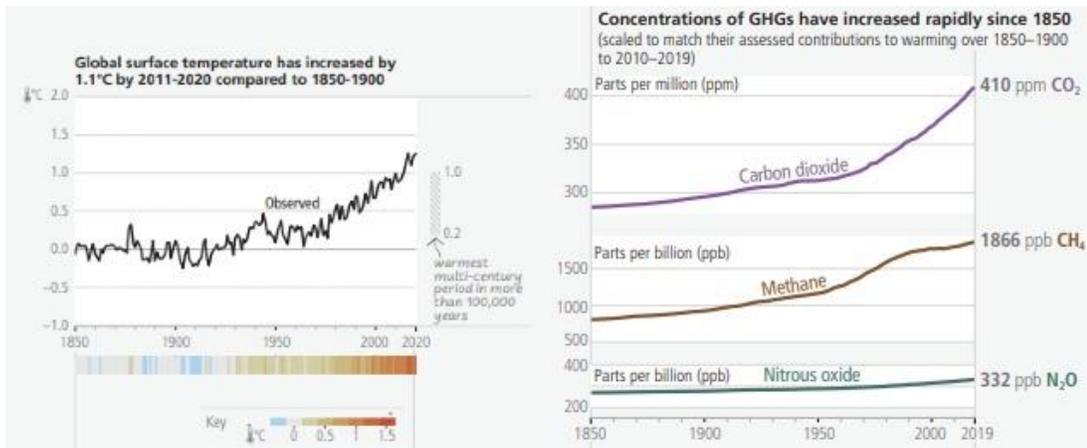


Figura 2-2: Aumento de las temperaturas y de gases de efecto invernadero en la superficie terrestre. Fuente: (IPCC, 2023).

Las actividades humanas, principalmente a través de las emisiones de gases de efecto invernadero, han generado una aceleración no natural en el calentamiento global, incrementando la temperatura global en 1,1°C en los años 2011-2020 en comparación al periodo 1850-1900, tal como se aprecia en la Figura 2-3. Las emisiones globales de gases de efecto invernadero han continuado aumentando durante 2010-2019, con contribuciones históricas, derivadas del uso insostenible de energía, los estilos de vida de las personas y sus patrones de consumo (IPCC, 2023).

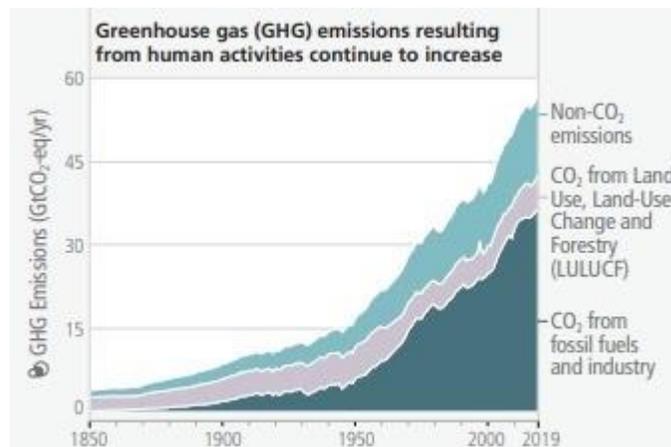


Figura 2-3: Aumento de gases de efecto invernadero por actividad humana. Fuente: (IPCC, 2023)

El cambio climático causado por el ser humano ya está afectando a fenómenos meteorológicos y climáticos extremos en todas las regiones del mundo. Esto ha llevado a impactos adversos generalizados en la seguridad alimentaria y del agua, la salud humana, así como pérdidas y daños relacionados con la naturaleza y las personas, afectadas por los cambios bruscos y extremos que cada vez resultan ser más comunes (IPCC, 2023).

## 2.5. Escenarios climáticos

Producto del cambio climático y como una medida para mitigar y buscar soluciones, se forma el Panel Intergubernamental de Expertos sobre el cambio climático (IPCC por sus siglas en inglés) en el año 1988 (Garay, 2022).

Buscando realizar proyecciones climáticas, se generan diferentes escenarios futuros de emisiones de gases de efecto invernadero, llamados Trayectorias de Concentraciones Representativas (RCP, por sus siglas en inglés), los cuales se aprecian en la Figura 2-4. Siguiendo esto, es que existe un escenario pesimista, donde el forzamiento radiativo aumenta a lo largo del siglo XXI (RCP8.5) (Riahi, y otros, 2011), dos escenarios intermedios (RCP4.5 y RCP6) y un escenario optimista (RCP2.6), donde se tiene un alto grado de mitigación de emisiones de gases de efecto invernadero. El número presente después de la sigla RCP, corresponde a la radiación en unidades de  $W/m^2$  (Government of Canada, 2023). Por otro lado, se generan cinco escenarios basados en Trayectorias Socioeconómicas Compartidas (SSP, por sus siglas en inglés), siendo SSP1 el más optimista, y SSP5 el más pesimista, tal como se observa en la Figura 2-5 (Riahi, y otros, 2017).

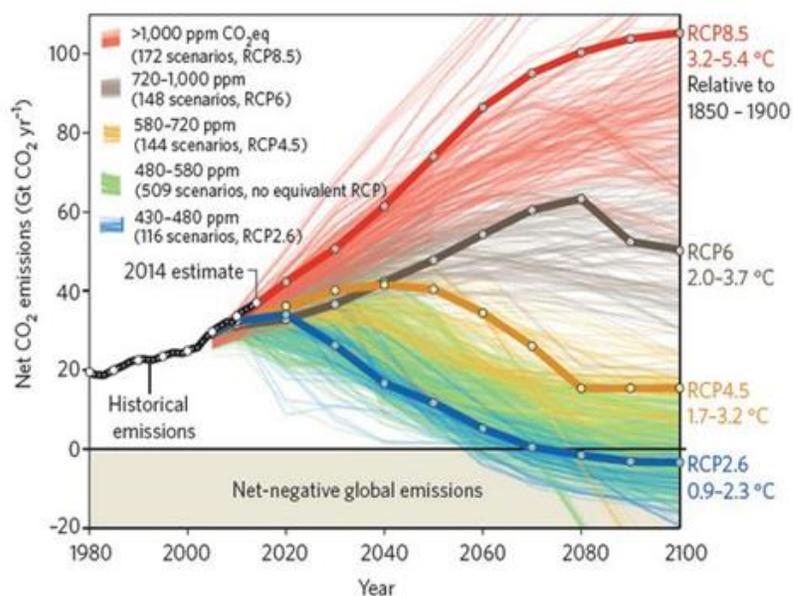


Figura 2-4: Caracterización de RCP y tasas de gases de efecto invernadero (CIIFEN, 2022).

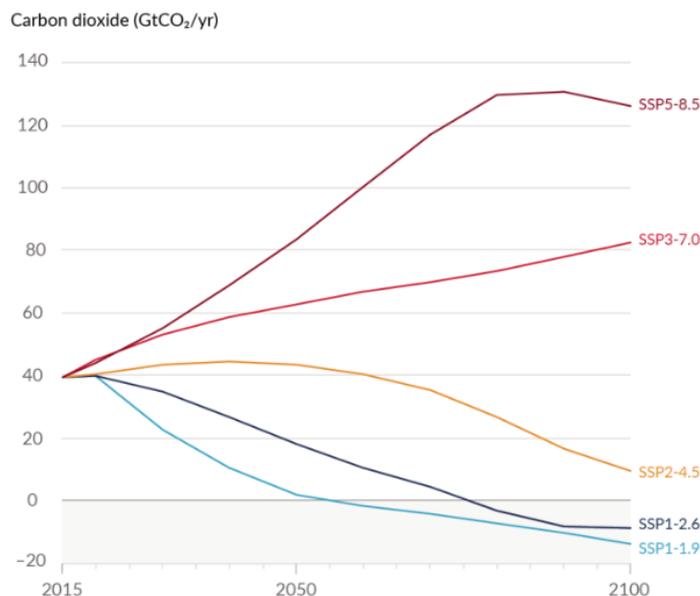


Figura 2-5: Escenarios de emisiones de carbono utilizados por el IPCC (University, Oregon State, 2019).

Dentro de las simulaciones climáticas globales, destaca el proyecto CMIP6 (O'Neill, y otros, 2016), sucesor de CMIP5. Este proyecto coordina actividades que comparan modelos climáticos independientes, los cuales siguen una infraestructura común para la recopilación, organización y distribución de los resultados obtenidos en experimentos compartidos. Los datos generados por los modelos de fases anteriores de CMIP han sido utilizados en miles de investigaciones científicas. La comparación de múltiples modelos ofrece una visión amplia sobre los errores y las incertidumbres presentes en las simulaciones climáticas (CR2, 2021).

## 2.6. Escalamiento

Tanto los análisis climáticos como los GCM se basan en simulaciones numéricas que abarcan todo el globo terrestre, utilizando grillas relativamente gruesas, generalmente de 1,0° (existen de 0,7°) de resolución. Sin embargo, para escalas hidrológicas se requiere mayor resolución horizontal, lo que significa grillas más pequeñas (i.e., más finas). Esta diferencia de resoluciones horizontales genera un problema de compatibilidad de la información, ya que la de estas grillas globales no representa adecuadamente efectos locales, como por ejemplo los asociados a topografía y relieve, por lo que es imposible utilizarla directamente en estudios hidrológicos en áreas pequeñas.

Por lo anterior, se debe recurrir a escalamientos de las variables relevantes para el caso de estudio, proceso que se puede llevar a cabo de múltiples formas; por un lado, existen los escalamientos de tipo dinámico, que corresponden a trabajar a una mayor resolución espacial y en un área acotada con algún tipo de modelo de circulación regional, usando como condiciones de borde las proyecciones realizadas por los mismos GCM. Por otra parte, se encuentran los métodos de escalamiento estadístico (ver Figura 2-6), los cuales se basan en el supuesto de establecer relaciones estadísticas

establecidas en el periodo de línea base con la información de los GCM y los datos observados, los cuales son eventualmente proyectados sobre los datos a futuro bajo alguna configuración (Comisión nacional de energía, 2020).



Figura 2-6: Escalamiento estadístico (Comisión nacional de energía, 2020).

Una vez que se encuentran escalados los datos, ya sea de forma dinámica o estadística, estos deben corregirse por sesgo para ser utilizados como variables de entrada en un modelo hidrológico (Wilby & Dessai, 2010). En palabras simples, la corrección de sesgo (*Bias Correction*) corresponde a comparar datos observados en estaciones con los obtenidos mediante simulaciones históricas escaladas de los GCMs; dicho procedimiento busca lograr que la distribución de probabilidad acumulada de las modelaciones sea similar a las observadas en las estaciones utilizadas (González, 2021).

# Capítulo 3: Caracterización zona de estudio

## 3.1. Antecedentes generales

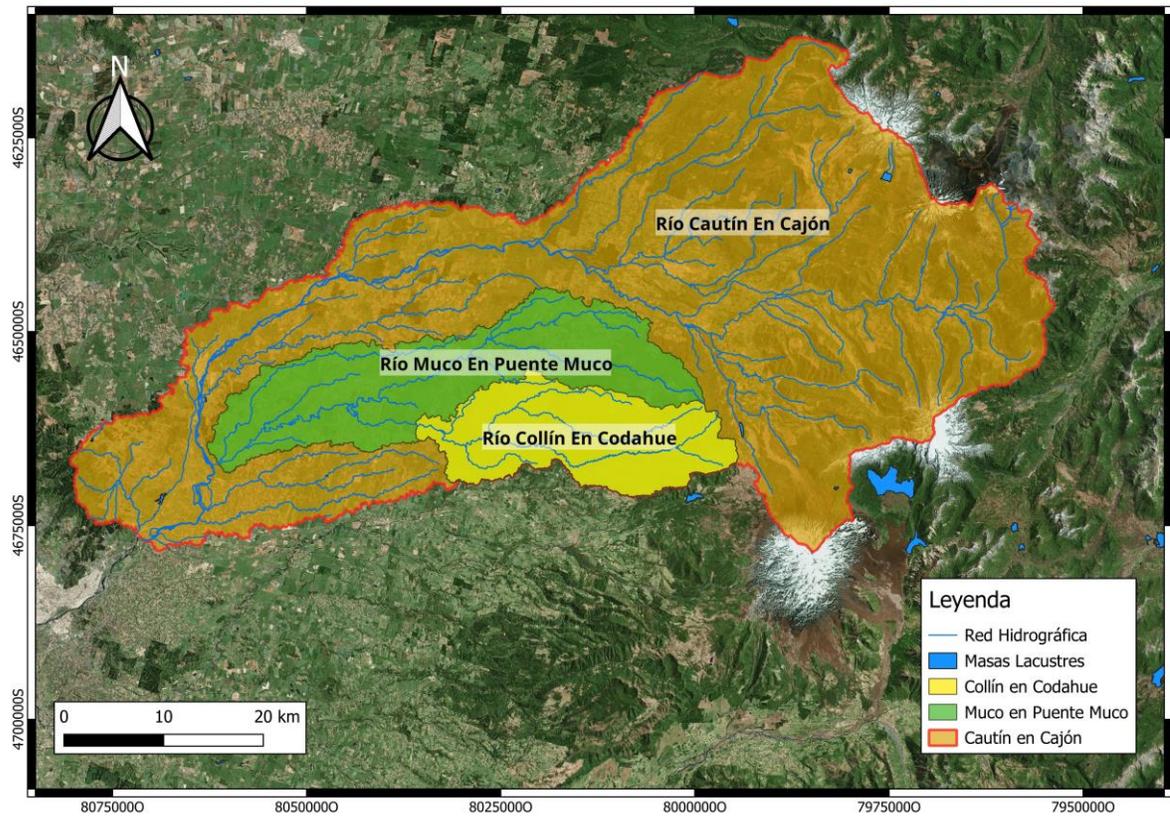
La zona de estudio corresponde a la cuenca definida por la estación fluviométrica río Cautín en Cajón, que al menos contiene al menos dos cuencas anidadas con información registrada que corresponden a las definidas por las estaciones río Collín en Codahue y Muco en Puente Muco (Figura 3-1); todas estas, ubicadas en la región de la Araucanía (Figura 3-2). La cuenca principal tiene una superficie de 2755,6 km<sup>2</sup> y una precipitación media anual de 2190 mm/año, con un índice de aridez<sup>2</sup> de 0,5. Su punto más alto se encuentra a los 3090 m s.n.m y su altitud media es de 763 m s.n.m (Alvarez-Garreton, y otros, 2018). Las extensiones de las cuencas en estudio y sus centroides se aprecian en la Tabla 3-1.

*Tabla 3-1: Características cuencas en estudio.*

<b>Cuenca</b>	<b>Punto de salida (Lat; Lon)</b>	<b>Área [km<sup>2</sup>]</b>	<b>Índice de aridez</b>
Río Cautín en Cajón	(-38,69; -72,5)	2755,6	0,5
Muco en Puente Muco	(-38,58; -72,19)	650,3	0,5
Río Collín en Codahue	(-38,62; -72,42)	254,6	0,6

---

<sup>2</sup> Índice de Aridez: Muestra el grado de aridez potencial de una zona, representado en el déficit de agua que puede tener una cobertura vegetal comparado con la disponibilidad plena de humedad que requiere para su desarrollo (estado óptimo o ideal de agua) (Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible, 2023).



*Figura 3-1: Ubicación de cuencas en estudio en el espacio. Basado en Google Earth.*

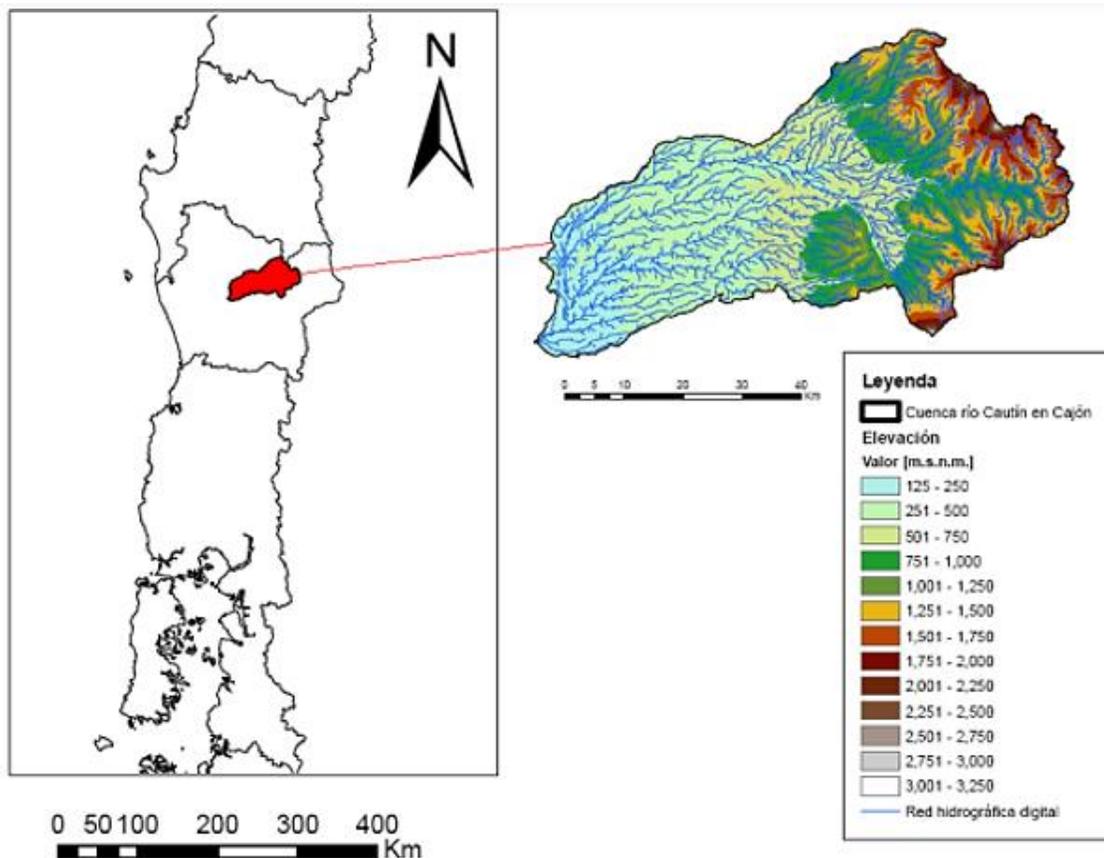


Figura 3-2: Ubicación y elevación de la cuenca. Fuente: Mendoza (2010)

## 3.2. Clima

La región de la Araucanía tiene un clima templado oceánico lluvioso, ubicado principalmente en la Cordillera de la Costa y la precordillera andina. En cuanto a las precipitaciones, estas oscilan entre los 1.500 y 2.500 mm/año, con periodos secos de uno a dos meses. Al norte, predomina un clima templado cálido con menor precipitación, en comparación al resto del territorio (BCN, Clima y vegetación Región de la Araucanía, 2023).

El cordón de cerros de Nahuelbuta atrapa la influencia oceánica, reduciendo las precipitaciones y aumentando los periodos secos (BCN, Clima y vegetación Región de la Araucanía, 2023). En la costa, se encuentra un clima templado oceánico de costa occidental, caracterizado por alta humedad relativa y precipitaciones entre 1.000 y 1.500 mm/año, siendo en lo alto de la cordillera de los Andes donde se registran las mayores precipitaciones. En la Cordillera de los Andes predomina un clima frío de altura, con precipitaciones de hasta 3.000 mm/año y bajas temperaturas durante todo el año (BCN, Clima y vegetación Región de la Araucanía, 2023).

Con respecto a las precipitaciones, en la Figura 3-3 se presentan las curvas de variación estacional, para las tres cuencas en estudio:

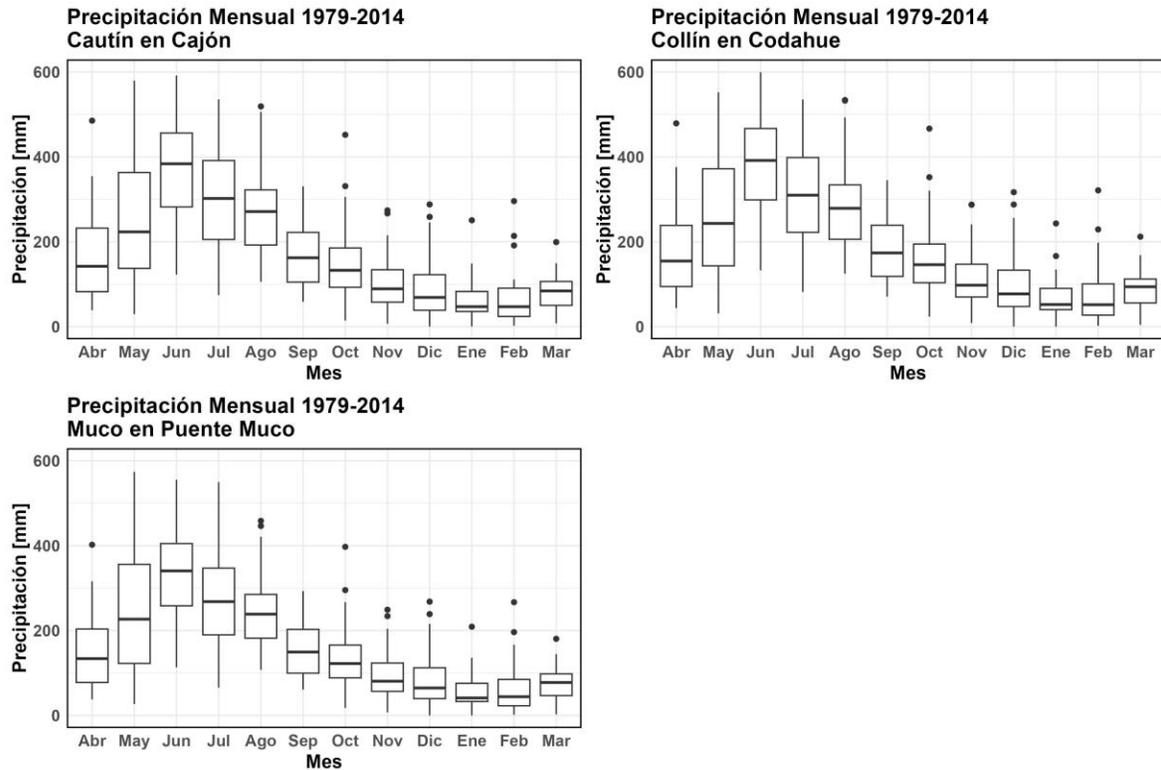


Figura 3-3: Curva de variación estacional de precipitación para las cuencas en estudio. Datos obtenidos de CR2 CAMELS Explorer (2021).

Las curvas de precipitación analizadas evidencian de manera clara que la zona de estudio presenta una fuerte estacionalidad climática. Este comportamiento se manifiesta en un aumento significativo en los peaks máximos de precipitaciones durante los meses de abril a agosto, lo que sugiere una marcada estacionalidad en las lluvias. A partir de los gráficos, se observa que los meses de invierno y primavera (principalmente de mayo a septiembre) concentran las precipitaciones más altas, con una mayor variabilidad en estos meses. Además, los meses de verano (diciembre a marzo) muestran precipitaciones considerablemente bajas, con una menor variabilidad.

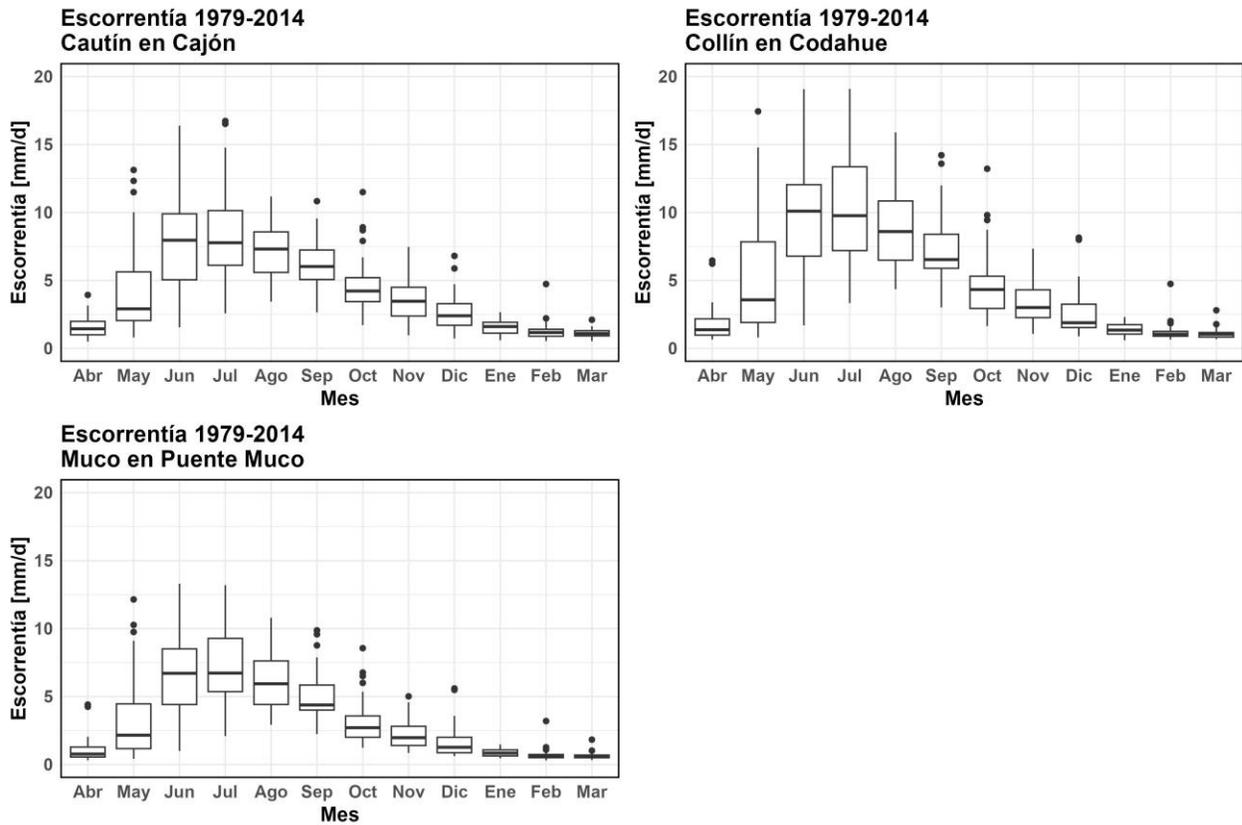


Figura 3-4: Curva de variación estacional de escorrentía para las cuencas en estudio. Datos obtenidos de CR2 CAMELS Explorer (2021).

Los gráficos de escorrentía de la Figura 3-4 muestran una clara estacionalidad, con *peaks* máximos durante los meses de invierno (mayo a septiembre), similares a los observados en las precipitaciones. La mayor variabilidad ocurre en invierno, con escorrentías más altas y fluctuantes, mientras que en verano (diciembre a marzo) los valores son bajos y consistentes, reflejando un patrón seco.

### 3.3. Topografía

Dentro de la cuenca en estudio, se encuentran dos características geográficas: la Cordillera de Los Andes y la Depresión Intermedia. En cuanto a la mencionada en primer lugar, ésta presenta alturas superiores a los 2.000 m s.n.m, dominada por los volcanes que la constituyen y le dan las características de cordillera volcánica activa: Tolhuaca (2.780 m s.n.m), Lonquimay (2.822 m s.n.m), Llaima (3.050 m s.n.m) y Villarrica (2.840 m s.n.m) (BCN, 2023). La Figura 3-5 muestra las curvas hipsométricas de las cuencas en estudio.

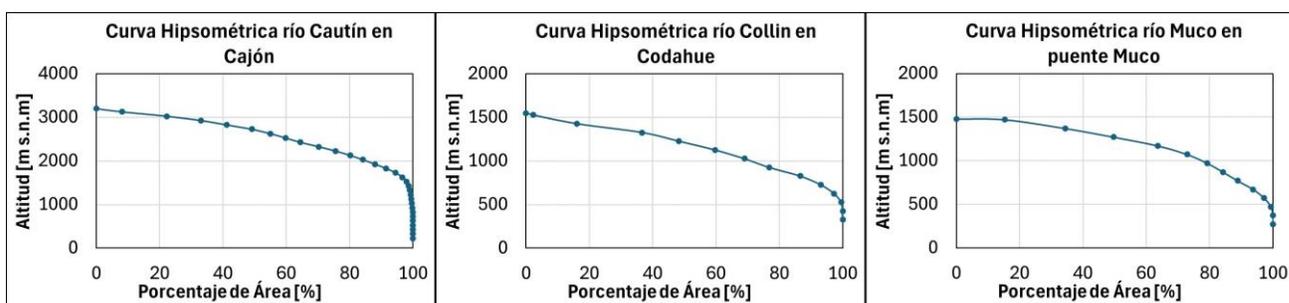


Figura 3-5: Curvas hipsométricas de las cuencas en estudio.

A partir de las curvas hipsométricas, se observa que aquella que posee las mayores altitudes corresponde a Cautín en Cajón, lo que se debe principalmente por su extensión hacia la Cordillera de Los Andes, con altitudes de hasta 3000 m s.n.m, como se da en el caso del volcán Llaima. Además, según la forma de las curvas hipsométricas, las cuencas se pueden categorizar como ríos jóvenes.

### 3.4. Cobertura y tipos de suelo

Con respecto a los tipos de suelo por cuenca, se tiene que la gran mayoría de su extensión corresponde a bosques y terrenos agrícolas y en mucha menor cantidad, zonas sin vegetación y con nieve y glaciares. La Tabla 3-2 y la Figura 3-6 se presentan los porcentajes de cobertura según su clasificación y repartición en la zona de estudio. Con respecto a un análisis desde un punto de vista granulométrico, se presenta la Figura 3-7, en la que se caracteriza la zona en estudio.

Tabla 3-2: Porcentaje de suelo según tipo de cobertura. Fuente: CONAF.

Uso	Porcentaje de Cobertura
Áreas Desprovistas de Vegetación	1,9%
Áreas Urbanas e Industriales	0,4%
Bosques	69,1%
Cuerpos de Agua	1,2%
Humedales	0,4%
Nieves Eternas y Glaciares	0,1%
Praderas y Matorrales	22,9%
Terrenos Agrícolas	4,0%

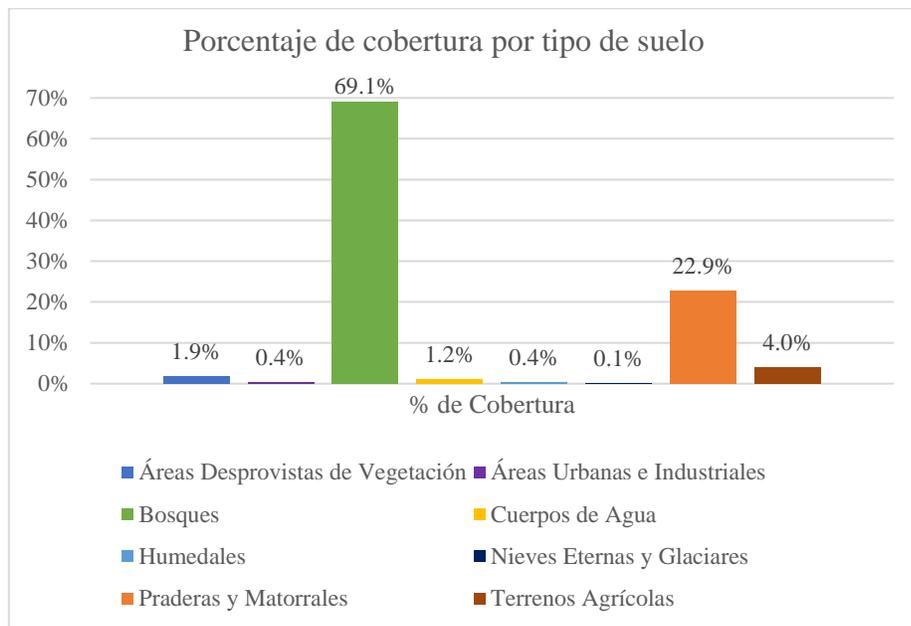


Figura 3-6: Representación gráfica de la cobertura de suelo por tipo (CONAF, 2019).

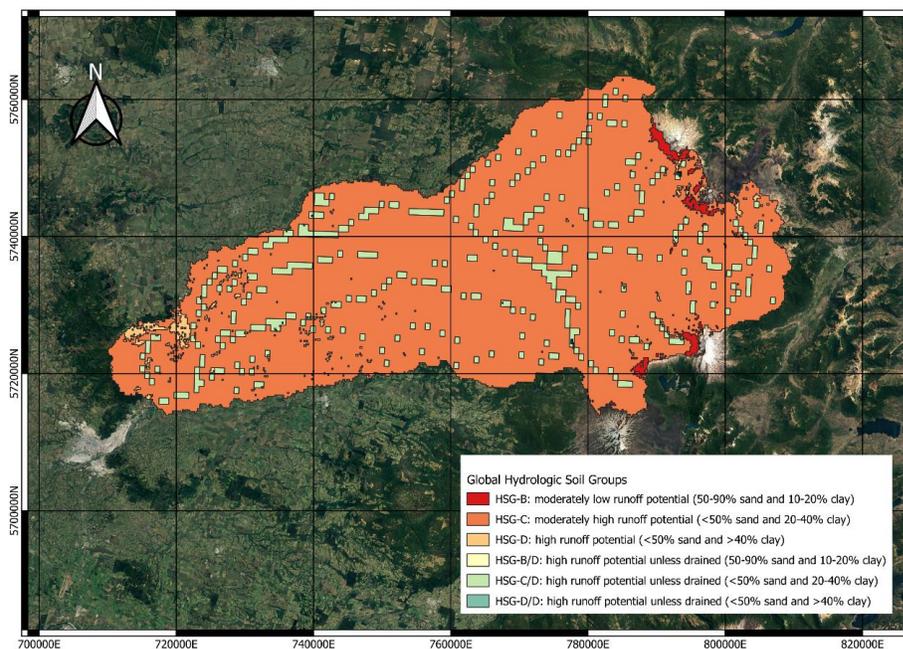


Figura 3-7: Tipos de suelo en la cuenca de estudio (NASA, 2020)

El análisis de la Figura 3-7, indica que la gran mayoría del suelo de la cuenca corresponde a un tipo de suelo tipo C, el cual se caracteriza por tener una alta capacidad de escorrentía y una cantidad de finos entre 20 a 40% (arcilla). Además, con respecto a la cantidad de arena que posee este suelo, ésta se encuentra por debajo del 50%.

Adicionalmente, a partir de la Figura 3-7, se tienen zonas en donde el suelo corresponde a un tipo C/D, el cual posee un alto potencial de escorrentía a menos que se drene, con un porcentaje de arenas menor al 50% y un porcentaje de arcillas del 20 al 40%.

Finalmente, y en una cantidad mucho menor, se tienen suelos de tipo B y D, los que poseen 10 a 20% de arcilla y más de un 40% de arcilla respectivamente. Con respecto a la capacidad de escorrentía, el suelo de tipo B posee una capacidad moderada y el tipo D una alta capacidad de escorrentía (NASA, 2020).

# Capítulo 4: Metodología

## 4.1. Metodología general

En este estudio se utilizó la plataforma de modelación hidrológica FUSE, que permite configurar múltiples estructuras de modelos para estimar diversos procesos. De las 108 combinaciones posibles, se seleccionaron 20 de manera aleatoria para su calibración en la cuenca del río Cautín en Cajón, con el objetivo de analizar el impacto de la elección de estructuras en las proyecciones.

El modelo se alimentó con datos meteorológicos de estaciones ubicadas en las cuencas del Cautín en Cajón, Collín en Codahue y Muco en Puente Muco. Para considerar los efectos del cambio climático, se utilizaron simulaciones de Modelos de Circulación General (GCMs) bajo el escenario SSP5-8.5, cubriendo el periodo 1979-2085. Estas simulaciones fueron escaladas espacialmente y corregidas por sesgo mediante el método MBCn.

La calibración del modelo se realizó con datos diarios de escorrentía, temperatura, precipitación y evapotranspiración potencial. Los datos históricos (1979-2014) se organizaron en tres fases: una etapa de calentamiento (1979-1980), un periodo de calibración (1981-2004) y un periodo de validación (2004-2014). El algoritmo SCE se utilizó para la calibración, tomando como función objetivo el Error Cuadrático Medio (RMSE). Posteriormente, se generó un ranking con las tres estructuras mejor evaluadas mediante un análisis complementario de índices de ajuste para chequear el correcto comportamiento.

Finalmente, se realizó un análisis de índices de sequía, incluyendo SPEI, SPI, SSFI y RAI. Estos índices se calcularon para escalas de 9 y 12 meses, utilizando tanto datos históricos como proyectados, lo que permitió identificar sequías meteorológicas e hidrológicas. El enfoque se centró en evaluar la intensidad, duración y magnitud de los eventos de sequía, tanto para el periodo histórico como para el futuro.

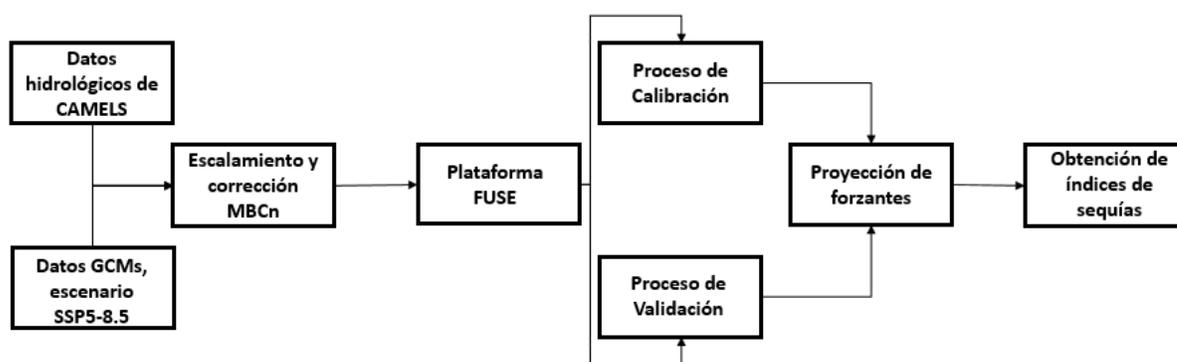


Figura 4-1: Diagrama de flujo de metodología general.

## 4.2. Plataforma hidrológica FUSE

La plataforma de modelación hidrológica FUSE se caracteriza por tener nueve estructuras con diferentes opciones de modelos en cada una de ellas. Sin embargo, este trabajo se enfoca en cuatro de ellas (2<sup>a</sup>, 3<sup>a</sup>, 4<sup>a</sup> y 5<sup>a</sup> posición, Tabla 4-1), dentro de las cuales se presentan diversas opciones que permiten una amplia variedad de combinaciones posibles, lo que influye considerablemente en los resultados simulados. Para comprender de manera gráfica las distintas opciones de combinación de modelos, se presenta la Tabla 4-1, en la cual se observa un ejemplo de combinación de estructuras de modelo (224312111, en la fila Número).

*Tabla 4-1: Ejemplo de combinación de opciones de modelos de una estructura FUSE en la segunda fila y su posición respectiva en la primera fila.*

Posición	1 <sup>a</sup>	2 <sup>a</sup>	3 <sup>a</sup>	4 <sup>a</sup>	5 <sup>a</sup>	6 <sup>a</sup>	7 <sup>a</sup>	8 <sup>a</sup>	9 <sup>a</sup>
Número	2	2	4	3	1	2	1	1	1
Significado	Tabla B-1	("U") PRMS	("L") ARNO/VIC	("SR") TOPMODEL	("PE") PRMS	Tabla B-1	Tabla B-1	Tabla B-1	Tabla B-1

Los números ubicados en la primera, sexta, séptima, octava y novena posición corresponden a aquellas opciones de modelo que no fueron modificadas para este estudio, las que se detallan en la Tabla B-1.

Las combinaciones de las opciones de modelo dan un total de 108 posibles combinaciones (3 U \* 4 L \* 3 SR \* 3 PE), pero solo 78 son compatibles entre sí y son capaces de llevar a cabo proyecciones. Para este estudio, se utilizaron 20 para la calibración y validación, cuya selección se hizo de manera aleatoria. En la Tabla 4-2, se presentan todas las combinaciones utilizadas en el proceso de calibración y validación de los parámetros.

Tabla 4-2: Combinaciones FUSE utilizadas.

Combinación de Estructuras FUSE Utilizadas			
211112111	214332111	231132111	233112111
211132111	223112111	231212111	233312111
214112111	224312111	231222111	234122111
214212111	231112111	231232111	234222111
214232111	231122111	231312111	234322111

En la Tabla 4-2, se aprecia que varían las opciones de modelo que se encuentran en la segunda, tercera, cuarta y quinta posición, las que corresponden respectivamente a las estructuras de modelo representadas en la Tabla 4-3. Dicha tabla, muestra las diferentes opciones de modelación para las estructuras, en donde en la columna de *Modelo existente*, el número entre paréntesis representa el modelo que se usa en las combinaciones de FUSE:

Tabla 4-3: Estructuras de modelo y sus opciones para FUSE (Clark, y otros, 2008), traducido y modificado de (Saavedra, Mendoza, Addor, Llauca, & Vargas, 2021).

Estructura del modelo	Opción del modelo	Modelo existente
Arquitectura de la capa superior “U (Upper)”	La capa superior dividida en almacenamiento de tensión y almacenamiento libre.	Sacramento (1)
	Almacenamiento libre más almacenamiento de tensión subdividido en recarga y exceso.	PRMS (2)
	Capa superior definida por un único valor de estado.	ARNO/VIC – TOPMODEL (3)
Arquitectura de la capa inferior y flujo subsuperficial “L” (Lower)	Almacenamiento de tensión combinado con dos tanques paralelos.	Sacramento (1)
	Almacenamiento de tamaño ilimitado combinado con tasa de fracción lineal.	PRMS (2)
	Almacenamiento de tamaño ilimitado combinado con recesión de potencia.	TOPMODEL (3)
	Almacenamiento de tamaño fijo con función de almacenamiento no lineal.	ARNO/VIC (4)

Estructura del modelo	Opción del modelo	Modelo existente
Escorrentía superficial “SR”	Parametrización ARNO/VIC: controlada por el contenido de humedad superior del suelo.	ARNO/VIC (1)
	Variante PRMS: fracción del almacenamiento de tensión superior.	PRMS (2)
	Parametrización TOPMODEL: basada en la distribución del índice topográfico.	TOPMODEL (3)
Percolación “PE”	Agua desde la capacidad del campo disponible para la percolación.	PRMS (1)
	Agua desde el punto de marchitez hasta la saturación disponible para la percolación.	ARNO/VIC (2)
	Percolación definida por el contenido de humedad en la arquitectura de la capa inferior.	Sacramento (3)

## 4.3. Obtención y tratamiento de la información

### 4.3.1. Obtención de datos y forzantes

Para la obtención de datos y forzantes, se debe distinguir entre los datos crudos, los escalados y los corregidos. Esta subsección se centra en los datos crudos, tanto observados, como los que se obtienen a partir de los GCM. Este tipo de datos se obtienen de diversas fuentes, diferenciando entre aquellos observados en las estaciones de Cautín en Cajón, Collín en Codahue y Muco en Puente Muco, y aquellos provenientes de simulaciones realizadas por los GCMs CMCC\_ESM2, EC\_EARTH\_CC, EC\_EARTH3-veg, MRI\_ESM2 y MIROC6, en el contexto del escenario SSP5-8.5 y extraídos de Copernicus (<https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/projections-cmip6?tab=overview>) bajo las proyecciones climatológicas de CMIP6 (*Coupled Model Intercomparison Project Phase 6*).

Para la descarga de datos desde Copernicus, es necesario delimitar una zona de estudio que abarque un área mayor que las cuencas de interés. Las coordenadas del cuadrante utilizado para obtener las series de tiempo desde los GCMs se detallan en la Tabla B-3, adicionalmente, se presentan en el Tabla B-2 las resoluciones y dimensiones de los GCMs descargados.

### 4.3.2. Escalamiento y corrección de datos

Una vez descargados los datos históricos desde CAMELS y de proyecciones climáticas futuras de precipitaciones y temperaturas, se procede a escalar espacialmente dichos datos mediante la utilización del entorno de software libre R. De esta manera, se logra pasar a una escala más pequeña y ajustada al dominio de estudio, obteniendo archivos Excel con las series de datos de forzantes, tanto para periodos históricos (1979-2014) como para futuros (2015-2085).

Finalmente, se tienen los datos escalados a los centroides de las cuencas, con lo que posteriormente se debe corregir el sesgo de dichas series de forzantes climatológicas mediante el método MBCn (Cannon, 2017). En este caso de estudio se utilizaron las variables de precipitación y temperatura en conjunto, teniendo como periodo de referencia al periodo histórico observado (1979-2014).

## 4.4. Estrategia de calibración mediante FUSE

Para la calibración de las estructuras seleccionadas en la plataforma FUSE, se requiere inicialmente de información de forzantes de carácter histórico, específicamente de escorrentía, temperatura, precipitación y evapotranspiración potencial. Para este punto en particular, se utilizaron las series de tiempo diarias agregadas espacialmente a escala de cuenca de CAMELS que llevan por nombre Cautín en Cajón (9129002), Collín en Codahue (9126001) y Muco en Puente Muco (9127001), estaciones de las cuales se utilizaron los datos históricos entre el 01-01-1979 y el 15-12-2014.

Se utilizaron los datos entre el 01-01-1979 hasta el 31-12-1980 como periodo de calentamiento o *Warm-up*; posteriormente para el periodo de calibración se utilizaron datos desde el 01-01-1981 hasta el 01-11-2004 y finalmente desde el 02-11-2004 hasta el 15-12-2014 para el periodo de validación. Se utilizó esta distribución de los datos observados históricos, guardando la repartición de 70% y 30% entre calibración y evaluación respectivamente (Klemes, 1986). De manera ordenada, se presenta la Tabla 4-4, que muestra los periodos utilizados:

Tabla 4-4: Distribución de periodos.

<b>Periodo</b>	<b>Fecha inicio / Fecha final</b>
Calentamiento/ <i>Warm-Up</i>	01-01-1979/31-12-1980
Calibración	01-01-1981/01-11-2004
Validación	02-11-2004/15-12-2014

Con respecto a la estrategia de calibración de FUSE, esta plataforma utiliza tres comandos en la consola de Linux, en donde el conocido como “*def-run*” corre las modelaciones con parámetros por defecto no calibrados, “*run-best*” el cual corre las modelaciones con los parámetros ya calibrados y “*run-sce*” el cual se encarga de calibrar estos parámetros mediante la función objetivo de RMSE y el algoritmo de calibración SCE, ambos puntos analizados en la sección 2.2 del documento. Para llevar a cabo este procedimiento de calibración se utilizaron 10000 iteraciones.

En este estudio, se evaluaron diversas estructuras de modelación en tres cuencas, utilizando los índices de ajuste KGE y KGE\_log (que emplea datos transformados logarítmicamente), con el objetivo de identificar los modelos más cercanos al punto óptimo (1,1). Después de los procesos de calibración y validación, se calculó la distancia euclidiana entre cada estructura y el punto óptimo, generando un ranking con las 10 mejores combinaciones de estructuras para ambos periodos. Posteriormente, se filtraron las combinaciones seleccionadas, eligiendo las tres mejores por cuenca, tanto para el periodo de calibración como el de validación.

Para un uso adecuado del índice de ajuste KGE\_log, el promedio de los datos de escurrimiento debe estar fuera del rango de -0,5 a 0,5 (Santos, Thirel, & Perrin, 2018). Si el promedio cae dentro de este intervalo, el término  $\beta$  adquiere mayor peso que  $r$  y  $\alpha$  en la fórmula (Tabla 4-5), lo que reduce la relevancia del índice.

Tabla 4-5: Criterios de eficiencia definidos para la evaluación del modelo (obtenido y modificado de Muñoz (2019))

Criterio	Ecuación	Valor Óptimo
RMSE	$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} * \sum_{i=1}^N (S_i - O_i)^2}$	0
NSE	$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (S_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2}$	1
R <sup>2</sup>	$R^2 = \left( \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O}) * (S_i - \bar{S})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2 * \sum_{i=1}^N (S_i - \bar{S})^2}} \right)^2$	1
KGE	$KGE = 1 - \sqrt{(r - 1)^2 + (\alpha - 1)^2 + (\beta - 1)^2}$	1
KGE (log)	$KGE (log) = 1 - \sqrt{(r - 1)^2 + (\alpha - 1)^2 + (\beta - 1)^2}$	1

Donde:

- $S_i$ : Valor simulado para la variable en el tiempo  $t=t_i$ .
- $O_i$ : Valor observado para la variable en el tiempo  $t=t_i$ .
- $r$ : Correlación lineal entre las observaciones y las simulaciones.
- $\alpha$ : Razón entre la desviación estándar de las simulaciones y las observaciones.
- $\beta$ : Razón entre la media de las simulaciones y las observaciones.

Un punto importante que se analizará mediante las distintas estructuras escogidas por cada cuenca, tras haberse realizado la calibración mediante FUSE, corresponde al análisis de la partición de la

precipitación en escorrentía y evapotranspiración. Es por esto que se enfocará en los modelos utilizados en *Upper-layer* (“U”) y *Lower-layer* (“L”). Específicamente en los modelos SACRAMENTO y a ARNO/VIC-TOPMODEL.

Con respecto al modelo Sacramento, este se caracteriza por dividir el suelo en dos partes: una zona superior y otra inferior, cada una de las cuales tiene una capacidad de agua en tensión y de agua libre. La primera está ligada a las partículas del suelo, esta se agota únicamente mediante evapotranspiración. Se permite el drenaje tanto descendente como horizontal del agua libre. El agua que accede a una de las zonas es incorporada al almacenamiento de agua de adhesión, siempre y cuando no se rebase su capacidad, mientras que el exceso es incorporado al almacenamiento de agua libre. Para cada proceso de precipitación, una parte de esta es desviada inmediatamente al sistema de cauces en forma de escorrentía directa (Chávez Torres, 2016).

Al analizar el modelo ARNO/VIC-TOPMODEL, se constata que este define la capa superior con solo un valor de estado y considera que el terreno y la topografía tienen una influencia significativa en la generación de escorrentía (Beven, 1997), tomando en cuenta las variaciones espaciales de la infiltración y de la humedad del suelo (Xu, Lettenmaier, Wood, & Burges, 1994).

El análisis de estos modelos presentados permite comprender de mejor manera el comportamiento que se da tanto en las distintas cuencas como combinaciones de estructuras FUSE al momento de analizar la partición de la precipitación en escorrentía y evapotranspiración.

## 4.5. Índices de sequía y sus interpretaciones

Para el análisis de los datos de proyecciones futuras de precipitación y temperatura (periodo histórico y futuro), así como también la escorrentía modelada por la plataforma FUSE (periodo histórico y futuro), se utilizaron los siguientes índices con sus respectivas ecuaciones con las que se obtienen sus valores categorizados como se vio en la sección de Índices de sequías:

SPEI (índice estandarizado de precipitación y evapotranspiración): Para el cálculo de este índice se utilizó el paquete de R llamado SPEI, (<https://cran.r-project.org/web/packages/SPEI/index.html>), el cual trabaja con la distribución “*Log-logistic*” por defecto. Además, se debe indicar la escala temporal (en meses) en la que se quiere calcular el índice. En este caso, se utilizaron las escalas de 9 y 12 meses. Con respecto a la fórmula con la que se calcula este índice, se puede revisar el anexo A.2.

SPI (índice normalizado de precipitación): Para el cálculo de este índice se utilizó el paquete de R llamado SPEI (<https://cran.r-project.org/web/packages/SPEI/index.html>), el cual trabaja por defecto con la distribución *Gamma*. Además, se debe indicar la escala en meses en la que se quiere calcular el índice, en este caso, se utilizaron las escalas de 9 y 12 meses. Con respecto a la fórmula con la que se calcula este índice, se puede revisar el anexo A.2.

SSFI (Índice normalizado de los caudales fluviales): Para el cálculo de este índice se utilizó la ecuación ( 4-1 ) (Zalokar, Kobold, & Sraj, 2021). Las escalas de meses trabajadas con este índice son de 9 y 12 meses.

$$SSFI = \frac{V_i - \bar{V}}{\sigma_V} \quad (4-1)$$

Donde:

- $V_i$ : Volumen de caudal fluvial en el tiempo  $i$ .
- $\bar{V}$ : Media del flujo del caudal fluvial en el período de referencia.
- $\sigma_V$ : Desviación estándar del flujo de corriente en el periodo de referencia.

RAI (Índice de anomalía pluviométrica): Para el cálculo de este índice se usó la ecuación ( 4-2 ) y ( 4-3 ) (Van Roy, 1965), para las escalas temporales de 9 y 12 meses:

$$RAI = +3 * \frac{P - \bar{P}}{M - \bar{P}} \quad (4-2)$$

$$RAI = -3 * \frac{P - \bar{P}}{m - \bar{P}} \quad (4-3)$$

Donde:

- $P$ : Precipitación del año específico.
- $\bar{P}$ : Precipitación media de todos los registros para el periodo.
- $M$ : Media de los diez registros de precipitación más altos del periodo de estudio.
- $m$ : Media de los diez registros de precipitación más bajos del periodo de estudio.

Para la presentación de resultados, se enfocará en los índices SPEI y SSFI, que representan las sequías meteorológicas e hidrológicas, respectivamente. Primero se analizará el comportamiento de ambos índices en el periodo histórico utilizando datos observados. Además, para el SSFI, se presentarán las simulaciones históricas realizadas con las estructuras de FUSE seleccionadas calibradas para cada cuenca.

Cabe destacar que para el cálculo de los índices en periodos fuera del periodo histórico (1979-2014), se debe usar este periodo de referencia, pues si esto no se lleva a cabo de esta manera, los resultados de los índices a futuro tendrán comportamientos erráticos y fuera de lo esperado.

Siguiendo el enfoque de variabilidad interanual propuesto por Gateño (2022) en su metodología, se aplicará un filtro de GCM para las cuencas Collín en Codahue y Muco en Puente Muco, con el objetivo de presentar los resultados de un solo GCM. Este enfoque compara el coeficiente de variación del GCM en el periodo histórico con el de los datos observados históricos, y calcula la diferencia entre ambos. Si el valor resultante es positivo, indica sobreestimación; si es negativo, indica subestimación.

Además, se analizará la intensidad de los distintos tipos de sequías, tomando en cuenta tanto sus áreas como la duración de cada categoría. La intensidad se calculará utilizando la siguiente fórmula:

$$Intensidad \left[ \frac{1}{meses} \right] = \frac{\text{Área}}{\text{Duración [meses]}} \quad (4-4)$$

A modo gráfico, las variables presentadas en la ecuación (4-4) se presentan en la Figura 4-2. Un punto importante a tener en consideración de la figura es que lo presentado como magnitud, corresponde al área de la Ecuación (4-4):

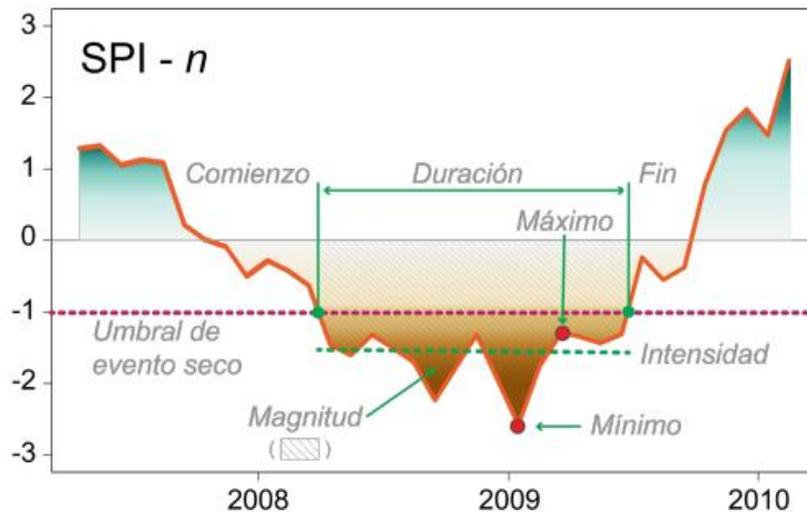


Figura 4-2: Esquema de un evento hipotético de sequía (Podestá, Skansi, Herrera, & Veiga, 2020).

Las variables de la Figura 4-2 se definen a continuación (Podestá, Skansi, Herrera, & Veiga, 2020):

- Duración: Periodo durante el cual el índice se encuentra por debajo del umbral seleccionado.
- Intensidad: Promedio de valores del índice durante el periodo en que el mismo está por debajo de umbral seleccionado.
- Magnitud/Área: Acumulación del déficit por debajo del umbral seleccionado durante el periodo de la sequía.

Para presentar los resultados de los índices de manera más clara y concisa, se realizó un filtro de los GCMs con el fin de seleccionar uno para mostrar sus resultados. Esta selección se basó en la variabilidad interanual, siguiendo la metodología propuesta por Gateño (2022). En esta metodología, se comparan los coeficientes de variación de las precipitaciones anuales entre los GCMs y los valores obtenidos a partir del producto observacional de CAMELS durante el periodo histórico.

# Capítulo 5: Resultados y discusión

## 5.1. Obtención y tratamiento de información

### 5.1.1. Escalamiento y corrección de datos

Se analizan las forzantes escaladas y corregidas de precipitación y evapotranspiración potencial, esta última basada en las temperaturas observadas y proyectadas. En la Figura 5-1 y Figura 5-2 se muestran las curvas de variación estacional de estas forzantes para cada periodo en la cuenca de Cautín en Cajón.

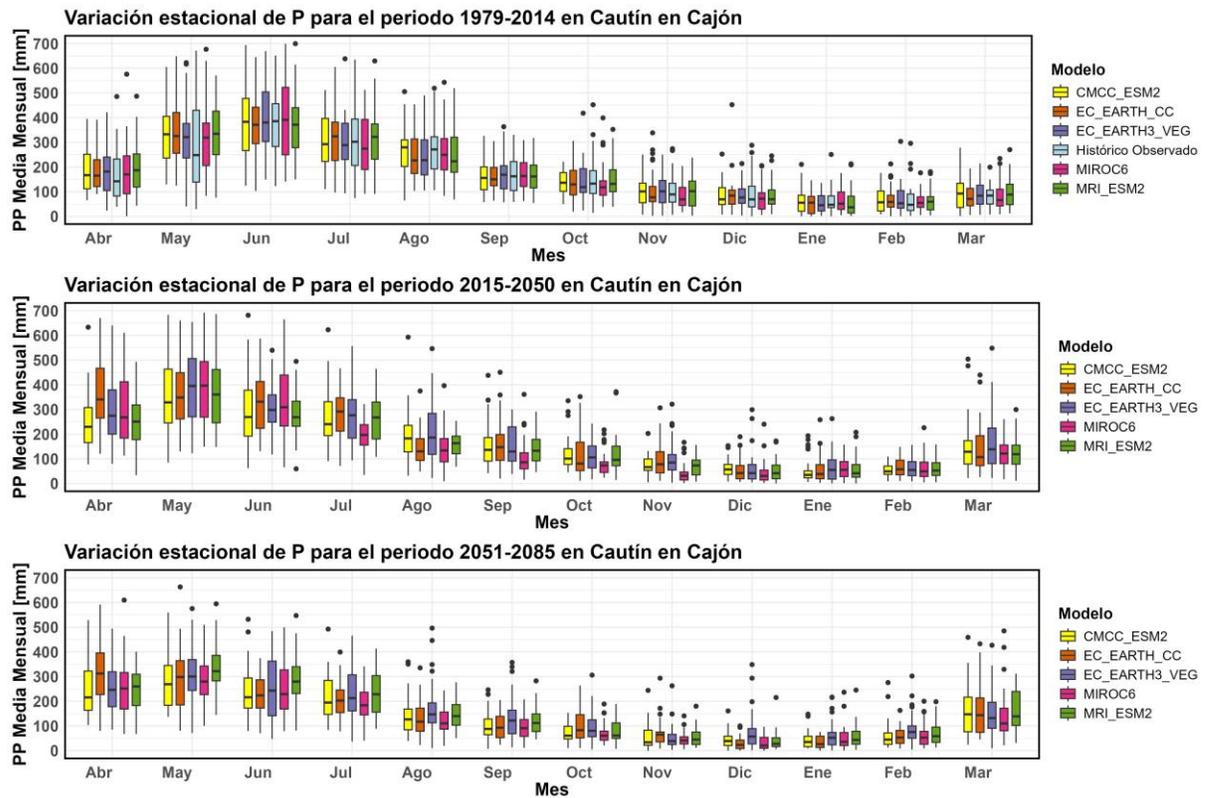


Figura 5-1: Curvas de Variación estacional de precipitación, periodos climatológicos desde 1979 hasta 2085. Cuenca: Cautín en Cajón.

Al comparar el periodo histórico con la ventana temporal de 2015-2050 (Figura 5-1), se observa una tendencia a la disminución de la precipitación, particularmente durante los meses de invierno (mayo a agosto). Por ejemplo, en junio, la precipitación media mensual cae de alrededor de 500 mm en el primer periodo a aproximadamente 400 mm en el segundo, lo que representa una reducción del 20%. La variabilidad también disminuye, con una menor dispersión en los valores de

precipitación, lo que indica que los eventos extremos de precipitación son menos frecuentes. Durante los meses de verano (diciembre a marzo), las precipitaciones se mantienen más estables, con valores medios de alrededor de 100-150 mm, mostrando poca diferencia entre ambos periodos.

Al comparar el periodo de 1979-2014 con la ventana temporal de 2051-2085 (Figura 5-1), la disminución de las precipitaciones se acentúa aún más. En junio, la precipitación media mensual desciende a aproximadamente 300 mm, lo que implica una reducción de 40% en comparación con el primer periodo. Asimismo, en julio, la precipitación cae de 400 mm a cerca de 250 mm, mostrando una disminución. En contraste, los meses de verano (diciembre a marzo) muestran una menor reducción, con valores que oscilan entre 100 y 150 mm, similares a los del periodo histórico. Para analizar el comportamiento de las curvas de variación estacional de la precipitación, se debe revisar la Figura B-1 y Figura B-2, para las cuencas de Collín en Codahue y Muco en Puente Muco respectivamente.

En las Figura 5-2 se presentan las curvas de variación estacional correspondientes a la evapotranspiración potencial para cada ventana temporal en la cuenca de Cautín en Cajón:

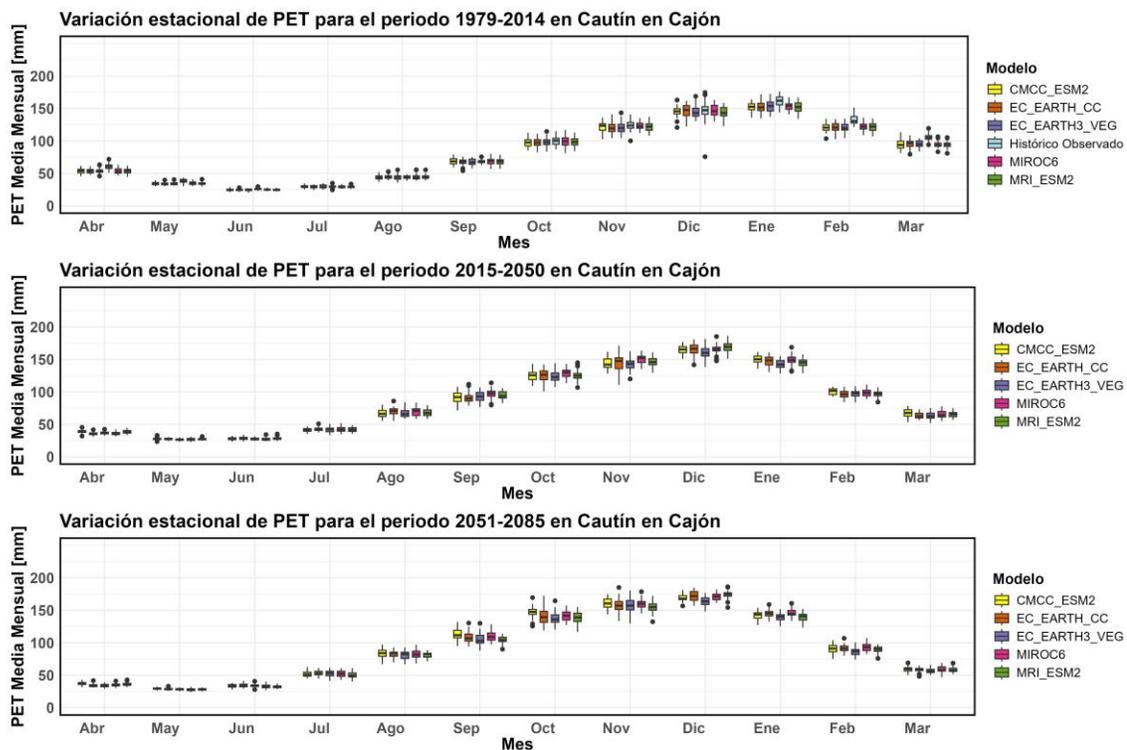


Figura 5-2: Curvas de Variación estacional de evapotranspiración potencial, periodos desde 1979 hasta 2085. Cuenca: Cautín en Cajón.

Al comparar el periodo histórico con la ventana temporal de 2015-2050, se observa un aumento gradual en los valores de PET durante los meses de agosto a marzo en el periodo 2015-2050 en comparación con 1979-2014. Por ejemplo, en diciembre, los valores de PET suben de aproximadamente 130 mm en el primer periodo a alrededor de 150 mm en el segundo, lo que representa un aumento cercano al 15%. En los meses de verano, como enero, la PET aumenta de 160 mm a 180

mm. Los meses de invierno, como junio y julio, permanecen casi sin cambios, con valores de PET cercanos a 0-50 mm en ambos periodos, lo que indica que el aumento de la evaporación se concentra en los meses cálidos.

Comparando el periodo histórico con el periodo de 2051-2085, se evidencia un incremento más marcado de la PET en los meses cálidos. En enero, la PET media mensual sube de 160 mm en 1979-2014 a cerca de 200 mm en 2051-2085, lo que equivale a un aumento del 25%. Los meses de septiembre a marzo experimentan una tendencia similar, con incrementos significativos, especialmente en diciembre, donde los valores pasan de 130 mm a 190 mm. En cambio, los meses invernales continúan sin mostrar variaciones importantes, manteniendo valores bajos, similares a los observados en los periodos previos. Para analizar el comportamiento de las curvas de variación estacional de la evapotranspiración potencial, se debe revisar la Figura B-3 y Figura B-4, para las cuencas de Collín en Codahue y Muco en Puente Muco respectivamente.

A continuación, en las Tabla 5-1 y Tabla 5-2 se presentan los promedios de diversas forzantes para cada uno de los cinco modelos GCM, así como los datos obtenidos desde CAMELS para la cuenca de Cautín en Cajón. Adicionalmente, se muestra la variación entre los valores observados en la estación y los simulados por cada modelo sin corrección de sesgo.

*Tabla 5-1: Promedios climatológicos de forzantes para cada GCM. Cuenca: Cautín en Cajón.*

<b>Promedios Cautín en Cajón (1979-2014)</b>	<b>P [mm/d]</b>	<b>Tmean [°C]</b>	<b>Tmin [°C]</b>	<b>Tmax [°C]</b>
<b>MRI_ESM2</b>	6,59	9,20	5,36	13,04
<b>MIROC6</b>	4,71	12,63	8,49	16,76
<b>EC_EARTH3_VEG</b>	4,38	10,98	5,80	16,16
<b>EC_EARTH_CC</b>	4,36	11,23	5,47	16,99
<b>CMCC_ESM2</b>	2,87	10,84	4,97	16,70
<b>CR2 Cautín en Cajón</b>	5,97	9,76	3,66	15,87

*Tabla 5-2: Variación porcentual de forzantes para modelos y estación Cautín en Cajón.*

<b>GCM</b>	<b>Variación (1979-2014) - Cautín en Cajón</b>			
	<b>P [mm/d]</b>	<b>Tmean [°C]</b>	<b>Tmin [°C]</b>	<b>Tmax [°C]</b>
<b>MRI_ESM2</b>	10%	-0,56	1,7	-2,83
<b>MIROC6</b>	-21%	2,87	4,83	0,89
<b>EC_EARTH3_VEG</b>	-27%	1,22	2,14	0,29
<b>EC_EARTH_CC</b>	-27%	1,47	1,81	1,12
<b>CMCC_ESM2</b>	-52%	1,08	1,31	0,83

La Tabla 5-1 y Tabla 5-2 muestran diferencias entre los modelos climáticos (datos escalados, no corregidos) y la estación Cautín en Cajón para el periodo 1979-2014. En cuanto a la precipitación, la estación presenta 5,97 mm/d, mientras que los modelos varían desde 2,87 mm/d (CMCC-ESM2) hasta 6,59 mm/d (MRI-ESM2), con variaciones porcentuales que reflejan una tendencia a la baja, excepto para MRI\_ESM2, que muestra un aumento del 10%. En términos de temperatura media,

los modelos en su mayoría proyectan valores mayores que los observados (9,76 °C en la estación), a excepción de MRI\_ESM2 que presenta una disminución de -0,56 °C en comparación.

Las temperaturas mínimas muestran incrementos, especialmente en MIROC6 (4,83 °C). Las temperaturas máximas son más consistentes entre los modelos y la estación, con variaciones porcentuales menores, excepto para MRI\_ESM2, que muestra una reducción de -2,83 °C. Esto resalta la incertidumbre en la proyección de precipitación y las temperaturas con los datos no corregidos. Con estos datos y variaciones presentadas se busca mostrar la incertidumbre de los datos de los GCMs crudos.

A modo de verificar que la corrección de sesgo funciona de manera correcta, revisar Tabla B-2 y Tabla B-3 en donde se presentan los promedios y variaciones de las temperatura y precipitación tras la utilización del método MBCn.

### 5.1.2. Estrategia de calibración mediante FUSE

En este estudio se evaluaron diversas estructuras de modelación para tres cuencas mediante el uso de los índices de ajuste KGE y KGE\_log, con el objetivo de determinar qué modelos se acercan más al óptimo. Para cada cuenca, se calculó la distancia euclidiana entre las estructuras y el punto óptimo (1,1), destacando las mejores tres estructuras de calibración y validación.

En las Figura 5-3, Figura 5-4 y Figura 5-5 se muestran los gráficos para los periodos de calibración y validación para las 20 estructuras mencionadas en la Tabla 4-2, las cuales se representan mediante puntos de distintos colores y formas, en donde cada uno representa una de las estructuras. Cabe destacar que dicha calibración y validación, se realizó con datos observados de las cuencas en estudio:

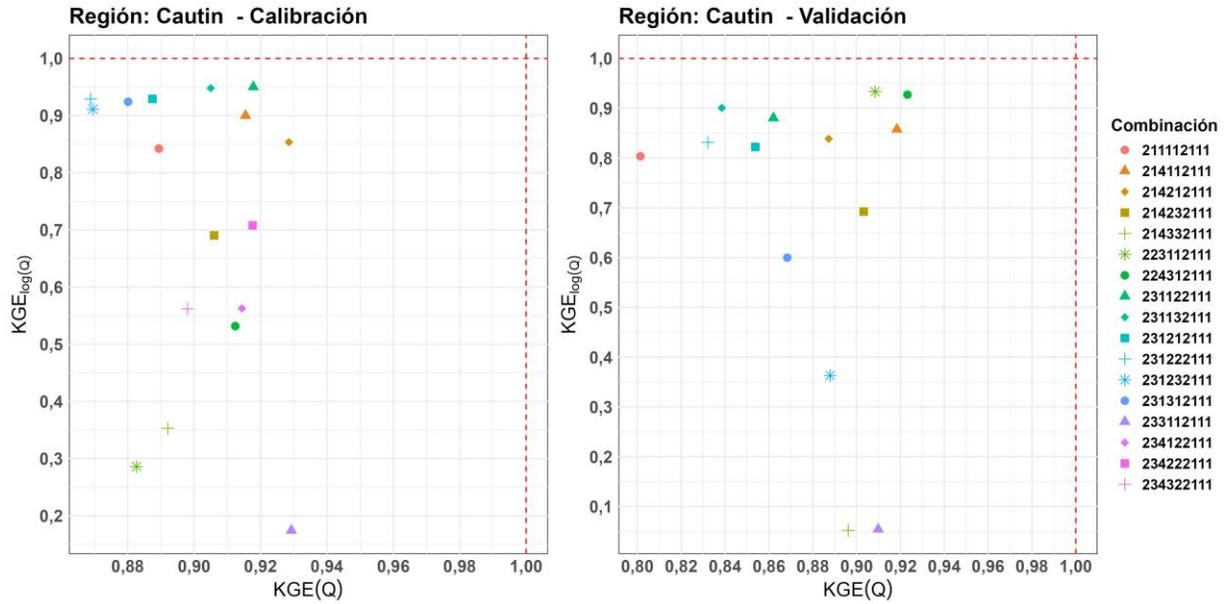


Figura 5-3: Combinación de métrica  $KGE(Q)$  con  $KGE_{log}(Q)$  de las distintas estructuras FUSE con respecto al óptimo (1,1) para la cuenca de Cautín en Cajón.

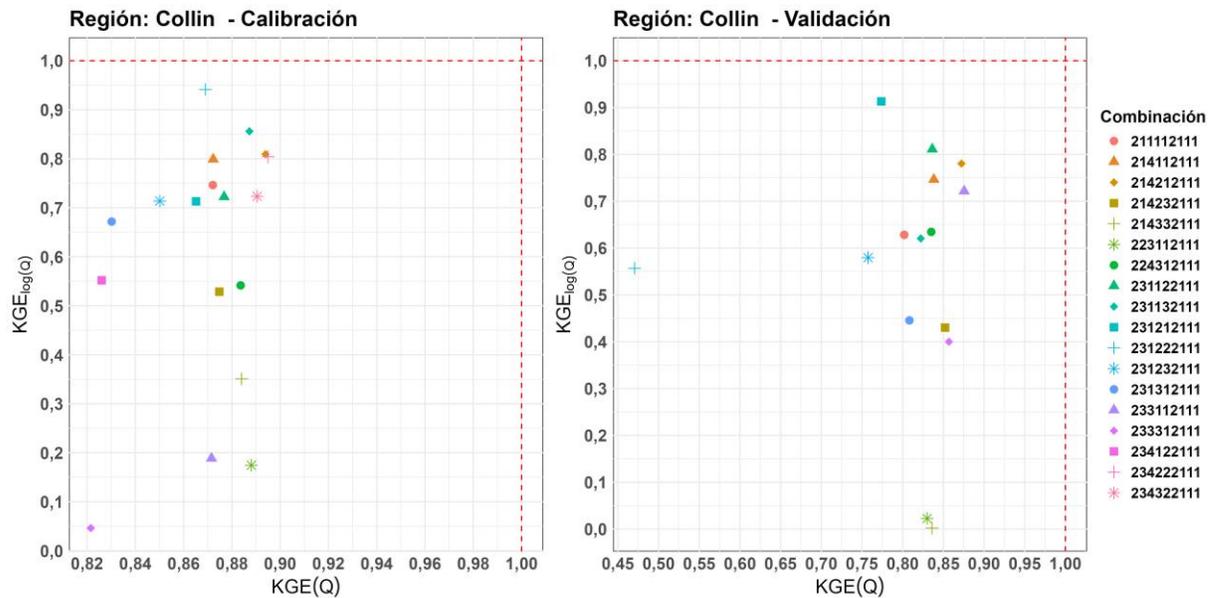


Figura 5-4: Combinación de métrica  $KGE(Q)$  con  $KGE_{log}(Q)$  de las distintas estructuras FUSE con respecto al óptimo (1,1) para la cuenca de Collín en Codahue.

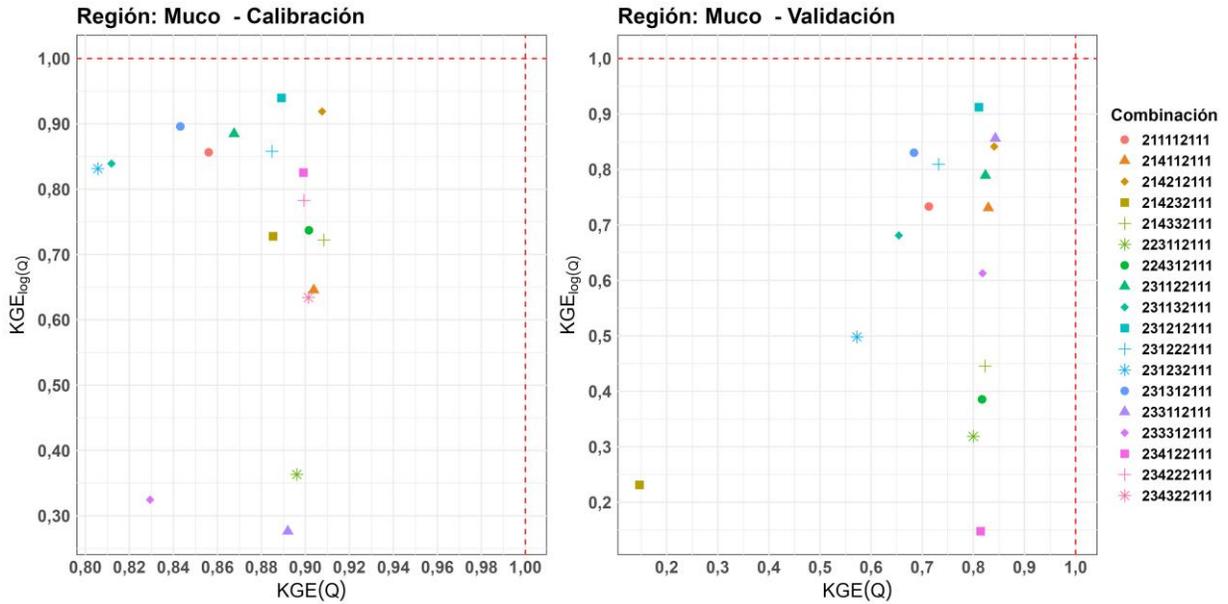


Figura 5-5: Combinación de métrica KGE (Q) con KGE\_log(Q) de las distintas estructuras FUSE con respecto al óptimo (1,1) para la cuenca de Muco en puente Muco.

Acorde a los puntos y símbolos de la Figura 5-3, Figura 5-4 y Figura 5-5, los cuales representan a las combinaciones de estructuras, se calculó la distancia Euclidiana de cada uno con respecto al punto (1,1), el cual representa el óptimo de los índices de ajuste KGE y KGE [log(Q)]. Pasando los datos de escorrentía observados por cuenca a logaritmo y calculando los promedios de estos, se obtuvo que el promedio más bajo corresponde a Muco con un valor de 0,65 mm/d, lo que se encuentra fuera del intervalo -0,5 y 0,5. Para ver las distancias de las otras cuencas de este estudio, revisar el ANEXO XXX. Las distancias Euclidianas se presentan en la Tabla 5-3 en donde se muestra el orden jerárquico de las estructuras por cada una de las cuencas en estudio, para las etapas de calibración y validación.

Tabla 5-3: Distancias Euclidianas de las 10 mejores combinaciones de estructuras FUSE al óptimo (1,1), para la etapa de calibración y validación.

Cuenca	Etap	Estructura	Distancia	Etap	Estructura	Distancia
Cautín	Calibración	231122111	0,10	Validación	231132111	0,11
		231112111	0,10		231122111	0,11
		211132111	0,10		231112111	0,14
		231132111	0,11		214112111	0,16
		214112111	0,13		231212111	0,18
		231212111	0,13		231222111	0,19
		231312111	0,14		214212111	0,20
		231222111	0,15		211132111	0,20
		231232111	0,16		231232111	0,23
		214212111	0,16		231312111	0,24

Cuenca	Etapa	Estructura	Distancia	Etapa	Estructura	Distancia
Collín	Calibración	211132111	0,12	Validación	211132111	0,17
		231222111	0,14		231222111	0,24
		231132111	0,18		231132111	0,25
		214212111	0,22		214212111	0,25
		234222111	0,22		214112111	0,30
		214112111	0,24		234222111	0,30
		211112111	0,28		231112111	0,40
		234322111	0,30		231122111	0,40
		231112111	0,30		231212111	0,42
		231122111	0,30		211112111	0,42
Muco	Calibración	214212111	0,12	Validación	231212111	0,21
		231212111	0,13		234122111	0,21
		231122111	0,18		214212111	0,22
		231222111	0,18		231122111	0,27
		231112111	0,19		231112111	0,31
		231312111	0,19		214112111	0,32
		234122111	0,20		231222111	0,33
		211112111	0,20		231312111	0,36
		234222111	0,24		211112111	0,39
		231132111	0,25		234222111	0,43

Finalmente, las estructuras utilizadas por cada cuenca se presentan en la Tabla 5-4. Se escogieron las tres primeras de cada cuenca con respecto a la minimización de la distancia con respecto al óptimo para el periodo de calibración. Se comprobó para el periodo de validación que la distancia al óptimo siguiera siendo baja, es decir, que se encontrase dentro de las 10 primeras posiciones:

*Tabla 5-4: Estructuras de FUSE a utilizar por cada cuenca.*

Cautín en Cajón	Collín en Codahue	Muco en Puente Muco
231122111	211132111	214212111
231112111	231222111	231212111
211132111	231132111	231122111

Las estructuras presentadas en la Tabla 5-4 serán utilizadas en este estudio para modelar la escorrenría y calcular el índice SSFI. Dado que la cuenca de Cautín en Cajón es la más grande en términos de extensión y abarca las otras dos cuencas, se ha decidido exponer los resultados correspondientes a las estructuras 231122111 (presente en Cautín y Muco) y 211132111 (presente en Cautín y Collín).

### 5.1.3. Simulación de escorrentía mediante FUSE

La Figura 5-6 presenta la escorrentía simulada mediante FUSE, generando curvas de variación estacional por cada combinación de estructuras escogida (Tabla 5-4), con los datos calibrados para el periodo histórico y comparándolo con los datos observados en cada estación.

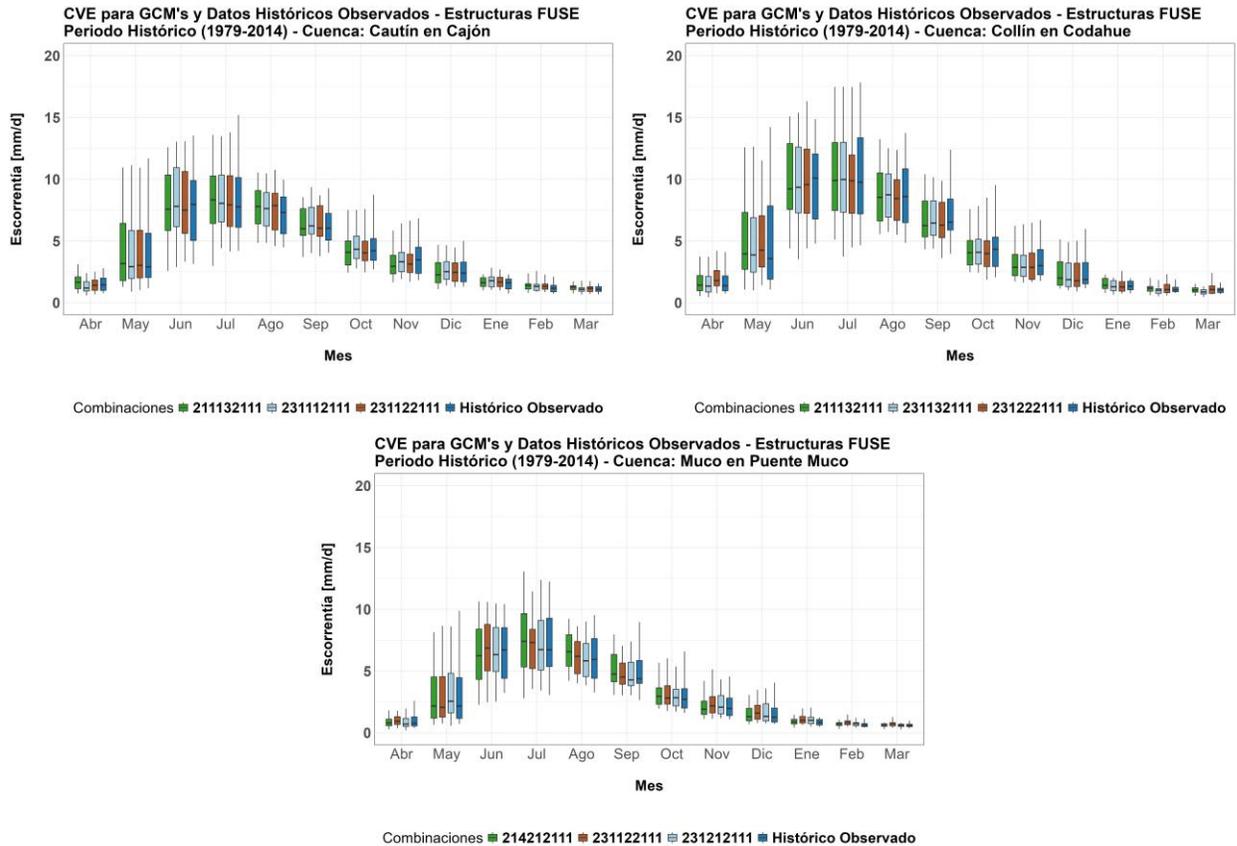


Figura 5-6: Escorrentía simulada en el periodo histórico (1979-2014), con estructuras FUSE seleccionadas calibradas con datos observados como input.

La Figura 5-6 presenta tres gráficos comparativos de curvas de variación estacional para las cuencas analizadas en este estudio, basados tanto en datos históricos observados como en simulaciones realizadas con estructuras FUSE calibradas. Los gráficos siguen un patrón similar, con los mayores valores de escorrentía concentrados en los meses de invierno (junio a agosto), alcanzando picos de aproximadamente 15 mm/día en la cuenca de Collín y cercanos a 10 mm/día en las cuencas de Cautín y Muco. Durante los meses de verano (diciembre a marzo), se observa una disminución, con escorrentía que oscila entre 0 y 5 mm/día. A pesar de algunas diferencias entre los datos observados y simulados, todos los conjuntos de datos muestran un patrón estacional coherente, independientemente de la combinación de estructuras utilizada.

Siguiendo con las simulaciones de escorrentía mediante FUSE, se muestra en las Figura 5-7, Figura 5-8 y Figura 5-9 qué fracción de las precipitaciones pasa a ser escorrentía y cuanto de esta se evapotranspirará las principales estructuras por cuenca.

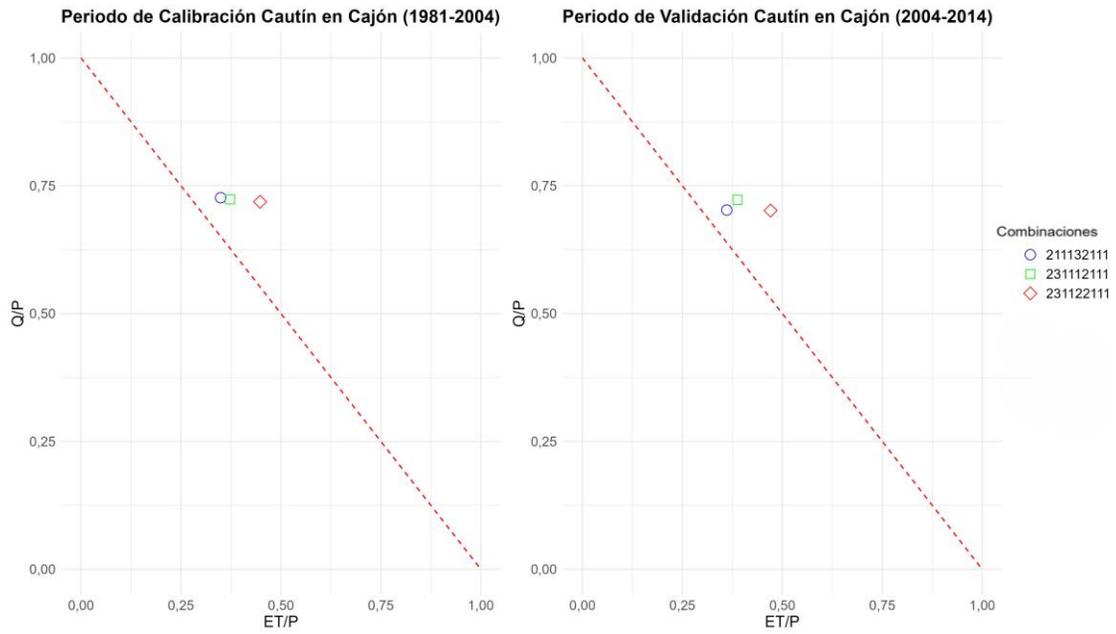


Figura 5-7: Partición de la precipitación en escorrentía y evapotranspiración para las mejores estructuras de FUSE en Cautín en Cajón, durante el periodo de Calibración y Validación.

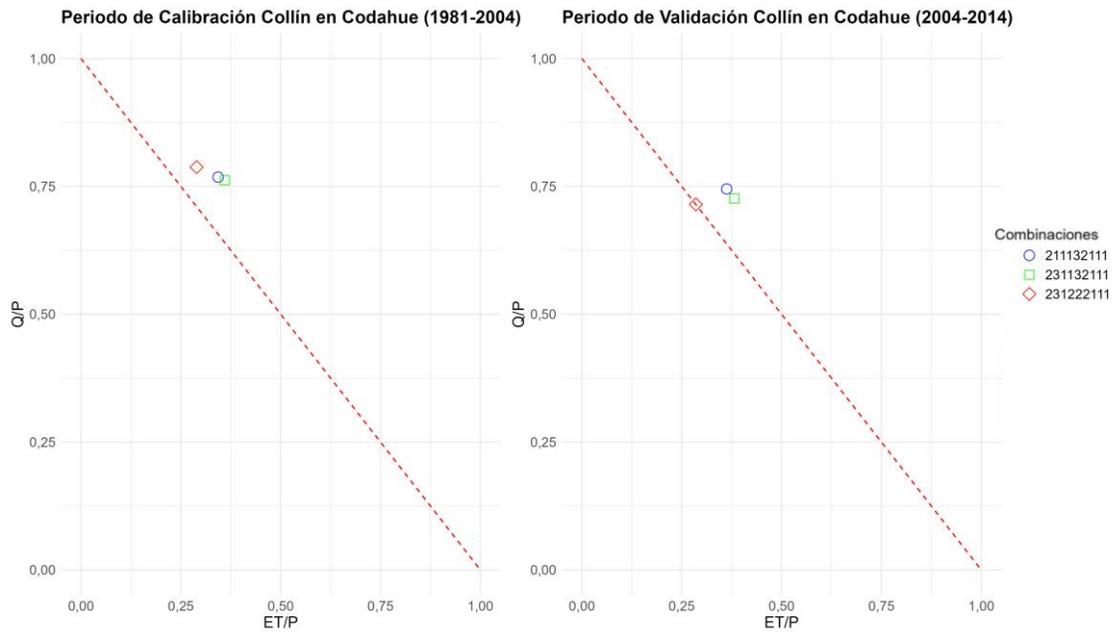


Figura 5-8: Partición de la precipitación en escorrentía y evapotranspiración para las mejores estructuras de FUSE en Collín en Codahue, durante el periodo de Calibración y Validación.

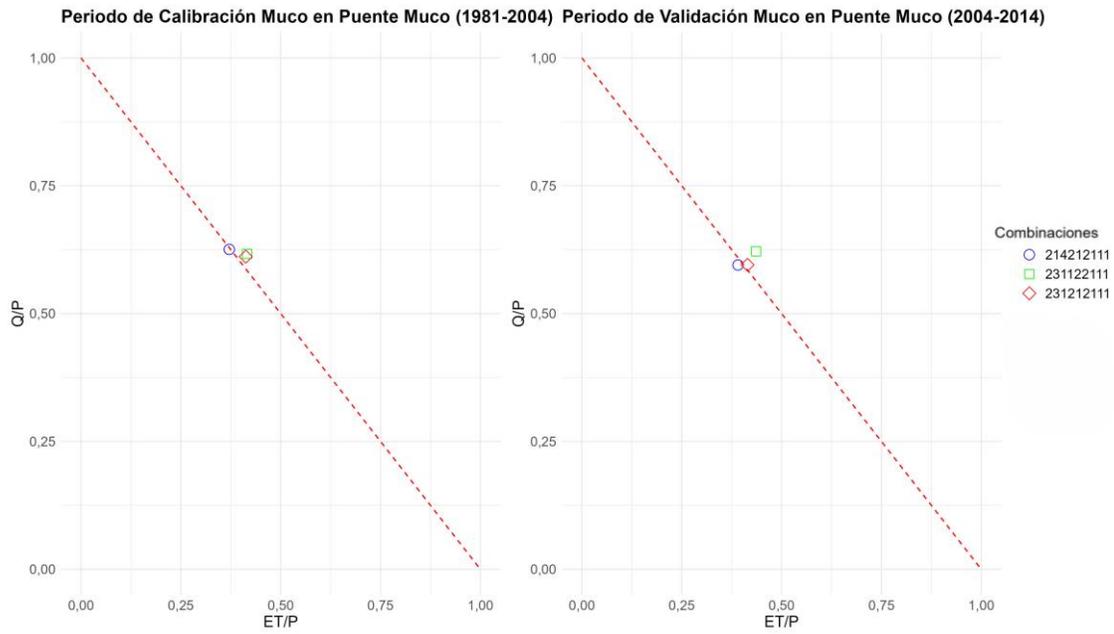


Figura 5-9: Partición de la precipitación en escorrentía y evapotranspiración para las mejores estructuras de FUSE en Muco en Puente Muco, durante el periodo de Calibración y Validación.

En los gráficos presentados en las Figura 5-7, Figura 5-8 y Figura 5-9, se observa comúnmente la relación entre  $Q/P$  en el eje Y y  $ET/P$  en el eje X, lo que permite evaluar la distribución del agua disponible ( $P$ ) entre la escorrentía que sale del sistema y la evapotranspiración ( $ET$ ). Estos gráficos muestran diversas combinaciones de estructuras para el período de 1979 a 2014, facilitando la comparación del impacto de cada una en el balance hídrico de la cuenca hidrográfica. Sin embargo, es crucial tener en cuenta que la ecuación simplificada representada por la línea roja diagonal no considera la variación en el almacenamiento del sistema ( $dS/dt$ ), lo que sugiere que el sistema podría no estar en equilibrio en todos los casos y que el almacenamiento de agua puede ser un factor clave para compensar las diferencias entre la precipitación, la escorrentía y la evapotranspiración.

La línea roja diagonal que se ve en los gráficos representa una condición ideal en la que toda la precipitación se convierte en escorrentía y evapotranspiración, es decir:

$$\frac{Q}{P} + \frac{ET}{P} = 1 \quad (5-1)$$

Si un punto se desplaza por debajo de la diagonal, significa un aumento en el almacenamiento, mientras que un desplazamiento por encima de la diagonal sugiere una disminución en el almacenamiento del sistema.

En la Figura 5-7, Figura 5-8 y Figura 5-9, la mayoría de los puntos se sitúan por encima de la diagonal roja, lo que sugiere mayor escorrentía o evapotranspiración, según el caso, o indica que las cuencas están en desequilibrio y perdiendo almacenamiento. En contraste, los puntos sobre la

línea diagonal muestran que la precipitación se distribuye completamente entre la escorrentía y la evapotranspiración.

Otro punto que respalda el comportamiento de los puntos en la Figura 5-7, Figura 5-8 y Figura 5-9, son las estructuras que se escogieron para la representación de resultados (compartidas por Cautín con Collín y Cautín con Muco, explicitadas en la sección 5.1.2), dichas estructuras se presentan en la Tabla 5-5:

*Tabla 5-5: Estructuras presentadas en la Figura 5-7.*

1ra Estr.	2	1	1	1	3	2	1	1	1
	-	“U”	“L”	“SR”	“PE”	-	-	-	-
2da Estr.	2	3	1	1	2	2	1	1	1

Una vez calibradas las combinaciones de estructuras, se obtuvieron diversos valores de parámetros que permiten comprender mejor el comportamiento mostrado en la Figura 5-7, Figura 5-8 y Figura 5-9, cuyos valores se presentan en la Tabla B-4. Al analizar esta tabla y los resultados de la calibración de MAX-WATR\_1, MAX-WATR\_2 y PER-CRTE, se pueden extraer conclusiones que ayudan a entender el comportamiento de las cuencas en relación con lo observado en dichas figuras.

- En la cuenca de Cautín en Cajón, con la estructura 211132111, los valores de MAX-WATR\_2 que representan la capacidad máxima de almacenamiento de agua en la segunda capa del suelo, son notablemente más altos en comparación con Collín en Codahue, utilizando la misma estructura. Esto sugiere que el suelo en Cautín posee una mayor capacidad de retención en las capas más profundas. Por el contrario, en Collín en Codahue, los valores más bajos de MAX-WATR\_2 indican una menor capacidad de almacenamiento de agua en la segunda capa del suelo.
- Los parámetros SACPMLT y SACPEXP muestran valores similares tanto para Cautín como para Collín con la estructura 211132111. SACPMLT refleja la tasa a la que la nieve se derrite y se libera, mientras que SACPEXP controla la relación entre la cantidad de agua almacenada y el flujo de agua en el suelo. La similitud entre estos parámetros en ambos escenarios sugiere una consistencia en la forma en que el suelo almacena y libera el agua en la superficie. Por otro lado, MAX-WATR\_1, que es la capacidad de almacenamiento en la primera capa del suelo, es mayor en Cautín en Cajón que en Collín en Codahue, lo que podría señalar diferencias en la capacidad de retención de agua en las capas superficiales.
- En la estructura 231122111 para Cautín en Cajón, se destaca un valor elevado de FPRIMQB, el cual representa el flujo base primario, o la cantidad de agua subterránea que aporta a la escorrentía. Un valor elevado sugiere una mayor contribución de agua subterránea a la escorrentía en este periodo de calibración. Además, el parámetro IFLWRTE, que define el tiempo de retardo en la respuesta del flujo de agua desde la entrada hasta la salida del sistema, se mantiene constante en 500 mm/d en todos los escenarios, indicando que este aspecto no varía significativamente.

- Por último, en Muco en Puente Muco, se observa un valor extremadamente alto de PER-CRTE, que es la tasa de percolación del agua hacia las capas más profundas del suelo. Un valor alto indica que el agua se percola rápidamente en el suelo profundo de una capa a otra, en contraste con los otros escenarios donde la percolación ocurre de manera más lenta y controlada. Este comportamiento sugiere que el suelo en Muco tiene una mayor capacidad de conducir agua hacia las capas profundas.

Tomando como ejemplo a la estructura 231222111 en la cuenca de Collín en Codahue, esta se acopla de manera perfecta a la línea roja punteada en el periodo de validación, es decir toda la precipitación se transforma en evapotranspiración y escorrentía. Visto de otro modo, analizando los parámetros calibrados de esta estructura, se puede ver como estos afectan al comportamiento de los puntos en los gráficos, relacionándolo con los almacenamientos de las capas. En la Tabla 5-6 se presentan los valores de los parámetros obtenidos en la calibración de la estructura, en particular de lleva a cabo un análisis de MAX-WATR\_1, MAX-WATR\_2 y PER-CRTE:

*Tabla 5-6: Valores de parámetros para la estructura 231222111 en Collín en Codahue, tras su calibración y validación.*

<b>Valores de Parámetros</b>									
<b>Estructura - Collín en Codahue - Periodo de Calibración y Validación - 231222111</b>									
RFERR_MLT	MAX-WATR_1	MAX-WATR_2	FRAC-TEN	FRCH_ZNE	FPRIM_QB	RTFR_AC1	PER-CRTE	PER-CEXP	SACPM_LT
1,00	315,62	2908,75	0,93	0,50	0,46	0,59	609,16	6,17	10,00
SACPE_XP	PER-CFRAC	FRA-CLOWZ	IFLWRT_E	BA-SERT_E	QB_P_OWR	QB_P_RMS	QBRAT_E_2A	QBRAT_E_2B	SAREA_MAX
5,000	0,560	0,500	500,000	50,000	5,000	0,010	0,009	0,059	0,131
AXV_B_EXP	LO-GLAMB	TISHAPE	TIME-DELAY	MBAS_E	MFMA_X	MFMI_N	PXTEMP	OPG	LAPSE
0,30	7,50	3,00	1,98	0,61	5,27	3,43	1,26	1,92	-5,44

De los valores expuestos en la Tabla 5-6, se puede comentar que:

- El valor de MAXWATR\_2, que representa la capacidad máxima de almacenamiento en la segunda capa del suelo, es de 2908,75 mm, lo que indica una gran capacidad de retención de agua en las capas más profundas del suelo. Este valor es considerablemente alto, sugiriendo que el subsuelo en Collín en Codahue tiene un mayor potencial de almacenamiento hídrico en profundidad. En cuanto a MAXWATR\_1, que mide la capacidad de almacenamiento en la primera capa del suelo, el valor es de 315,62 mm, más bajo que en la segunda capa, lo que implica una menor capacidad de retención en las capas superficiales.
- El parámetro PERCRTE, que mide la tasa de percolación, tiene un valor alto de 609,16 mm/d, lo que indica que el agua se infiltra rápidamente. Esto, en combinación con el alto

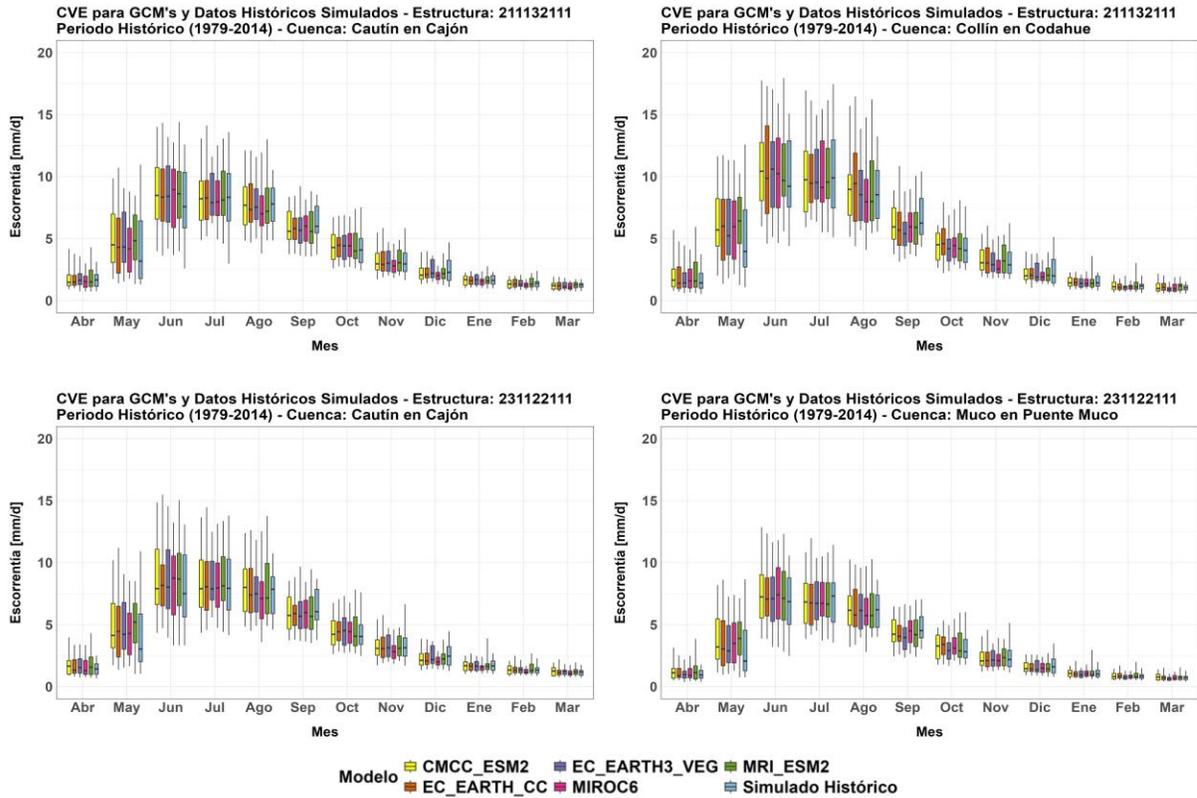
valor de MAXWATR\_2, sugiere que el suelo en Collín en Codahue es altamente permeable, permitiendo que el agua se mueva con facilidad hacia el subsuelo.

Otro punto a tener en consideración en aras de comprender de mejor manera el comportamiento las cuencas con respecto al balance hídrico, es la variación temporal de los almacenamientos de agua libre y en tensión, es decir, el agua que se mueve por gravedad y aquella que se encuentra en contacto con las fuerzas capilares respectivamente (Rasoulzadeh, Bezaatpour, Azizi Mobaser, & Fernández-Gálvez, 2024). Por este motivo se exponen gráficos en el Anexo B.3, que muestran las variaciones en estos almacenamientos en las etapas de calibración y validación para las tres mejores estructuras en cada cuenca.

Con respecto al párrafo anterior y analizando lo correspondiente a los almacenamientos, se puede apreciar como en aquellas estructuras en donde el almacenamiento conocido como tens\_2 disminuye en el periodo de validación en comparación al de calibración, la estructura tiende a mantener el balance.

Adicionalmente, en el Anexo B.3, se presentan los gráficos que muestran el comportamiento de las estructuras en las distintas ventanas temporales escogidas que abarcan desde 1979 a 2085 para los cinco modelos de circulación globales escogidos; dichos comportamientos se explican por las mismas razones presentadas en los párrafos anteriores, es decir, están influenciadas por los almacenamientos.

Una vez calibrado las estructuras y escogidos las mejores en el periodo de calibración, se hizo uso de las estructuras compartidas entre cuencas para modelar escorrentía en el periodo histórico (1979-2014) para cada una de las cuencas, esto se presenta en la Figura 5-10. Se hizo utilización de los datos históricos de los GCMs para las simulaciones y se comparó con los datos observados en cada cuenca de estudio.



*Figura 5-10: Escorrentía simulada en el periodo histórico (1979-2014) a base de las forzantes de los GCMs seleccionados, usando estructuras compartidas en cuenca Cautín en Cajón y cuencas anidadas Collín en Codahue y Muco en puente Muco.*

El comportamiento de la escorrentía muestra los valores más altos entre mayo y agosto, mientras que los valores más bajos se registran durante los meses entre diciembre y marzo. Esta tendencia coincide con el análisis de las curvas de variación estacional de las precipitaciones, donde se observa que los máximos de precipitación ocurren entre mayo y agosto.

Una vez analizado el periodo histórico con respecto a la escorrentía, se procede a analizar las curvas de variación estacional de escorrentía para el periodo entre 2015-2050 y 2051-2085 para cada una de las cuencas. Comparando por estructuras de FUSE compartidas en los distintos periodos. Lo anterior se presenta en la Figura 5-11 y Figura 5-12.

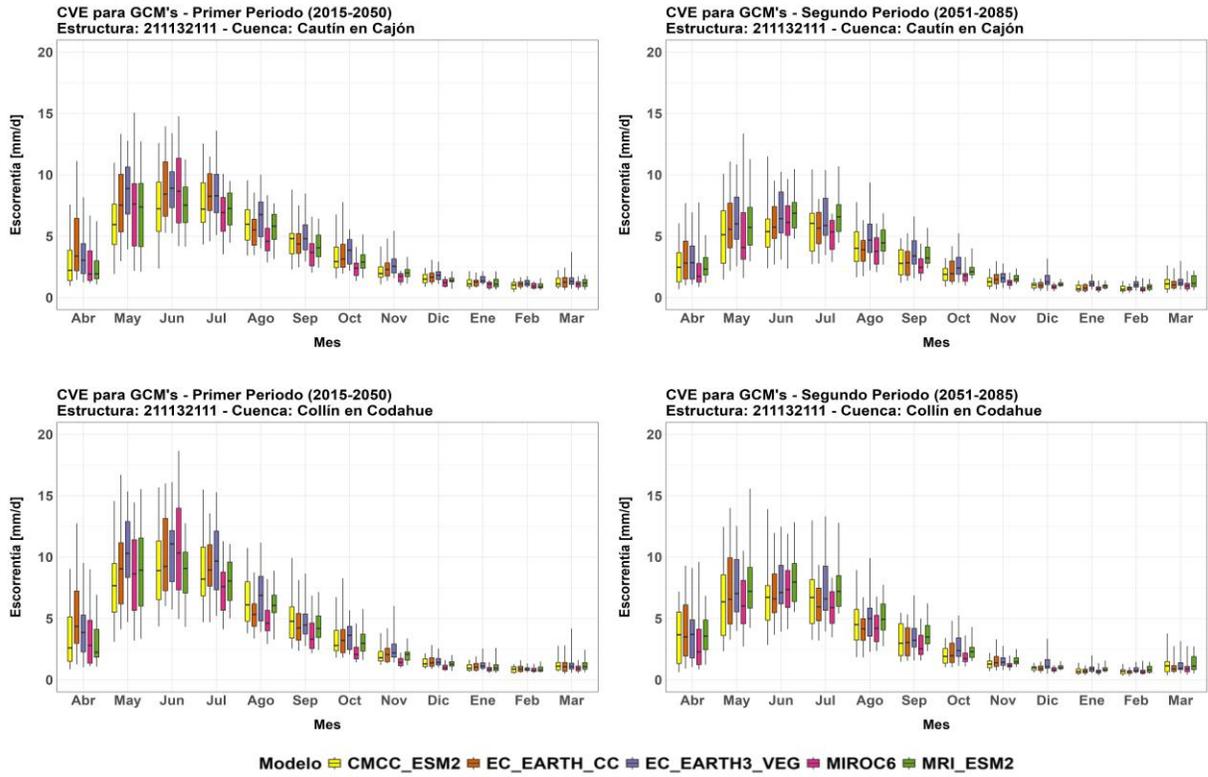


Figura 5-11: Curva de variación estacional para escorrentía, durante el primer (2015-2050) y segundo periodo (2051-2085), por cada par de estructuras compartidas para Collín en Codahue y Cautín en Cajón.

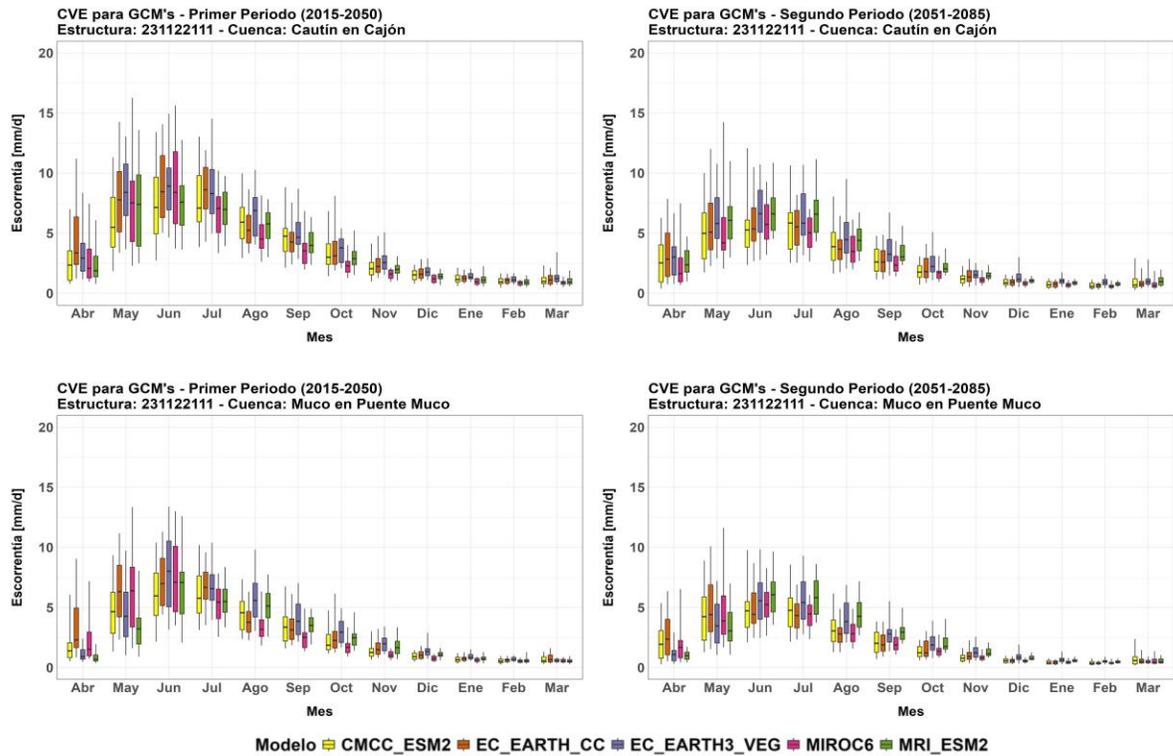


Figura 5-12: Curva de variación estacional para escorrentía, durante el primer (2015-2050) y segundo periodo (2051-2085), por cada par de estructuras compartidas para Muco en Puente Muco y Cautín en Cajón.

Las curvas presentadas en la Figura 5-11 y Figura 5-12, muestran el comportamiento dispar entre los distintos GCMs a la hora de proyectar la escorrentía mediante FUSE con las estructuras elegidas anteriormente.

En la Figura 5-11, se observa que la estacionalidad de la escorrentía se mantiene en ambas proyecciones, con *peaks* marcados durante los meses invernales (mayo a septiembre). Sin embargo, se evidencia una disminución en la magnitud de la escorrentía en el segundo periodo (2051-2085), particularmente en los meses de invierno, lo que sugiere una reducción en la disponibilidad de agua en estas estaciones.

En la Figura 5-12, la dinámica es muy similar. En el primer periodo (2015-2050), se observan altos niveles de escorrentía durante los meses invernales. Durante el segundo periodo (2051-2085), la escorrentía invernal se ve reducida. Esto sugiere que las cuencas podrían experimentar un cambio significativo en la disponibilidad de agua en los próximos años.

De forma complementaria al análisis visual que permiten las curvas de variación estacional, la Tabla 5-7 y Tabla 5-8, presentan las variaciones porcentuales de las medianas de cada boxplot por GCM, asociadas a las estructuras 211132111 y 231122111, para la cuenca de Cautín en Cajón.

Tabla 5-7: Variación porcentual de escorrentía con respecto al periodo histórico de los GCMs, estructura 211132111, Cautín en Cajón.

Primer Periodo (2015-2050) - 211132111 - Cautín en Cajón						Segundo Periodo (2051-2085) - 211132111- Cautín en Cajón				
Mes	CMCC_ ESM2	EC_EAR TH_CC	EC_EART H3_VEG	MI-ROC 6	MRI_ ESM2	CMCC_ ESM2	EC_EAR TH_CC	EC_EART H3_VEG	MI-ROC 6	MRI_ ESM2
04	51%	129%	86%	26%	29%	68%	90%	74%	13%	55%
05	32%	75%	107%	83%	53%	14%	29%	39%	-2%	18%
06	-15%	1%	6%	-3%	-13%	-37%	-31%	-24%	-31%	-20%
07	-12%	0%	5%	-13%	-10%	-26%	-32%	-26%	-33%	-19%
08	-22%	-25%	-10%	-35%	-19%	-48%	-47%	-38%	-46%	-38%
09	-14%	-25%	-15%	-39%	-27%	-50%	-51%	-40%	-59%	-42%
10	-31%	-30%	-13%	-46%	-28%	-56%	-56%	-46%	-59%	-47%
11	-34%	-21%	-15%	-38%	-34%	-57%	-49%	-48%	-56%	-51%
12	-27%	-21%	-18%	-40%	-36%	-50%	-53%	-42%	-58%	-51%
01	-35%	-22%	-18%	-31%	-32%	-59%	-53%	-34%	-54%	-41%
02	-23%	-16%	-13%	-26%	-33%	-50%	-42%	-22%	-47%	-35%
03	-7%	6%	15%	1%	-8%	-7%	-15%	3%	-12%	-10%

A partir de la Tabla 5-7, se puede concluir que, entre los dos periodos presentados, se observa una tendencia general de disminución en las proyecciones de los modelos climáticos para los meses entre junio y agosto, con descensos más pronunciados en el segundo periodo, llegando hasta una variación de -59% en septiembre según algunos modelos (MIROC6).

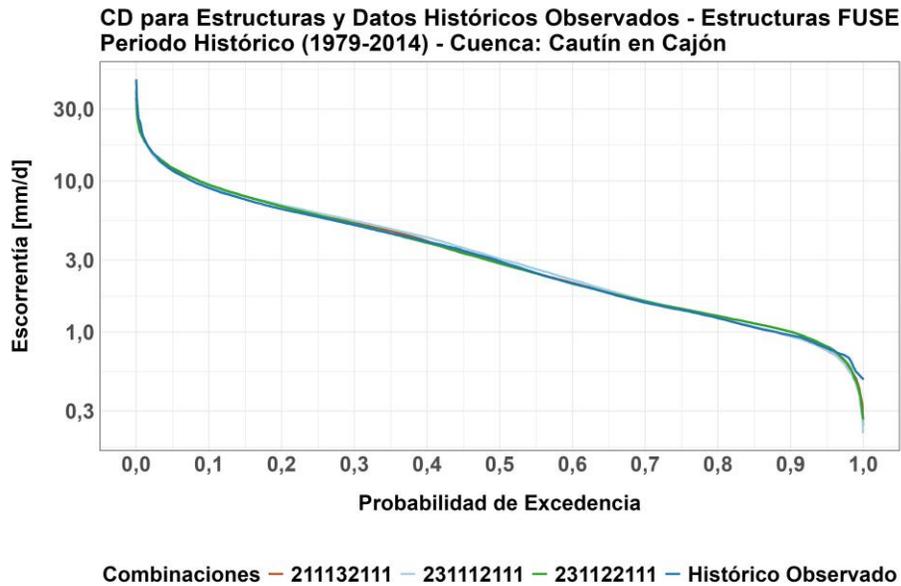
Tabla 5-8: Variación porcentual de escorrentía con respecto al periodo histórico de los GCMs, estructura 231122111, Cautín en Cajón.

Primer Periodo (2015-2050) - 231122111 - Cautín en Cajón						Segundo Periodo (2051-2085) - 231122111 - Cautín en Cajón				
Mes	CMCC_ESM2	EC_EAR_TH_CC	EC_EART_H3_VEG	MI-ROC_6	MRI_ESM2	CMCC_ESM2	EC_EAR_TH_CC	EC_EART_H3_VEG	MI-ROC_6	MRI_ESM2
04	42%	155%	92%	60%	20%	53%	114%	96%	27%	52%
05	33%	74%	105%	75%	42%	21%	14%	38%	-3%	17%
06	-10%	4%	11%	-4%	-13%	-33%	-34%	-17%	-34%	-24%
07	-10%	7%	5%	-11%	-14%	-26%	-31%	-26%	-37%	-19%
08	-26%	-29%	-8%	-37%	-19%	-52%	-50%	-40%	-51%	-39%
09	-17%	-28%	-18%	-41%	-30%	-55%	-56%	-43%	-61%	-47%
10	-29%	-30%	-17%	-49%	-29%	-58%	-59%	-51%	-61%	-50%
11	-34%	-27%	-18%	-43%	-36%	-61%	-56%	-51%	-61%	-53%
12	-28%	-24%	-19%	-40%	-37%	-59%	-55%	-46%	-59%	-53%
01	-32%	-25%	-19%	-40%	-33%	-58%	-54%	-39%	-57%	-48%
02	-29%	-18%	-18%	-25%	-31%	-57%	-49%	-33%	-51%	-42%
03	-22%	-2%	0%	-15%	-21%	-46%	-33%	-20%	-38%	-18%

En la Tabla 5-8, la comparación entre los dos periodos muestra que entre los meses de abril y mayo predominan los valores positivos en la mayoría de los modelos, aunque con una tendencia a la reducción en el segundo periodo, particularmente en mayo, donde los descensos llegan hasta -3%. En los meses entre junio a noviembre, las proyecciones son predominantemente negativas, con reducciones que alcanzan hasta -61% en octubre y noviembre.

Adicionalmente, se obtuvieron curvas de duración, las que permiten obtener información valiosa con respecto a las probabilidades de excedencia de la escorrentía, dichas curvas se presentan en las Figura 5-13, Figura 5-14, Figura 5-15 y Figura 5-16.

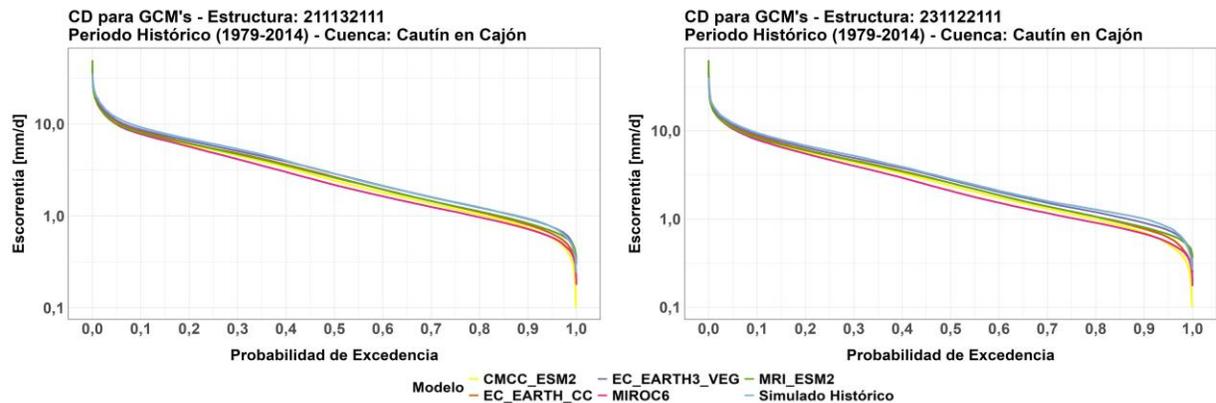
En la Figura 5-13 se presenta la curva de duración para las distintas estructuras calibradas para la cuenca de Cautín en Cajón en el periodo de 1979-2014, además, se presenta la curva para el periodo histórico observado.



*Figura 5-13: Curva de duración de escorrentía para estructuras de Cautín en Cajón, sin GCMs durante el periodo histórico, a través de datos observados y simulados por FUSE.*

La Figura 5-13 muestra que las curvas de los modelos FUSE están muy alineadas con la curva de los datos históricos observados, lo que indica que los modelos reproducen de manera adecuada el comportamiento de la escorrentía en la cuenca. La coincidencia sugiere que las configuraciones del modelo son apropiadas para simular el régimen hidrológico de la cuenca Cautín en Cajón durante el período histórico.

Las curvas de duración de los GCMs, durante el periodo histórico en comparación a lo simulado histórico de las combinaciones de estructuras FUSE, se presentan en la Figura 5-14.



*Figura 5-14: Curvas de duración para el periodo histórico, para todos los GCMs en Cautín en Cajón, y el simulado histórico con las estructuras elegidas.*

Las curvas de los distintos GCMs están alineadas entre sí y con la curva de escorrentía simulada históricamente, lo que sugiere que los GCMs replican de manera consistente el comportamiento hidrológico en ambos modelos estructurales de FUSE en el periodo histórico. Para analizar los periodos de 2015-2050 y 2051-2085, se presentan las Figura 5-15 y Figura 5-16.

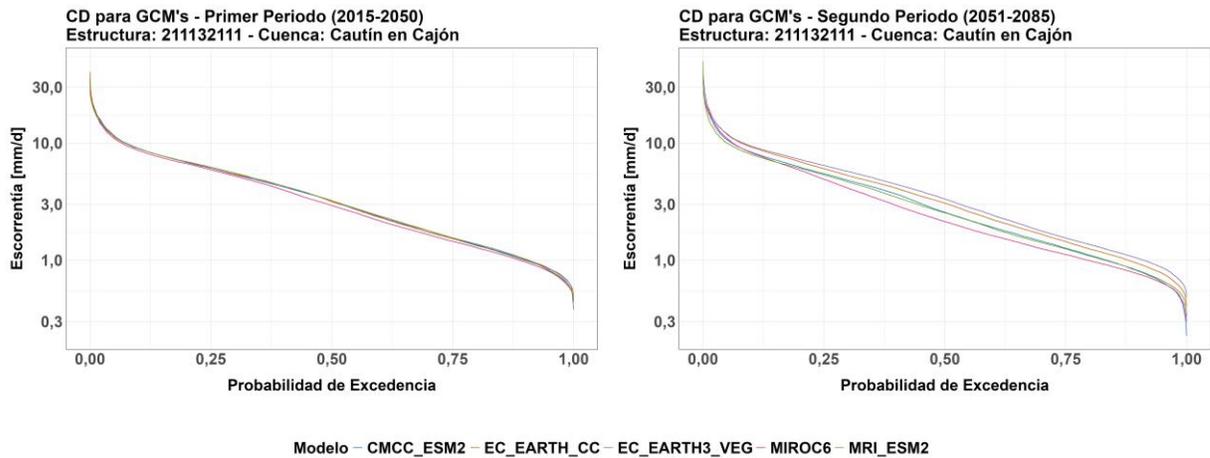


Figura 5-15: Curvas de duración para los periodos futuros, para todos los GCMs en Cautín en Cajón, con la estructura 211132111.

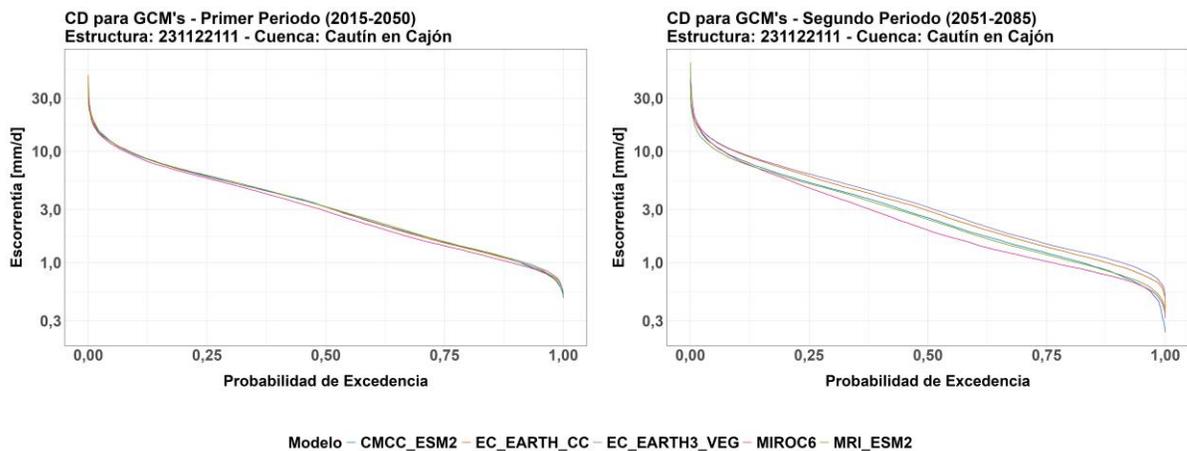


Figura 5-16: Curvas de duración para los periodos futuros, para todos los GCMs en Cautín en Cajón, con la estructura 231122111.

Al analizar la Figura 5-15 y Figura 5-16, en ambos periodos se observa que en las probabilidades altas se genera una variabilidad de valores de escorrentía mucho más notoria que en las probabilidades de excedencia menores, esto va en relación directa con la disponibilidad de agua, especialmente en las estaciones secas o en los periodos en los que la precipitación es menor. Si bien las diferencias entre los modelos no son extremadamente grandes, reflejan variaciones en cómo los diferentes GCMs proyectan la escorrentía. Esto podría implicar que algunos modelos proyectan más periodos de sequía que otros.

## 5.2. Índices de sequías y sus interpretaciones

A continuación, en la Figura 5-17, Figura 5-18 y Figura 5-19, se presentan los gráficos correspondientes al SPEI, para las tres cuencas en estudio:

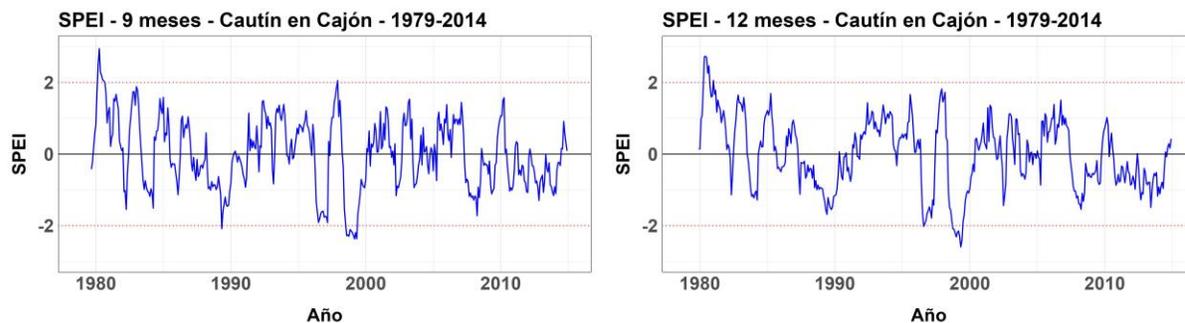


Figura 5-17: Comportamiento del índice SPEI en el periodo histórico (Datos Observados) en Cautín en Cajón, para la escala de 9 y 12 meses.

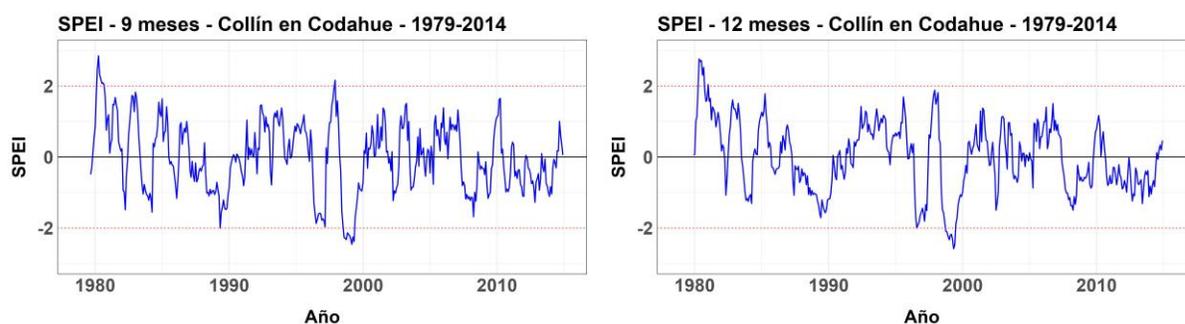


Figura 5-18: Comportamiento del índice SPEI en el periodo histórico (Datos Observados) en Collín en Codahue, para la escala de 9 y 12 meses.

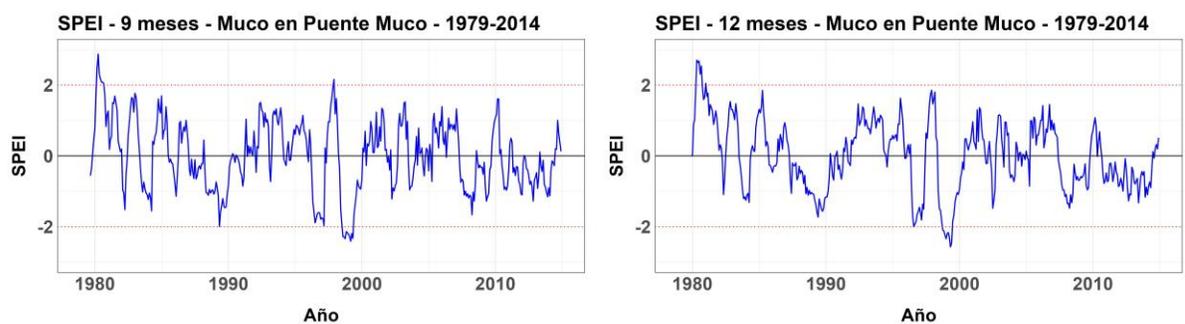


Figura 5-19: Comportamiento del índice SPEI en el periodo histórico (Datos Observados) en Muco en Puente Muco, para la escala de 9 y 12 meses.

En las Figura 5-17, Figura 5-18 y Figura 5-19, se presenta el periodo histórico observado del índice SPEI, donde se aprecia que el comportamiento en las tres cuencas es similar, con máximos y mínimos que ocurren prácticamente en las mismas fechas. Además, se observa que la presencia de

sequías extremas es mínima, con un solo fenómeno de este tipo alrededor del año 2000. Otro punto importante a destacar es la tendencia en los últimos años hacia valores negativos de manera gradual y constante.

A continuación, la Figura 5-20, Figura 5-21 y Figura 5-22 presentan el comportamiento del índice SSFI en el periodo histórico con datos observados y simulados por las combinaciones de estructuras FUSE calibradas.

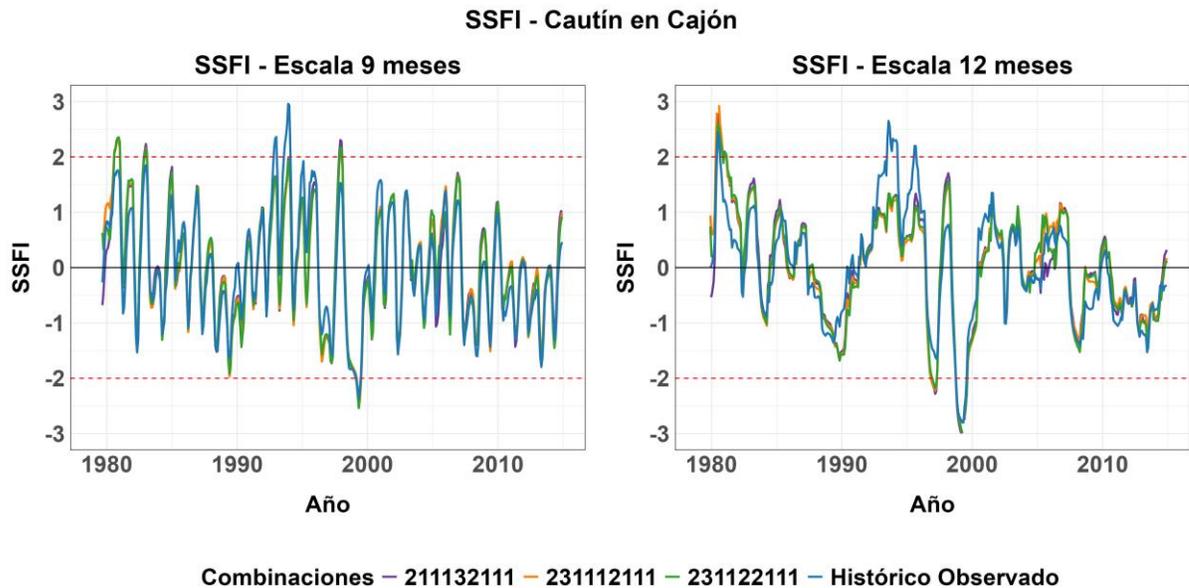


Figura 5-20: Comportamiento del índice SSFI en el periodo histórico en Cautín en Cajón, para la escala de 9 y 12 meses, mediante datos observados y simulados con estructuras FUSE.

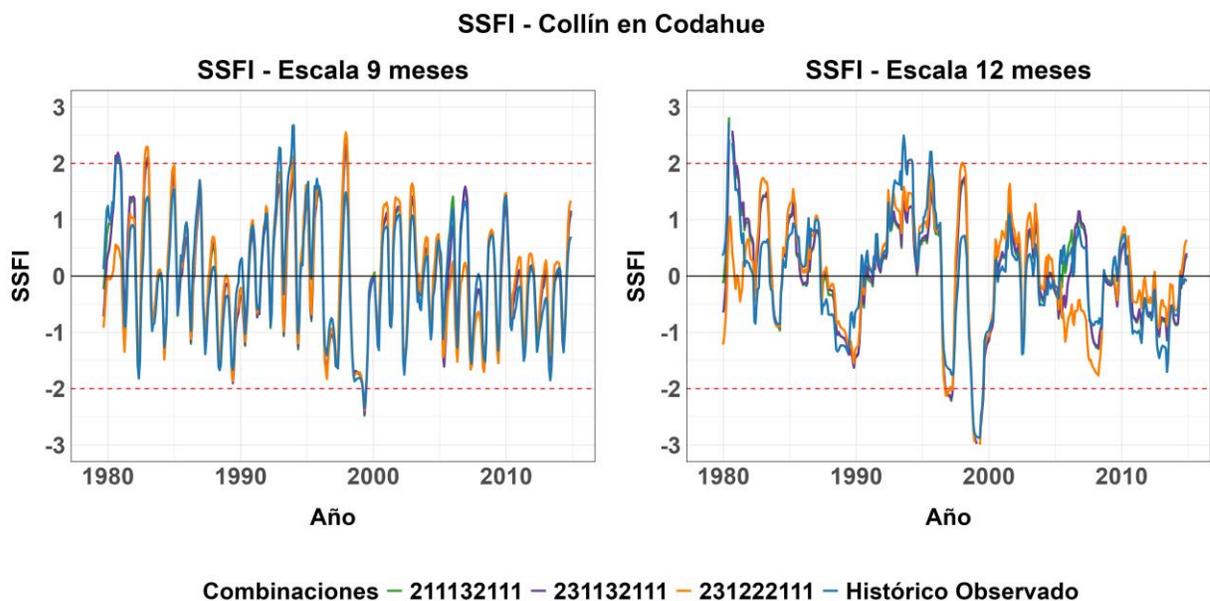
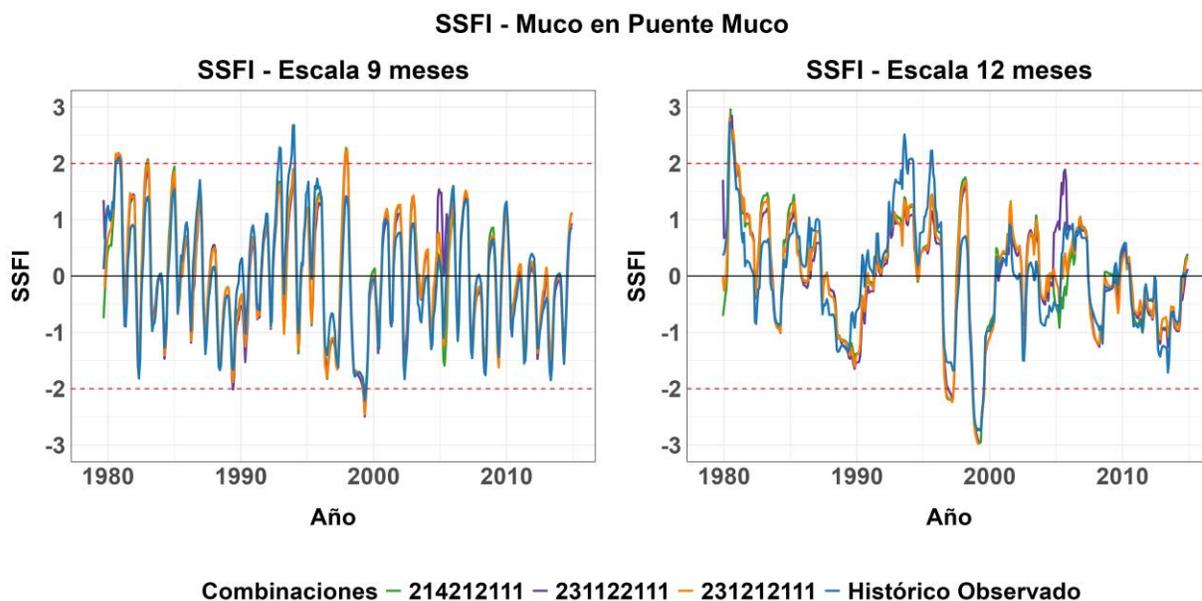


Figura 5-21: Comportamiento del índice SSFI en el periodo histórico en Collín en Codahue, para la escala de 9 y 12 meses mediante datos observados y simulados con estructuras FUSE.



*Figura 5-22: Comportamiento del índice SSFI en el periodo histórico en Muco en Puente Muco, para la escala de 9 y 12 meses, mediante datos observados y simulados con estructuras FUSE.*

La Figura 5-20, Figura 5-21 y Figura 5-22 muestran la variación de índice SSFI durante el período 1979-2014. En el gráfico de 9 meses se observa una mayor variabilidad de los máximos y mínimos en comparación a la escala de 12 meses, en la que los cambios se dan de manera más gradual, facilitando el análisis del índice. Adicionalmente, para los gráficos de las tres cuencas se observa cómo las estructuras se acoplan de buena manera a los datos históricos observados, a excepción de ciertos máximos, como ocurre en el año 1993, en donde las estructuras subestiman al valor del índice en comparación al obtenido mediante datos observados.

Una vez analizadas la Tabla B-5 y la Tabla B-6 según el criterio de Gateño (2022), se optó por escoger el GCM CMCC\_ESM2, el cual presenta la misma sobreestimación de la precipitación en el periodo histórico, tanto en la cuenca de Collín en Codahue como en la de Muco en Puente Muco. Cabe destacar que todos los GCMs presentados poseen valores muy bajos de  $C.V_{GCM-Escalado} - C.V_{Observado}$ , por lo que elegir cualquiera de estos no representa grandes subestimaciones o sobreestimaciones de los datos. Adicionalmente, se presentan en la Tabla B-7, Tabla B-8 y Tabla B-9 los estadísticos para las tres cuencas en estudio, con las proyecciones del GCM CMCC\_ESM2 correspondientes al periodo histórico y futuro para la precipitación, temperatura media y evapotranspiración potencial.

En la Figura 5-23 y Figura 5-24, se presentan las curvas envolventes de precipitación acumulada para la cuenca de Collín y Muco, en donde se muestra el comportamiento del GCM escogido corregido con respecto al resto. En dichas curvas el área amarilla representa el rango entre los valores máximos y mínimos de precipitación acumulada de todos los GCMs, la línea azul corresponde a los datos del CMCC\_ESM2 y la línea roja muestra los datos observados.

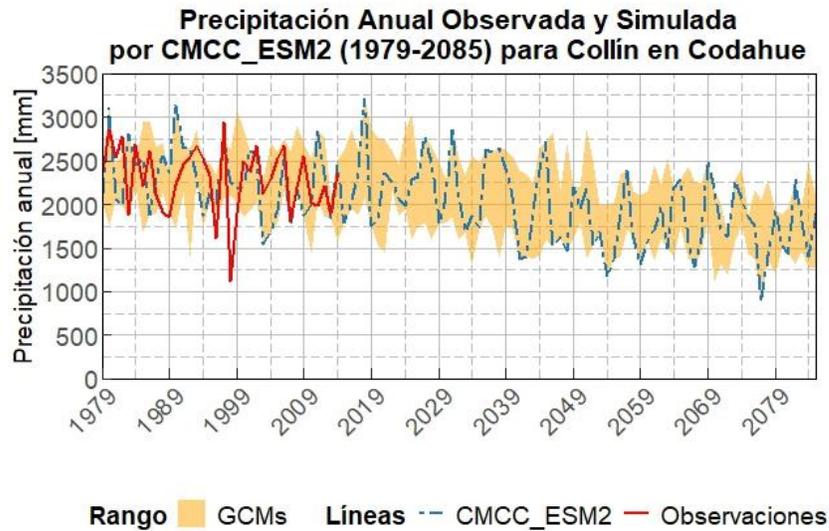


Figura 5-23: Curva envolvente de precipitación, en donde se presenta el máximo y mínimo de los GCMs del estudio, lo observado y del GCM CMCC\_ESM2 escogido para la cuenca de Collín en Codahue.

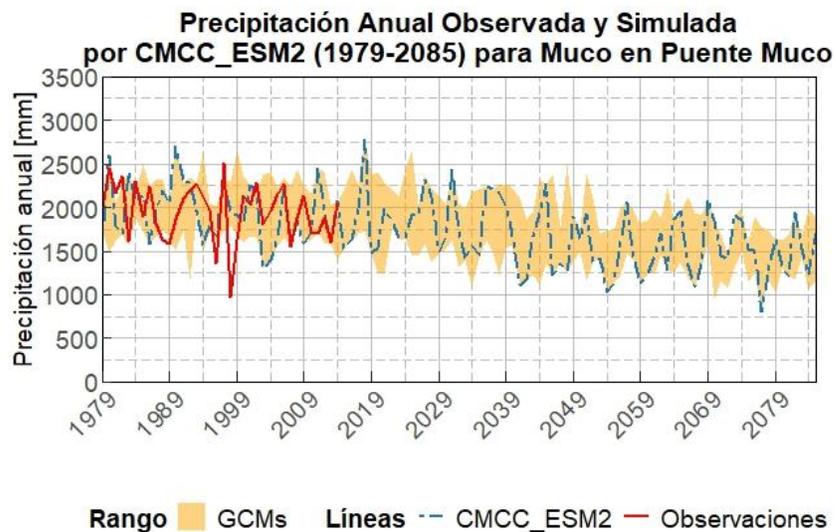


Figura 5-24: Curva envolvente de precipitación, en donde se presenta el máximo y mínimo de los GCMs del estudio, lo observado y del GCM CMCC\_ESM2 escogido para la cuenca de Muco en Puente Muco.

En Figura 5-23 y Figura 5-24, se observa que los datos observados coinciden en su mayoría con el comportamiento del CMCC\_ESM2, salvo en ciertos *peaks* donde las tendencias son opuestas o los datos observados se salen de la envolvente de los GCM (área amarilla). Además, en varios puntos, el GCM seleccionado alcanza los valores extremos de la envolvente, manteniendo coherencia con los *peaks* máximos y mínimos de la misma.

Una vez seleccionado el GCM, se presenta entre la Figura 5-26 y la Figura 5-31, las series temporales y las variaciones de los índices SPEI y SSFI. Se destaca adicionalmente que, en los gráficos, desde el -1 se tienen las sequías moderadas (umbral naranja) y desde el -2 (umbral rojo, -3 para el caso del índice RAI) son sequías de carácter extremo. Los resultados se presentan para tres ventanas

temporales, las que son 1979-2014 (periodo histórico), 2015-2050 y 2051-2085. Para analizar los índices con un GCM distinto al CMCC\_ESM2, revisar Anexo Digital.

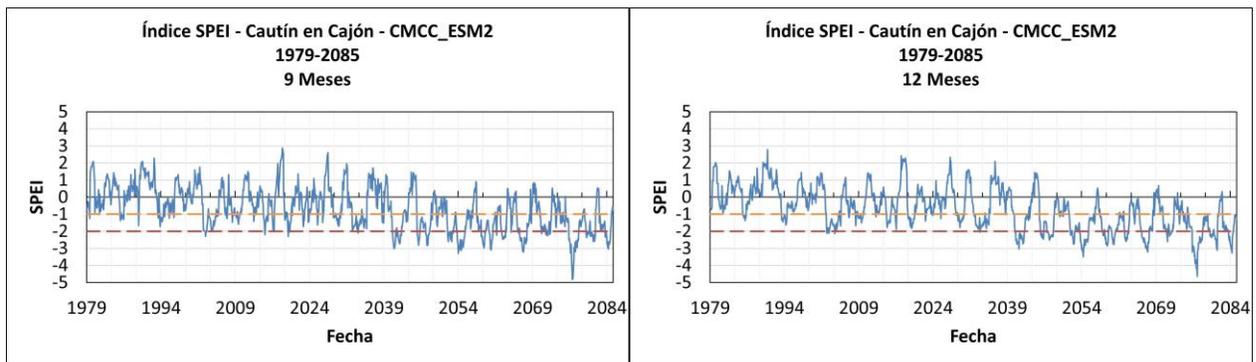


Figura 5-25: Índice SPEI para escalas de 9 y 12 meses en la cuenca de Cautín en Cajón, para el GCM CMCC-ESM2.

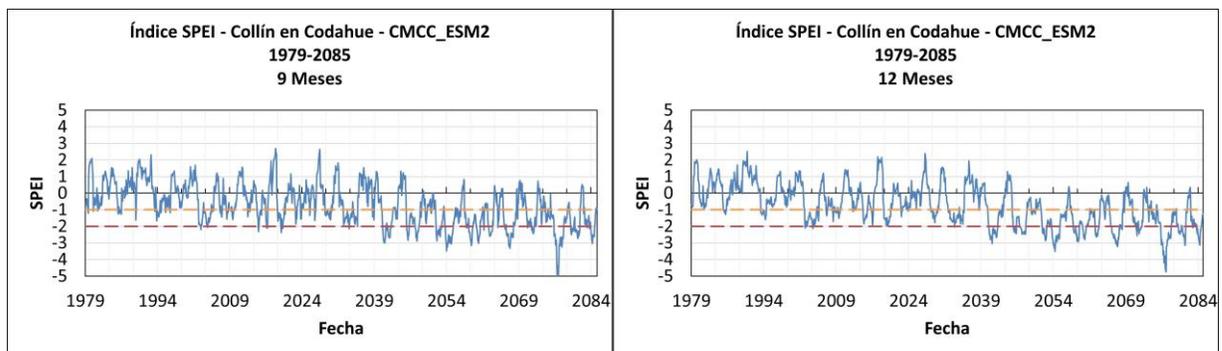


Figura 5-26: Variación índice SPEI para escalas de 9 y 12 meses en la cuenca de Collín en Codahue, para el GCM CMCC\_ESM2.

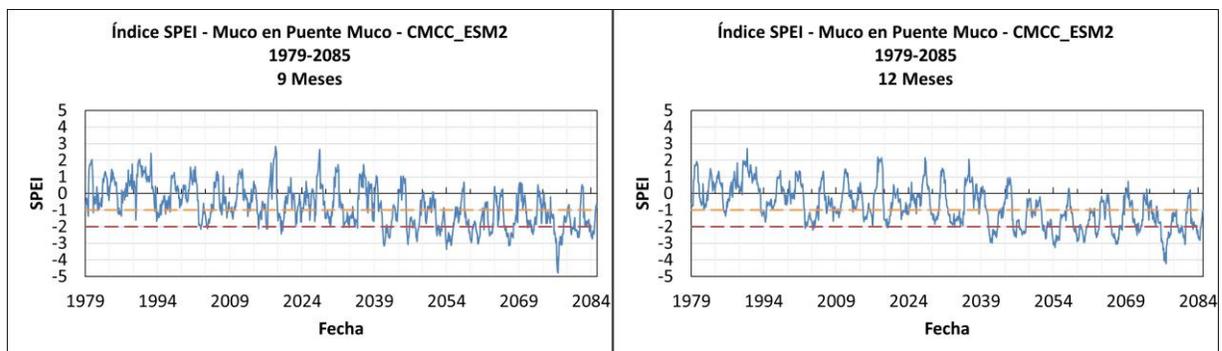


Figura 5-27: Variación índice SPEI para escalas de 9 y 12 meses en la cuenca de Muco en Puente Muco, para el GCM CMCC\_ESM2.

Con respecto a la Figura 5-25, Figura 5-26 y Figura 5-27, se tiene que a medida que se avanza en el tiempo, tanto para la escala de 9 y 12 meses, la presencia de sequías extremas se hace mucho más regular, por el contrario, la existencia de eventos de humedad extrema disminuye, siendo casi nulos en el futuro.

En la Tabla 5-9 se presenta el índice SPEI para la región de Cautín en Cajón, analizado las escalas temporales de 9 y 12 meses. Los datos se distribuyen en tres ventanas temporales con el GCM CMCC\_ESM2 previamente escogido.

*Tabla 5-9: Índice SPEI en las tres ventanas temporales (1979-2014, 2015-2050 y 2051-2085), cuenca Cautín en Cajón.*

Índice SPEI			Cautín en Cajón - Escala 9 Meses				Cautín en Cajón - Escala 12 Meses			
GCM	Periodo	Clasificación	Área Total	D. Total [Meses]	Int. Media [1/mes]	N° Sequías	Área Total	D. Total [Meses]	Int. Media [1/mes]	N° Sequías
CMCC-ESM2	1979-2014	S. Extrema	10,47	5	2,09	4	10,42	5	2,07	2
		S. Severa	40,6	24	1,70	10	27,4	15	1,77	8
		S. Moderada	54,44	45	1,19	14	65	53	1,21	27
	2015-2050	S. Extrema	112,51	48	2,26	4	102,95	43	2,24	12
		S. Severa	72,23	43	1,68	17	90,05	53	1,70	29
		S. Moderada	98,90	80	1,23	30	90	70	1,28	35
	2051-2085	S. Extrema	387,53	150	2,34	20	381,15	149	2,33	20
		S. Severa	174,65	98	1,77	34	142,06	81	1,75	36
		S. Moderada	78,23	64	1,23	26	89,17	69	1,27	36

Con respecto a la Tabla 5-9 se observa que se proyecta un aumento importante en la duración y área de las sequías hacia el año 2085. Enfocándose principalmente en las sequías extremas, que pasan de ser eventos relativamente raros, a fenómenos comunes y prolongados en el periodo 2051-2085, el aumento en la duración pasa de 5 a 150 meses y el área pasa de 10,47 a 387,53 a escala de 9 meses. Con respecto a la escala de 12 meses, la duración pasa de ser de 5 meses en el periodo histórico a 149 en el periodo de 2051-2085 y el área pasa de ser 10,42 a 381,15.

Con respecto a la columna del Número de sequías, esta hace referencia a la cantidad de veces en que se superó el umbral de la clasificación de sequía correspondiente. Por ejemplo, en la Tabla 5-9, se tiene que la duración de la sequía extrema (umbral -2) en el periodo de 1979-2014 fue de 5 meses, pero el número de sequía fue de 4, es decir, pudo ocurrir que una de las sequías haya durado 2 meses seguidos.

A continuación, se presentan los resultados del índice SSFI para cada cuenca y estructura correspondiente (Figura 5-28, Figura 5-29, Figura 5-30 y Figura 5-31).

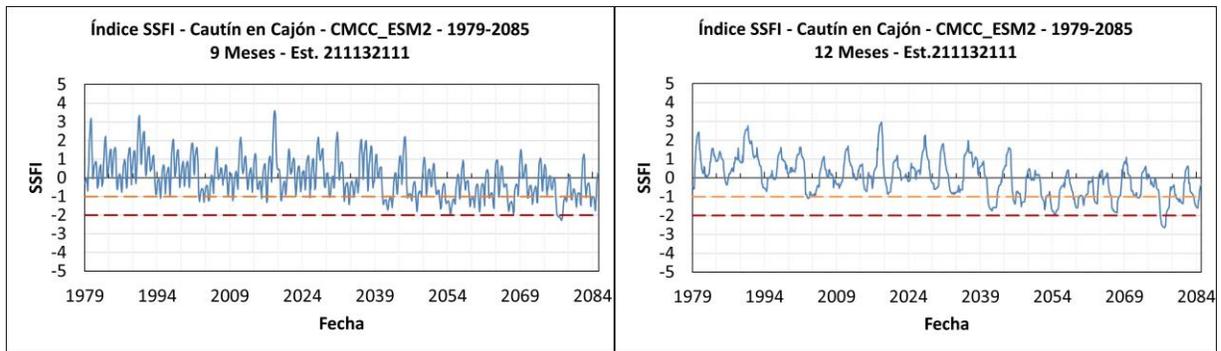


Figura 5-28: Evolución temporal proyectada del índice SSFI para escalas de 9 y 12 meses en la cuenca de Cautín en Cajón, para el GCM CMCC\_ESM2 y las estructura 211132111.

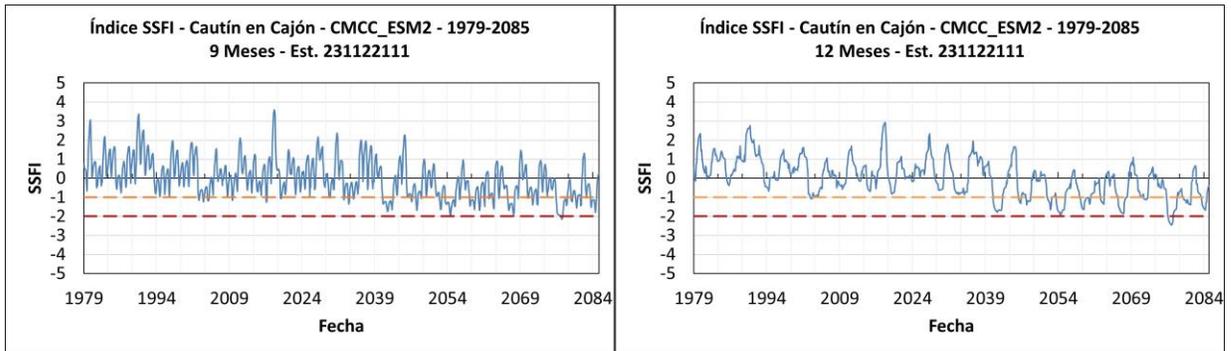


Figura 5-29: Evolución temporal proyectada del índice SSFI para escalas de 9 y 12 meses en la cuenca de Cautín en Cajón, para el GCM CMCC\_ESM2 y las estructura 231122111.

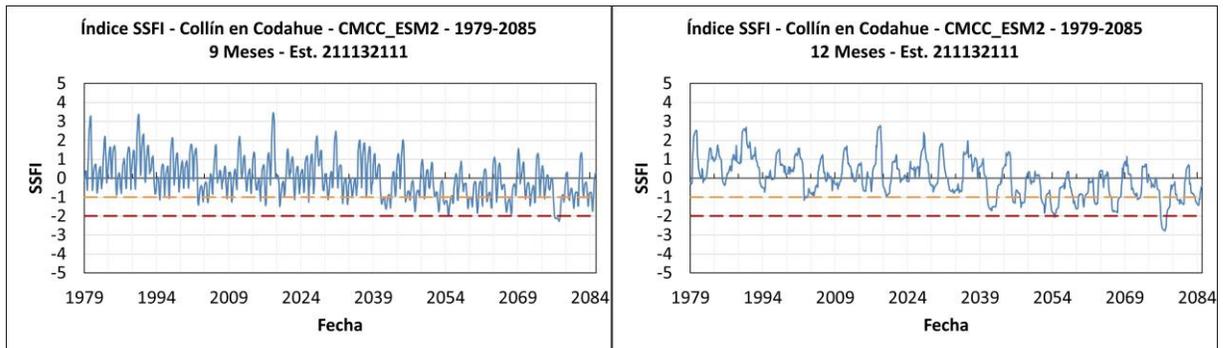


Figura 5-30: Evolución temporal proyectada del índice SSFI para escalas de 9 y 12 meses en la cuenca de Collín en Codahue, para el GCM CMCC\_ESM2 para la estructura 211132111.

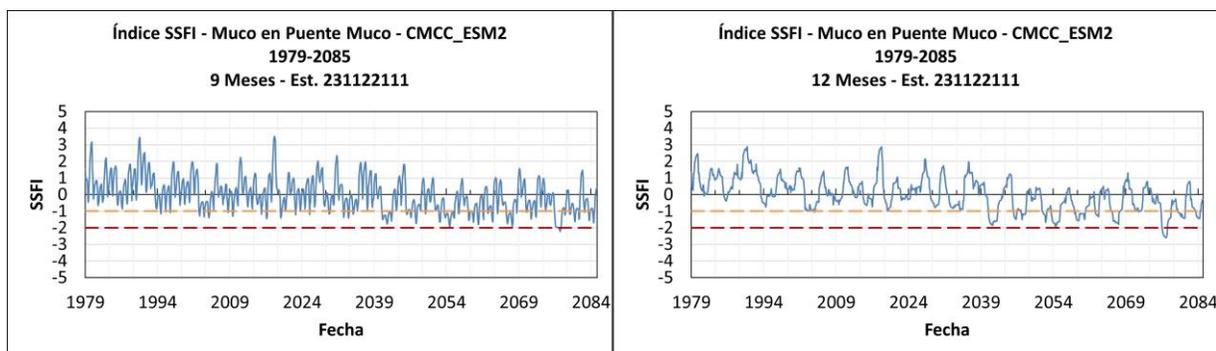


Figura 5-31: Evolución temporal proyectada del índice SSFI para escalas de 9 y 12 meses en la cuenca de Muco en Puente Muco, para el GCM CMCC\_ESM2 para la estructura 231122111.

Con respecto a las Figura 5-28, Figura 5-29, Figura 5-30 y Figura 5-31, se deduce que el comportamiento que poseen las curvas, es similar a lo que ocurre en el índice SPEI. Pero si se compara gradualidad, los índices asociados a las sequías meteorológicas tienen una tendencia más agresiva hacia valores negativos en el futuro.

A continuación, en la Tabla 5-10 y Tabla 5-11, se presenta el índice SSFI para la región de Cautín en Cajón, analizando las escalas temporales de 9 y 12 meses para las estructuras compartidas con Collín en Codahue y Muco en Puente Muco. Indicando el área total, la duración total, la intensidad media y el número de sequías para cada clasificación de sequía.

Tabla 5-10: Índice SSFI, cuenca Cautín en Cajón, estructura 211132111, para los GCM CMCC\_ESM2.

Índice SSFI			Estructura 211132111							
			Cautín en Cajón - Escala 9 Meses				Cautín en Cajón - Escala 12 Meses			
GCM	Periodo	Clasificación	Área Total	D. Total [Meses]	Int. Media [1/mes]	N° Sequías	Área Total	D. Total [Meses]	Int. Media [1/mes]	N° Sequías
CMCC_ESM2	1979-2014	S. Extrema	0,00	0	-	0	0,00	0	-	0
		S. Severa	0,00	0	-	0	0,00	0	-	0
		S. Moderada	6,39	6	1,065	1	16,07	14	1,12	7
	2015-2050	S. Extrema	0,00	0	-	0	0,00	0	-	0
		S. Severa	32,19	20	1,57	2	13,15	8	1,64	3
		S. Moderada	28,86	23	1,22	5	53,58	45	1,17	16
	2051-2085	S. Extrema	34,85	14	2,49	1	27,82	13	2,14	1
		S. Severa	97,38	57	1,68	7	56,14	33	1,67	13
		S. Moderada	95,98	80	1,20	17	122,23	101	1,20	30

Tabla 5-11: Índice SSFI, cuenca Cautín en Cajón, estructura 231122111, para los GCM CMCC\_ESM2.

Índice SSFI			Estructura 231122111							
			Cautín en Cajón - Escala 9 Meses				Cautín en Cajón - Escala 12 Meses			
GCM	Periodo	Clasificación	Área Total	D. Total [Meses]	Int. Media [1/mes]	Nº Sequías	Área Total	D. Total [Meses]	Int. Media [1/mes]	Nº Sequías
CMCC_ESM2	1979-2014	S. Extrema	0,00	0	-	0	0	0	-	0
		S. Severa	0,00	0	-	0	0	0	-	0
		S. Moderada	13,41	12	1,12	4	6,32	6	1,033	2
	2015-2050	S. Extrema	0,00	0	-	0	0	0	-	0
		S. Severa	14,73	9	1,63	3	31,94	19	1,68	1
		S. Moderada	49,26	41	1,18	13	29,14	24	1,23	4
	2051-2085	S. Extrema	10,44	5	2,09	1	30,05	13	2,31	1
		S. Severa	64,46	37	1,68	12	96,98	57	1,69	7
		S. Moderada	134,4	109	1,21	30	113,13	95	1,20	18

La Tabla 5-10 y la Tabla 5-11 muestran la variación del índice SSFI en la cuenca de Cautín en Cajón durante diferentes periodos de tiempo. Los resultados revelan un aumento significativo en la duración y el área de las sequías, especialmente las de carácter moderadas, que son más frecuentes en los últimos dos periodos analizados (2015-2050 y 2051-2085). En el caso de este tipo de sequías, al comparar el periodo histórico con la ventana temporal de 2051-2085 para la estructura 211132111 de la Tabla 5-10, se observa que el área pasa de tener un valor de 6,39 a tomar un valor de 95,98 y de tener una duración de 6 meses a tener una de 80 meses. En la Tabla 5-11, para la estructura 231122111, se tiene un área inicial de 13,41 a tener una de 134,4 y de tener una duración de 12 meses a tener una de 109 meses para la escala de 9 meses. Para la escala de 12 meses, la estructura 211132111 presenta un cambio en el área pasando de un valor de 16,07 a 122,23 y un cambio en el área pasando de 14 meses a 101 meses, mientras que la estructura 231122111 muestra un cambio en el área de 6,32 a 113,13 y de 6 meses a 95 meses en la duración.

Una vez obtenidas las variaciones de los índices en las cuencas en estudio de forma gráfica y tabuladas para el índice SPEI y SSFI, se procede a presentar de manera tabulada aquellos índices que no requieren de simulaciones mediante FUSE, estos son RAI y SPI, adicionales al SPEI ya presentado. Esto se presenta en la Tabla 5-12 y Tabla 5-13.

Tabla 5-12: Índice RAI, Cautín en Cajón.

Índice RAI			Cautín en Cajón - Escala 9 Meses				Cautín en Cajón - Escala 12 Meses			
GCM	Periodo	Clasificación	Área Total	D. Total [Meses]	Int. Media [1/mes]	N° Sequías	Área Total	D. Total [Meses]	Int. Media [1/mes]	N° Sequías
CMCC_ESM2	1979-2014	Ext. Seco	9,93	3	3,25	2	12,93	4	3,26	3
		Muy Seco	92,80	38	2,45	21	73,97	30	2,43	10
		Mod. Seco	122,73	86	1,43	45	110,99	77	1,36	24
	2015-2050	Ext. Seco	59,90	18	3,26	9	137,63	40	3,32	4
		Muy Seco	162,82	67	2,43	29	115,78	48	2,43	17
		Mod. Seco	128,00	85	1,49	46	145,37	97	1,48	29
	2051-2085	Ext. Seco	205,11	56	3,40	18	443,94	113	3,50	16
		Muy Seco	262,12	106	2,51	43	276,39	113	2,44	31
		Mod. Seco	152,86	104	1,50	48	120,05	81	1,53	27

Tabla 5-13: Índice SPI, Cautín en Cajón.

Índice SPI			Cautín en Cajón - Escala 9 Meses				Cautín en Cajón - Escala 12 Meses			
GCM	Periodo	Clasificación	Área Total	D. Total [Meses]	Int. Media [1/mes]	N° Sequías	Área Total	D. Total [Meses]	Int. Media [1/mes]	N° Sequías
CMCC_ESM2	1979-2014	S. Extrema	20,28	9	2,19	2	20,66	9	2,27	4
		S. Severa	21,60	12	1,79	8	36,18	21	1,74	11
		S. Moderada	56,78	46	1,23	21	46,94	39	1,21	13
	2015-2050	S. Extrema	108,77	41	2,53	11	119,25	47	2,32	7
		S. Severa	65,39	38	1,74	24	52,53	30	1,78	13
		S. Moderada	82,88	67	1,22	35	74,67	61	1,19	24
	2051-2085	S. Extrema	377,62	129	2,56	19	391,14	132	2,55	17
		S. Severa	100,99	58	1,73	31	130,66	76	1,71	32
		S. Moderada	85,31	69	1,23	39	72,26	56	1,29	31

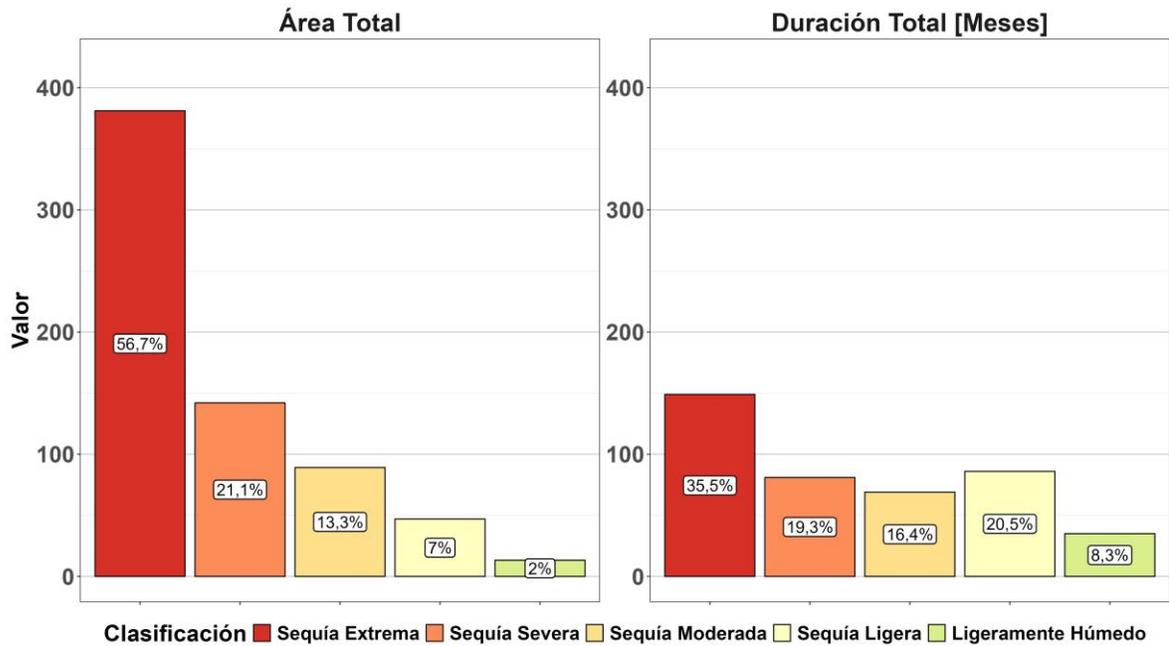
Con respecto a los índices que no requieren simulación hidrológica de escorrentía, y solo dependen de variables meteorológicas, se aprecian comportamientos bastante similares en todos los periodos asociados a las distintas cuencas y escalas, caracterizándose por un aumento significativo de las sequías extremas además de severas en el periodo de 2051-2085. Adicionalmente, comparando el número de sequías para la categoría extrema en el caso del índice SPI, entre el periodo histórico y

el periodo de 2051-2085 se observa como en esta última ventana temporal, la duración continua es mucho mayor, ya que el umbral se supera 19 veces, pero la duración total es de 129 meses, a diferencia del periodo histórico en donde la duración total es de 9 meses y el número de sequías es de 2, generándose una diferencia notoria. Dicho comportamiento se da tanto a escala de 9 como de 12 meses.

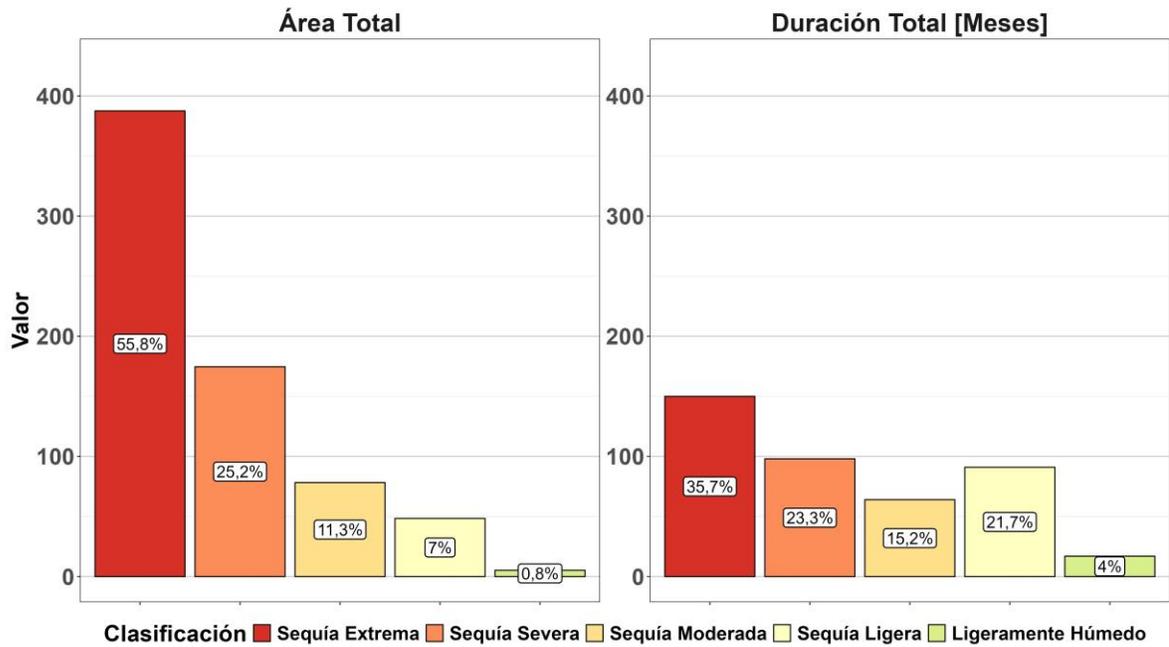
A modo de entender de mejor manera la presencia mayoritaria de sequías de carácter extremo, se presenta la distribución porcentual que representan dichos valores dentro del total de meses de cada periodo, para esto, se establece que la duración es de 420 meses para el periodo histórico (1979-2014) y el primer periodo (2015-2050), y de 408 meses para el segundo periodo (2051-2085).

Los resultados de las distribuciones porcentuales entre duración y área total se presentan en la Figura 5-32, Figura 5-33 y Figura 5-34, enfocándose principalmente en la ventana cronológica de 2051 a 2085 en la cuenca de Cautín en Cajón. Con respecto a los índices SPI y RAI y el resto de las ventanas cronológicas, revisar Anexo B.5.

**Distribución del índice SPEI en Cautín en Cajón  
2051-2085 - CMCC\_ESM2 - 9 Meses**

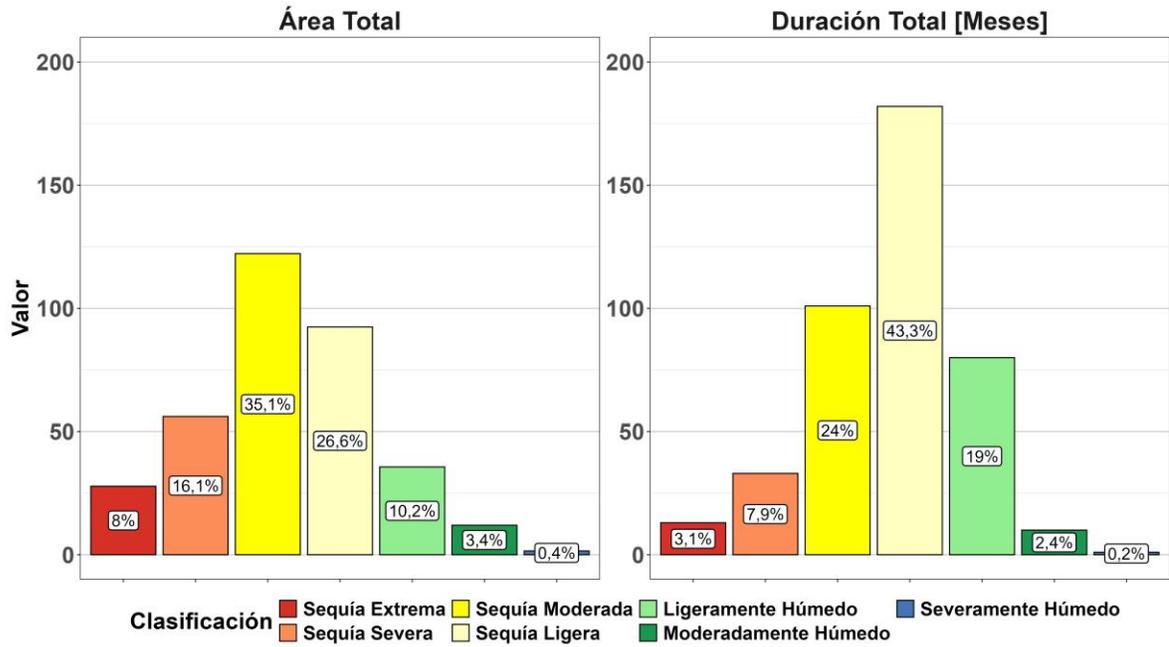


**Distribución del índice SPEI en Cautín en Cajón  
2051-2085 - CMCC\_ESM2 - 12 Meses**

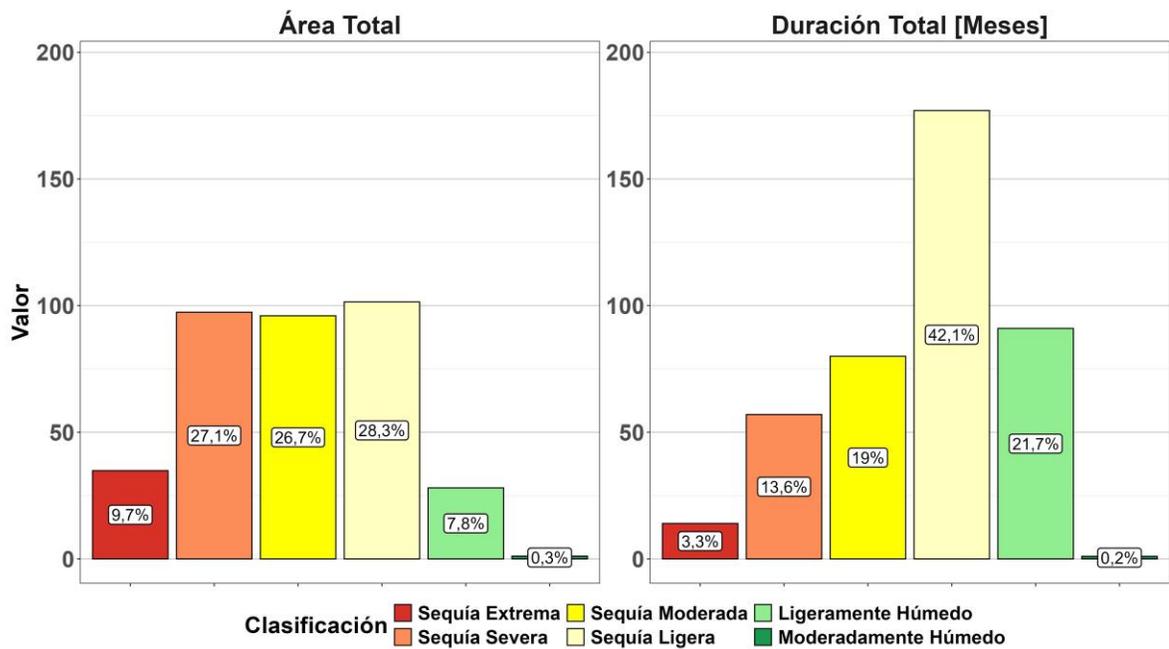


*Figura 5-32: Distribución del índice SPEI, en la cuenca de Cautín en Cajón, para el periodo de 2051 a 2085, CMCC\_ESM2, escala de 9 y 12 meses (2051-2085).*

**Distribución del índice SSFI en Cautín en Cajón**  
**Estructura: 211132111 - 2051-2085 - CMCC\_ESM2 - 9 Meses**

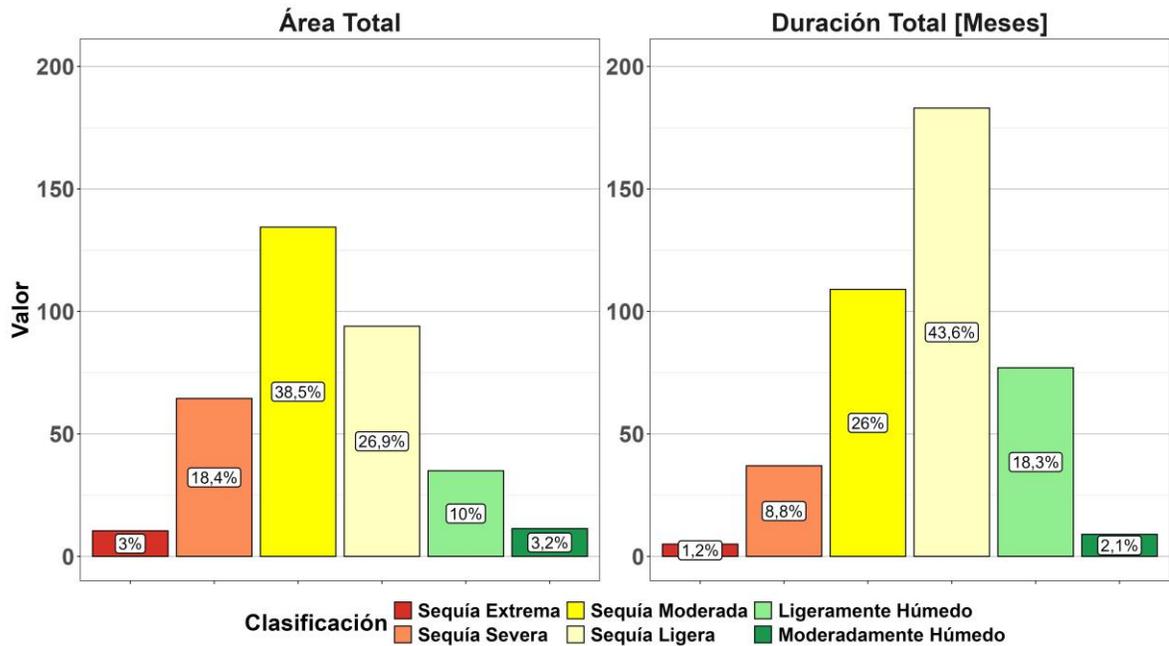


**Distribución del índice SSFI en Cautín en Cajón**  
**Estructura: 211132111 - 2051-2085 - CMCC\_ESM2 - 12 Meses**

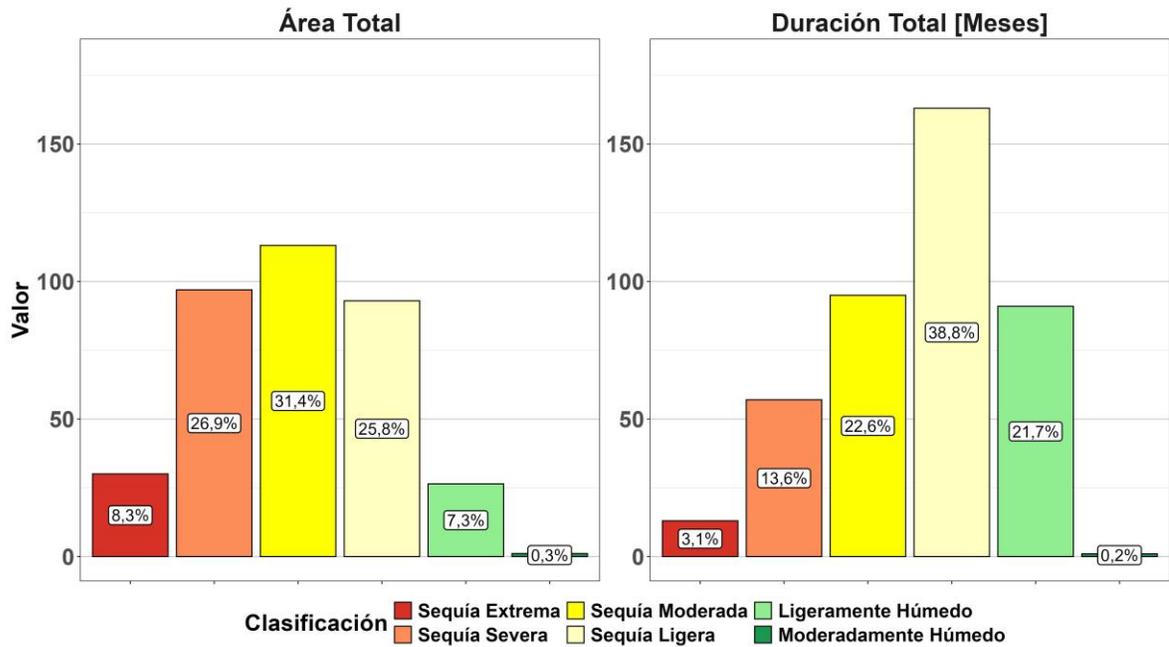


*Figura 5-33: Distribución del índice SSFI, estructura 211132111, Cautín en Cajón, CMCC\_ESM2, escalas de 9 y 12 meses (2051-2085).*

**Distribución del índice SSFI en Cautín en Cajón**  
**Estructura: 231122111 - 2051-2085 - CMCC\_ESM2 - 9 Meses**



**Distribución del índice SSFI en Cautín en Cajón**  
**Estructura: 231122111 - 2051-2085 - CMCC\_ESM2 - 12 Meses**



*Figura 5-34: Distribución del índice SSFI, estructura 231122111, Cautín en Cajón, CMCC\_ESM2, escalas de 9 y 12 meses (2051-2085).*

Con respecto a los gráficos de barra expuestos (Figura 5-32, Figura 5-33, Figura 5-34 y Anexo B.5), se observa que a medida que avanza el tiempo, las sequías extremas aumentan su periodicidad y duración, principalmente en aquellos índices asociados a sequías meteorológicas (SPI, SPEI y RAI). Para el caso del índice SSFI, se tiene que las sequías de carácter moderada y ligera abarcan más del 50% del área y duración total en las dos ventanas temporales expuestas.

El aumento gradual de las sequías extremas asociadas a índices de sequías hidrológicas (SSFI), se explica principalmente por la clara presencia de sequías meteorológicas, que serán cada vez más agresivas y comunes en el futuro. Cuando las precipitaciones disminuyen durante un periodo prolongado, los caudales y escorrentía de ríos, lagos y acuíferos comienzan a reducirse, marcando el inicio de una sequía hidrológica. No obstante, este tipo de sequía suele tardar más en manifestarse, produciéndose de manera desplazada respecto a la sequía de origen meteorológico, lo que explica la aparición de sequías de carácter severo a moderado más que extremas en la Figura 5-33 y Figura 5-34.

# Capítulo 6: Conclusiones y comentarios

En esta memoria se aborda el análisis de proyecciones de índices de sequías, bajo el escenario SSP5-8.5, en las cuencas del río Cautín en Cajón utilizando la plataforma FUSE para simular los recursos hídricos.

Las proyecciones de los modelos climáticos CMCC\_ESM2, EC\_EARTH\_CC, EC\_EARTH3-veg, MRI\_ESM2 y MIROC6, muestran una disminución de las precipitaciones invernales durante los periodos 2015-2050 y 2051-2085, respectivamente, lo que sugiere una creciente presión sobre los recursos hídricos en el futuro. Los resultados de los índices de sequías revelan un impacto significativo del cambio climático, especialmente en la intensidad de las sequías meteorológicas en la región.

Con base en las forzantes escaladas y corregidas por sesgo, se generan curvas de variación estacional para la precipitación y la evapotranspiración potencial (PET) en tres periodos: 1979-2014, 2015-2050 y 2051-2085. Los resultados indican que, comparado con el periodo histórico, la precipitación disminuye 20 % en los meses de invierno para el periodo 2015-2050 y hasta un 40 % hacia 2051-2085. Por otro lado, la PET aumenta entre agosto y marzo, con incrementos del 15 % y 25 %, respectivamente, para los mismos periodos.

Para la modelación, se implementan 20 combinaciones de estructuras en FUSE para las cuencas de los ríos Cautín, Collín y Muco, identificando que hay estructuras compartidas por las cuencas de Cautín-Collín, y entre Cautín-Muco.

Asimismo, las proyecciones de escorrentía muestran en los periodos proyectados (2015-2050 y 2051-2085), se mantiene la estacionalidad, aunque se observa una disminución significativa en los máximos mensuales en el período invernal. Las simulaciones con las estructuras compartidas para Cautín y sus cuencas anidadas (Collín y Muco) reflejan patrones similares, aunque con ligeras variaciones según el modelo climático utilizado.

Desde un enfoque numérico, la comparación de las medianas de las curvas estacionales entre los diferentes periodos y modelos evidencia una tendencia decreciente en la escorrentía. Por ejemplo, el GCM MIROC6 con la estructura 231122111 muestra una disminución máxima de -59 %, mientras que el GCM MRI\_ESM2 y MIROC6, con la estructura 211132111, alcanzan un descenso de hasta -61 %. Estas proyecciones subrayan la necesidad de revisar la gestión de los recursos hídricos en la cuenca ante posibles déficits.

En cuanto a los índices de sequía, tanto meteorológicos (RAI, SPEI, SPI) como hidrológicos (SSFI), los resultados advierten sobre una mayor frecuencia e intensidad de las sequías en la cuenca del río Cautín.

Las proyecciones del SPEI en escalas de 9 y 12 meses, basadas en el modelo CMCC\_ESM2, indican que las sequías extremas se vuelven más comunes, mientras que los eventos de humedad extrema desaparecen casi por completo. Para la ventana temporal de 2051-2085, se estima un aumento significativo en la duración y área de las sequías extremas, con incrementos de 10,47 a 387,53 en el área y de 5 a 150 meses en la duración para la escala de 9 meses. Con respecto a la escala de 12 meses, se presentan aumentos en el área de 10,42 a 381,15 en el área y de 5 a 129 meses en la duración en comparación con el periodo histórico (1979-2014).

De forma similar, el análisis del SSFI proyecta incrementos sustanciales en la duración y área de las sequías moderadas entre 2051 y 2085 en comparación al periodo histórico (1979-2014). La estructura 211132111 muestra aumentos en el área, pasando de 6,39 a 95,98 y en la duración, pasando de 6 a 80 meses. En la escala de 12 meses, esta misma estructura presenta aumento del área pasando de 16,07 a 122,23 y en la duración, pasando de tener una duración de 14 meses a 101. Estos valores reflejan una futura intensificación de las sequías, reforzando la necesidad de diseñar estrategias de gestión más efectivas.

A pesar del éxito en la implementación de los modelos y la obtención de proyecciones relevantes, persisten desafíos relacionados con la calibración y la reducción de la incertidumbre en las simulaciones. Además, trabajar únicamente bajo el escenario SSP5-8.5 restringe el análisis, dejando fuera otros escenarios que podrían ofrecer perspectivas más amplias sobre las condiciones hidrológicas futuras.

En conclusión, este estudio destaca la urgencia de adaptar las estrategias de gestión del agua en la cuenca del río Cautín en Cajón, dado que el futuro bajo el escenario SSP5-8.5 presenta mayores desafíos en términos de sequías y disponibilidad de recursos. Las técnicas avanzadas de modelación hidrológica utilizadas en este estudio, combinadas con una planificación integral, resultan esenciales para mitigar los riesgos asociados a las sequías.

# Bibliografía

- Alvarez-Garreton, C., Mendoza, P. A., Boisier, J. P., Addor, N., Galleguillos, M., Zambrano-Bigiarini, M., & Ayala, A. (2018). *The CAMELS-CL dataset: catchment attributes and meteorology for large sample studies*. Hydrology and Earth System Sciences.
- Aranda, D. F. (2018). *Cuantificación con el SPEI de las sequías históricas y bajo cambio climático probable en la estación climatológica Zacatecas, México*. San Luis Potosí, México.
- Baeza, E. (2019). *Panorama Hídrico en región de la Araucanía*. Biblioteca del congreso nacional. Asesoría técnica.
- BCN. (2023). *Clima y vegetación Región de la Araucanía*. Obtenido de <https://www.bcn.cl/siit/nuestropais/region9/clima.htm#:~:text=Esta%20regi%C3%B3n%20presenta%20caracter%C3%ADsticas%20predominantes,su%20relativo%20alejamiento%20del%20mar>.
- BCN. (2023). *Relieve región de la Araucanía*. Obtenido de <https://www.bcn.cl/siit/nuestropais/region9/relieve.htm#:~:text=La%20topograf%C3%A9a%20de%20esta%20formaci%C3%B3n,metros%20en%20Collipulli%20y%20Victoria>.
- Beven, K. (1997). *TOPMODEL: A critique*. Lancaster University, Centre for Research on Environmental Systems and Statistics, Institute of Environmental and Biological Sciences. Lancaster: HYDROLOGICAL PROCESSES.
- Biblioteca del congreso nacional de Chile. (2023). *Clima y vegetación Región de la Araucanía*. Obtenido de <https://www.bcn.cl/siit/nuestropais/region9/clima.htm>
- Cabrera, J. (2012). *Calibración de Modelos Hidrológicos*. Universidad Nacional de Ingeniería.
- Cabrera, J. (2012). *Modelos Hidrológicos*. Universidad Nacional de Ingeniería.
- Cad, G. o. (s.f.).
- Camargo, A. (2015). *Modelación hidrológica distribuida basada en esquemas de volúmenes finitos*. Barcelona.
- Camarillo-Peñaranda, J. R., Saavedra-Montes, A. J., & Ramos-Paja, C. A. (2013). *Recomendaciones para Seleccionar Índices para la Validación de Modelos*. Instituto tecnológico metropolitano. Medellín: Tecno Lógicas.
- Cannon, A. (2017). *Multivariate quantile mapping bias correction: an N-dimensional probability density function transform for climate model simulations of multiple variables*.
- Cerda, J. C. (2014). *RESPUESTA HIDROLOGICA DEL RÍO CAUTÍN EN LA IX*.
- Chávez Torres, A. d. (2016). *MODELOS HIDROLÓGICOS PARA LA GENERACIÓN DE CAUDALES DIARIOS EN LAS CUENCAS DE LOS RÍOS PISCO Y SAN JUAN - ICA*. Lima, Perú.
- CIIFEN. (2022). *Escenarios y proyecciones*. Obtenido de <https://ciifen.org/escenarios-y-proyecciones/>

- Clark, M. P., Slater, A. G., Rupp, D. E., Woods, R. A., Vrugt, J. A., Gupta, H. V., . . . Hay, L. E. (13 de Agosto de 2008). *Framework for Understanding Structural Errors (FUSE): A modular framework to diagnose differences between hydrological models*. Obtenido de <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2007WR006735>
- Colombia, M. d. (2018). *IDEAM*. Obtenido de [http://www.ideam.gov.co/web/agua/ia#:~:text=El%20C3%8Dndice%20de%20Aridez%20\(IA,partir%20del%20balance%20h%C3%ADrico%20superficial](http://www.ideam.gov.co/web/agua/ia#:~:text=El%20C3%8Dndice%20de%20Aridez%20(IA,partir%20del%20balance%20h%C3%ADrico%20superficial).
- Comisión nacional de energía. (2020). *Análisis de la Estadística Hidrológica utilizada en los procesos de la Comisión nacional de energía*.
- CONAF. (2019). *Sistema de información territorial*. Obtenido de <https://sit.conaf.cl/>
- CR2. (2021). *CAMELS Explorer*. Obtenido de <https://camels.cr2.cl/>
- CR2. (2021). *Simulaciones climáticas globales*. Obtenido de <https://www.cr2.cl/simulaciones-climaticas-globales/#:~:text=CMIP6%20coordina%20actividades%20de%20intercomparaci%C3%B3n,realizan%20conjuntos%20comunes%20de%20experimentos>.
- CREAN. (2022). *Índice de Palmer – Palmer Drought Severity Index (PDSI)*. Obtenido de <https://www.crean.unc.edu.ar/pdsi-2022-1/>
- DGA. (2019). *Proyecciones de cambio hidrológico*.
- Duan, Q., Gupta, V., & Sorooshian, S. (Marzo de 1993). Shuffled complex evolution approach for effective and efficient global minimization. *J Optim Theory Appl. J Optim Theory Appl*, págs. 501-523.
- Foundation, W. a. (2022). *En la aridez hay vida que preservar*. Obtenido de <https://www.wearewater.org/es/insights/en-la-aridez-hay-vida-que-debemos-preservar/>
- Garay, D. A. (2022). *PROYECCIONES DE EVENTOS EXTREMOS BAJO NUEVOS ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO CMIP6 EN LA ZONA CENTRAL DE CHILE PARA EL PERÍODO 2025-2085*. Santiago de Chile.
- Gateño, F. (2022). *¿CÓMO SELECCIONAR MODELOS DE CIRCULACIÓN GENERAL PARA ESTUDIOS REGIONALES? PROPUESTA METODOLÓGICA BASADA EN EL DESEMPEÑO HISTÓRICO*.
- González, F. L. (2021). *ANÁLISIS DEL IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO SOBRE LOS RECURSOS HÍDRICOS DE CUENCAS EN RÉGIMEN NATURAL UBICADAS EN LA ZONA ALTA DEL RÍO MATAQUITO. COMPARACIÓN ENTRE LOS ESCENARIOS RCP 8.5 Y RCP 4.5*. Santiago de Chile.
- Government of Canada. (2023). *CMIP6 and Shared Socio-economic Pathways overview*.
- Hrachowitz, M., & P. Clark, M. (2017). *HESS Opinions: The complementary merits of competing modelling philosophies in hydrology*. *Hidrology and earth system sciences*.
- IPCC. (2021). *Cambio climático, Bases físicas*.
- IPCC. (2023). *Climate change 2023 Synthesis Report*.

- Klemes, V. (1986). Operational testing of hydrological simulation models. *Hydrological Sciences Journal*, págs. 13-24.
- McKee, T., Doesken, N., & Kleist, J. (1993). Relationship of Drought Frequency and Duration to Time Scales. *Proceedings of the Eighth Conference on Applied Climatology*. págs. 179-184.
- Mendoza, P. (2010). *Pronóstico de caudales de crecida mediante un modelo hidrológico distribuido y la asimilación de datos observados*. Santiago de Chile.
- Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible. (2023). *República de Colombia, Índice de aridez (IA)*. Bogota.
- Muñoz, E. (mayo de 2019). Análisis hidrológico de la cuenca del río olivares frente a sequías extremas en escenarios de retroceso glaciario mediante la implementación del modelo glacio-hidrológico TOPKAPI-ETH.
- Nalbantis, I., & Tsakiris, G. (30 de junio de 2008). Assessment of Hydrological Drought Revisited.
- NASA. (2020). *ORNL DAAC*. Obtenido de [https://daac.ornl.gov/SOILS/guides/Global\\_Hydrologic\\_Soil\\_Group.html#acqmatmethods](https://daac.ornl.gov/SOILS/guides/Global_Hydrologic_Soil_Group.html#acqmatmethods)
- Necco, G., & Aiello, J. L. (2021). *Bolsa de comercio de Rosario*. Obtenido de [https://www.bcr.com.ar/sites/default/files/2021-09/2021\\_0902\\_informe\\_final\\_sequias.pdf](https://www.bcr.com.ar/sites/default/files/2021-09/2021_0902_informe_final_sequias.pdf)
- OMM. (2016). *Manual de indicadores e índices de sequías*.
- O'Neill, B. C., Eyring, V., Friedlingstein, P., Hurtt, G., & Sanderson, B. M. (2016). *The scenario model intercomparison project (ScenarioMIP) for CMIP6*. Geoscientific Model Development.
- O'Neill, B. C., Tebaldi, C., Van Vuuren, D. P., Eyring, V., Friedlingstein, P., Hurtt, G., . . . Sanderson, B. M. (2016). *The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6*. doi:<https://doi.org/10.5194/gmd-9-3461-2016>
- Podestá, G., Skansi, M. d., Herrera, N., & Veiga, H. (2020). *Descripción de índices para el monitoreo de sequía meteorológica implementados por el Centro Regional del Clima para el Sur de América del Sur*. Miami.
- PRDW, C. P. (2023). *PRDW*. Obtenido de <https://prdw.com/about/>
- Rasoulzadeh, A., Bezaatpour, J., Azizi Mobaser, J., & Fernández-Gálvez, J. (2024). *Performance of a Set of Soil Water Retention Models for Fitting Soil Water Retention Data Covering All Textural Classes*. doi:<https://doi.org/10.3390/land13040487>
- Refsgaard, J. y. (1996). *Distributed hydrological modelling*.
- Riahi, K., P. Van Vuuren, D., Kriegler, E., Edmonds, J., O'Neill, B., Fujimori, S., . . . Tavoni, M. (2017). *The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview*. *Global Environmental Change*.
- Riahi, K., Rao, S., Krey, V., Cho, C., Chirkov, V., Fischer, G., . . . Rafaj, P. (2011). *RCP 8.5—A scenario of comparatively high greenhouse gas emissions*. *Climatic Change* .

- Saavedra, D., Mendoza, P., Addor, N., Llauca, H., & Vargas, X. (19 de Noviembre de 2021). A multi-objective approach to select hydrological models and constrain structural uncertainties for climate impact assessment. *Hy*.
- Salvador, U., Lopez, R., Lluviaria, T., Torres, I., & Galván, E. (septiembre de 2019). Análisis del índice de sequía en caudales (SDI) empleando escurrimiento natural en la cuenca mexicana del río Lerma.
- Santos, L., Thirel, G., & Perrin, C. (2018). *Technical note: Pitfalls in using log-transformed flows within the KGE criterion*. Antony: Hydrology and earth system sciences. doi:<https://doi.org/10.5194/hess-22-4583-2018>
- Scordo, F., Piccolo, M. C., & Perillo, G. M. (2018). *Aplicacion del indice de precipitacion, evapotranspiracionestandarizada para identificar periodos humedos y secos en la patagonia andina y extra andinha argentina*. Buenos Aires.
- Serrano, V., M., S., LORENZO-LACRUZ, Jorge, S. B., CAMARERO, J. J., LÓPEZ-MORENO, J. I., . . . SÁNCHEZ-LORENZO, A. (2016). *ANÁLISIS COMPARATIVO DE DIFERENTES ÍNDICES DE SEQUÍA PARA APLICACIONES ECOLÓGICAS, AGRÍCOLAS E HIDROLÓGICAS*.
- Travisany, O., & Mendez, R. (30 de Noviembre de 2022). Aplicación de modelos hidrológicos. *El Higo*.
- Unidas, N. (s.f.). *¿Que es el cambio climático?* Obtenido de <https://www.un.org/es/climatechange/what-is-climate-change>
- University, Oregon State. (2019). *INTRODUCTION TO CLIMATE SCIENCE*. Obtenido de <https://open.oregonstate.education/climatechange/chapter/impacts/>
- Van Roy, M. P. (1965). A rainfall anomaly index independent of time and space. págs. 14, 43-48.
- Vicario, L., García, C. M., & Bertoni, J. C. (2014). *Evaluación de un índice para cuantificar sequías hidrológicas utilizando series sintéticas que incluyen variaciones temporales generadas por distintos procesos*. Córdoba: Universidad nacional de Córdoba.
- Vicente-Serrano, S., Beguería, S., & Lopez-Moreno, J. (2010). *A Multiscalar Drought Index Sensitive to Global Warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index*. doi:10.1175/2009JCLI2909
- Vitolo, C. (2016). *FUSE: an R package implementing the Framework for Understanding Structural Errors*. Obtenido de <https://cvitolo.github.io/fuse/>
- Wilby, R., & Dessai, S. (2010). *Robust adaptation to climate change*. Royal Meteorological Society. doi:10.1002/wea.543
- Xu, L., Lettenmaier, D., Wood, E., & Burges, S. (1994). *A simplehydrologicallybasedmodelof land surfacewater and energyfluxesfor generalcirculationmodel*. Seattle: JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH, .
- Zalokar, L., Kobold, M., & Sraj, M. (2021). Investigation of Spatial and Temporal Variability of Spatial and Temporal Variability of Hydrological Drought in Slovenia Using the Standardised Streamflow Index (SSI). *Water*.

# Anexos

## Anexo A: Metodología

### A.1. Estructuras de modelo FUSE no modificados

*Tabla B-1: Estructuras FUSE no modificados en la modelación*

<b>Posición respectiva</b>	<b>Estructura del modelo</b>	<b>Opción del modelo</b>
Primera	Error de lluvia	1-Error de lluvia aditivo
		2-Error de lluvia multiplicativo
Sexta	Evaporación	1-Modelo de evaporación secuencial
		2-Ponderación de raíces
Séptima	Inter flujo	1-Sin Inter flujo
		2-Con Inter flujo
Octava	Escorrentía con retardo de tiempo	1-Uso de distribución Gamma con un parámetro de ajuste igual a 2,5
		2-Sin enrutamiento
Novena	Modelo de nieve	1-Modelo de índice de temperatura
		2-Sin modelo de nieve

## A.2. Ecuaciones SPI y SPEI.

*Ecuación A.2-1: Ecuaciones SPEI*

$$SPEI = W - \frac{C_0 + C_1 * W + C_2 * W^2}{1 + d_1 * W + d_2 * W^2 + d_3 * W^3}$$

Donde:

- $W = \sqrt{-2 * \ln (P)}$  ; Para  $P \geq 0,5$ ;  $P =$  Probabilidad de excedencia.
- Si  $P > 0,5$ ;  $W = \sqrt{-2 * \ln (1 - P)}$
- $C_0 = 2,515517$
- $C_1 = 0,802853$
- $C_2 = 0,010328$
- $d_1 = 1,432788$
- $d_2 = 0,189269$
- $d_3 = 0,001308$
- Requerimiento de balance entre Precipitación y Evapotranspiración Potencial (P-PET).

*Ecuación A.2-2: Ecuaciones SPI*

$$SPI = \frac{P - P^*}{\sigma_p}$$

Donde:

- $P =$  Precipitación
- $P^* =$  Precipitación promedio.
- $\sigma_p =$  Desviación estándar de la precipitación.

### A.3. Resolución y dimensiones para descarga de GCMs en Copernicus

Tabla B-2: Resolución y dimensiones por GCM de los datos descargados.

Modelo GCM	Resolución (x; y)	Dimensiones (filas, columnas y celdas)
CMCC_ESM2	1; 0,942	3; 2; 6
EC_EARTH_CC	1; 0.702	4; 2; 8
EC_EARTH3_veg	1; 1,121	3; 2; 6
MRI_ESM2	1; 1,121	3; 2; 6
MIROC6	1; 1,400	3; 2; 6

Tabla B-3: Referenciación geográfica para descarga de datos.

Punto Cardinal	Referencia Geográfica
Norte	-37,132 N
Sur	-40,248 S
Este	-69,889 E
Oeste	-74,141 O

### A.4. Tabla de parámetros FUSE.

Tabla B-4: Parámetros FUSE, descripción y límites. Traducido y obtenido de (Saavedra, Mendoza, Addor, Llauca, & Vargas, 2021).

Nombre del Parámetro	Descripción	Unidades	Límite Inferior	Límite Superior
RFERR_MLT	Error multiplicativo de precipitación	–	1,000	1,001
MAXWATR_1	Profundidad de la capa superior del suelo	mm	25	500

<b>Nombre del Parámetro</b>	<b>Descripción</b>	<b>Unidades</b>	<b>Límite Inferior</b>	<b>Límite Superior</b>
MAXWATR_2	Profundidad de la capa inferior del suelo	mm	50	5000
FRAC TEN	Fracción total de almacenamiento en tensión	–	0,05	0,95
FRCHZNE	Fracción de almacenamiento en tensión en zona de recarga	–	0,05	0,95
FPRIMQB	Fracción de almacenamiento en el primer reservorio base	–	0,05	0,95
RTFRAC1	Fracción de raíces en la capa superior del suelo	–	0,05	0,95
PERCRTE	Tasa de percolación	mm d <sup>-1</sup>	0,10	1000
PERCEXP	Exponente de percolación	–	1	20
SACPMLT	Multiplicador del modelo SAC para percolación en suelo seco	–	1	250
SACPEXP	Exponente del modelo SAC para percolación en suelo seco	–	1	5
PERCFRA	Fracción de percolación para almacenamiento en tensión	–	0,05	0,95
FRACLOWZ	Fracción del exceso de suelo para la zona inferior	–	0,05	0,95
IFLWRTE	Tasa de flujo intermedio	mm d <sup>-1</sup>	0,01	1000
BASERTE	Tasa de flujo base	mm d <sup>-1</sup>	0,001	1000
QB_POWR	Exponente de flujo base	–	1	10
QB_PRMS	Tasa de agotamiento del flujo base 1er reservorio	día <sup>-1</sup>	0,001	0,25
QBRATE_2A	Tasa de agotamiento del flujo base 2do reservorio	día <sup>-1</sup>	0,001	0,25

<b>Nombre del Parámetro</b>	<b>Descripción</b>	<b>Unidades</b>	<b>Límite Inferior</b>	<b>Límite Superior</b>
SAREAMAX	Área máxima saturada	–	0,001	1
ARNO_BEXP	Exponente "b" del modelo ARNO/VIC	–	0,001	3
LOGLAMB	Valor medio del índice topográfico	m	5	10
TISHAPE	Parámetro de forma para la distribución del índice topográfico Gamma	–	2	5
TIMEDELAY	Retardo temporal en el escurrimiento	día	0,01	5
MBASE	Temperatura base de fusión para el modelo de nieve	°C	0	3
MFMAX	Máximo factor de fusión para la nieve	mm °C <sup>-1</sup> día <sup>-1</sup>	2	8
MFMINE	Mínimo factor de fusión para la nieve	mm °C <sup>-1</sup> día <sup>-1</sup>	0,4	6
PXTEMP	Temperatura de partición lluvia-nieve	°C	-1	5
OPG	Gradiente de precipitación con la elevación	km <sup>-1</sup>	0	2,5
LAPSE	Tasa de disminución de la temperatura con la altitud	°C/km	-7	-4

# Anexo B: Resultados y discusión

## B.1. Promedios logarítmicos de datos observados de es- correntía para las cuencas en estudio.

Tabla B-1: Promedios logarítmicos de escorrentía por cuencas en estudio.

	Cautín	Collín	Muco
Promedio Observado Logarítmico [mm/d]	1,07	1,11	0,65

## B.2. CVE cuencas anidadas, promedios GCM crudos y estadísticos por cuenca con GCM CMCC\_ESM2.

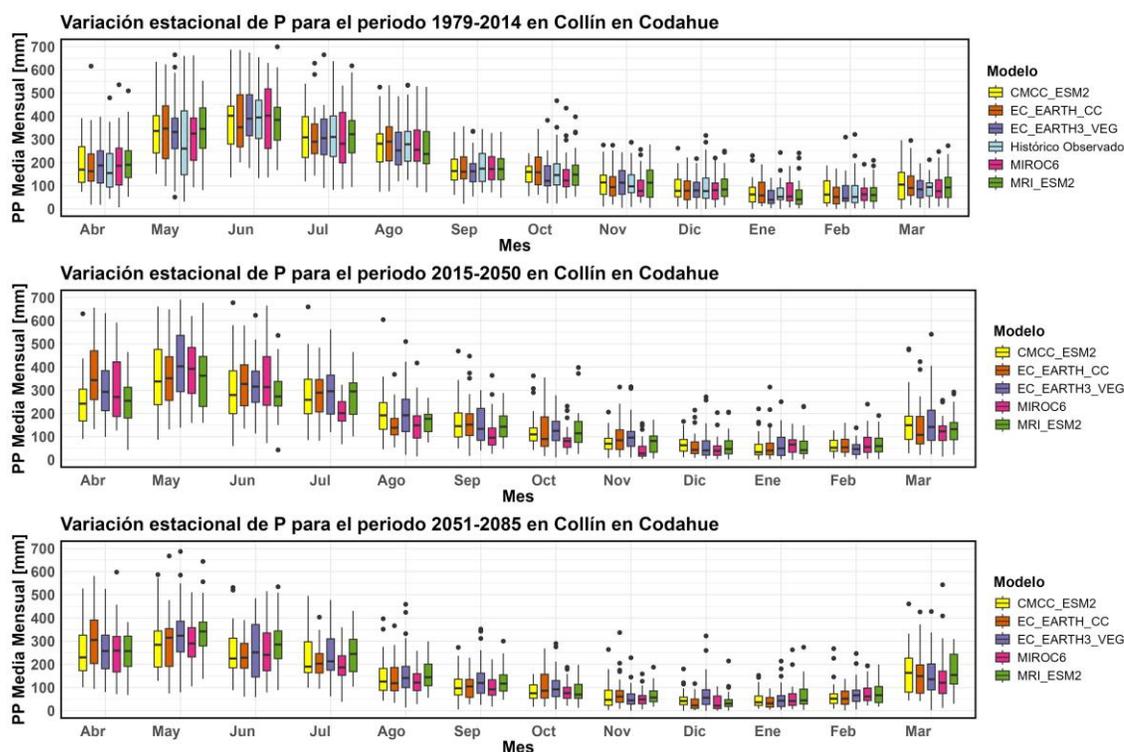


Figura B-1: Curvas de Variación estacional de precipitación, periodos desde 1979 hasta 2085. Cuenca: Collín en Codahue.

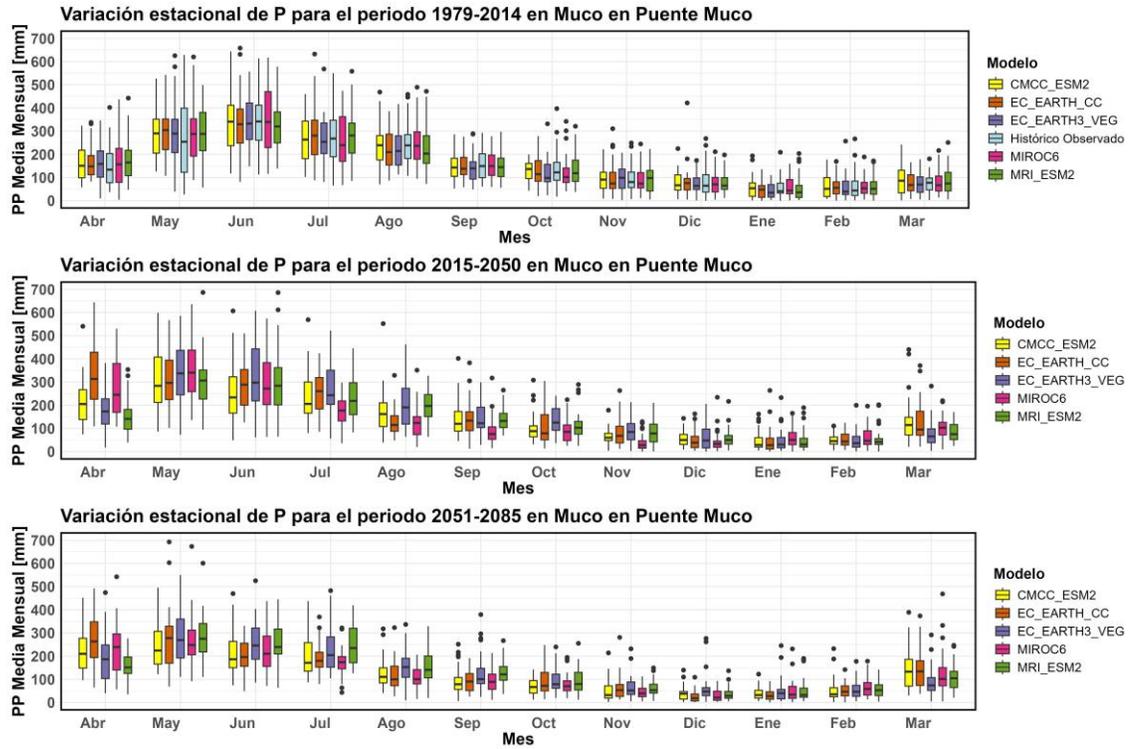


Figura B-2: Curvas de Variación estacional de precipitación, periodos desde 1979 hasta 2085. Cuenca: Muco en Puente Muco.

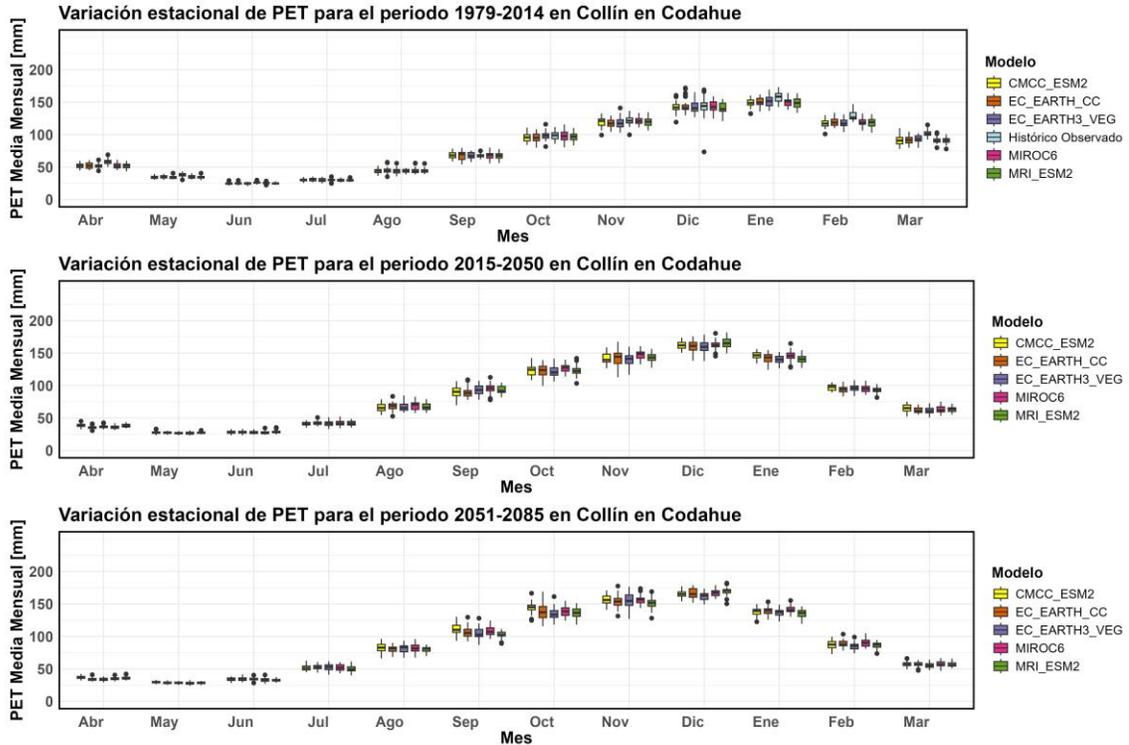


Figura B-3: Curvas de Variación estacional de evapotranspiración potencial, periodos desde 1979 hasta 2085. Collín en Codahue.

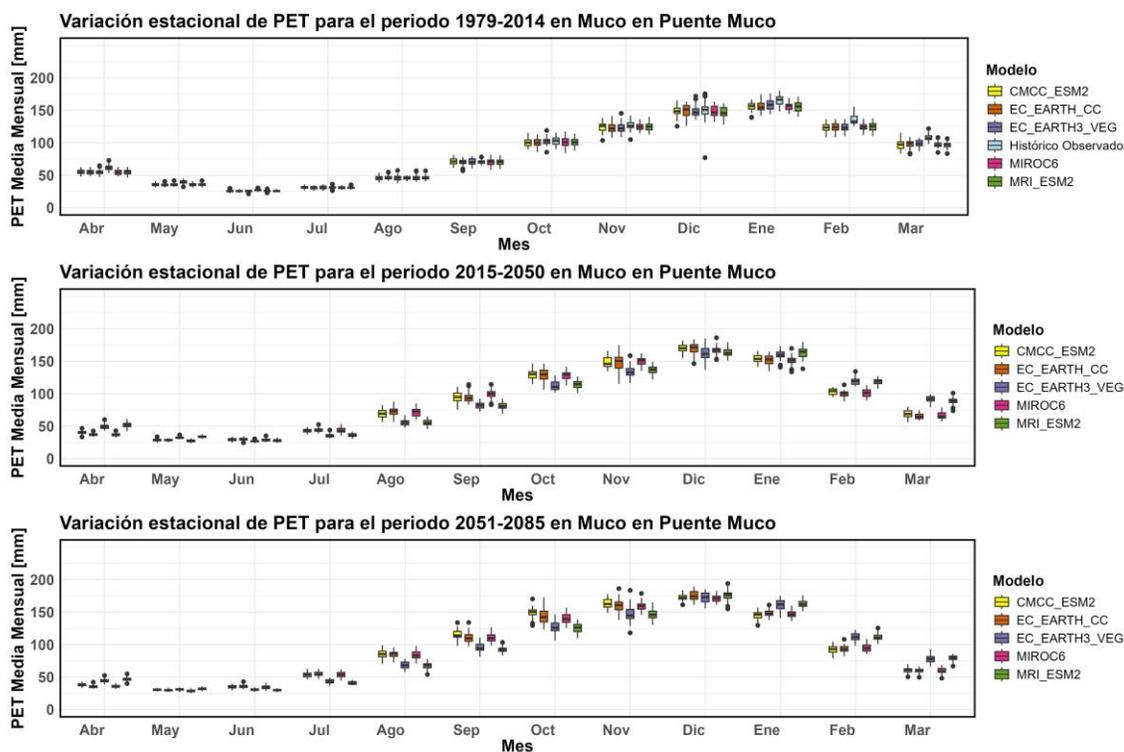


Figura B-4: Curvas de Variación estacional de evapotranspiración potencial, periodos desde 1979 hasta 2085. Muco en Puente Muco.

Tabla B-2: Promedio de forzantes para GCMs y estación, tras corregir por MBCn.

Promedios Cautín en Cajón (1979-2014)	P [mm/d]	Tmean [°C]	Tmin [°C]	Tmax [°C]
MRI_ESM2	5,98	9,76	3,66	15,87
MIROC6	5,98	9,76	3,66	15,87
EC_EARTH3_VEG	5,97	9,77	3,66	15,87
EC_EARTH_CC	5,98	9,77	3,67	15,87
CMCC_ESM2	5,97	9,76	3,66	15,87
CR2 Cautín en Cajón	5,97	9,76	3,66	15,87

Tabla B-3: Variación de forzantes para modelos y cuenca Cautín en Cajón, con datos corregidos mediante el método MBCn.

GCM	Variación (1979-2014) - Cautín en Cajón			
	P [mm/d]	Tmean [°C]	Tmin [°C]	Tmax [°C]
MRI_ESM2	0%	0	0	0
MIROC6	0%	0	0	0
EC_EARTH3_VEG	0%	0	0	0

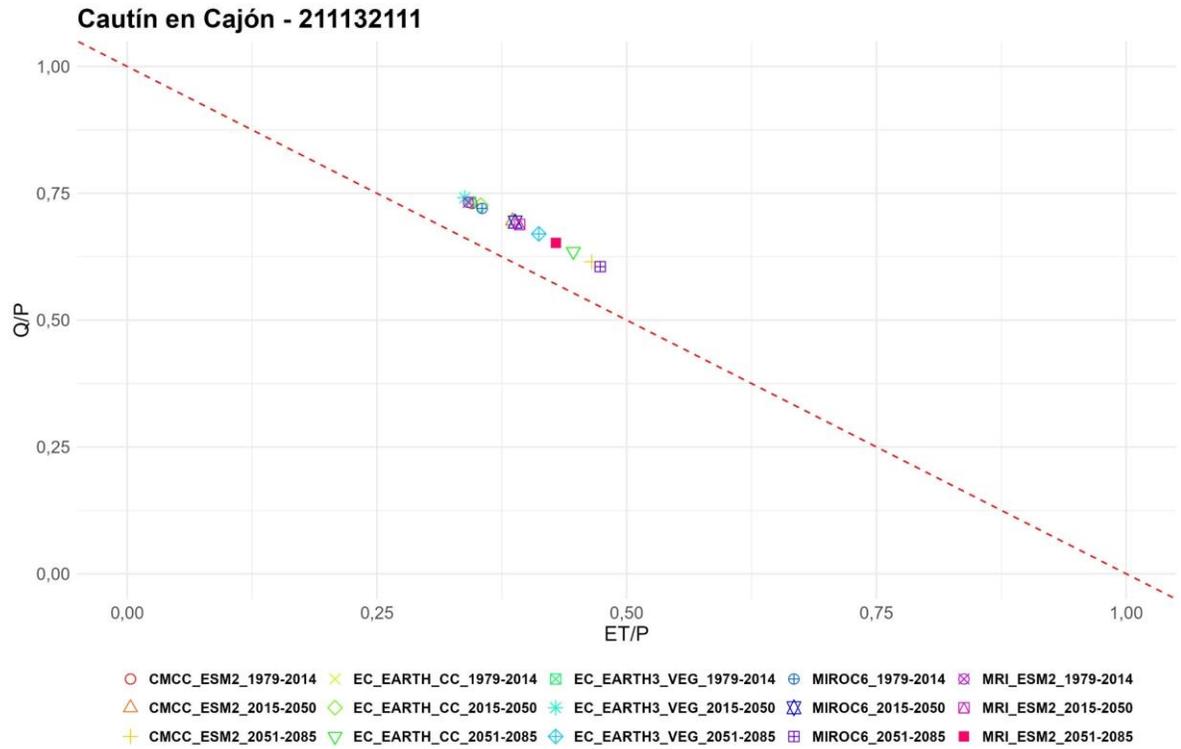
	<b>Variación (1979-2014) - Cautín en Cajón</b>			
<b>GCM</b>	<b>P [mm/d]</b>	<b>Tmean [°C]</b>	<b>Tmin [°C]</b>	<b>Tmax [°C]</b>
<b>EC_EARTH_CC</b>	0%	0	0	0
<b>CMCC_ESM2</b>	0%	0	0	0

### B.3. Análisis de balance en periodo de calibración y validación

*Tabla B-4: Valores de parámetros calibrados durante el periodo de Calibración para cuencas en estudio y sus respectivas estructuras.*

<b>Valores de Parámetros</b>									
<b>Estructura - Cautín en Cajón - Periodo de Calibración y Validación – 211132111</b>									
RFERR_MLT	MAX-WATR_1	MAX-WATR_2	FRAC-TEN	FRCH_ZNE	FPRIM_QB	RTFR_AC1	PER-CRTE	PER-CEXP	SACPM_LT
1,00	31,87	1621,78	0,44	0,50	0,07	0,43	100,00	5,00	10,00
SACPE_XP	PER-CFRAC	FRA-CLOWZ	IFLWRT_E	BA-SERT_E	QB_P_OWR	QB_P_RMS	QBRAT_E_2A	QBRAT_E_2B	SAREA_MAX
5,00	0,16	0,50	500,00	50,00	5,00	0,01	0,11	0,01	0,25
AXV_B_EXP	LO-GLAMB	TISHAPE	TIME-DELAY	MBAS_E	MFMA_X	MFMI_N	PXTEM_P	OPG	LAPSE
0,16	7,50	3,00	2,44	1,48	5,54	4,42	1,00	0,99	-5,78
<b>Estructura - Collín en Codahue - Periodo de Calibración y Validación – 211132111</b>									
RFERR_MLT	MAX-WATR_1	MAX-WATR_2	FRAC-TEN	FRCH_ZNE	FPRIM_QB	RTFR_AC1	PER-CRTE	PER-CEXP	SACPM_LT
1,00	53,23	842,47	0,41	0,50	0,59	0,34	100,00	5,00	26,50
SACPE_XP	PER-CFRAC	FRA-CLOWZ	IFLWRT_E	BA-SERT_E	QB_P_OWR	QB_P_RMS	QBRAT_E_2A	QBRAT_E_2B	SAREA_MAX
4,16	0,13	0,50	500,00	50,00	5,00	0,01	0,01	0,10	0,25
AXV_B_EXP	LO-GLAMB	TISHAPE	TIME-DELAY	MBAS_E	MFMA_X	MFMI_N	PXTEM_P	OPG	LAPSE
0,15	7,50	3,00	2,76	0,51	6,05	4,31	1,26	2,34	-6,12

<b>Estructura - Cautín en Cajón - Periodo de Calibración y Validación – 231122111</b>									
RFERR_MLT	MAX-WATR_1	MAX-WATR_2	FRAC-TEN	FRCH ZNE	FPRIM QB	RTFR AC1	PER-CRTE	PER-CEXP	SACPM LT
1,00	490,53	3215,43	0,15	0,50	0,77	0,82	38,83	5,49	10,00
SACPE XP	PER-CFRAC	FRA-CLOWZ	IFLWRT E	BA-SERT E	QB_P OWR	QB_P RMS	QBRAT E_2A	QBRAT E_2B	SAREA MAX
5,00	0,65	0,50	500,00	50,00	5,00	0,01	0,01	0,22	0,25
AXV_B EXP	LO-GLAMB	TISHAPE	TIME-DELAY	MBAS E	MFMA X	MFMI N	PXTEM P	OPG	LAPSE
0,16	7,50	3,00	2,65	2,84	6,85	0,94	1,26	1,65	-5,60
<b>Estructura - Muco en Puente Muco - Periodo de Calibración y Validación – 231122111</b>									
RFERR_MLT	MAX-WATR_1	MAX-WATR_2	FRAC-TEN	FRCH ZNE	FPRIM QB	RTFR AC1	PER-CRTE	PER-CEXP	SACPM LT
1,00	452,86	2625,72	0,08	0,50	0,43	0,77	607,96	11,85	10,00
SACPE XP	PER-CFRAC	FRA-CLOWZ	IFLWRT E	BA-SERT E	QB_P OWR	QB_P RMS	QBRAT E_2A	QBRAT E_2B	SAREA MAX
5,00	0,93	0,50	500,00	50,00	5,00	0,01	0,20	0,01	0,25
AXV_B EXP	LO-GLAMB	TISHAPE	TIME-DELAY	MBAS E	MFMA X	MFMI N	PXTEM P	OPG	LAPSE
0,32	7,50	3,00	3,21	1,36	5,31	5,03	3,37	1,04	-6,95



*Figura B-5: Balance hídrico de la estructura 211132111, Cautín en Cajón para todos los GCMs en las distintas ventanas temporales.*

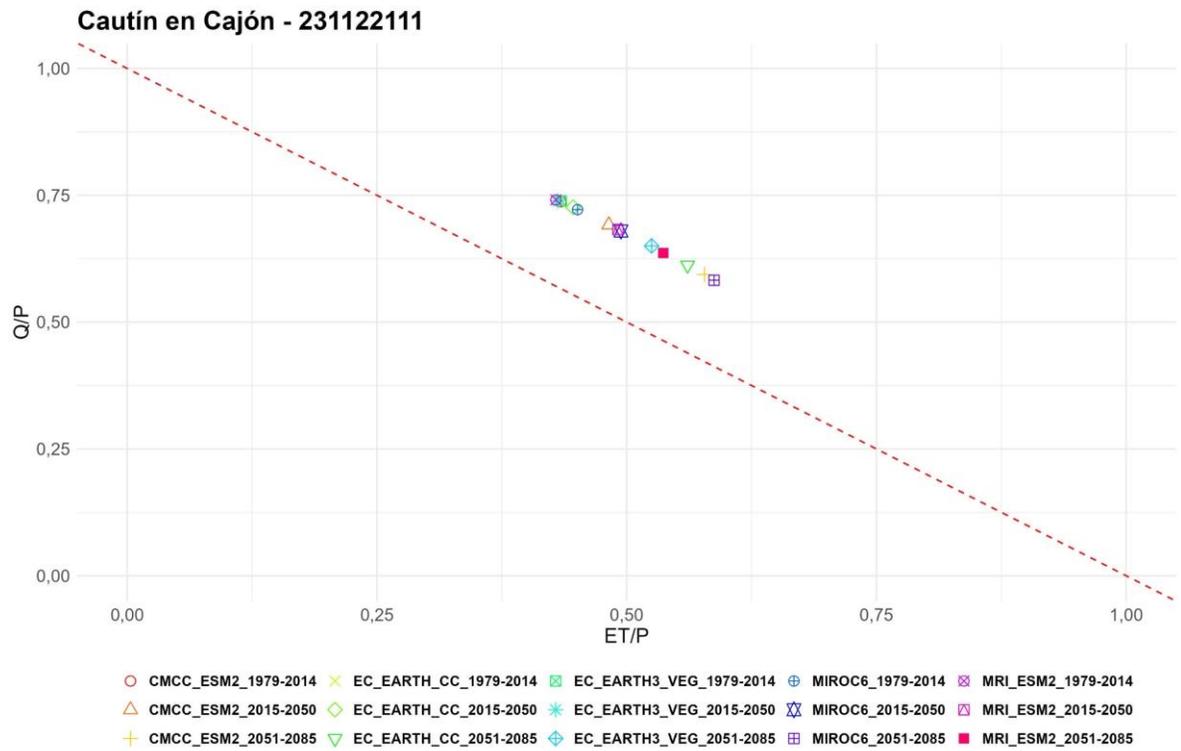
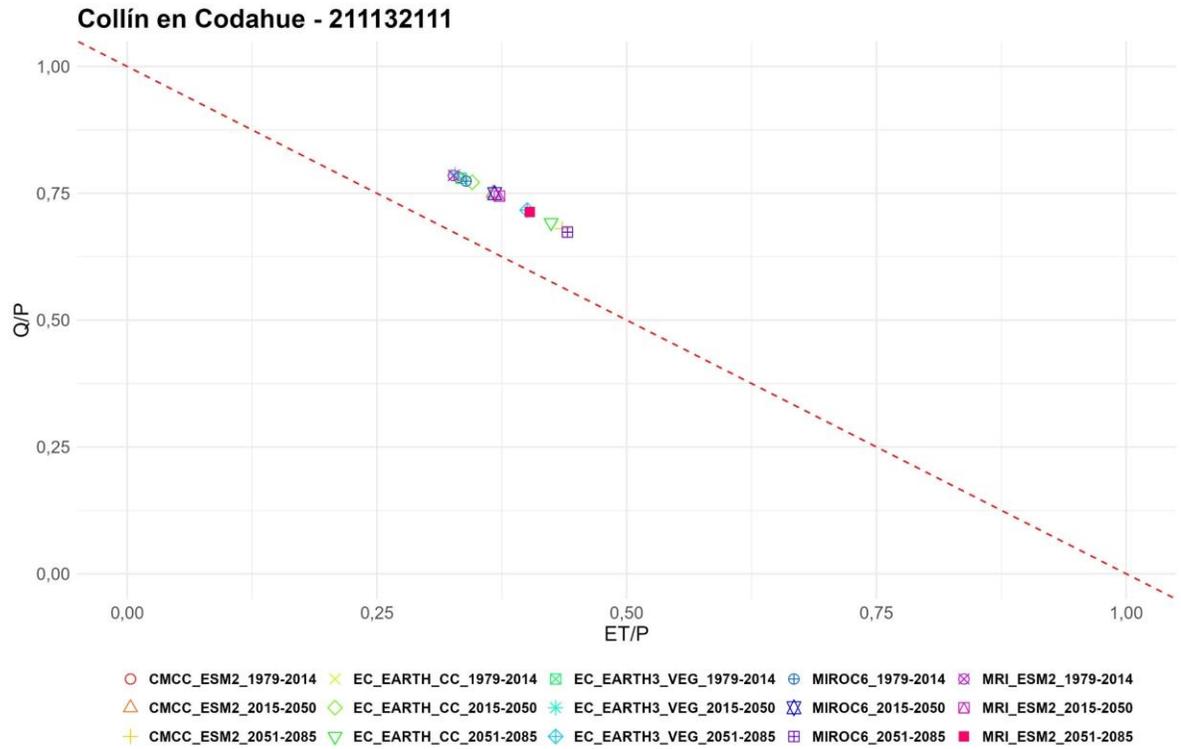
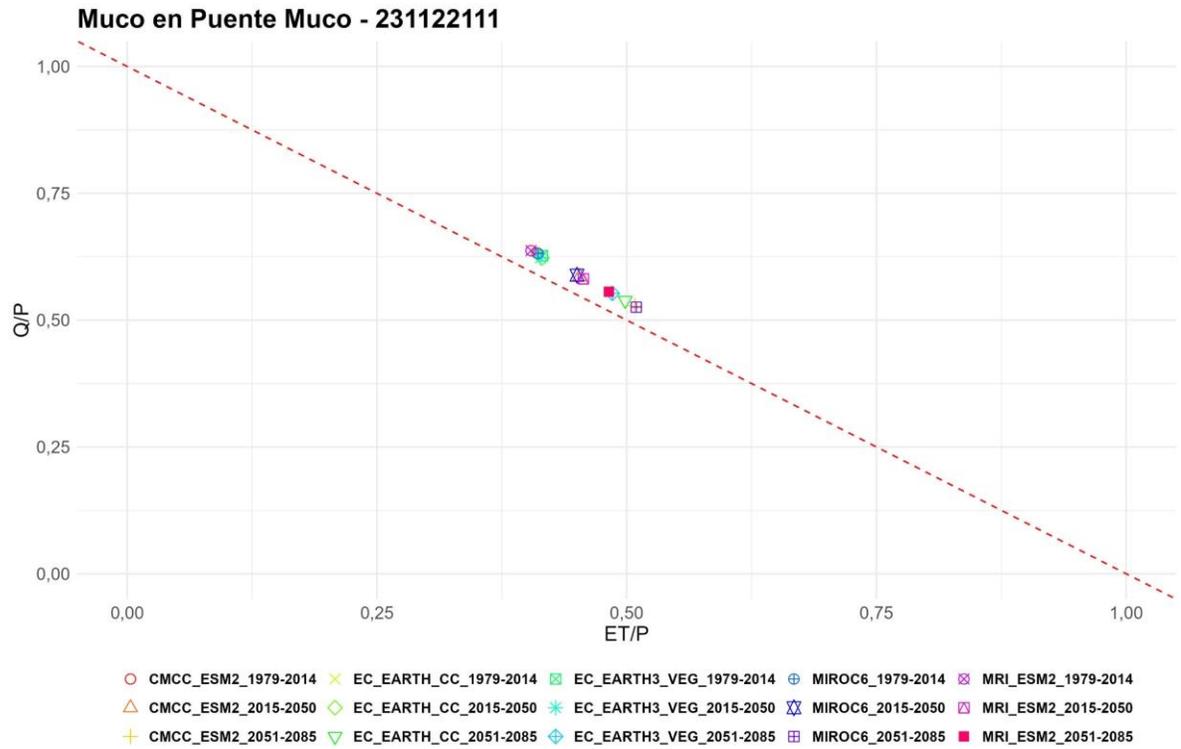


Figura B-6: Balance hídrico de la estructura 231122111, Cautín en Cajón para todos los GCMs en las distintas ventanas temporales



*Figura B-7: Balance hídrico de la estructura 211132111, Collín en Codahue para todos los GCMs en las distintas ventanas temporales.*



*Figura B-8: Balance hídrico de la estructura 231122111, Muco en Puente Muco para todos los GCMs en las distintas ventanas temporales.*

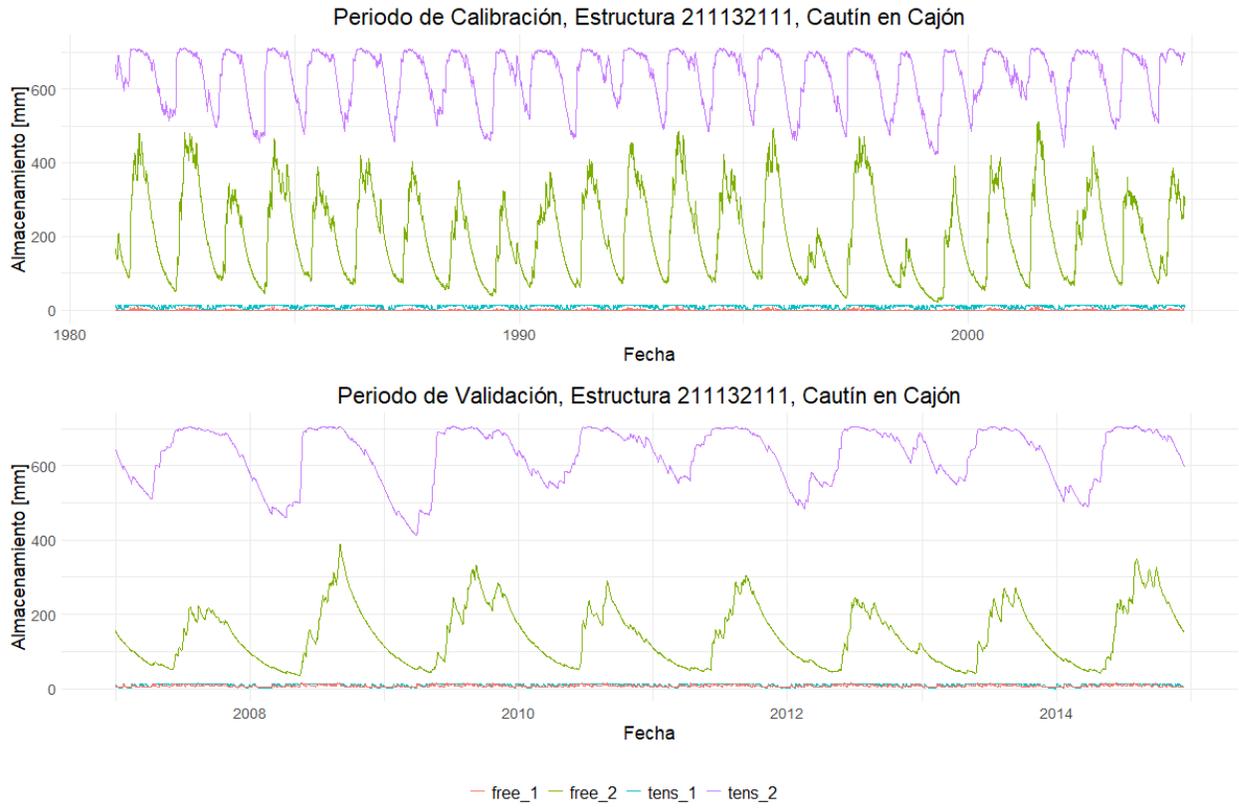


Figura B-9: Almacenamiento de agua libre y a tensión, Cautín en Cajón, 211132111.

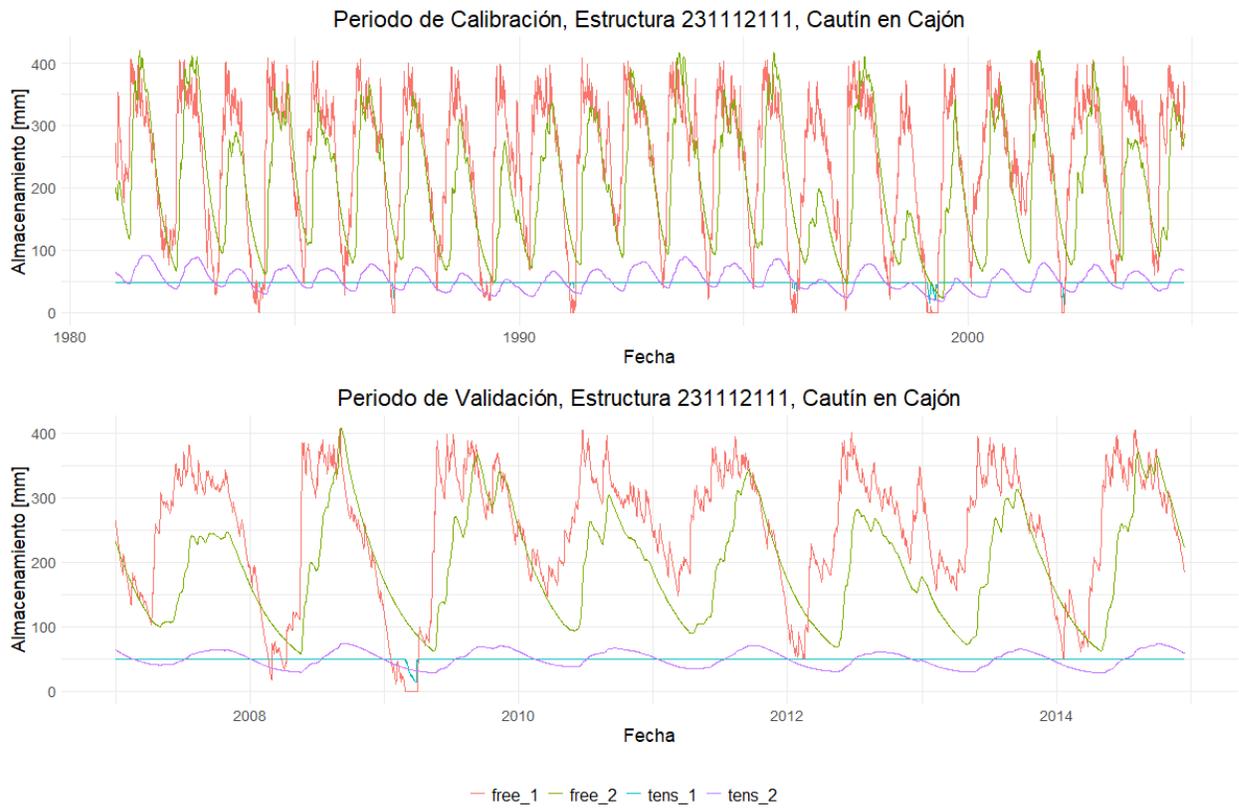
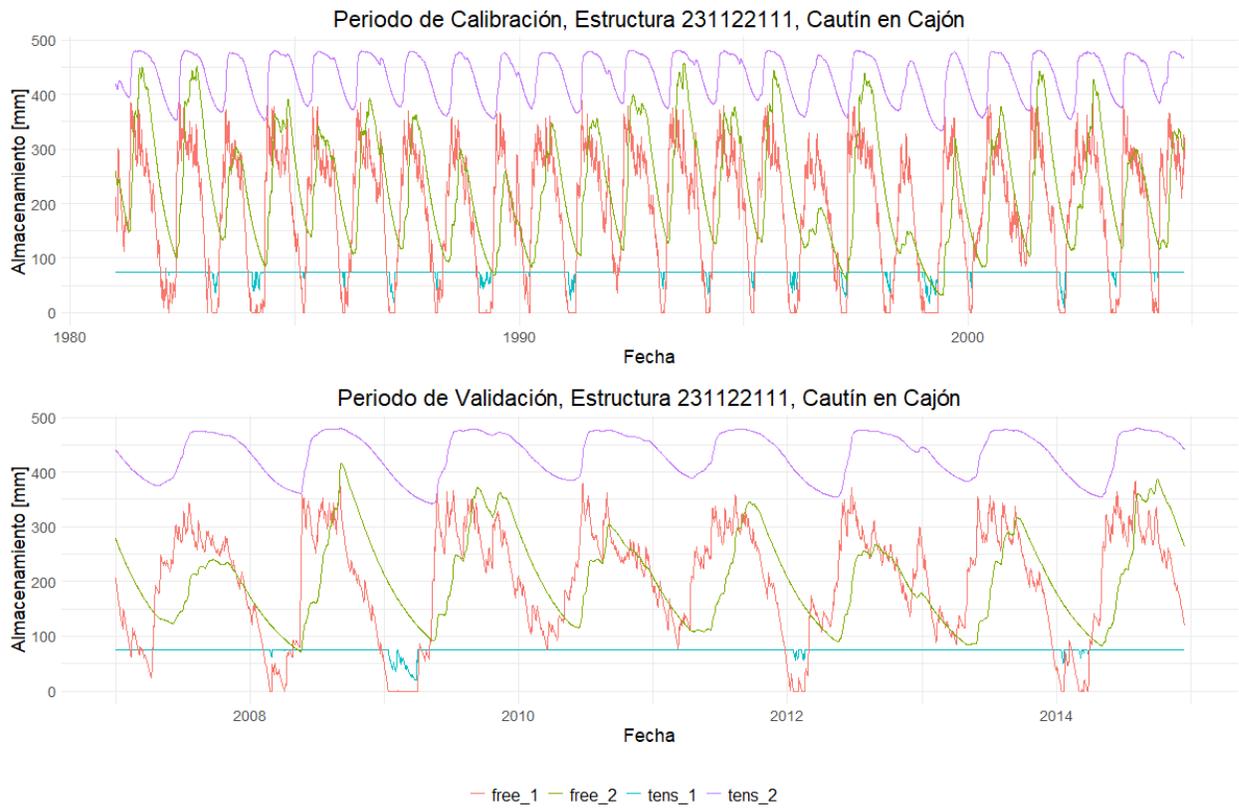


Figura B-10: Almacenamiento de agua libre y a tensión, Cautín en Cajón, 231112111.



*Figura B-11: Almacenamiento de agua libre y a tensión, Cautín en Cajón, 231122111.*

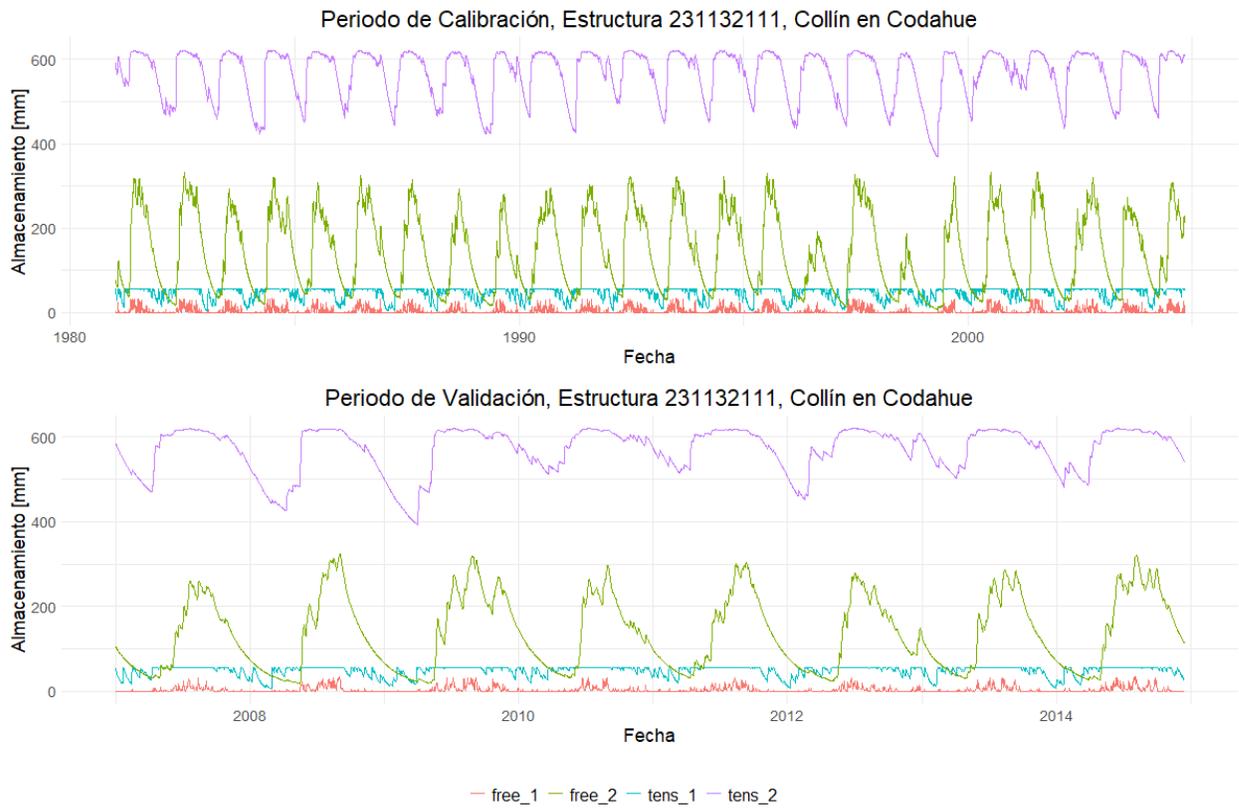


Figura B-12: Almacenamiento de agua libre y a tensión, Collín en Codahue, 231132111.

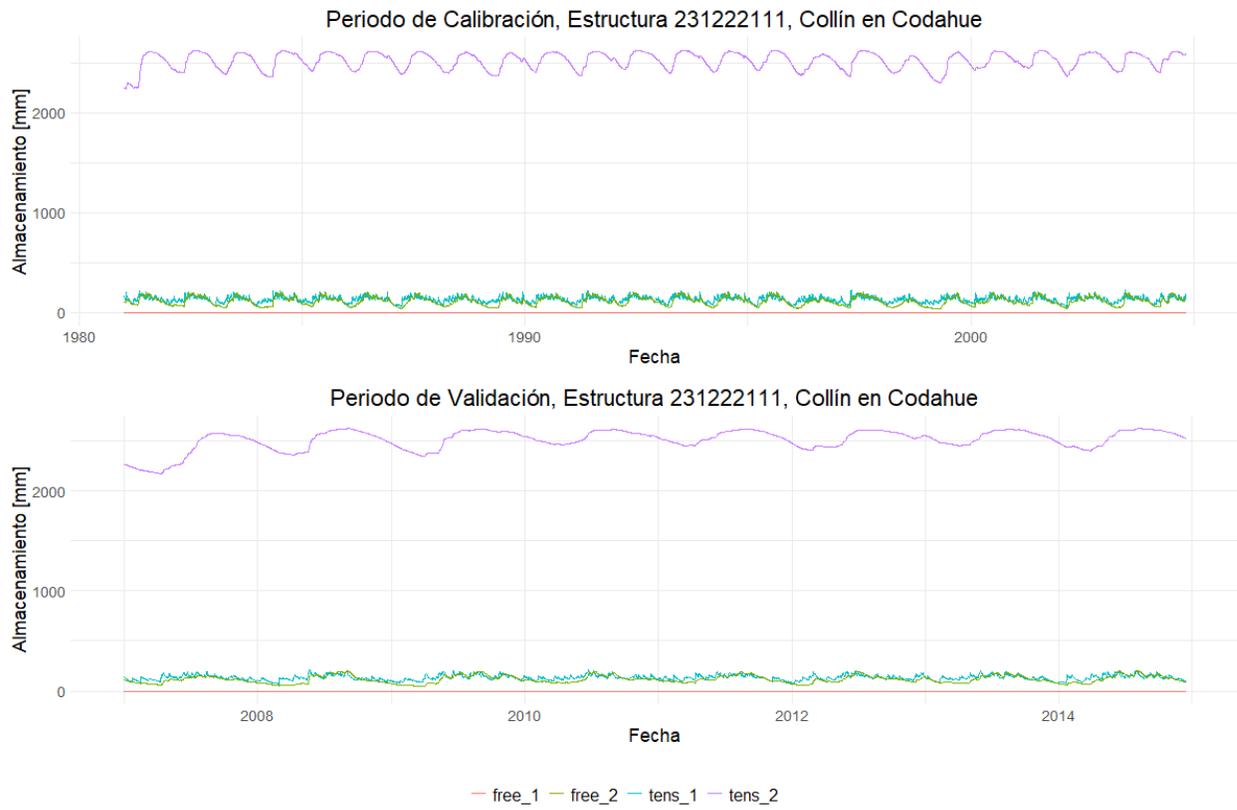


Figura B-13: Almacenamiento de agua libre y a tensión, Collín en Codahue, 231222111.

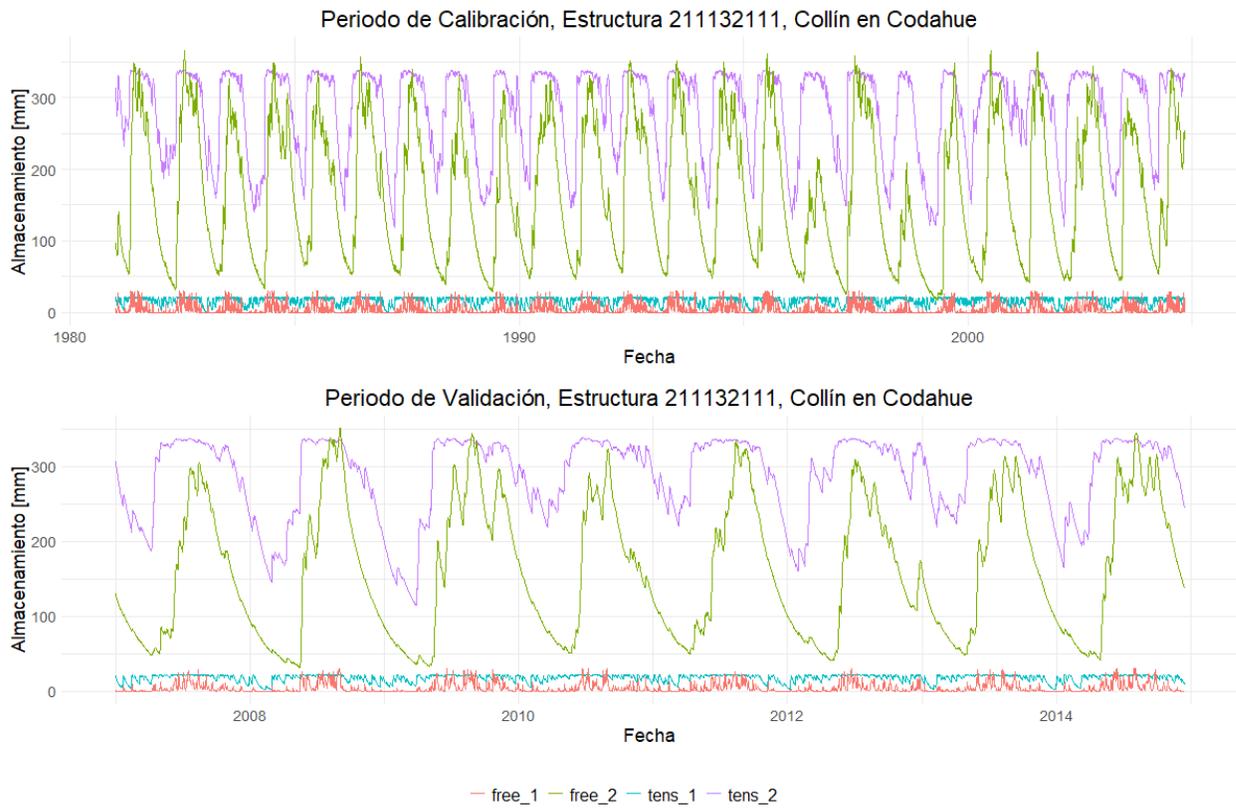


Figura B-14: Almacenamiento de agua libre y a tensión, Collín en Codahue, 211132111.

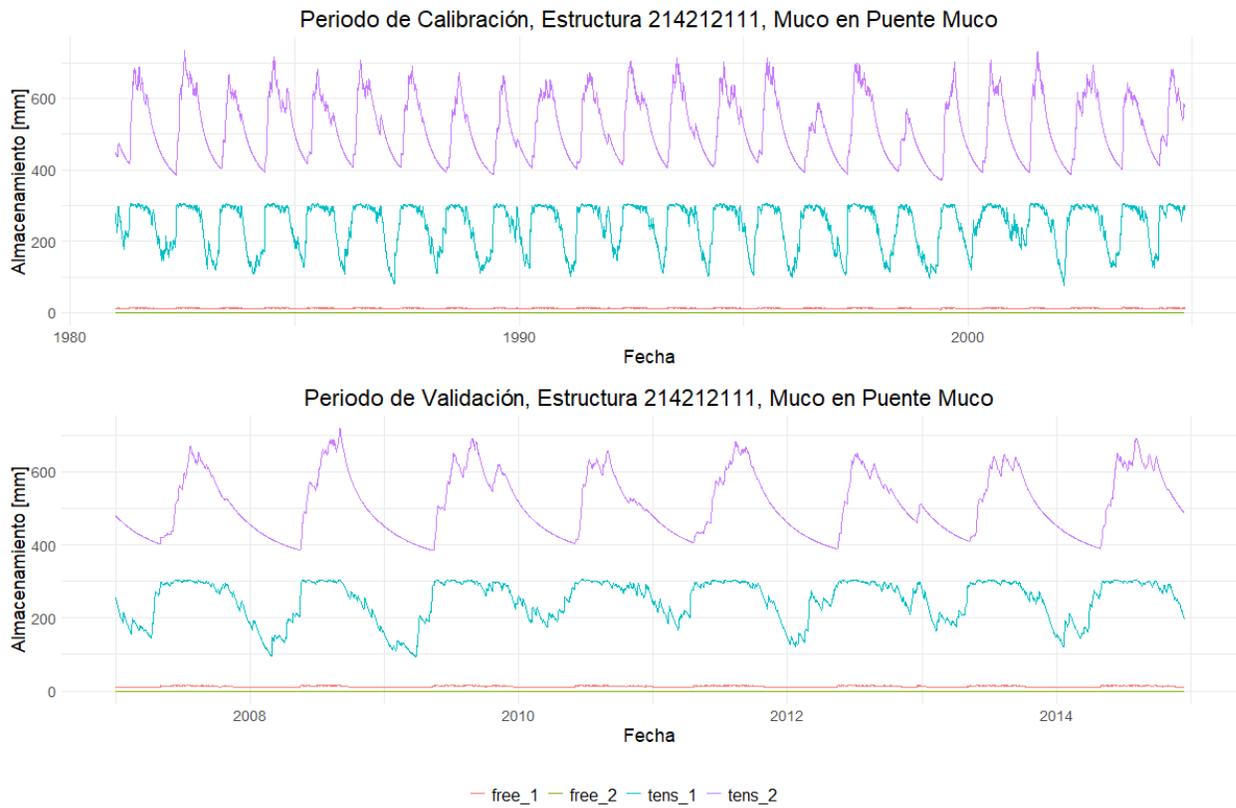


Figura B-15: Almacenamiento de agua libre y a tensión, Muco en Puente Muco, 214212111.

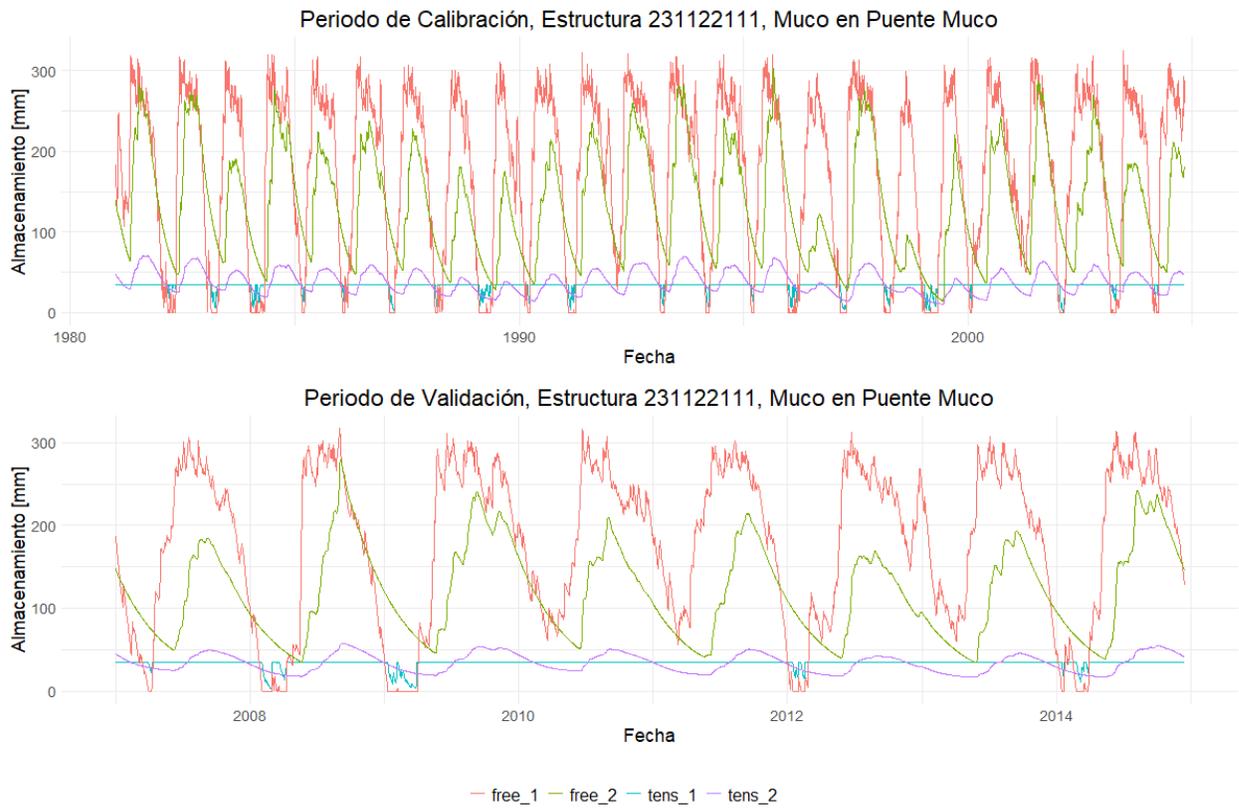


Figura B-16: Almacenamiento de agua libre y a tensión, Muco en Puente Muco, 231122111.

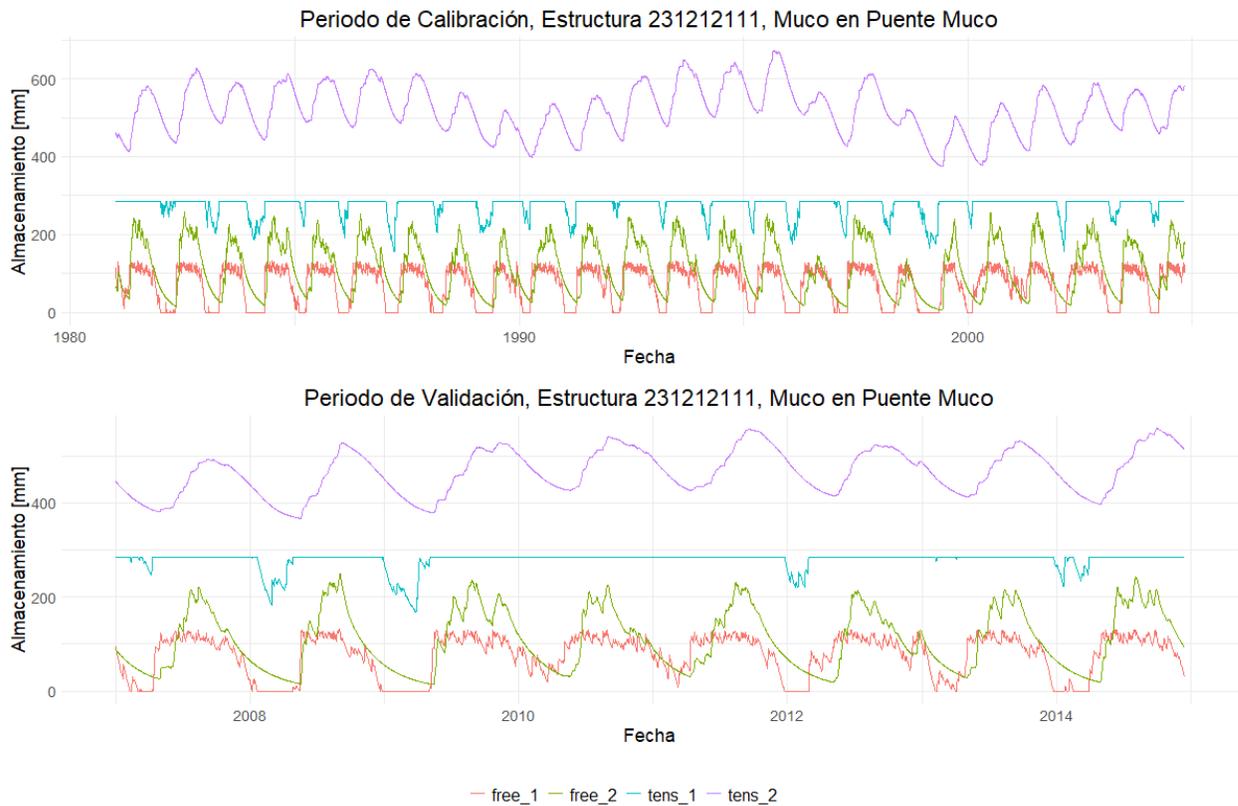


Figura B-17: Almacenamiento de agua libre y a tensión, Muco en Puente Muco, 231212111.

## B.4. Selección de GCM y gráficos de líneas RAI y SPI

Tabla B-5: Relación de coeficientes de variación (GCM – Observado), para la cuenca Collín en Codahue, en el periodo entre 1979-2014.

C.V <sub>GCM-ESCALADO</sub> - C.V <sub>Observado</sub>	
GCM	1979-2014
CMCC_ESM2	0,0009
EC_EARTH_CC	0,0002
EC_EARTH3_VEG	0,0002
MIROC6	-0,0002
MRI_ESM2	-0,0007

Tabla B-6: Relación de coeficientes de variación (GCM – Observado), para la cuenca Muco en Puente Muco, en el periodo entre 1979-2014.

<b>C.V<sub>GCM-ESCALADO</sub> - C.V<sub>Observado</sub></b>	
GCM	1979-2014
CMCC_ESM2	0,0009
EC_EARTH_CC	0,0003
EC_EARTH3_VEG	0,0001
MIROC6	-0,0003
MRI_ESM2	-0,0008

Tabla B-7: Estadísticos de Cautín en Cajón para las principales forzantes en todas las ventanas temporales trabajadas.

<b>Cautín en Cajón</b>					
<b>CMCC_ESM2 - Precipitación [mm/d]</b>		<b>CMCC_ESM2 - T.Mean [°C]</b>		<b>CMCC_ESM2 - PET [mm/d]</b>	
<b>Periodo 1979-2014</b>		<b>Periodo 1979-2014</b>		<b>Periodo 1979-2014</b>	
Promedio	5,97	Promedio	9,77	Promedio	2,70
Desv. Estándar	11,58	Desv. Estándar	4,19	Desv. Estándar	1,56
Mediana	0,00	Mediana	9,56	Mediana	2,47
Coef. Variación	1,94	Coef. Variación	0,43	Coef. Variación	0,58
<b>Periodo 2015-2050</b>		<b>Periodo 2015-2050</b>		<b>Periodo 2015-2050</b>	
Promedio	5,60	Promedio	11,02	Promedio	2,86
Desv. Estándar	11,22	Desv. Estándar	4,81	Desv. Estándar	1,66
Mediana	0,00	Mediana	10,83	Mediana	2,59
Coef. Variación	2,01	Coef. Variación	0,44	Coef. Variación	0,58
<b>Periodo 2051-2085</b>		<b>Periodo 2051-2085</b>		<b>Periodo 2051-2085</b>	
Promedio	4,60	Promedio	12,84	Promedio	3,06
Desv. Estándar	10,07	Desv. Estándar	4,73	Desv. Estándar	1,74
Mediana	0,00	Mediana	12,64	Mediana	2,79
Coef. Variación	2,19	Coef. Variación	0,37	Coef. Variación	0,57

Tabla B-8: Estadísticos de Collín en Codahue para las principales forzantes en todas las ventanas temporales trabajadas.

<b>Collín en Codahue</b>					
<b>CMCC_ESM2 - Precipitación [mm/d]</b>		<b>CMCC_ESM2 - T.Mean [°C]</b>		<b>CMCC_ESM2 - PET [mm/d]</b>	
<b>Periodo 1979-2014</b>		<b>Periodo 1979-2014</b>		<b>Periodo 1979-2014</b>	
Promedio	6,27	Promedio	9,97	Promedio	2,65
Desv. Estándar	11,71	Desv. Estándar	4,04	Desv. Estándar	1,51
Mediana	0,00	Mediana	9,80	Mediana	2,42
Coef. Variación	1,87	Coef. Variación	0,41	Coef. Variación	0,57
<b>Periodo 2015-2050</b>		<b>Periodo 2015-2050</b>		<b>Periodo 2015-2050</b>	
Promedio	5,82	Promedio	11,20	Promedio	2,81
Desv. Estándar	11,25	Desv. Estándar	4,65	Desv. Estándar	1,62
Mediana	0,00	Mediana	11,04	Mediana	2,54
Coef. Variación	1,93	Coef. Variación	0,41	Coef. Variación	0,57
<b>Periodo 2051-2085</b>		<b>Periodo 2051-2085</b>		<b>Periodo 2051-2085</b>	
Promedio	4,81	Promedio	13,03	Promedio	3,00
Desv. Estándar	10,19	Desv. Estándar	4,56	Desv. Estándar	1,69
Mediana	0,00	Mediana	12,85	Mediana	2,74
Coef. Variación	2,12	Coef. Variación	0,35	Coef. Variación	0,56

Tabla B-9: Estadísticos de Muco en Puente Muco para las principales forzantes en todas las ventanas temporales trabajadas.

<b>Muco en Puente Muco</b>					
<b>CMCC_ESM2 - Precipitación [mm/d]</b>		<b>CMCC_ESM2 - T.Mean [°C]</b>		<b>CMCC_ESM2 - PET [mm/d]</b>	
<b>Periodo 1979-2014</b>		<b>Periodo 1979-2014</b>		<b>Periodo 1979-2014</b>	
Promedio	5,34	Promedio	10,62	Promedio	2,78
Desv. Estándar	10,13	Desv. Estándar	4,01	Desv. Estándar	1,58
Mediana	0,00	Mediana	10,45	Mediana	2,55
Coef. Variación	1,90	Coef. Variación	0,38	Coef. Variación	0,57
<b>Periodo 2015-2050</b>		<b>Periodo 2015-2050</b>		<b>Periodo 2015-2050</b>	
Promedio	4,87	Promedio	11,88	Promedio	2,95
Desv. Estándar	9,75	Desv. Estándar	4,62	Desv. Estándar	1,69
Mediana	0,00	Mediana	11,71	Mediana	2,68
Coef. Variación	2,00	Coef. Variación	0,39	Coef. Variación	0,57
<b>Periodo 2051-2085</b>		<b>Periodo 2051-2085</b>		<b>Periodo 2051-2085</b>	
Promedio	4,12	Promedio	13,65	Promedio	3,12
Desv. Estándar	8,80	Desv. Estándar	4,53	Desv. Estándar	1,76
Mediana	0,00	Mediana	13,49	Mediana	2,87
Coef. Variación	2,14	Coef. Variación	0,33	Coef. Variación	0,56

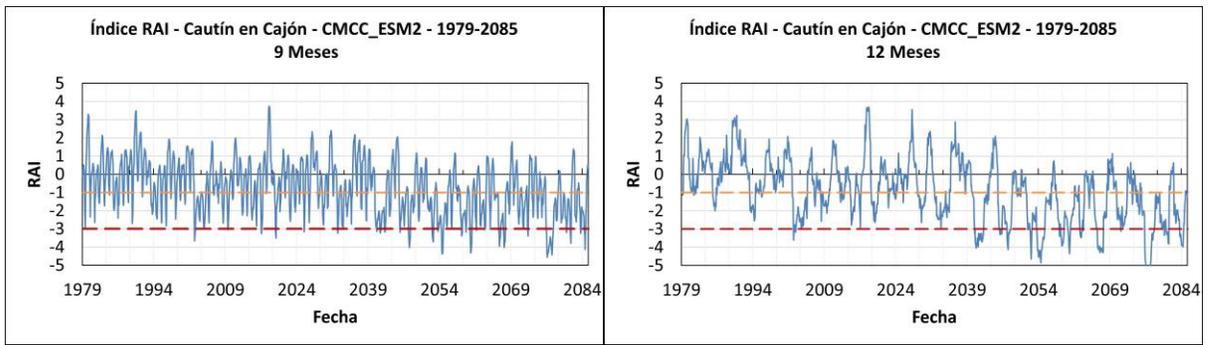


Figura B-18: Índice RAI, Cautín en Cajón GCM CMCC\_ESM2, en escala de 9 y 12 meses.

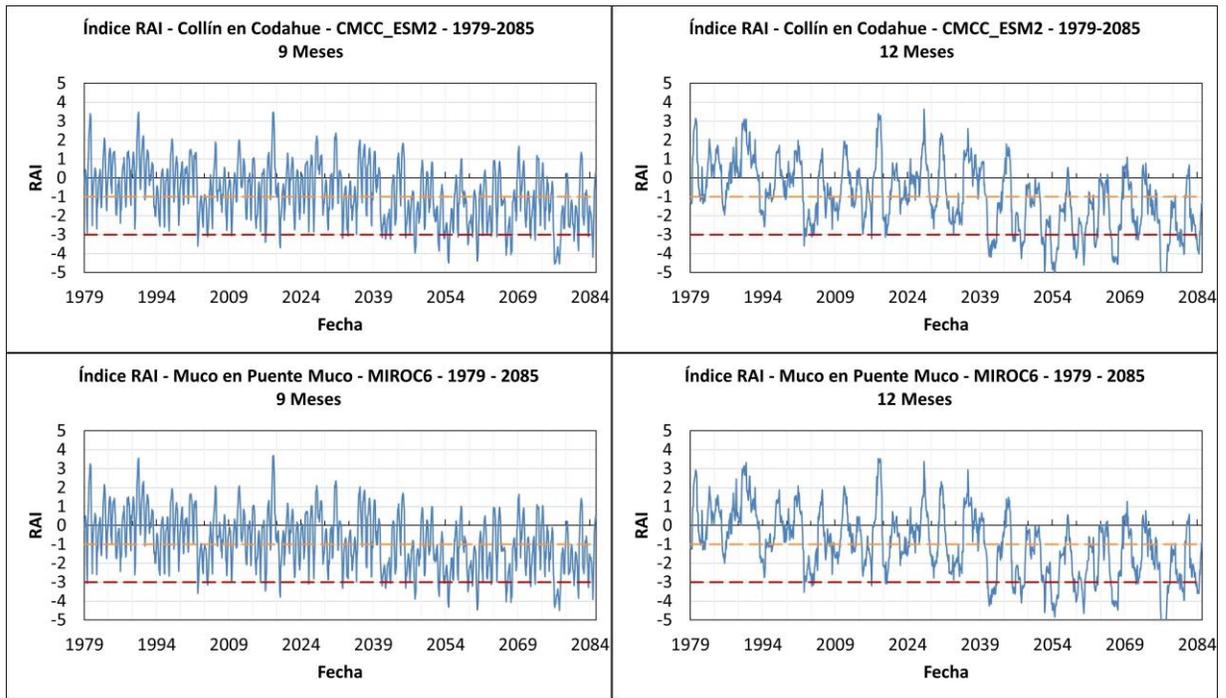


Figura B-19: Índice RAI, Collín en Codahue y Muco en Puente Muco, GCM CMCC\_ESM2, en escala de 9 y 12 meses.

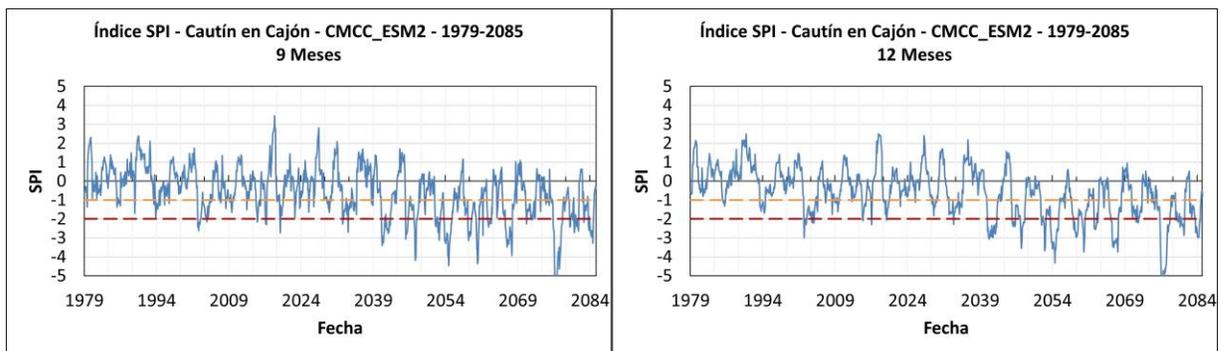


Figura B-20: Índice SPI, Cautín en Cajón, GCM CMCC\_ESM2, en escala de 9 y 12 meses.

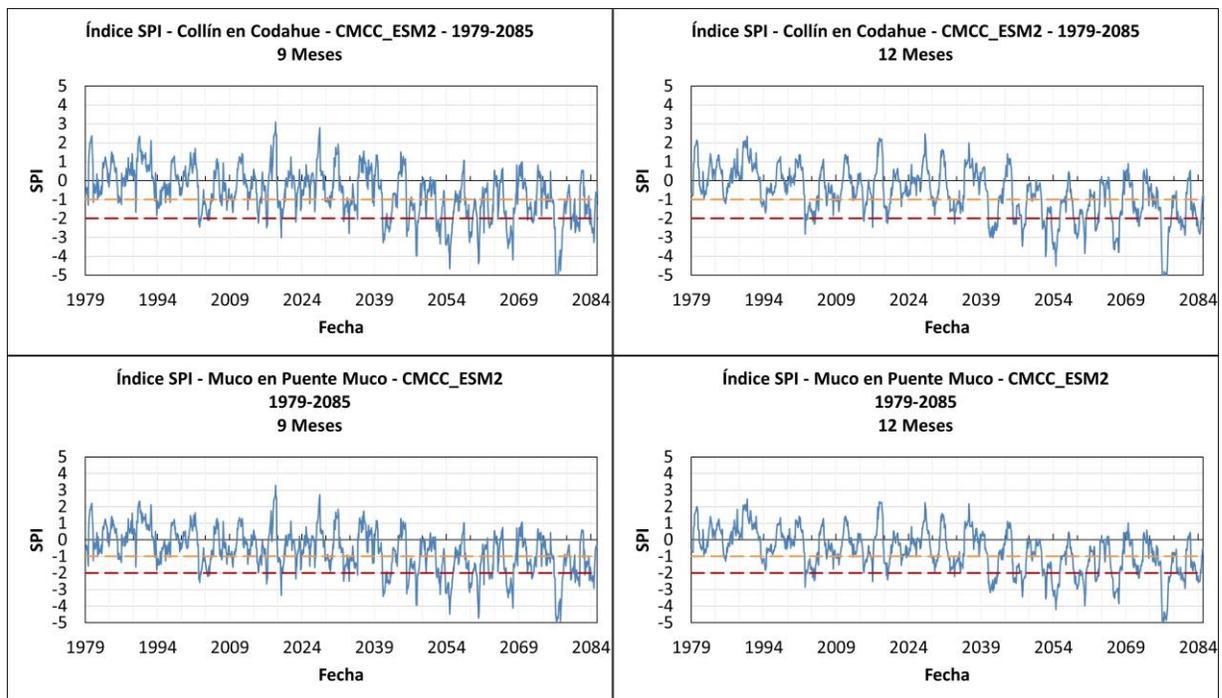


Figura B-21: Índice SPI, Collín en Codahue y Muco en Puente Muco, GCM CMCC\_ESM2, en escala de 9 y 12 meses.

## B.5. Gráficos de duración y área de los índices RAI, SPI, SPEI y SSFI

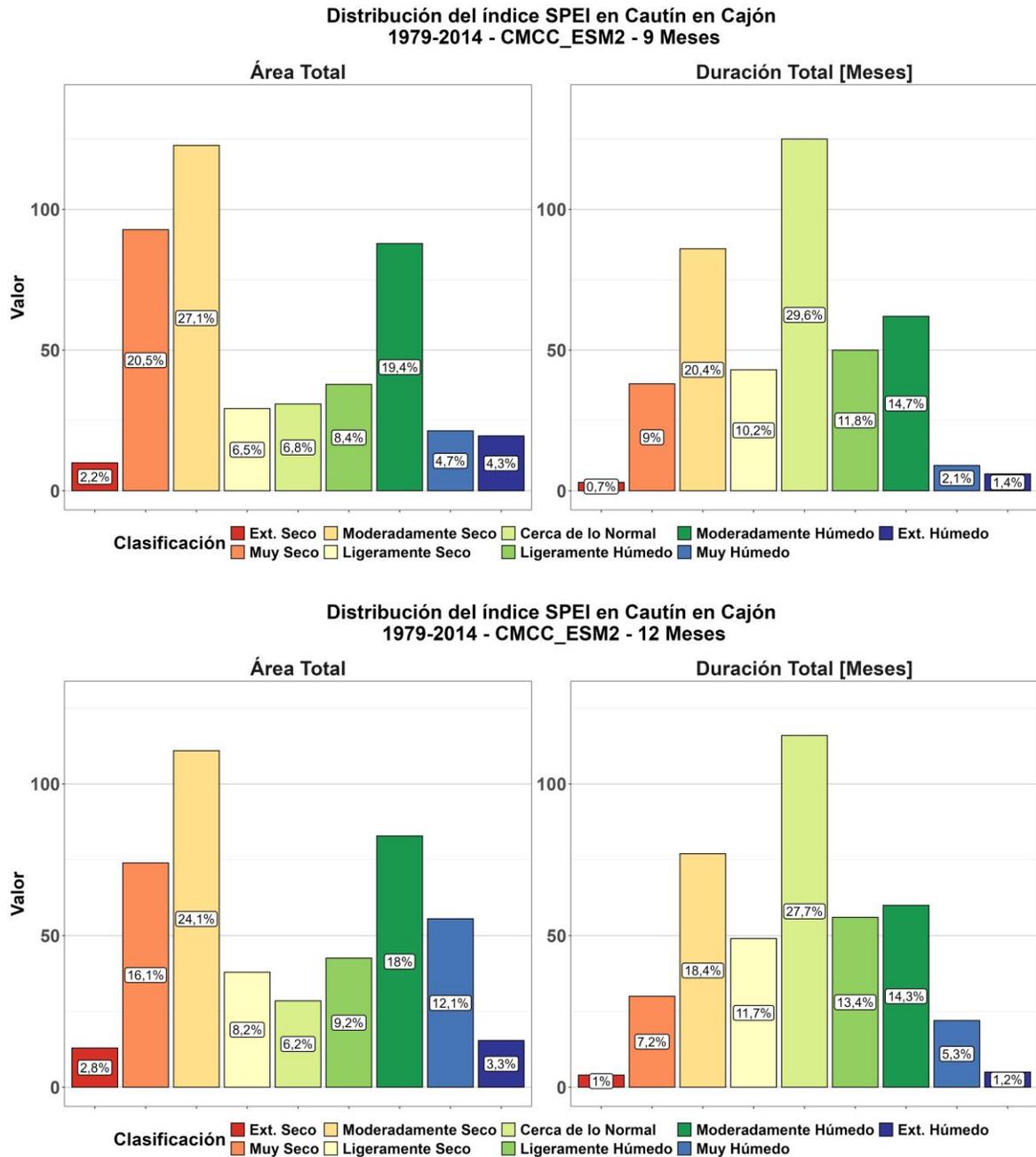
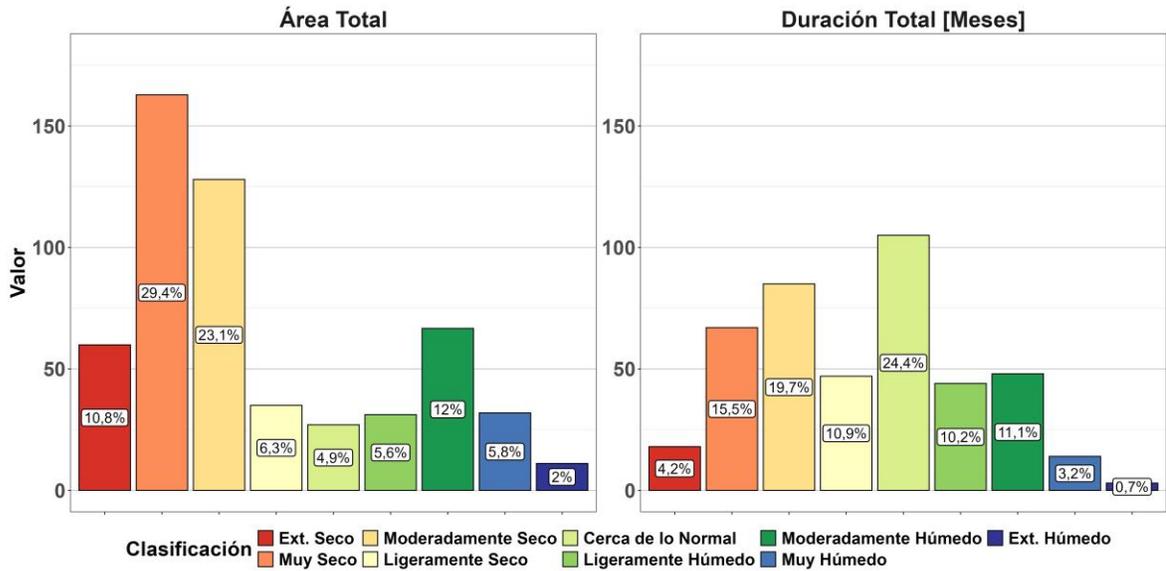


Figura B-22: Variación del índice RAI, en la cuenca de Cautín en Cajón, para el periodo de 1979 a 2014, CMCC\_ESM2, escala de 9 y 12 meses.

Distribución del índice SPEI en Cautín en Cajón  
2015-2050 - CMCC\_ESM2 - 9 Meses



Distribución del índice SPEI en Cautín en Cajón  
2015-2050 - CMCC\_ESM2 - 12 Meses

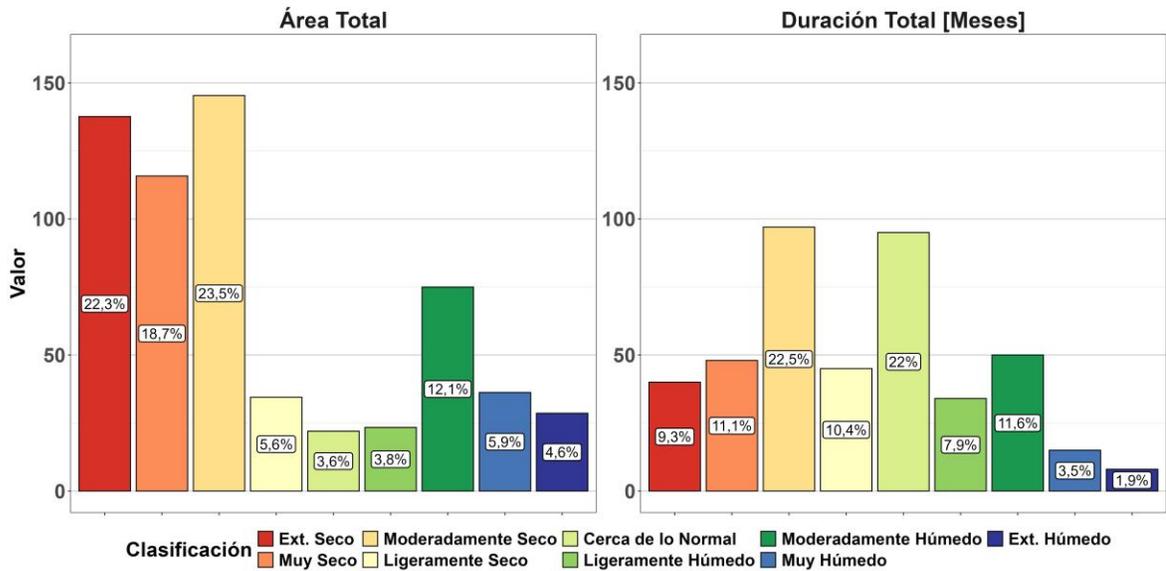
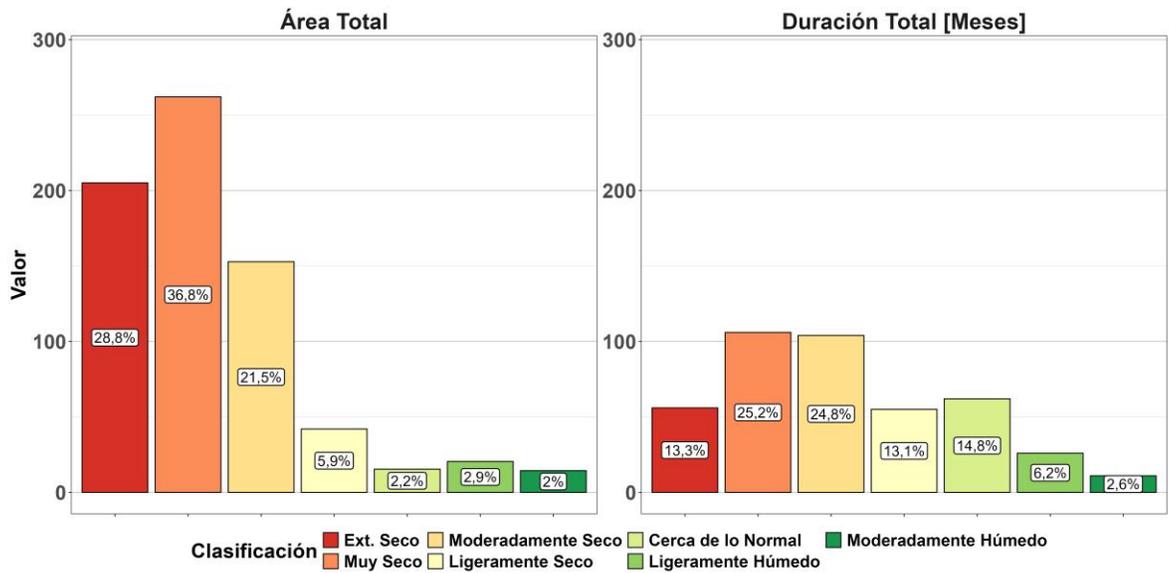
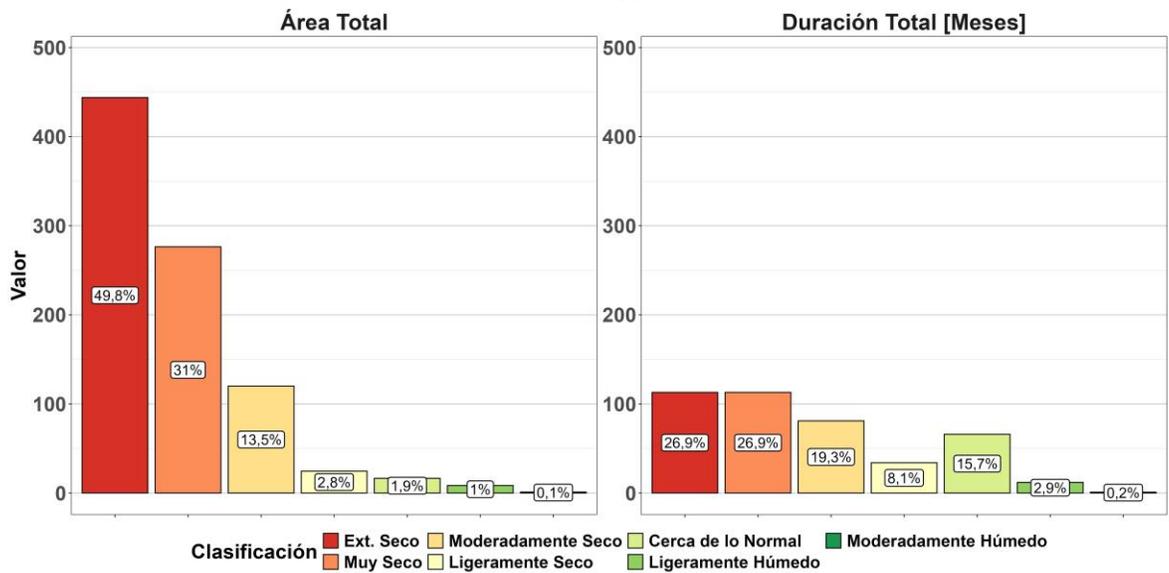


Figura B-23: Variación del índice RAI, en la cuenca de Cautín en Cajón, para el periodo de 2015 a 2050, CMCC\_ESM2, escala de 9 y 12 meses.

**Distribución del índice SPEI en Cautín en Cajón  
2051-2085 - CMCC\_ESM2 - 9 Meses**

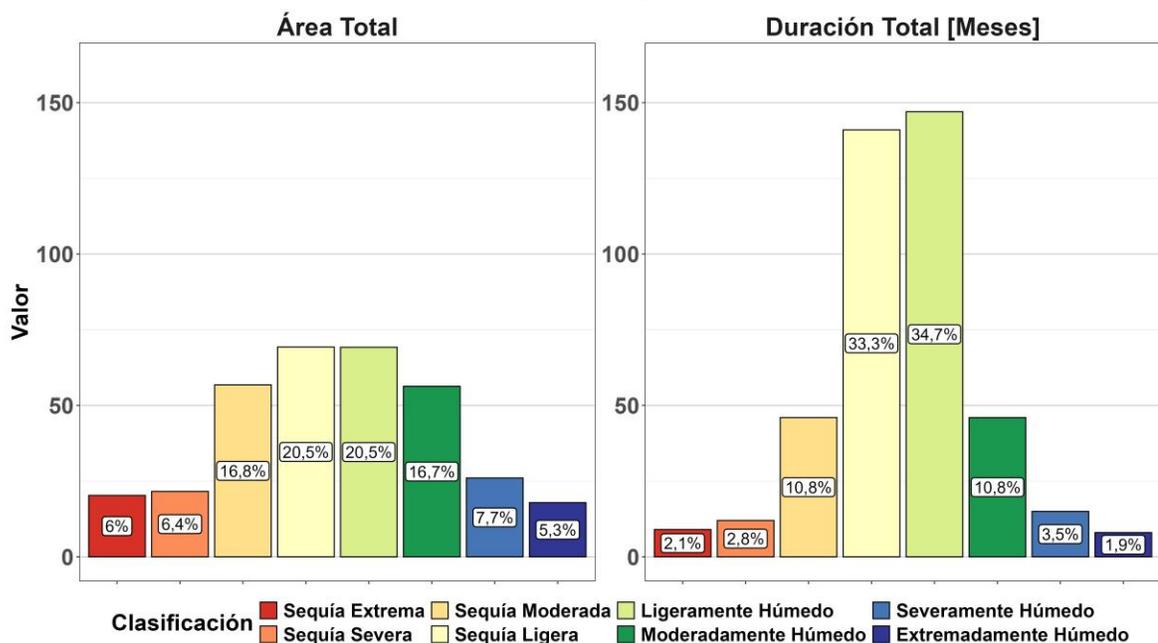


**Distribución del índice SPEI en Cautín en Cajón  
2051-2085 - CMCC\_ESM2 - 12 Meses**

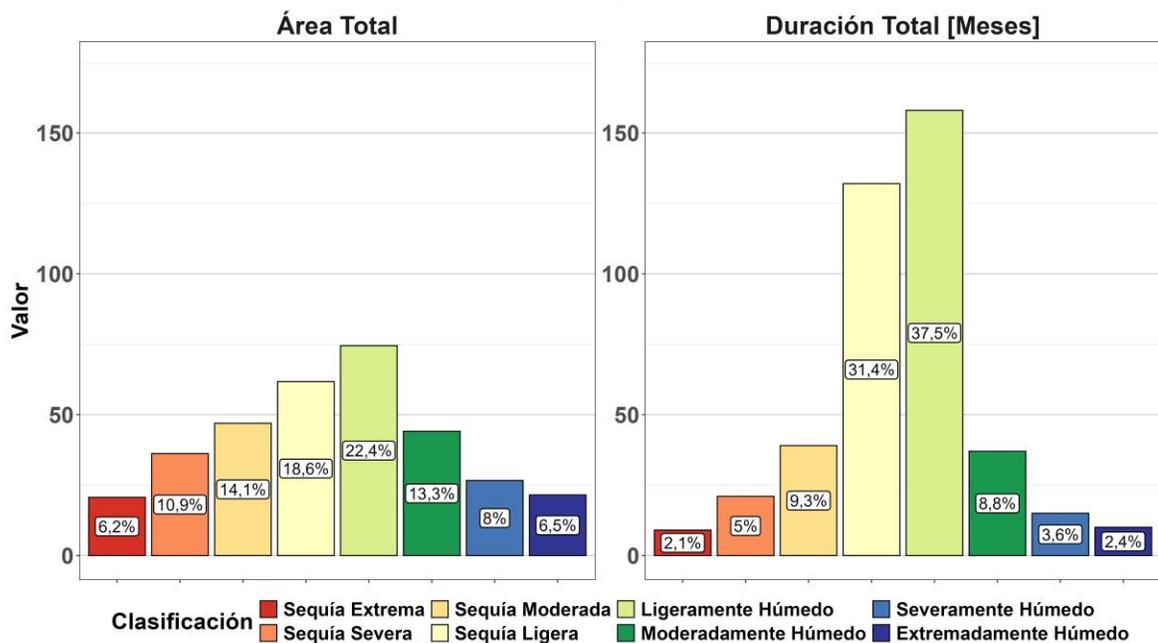


*Figura B-24: Variación del índice RAI, en la cuenca de Cautín en Cajón, para el periodo de 2051 a 2085, CMCC\_ESM2, escala de 9 y 12 meses.*

**Distribución del índice SPI en Cautín en Cajón  
1979-2014 - CMCC\_ESM2 - 9 Meses**

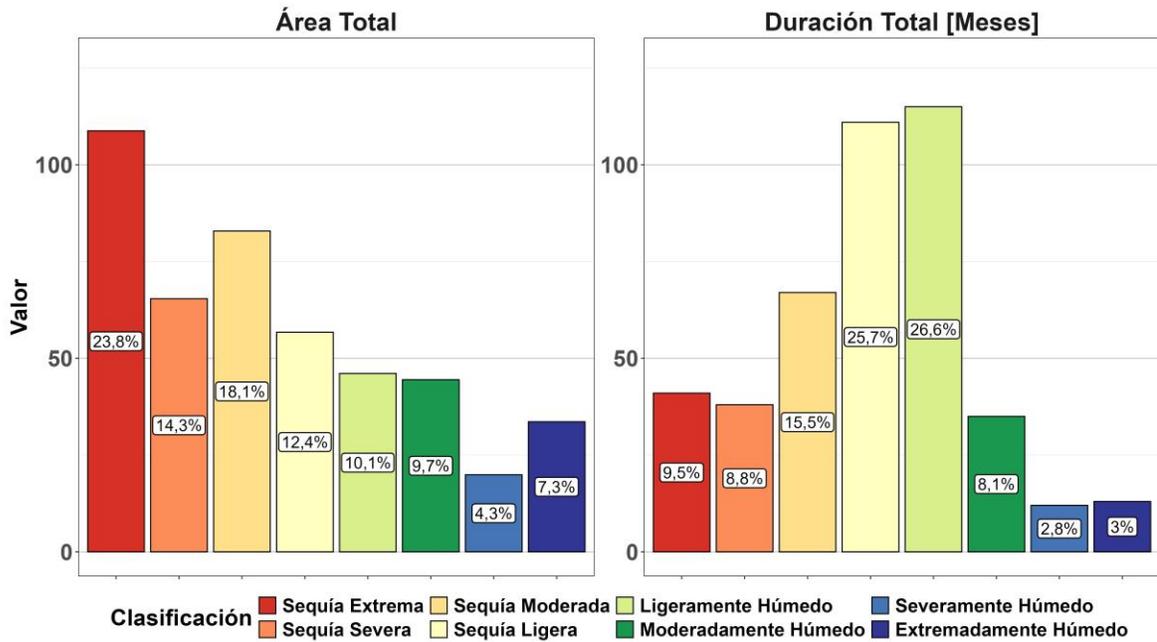


**Distribución del índice SPI en Cautín en Cajón  
1979-2014 - CMCC\_ESM2 - 12 Meses**

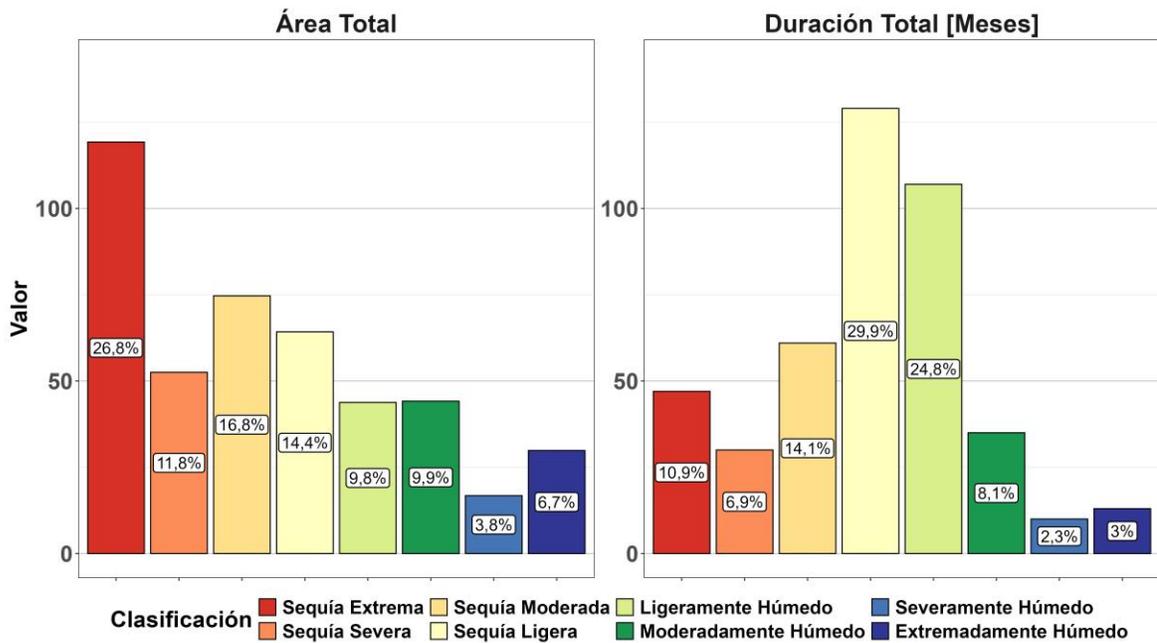


*Figura B-25: Variación del índice SPI, en la cuenca de Cautín en Cajón, para el periodo de 1979 a 2014, CMCC\_ESM2, escala de 9 y 12 meses.*

**Distribución del índice SPI en Cautín en Cajón  
2015-2050 - CMCC\_ESM2 - 9 Meses**

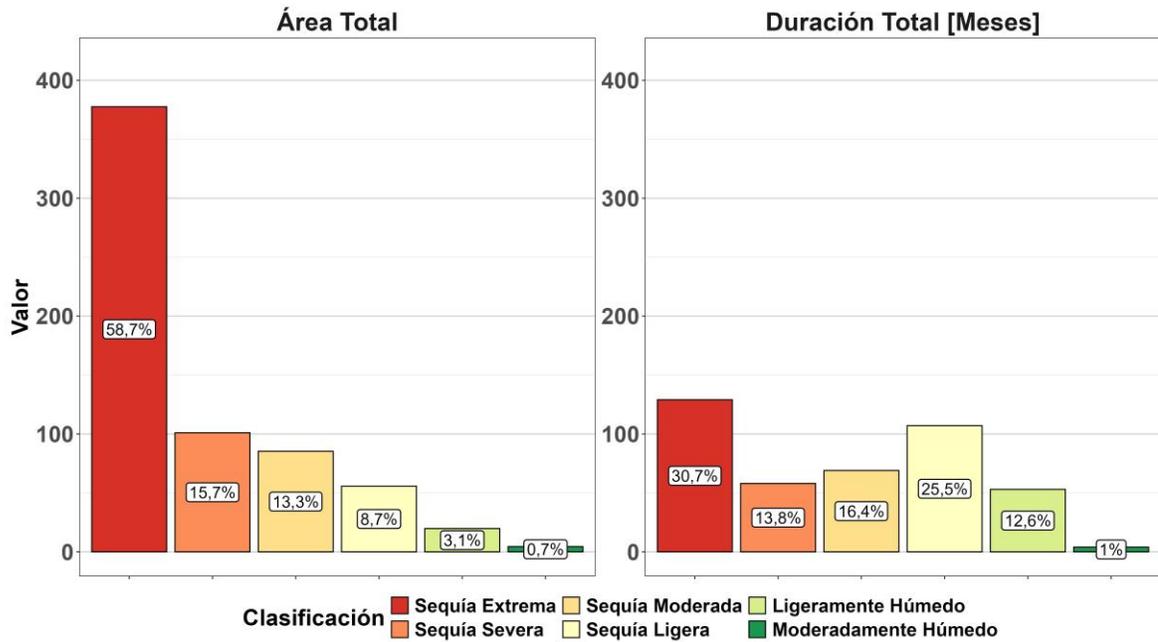


**Distribución del índice SPI en Cautín en Cajón  
2015-2050 - CMCC\_ESM2 - 12 Meses**

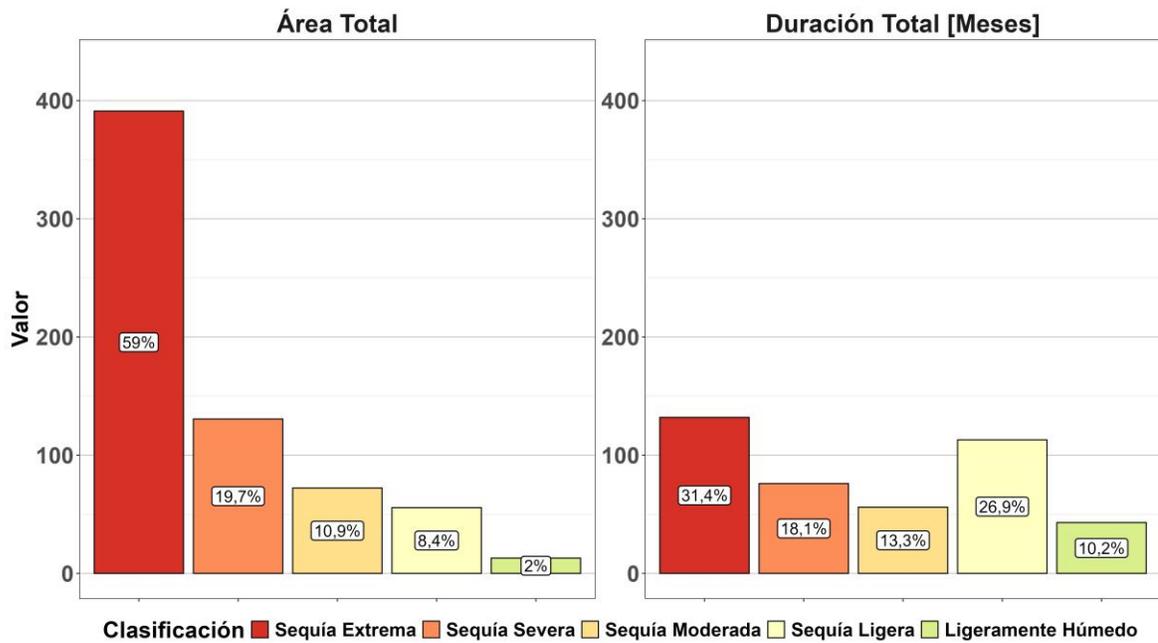


*Figura B-26: Variación del índice SPI, en la cuenca de Cautín en Cajón, para el periodo de 2015 a 2050, CMCC\_ESM2, escala de 9 y 12 meses.*

**Distribución del índice SPI en Cautín en Cajón  
2051-2085 - CMCC\_ESM2 - 9 Meses**

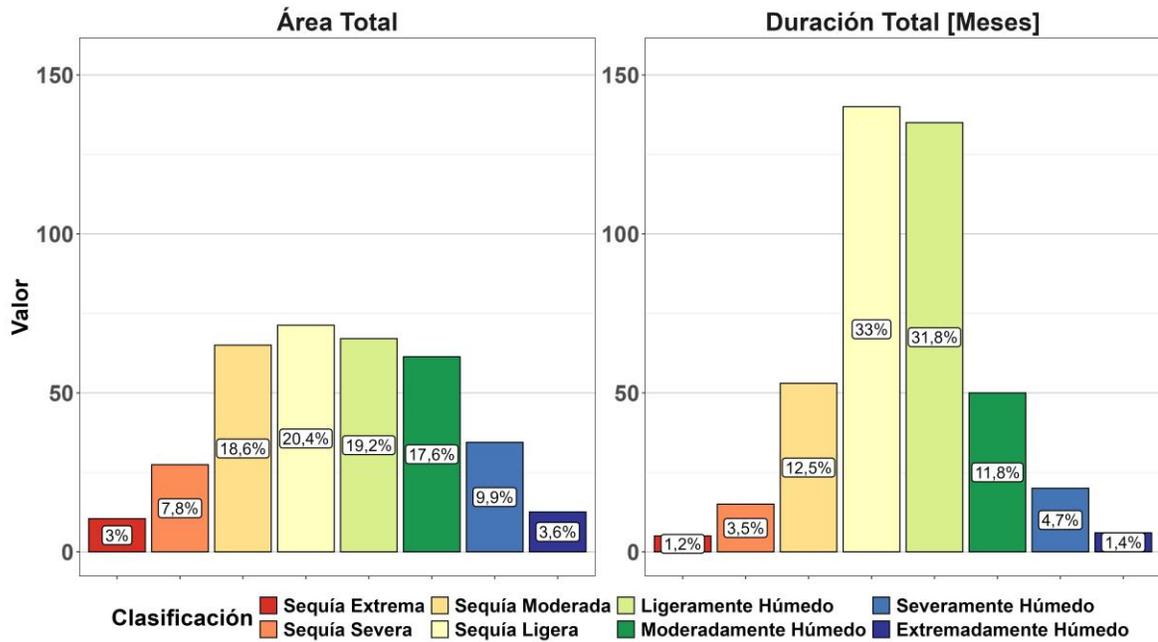


**Distribución del índice SPI en Cautín en Cajón  
2051-2085 - CMCC\_ESM2 - 12 Meses**

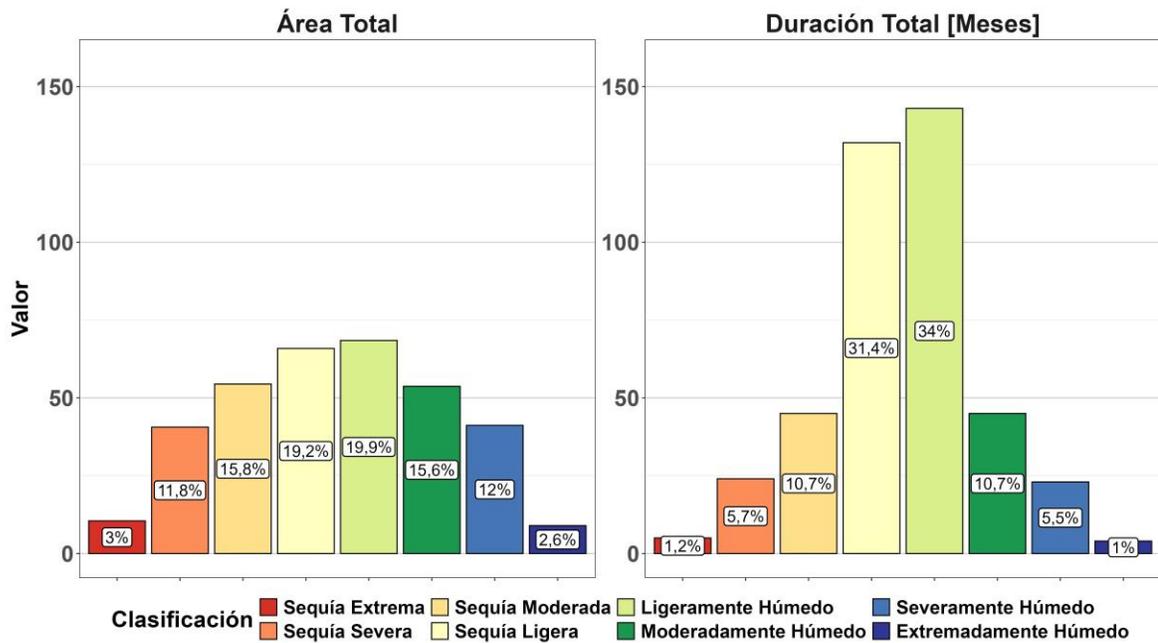


*Figura B-27: Variación del índice SPI, en la cuenca de Cautín en Cajón, para el periodo de 2051 a 2085, CMCC\_ESM2, escala de 9 y 12 meses.*

**Distribución del índice SPEI en Cautín en Cajón  
1979-2014 - CMCC\_ESM2 - 9 Meses**

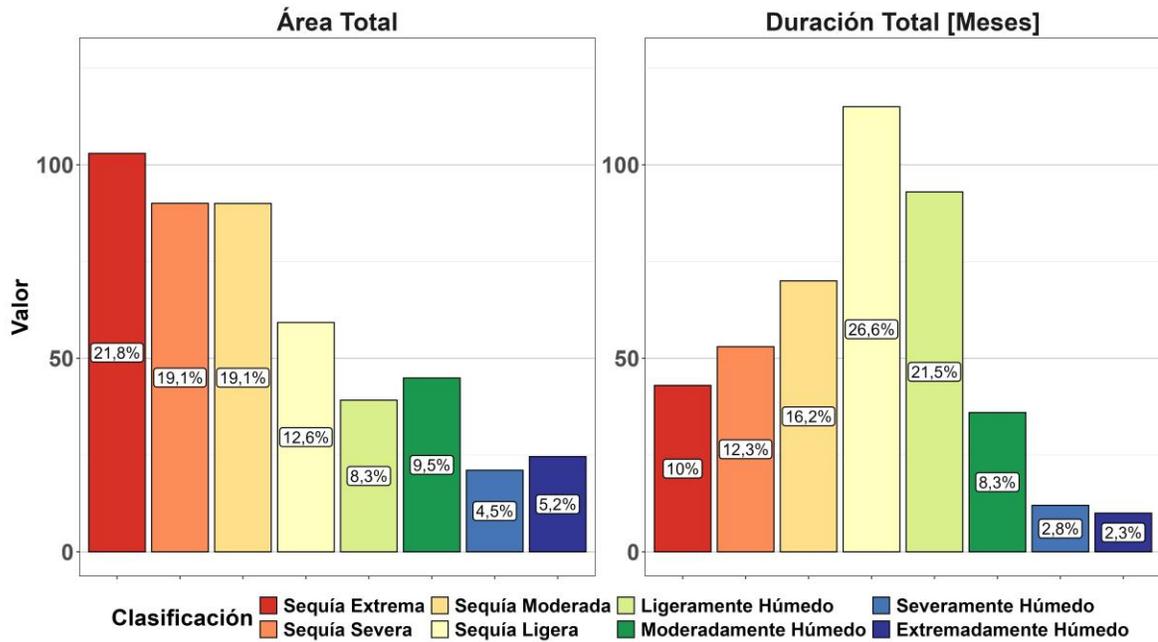


**Distribución del índice SPEI en Cautín en Cajón  
1979-2014 - CMCC\_ESM2 - 12 Meses**

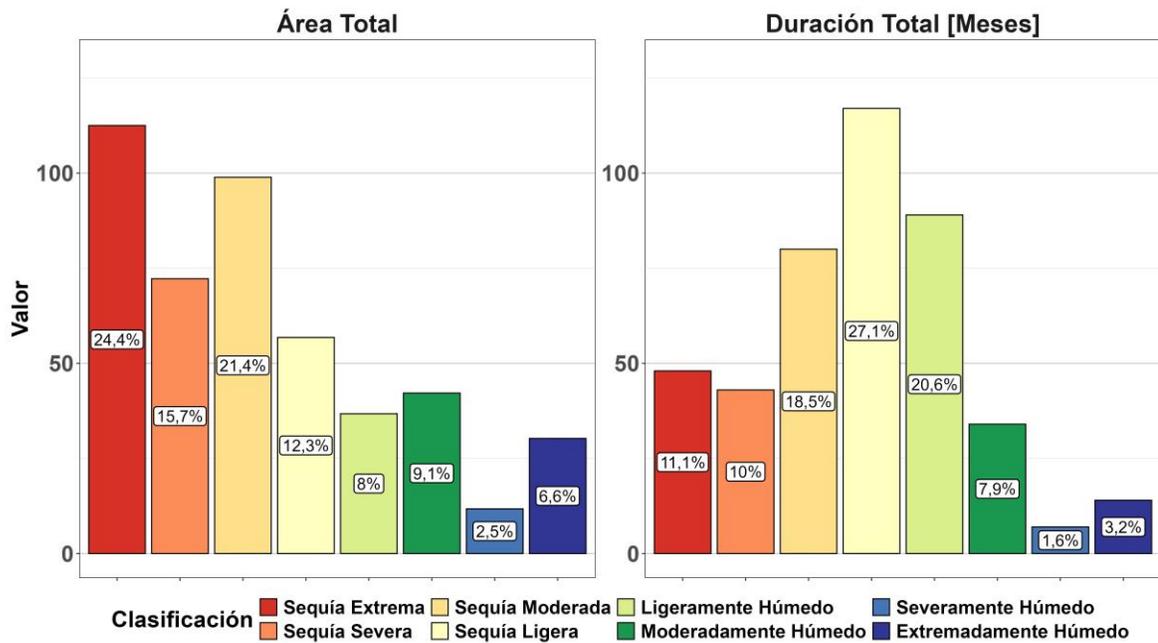


*Figura B-28: Variación del índice SPEI, en la cuenca de Cautín en Cajón, para el periodo de 1979 a 2014, CMCC\_ESM2, escala de 9 y 12 meses.*

**Distribución del índice SPEI en Cautín en Cajón  
2015-2050 - CMCC\_ESM2 - 9 Meses**

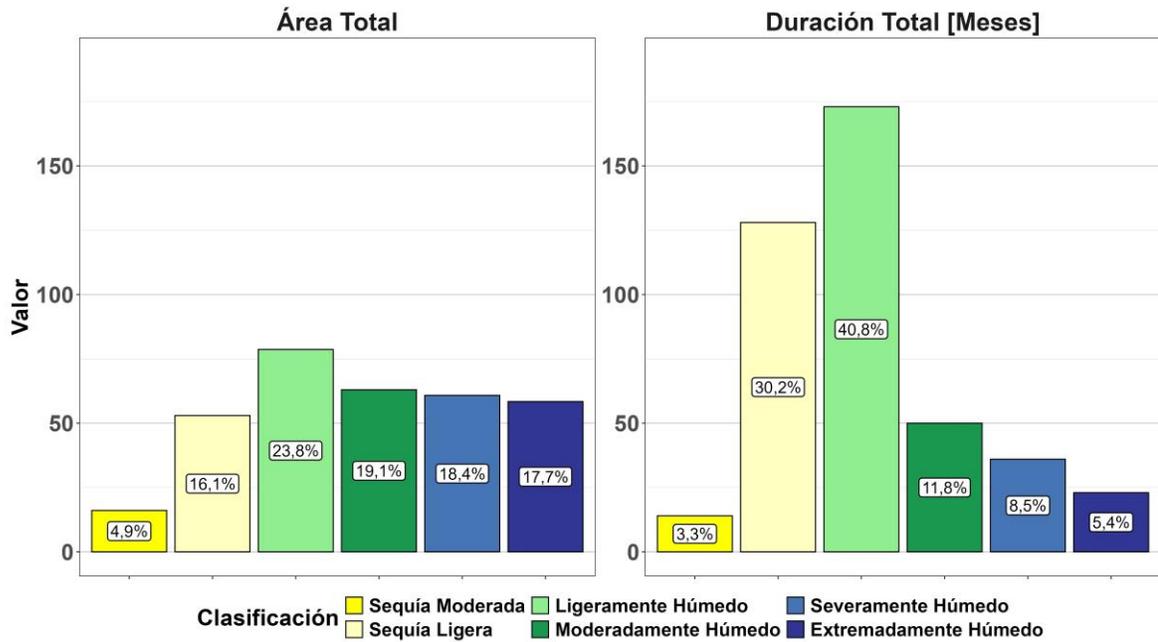


**Distribución del índice SPEI en Cautín en Cajón  
2015-2050 - CMCC\_ESM2 - 12 Meses**

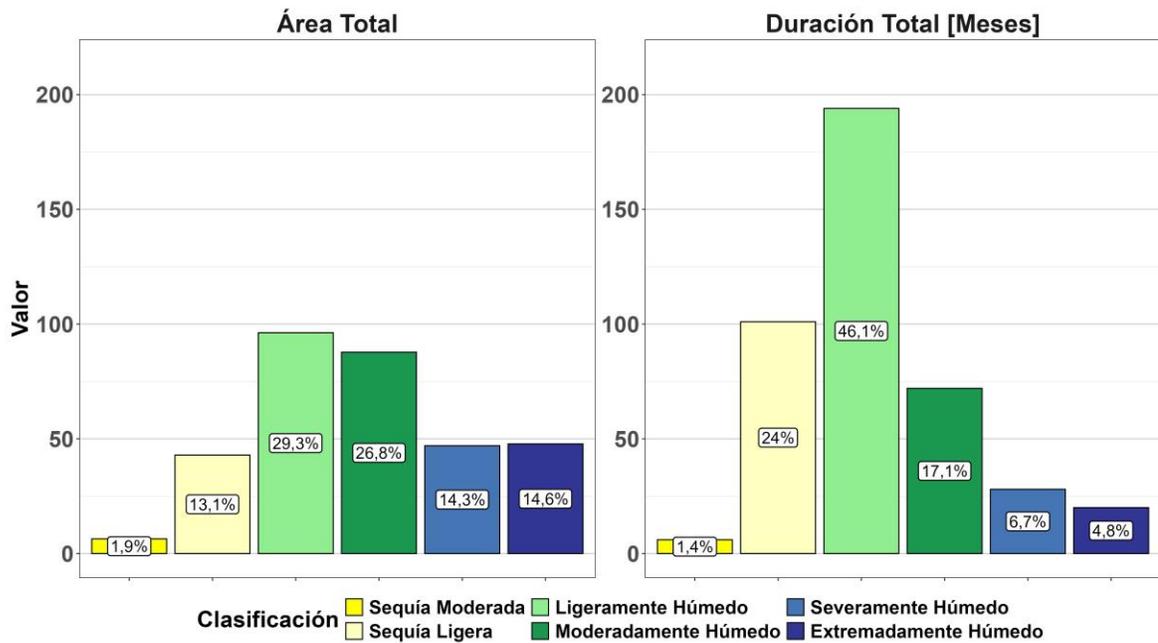


*Figura B-29: Variación del índice SPEI, en la cuenca de Cautín en Cajón, para el periodo de 2015 a 2050, CMCC\_ESM2, escala de 9 y 12 meses.*

**Distribución del índice SSFI en Cautín en Cajón**  
**Estructura: 211132111 - 1979-2014 - CMCC\_ESM2 - 9 Meses**

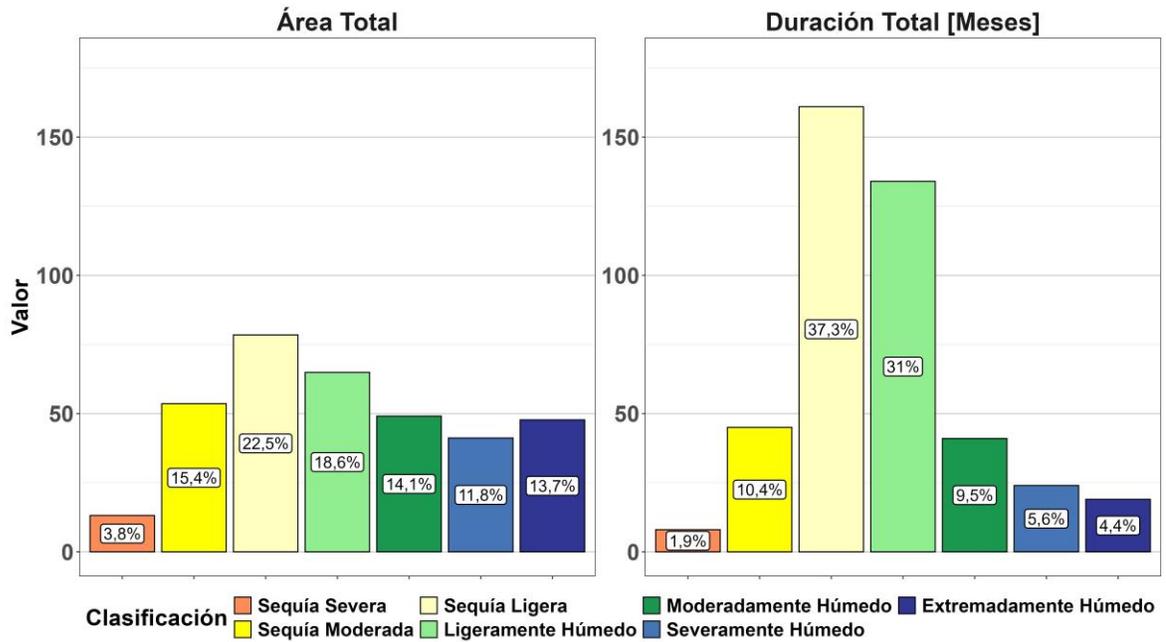


**Distribución del índice SSFI en Cautín en Cajón**  
**Estructura: 211132111 - 1979-2014 - CMCC\_ESM2 - 12 Meses**

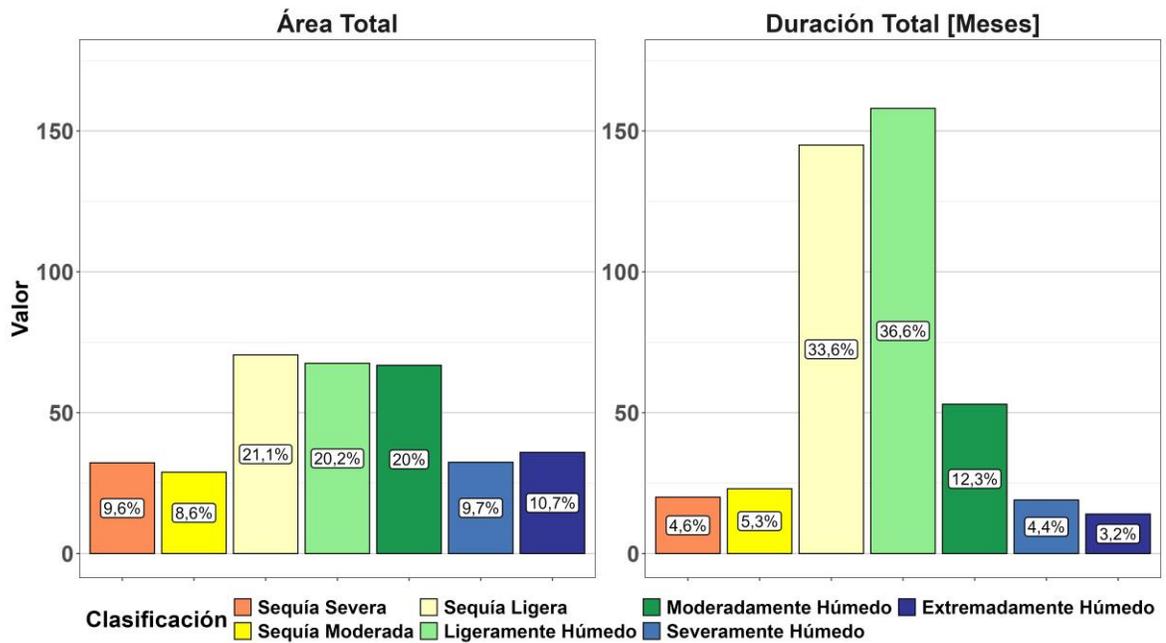


*Figura B-30: Variación del índice SSFI, en la cuenca de Cautín en Cajón, para el periodo de 1979 a 2014, CMCC\_ESM2, escala de 9 y 12 meses. Estructura 211132111.*

**Distribución del índice SSFI en Cautín en Cajón**  
**Estructura: 211132111 - 2015-2050 - CMCC\_ESM2 - 9 Meses**

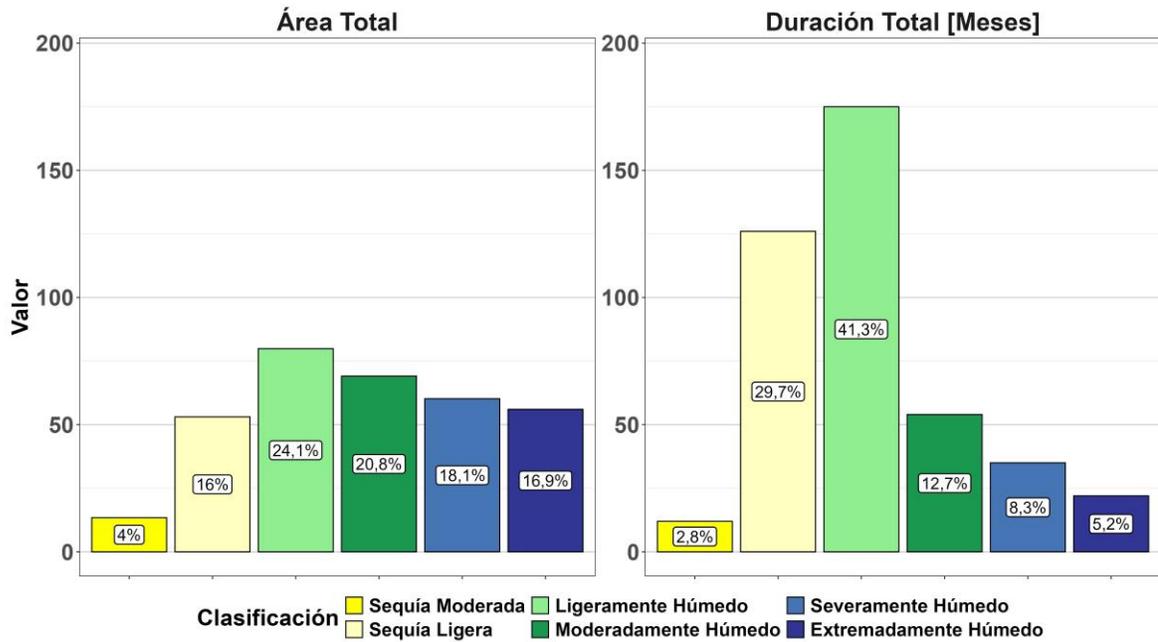


**Distribución del índice SSFI en Cautín en Cajón**  
**Estructura: 211132111 - 2015-2050 - CMCC\_ESM2 - 12 Meses**

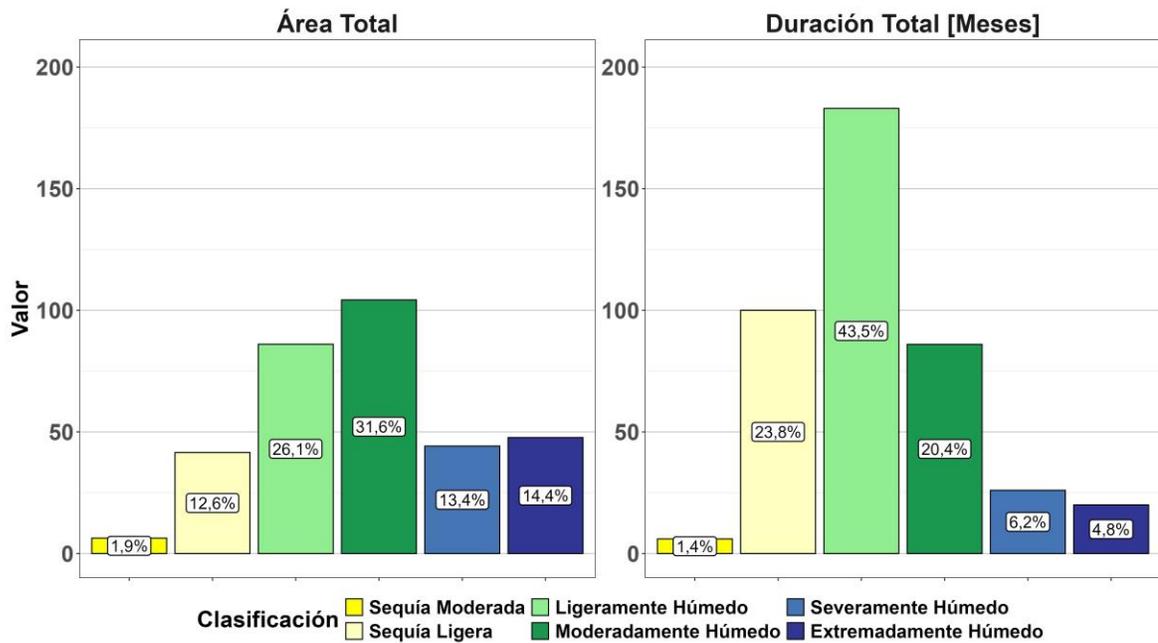


*Figura B-31: Variación del índice SSFI, en la cuenca de Cautín en Cajón, para el periodo de 2015-2050, CMCC\_ESM2, escala de 9 y 12 meses. Estructura 211132111.*

**Distribución del índice SSFI en Cautín en Cajón**  
**Estructura: 231122111 - 1979-2014 - CMCC\_ESM2 - 9 Meses**

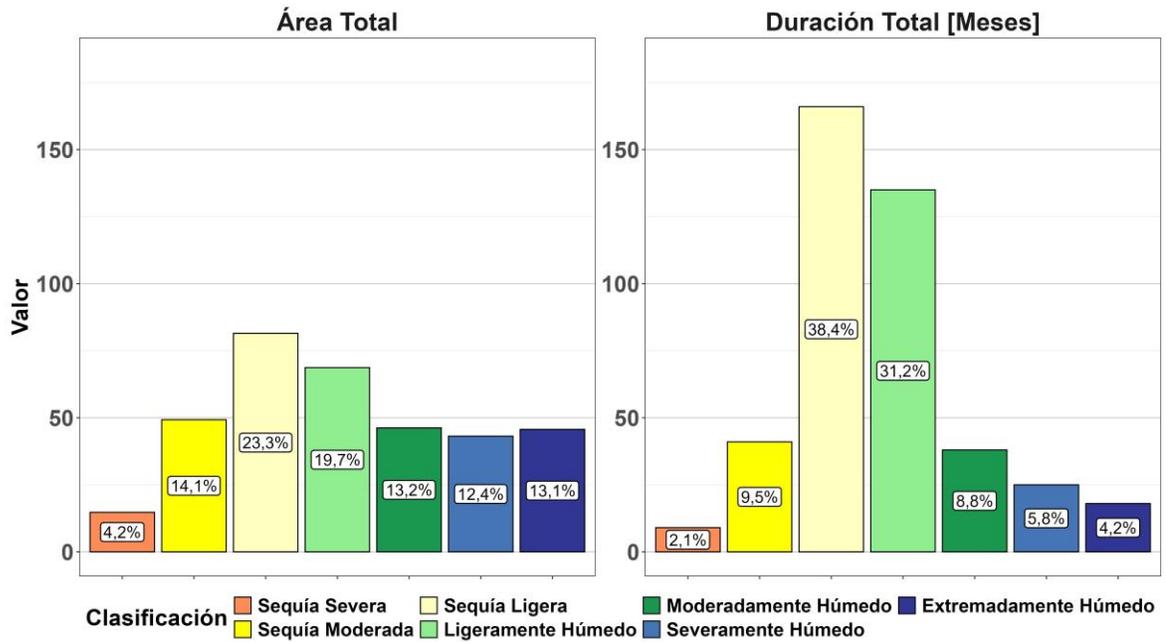


**Distribución del índice SSFI en Cautín en Cajón**  
**Estructura: 231122111 - 1979-2014 - CMCC\_ESM2 - 12 Meses**

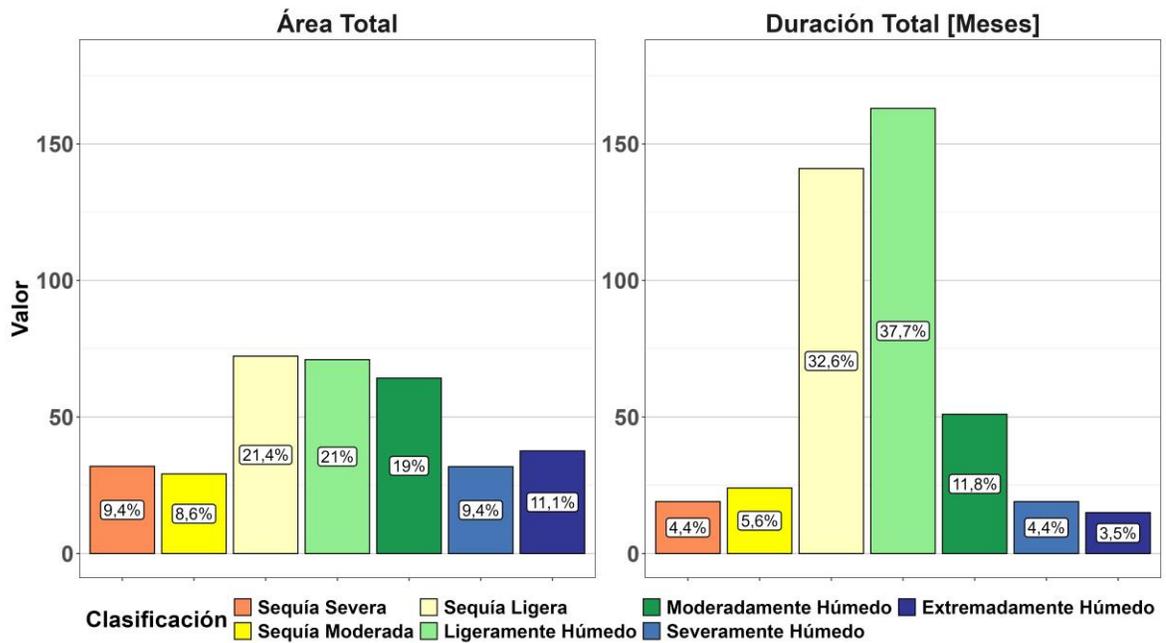


*Figura B-32: Variación del índice SSFI, en la cuenca de Cautín en Cajón, para el periodo de 1979 a 2014, CMCC\_ESM2, escala de 9 y 12 meses. Estructura 231122111.*

**Distribución del índice SSFI en Cautín en Cajón**  
**Estructura: 231122111 - 2015-2050 - CMCC\_ESM2 - 9 Meses**



**Distribución del índice SSFI en Cautín en Cajón**  
**Estructura: 231122111 - 2015-2050 - CMCC\_ESM2 - 12 Meses**



*Figura B-33: Variación del índice SSFI, en la cuenca de Cautín en Cajón, para el periodo de 2015-2050, CMCC\_ESM2, escala de 9 y 12 meses. Estructura 231122111.*