



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

**ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD HÍDRICA ANTE PROYECCIONES DE CAMBIO  
CLIMÁTICO EN 25 CUENCAS CHILENAS EN RÉGIMEN NATURAL. ESTUDIO DE  
CAUDALES MEDIOS Y CRECIDAS**

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

**FELIPE IGNACIO RAMÍREZ RAMÍREZ**

**PROFESOR GUÍA:  
MIGUEL LAGOS ZÚÑIGA**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
PABLO MENDOZA ZÚÑIGA  
XIMENA VARGAS MESA**

**SANTIAGO DE CHILE  
2020**

## **ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD HÍDRICA ANTE PROYECCIONES DE CAMBIO CLIMÁTICO EN 25 CUENCAS CHILENAS EN RÉGIMEN NATURAL. ESTUDIO DE CAUDALES MEDIOS Y CRECIDAS**

Es necesario tener una noción de cuánto cambiarán los caudales medios en periodos futuros para construir Curvas de Variación Estacional y Curvas de Duración, para facilitar la gestión y la decisión de, por ejemplo, entregar Derechos de Agua Permanentes o Derechos de Agua con Ejercicio Eventual. Además estimar potenciales variaciones en caudales máximos permite diagnosticar a priori el diseño de obras hidráulicas y prevenir inundaciones.

Para llevar a cabo una predicción de la variación de caudales, se usa información histórica (1975-2015) diaria de caudales, precipitación y temperatura para 25 cuencas en régimen natural. Con esta información es posible calcular promedios de caudales, precipitación acumulada y temperaturas para cada año, considerando una temporada completa, temporada de invierno, verano y verano con caudal de año entero o invierno (verano modificado). Se usa el promedio histórico de este caudal y se calculan variaciones con respecto a este valor y la precipitación y se normalizan por dicho promedio, obteniendo  $\Delta Q$  [%] y  $\Delta Pp$  [%]. Para la temperatura se calculan variaciones respecto al promedio y no se normaliza, obteniendo  $\Delta T$  [-]. Para cada cuenca se realiza una regresión lineal múltiple (por cada período) para obtener  $\Delta Q$  [%] a partir de  $\Delta Pp$  [%] y  $\Delta T$  [-], obteniéndose  $R^2$  ajustados. promedios de: temporada completa  $0,66 \pm 0,21$ , invierno  $0,47 \pm 0,30$ , verano  $0,12 \pm 0,15$  y verano mod.  $0,66 \pm 0,26$ .

Utilizando información de precipitación y temperatura obtenidos de tres Modelos Globales de Circulación (GCMs) diferentes e información del caudal obtenido del modelo VIC, se obtienen promedios de temperatura, precipitación y caudal para el período histórico (1975-2015). Luego con información de temperatura y precipitación futura (2020-2059) proveniente de estos GCMs, se calculan  $\Delta Pp$  [%] y  $\Delta T$  [-], para dos períodos futuros (2020-2039 y 2040-2059). Estas variaciones se usan en la regresión obtenida anteriormente estimando variaciones de  $\Delta Q$  [%] para los dos períodos futuros; los cuales se comparan con  $\Delta QV$  [%], que corresponde a variaciones de caudales proyectados con el modelo VIC.

De las 25 cuencas, tres presentan un error absoluto menor al 10% para el año completo, en cambio para la temporada de invierno se tienen cuatro cuencas con un error absoluto menor al 5%. Para la temporada de deshielo (o verano modificado) se tienen cuatro cuencas con error absoluto menor al 10%. Estas cuencas presentan características similares como el régimen, elevación media y la fracción de nieve.

Para la estimación de crecidas, se utiliza la misma metodología con caudales máximos dada una precipitación y temperatura asociada a esa precipitación, pero se obtienen valores de  $R^2$  aj para la regresión de  $0,11 \pm 0,19$  para crecidas de invierno y  $0,27 \pm 0,22$  para verano, por lo que no se pronostican caudales de crecida.

**Dedicado a todos quienes han estado a mi lado,  
a todos quienes quieren cumplir sus sueños,  
a G, MJ, KRSKV y Leia.**

## **Agradecimientos**

En primer lugar, quiero agradecer a mis padres, por querer siempre lo mejor para mi y mis hermanos. Por darnos lo mejor que hemos podido tener, por ayudar a superarnos y enfrentar nuestros defectos y miedos. Agradezco a mis hermanos por estar siempre para uno.

Agradezco a todos los profesores que han sido parte de mi educación, en especial al Profesor Miguel Lagos por todo el apoyo que me ha dado para terminar este trabajo. A todos los profesores del Área de Recursos Hídricos y Medio Ambiente del Departamento de Ingeniería Civil. A mis profesores del colegio y de la universidad.

Agradezco a mis amigos incondicionales que he conocido en el colegio y que siempre estarán a mi lado. A los incontables amigos que he conocido en la universidad, que sin ellos mi vida no sería la misma ni habría sido disfrutada como lo ha sido.

Agradezco a mis compañeros de karate y a mi sensei por abrirme las puertas de un nuevo e infinito camino.

Agradezco a todos mis tíos y tías, primos y primas, por siempre preocuparse por mí. También agradezco a quién me ha acogido en su casa estos últimos meses: la tía Pili.

Agradezco de todo corazón a Fabiola Pinto, por querer lo mejor para mi siempre. Ella se merece el cielo, a ver si logro bajarlo para ella...



## Tabla de contenido

Capítulo 1: Introducción .....	1
1.1 Motivación .....	1
1.2 Objetivos .....	1
1.2.1 General.....	1
1.2.2 Objetivos específicos .....	1
Capítulo 2: Antecedentes bibliográficos.....	2
2.1 Tendencias y proyecciones climáticas .....	2
2.1.1 Observaciones históricas .....	2
2.1.1 Proyecciones climáticas .....	6
2.2 Estudios de disponibilidad y crecidas .....	10
2.3 Estudios de cambio hidrológico .....	12
2.3.1 Enfoque Top-Down.....	12
2.3.2 Enfoque Bottom-Up .....	14
Capítulo 3: Zona de estudio .....	19
3.1 Descripción de cuencas .....	19
3.2 Datos utilizados .....	26
Capítulo 4: Metodología .....	28
4.1 Metodología para estimar caudales promedios (disponibilidad).....	28
4.2 Metodología para estimar caudales máximos (crecidas).....	31
Capítulo 5: Resultados .....	32
5.1 Ajustes para estimar variaciones de caudales de promedios.....	32
5.1.1 Ajustes con datos históricos: CR2met y caudales medidos .....	32
5.1.2 Comparación con resultados de modelación VIC .....	38
5.2 Ajustes para estimar variaciones de caudales de crecidas.....	47
5.1.2 Ajustes con datos históricos: CR2met y caudales medidos .....	47
Capítulo 6: Discusión.....	49
6.1 Ajuste con datos históricos para disponibilidad.....	49
6.2 Comparación de $\Delta Q_f$ con $\Delta Q_f V$ para caudales proyectados .....	50
6.3 Ajuste con datos históricos para crecidas.....	51
Capítulo 7: Conclusiones .....	52
Bibliografía .....	53
8 Anexos .....	56
Anexo A: regresión de disponibilidad de caudales .....	56
Anexo B: comparación con caudales VIC, figuras .....	98
Anexo C: comparación con caudales VIC, según características .....	106
Anexo D: regresión de crecidas de caudales, figuras.....	146
Anexo E: métricas de evaluación .....	152
Anexo F: características de las cuencas estudiadas.....	153

## Indice de Tablas

<b>Tabla 3. 1:</b> GCMs utilizados en la actualización del Balance Hídrico Nacional (DGA, 2018).....	27
<b>Tabla 4. 1:</b> Distintos períodos de tiempo para realizar análisis. ....	29
<b>Tabla A - 1:</b> Resumen de valores A, B, C y R2 ajustado considerando año entero.....	68
<b>Tabla A - 2:</b> resumen de valores A, B, C y R2 ajustado considerando meses de Invierno (entre abril y septiembre).....	69
<b>Tabla A - 3::</b> resumen de valores A, B, C y R2 ajustado considerando meses de Verano (entre octubre y marzo) ...	69
<b>Tabla A - 4:</b> resumen de valores A, B, C y R2 ajustado considerando meses de Verano para caudal y temperatura con precipitación del año entero o meses de Invierno .....	70
<b>Tabla 5. 1:</b> Promedio, desviación estándar, máximo y mínimo de valores .....	48
<b>Tabla A - 5:</b> Promedio, desviación estándar, máximo y mínimo de valores	70
<b>Tabla A - 6:</b> Promedio, desviación estándar, máximo y mínimo de valores del coeficiente de correlación R <sup>2</sup> ajustado y número de cuencas para año entero para distintos regímenes de cuencas. ....	70
<b>Tabla A - 7::</b> Promedio, desviación estándar, máximo y mínimo de valores del coeficiente de correlación R <sup>2</sup> ajustado y número de cuencas para temporada de Invierno para distintos regímenes de cuencas.....	71
<b>Tabla A - 8:</b> Promedio, desviación estándar, máximo y mínimo de valores del coeficiente de correlación R <sup>2</sup> ajustado y número de cuencas para temporada de Verano para distintos regímenes de cuencas.....	71
<b>Tabla A - 9:</b> Promedio, desviación estándar, máximo y mínimo de valores del coeficiente de correlación R <sup>2</sup> ajustado y número de cuencas para temporada de Verano modificado para distintos regímenes de cuencas. ....	71
<b>Tabla A - 10:</b> resumen de R2 obtenidas de la validación cruzada para año entero. ....	80
<b>Tabla A - 11:</b> resumen de R2 obtenidas de la validación cruzada para meses de invierno. ....	80
<b>Tabla A - 12:</b> resumen de R2 obtenidas de la validación cruzada para meses de verano.....	81
<b>Tabla A - 13:</b> resumen de R2 obtenidas de la validación cruzada para meses de verano con precipitación de invierno o del año entero. ....	82
<b>Tabla A - 14:</b> Promedio, desviación estándar, máximo y mínimo de valores del coeficiente de correlación R <sup>2</sup> de validación cruzada. ....	83
<b>Tabla A - 15:</b> Promedio, desviación estándar, máximo y mínimo de valores del coeficiente de correlación R <sup>2</sup> de validación cruzada para el año entero según régimen .....	83
<b>Tabla A - 16:</b> Promedio, desviación estándar, máximo y mínimo de valores del coeficiente de correlación R <sup>2</sup> de validación cruzada para meses de invierno según régimen .....	84
<b>Tabla A - 17:</b> Promedio, desviación estándar, máximo y mínimo de valores del coeficiente de correlación R <sup>2</sup> de validación cruzada para meses de verano según régimen.....	84
<b>Tabla A - 18:</b> Promedio, desviación estándar, máximo y mínimo de valores del coeficiente de correlación R <sup>2</sup> de validación cruzada para el año entero según régimen	85
<b>Tabla C - 1:</b> Promedio, desviación estándar, máximo y mínimo de errores absolutos medios y número de cuencas para distintas temporadas para dos períodos futuros para GCM MIROC-ESM.	144
<b>Tabla C - 2:</b> Promedio, desviación estándar, máximo y mínimo de valores del coeficiente de correlación R <sup>2</sup> ajustado y número de cuencas para distintas temporadas para dos períodos futuros CSIRO-MK3. ....	144
<b>Tabla C - 3:</b> Promedio, desviación estándar, máximo y mínimo de valores de diferencia absoluta entre variaciones de caudal y número de cuencas para distintas temporadas para dos períodos futuros para IPSL-CM5A. ....	145
<b>Tabla F - 1:</b> régimen, latitud, área, elevación media e índice de aridez de las cuencas estudiadas.	153
<b>Tabla F - 2:</b> régimen, p seasonality, fracción de nieve y pendiente de las cuencas estudiadas.....	154

## Índice de Figuras

<b>Figura 2. 1:</b> Temperatura media anual para diferentes estaciones de Chile central. Fuente: Falvey y Garreaud (2009). .....	2
<b>Figura 2. 2:</b> Tendencia decadal de la temperatura. Con color azul tendencia negativa y con color rojo tendencia positiva. Tamaño indica magnitud. Puntos rodeados de color amarillo indican tendencia significativa (p menor a 10 % según método Mann-Kendall). Fuente: DGA, 2017. ....	4
<b>Figura 2. 3:</b> Tendencia como una variación porcentual de precipitación, considerando el promedio del periodo de estudio, el color rojo corresponde a tendencias de aumento y el azul a disminución. Fuente: DGA, 2017. ....	6
<b>Figura 2. 4:</b> emisiones de combustibles fósiles (históricas y futura) simuladas mediante los modelos CMIP5 para cuatro RCP. Fuente: IPCC, 2013. ....	7
<b>Figura 2. 5:</b> a) Forzante radiativo medio global, b) Serie de valores medios anuales globales de las anomalías de la temperatura, c) Promedio de los modelos para cambios de temperatura en la superficie. Fuente: IPCC, 2013. ....	8
<b>Figura 2. 6:</b> Esquema grilla de un GCM (Jalota et al., 2018). ....	9
<b>Figura 2. 7:</b> Conceptualización del escalamiento, Khan y Pilz, 2018. ....	10
<b>Figura 2. 8:</b> Representación celda del modelo VIC Fuente: Gao et al., 2009. ....	11
<b>Figura 2. 9:</b> Esquema enfoque Top-down. Fuente: Wilby y Dessai, 2010. ....	13
<b>Figura 2. 10:</b> Evaluación por estacionalidad para la precipitación de modelos GCM en una estación base. Fuente: Lagos et al., (2015). ....	13
<b>Figura 2. 11:</b> Diagrama de evaluación bottom-up. Fuente: Brown y Ghile, 2012. ....	15
<b>Figura 2. 12:</b> Panel izquierdo top-down, panel derecho bottom-up. Fuente: Brown y Wilby, 2012. ....	16
<b>Figura 2. 13:</b> Elasticidad para distintos LSM (líneas de colores) graficados de dos maneras diferentes: a la izquierda Elasticidad dada la Precipitación dada y al a derecha se grafica las mismas Elasticidades para los caudales correspondientes. ....	17
<b>Figura 2. 14:</b> Sensibilidades para distintos LSM (líneas de colores) graficados al aumentar T <sub>min</sub> y T <sub>max</sub> (izquierda) y al aumentar T <sub>max</sub> y dejar fijo T <sub>min</sub> (derecha). ....	17
<b>Figura 2. 15:</b> obtención de variación porcentual de caudal (isolíneas) en % según información histórica y futura de distintos GCMs (variación porcentual de precipitación y variación de temperatura en °C. Fuente: Vano et al., 2015. ....	18
<b>Figura 3. 2:</b> distribución espacial de Cuencas en Régimen Natural. ....	19
<b>Figura 3. 3:</b> Climogramas de cuencas con régimen Pluvial entre los años 1985 y 2015 (precipitación en verano). ....	20
<b>Figura 3. 4:</b> Caudales medios mensuales normalizados de cuencas régimen con Pluvial entre los años 1985 y 2015 (precipitación en verano). ....	20
<b>Figura 3. 5:</b> Climogramas de cuencas con régimen Nival entre los años 1985 y 2015. ....	21
<b>Figura 3. 6:</b> Caudales medios mensuales normalizados de cuencas con en régimen Nival entre los años 1985 y 2015. ....	21
<b>Figura 3. 7:</b> Climogramas de cuencas con régimen Nivo Pluvial entre los años 1985 y 2015. ....	22
<b>Figura 3. 8:</b> Caudales medios mensuales normalizados de cuencas con régimen Nivo Pluvial entre los años 1985 y 2015. ....	22
<b>Figura 3. 9:</b> Climogramas de cuencas con régimen Pluvio Nival entre los años 1985 y 2015. ....	23
<b>Figura 3. 10:</b> Caudales medios mensuales normalizados de cuencas con régimen Pluvial Nival entre los años 1985 y 2015. ....	23
<b>Figura 3. 11:</b> Climogramas de cuenca con régimen Pluvial entre los años 1985 y 2015 (precipitación en invierno). ....	24
<b>Figura 3. 12:</b> Caudales medios mensuales normalizados de cuencas con régimen Pluvial entre los años 1985 y 2015 (precipitación en invierno). ....	24
<b>Figura 3. 13:</b> Cuencas según distintos parámetros: izquierda área [km <sup>2</sup> ], centro pendiente media [m/km], derecha elevación media [msnm]. ....	25
<b>Figura 3. 14:</b> Cuencas según distintos parámetros: izquierda índice de aridez [-], centro temporalidad de Pp [-], derecha fracción de nieve [-]. ....	26
<b>Figura 4. 2:</b> Esquema metodología. ....	31
<b>Figura 5. 1:</b> Distribuciones del coeficiente de correlación ajustado para distintos períodos de estudio. ....	32
<b>Figura 5. 2:</b> Distribución espacial para coeficiente de correlación ajustado para los cuatro períodos estudiados según el régimen de la cuenca. ....	33

<b>Figura 5. 3:</b> Distribuciones del coeficiente $R^2$ aj. para el año Entero para diferentes regímenes de cuencas. ....	34
<b>Figura 5. 4:</b> Distribuciones del coeficiente $R^2$ aj. para temporada de Invierno para diferentes regímenes de cuencas. ....	34
<b>Figura 5. 5:</b> Distribuciones del coeficiente $R^2$ aj. para temporada de Verano para diferentes regímenes de cuencas. ....	35
<b>Figura 5. 6:</b> Distribuciones del coeficiente $R^2$ aj. para temporada de Verano modificado para diferentes regímenes de cuencas. ....	35
<b>Figura 5. 7:</b> Distribuciones del coeficiente $R^2$ para distintos períodos de estudio considerando años normales (color gris), años húmedos (color azul) y años secos (color naranja). ....	36
<b>Figura 5. 8:</b> Distribuciones del coeficiente $R^2$ para el Año Entero para diferentes regímenes de cuencas considerando años normales (color gris), años húmedos (color azul) y años secos (color naranja). ....	36
<b>Figura 5. 9:</b> Distribuciones del coeficiente $R^2$ para temporada de Invierno para diferentes regímenes de cuencas considerando años normales (color gris), años húmedos (color azul) y años secos (color naranja). ....	37
<b>Figura 5. 10:</b> Distribuciones del coeficiente $R^2$ para temporada de Verano para diferentes regímenes de cuencas considerando años normales (color gris), años húmedos (color azul) y años secos (color naranja). ....	37
<b>Figura 5. 11:</b> Distribuciones del coeficiente $R^2$ para temporada de Verano Modificado para diferentes regímenes de cuencas considerando años normales (color gris), años húmedos (color azul) y años secos (color naranja). ....	38
<b>Figura 5. 12:</b> Variaciones de caudal medio [%] representadas por isolíneas para distintos períodos de estudio: año completo (a), temporada de invierno (b), temporada de verano (c) y temporada de verano con precipitación de año entero o de invierno. Se aprecian dos periodos: años 2020-2039 en azul y años 2040-2059 en rojo para tres GCMs: MIROC-ESM en círculos, CSIRO-MK3-6.0 en cuadrados y IPSL-CM5A-LR en triángulos. Cuenca 4513001. ....	39
<b>Figura 5. 13:</b> Comparación de variaciones de caudales VIC y caudales MOD para año entero para futuro cercano 2020-2039, para GCM MIROC-ESM. ....	40
<b>Figura 5. 14:</b> Comparación de variaciones de caudales VIC y caudales MOD para año entero para futuro lejano 2040-2059, para GCM MIROC-ESM. ....	40
<b>Figura 5. 15:</b> Comparación de variaciones de caudales VIC y caudales MOD para año entero junto a estadísticos y características de las cuencas para GCM MIROC-ESM. Período futuro cercano 2020-2039. ....	41
<b>Figura 5. 16:</b> Comparación de variaciones de caudales VIC y caudales MOD para año entero junto a estadísticos y características de las cuencas para GCM MIROC-ESM. Período futuro lejano 2040-2059. ....	42
<b>Figura 5. 17:</b> Distribuciones de diferencias absolutas entre variaciones $\Delta Q_{VIC}$ y $\Delta Q_{MOD}$ para distintas temporadas para dos períodos futuros para GCM MIROC-ESM. ....	43
<b>Figura 5. 18:</b> Distribuciones diferencia absoluta entre $\Delta Q_{VIC}$ y $\Delta Q_{MOD}$ para distintas temporadas para dos períodos futuros para CSIRO-MK3. ....	44
<b>Figura 5. 19:</b> Distribuciones de diferencia absoluta entre $\Delta Q_{VIC}$ y $\Delta Q_{MOD}$ para distintas temporadas para dos períodos futuros para IPSL-CM5A. ....	44
<b>Figura 5. 20:</b> comparación de variaciones de caudales para año entero junto a estadísticos y características de las cuencas para diferencias menores al 10% para períodos de futuro cercano con GCM MIROC-ESM. ....	45
<b>Figura 5. 21:</b> comparación de variaciones de caudales para año entero junto a estadísticos y características de las cuencas para diferencias menores al 10% para períodos de futuro lejano con GCM MIROC-ESM. ....	46
<b>Figura 5. 22:</b> variaciones de caudal medio [%] para distintos períodos de estudio, temporada de invierno (a) y temporada de verano (b). ....	47
<b>Figura 5. 23:</b> distribuciones del coeficiente de correlación ajustado para distintos períodos de estudio. ....	47
<b>Figura 5. 24:</b> distribuciones del coeficiente de correlación ajustado para distintos períodos de estudio. ....	48

# Capítulo 1: Introducción

## 1.1 Motivación

Debido a las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), se ha generado un aumento en las temperaturas a lo largo de los últimos años (IPCC,1990). Este fenómeno recibe el nombre de cambio climático, el cual ha generado un calentamiento global. Mediante diversos estudios y modelos es posible predecir distintas forzantes meteorológicas como la precipitación y temperatura para diferentes zonas del planeta.

Diversas instituciones han desarrollado modelos globales de clima (GCMs por sus siglas en inglés) para estudiar el clima actual, histórico y futuro. En el último informe del IPCC (2013), se analizan los escenarios denominados RCP (Representative Concentration Pathway), los que consideran distintas emisiones de GEI (Moss et al., 2010). Dos de estos escenarios son RCP 8.5 y RCP 4.5, los cuales son bastante utilizados para estudiar el cambio climático, ya que indican las respuestas que tendría el sistema climático ante un menor o mayor esfuerzo en la reducción de GEI respectivamente (IPCC, 2013).

Se han realizado estudios que proyectan cambios en las forzantes meteorológicas como por ejemplo el aumento de temperatura en 4°C bajo el escenario RCP 8.5°C a finales del año 2100 (IPCC,2013). También se proyecta una disminución en la frecuencia de lluvias, pero aumento en su intensidad (Alexander et al.,2006). Otros estudios afirman que aumentará el número de crecidas (Milly et al., 2002). En Europa se proyecta un incremento en las crecidas y la frecuencia de sequías (Lehner et al., 2006) y en Inglaterra aumentará el caudal máximo instantáneo (Bell et al., 2007).

En nuestro país, se desarrolló la actualización del Balance Hídrico Nacional (DGA, 2017) en donde se realizó una modelación hidrológica de base física Variable Infiltration Capacity (VIC) para estimar caudales y mediante Modelos de Circulación General se estiman forzantes meteorológicas. Dentro de este contexto se desea estudiar la sensibilidad de las cuencas en régimen natural ubicadas en Chile ante los efectos del cambio climático. Para ello, se estudian 25 cuencas en donde se realiza un análisis de sensibilidad para el período histórico y futuro de la relación que existe entre variaciones de caudal, precipitación y temperatura. Esto se lleva a cabo para realizar estimaciones de variaciones de caudalo en un período futuro y comparar con con la variación obtenidamediante la modelación hidrológica realizada con VIC.

## 1.2 Objetivos

### 1.2.1 General

El objetivo principal de esta memoria es estudiar la sensibilidad de variaciones de caudal promedio y de crecida en 25 cuencas en régimen natural ante variaciones de precipitación y temperatura a nivel anual y estacional a partir de información histórica (1979-2015). Esto con el fin de realizar un pronóstico de variaciones de caudal promedio y caudal de crecida para períodos futuros (2020-2059).

### 1.2.2 Objetivos específicos

Para poder llevar a cabo este objetivo, se realizan los siguientes objetivos específicos:

- Estudiar la sensibilidad de caudal medio anual y medio estacional según variaciones de temperatura promedio y de precipitación acumulada con información histórica de 25 cuencas en régimen natural.

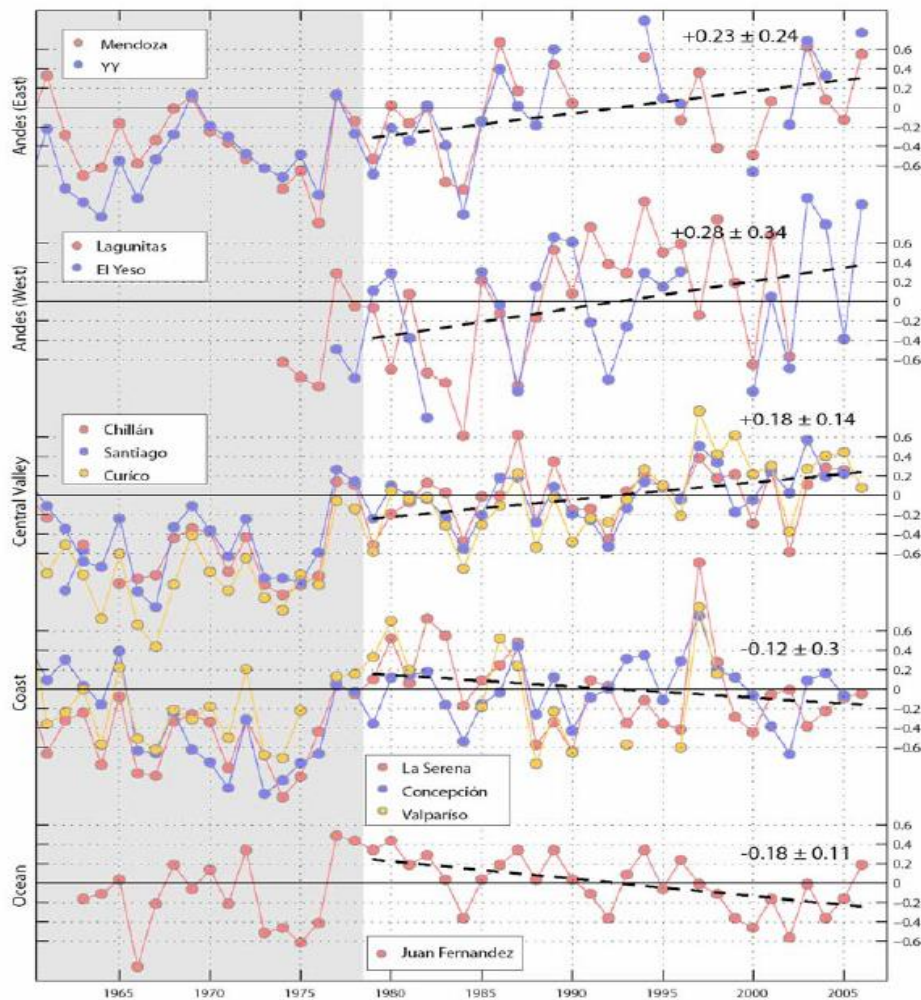
- Obtener una estimación de variación de caudal para períodos futuros mediante el uso de tres modelos de circulación general, los que aportan con información de precipitación y temperatura.
- Estudiar la sensibilidad de variaciones de caudal de crecidas (caudal máximo diario) ante variaciones de temperatura promedio en días de tormenta y variaciones de la precipitación para caudales máximos.
- Estudiar la posibilidad de realizar proyecciones de variaciones de caudal sin tener que realizar una modelación hidrológica como por ejemplo el modelo VIC.

## Capítulo 2: Antecedentes bibliográficos

### 2.1 Tendencias y proyecciones climáticas

#### 2.1.1 Observaciones históricas

De acuerdo con el estudio realizado por Falvey y Garreaud (2009), las temperaturas medias anuales presentan un comportamiento dispar a lo largo del territorio en la zona central. En la *Figura 2. 1* se presenta la temperatura promedio anual, evidenciándose una tendencia de aumento para la zona central y este del país.



*Figura 2. 1: Temperatura media anual para diferentes estaciones de Chile central. Fuente: Falvey y Garreaud (2009).*

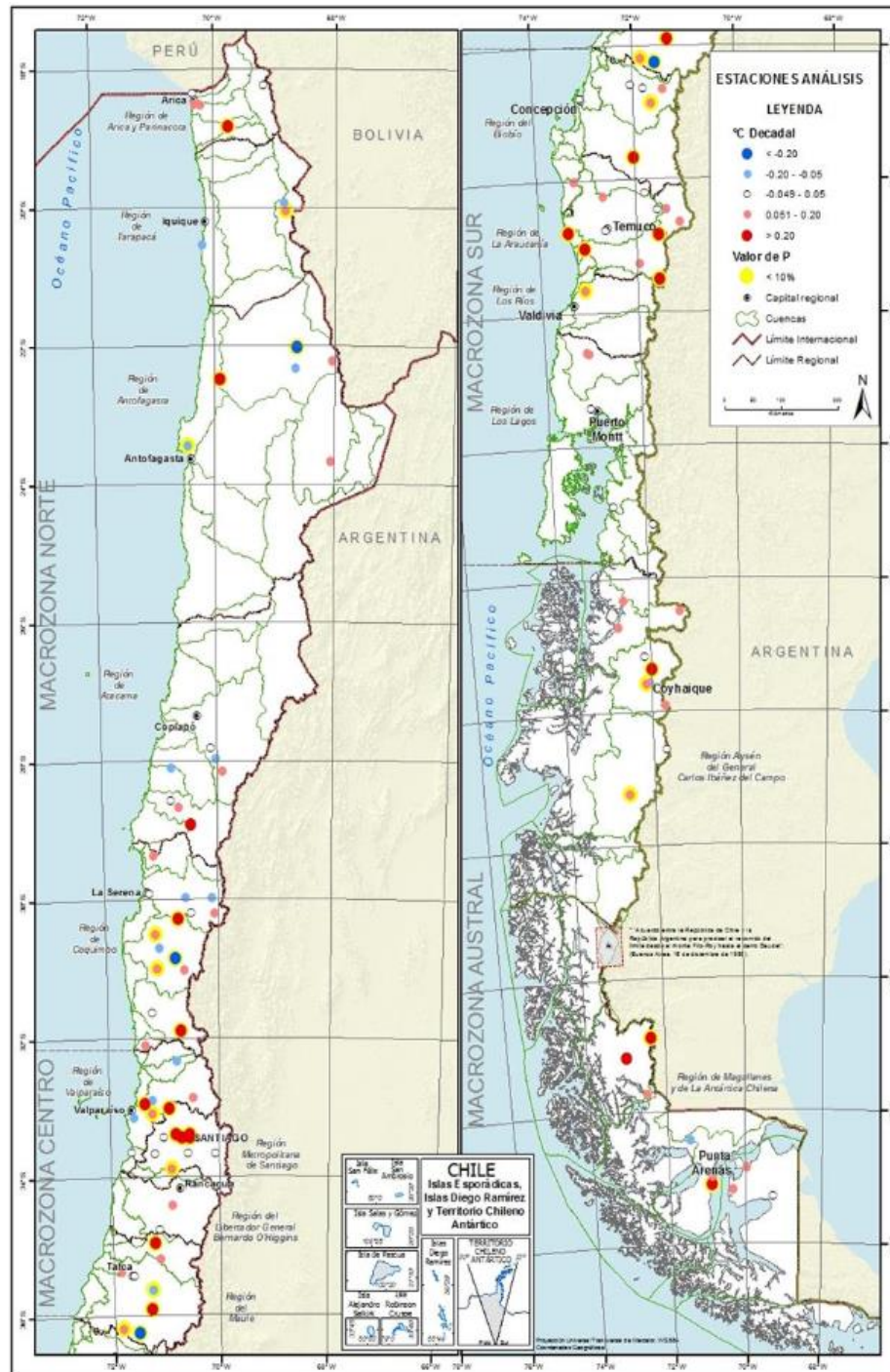
En el año 2017, se desarrolla la actualización del balance hídrico nacional, realizado por la Dirección General de Aguas (DGA) y profesionales de la Universidad de Chile y Universidad Católica (DGA, 2017). En este balance, se analizan tendencias históricas de temperaturas, precipitaciones y caudales en estaciones ubicadas en distintas cuencas de Chile. A partir de este documento se extrae información sobre las observaciones históricas.

En general, la tendencia de temperatura es positiva, con tasas de incremento promedio sobre 0.4°C y para la precipitación se aprecia una disminución en la tendencia con valores de disminución de más de 20 % en la zona central (DGA,2017).

Hacia el altiplano también se mantiene la tendencia de disminución de la precipitación. Para la macrozona sur, la disminución de la precipitación es más baja y para el sector más austral se obtienen tendencias significativas al aumento de la precipitación. Al estudiar los caudales, las tendencias son consistentes con las de las precipitaciones, pero no son significativas según el método de Mann- Kendall (DGA,2017).

De acuerdo con los resultados obtenidos en el documento de la DGA (2017). En la *Figura 2. 2* se presentan las tendencias decadales de acuerdo con el método Mann-Kendall, en donde el color rojo indica un aumento y el azul una disminución. La mayoría de las estaciones de la zona central presenta una tendencia al aumento de temperatura, en la macrozona norte no se aprecia una tendencia y en la zona sur la tendencia no es significativa, pero se aprecia un alza en la temperatura.





**Figura 2. 2:** Tendencia decadal de la temperatura. Con color azul tendencia negativa y con color rojo tendencia positiva. Tamaño indica magnitud. Puntos rodeados de color amarillo incidacan tendencia significativa (p menor a 10 % según método Mann-Kendall). Fuente: DGA, 2017.

La precipitación anual promedio tiende a aumentar con la latitud y altitud, y su variabilidad interanual se relaciona con el El Niño-Oscilación del SUR (ENSO, por sus siglas en inglés) (Montecinos y Aceituno, 2003), el cual corresponde a un fenómeno acoplado océano-atmósfera que se ubica en el Pacífico tropical. También Montecinos y Aceituno (2003) muestran que la precipitación interdecadal se vincula con la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO) (Valdés-Pineda et al., 2014), el periodo cálido de la PDO se relaciona con mayores precipitaciones y si es frío ocurre lo contrario. (DGA, 2017).

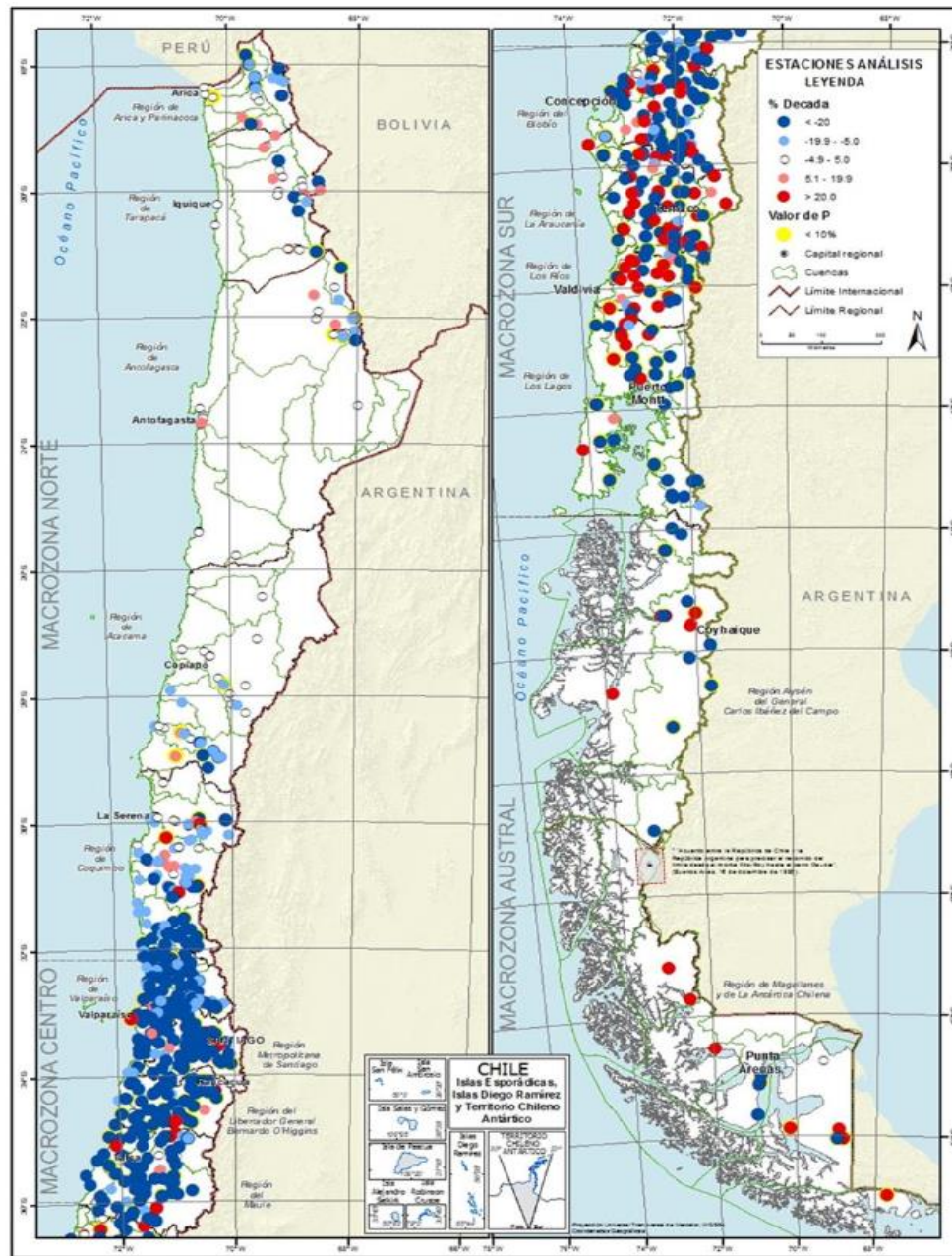


Quintana y Aceituno (2011), concluyen que para la zona centro norte (30°-34°) la media de la precipitación anual no ha presentado una variación significativa durante los últimos 50 años, dada la variabilidad interanual y decadal. Otro estudio, realizado por Boisier et al., (2018) indica que entre los años 1960 y 2016 hay una tendencia a la disminución en la precipitación media anual y caudales medios anuales para Chile central (30°-39° S) y Sur de Chile (38°-48° S) con disminuciones de precipitación media de  $-1 \pm 1.9 \%$ .

En el año 2010 esta disminución se hace aun más evidente hasta el presente, evento denominado megasequía (entre años 2010 y 2015), provocando un impacto significativo en la hidrología superficial, aguas subterráneas, exportación de sedimentos al océano, vegetación y actividad de incendios a lo largo del centro de Chile. Esta la sequía con mayor duración que se ha registrado en la historia de Chile (Garreaud et al., 2017).

En el sur (37°- 43°) la precipitación presenta una tendencia negativa, la cual es mayor a finales del siglo XX, esto se debe a la Oscilación Antártica (AAO, por su siglas en inglés), la cual afecta los gradientes de presión en la Antártica. La AAO es un índice que al tomar valores positivos significa que las bajas presiones están cerca de la Antártica y alejadas de Chile provocando una disminución de precipitaciones en nuestro país (Quintana y Aceituno, 2011).

De acuerdo con el análisis de precipitación realizado por la DGA (2017), se presenta en la *Figura 2. 3*. Se aprecia una tendencia de disminución decadal para la precipitación, en la zona centro, y en la zona centro sur no se aprecia una tendencia ya que existen aumentos y una disminución para las estaciones ubicadas en dicha zona.



**Figura 2. 3:** Tendencia como una variación porcentual de precipitación, considerando el promedio del periodo de estudio, el color rojo corresponde a tendencias de aumento y el azul a disminución. Fuente: DGA, 2017.

### 2.1.1 Proyecciones climáticas

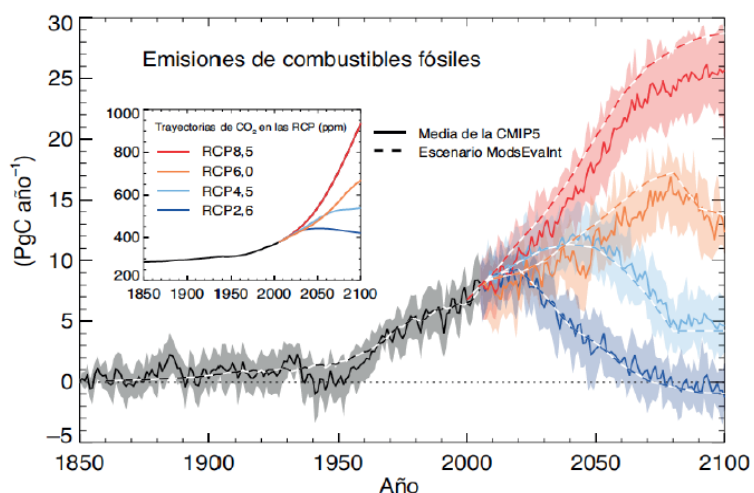
El cambio climático se refiere a una variación estadística significativa en el estado medio del clima y/o en la variabilidad de sus propiedades, que persiste durante largos períodos de tiempo, generalmente decenios o períodos más largos. Estos cambios climáticos pueden ser atribuidos a procesos naturales del planeta o actividades antropogénicas (IPCC, 1990).

Actualmente, existe un consenso científico sobre el cambio climático causado por actividades antropogénicas producto de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), principalmente debido al aumento en la concentración de CO<sub>2</sub>, y otros contaminantes como el

metano, ozono y aerosoles. Estos gases generan un efecto invernadero, lo que aumenta la temperatura de la Tierra (IPCC, 1990).

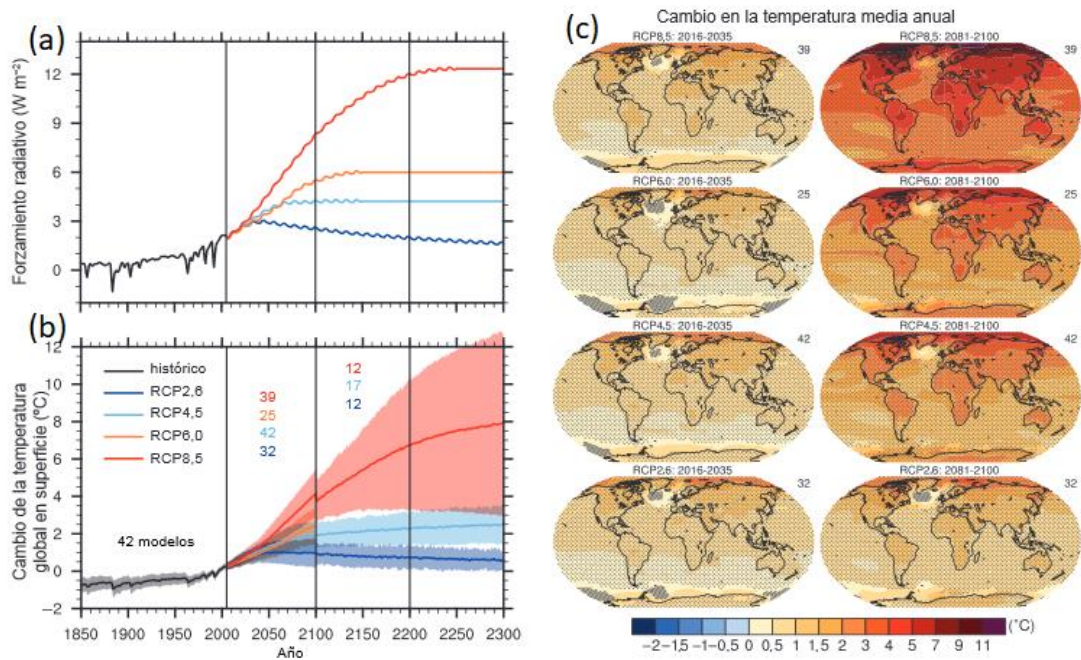
Existen diversas instituciones internacionales que han desarrollado modelos globales de clima acoplados (GCMs, por sus siglas en inglés: Global Climate Model) que derivan directamente de las leyes físicas o se construyen por métodos empíricos (Jalota et al., 2018). Los GCMs principalmente se utilizan para: (1) estudiar el clima actual, histórico y futuro, junto a (2) investigaciones destinadas a aumentar la comprensión del sistema climático y su variabilidad (Yu y Mechoso, 2001). También, los GCMs permiten realizar proyecciones climáticas (series de tiempo de precipitación, temperatura, humedad, entre otras) bajo distintos escenarios. Estos suponen diferentes escenarios de evolución temporal de los GEI en la atmósfera (Moss et al, 2010), entre otras forzantes.

Los escenarios RCPs (por sus siglas en inglés: Representative Concentration Pathways) con menor y mayor esfuerzo en la reducción de los GEI en la atmósfera, proyectan un forzamiento radiativo de  $8,5 \text{ W/m}^2$ ;  $6,0 \text{ W/m}^2$ ,  $4,5 \text{ W/m}^2$  y  $2,6 \text{ W/m}^2$  para el año 2100, siendo el RCP 8,5 el caso más desfavorable y el RCP 2,6 el caso más favorable (IPCC, 2013). En la *Figura 2. 4* se presentan esquemáticamente las proyecciones de los combustibles fósiles para cada escenario.



**Figura 2. 4:** emisiones de combustibles fósiles (históricas y futura) simuladas mediante los modelos CMIP5 para cuatro RCP. Fuente: IPCC, 2013.

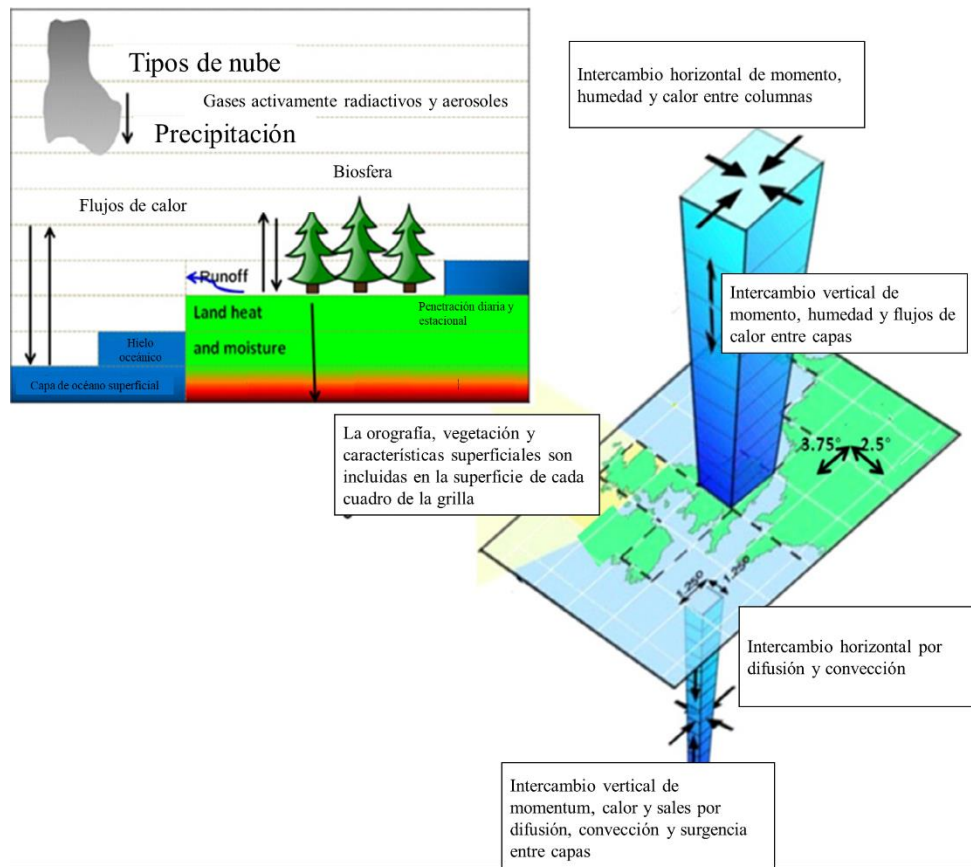
En el quinto informe del Grupo 1 del *International Panel on Climate Change* (IPCC, año 2013) se proyectan hacia el año 2100 un aumento de la temperatura media entre  $1^\circ\text{C}$  para el RCP 2,6 y  $4^\circ\text{C}$  para el RCP 8,5 respecto a la condición actual (año 2013). En la *Figura 2. 5* se presenta el cambio anual en la temperatura de la superficie y forzante radiativo. En el panel (a) se proyectan los forzantes radiativos para los distintos RCP, en el panel (b) se entrega cuánto aumenta la temperatura debido a estos forzantes y en el panel (c) los promedios de cambios de temperaturas en la superficie, siendo mayores para el RCP 8,5 para el período 2081-2100.



**Figura 2. 5:** a) Forzante radiativo medio global, b) Serie de valores medios anuales globales de las anomalías de la temperatura, c) Promedio de los modelos para cambios de temperatura en la superficie. Fuente: IPCC, 2013.

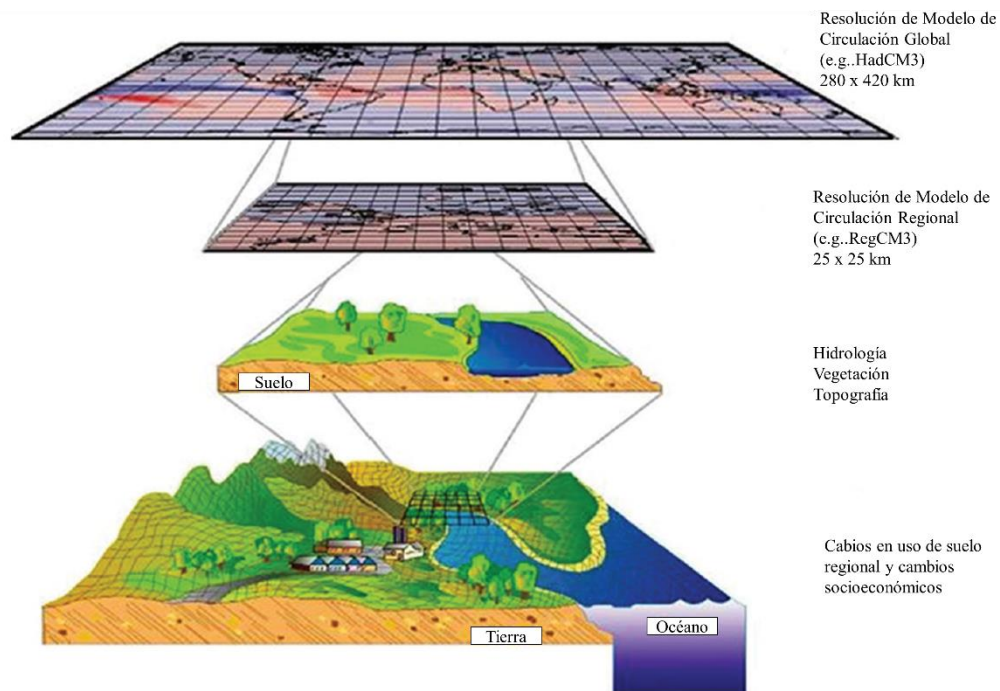
Los GCMs incorporan la naturaleza tridimensional del océano y la atmósfera, para replicar patrones de la atmósfera, océano, superficie terrestre y áreas cubiertas de nieve en el mundo. Debido al alto requerimiento computacional para la simulación, las variables como temperatura, precipitación, entre otros, se estiman considerando una grilla de 250-600 km de resolución horizontal, con 10 a 20 capas verticales para representar la atmósfera. En la *Figura 2. 6* se presenta de forma esquemática la grilla de un GCM (Jalota et al., 2018).





**Figura 2. 6:** Esquema grilla de un GCM (Jalota et al., 2018).

Para estudiar el impacto del cambio climático en los recursos hídricos se necesita una mejor resolución a la de los GCMs (mayor a 60 km) ya que con la información que estos poseen y la escala que usan no es posible generar proyecciones en una escala local (Xu, 1999). Debido a esto, es necesario realizar un escalamiento para obtener grillas, en lo posible, menores a 5 km. En la *Figura 2. 7* se presenta esquemáticamente este método. Se utilizan dos formas de escalamientos: (1) dinámico y (2) estadístico. El primero consiste en la resolución explícita de la dinámica física del sistema, considerando un modelo regional con mayor resolución con condiciones de borde dependientes de los GCM, por lo que se requiere un mayor gasto computacional. En cambio, el segundo método utiliza relaciones estadísticas del sistema que son derivadas de los datos observados, por lo que el costo computacional es menor (Xu, 1999).



**Figura 2. 7:** Conceptualización del escalamiento, Khan y Pilz, 2018.

## 2.2 Estudios de disponibilidad y crecidas

Es importante conocer los caudales promedio (disponibilidad) y caudales máximos instantáneos (crecidas) a lo largo de todo el territorio nacional, a nivel histórico y al menos tener una referencia de como variarán estos valores en el futuro.

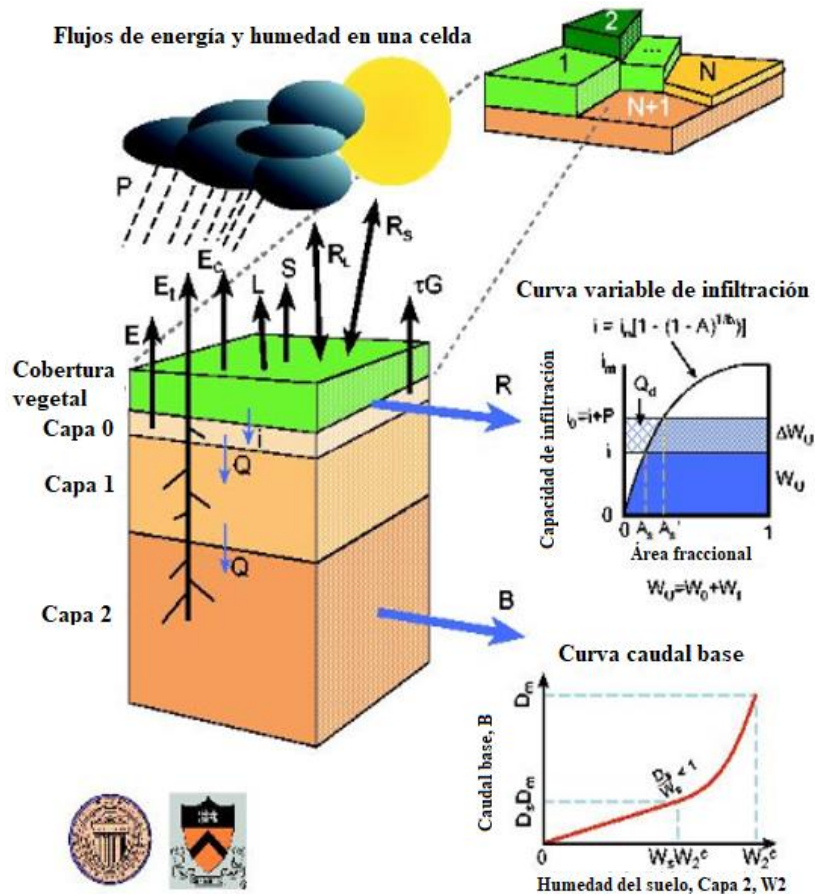
Es necesario estimar caudales medios mensuales para poder construir Curvas de Variación Estacional (CVE), permitiendo gestionar la entrega de Derechos de Agua de ejercicio eventual, los que pueden ser usados en épocas del año en que el caudal tenga una sobrante luego de entregar los Derechos de Agua permanente (Código de Aguas, 1981).

Una disminución natural de caudales junto a una mala gestión y entrega de Derechos de Agua puede terminar en declaraciones de agotamiento de aguas superficiales, decretos de reserva, áreas de restricción y zonas de prohibición de aguas subterránea (Atlas del Agua, 2016).

Para calcular la disponibilidad se han realizado diferentes estudios en Chile, siendo los más importantes el Balance hídrico de Chile el año 1987 (DGA, 1987) y el Balance Hídrico Nacional el año 2017 (DGA, 2017). En este último se ha utilizado el modelo hidrológico *Variable Infiltration Capacity* (VIC; Liang et al., 1994, 1996), el cual corresponde a un modelo semidistribuido de superficie terrestre y físicamente basado, ya que resuelve balances de energía y masa.

En este modelo las celdas de la grilla pueden ser consideradas como una unidad de respuesta hidrológica dado que las celdas son modeladas de forma independiente sin considerar un flujo de agua horizontal (Gao et al., 2010), luego empleando un modelo de enrutamiento autónomo (Lohmann et al., 1996) se transporta la escorrentía de las superficies de las celdas y el flujo base al sistema fluvial (Gao et al., 2010).

En la *Figura 2. 8* se presenta esquemáticamente el funcionamiento del modelo VIC. Presenta una distribución de una capa para la vegetación y múltiples capas de suelo. En la primera capa se intercepta la lluvia (Canopy), en las 2 primeras capa de suelo se representa la respuesta dinámica del suelo a la lluvia infiltrada y escorrentía. Cuando la capa media está saturada (Layer 0-1), la capa inferior de suelo caracteriza el comportamiento estacional de la humedad del suelo y solo responde a la lluvia a corto plazo cuando las capas superiores del suelo están saturadas (Gao et al., 2010).



*Figura 2. 8:* Representación celda del modelo VIC Fuente: Gao et al., 2009.

Al momento de diseñar cualquier obra hidráulica es necesario estimar el caudal máximo que deben resistir para alguna crecida dependiendo del tamaño y/o peligro que genere el desborde o daño en la obra, así como el caudal que podría generar algún acontecimiento aluvional o de inundación; por lo que, en el año 1995, la DGA elaboró un documento llamado Manual de cálculo de crecidas y caudales mínimos en cuencas sin información fluviométrica (DGA, 1995).

Este manual tiene como objetivo entregar métodos de cálculos de caudales máximos y mínimos. Algunos de los métodos entregados corresponden a: Método DGA-AC para crecidas pluviales, Método de Verni King y King Modificada, fórmula Racional, además de la estimación mediante hidrogramas de crecidas.

Estos métodos calculan caudales máximos instantáneos para diferentes períodos de retorno (entre 2 y 100 años) usando constantes que dependen de la información fluviométrica medidas hasta el año 1995, las que dependen de la zona en que se encuentra la cuenca estudiada. Además, necesitan la precipitación para el período de retorno indicado y el área pluvial aportante.

Otros estudios sugieren que se deben considerar otros factores al momento de estimar la crecida. Lagos (2012) destaca que el estudio de las crecidas pluviales en las cuencas nivales, se llevan a cabo considerando precipitaciones y caudales, mediante hidrogramas unitarios. Esto considera que el área pluvial será el mismo para todas las tormentas, lo cual es erróneo ya que es dinámico y varía de tormenta en tormenta, lo que puede generar que una tormenta de bajo periodo de retorno, pero cálida genere una crecida mucho más severa que otra de alto periodo de retorno, pero fría. Por lo que es necesario determinar las variaciones de la línea de nieve en esta cuenca. Al no existir una red de monitoreo densa y extensa aun no es posible determinar las características de las crecidas originadas por este tipo de tormenta.

Molina (2019), analiza la ocurrencia de crecidas que pueden conllevar a un aluvión utilizando el modelo VIC. En donde, para cada evento histórico que dio como resultado un aluvión o una crecida pluvial, se modela nuevamente cambiando la precipitación, temperatura y humedad antecedente en el suelo. De estas tres variables la que más afecta a los eventos históricos es la humedad y la temperatura. Un aumento de la humedad genera un incremento notorio en los caudales de crecida y un aumento de la temperatura provoca que la línea de nieves este a una mayor altura, por lo que estas variables debiesen ser tomadas en cuenta en las estimaciones de crecidas.

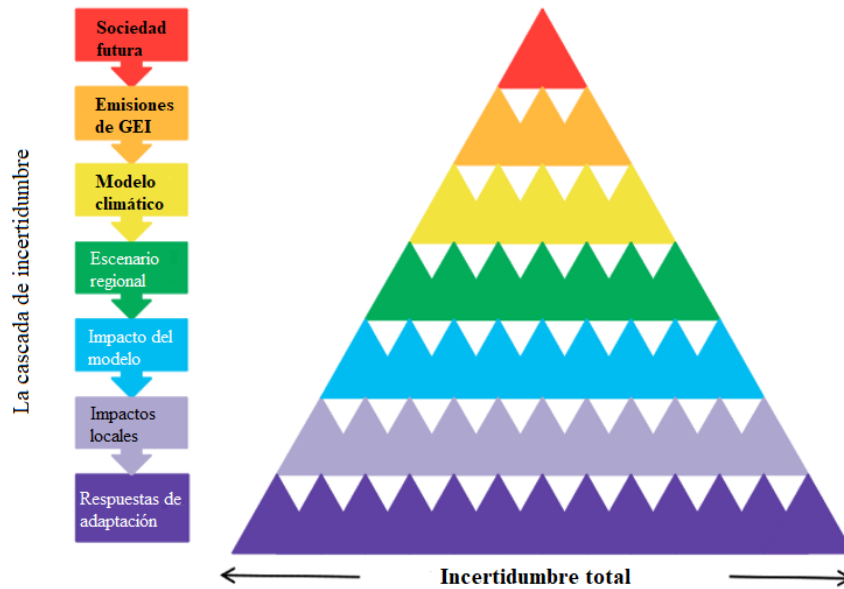
## **2.3 Estudios de cambio hidrológico**

### **2.3.1 Enfoque Top-Down**

El enfoque top-down o “descendente”, consiste en utilizar las proyecciones climáticas a partir de diferentes escenarios de emisión (RCP) y GCM, por lo que se necesita una reducción de escala y/o sesgo para utilizar esta información como forzantes en diferentes modelos numéricos o estadísticos para estimar los posibles impactos y así tomar medidas de adaptación (Zscheischler et al., 2018). A pesar de esto, la mayoría de los estudios con este enfoque se detienen en la fase de estimación y evaluación de impacto (Wilby y Dessai, 2010).

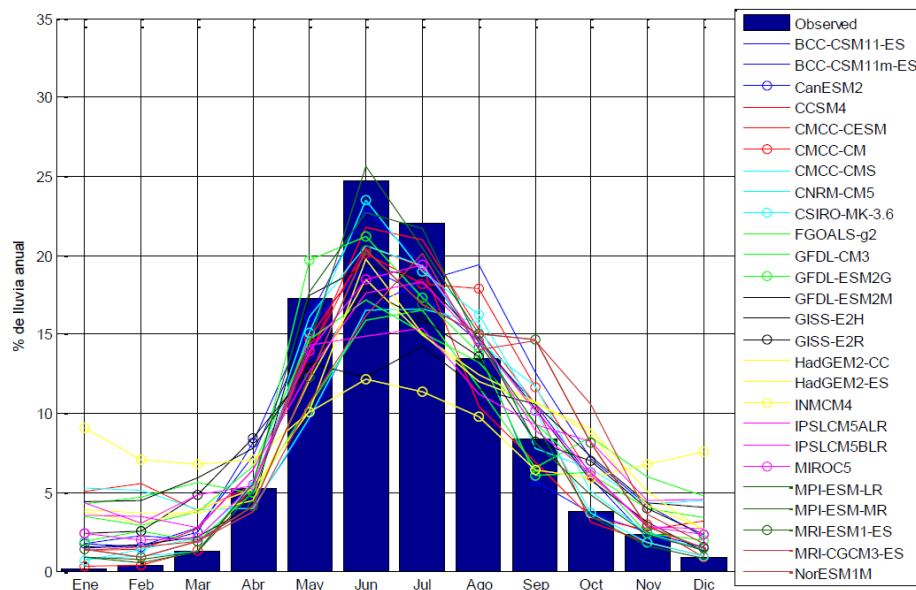
Por lo tanto, este enfoque consiste en utilizar la información como una cascada, conectando la información de un paso al siguiente, provocando que la incertidumbre sea mayor en cada paso del proceso (Girard et al., 2015), en la *Figura 2. 9* se presenta esquemáticamente este tipo de enfoque.





**Figura 2. 9:** Esquema enfoque Top-down. Fuente: Wilby y Dessai, 2010.

Para abordar la propagación de incertidumbre con este tipo de enfoque, se realiza una selección de los tipos GCM (e.g., DGA, 2017). En el trabajo realizado por Lagos et al. (2015) en donde se analizan 26 GCMs para determinar las proyecciones de crecidas con diferentes periodos de retorno para 3 cuencas, utilizando un escalamiento estadístico y descartando los modelos GCM de acuerdo con el ajuste de la estacionalidad de precipitación y temperatura del modelo en el periodo histórico, seleccionando finalmente 4 GCMs, en la *Figura 2. 10* se presentan los GCM para la precipitación.



**Figura 2. 10:** Evaluación por estacionalidad para la precipitación de modelos GCM en una estación base. Fuente: Lagos et al., (2015).

Migliavacca et al. (2015), también utiliza este tipo de enfoque ya que evalúan los posibles impactos del cambio climático hasta 2100 sobre el régimen hidrológico de la cuenca del río Maipo. Para esto utilizan un modelo hidrológico, información de diferentes GCM para diferentes

escenarios RCP (2.4, 4.5 y 8.5) al que se le aplican un escalamiento estadístico para forzar un modelo con las proyecciones de temperatura y precipitación. Se obtienen tendencias de aumento de temperatura, disminución del flujo anual, en invierno el flujo aumentará y en primavera se verá reducido.

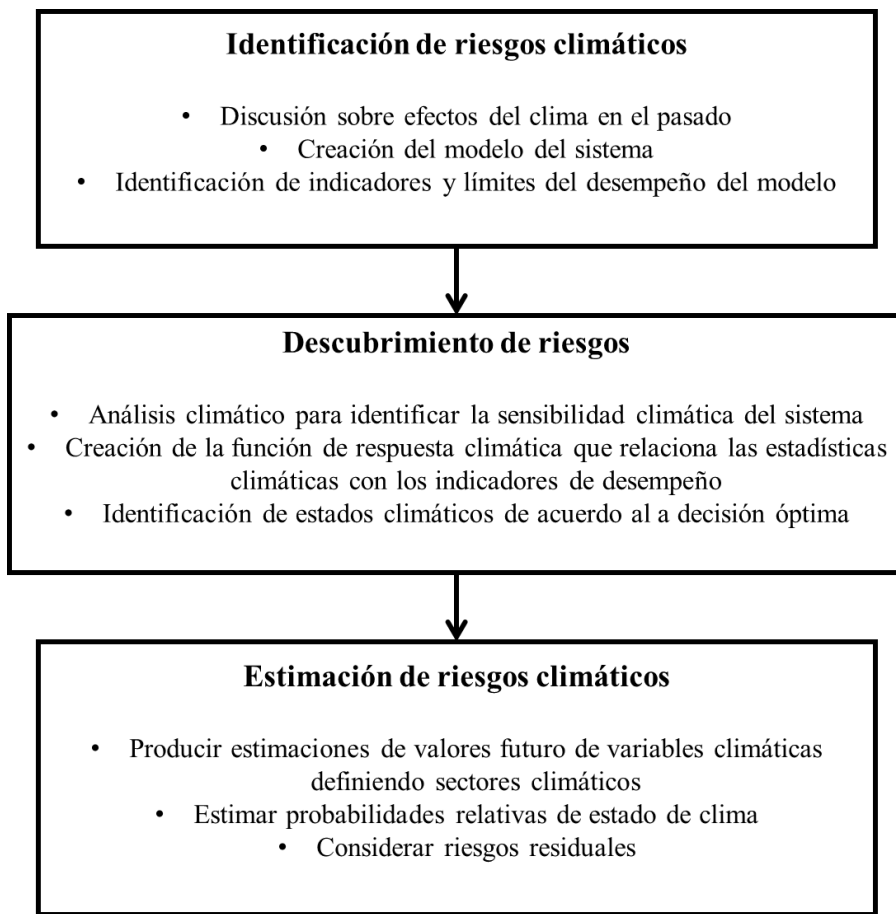
Otro estudio (Chadwick 2017), dice que para las cuencas del Limarí, Maipo y Maule compara las series de precipitación (P) y temperatura (T) obtenidas de un pre-análisis estadístico de 45 GCMs con los resultados obtenidos al usar cada proyección individualmente. Las series de P y T sin pre-análisis se realizan a partir de las series móviles normalizadas y un generador de series anuales. Las series con pre-análisis se realiza a partir de series de tendencias (obtenidas diferentes percentiles de las Curvas de Probabilidad Acumulada de las series de medias móviles normalizadas) para 45 GCMs y un generador de series anuales. Obtiene resultados de cantidad de años futuros secos muy similares con y sin pre-análisis (diferencia promedio menor al 0,4%) además de concluir que usando entre 5 a 10 tendencias se mejoran los resultados comparados a usar una sola tendencia, incluso si esta corresponde al a media o mediana.

En el año 2018, Chadwick realiza el mismo análisis además de comparar los resultados con los obtenidos mediante otras metodologías tales como: QMBC (por sus siglas en inglés *quantile mapping bias correction*), GCMs sin procesar o “crudos”, cambio delta o factor de cambio. Concluye que el mejor método para reproducir el clima local e incorporar los cambios que proyectan los GCMs es el sin pre-análisis o convencional seguido del pre-análisis.

### **2.3.2 Enfoque Bottom-Up**

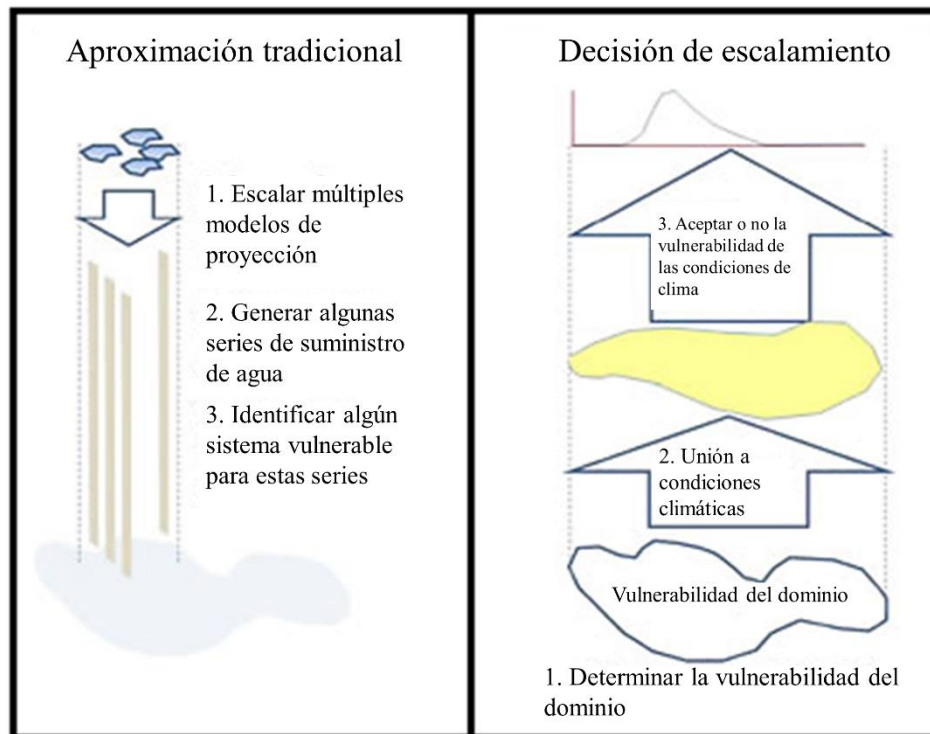
Este tipo de enfoque “ascendente” analiza los factores y condiciones características que permiten comprender el comportamiento y sensibilidad del sistema. A pesar de que las respuestas del sistema no dependen de los escenarios de cambio climático, se necesitan observaciones suficientemente largas para evaluar las magnitudes y frecuencias de los eventos de interés. Destacar que este tipo de enfoque se utilizan cada vez más para comprender los impactos climáticos y la resistencia del sistema (Wilby y Dessai, 2010).

Brown et al., 2012 presenta un enfoque bottom-up para la evaluación del cambio climático considerando diferentes fuentes de información climática. Para esto propone una metodología de 3 pasos: (1) Identificación de peligros, umbrales climáticos y la creación de un modelo (2) Luego se identifican los estados climáticos asociados con el riesgo y (3) a partir de la información de diferentes GCM se adaptan para la toma de decisiones. En la *Figura 2. 11* se presenta el esquema desarrollado.



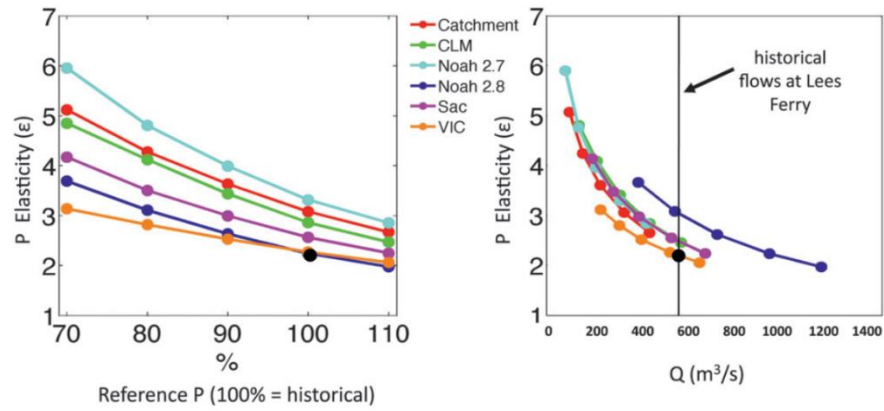
*Figura 2. 11:* Diagrama de evaluación bottom-up. Fuente: Brown y Ghile, 2012.

Diferentes hidrólogos están utilizando métodos basados en el análisis de sensibilidad que utilizan proyecciones de GCM para informar, de esta manera establecen enfoques de un escenario neutral y escalas de decisiones para incorporar la información climática. Este tipo de procedimiento se puede considerar como una combinación del enfoque bottom-up con top-down ya que analizan las áreas y temas de interés con la información climática disponible y luego analizan la información climática entregada por GCMs (Brown y Wilby, 2012). En la *Figura 2. 12* se presenta el enfoque top-down y bottom-up.

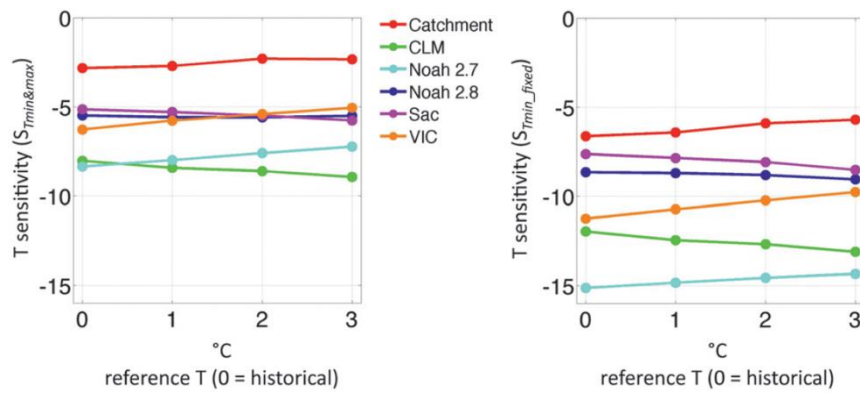


*Figura 2. 12: Panel izquierdo top-down, panel derecho bottom-up. Fuente: Brown y Wilby, 2012.*

Ejemplos de modelos Bottom-Up serían los realizados por Vano en el 2012 y 2015. El año 2012 publica un estudio sobre las diferencias atribuibles al uso de distintos modelos de superficie terrestre (LSM, por sus siglas en inglés: Land Surface Model) y cómo la elección de estos afecta la sensibilidad (temperatura) y elasticidad (precipitación) del caudal de río Colorado en Estados Unidos. Para esto se usaron 5 LSMs aplicados a toda la cuenca. Se obtuvieron resultados de elasticidad para el caudal evaluado a cambios de precipitación y para cambios en temperatura se obtuvieron sensibilidades del caudal. Estos valores fueron obtenidos a partir de información histórica entre los años 1975 y 2005. Para los distintos LSMs se impusieron cambios de precipitación y temperatura para estudiar la elasticidad y sensibilidad de precipitación y temperatura respectivamente. Las elasticidades obtenidas variando la precipitación y la sensibilidad variando temperatura se aprecia respectivamente en *Figura 2. 12* (Vano et al., 2012).

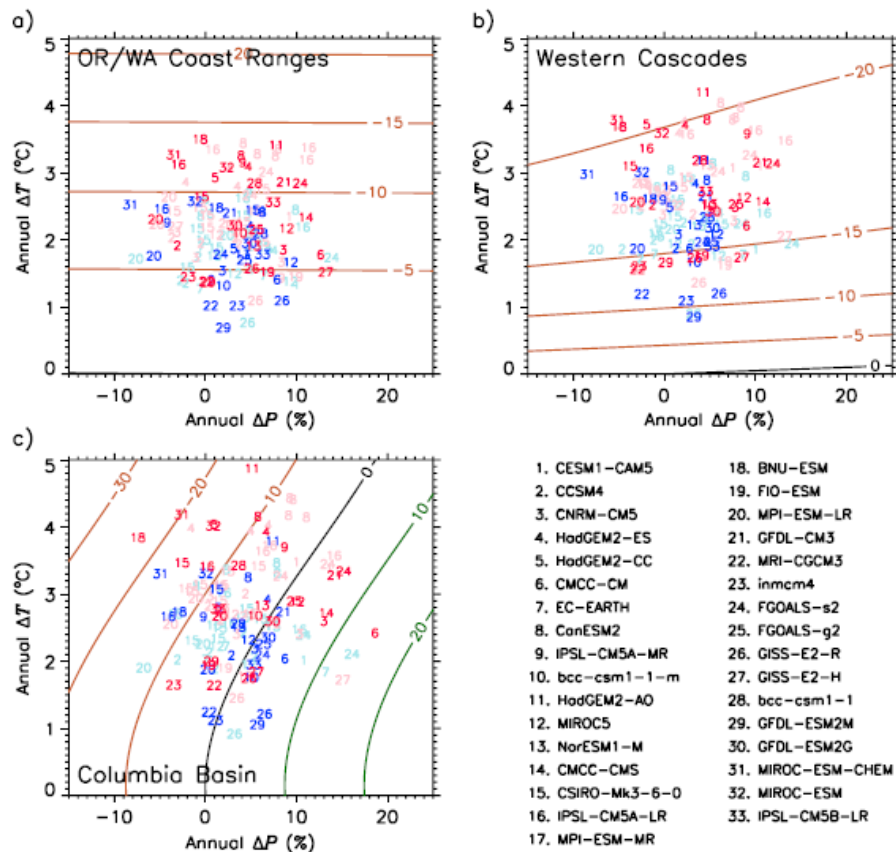


**Figura 2. 13:** Elasticidad para distintos LSM (líneas de colores) gráficos de dos maneras: a la izquierda Elasticidad dada la Preciitación dada y al a derecha se graficaa las mismas Elasticidades para los caudales correspondientes.



**Figura 2. 14:** Sensibilidades para distintos LSM (líneas de colores) gráficos al aumentar Tmin y Tmax (izquierda) y al aumentar T max y dejar fijo Tmin (derecha).

En otro estudio (Vano et al., 2015) se utilizaron distintos GCMs para obtener pronósticos de variaciones de forzantes climáticas para estimar caudales en distintas zonas, esto con el fin de estudiar el comportamiento en cuanto a caudal para distintas variaciones de precipitación y temperatura. Esto se realizó mediante la *Ecuación 1* (en Capítulo 4), la cual relaciona variaciones de caudal promedio anual [%] con variaciones de precipitación anual [%] y variaciones de temperatura promedio anual [°C]. Los resultados se entregan como isolínea de variaciones de caudal ante variaciones de precipitación y temperatura en tres zonas distintas como se aprecia en la *Figura 2. 15*. (Vano et al., 2015).



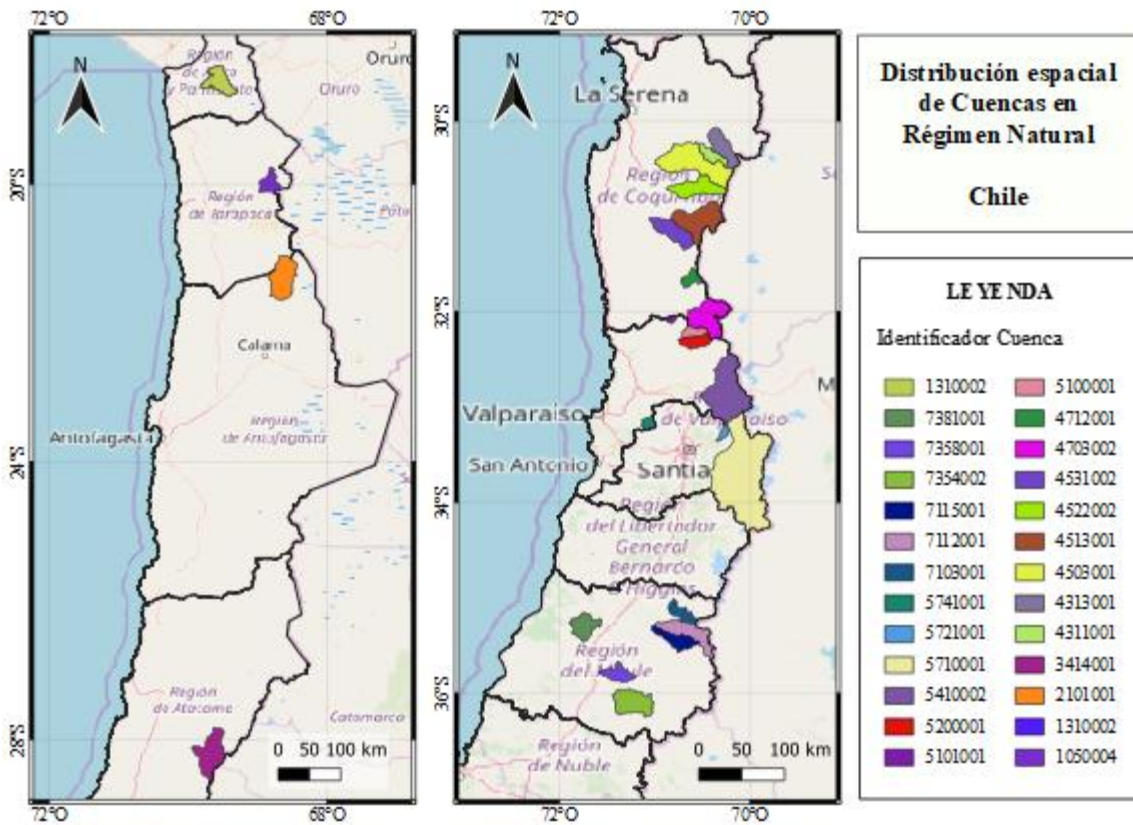
**Figura 2. 15:** Obtención de variación porcentual de caudal (isolíneas) en % según información histórica y futura de distintos GCMs (variación porcentual de precipitación y variación de temperatura en °C. Fuente: Vano et al., 2015.

Vano (año), dice que, si la cuenca posee algún componente nival, a aumentos de temperatura bajos, la variación de caudal esta controlada por aumentos de precipitación, pero a medida que aumenta la temperatura, el derretimiento de nieve es menor que la evapotranspiración por lo que el caudal aumenta en menor medida.

## Capítulo 3: Zona de estudio

### 3.1 Descripción de cuencas

Para este trabajo se estudian 25 cuencas ubicadas en las macrozonas Norte y Centro del país, entre la Región de Arica y Parinacota y la Región del Maule. Estas cuencas están poco intervenidas (asociado a derechos de agua permanente entregados en la cuenca en relación al caudal promedio del río de la cuenca) por lo que se consideran en régimen natural. La ubicación de las cuencas se aprecia en la *Figura 3. 1*.



*Figura 3. 1: distribución espacial de Cuencas en Régimen Natural.*

Además, con los datos utilizados (precipitación diaria [mm], temperatura promedio diaria, [°C] y caudal medio diario [ $m^3/s$ ] entre los años 1985 y 2015) se obtiene el régimen de cada cuenca. Se considera cuencas de régimen pluvial (se hace la distinción si el peak de los caudales medios mensuales (CMM) y las precipitaciones ocurren en verano), régimen nival (un solo peak de los CMM, durante el verano y las precipitaciones ocurren en invierno), régimen pluvio nival (dos peak en los CMM, el mayor se da en invierno y el menor en verano, con precipitación mayor en invierno) y nivo pluvial (dos peak en la CVE, el mayor se da en verano y el menor en invierno, con precipitación mayor en verano).

Se construyen los gráficos de los CMMs con caudales(Q) promedios mensuales dividido por el promedio anual y los climogramas con precipitación (Pp) mensual dividido en precipitación anual y con temperatura (T) promedio mensual dividido en temperatura promedio anual. Se tienen tres cuencas en régimen Pluvial con peak de caudal y precipitación en verano (*Figura 3. 2* y *Figura 3. 3*), once en régimen nival (*Figura 3. 4* y *Figura 3. 5*), seis en régimen Nivo Pluvial (*Figura 3. 6*



y Figura 3. 7), cuatro en régimen Pluvio Nival (Figura 3. 8 y Figura 3. 9) y una cuenca en régimen Pluvial con peak de caudal y precipitación en invierno (Figura 3. 10 y Figura 3. 11).

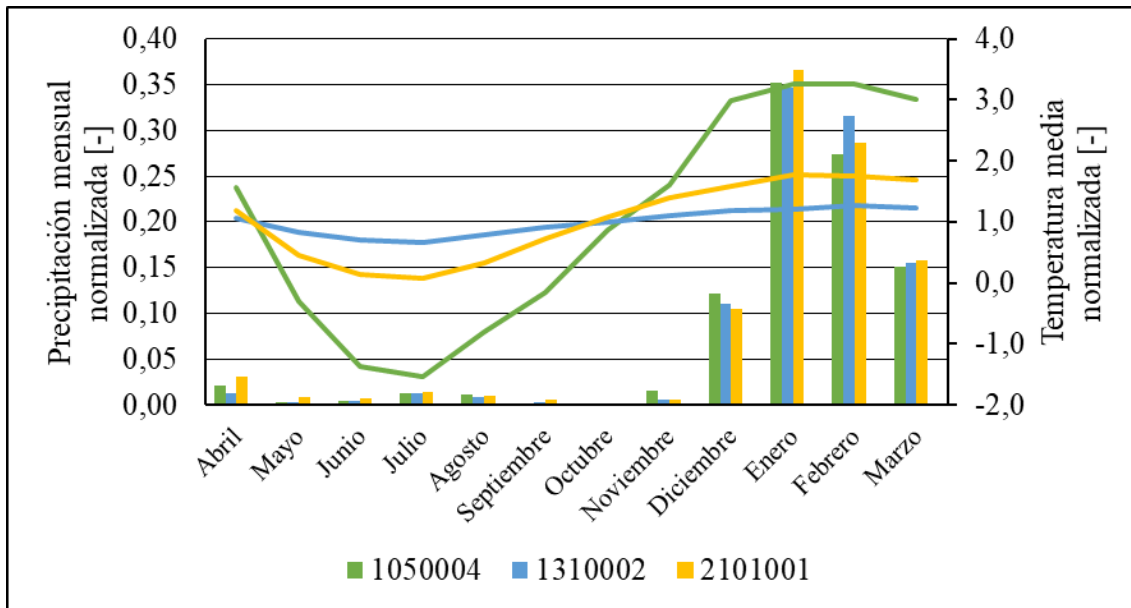


Figura 3. 2: Climogramas de cuencas con régimen Pluvial entre los años 1985 y 2015 (precipitación en verano).

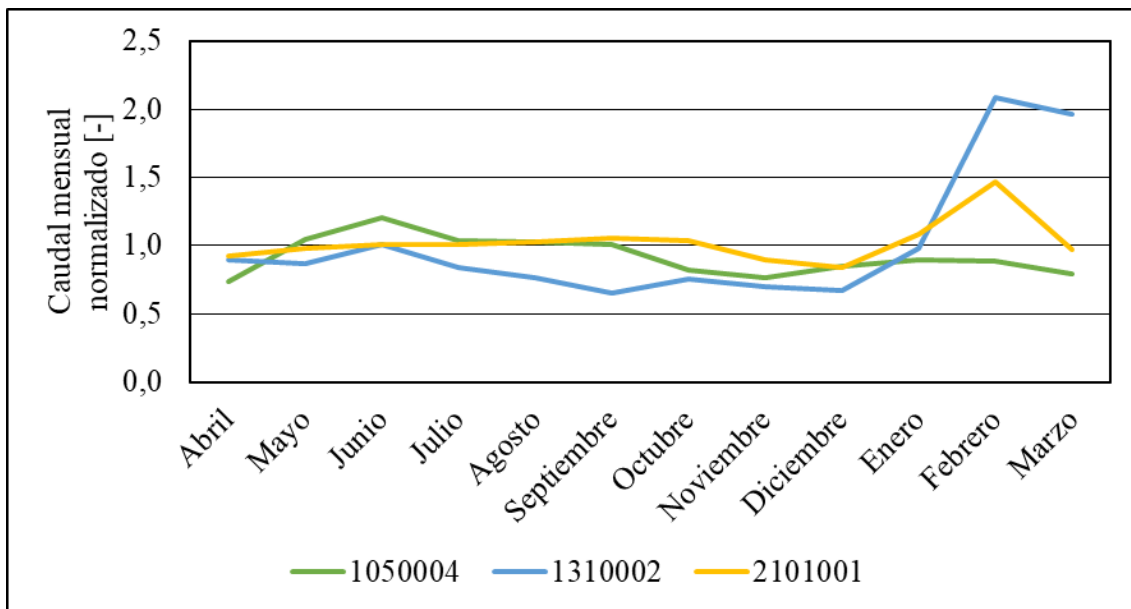


Figura 3. 3: Caudales medios mensuales normalizados de cuencas régimen con Pluvial entre los años 1985 y 2015 (precipitación en verano).



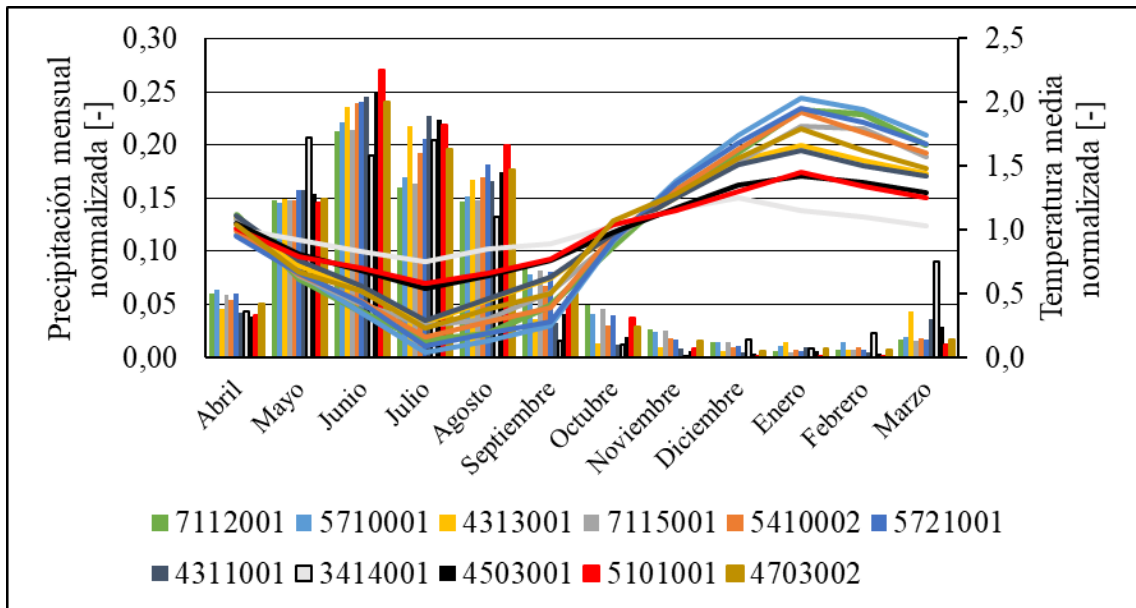


Figura 3. 4: Climogramas de cuencas con régimen Nival entre los años 1985 y 2015.

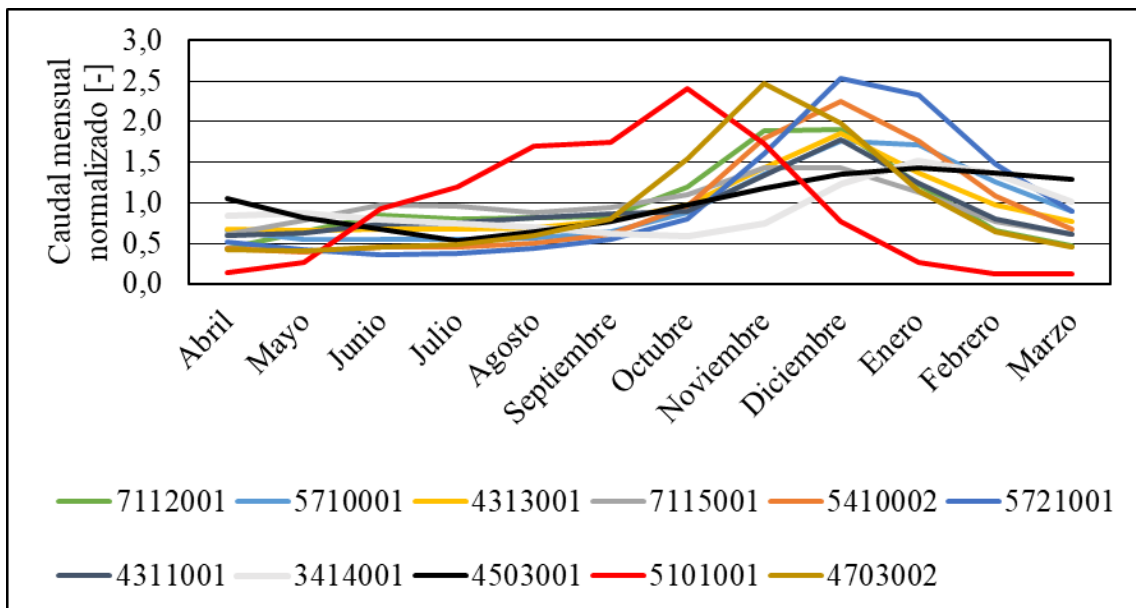
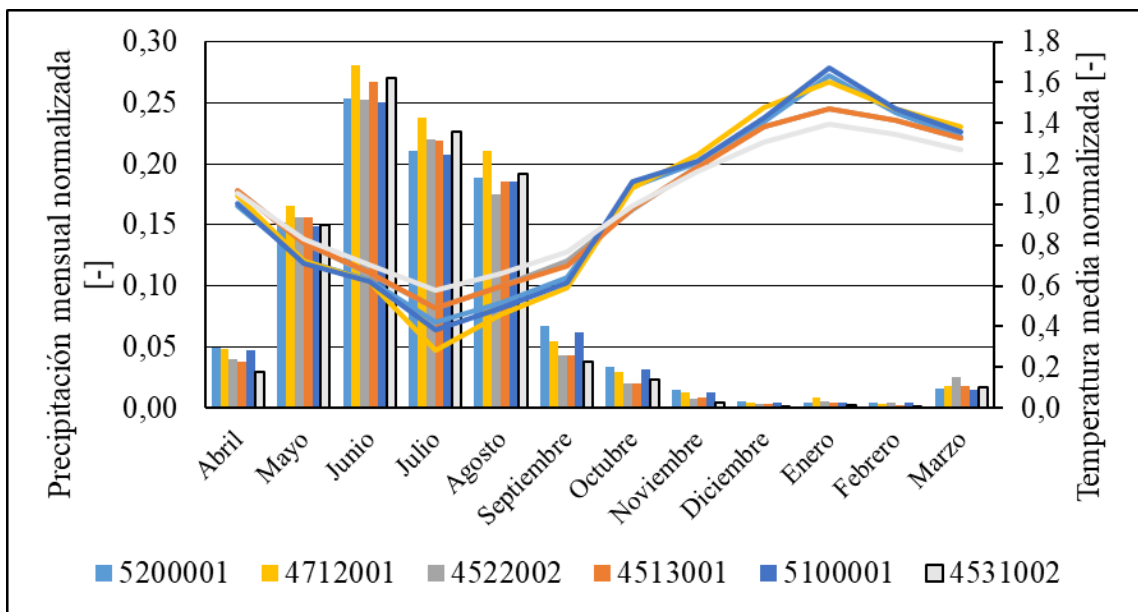
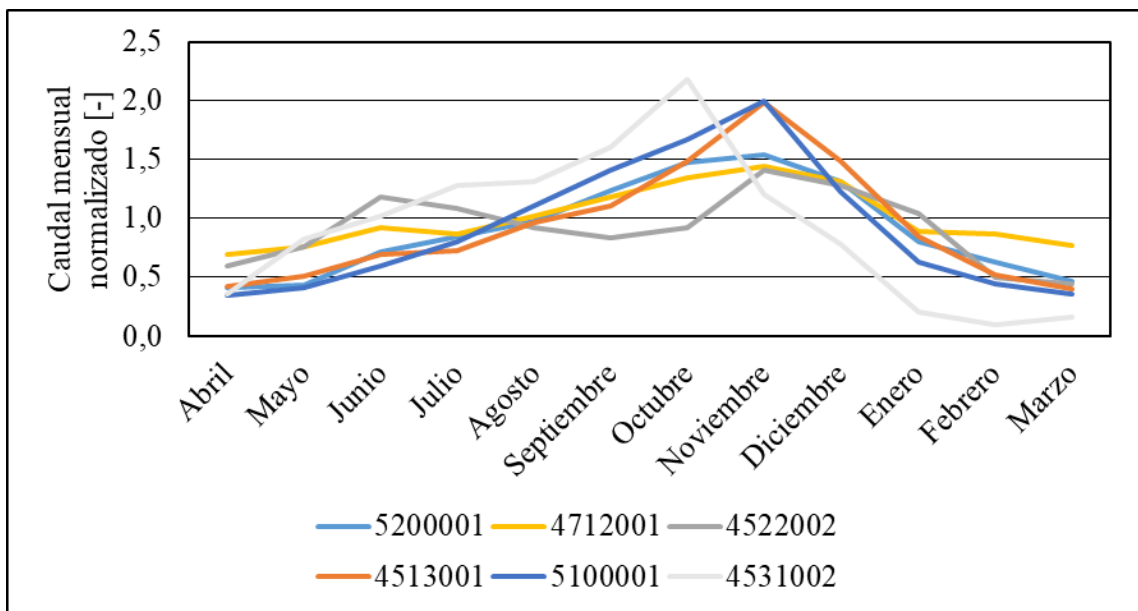


Figura 3. 5: Caudales medios mensuales normalizados de cuencas con en régimen Nival entre los años 1985 y 2015.



**Figura 3. 6:** Climogramas de cuencas con régimen Nivo Pluvial entre los años 1985 y 2015.



**Figura 3. 7:** Caudales medios mensuales normalizados de cuencas con régimen Nivo Pluvial entre los años 1985 y 2015.

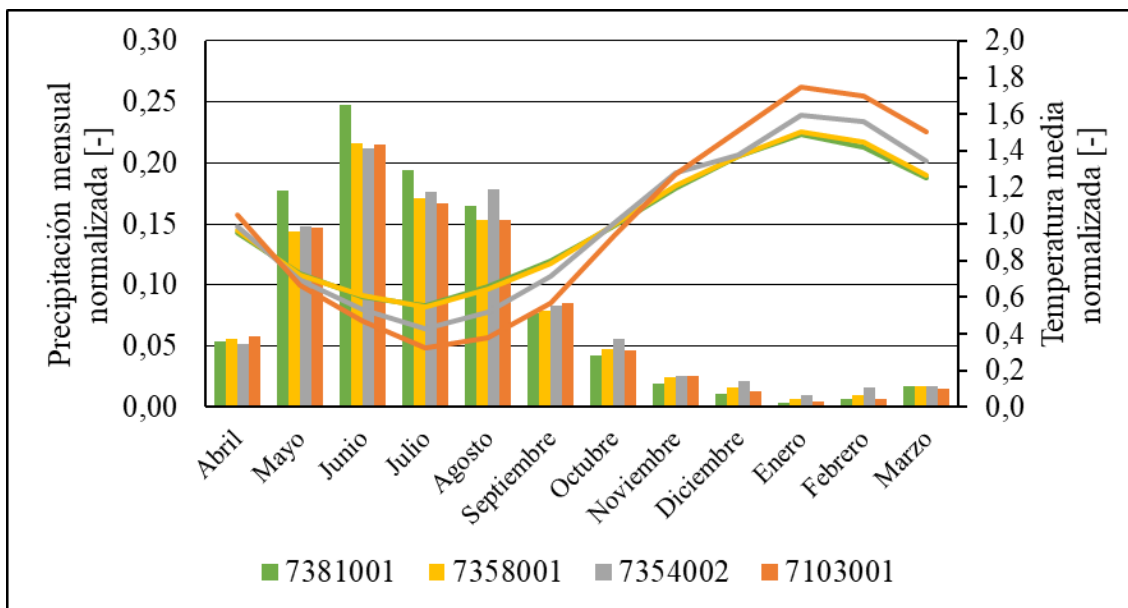


Figura 3. 8: Climogramas de cuencas con régimen Pluvio Nival entre los años 1985 y 2015.

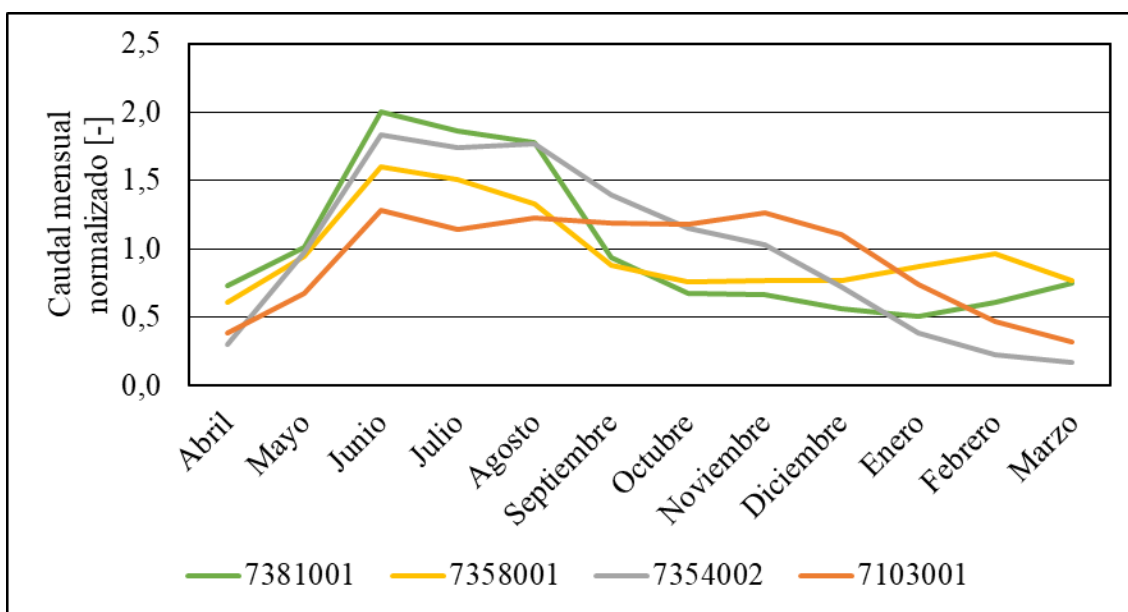


Figura 3. 9: Caudales medios mensuales normalizados de cuencas con régimen Pluvial Nival entre los años 1985 y 2015.

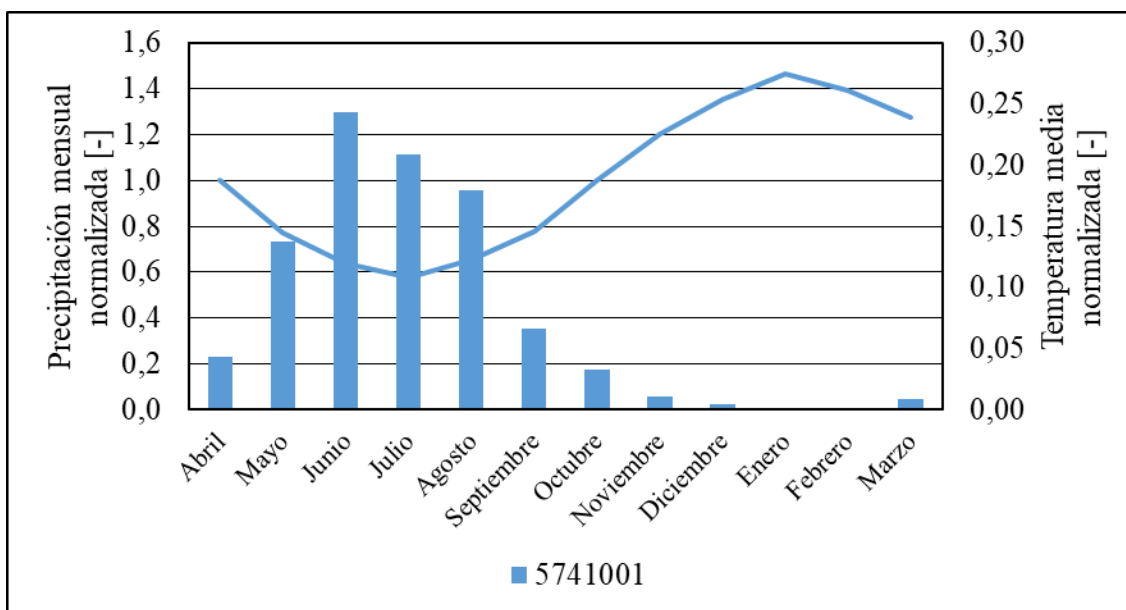


Figura 3. 10: Climogramas de cuenca con régimen Pluvial entre los años 1985 y 2015 (precipitación en invierno).

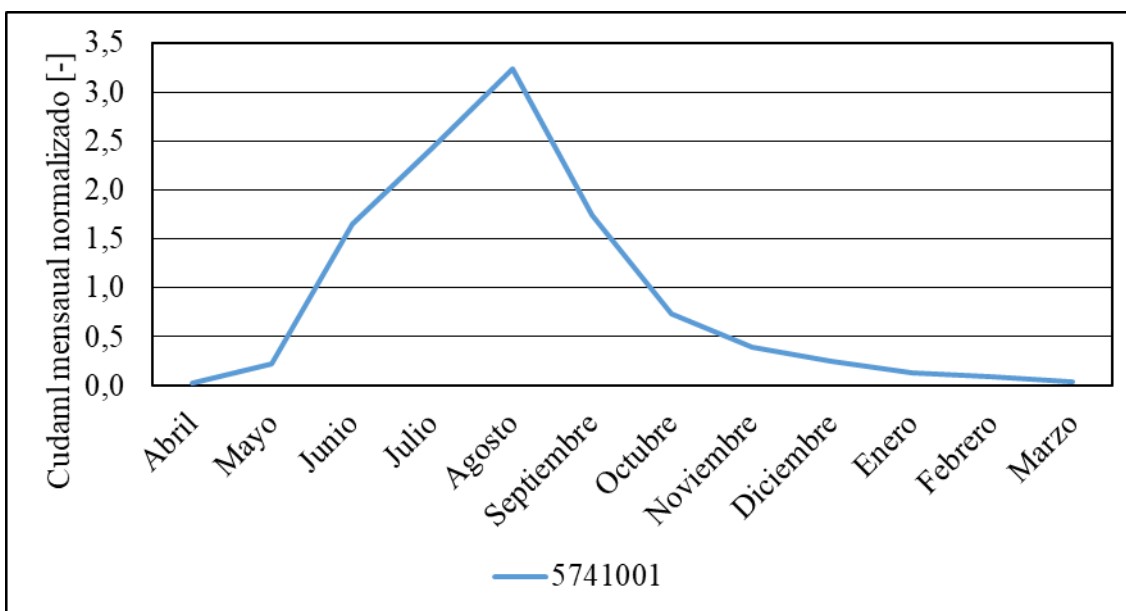
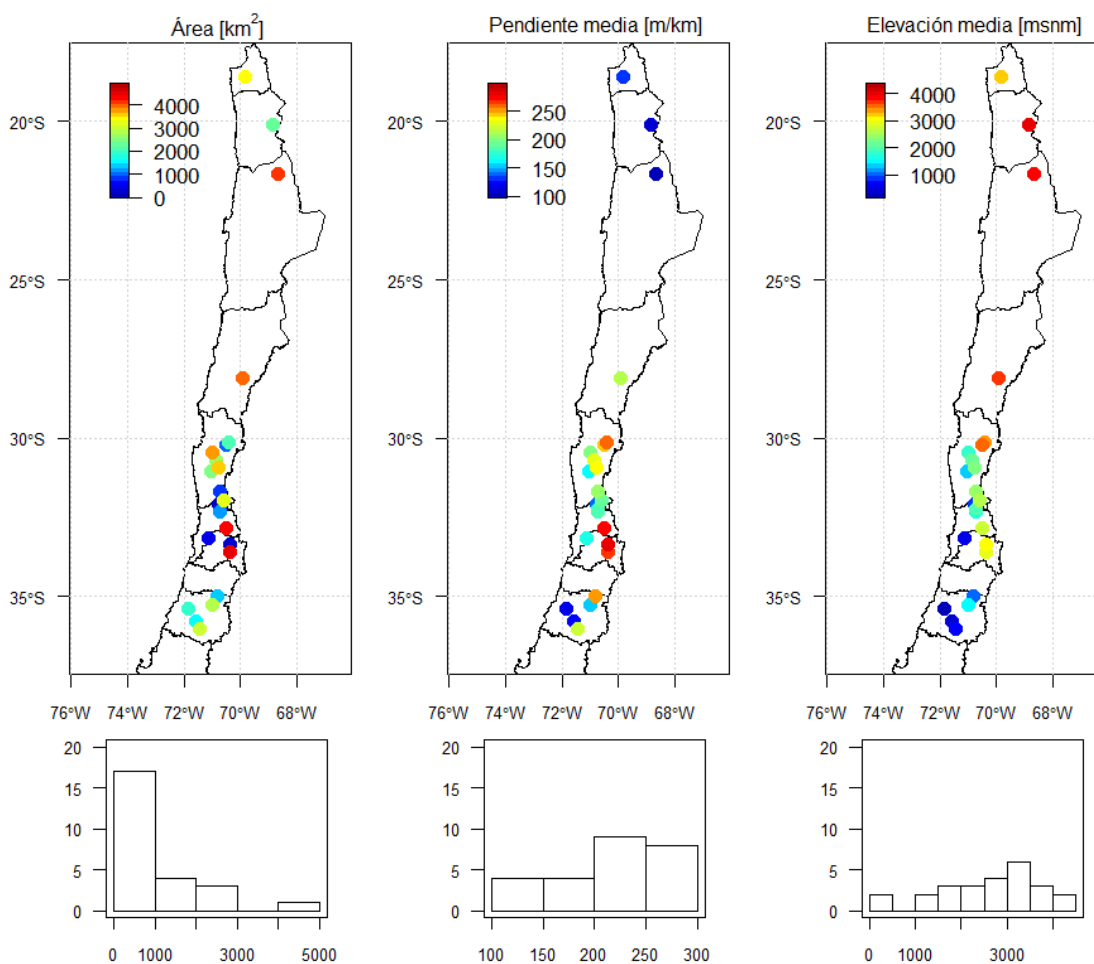


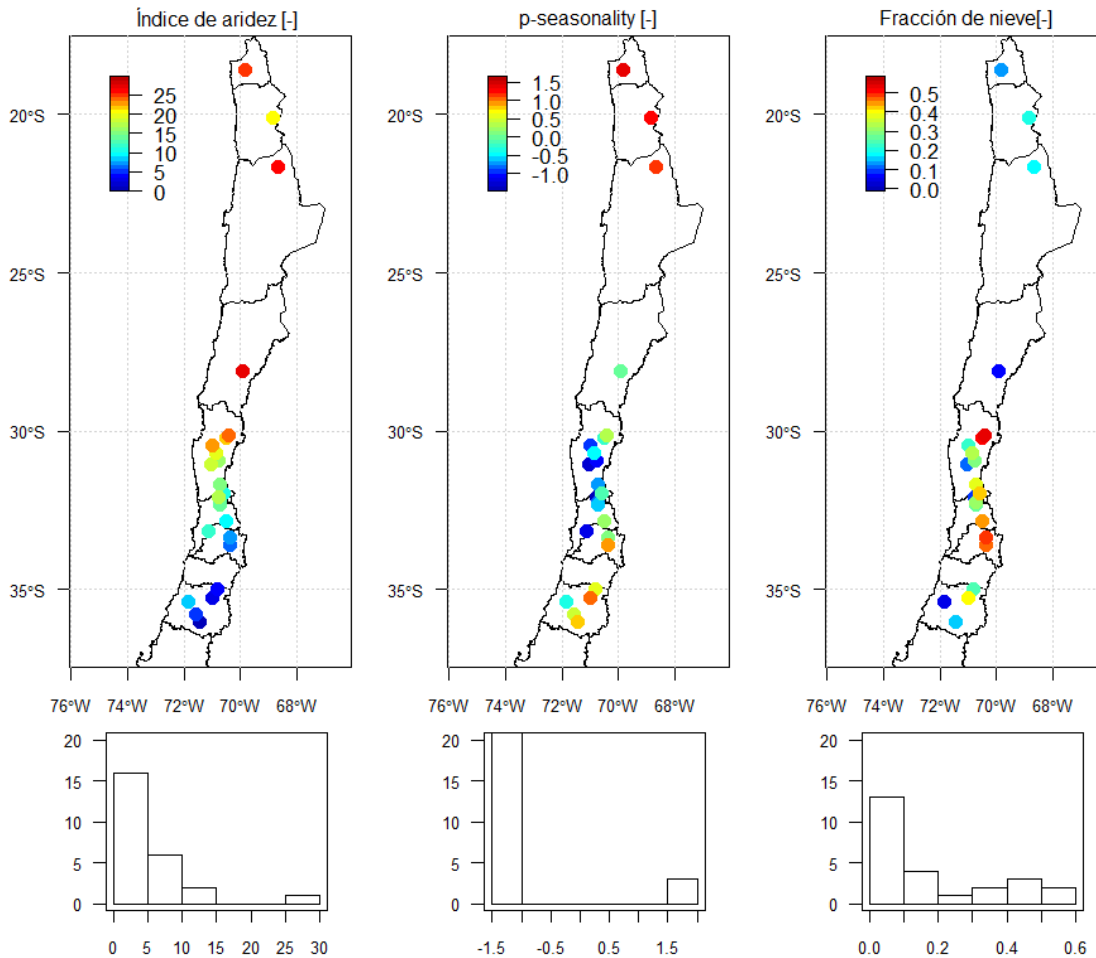
Figura 3. 11: Caudales medios mensuales normalizados de cuencas con régimen Pluvial entre los años 1985 y 2015 (precipitación en invierno).

Gracias a la información obtenida de la plataforma CAMELS-CL (Alvarez-Garreton et al., 2018) se construyen mapas espaciales para diferentes parámetros (Figura 3. 12 y Figura 3. 13), como lo son el área, el índice de aridez, la elevación media, pendiente media, fracción de área con nieve y temporalidad de precipitación (p-seasonality). A continuación, se describen brevemente estos parámetros:

El área, la elevación media y la pendiente media fueron modeladas a partir del raster ASTER GDEM con resolución de 30m. El índice de aridez se obtiene dividiendo el promedio diario de la Evapotranspiración potencial por el promedio diario de la Precipitación. El índice de temporalidad de la precipitación (p-seasonality) es un índice que indica si los peaks de precipitación ocurren en verano (valores positivos) o en invierno (valores negativos), un valor cercano a cero indica precipitación uniforme a lo largo del año. La fracción de nieve indica el porcentaje promedio de área que está cubierta con nieve (Alvarez-Garreton et al., 2018). Estos datos se encuentran en el Anexo F.



**Figura 3. 12:** Cuencas según distintos parámetros: izquierda área [km<sup>2</sup>], centro pendiente media [m/km], derecha elevación media [msnm].



**Figura 3. 13:** Cuencas según distintos parámetros: izquierda índice de aridez [-], centro temporalidad de Pp [-], derecha fracción de nieve [-].

### 3.2 Datos utilizados

Los datos con que se trabaja corresponden a los del Centro de Ciencia del Clima y Resiliencia (CR2) de la Universidad de Chile para precipitación diaria y temperatura media diaria. Estos datos están dimensionados en una grilla rectangular, de aproximadamente 5 km (0,05° latitud longitud) para Chile continental entre los años 1975 y 2015. El CR2 también recopiló información de caudales a partir de la Red de Estaciones de la DGA, obteniendo caudales medios diarios para las cuencas.

Debido a que desea proyectar caudales medios y caudales máximos para el futuro dado un escenario RCP 8,5, se utilizan 3 de los 4 GCMs que son utilizados en la actualización del balance hídrico a nivel nacional (DGA, 2018), ver *Tabla 3. 1*. Estos GCMs fueron seleccionados de manera que representaran la variabilidad climática histórica en Chile desde el año 1985 a 2015 (DGA, 2017), los que fueron escogidos de acuerdo a: (1) correlación de las simulaciones históricas con las oscilaciones ENSO y Modo Anular del Sur (SAM, por sus siglas en inglés), (2) sensibilidad climática a una cierta forzante externa, se seleccionaron sensibilidades bajas, medias y altas, (3) cambios regionales, considerando la variación de los cambios de temperatura y precipitación.

**Tabla 3. 1:** GCMs utilizados en la actualización del Balance Hídrico Nacional (DGA, 2018).

<b>Modelo</b>	<b>Institución</b>	<b>Sensibilidad</b>	<b>Resolución Lat x long</b>
CSIRO MK3-6-0	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization in collaboration with Queensland Climate Change Centre of Excellence, Australia.	Baja extrema	1,9° x 1,9°
MIROC-ESM	Agency for Marine-Earth Science and Technology, Atmosphere and Ocean Research Institute (University of Tokyo), and National Institute for Environmental Studies, Japan.	Alta moderada	2,8° x 2,8°
IPSL-CM5A-LR	Institut Pierre-Simon Laplace, France.	Alta extrema	3,7° x 1,9°

## Capítulo 4: Metodología

En este capítulo, se explica la metodología utilizada para estimar variaciones de caudal (disponibilidad y crecidas) dadas variaciones de precipitación (acumulada o asociada a crecida) y temperatura (promedio o asociada a crecida) en 25 cuencas de régimen natural, la cual se resumen en el *Figura 4. 1*.

### 4.1 Metodología para estimar caudales promedios (disponibilidad)

Se cuenta con la siguiente información histórica (1985-2015) para todas las cuencas: precipitación acumulada mensual, temperatura media mensual y caudal medio mensual, con la que se calcula el promedio de precipitación acumulada, promedio de temperaturas medias y promedio de caudal medio. Estos tres cálculos se realizan de manera anual y por temporadas de invierno y verano.

Con los promedios se calculan las variaciones de caudal, precipitación y temperatura usando *Ecuación 11*, *Ecuación 22* y *Ecuación 33*.

$$\Delta Q = \frac{Q - Q_{prom}}{Q_{prom}} \quad \text{Ecuación 1}$$

Con,

-  $Q$ : caudal promedio anual o estacional en  $\left[\frac{m^3}{s}\right]$

-  $Q_{prom}$ : promedio de caudales promedio anual o estacional en  $\left[\frac{m^3}{s}\right]$

$$\Delta P = \frac{P - P_{prom}}{P_{prom}} \quad \text{Ecuación 2}$$

Con,

-  $P$ : precipitación anual o estacional en  $[mm]$

-  $P_{prom}$ : promedio de precipitaciones promedio anual o estacional en  $[mm]$

$$\Delta T = T - T_{prom} \quad \text{Ecuación 3}$$

Con,

-  $T$ : temperatura media anual o estacional en  $[^{\circ}C]$

-  $T_{prom}$ : promedio de temperatura media anual o estacional en  $[^{\circ}C]$

Se ajusta una regresión lineal múltiple entre  $\Delta Q$  a partir de  $\Delta P$  y  $\Delta T$ , suponiendo que los cambios de  $\Delta Q$  generados por  $P$  y  $T$  son aditivos y no tienen interacción entre ellos (Vano et al., 2015) calculando los valores de  $A$ ,  $B$  y  $C$  para la *Ecuación 44*.  $A$  y  $B$  corresponden a la elasticidad (entre  $\Delta Q$  y  $\Delta P$ ) y sensibilidad (entre  $\Delta Q$  y  $\Delta T$ ) y en este trabajo se consideran constantes mientras que  $C$  corresponde al termino independiente de la regresión.

$$\Delta Q = A \cdot \Delta P + B \cdot \Delta T + C \quad \text{Ecuación 4}$$



Para validar la regresión lineal múltiple se utiliza la validación cruzada, la cual consiste en realizar predicciones repitiendo todo el procedimiento de ajuste con un subconjunto de datos y luego comparar las predicciones con los datos que no se consideraron para realizar el ajuste. El procedimiento utilizado corresponde al de dejar uno afuera (leave-one-out), para esto se tiene una muestra de  $n$  datos y se realiza el ajuste considerando  $(n-1)$  datos, para luego comparar la predicción con lo observado (Wilks, 2011).

Se identifican los años secos, húmedos y normales a partir de un análisis de frecuencia, por lo que si el caudal es menor al caudal del 70% de excedencia se considera año seco y si es mayor al caudal asociados al caudal del 30 % de excedencia se cataloga como año húmedo, y los caudales que se encuentren entre estos 2 valores corresponden a un año normal. Luego se calcula el error, el error absoluto y el coeficiente de correlación con los 25 datos estimados y para los años húmedo, seco y normal.

Una vez obtenidos los valores de A, B y C, se generan gráficos con isolíneas de variación de caudal  $\Delta Q$ , con variaciones de precipitación  $\Delta P$  en el eje X y variaciones de temperatura  $\Delta T$  en el eje Y. Estos gráficos son generados para los datos históricos de 25 cuencas en régimen natural considerando cuatro casos (Tabla 4. 1).

**Tabla 4. 1:** Distintos períodos de tiempo para realizar análisis.

<b>Temporada</b>	<b>Caudal promedio</b>	<b>Precipitación acumulada</b>	<b>Temperatura media promedio</b>
Año entero	Entre abril y marzo	Entre abril y marzo	Entre abril y marzo
Invierno	Entre abril y septiembre	Entre abril y septiembre	Entre abril y septiembre
Verano	Entre octubre y marzo	Entre octubre y marzo	Entre octubre y marzo
Verano modificado	Entre octubre y marzo	Entre abril y septiembre o entre abril y marzo	Entre octubre y marzo

Con las forzantes precipitación y temperatura obtenida de tres GCMs, se calculan los promedios de precipitación y temperatura entre los años 1975 y 2015 para los cuatro períodos. Con caudales modelados con VIC en el Balance del 2018 se obtiene el promedio para los mismos entre los años 1975 y 2015. Con estos promedios se calculan las variaciones de caudal, precipitación y temperatura  $\Delta Q_f$ ,  $\Delta P_f$  y  $\Delta T_f$ , usando Ecuación 1, Ecuación 2 y Ecuación 3.

Con los mismos promedios del párrafo anterior, se obtienen variaciones correspondientes a  $\Delta Q_f$ ,  $\Delta P_f$  y  $\Delta T_f$  para cada año entre 2020 y 2059. Luego se promedian estas variaciones para dos períodos futuros: entre años 2020-2039 y entre 2040-2059, obteniendo  $\Delta Q_f V$ ,  $\Delta P_f V$  y  $\Delta T_f V$ .

Usando los parámetros A, B y C, y usando la 4, se calcula la variación de caudal  $\Delta Q_f$ , usando los valores de  $\Delta P_f V$  y  $\Delta T_f V$  para ambos períodos: 2020-2039 y 2040-259.

Final mente, se compara  $\Delta Q_f$  con  $\Delta Q_f V$  y se calcula la diferencia absoluta entre estos valores con la Ecuación 5 y Ecuación 8:

$$\text{Error absoluto} = \left| \Delta Q_f V - \Delta Q_f \right| \quad \text{Ecuación 5}$$

Con,

$-\Delta Q_f V$ : variación de caudal partir de caudales modelados con VIC [-]

$-\Delta Q_f$ : variación de caudal calculado con parámetros A, B, C,  $\Delta P_f V$  y  $\Delta T_f V$  [-]

$$\text{Error relativo} = \frac{\left| \Delta Q_f V - \Delta Q_f \right|}{\Delta Q_f V} \quad \text{Ecuación 8}$$

Con,

$-\Delta Q_f V$ : variación de caudal partir de caudales modelados con VIC [-]

$-\Delta Q_f$ : variación de caudal calculado con parámetros A, B, C,  $\Delta P_f V$  y  $\Delta T_f V$  [-]

La metodología descrita se resume en *Figura 4. 1*.

Métricas de evaluación se encuentran en Anexo E.

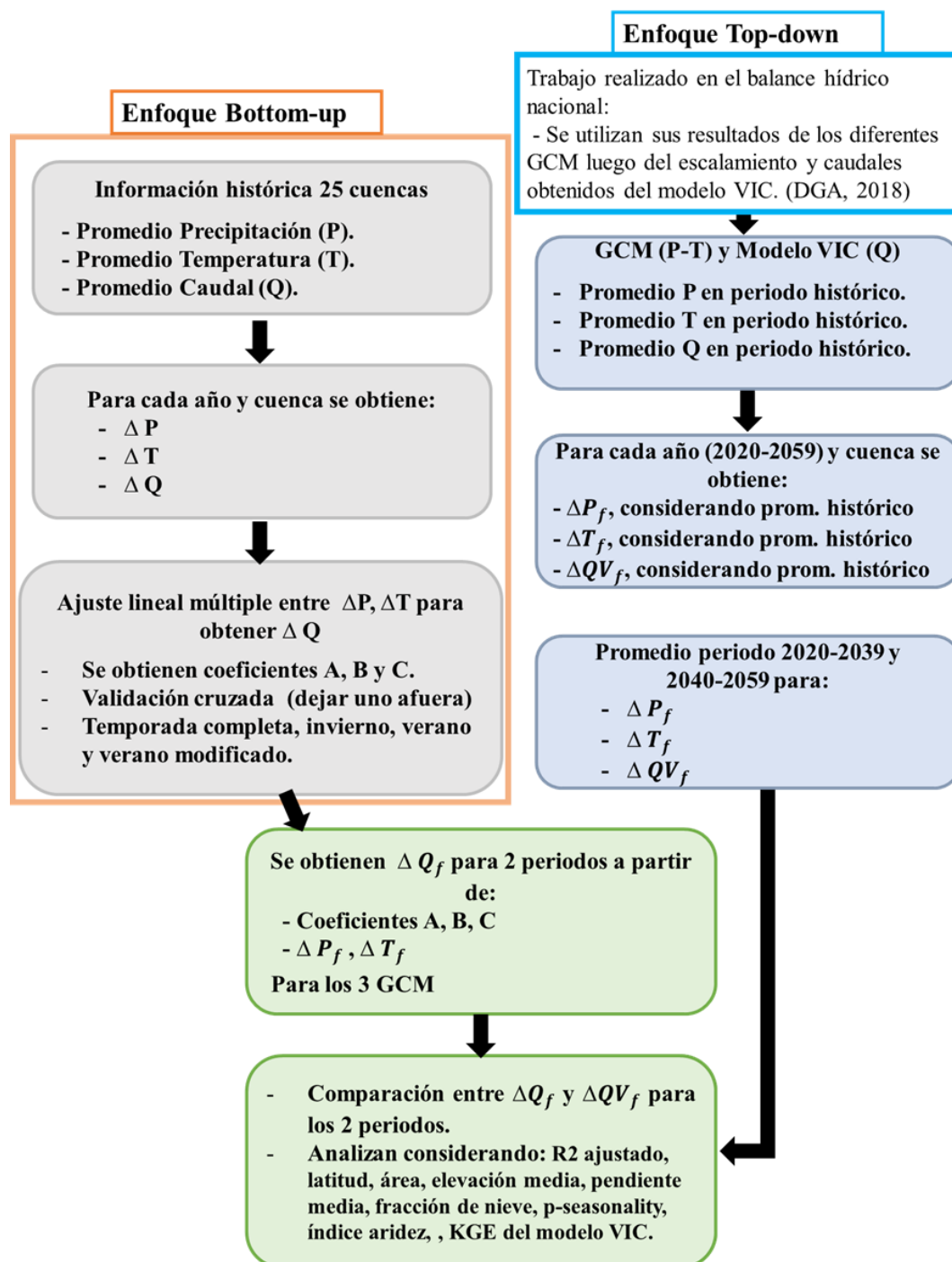


Figura 4. 1: Esquema metodología.

## 4.2 Metodología para estimar caudales máximos (crecidas)

La metodología para estimar caudales máximos es análoga a la que se usa para estimar caudales promedios, pero en este caso se utiliza el caudal máximo diario en vez del caudal promedio para cada año siempre y cuando este caudal sea generado por un evento de precipitación. Este análisis se lleva a cabo calculando el caudal máximo y analizando si hay precipitación en los días anteriores a ese caudal. En caso de que haya se calcula la temperatura promedio asociado a los días en que hay precipitación.

## Capítulo 5: Resultados

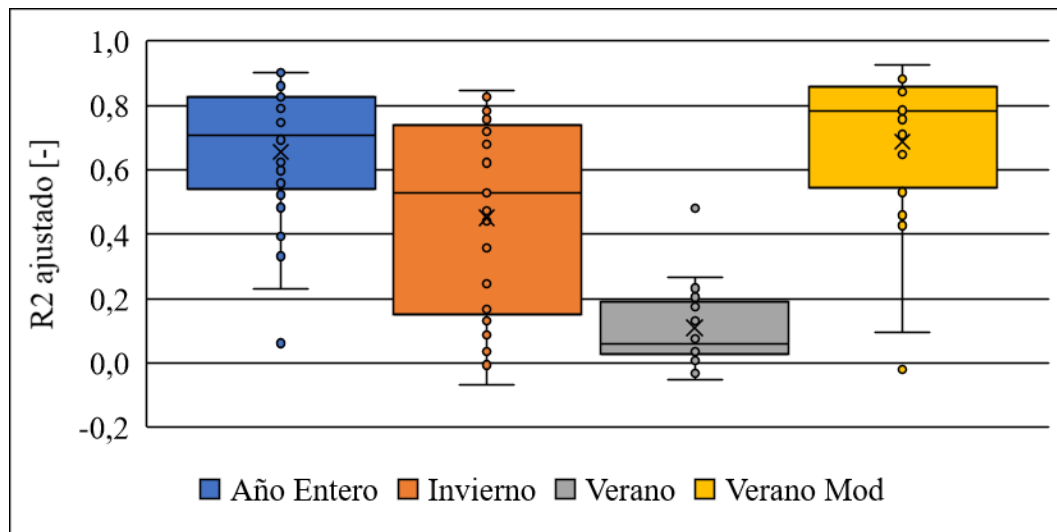
Los resultados presentados en este capítulo corresponden a los parámetros obtenidos al realizar el ajuste para disponibilidad y para crecidas. También se obtiene variaciones de caudales de disponibilidad para períodos futuros obtenidos de la modelación realizada en el Balance Hídrico Nacional del 2017 con información de tres GCMs. Estas variaciones ( $\Delta Q_f V$ ) son comparadas con variaciones de caudales de disponibilidad ( $\Delta Q \text{ mod}$ ) calculados con los parámetros ya mencionados en este párrafo. Esta variación de caudal ( $\Delta Q \text{ mod}$ ) se calcula con datos de precipitación y temperatura como se explica en el Capítulo 4.

### 5.1 Ajustes para estimar variaciones de caudales de promedios

#### 5.1.1 Ajustes con datos históricos: CR2met y caudales medidos

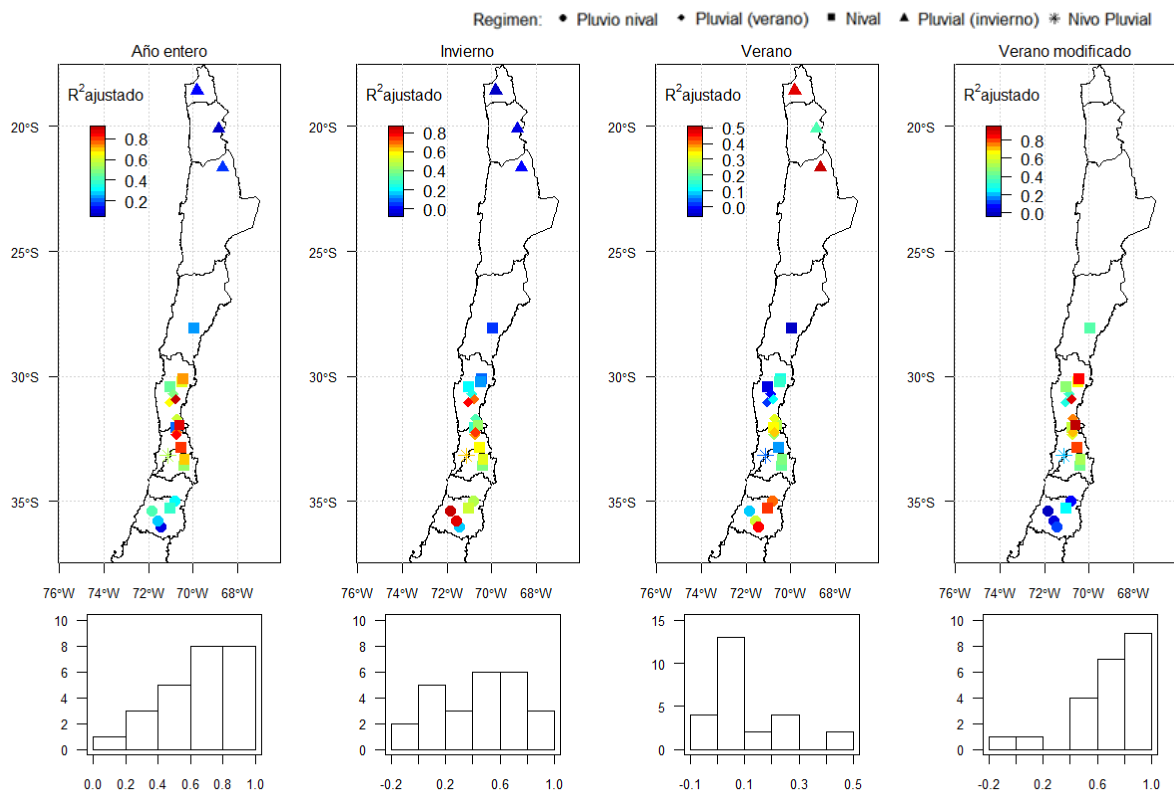
Al realizar la metodología propuesta del Capítulo 4 se obtienen gráficos que permiten estimar la variación de caudal (anual o por temporada) dada una variación de precipitación y de temperatura para diferentes períodos de estudio, lo que se aprecia en la *¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.*. Esta figura se muestra para una cuenca en particular, la que corresponde a la cuenca de código 4513001, Río Grande en Cuyano. Los gráficos para las otras cuencas se encuentran en Anexo A (*Figura A - 1 a Figura A - 24*). Los parámetros A, B y C junto al coeficiente  $R^2$  aj se presentan en el Anexo A, *Tabla A - 1 a Tabla A - 4*.

*¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.* Al realizar las regresiones para las 25 cuencas para e l año entero, temporadas de Invierno y Verano y para 22 cuencas para la temporada de Verano Modificado se obtienen distintos coeficientes  $R^2$  ajustado, los cuales se resumen en la *Figura 5. 1*.



*Figura 5. 1: Distribuciones del coeficiente de correlación ajustado para distintos períodos de estudio.*

A continuación, en la *Figura 5. 2*, se ilustran las distribuciones espaciales de los coeficientes  $R^2$  aj para los cuatro periodos estudiados, donde los colores azules indican valores bajos y colores rojizos indican valores altos.



**Figura 5. 2:** Distribución espacial para coeficiente de correlación ajustado para los cuatro períodos estudiados según el régimen de la cuenca.

Entre las *Figura 5. 3* y la *Figura 5. 6* se aprecian las distribuciones de los coeficientes  $R^2$  aj. para los diferentes regímenes de las cuencas para cada período evaluado: año entero, invierno, verano y verano modificado. En Anexo A entre *Tabla A - 5* y *Tabla A - 9*. Al realizar la validación cruzada (Anexo A), se obtienen distintos coeficientes  $R^2$ , cuya distribución *se aprecia en* la *Figura 5. 7* para los distintos períodos estudiados según si se realiza el análisis para un año seco, húmedo o normal.

se encuentran los promedios, desviaciones estándar, máximos y mínimos para los datos de los coeficientes  $R^2$  aj. de los gráficos mencionados.

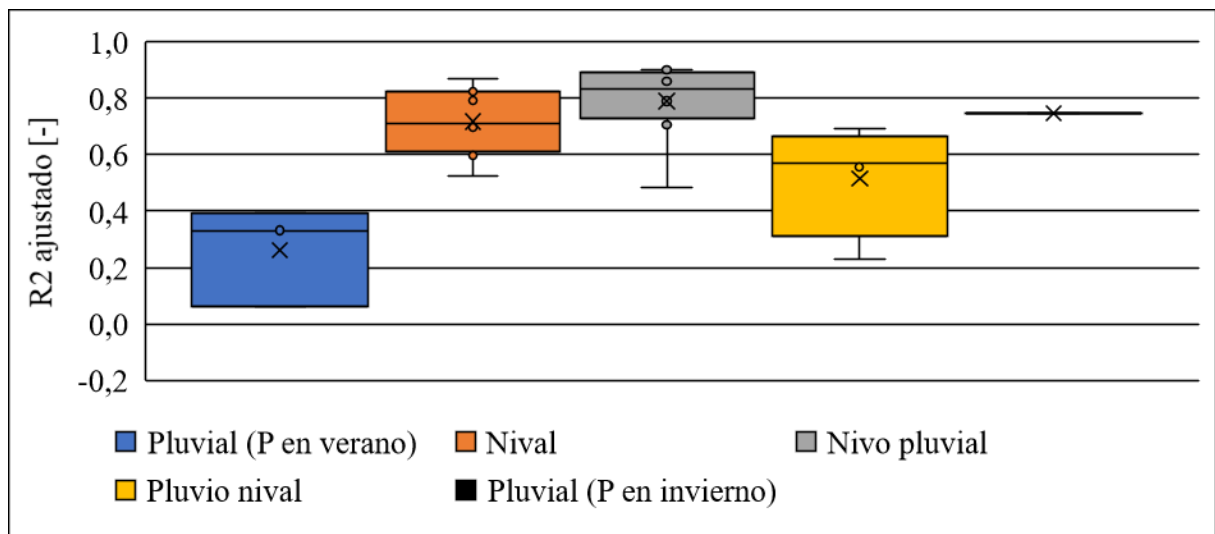


Figura 5. 3: Distribuciones del coeficiente  $R^2$  aj. para el año Entero para diferentes regímenes de cuencas.

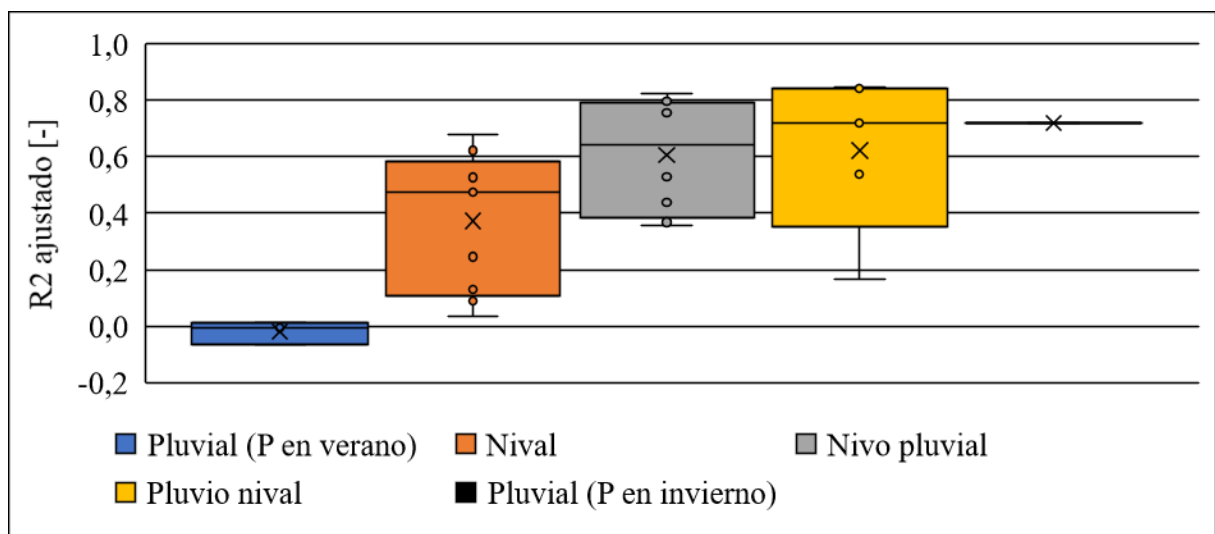
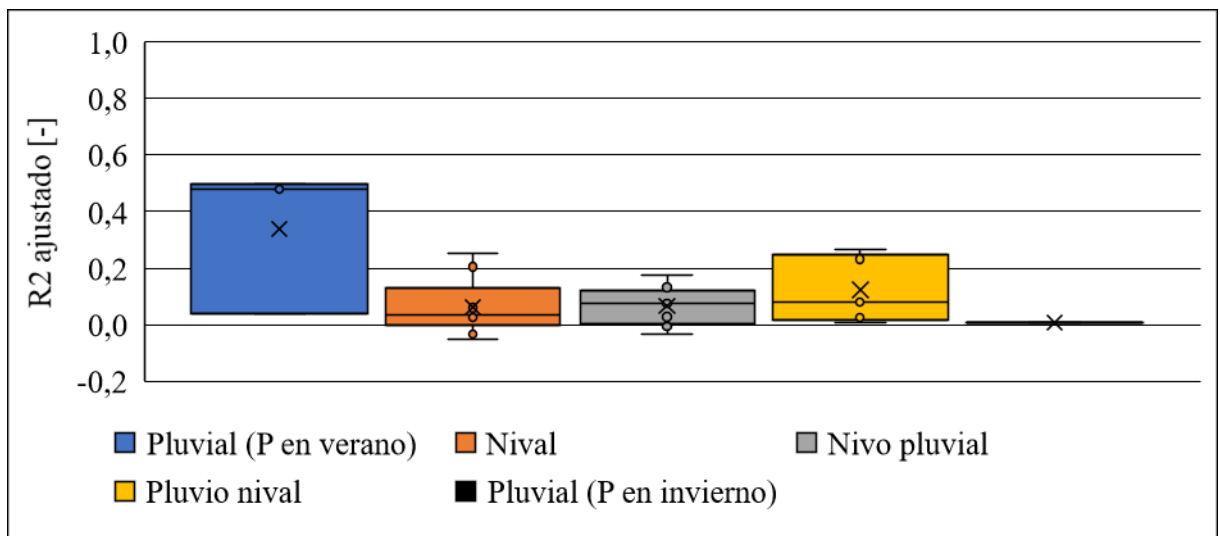
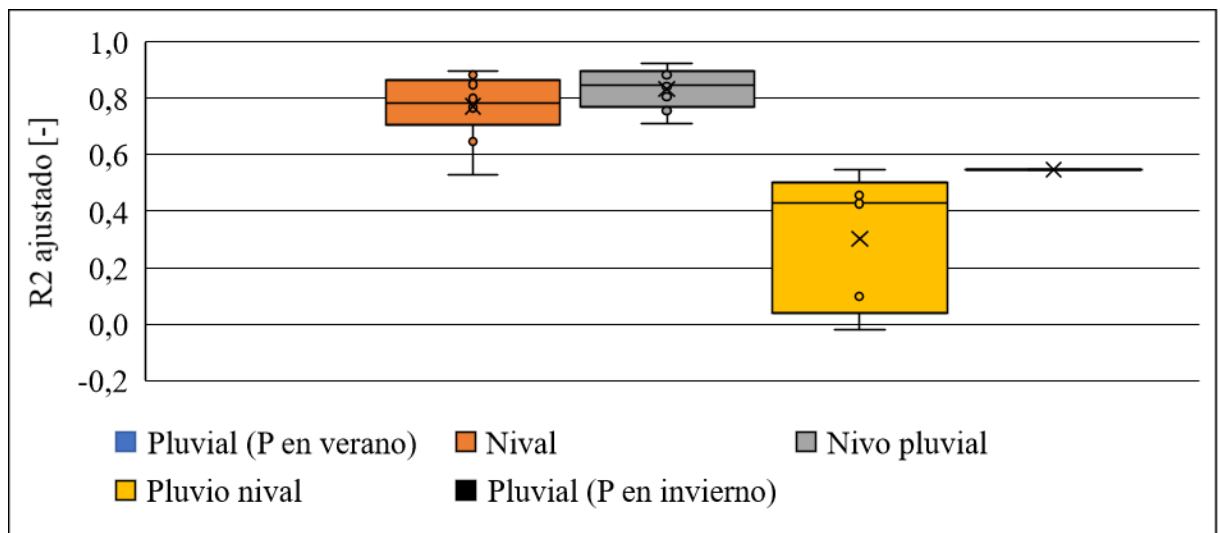


Figura 5. 4: Distribuciones del coeficiente  $R^2$  aj. para temporada de Invierno para diferentes regímenes de cuencas.



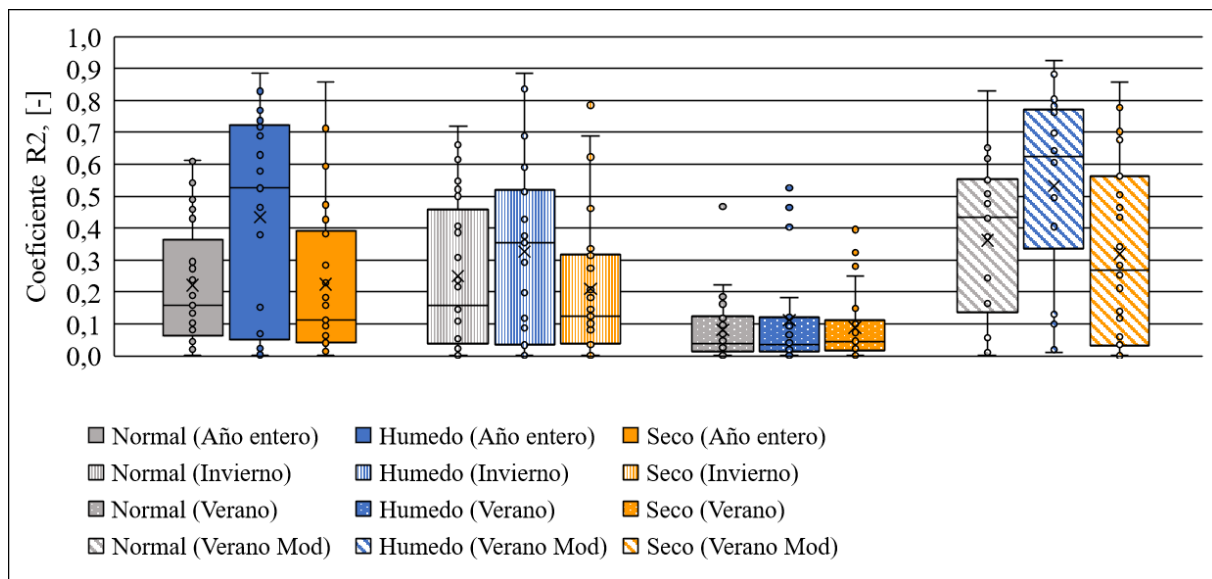
**Figura 5. 5:** Distribuciones del coeficiente  $R^2$  aj. para temporada de Verano para diferentes regimenes de cuencas.



**Figura 5. 6:** Distribuciones del coeficiente  $R^2$  aj. para temporada de Verano modificado para diferentes regimenes de cuencas.

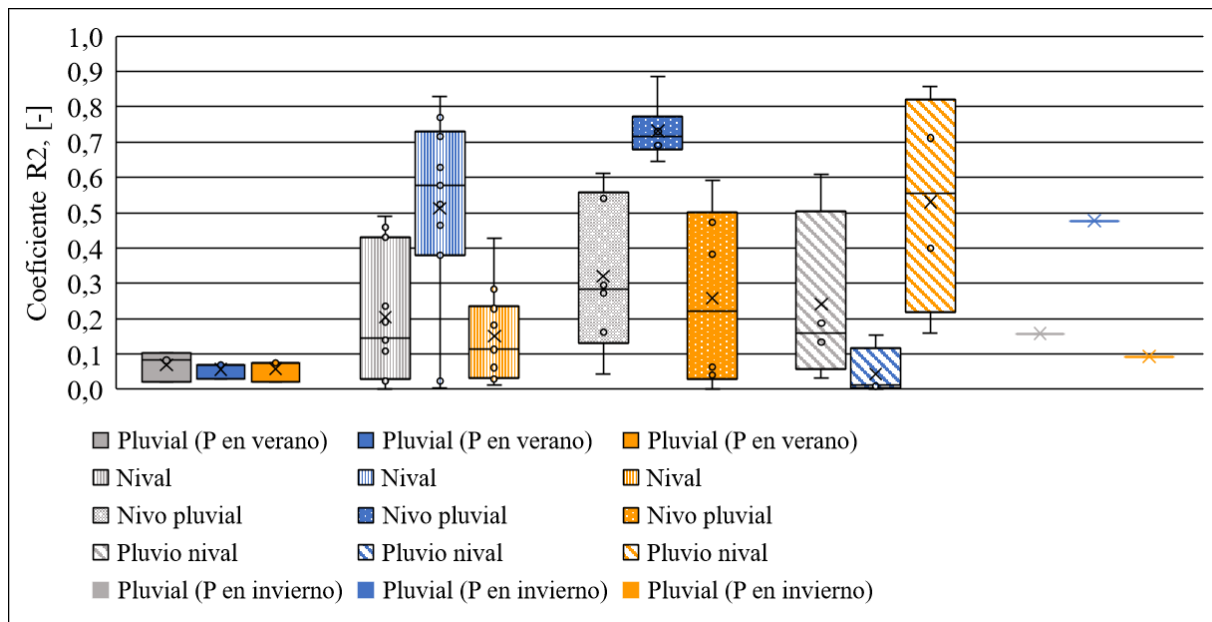
Al realizar la validación cruzada (Anexo A), se obtienen distintos coeficientes  $R^2$ , cuya distribución se aprecia en la *Figura 5. 7* para los distintos períodos estudiados según si se realiza el análisis para un año seco, húmedo o normal.



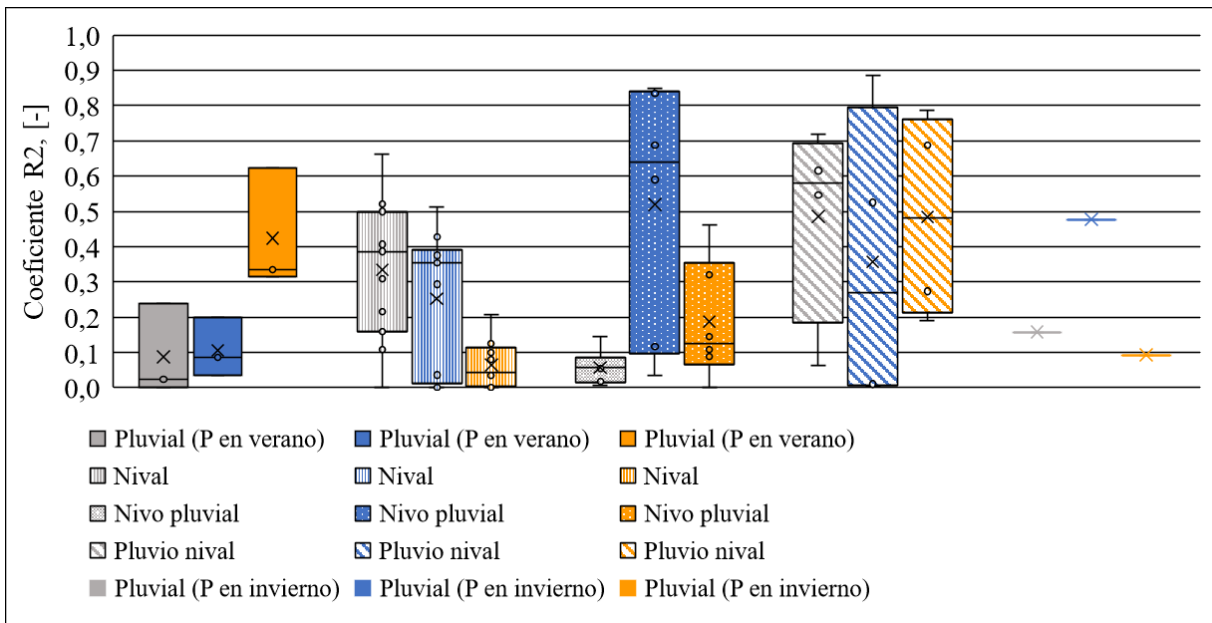


**Figura 5. 7:** Distribuciones del coeficiente  $R^2$  para distintos períodos de estudio considerando años normales (color gris), años húmedos (color azul) y años secos (color naranja).

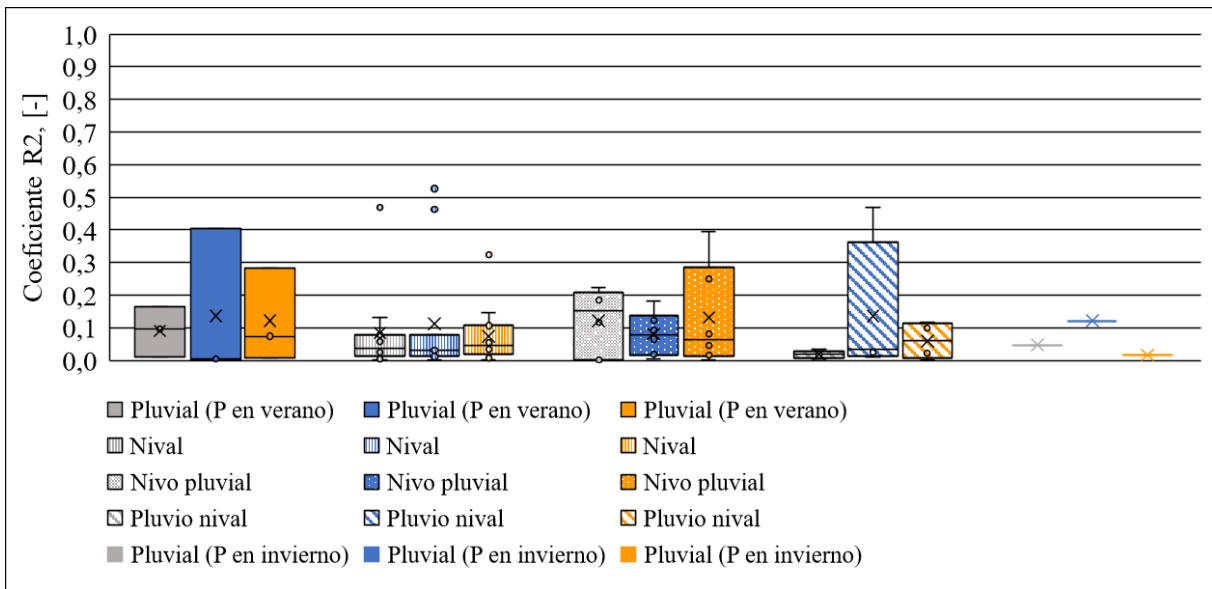
También se obtienen las distribuciones de los coeficientes de  $R^2$  obtenidos para los distintos tipos de año para los distintos regímenes de cuencas, considerando año completo (Figura 5. 8), temporada de invierno (Figura 5. 9), temporada de verano (Figura 5. 10) y verano modificado (Figura 5. 11).



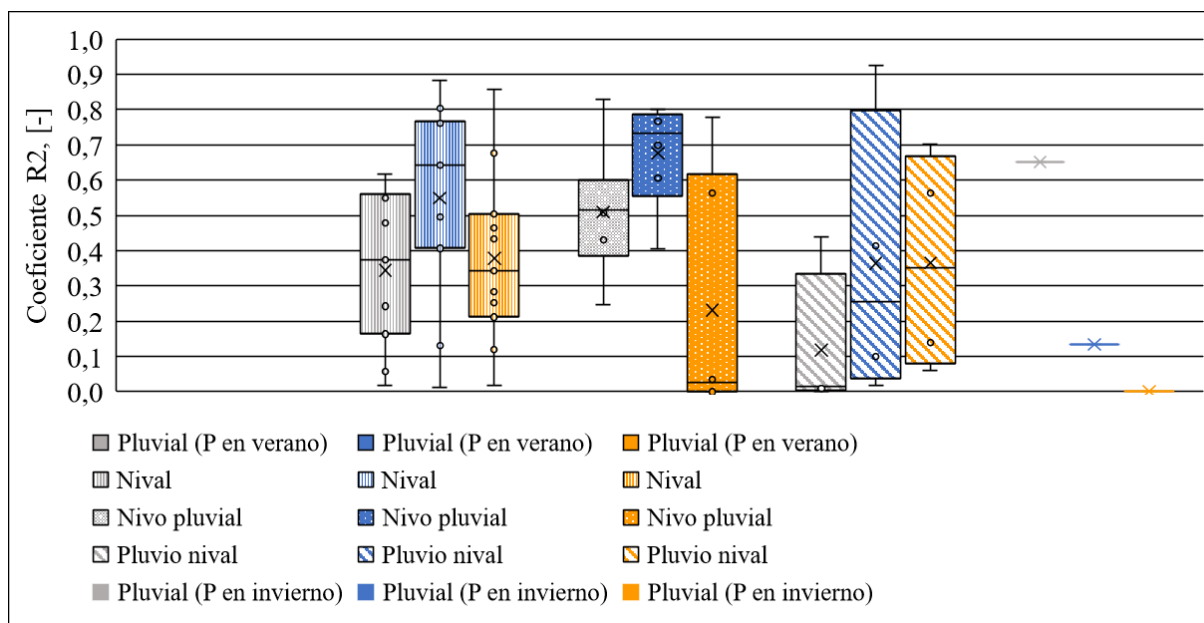
**Figura 5. 8:** Distribuciones del coeficiente  $R^2$  para el Año Entero para diferentes regímenes de cuencas considerando años normales (color gris), años húmedos (color azul) y años secos (color naranja).



**Figura 5. 9:** Distribuciones del coeficiente  $R_2$  para temporada de Invierno para diferentes regímenes de cuencas considerando años normales (color gris), años húmedos (color azul) y años secos (color naranja).



**Figura 5. 10:** Distribuciones del coeficiente  $R_2$  para temporada de Verano para diferentes regímenes de cuencas considerando años normales (color gris), años húmedos (color azul) y años secos (color naranja).



**Figura 5. 11:** Distribuciones del coeficiente R2 para temporada de Verano Modificado para diferentes regímenes de cuencas considerando años normales (color gris), años húmedos (color azul) y años secos (color naranja).

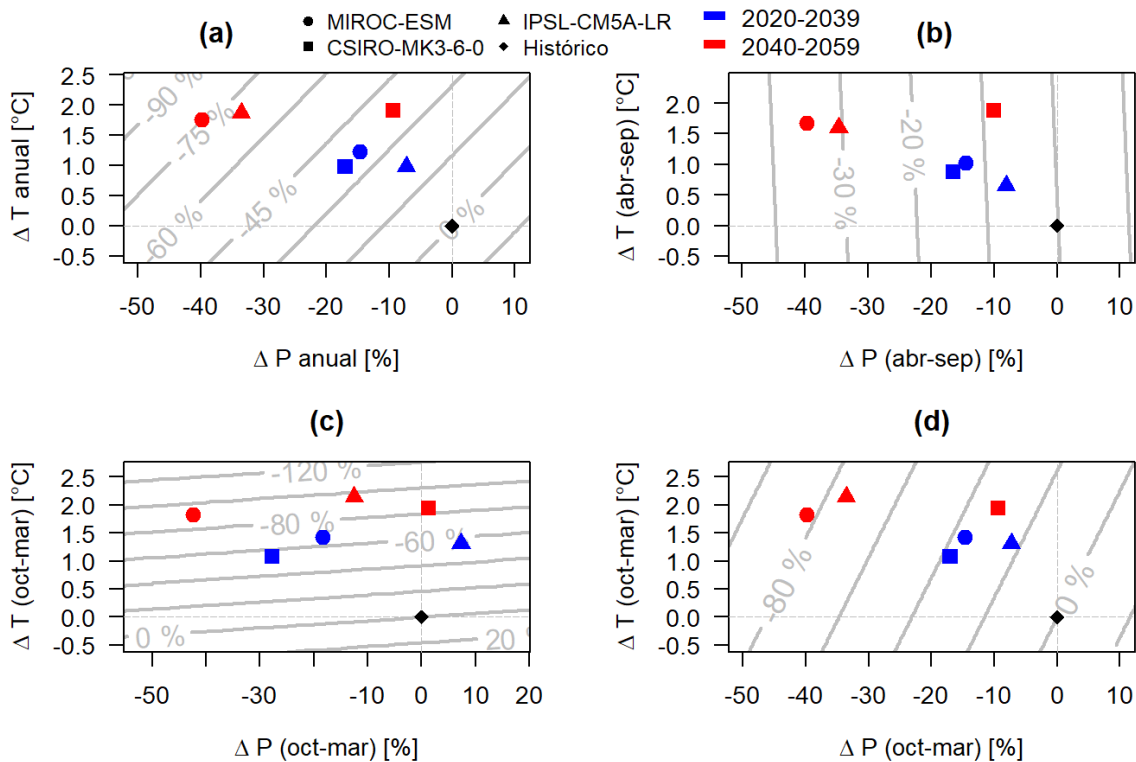
### 5.1.2 Comparación con resultados de modelación VIC

Se comparan variaciones de caudales promedios (anuales o por temporada) obtenidos a partir de caudales obtenidos de la modelación VIC de la Actualización del Balance Nacional (DGA, 2017) con variaciones de caudales calculadas a partir de predicciones de temperatura y de precipitación proveniente de tres GCMs y de los parámetros A, B y C obtenidos en el capítulo 4.1.1 de este trabajo. A modo de ejemplo se presenta la *Figura 5. 12*, en donde para la Cuenca 4513001, se calculan las variaciones de caudal. Para esto se usan las variaciones promedio de precipitación y temperatura para distintas temporadas. Para las demás cuencas están las figuras en el Anexo A.

Para variaciones anuales de caudal a nivel anual, se espera que entre los años 2020 y 2039, el caudal promedio disminuya y entre los años 2040 y 2059 esta disminución sea mayor; esta variación se debe a la disminución de precipitación y aumento de la temperatura. En la temporada de verano, se espera un comportamiento similar, lo que se deduce de la forma de las isolíneas de variación de caudal promedio para estas dos temporadas.

Aunque para la temporada de invierno también se espera que baje el caudal, esta reducción se debe principalmente a disminución de la precipitación en esta temporada más que a la variación de la temperatura, esto se deduce de la forma casi vertical de las isolíneas de variación de caudal promedio.

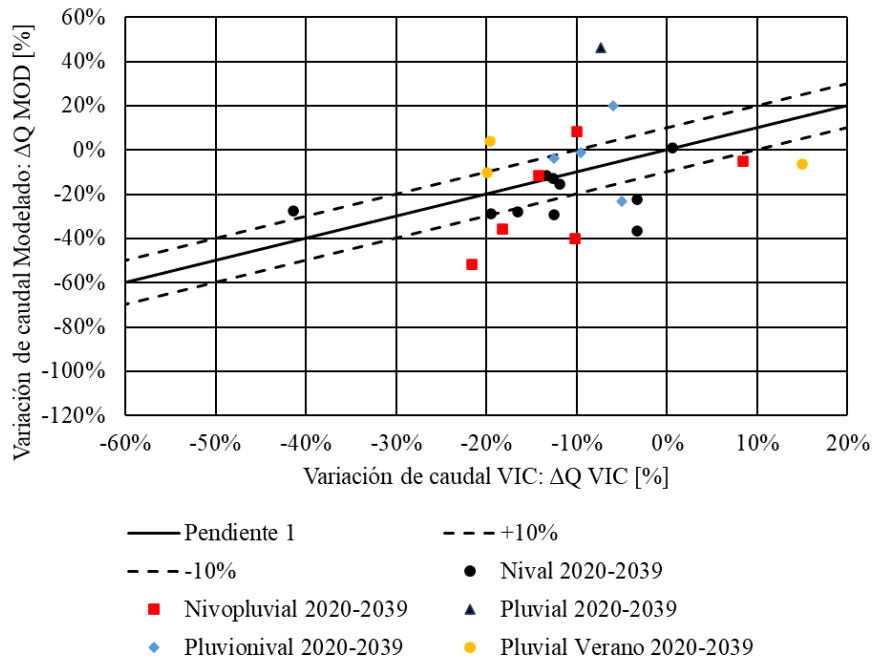
Los comportamientos descritos anteriormente coinciden con el régimen Nivopluvial de esta cuenca, ya que variaciones en precipitación y temperatura influyen en el caudal y en la cantidad de agua acumulada como nieve.



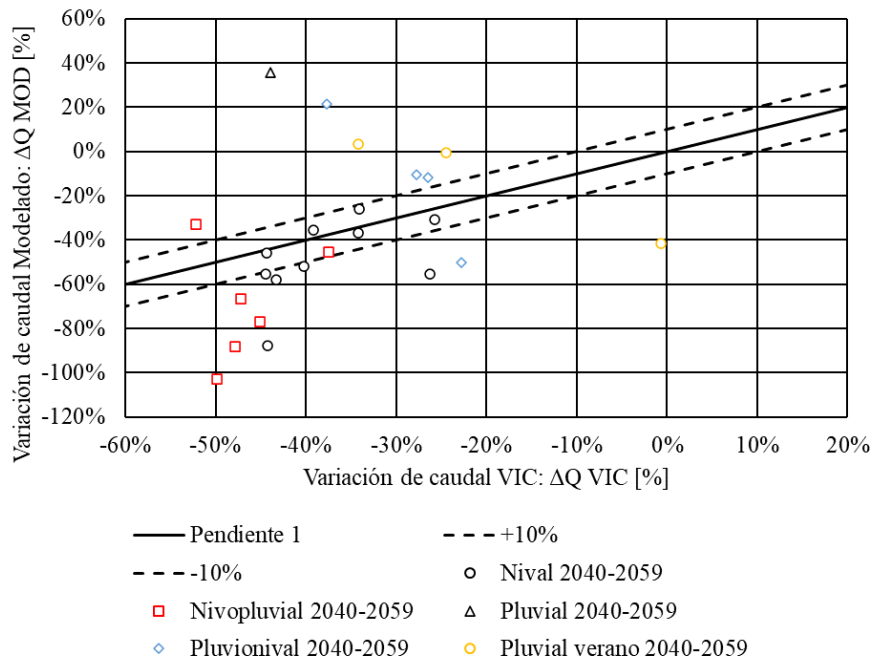
**Figura 5. 12:** Variaciones de caudal medio [%] representadas por isolíneas para distintos períodos de estudio: año completo (a), temporada de invierno (b), temporada de verano (c) y temporada de verano con precipitación de año entero o de invierno. Se aprecian dos periodos: años 2020-2039 en azul y años 2040-2059 en rojo para tres GCMs: MIROC-ESM en círculos, CSIRO-MK3-6.0 en cuadrados y IPSL-CM5A-LR en triángulos. Cuenca 4513001.

A continuación, se muestra la comparación entre las variaciones de caudal promedio VIC y las obtenidas en este trabajo en la *Figura 5. 13* y *Figura 5. 14*, para un futuro cercano (promedio entre años 2020-2039) y un futuro lejano (promedio entre años 2040-2059) respectivamente. En este caso se entregan los valores para el GCM MIROC-ESM. Los resultados de los GCMs CSIRO-MK3-6.0 y IPSL-CM5A-LR se encuentra en Anexo B.

En la *Figura 5. 13* se aprecia que para un intervalo de diferencia absoluta de  $\pm 10\%$ , 9 cuencas se encuentran dentro de este intervalo en el caso de año entero para un futuro cercano, de las cuales 5 corresponden a cuencas con régimen Nival, 2 a régimen Pluvionival, 1 a Nivopluvial y 1 a régimen Pluvial con precipitación en verano. Para el caso de futuro lejano, en la *Figura 5. 14* se aprecia que solo están dentro del intervalo 6 cuencas, 5 en régimen Nival y 2 en Nivopluvial.



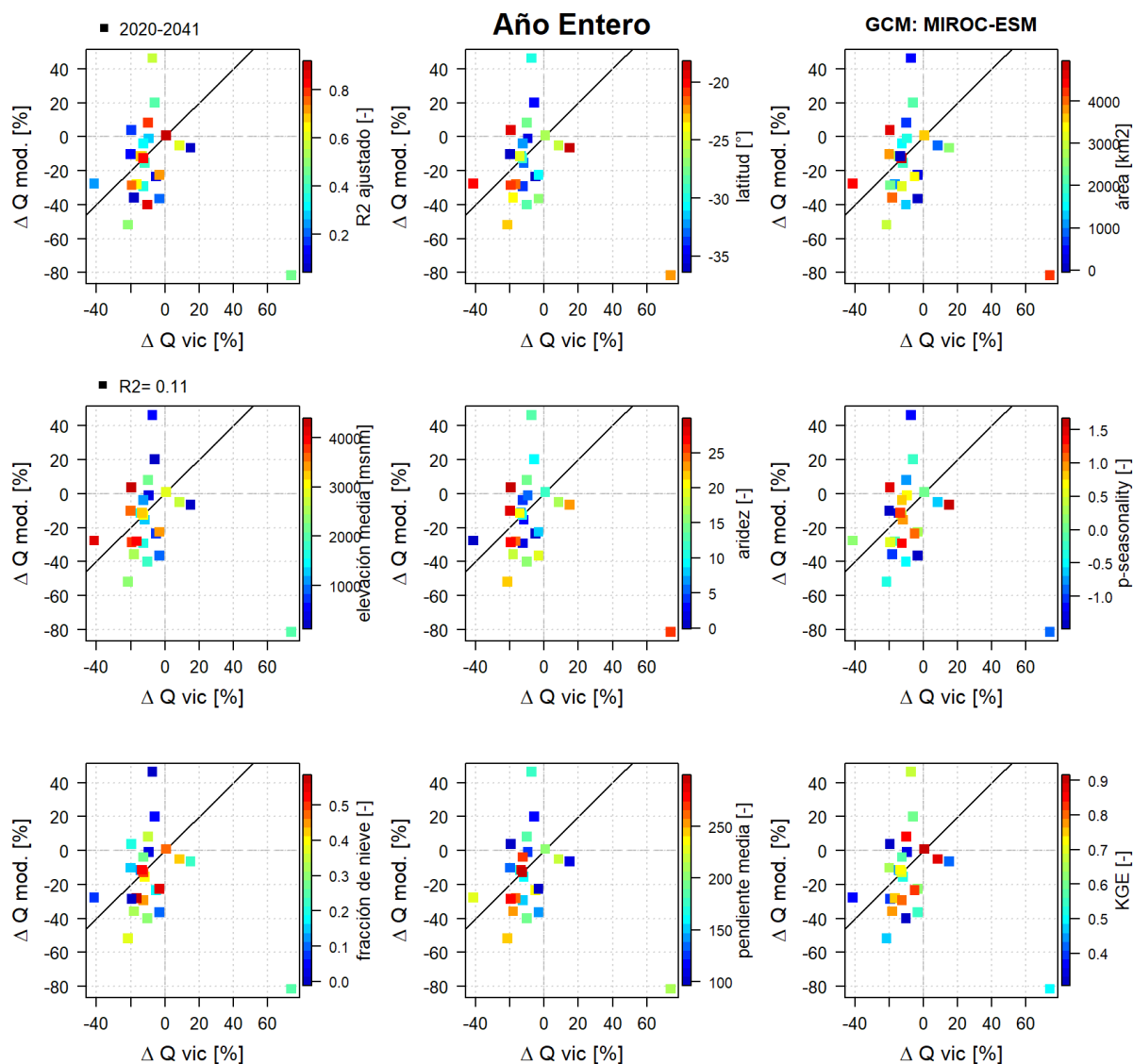
**Figura 5. 13:** Comparación de variaciones de caudales VIC y caudales MOD para año entero para futuro cercano 2020-2039, para GCM MIROC-ESM.



**Figura 5. 14:** Comparación de variaciones de caudales VIC y caudales MOD para año entero para futuro lejano 2040-2059, para GCM MIROC-ESM.

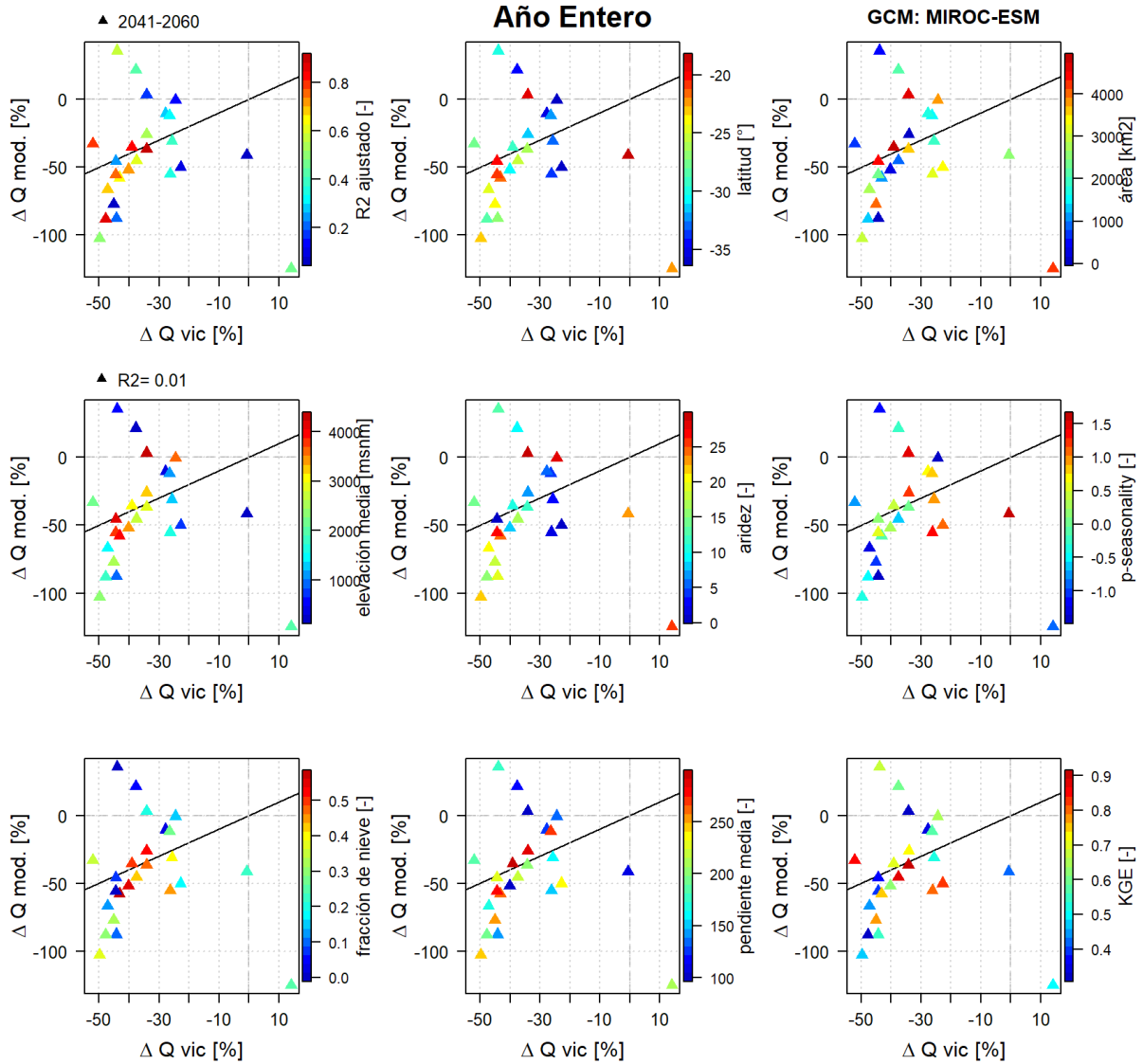
Las variaciones de caudales promedios se analizan según distintas características y estadísticos de cada cuenca para un GCM para el año entero realizado (*Figura 5. 15 y Figura 5. 16*). En Anexo C, se encuentra estas comparaciones para los tres GCMs para las cuatro temporadas analizadas, *Figura C- 1 a Figura C- 122*.

En la *Figura 5. 15* se tiene que no es posible establecer una relación entre estos estadísticos y las diferencias entre los caudales para todas las cuencas estudiadas, pero si es posible obtener información sobre las cuencas con diferencias absolutas menores. Se aprecia que las cuencas con menores diferencias poseen un coeficiente de correlación  $R^2$  alto junto a la fracción de nieve.



**Figura 5. 15:** Comparación de variaciones de caudales VIC y caudales MOD para año entero junto a estadísticos y características de las cuencas para GCM MIROC-ESM. Período futuro cercano 2020-2039.

Para la *Figura 5. 16* se tiene que para el futuro cercano y considerando año completo, se tienen diferencias absolutas más bajas para elevaciones de 3000 msnm, fracciones de nieve alta y pendiente media alta.

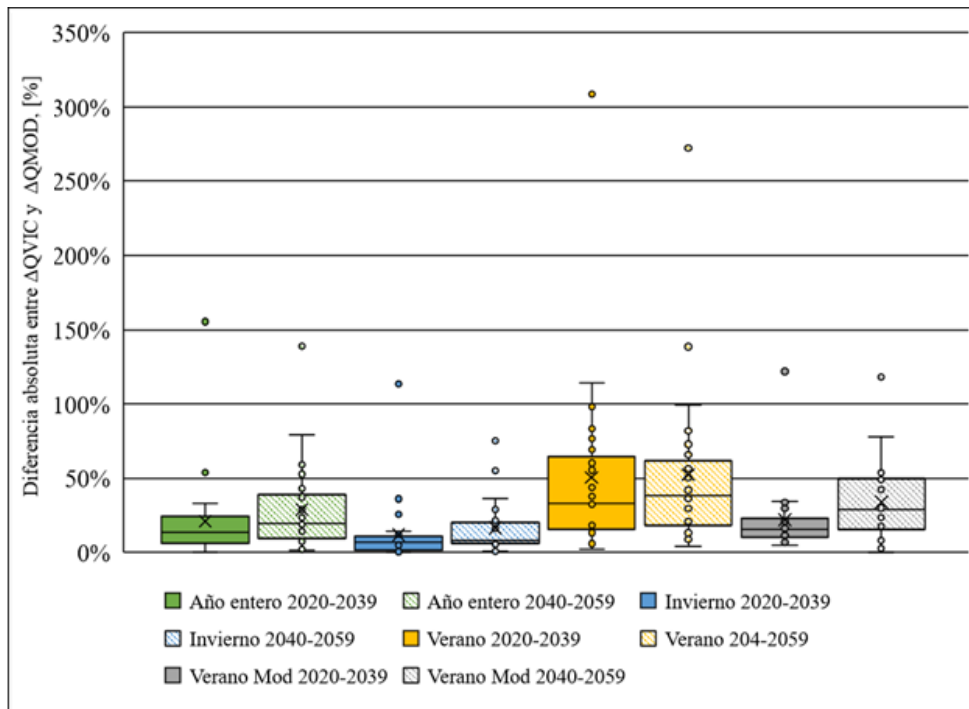


**Figura 5. 16:** Comparación de variaciones de caudales VIC y caudales MOD para año entero junto a estadísticos y características de las cuencas para GCM MIROC-ESM. Período futuro lejano 2040-2059.

En *Figura 5. 17*, *Figura 5. 18* y *Figura 5. 19* se aprecian las distribuciones de error absoluto entre  $\Delta Q_f V$  y  $\Delta Q_f$  para cada GCM, para las cuatro temporadas (año entero, invierno, verano y verano mod.) y para los dos períodos futuros analizados (2020-2039 y 2040-2059). Sus promedios, desviaciones estándar, máximo y mínimo se entregan en *Tabla C - 1*, *Tabla C - 2* y *Tabla C - 3*, en Anexo C.

En la *Figura 5. 17* se tiene que para el GCM MIROC-ESM se tienen menores diferencias absolutas para los promedios de un futuro cercano (años 2020-2039) que para el futuro lejano (año 2040-2059). Además, se tienen diferencias menores para la temporada de invierno, luego para el año completo, diferencias un poco menores que las de la temporada de verano modificado. Al

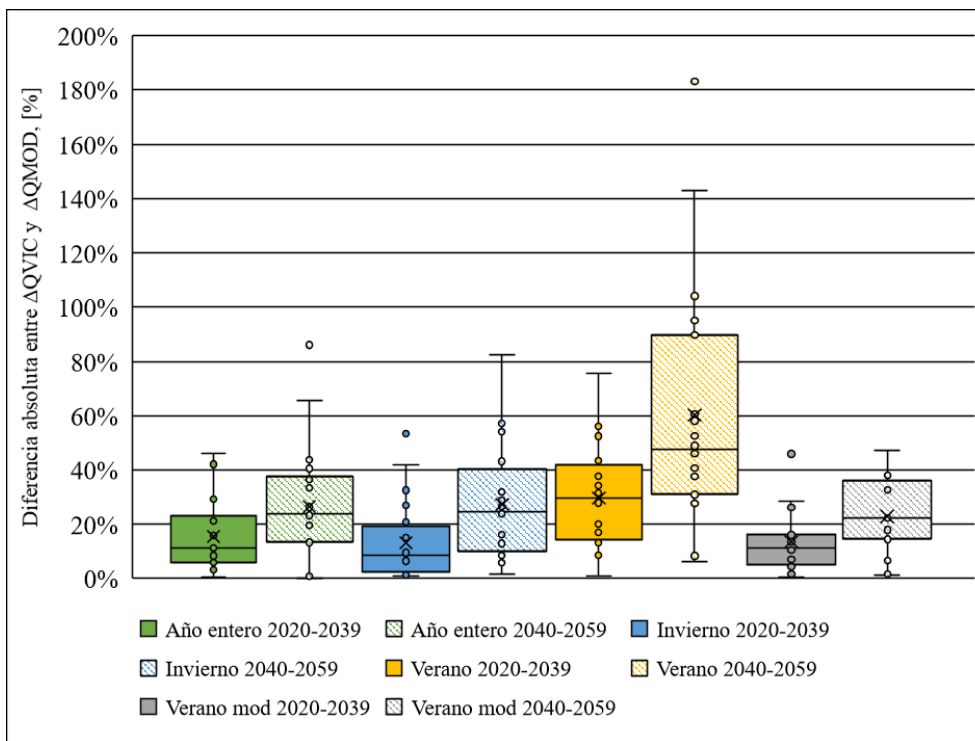
considerar la temporada de verano, se tienen diferencias mayores entre las variaciones de caudales promedio.



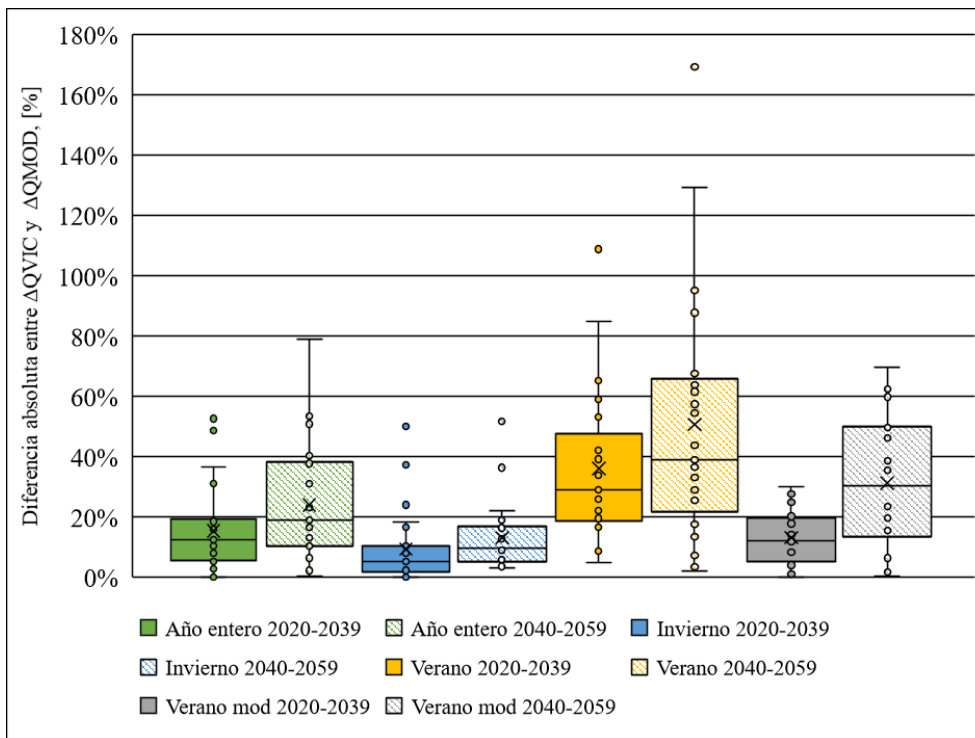
**Figura 5. 17:** Distribuciones de diferencias absolutas entre variaciones  $\Delta QVIC$  y  $\Delta QMOD$  para distintas temporadas para dos períodos futuros para GCM MIROC-ESM.

Para la *Figura 5. 18* y la *Figura 5. 19* se tienen resultados bajo el mismo comportamiento, pero obtenido con datos de los GCMs CSIRO-MK3 y IPSL-CM5A.



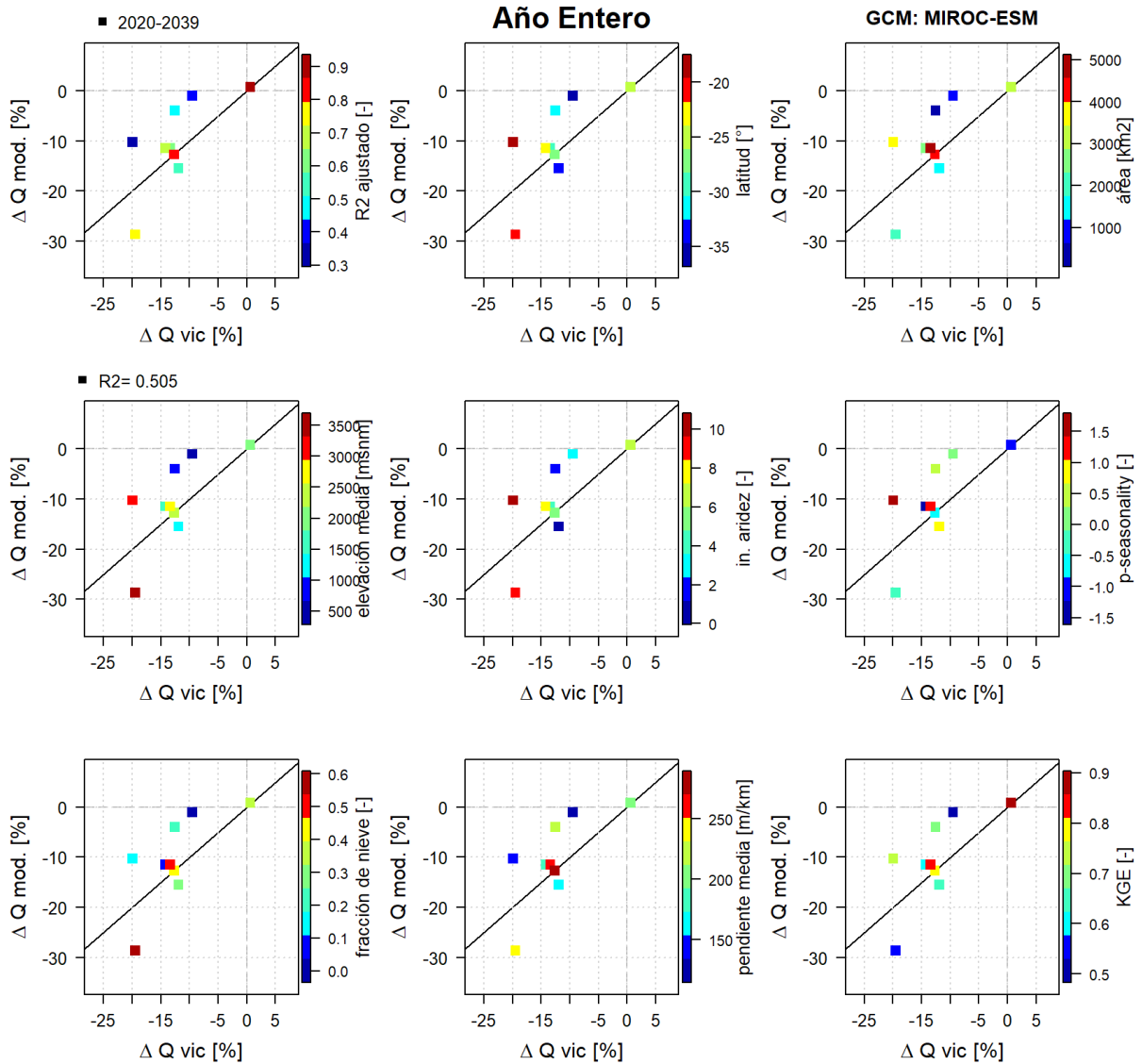


**Figura 5. 18:** Distribuciones diferencia absoluta entre  $\Delta QVIC$  y  $\Delta QMOD$  para distintas temporadas para dos periodos futuros para CSIRO-MK3.

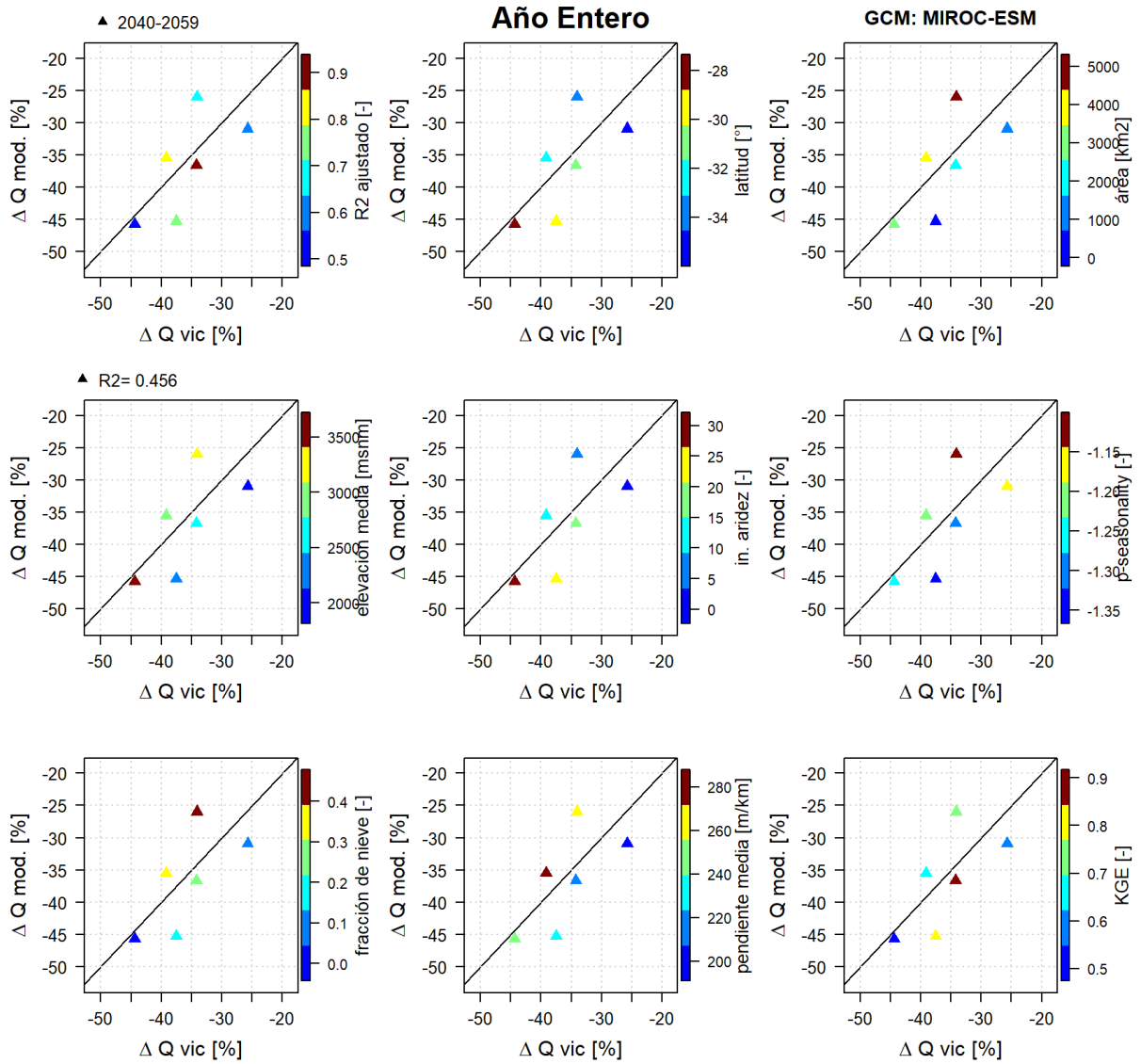


**Figura 5. 19:** Distribuciones de diferencia absoluta entre  $\Delta QVIC$  y  $\Delta QMOD$  para distintas temporadas para dos periodos futuros para IPSL-CM5A.

A continuación, se entregan el mismo análisis anterior para las cuencas en que la diferencia absoluta entre  $\Delta Q$  VIC y  $\Delta Q$  MOD sea menor a 10%, obteniéndose resultados para futuro cercano (entre años 2020 y 2039, *Figura 5. 20* y futuro lejano (entre años 2040-2059, *Figura 5. 21*)). Para el resto de las cuencas en Anexo C: *Figura C- 23 a Figura C- 23*).



**Figura 5. 20:** comparación de variaciones de caudales para año entero junto a estadísticas y características de las cuencas para diferencias menores al 10% para períodos de futuro cercano con GCM MIROC-ESM.

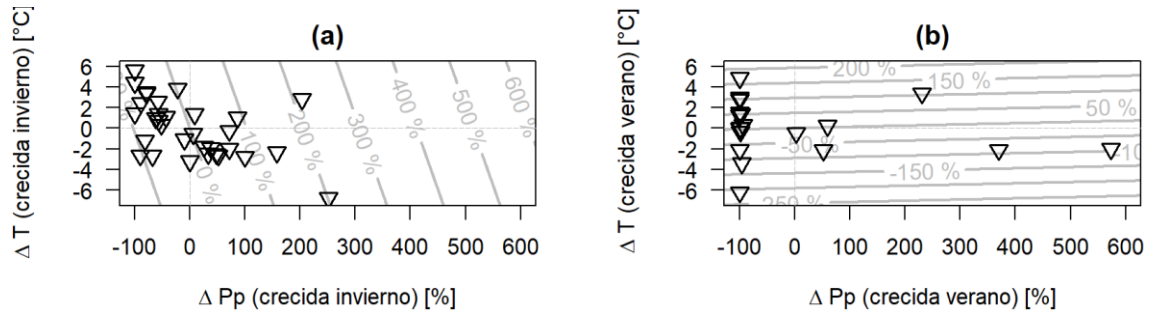


**Figura 5. 21:** comparación de variaciones de caudales para año entero junto a estadísticos y características de las cuencas para diferencias menores al 10% para periodos de futuro lejano con GCM MIROC-ESM.

## 5.2 Ajustes para estimar variaciones de caudales de crecidas

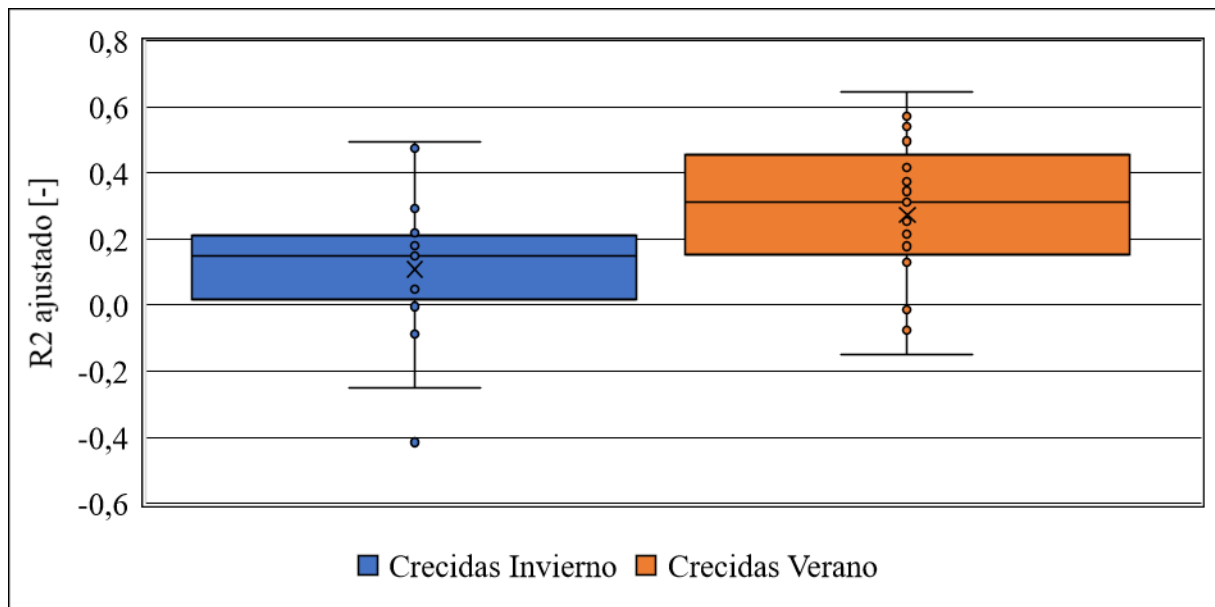
### 5.1.2 Ajustes con datos históricos: CR2met y caudales medidos

Al igual que en el capítulo 5.1.1, se obtienen gráficos para obtener variaciones de caudal para crecidas dadas variaciones de precipitación asociada a esa crecida junto a variaciones de temperatura asociadas a las crecidas, como el de la *Figura 5. 22*. Esta figura se muestra para una cuenca en particular, la que corresponde a la cuenca de código 4513001, Río Grande en Cuyano. Para las demás cuencas, se encuentran en Anexo D ( *Figura-D 1* a *Figura-D 24*).



*Figura 5. 22:* variaciones de caudal medio [%] para distintos períodos de estudio, temporada de invierno (a) y temporada de verano (b).

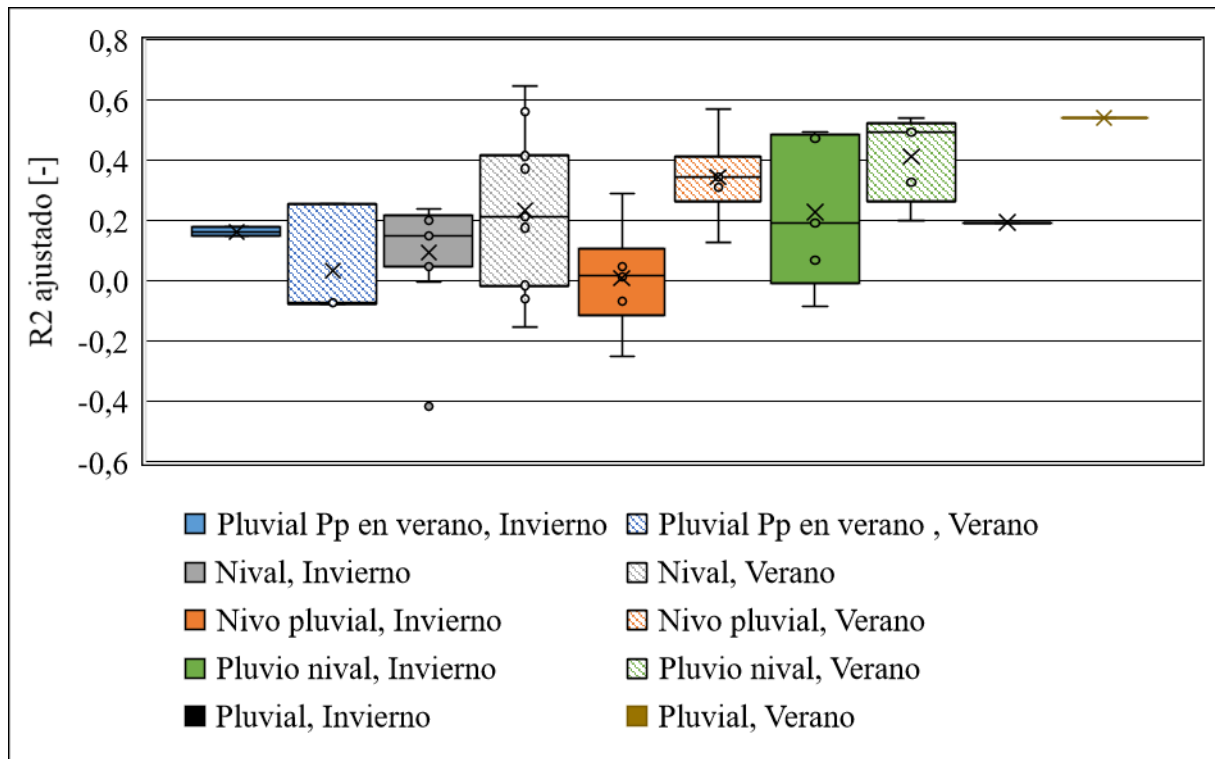
Se presenta en la *Figura 5. 23* distribución del coeficiente  $R^2$  aj. para la estimación de variaciones de crecidas en invierno y verano para el período histórico y en la *Tabla 5. 1* se entregan los promedios, desviación estándar, máximos y mínimos para esta figura.



*Figura 5. 23:* distribuciones del coeficiente de correlación ajustado para distintos períodos de estudio.

**Tabla 5. 1:** Promedio, desviación estándar, máximo y mínimo de valores del coeficiente de correlación  $R^2$  ajustado y número de cuencas.

Temporada	Invierno	Verano
Promedio	0,11	0,27
Desviación estándar	0.194	0,22
Máximo	0.496	0,65
Mínimo	-0,42	-0,15
n	25	25



**Figura 5. 24:** distribuciones del coeficiente de correlación ajustado para distintos períodos de estudio.

## Capítulo 6: Discusión

### 6.1 Ajuste con datos históricos para disponibilidad

Para la regresión de caudales de disponibilidad, es posible apreciar en la *Figura 5. 1* que, en promedio, el ajuste para la obtención de los parámetros A, B y C es mejor para la temporada completa ( $R^2$  aj = 0,65) y temporada de verano modificad0 ( $R^2$  aj = 0,69) que para temporada de invierno ( $R^2$  aj = 0,45) y temporada de verano ( $R^2$  aj = 0,11). También se aprecia un aumento considerable en la efectividad de la regresión cuando en la temporada de verano se consideran las precipitaciones del año entero o invierno, debido a que 11 de las cuencas tienen un régimen nival, 6 un régimen nivopluvial y 4 un régimen pluvionival, teniendo una alta importancia esta precipitación en la acumulación de nieve y su derretimiento en verano.

Para el año entero se obtienen en promedio mejores regresiones (*Figura 5. 3*) para las cuencas con régimen nivopluvial ( $R^2$  aj= 0,82), régimen nival ( $R^2$  aj=0,71) y régimen pluvial con peak en invierno ( $R^2$  aj=0,75) que para las cuencas de régimen pluvial con peak en verano ( $R^2$  aj=0,26) y régimen pluvionival ( $R^2$  aj=0,51). Este contraste se debe a que, en las cuencas con precipitación en Verano, es importante considerar la infiltración al momento de estimar caudales, fenómeno que toma en cuenta el modelo VIC. El mismo análisis se repite para la temporada de invierno donde los mejores resultados (*Figura 5. 4*) corresponden a las cuencas de régimen pluvionival ( $R^2$  aj=0,62, y nivopluvial ( $R^2$  aj=0,61), en comparación con cuencas de régimen nival ( $R^2$  aj=0,35) y cuencas pluviales con precipitaciones en verano ( $R^2$  aj= -0,02). Para la temporada de verano el mejor ajuste corresponde al del régimen pluvial con Pp en verano ( $R^2$  aj=0,34) comparado al régimen nival ( $R^2$  aj=0,01), nivopluvial ( $R^2$  aj=0,07) y pluvionival ( $R^2$  aj=0,123). Al considerar precipitación de invierno o del año entero para las regresiones en verano, los coeficientes mejoran considerablemente para las cuencas de régimen nival ( $R^2$  aj=0,84), nivopluvial ( $R^2$  aj=0,83) y pluvionival ( $R^2$  aj=0,12).

Al realizar la validación cruzada para el caudal medio anual (*Figura 5. 7*) para evaluar la capacidad de predicción de las ecuaciones de regresión lineal múltiple, se tiene que para las regresiones considerando año completo, se tienen mejores resultados para un año húmedo ( $R^2$  promedio = 0,43) que para años normales y secos ( $R^2$  promedio = 0,22 para cada uno). Para la temporada de invierno, también se tienen mejores resultados para un año húmedo ( $R^2$  promedio = 0,33) luego para un año normal ( $R^2$  promedio = 0,25) y para año seco ( $R^2$  promedio = 0,21). Estos valores mejoran para la temporada de verano modificado: nuevamente es mayor para los años húmedos ( $R^2$  promedio = 0,53) que para los años normales ( $R^2$  promedio = 0,36) y años secos ( $R^2$  promedio = 0,32).

Al momento de analizar para un año entero (*Figura 5. 8*), se tienen mejores resultados para años secos ( $R^2$  promedio = 0,53) que para los años normales ( $R^2$  promedio = 0,24) y años húmedos ( $R^2$  promedio = 0,04) solamente para cuencas en régimen nivopluvial. Para el resto de las cuencas, se tiene que es más alto para años húmedos.

Para la temporada de invierno (*Figura 5. 9*), son mayores los coeficientes para los años húmedos para los regímenes de pluvial y nivo pluvial. Para el régimen nival hay un mejor desempeño para años secos y para el régimen pluvial (con precipitación en verano) y pluvionival es mayor el desempeño en años húmedos.

Si se analizan las temporadas de verano modificado (*Figura 5. 11*), se tiene un mejor desempeño en la predicción para años secos en los regímenes pluviales (con precipitación en invierno) y en cuencas con regímenes nivo pluviales. Para los regímenes nivo pluviales y pluviales

el desempeño es mejor para los años húmedos- Es mejor el desempeño en años normales en las cuencas de régimen nival.

Analizando la forma de las Figuras A, para cuencas con comportamiento pluvionival con coeficientes de  $R^2$  aj. en invierno  $\geq 0.78$  (tres cuencas de seis), se tienen isolíneas verticales, lo que significa que variaciones de caudal se deben casi completamente a variaciones de precipitación. Al tomar en cuenta las cuencas con  $R^2$  aj. en verano mod.  $\geq 0.88$  (tres cuencas de seis), también se tienen cuencas con isolíneas verticales, pero menos que para el invierno; lo que quiere decir que la diferencia de temperatura para esta temporada afecta más que en el invierno, lo que es de esperarse debido a la acumulación y derretimiento de nieve, como se indica Vano et al., 2015. Para todas las cuencas nivales se obtienen variaciones de caudal que dependen de variaciones de precipitación y de temperatura.

## 6.2 Comparación de $\Delta Q_f$ con $\Delta Q_f V$ para caudales proyectados

Al calcular los resultados pronosticados mediante los parámetros A, B y C para las 25 cuencas en régimen natural y compararlos con los obtenidos con datos de los tres GCMs se obtienen bajas correlaciones  $R^2$  para los tres GCMs en los períodos estudiados ( $R^2 \leq 0.49$  para futuro cercano y futuro lejano); por lo que se decide analizar sólo las cuencas en que la diferencia absoluta entre  $\Delta Q_f$  con  $\Delta Q_f V$  sea menor a 10%.

Al considerar estas cuencas se obtiene que los  $\Delta Q$  con menor diferencia al tomar en cuenta el año completo corresponden a la de Río Choapa En Cuncumen (4703002), Río Aconcagua En Chacabuquito (5410002) y Río Maipo En El Manzano (571002). Las variaciones de caudales pronosticadas mediante los parámetros A, B y C poseen una diferencia absoluta menor al 10% para los tres GCMs y los dos períodos futuros estudiados (para los años 2020-2039 y los años 2040-2059). Estas cuencas tienen en común que están en régimen nival, también poseen una elevación media entre 3142 y 3182 msnm. La fracción de nieve de estas cuencas va entre 0,37 y 0,42. Las cuencas 5410002 y 571002 además tienen una pendiente promedio parecida.

Para la temporada de invierno, las cuencas con mejores resultados al comparar los  $\Delta Q$ , corresponden a la cuenca en régimen pluvial Estero Puangue En Boqueron (5741001), las cuencas en régimen nivo pluvial Río Grande En Cuyano (4513001) y Río Sobrante En Piadero (5100001) y la cuenca en régimen nival Río Aconcagua En Chacabuquito (5410002). Estas cuencas tienen en común que su  $p$  seasonality va entre -1,42 y -1,35.

Para la temporada de verano modificado se tiene que las cuencas con mejor comparación respecto al  $\Delta Q$  corresponde a Río Grande En Cuyano (4513001) y Río Choapa En Cuncumen (4703002). Ambas cuencas poseen régimen nival y además poseen un buen desempeño a nivel de año completo.

Las cuencas anteriormente mencionadas poseen un coeficiente de correlación ajustado  $R^2$  aj alto para la temporada evaluada: las cuencas con mejor resultado para el año entero poseen coeficientes de 0,90 (Río Choapa En Cuncumen), 0,87 (Río Aconcagua En Chacabuquito) y 0,71 (Río Maipo En El Manzano).

Para la temporada de invierno se tienen coeficientes de 0,72 (Estero Puangue En Boqueron), 0,78 (Río Grande En Cuyano), 0,80 (Río Sobrante En Piadero) y 0,68 (Río Aconcagua En

Chacabucito). Los coeficientes para la temporada de verano modificado son de 0,90 (Río Grande En Cuyano) y 0,93 (Río Choapa En Cuncumen).

Hay que considerar que los  $\Delta Q_f V$  presentan incertidumbre ya que dependen del método de escalamiento que se utilizó, la estructura de configuración del modelo y de los parámetros. Esto es válido también para los  $\Delta P p_f$  y delta  $\Delta T_f$  obtenidos de los GCMs ya que también provienen de un escalamiento estadístico.

### 6.3 Ajuste con datos históricos para crecidas

Para la regresión de caudales de crecida, es posible apreciar en la Figura 5. 23 y *Figura 5. 24*, que en promedio, el ajuste para la obtención de los parámetros A, B y C es mejor para la temporada de verano ( $R^2_{aj} = 0,27$ ) que para la temporada de invierno ( $R^2_{aj} = 0,11$ ) que para temporada de invierno ( $R^2_{aj} = 0,45$ ) y que temporada de verano ( $R^2_{aj} = 0.11$ ). También se aprecia en la *Figura 5. 24*, **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** que ese resultado de un mejor ajuste para las crecidas en verano se obtiene si se analiza por régimen de cuencas, obteniéndose que para todas menos para el régimen pluvial con precipitación en verano, aumenta el coeficiente para las crecidas de verano.

Es importante considerar que según la literatura revisada hay que considerar distintos factores que afectan en la crecida de un río al momento de llover tales como la humedad del aire al momento de llover (Molina, 2019) o la altura de la línea de nieves cuando llueve (Lagos, 2012).

Debido a los bajos coeficientes  $R^2_{aj}$  obtenidos, no se realiza la comparación de variaciones de caudales de crecida pronosticados, ya que en las temporadas de invierno y verano las cuencas que tenían bajo  $R^2_{aj}$  entregaban variaciones de caudales que al ser comparadas con las variaciones del caudal VIC presentaban errores mayores al 40% en promedio.



## Capítulo 7: Conclusiones

Al realizar regresiones con datos históricos se obtienen buenos resultados para períodos año entero y para verano modificado. Al comparar entre los regímenes de cuencas se tiene que para el año entero se tienen mejores regresiones en las cuencas nivopluviales; para el invierno las cuencas pluvionivales; para el verano las cuencas pluviales con precipitaciones en verano y para el verano modificado las cuencas nivopluviales junto a las nivales.

Es posible estimar variaciones de caudales de disponibilidad para cuencas de régimen natural sin la necesidad de realizar una modelación VIC. Esto es posible para cierto régimen de cuencas que cumplan con ciertos parámetros específicos como por ejemplo elevación media, p-seasonality, fracción de nieve. Para períodos de año completo y de invierno, se obtienen menores diferencias entre las variaciones de caudal obtenidas por la regresión y las obtenidas mediante la modelación VIC. Además, es necesario que la calibración histórica sea eficiente, prefiriendo que tengan coeficientes de  $R^2$  ajustados altos.

Para las regresiones históricas de caudales de crecidas no se obtienen resultados satisfactorios por lo que no se realiza el análisis de proyecciones de crecidas. Es probable que ocurra esto ya que la metodología para escoger los caudales a utilizar no sea el correcto, lo cual es posible mejorar para futuras investigaciones, además la temperatura y precipitación no describen todos los procesos necesarios para describir un aumento de caudal.

Como conclusión general se tiene que es posible estimar variaciones de caudales medios, pero no de caudales instantáneos diarios. Se propone estudiar la proyección de variaciones de caudales medios en para años enteros y temporada de deshielo para cuencas en régimen nival y nivopluvial en detalle como también las proyecciones de caudal medio para régimen pluvial para temporada de invierno.

Además, es necesario agregar restricciones a las proyecciones de variaciones de caudal, ya que no es posible que un caudal disminuya más del 100%.

## Bibliografía

- Alexander, L. V., Zhang, X., Peterson, T. C., Caesar, J., Gleason, B., Klein Tank, A. M. G., ... & Tagipour, A. (2006). Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 111(D5).
- 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-Chile dataset. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(11), 5817-5846.
- Barría, P. (2010). Pronóstico de caudales medios mensuales en las cuencas de los ríos Baker y Pascua. Memoria para optar al Título de Ingeniera Civil, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.
- Bell, V. A., Kay, A. L., Jones, R. G., & Moore, R. J. (2007). Use of a grid-based hydrological model and regional climate model outputs to assess changing flood risk. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 27(12), 1657-1671.
- Brown, C., Ghile, Y., Laverty, M., & Li, K. (2012). Decision scaling: Linking bottom-up vulnerability analysis with climate projections in the water sector. *Water Resources Research*, 48(9).
- Brown, C., & Wilby, R. L. (2012). An alternate approach to assessing climate risks. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 93(41), 401-402.
- Cannon, A.J., Sobie, S.R., Murdock, T.Q., 2015. Bias correction of GCM precipitation by quantile mapping: How well do methods preserve changes in quantiles and extremes? *J. Clim.* 28, 6938–6959. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00754.1>
- Clark, M. P., Wilby, R. L., Gutmann, E. D., Vano, J. A., Gangopadhyay, S., Wood, A. W., ... & Brekke, L. D. (2016). Characterizing uncertainty of the hydrologic impacts of climate change. *Current Climate Change Reports*, 2(2), 55-64.
- Chadwick, C., Gironás, J., Vicuña, S., Meza, F., & McPhee, J. (2017). PRE-ANÁLISIS DE MODELOS DE CAMBIO CLIMÁTICO PARA ESTUDIOS HIDROLÓGICOS. XXIII CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA. SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA
- Chadwick, C., Gironás, J., Vicuña, S., Meza, F., & McPhee, J. (2018). Using a Statistical Preanalysis Approach as an Ensemble Technique for the Unbiased Mapping of GCM Changes to Local Stations. *Journal of Hydrometeorology*, 19(9), 1447-1465.
- Dankers, R., & Feyen, L. (2009). Flood hazard in Europe in an ensemble of regional climate scenarios. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 114(D16).
- Dankers, R., Arnell, N. W., Clark, D. B., Falloon, P. D., Fekete, B. M., Gosling, S. N., ... & Stacke, T. (2014). First look at changes in flood hazard in the Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project ensemble. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(9), 3257-3261.
- Decreto Ley N°1.122. (1981). Fija texto del Código de Aguas. Diario Oficial de la República de Chile.
- DGA, 1995. Manual de cálculo de crecidas y caudales mínimos en cuencas sin información fluviométrica. Dirección General de Aguas, Ministerio de Obras Públicas, Chile.
- DGA (2016). Atlas del Agua.

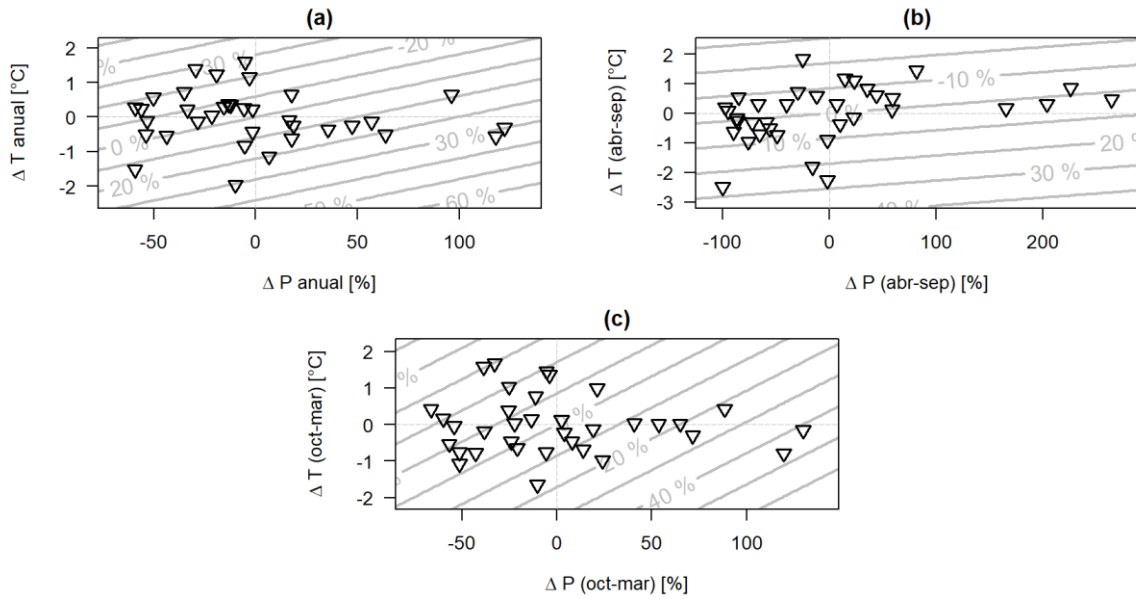
- DGA. (2017). Actualización del Balance Hídrico Nacional, SIT N°417, Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación, Santiago, Chile, Realizado por: Universidad de Chile & Pontificia Universidad Católica de Chile.
- DGA (2018). APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE ACTUALIZACIÓN DEL BALANCE HÍDRICO NACIONAL EN LAS CUENCAS DE LAS MACROZONAS NORTE Y CENTRO, SIT N° 435. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios Planificación, Santiago, Chile. Realizado por Fundación para la Transferencia Tecnológica y Pontificia Universidad Católica de Chile.
  - Falvey, M., & Garreaud, R. D. (2009). Regional cooling in a warming world: Recent temperature trends in the southeast Pacific and along the west coast of subtropical South America (1979–2006). *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 114(D4).
  - Gao, H., Tang, Q., Shi, X., Zhu, C., Bohn, T., Su, F., ... & Wood, E. (2010). Water budget record from Variable Infiltration Capacity (VIC) model.
  - Garreaud, R. D., Alvarez-Garreton, C., Barichivich, J., Pablo Boisier, J., Christie, D., Galleguillos, M., ... & Zambrano-Bigiarini, M. (2017). The 2010-2015 megadrought in central Chile: impacts on regional hydroclimate and vegetation.
  - Haan, C. T. (1989). Parametric uncertainty in hydrologic modeling. *Transactions of the ASAE*, 32(1), 137-0146.
  - Hirabayashi, Y., Kanae, S., Emori, S., Oki, T., & Kimoto, M. (2008). Global projections of changing risks of floods and droughts in a changing climate. *Hydrological Sciences Journal*, 53(4), 754-772.
  - Hrachowitz, M., & Clark, M. P. (2017). HESS Opinions: The complementary merits of competing modelling philosophies in hydrology. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(8), 3953-3973.
  - IPCC. (1990). *Working Group I: Scientific Assessment of Climate Change*.
  - IPCC. (2013). *CLIMATE CHANGE 2013: The Physical Science Basis*.
  - Khan, F., & Pilz, J. (2018). Statistical Methodology for Evaluating Process-Based Climate Models. In *Climate Change and Global Warming*. IntechOpen.
  - Lagos, M. (2012). Impacto del cambio climático en eventos extremos y análisis de la vulnerabilidad de algunas obras hidráulicas en Chile. Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería, mención Recursos y Medio Ambiente Hídrico. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.
  - Lagos-Zúñiga, Miguel & Bobadilla, Maria & Vargas, Ximena & Cepeda, Javier & Silva, Victoria & Uribe, Felipe & Vasquez, Nicolas. (2015). PROYECCIONES DE CRECIDAS EN CUENCAS ANDINAS BAJO DISTINTOS MODELOS DE CIRCULACIÓN GENERAL.
  - Lehner, B., Döll, P., Alcamo, J., Henrichs, T., & Kaspar, F. (2006). Estimating the impact of global change on flood and drought risks in Europe: a continental, integrated analysis. *Climatic Change*, 75(3), 273-299.
  - Liu, Y., & Gupta, H. V. (2007). Uncertainty in hydrologic modeling: Toward an integrated data assimilation framework. *Water Resources Research*, 43(7).
  - Marshall, G. J. (2003). Trends in the Southern Annular Mode from observations and reanalyses. *Journal of climate*, 16(24), 4134-4143.
  - Migliavacca, F., Confortola, G., Soncini, A., Senese, A., Diolaiuti, G. A., Smiraglia, C., ... & Bocchiola, D. (2015). Hydrology and potential climate changes in the Rio Maipo (Chile).
  - Milly, P. C. D., Wetherald, R. T., Dunne, K. A., & Delworth, T. L. (2002). Increasing risk of great floods in a changing climate. *Nature*, 415(6871), 51

- Molina, C. (2019). Evaluación hidrometeorológica de la ocurrencia de aluviones incorporando proyecciones del cambio climático en la cuenca de los ríos El Carmen y El Tránsito, Chile. Memoria para optar al Título de Ingeniera Civil, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.
- Moss, R. H., Edmonds, J. A., Hibbard, K. A., Manning, M. R., Rose, S. K., Van Vuuren, D. P., ... & Meehl, G. A. (2010). The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*, 463(7282), 747.
- Null, S. E., Viers, J. H., & Mount, J. F. (2010). Hydrologic response and watershed sensitivity to climate warming in California's Sierra Nevada. *PLoS One*, 5(4), e9932
- Renard, B., Kavetski, D., Kuczera, G., Thyer, M., & Franks, S. W. (2010). Understanding predictive uncertainty in hydrologic modeling: The challenge of identifying input and structural errors. *Water Resources Research*, 46(5).
- 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*, 109(1-2), 33.
- Samaniego, J., De Miguel, C. J., Galindo, L. M., Gómez, J. J., Martínez, K., & Cetrángolo, O. (2009). La economía del cambio climático en Chile: síntesis.
- Sandoval, Julio. (2003). *El riego en Chile*. Santiago de Chile: Ministerio de Obras Públicas. Dirección de Obras Hidráulicas.
- Switanek, B.M., Troch, A.P., Castro, L.C., Leuprecht, A., Chang, H.I., Mukherjee, R., Demaria, M.C.E., 2017. Scaled distribution mapping: A bias correction method that preserves raw climate model projected changes. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 21, 2649–2666. <https://doi.org/10.5194/hess-21-2649-2017>
- UC, C. I. D. C. G. (2013). *MARCO ESTRATÉGICO PARA LA ADAPTACIÓN DE LA INFRAESTRUCTURA AL CAMBIO CLIMÁTICO*. MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS.
- Valdés-Pineda, R., Pizarro, R., García-Chevesich, P., Valdés, J. B., Olivares, C., Vera, M., ... & Abarza, A. (2014). Water governance in Chile: Availability, management and climate change. *Journal of Hydrology*, 519, 2538-2567.
- 
- Vano, J. A., Das, T., & Lettenmaier, D. P. (2012). Hydrologic sensitivities of Colorado River runoff to changes in precipitation and temperature. *Journal of Hydrometeorology*, 13(3), 932-949.
- Vano, J. A., Nijssen, B., & Lettenmaier, D. P. (2015). Seasonal hydrologic responses to climate change in the Pacific Northwest. *Water Resources Research*, 51(4), 1959-1976.
- Wilby, R. L., & Dessai, S. (2010). Robust adaptation to climate change. *Weather*, 65(7), 180-185.
- Xu, C. (1999). From GCMs to river flow: a review of downscaling methods and hydrologic modelling approaches. *Progress in Physical Geography*, 23(2), 229–249.
- Yu, J. Y., & Mechoso, C. R. (2001). A coupled atmosphere–ocean GCM study of the ENSO cycle. *Journal of climate*, 14(10), 2329-2350.
- Zscheischler, J., Westra, S., van den Hurk, B. J. J. M., Seneviratne, S. I., Ward, P. J., Pitman, A., ... Zhang, X. (2018). *Future climate risk from compound events*. *Nature Climate Change*, 8(6), 469–477. doi:10.1038/s41558-018-0156-3

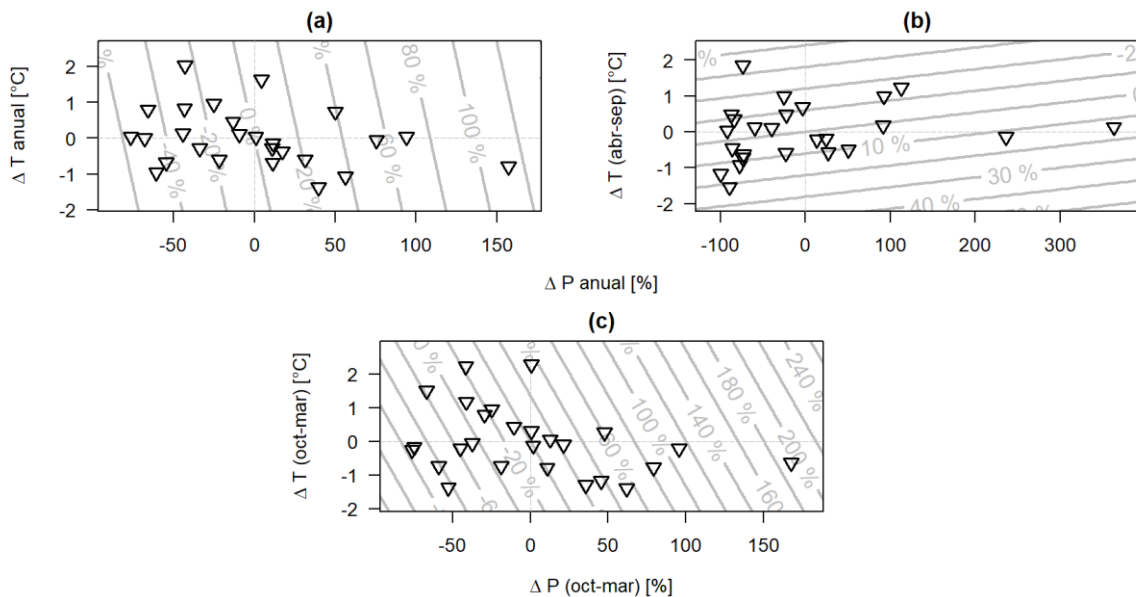
## 8 Anexos

### Anexo A: regresión de disponibilidad de caudales

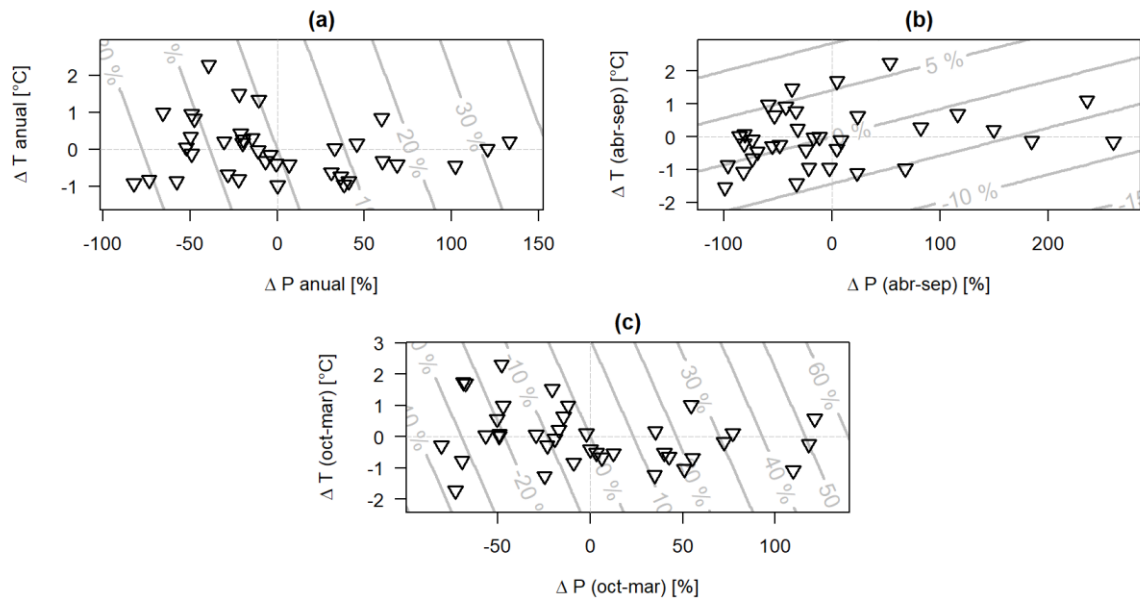
A continuación, entre la una regresión para obtener variaciones de caudal a partir de variaciones de precipitación y temperatura para 24 cuencas en régimen natural.



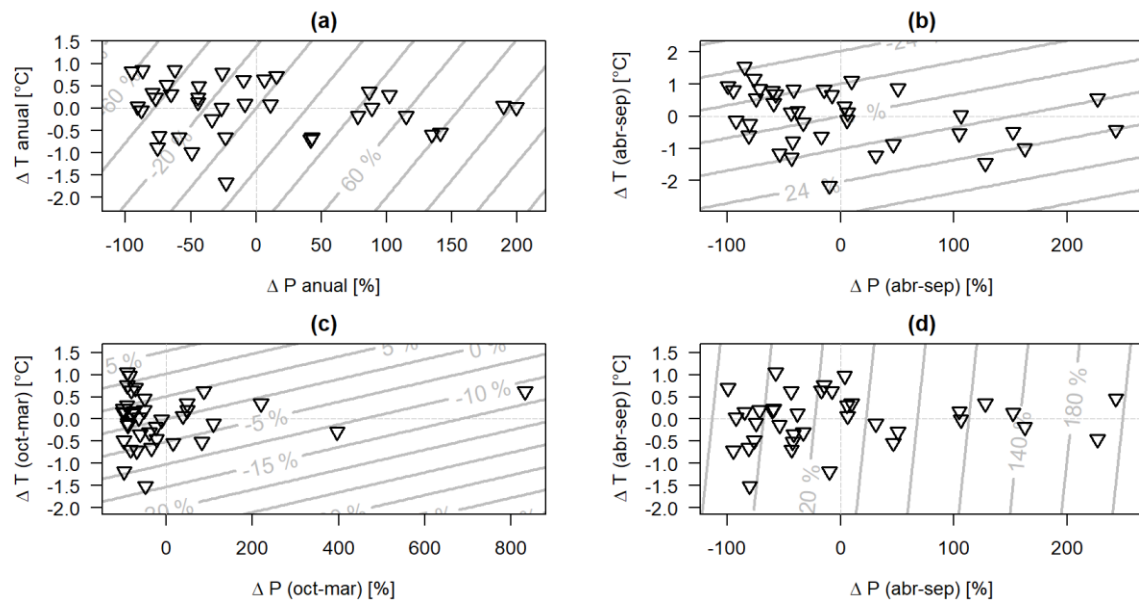
**Figura A - 1:** Variaciones de caudal medio [-] para: año completo (a), temporada de invierno (b), temporada de verano (c) y temporada de verano con precipitación de año entero o de invierno. Cuenca 1050004: Río Collagüa en Peñablanca.



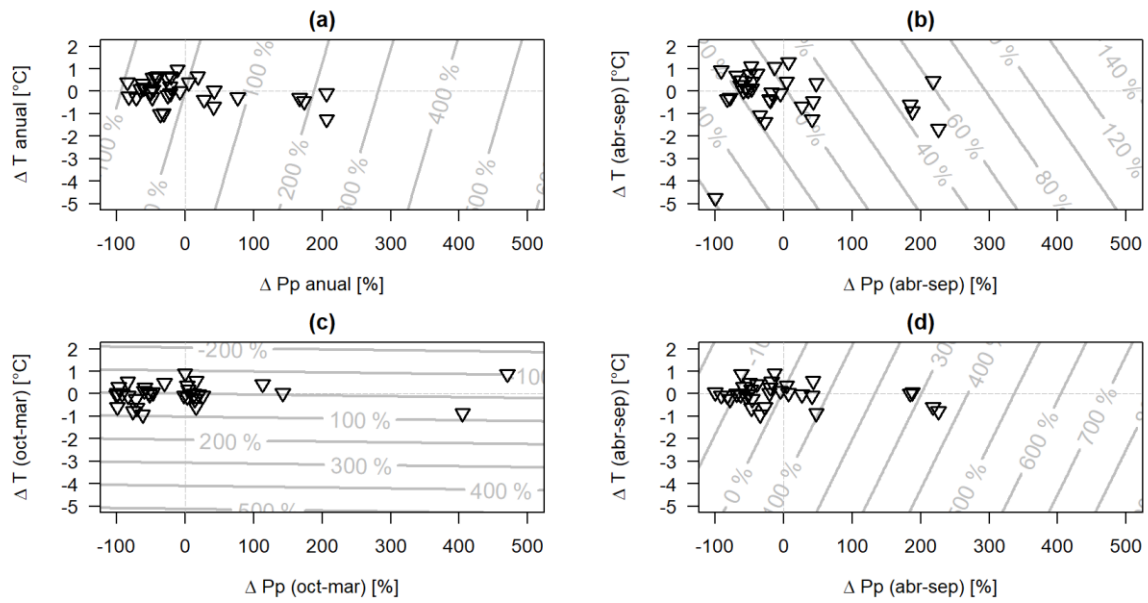
**Figura A - 2:** variaciones de caudal medio [-] para: año completo (a), temporada de invierno (b), temporada de verano (c) y temporada de verano con precipitación de año entero o de invierno. Cuenca 1310002



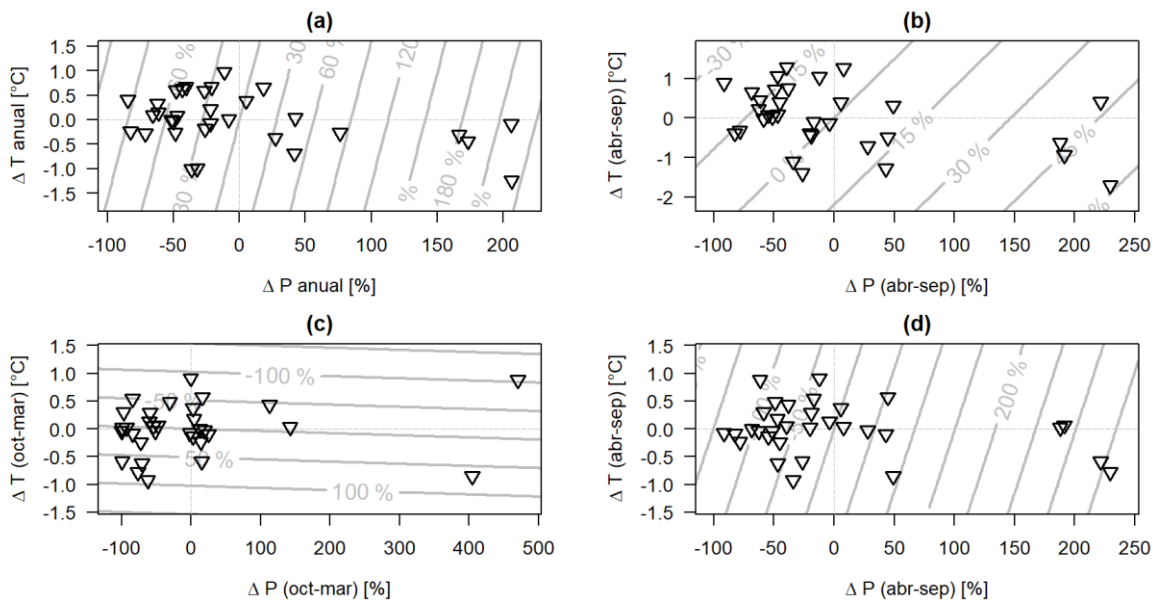
**Figura A - 3:** variaciones de caudal medio [-] para: año completo (a), temporada de invierno (b), temporada de verano (c) y temporada de verano con precipitación de año entero o de invierno. Cuenca 2101001



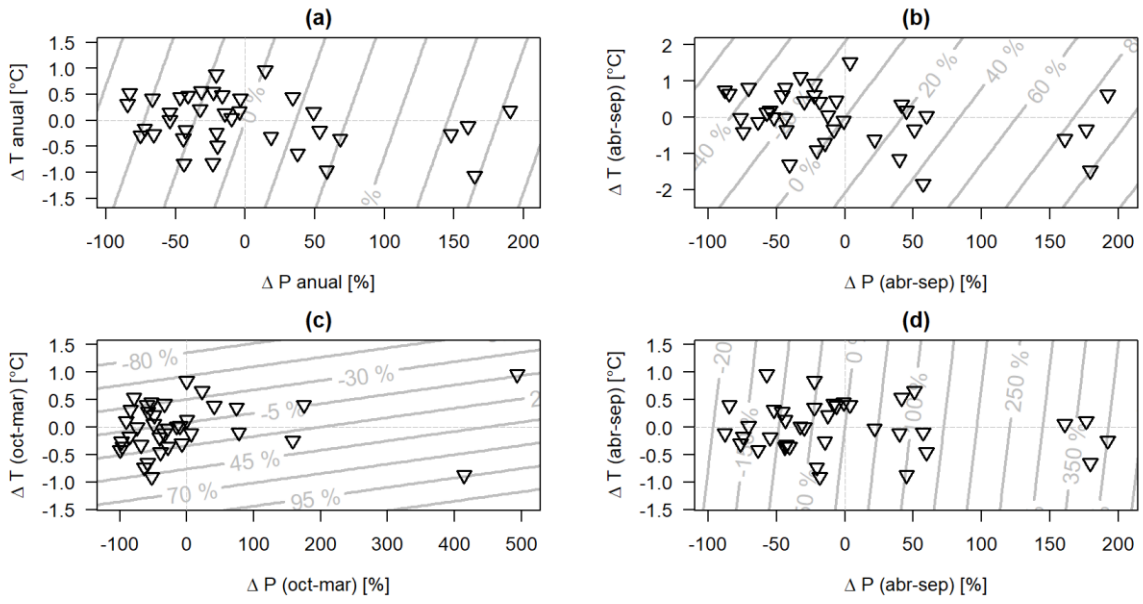
**Figura A - 4:** variaciones de caudal medio [-] para: año completo (a), temporada de invierno (b), temporada de verano (c) y temporada de verano con precipitación de año entero o de invierno. Cuenca 3414001



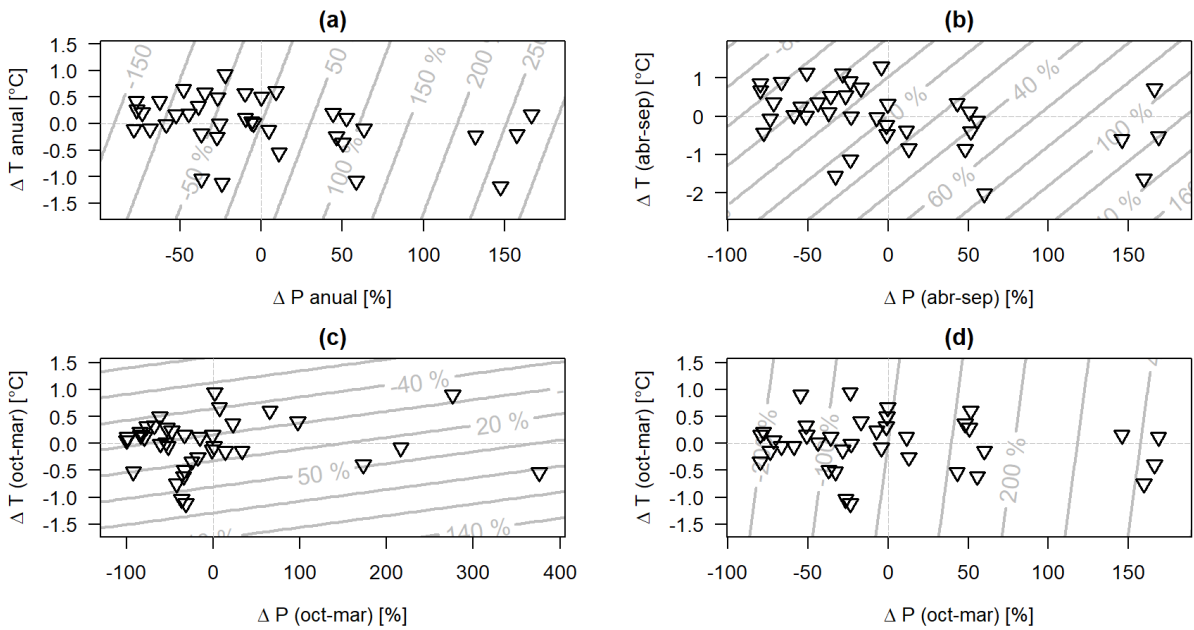
**Figura A - 5:** variaciones de caudal medio [-] para: año completo (a), temporada de invierno (b), temporada de verano (c) y temporada de verano con precipitación de año entero o de invierno. Cuenca 4311001



**Figura A - 6:** variaciones de caudal medio [-] para: año completo (a), temporada de invierno (b), temporada de verano (c) y temporada de verano con precipitación de año entero o de invierno. Cuenca 4313001

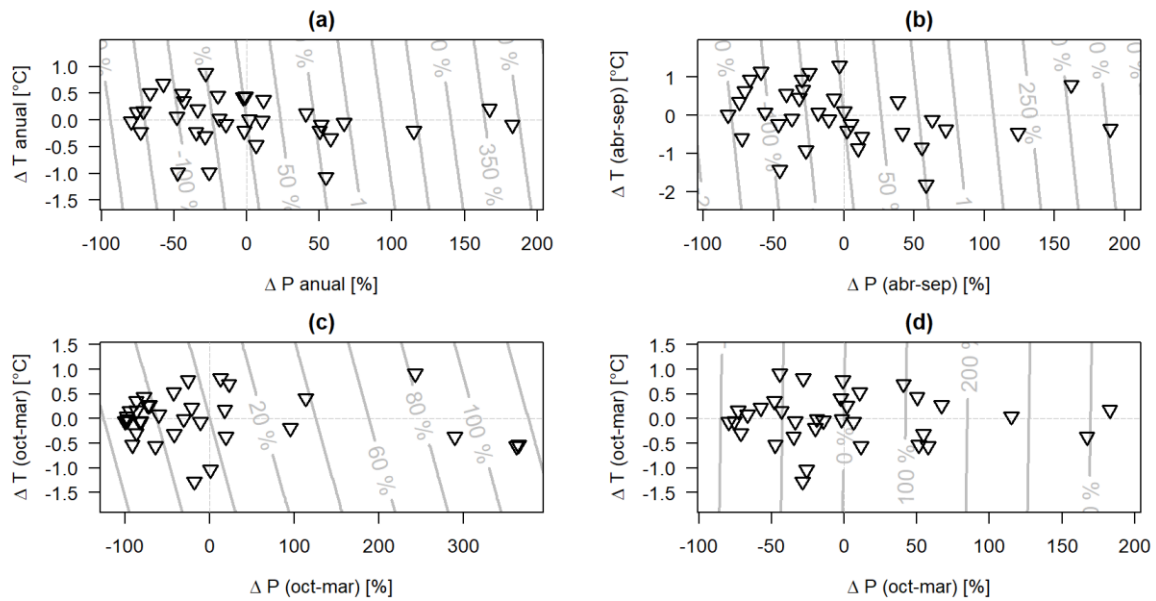


**Figura A - 7:** variaciones de caudal medio [-] para: año completo (a), temporada de invierno (b), temporada de verano (c) y temporada de verano con precipitación de año entero o de invierno. Cuenca 4503001

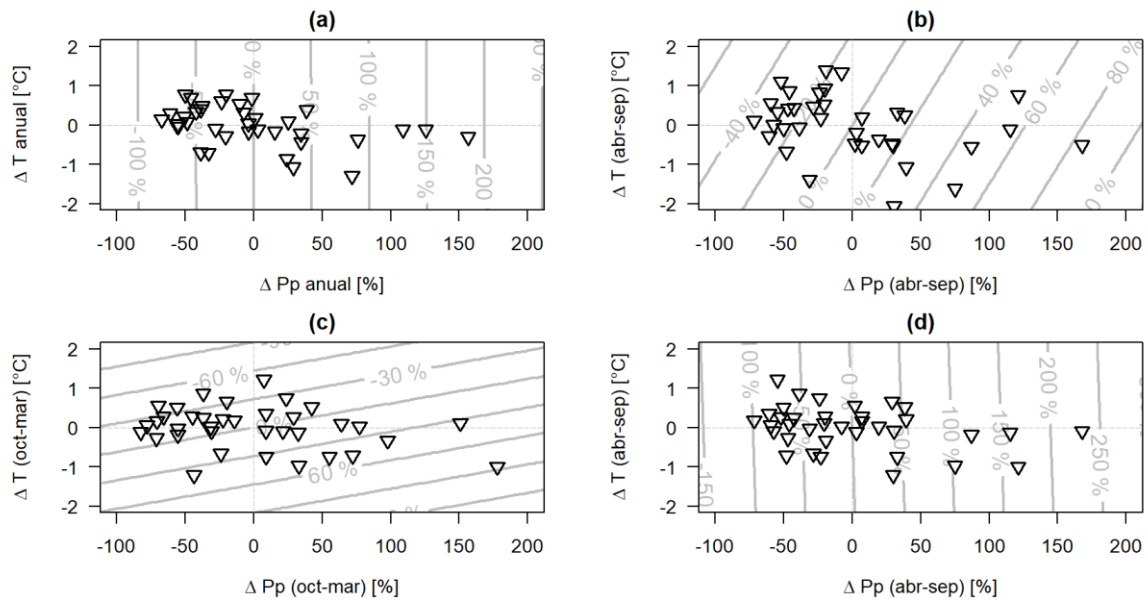


**Figura A - 8:** variaciones de caudal medio [-] para: año completo (a), temporada de invierno (b), temporada de verano (c) y temporada de verano con precipitación de año entero o de invierno. Cuenca 4522002

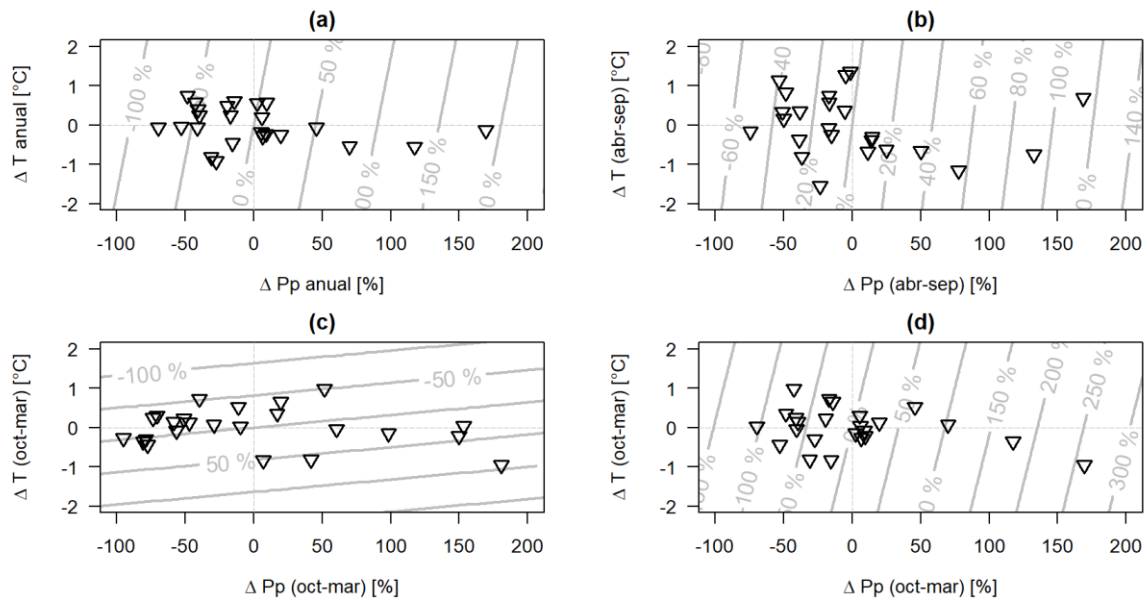




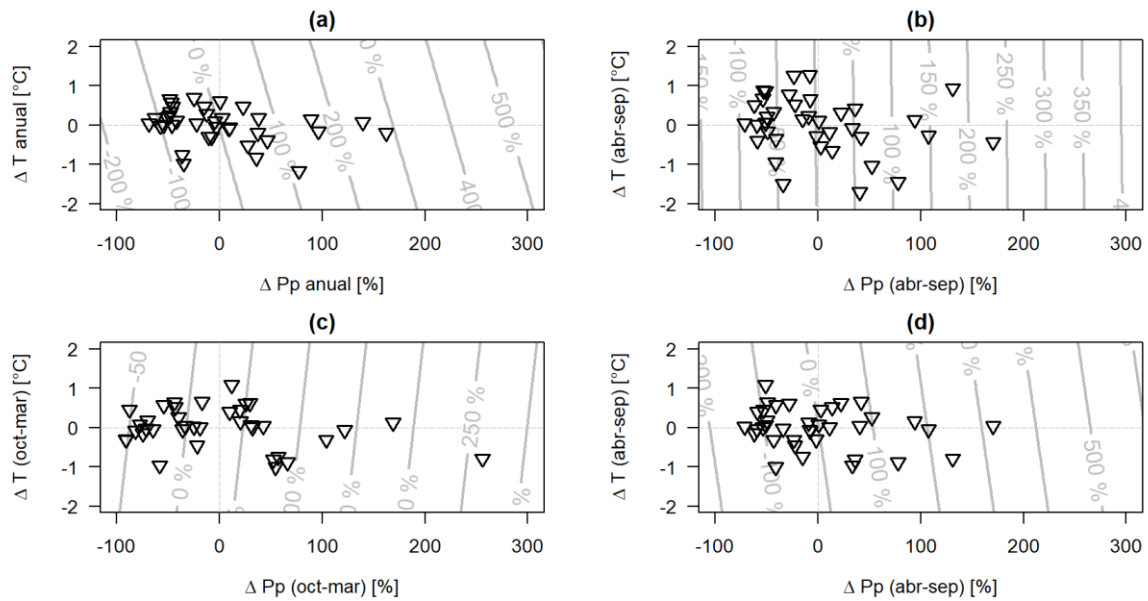
**Figura A - 9:** variaciones de caudal medio [-] para: año completo (a), temporada de invierno (b), temporada de verano (c) y temporada de verano con precipitación de año entero o de invierno. Cuenca 4531002



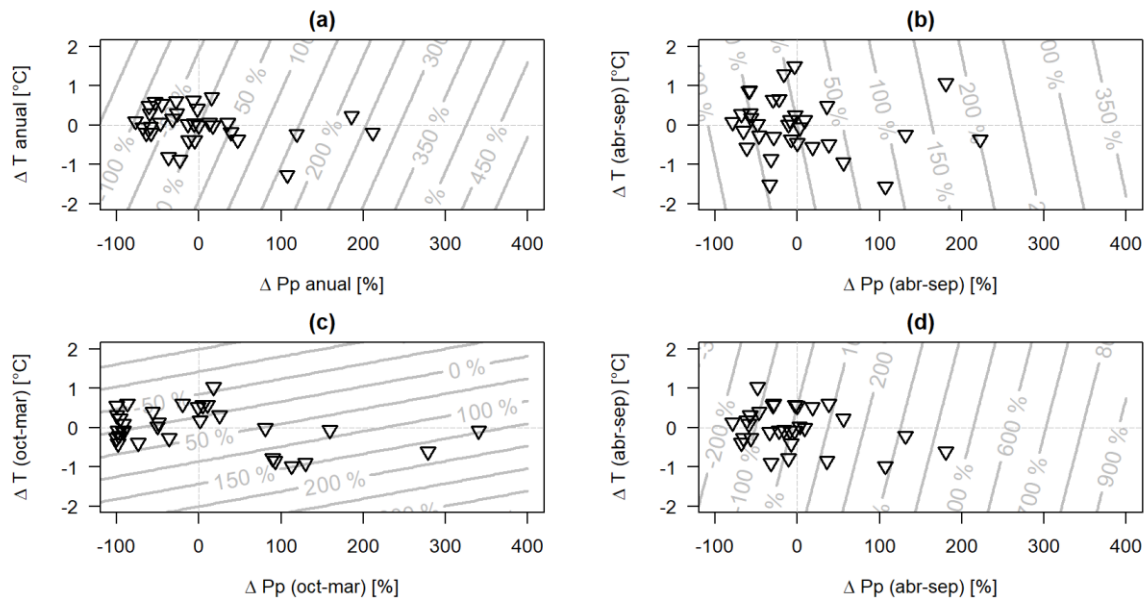
**Figura A - 10:** variaciones de caudal medio [-] para: año completo (a), temporada de invierno (b), temporada de verano (c) y temporada de verano con precipitación de año entero o de invierno. Cuenca 4703002



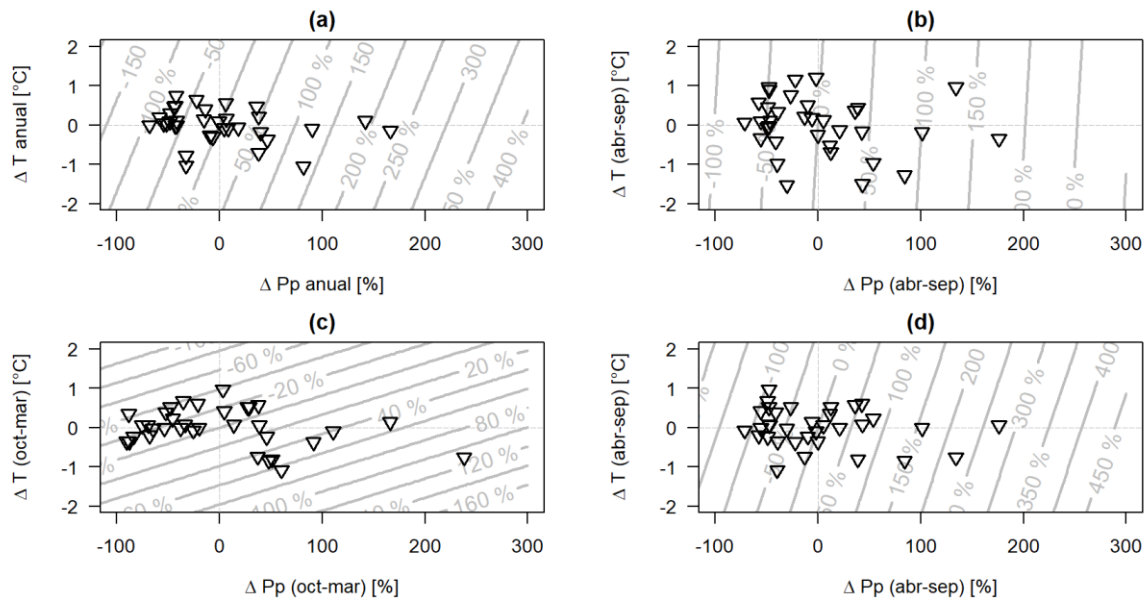
**Figura A - 11:** variaciones de caudal medio [-] para: año completo (a), temporada de invierno (b), temporada de verano (c) y temporada de verano con precipitación de año entero o de invierno. Cuenca 4712001



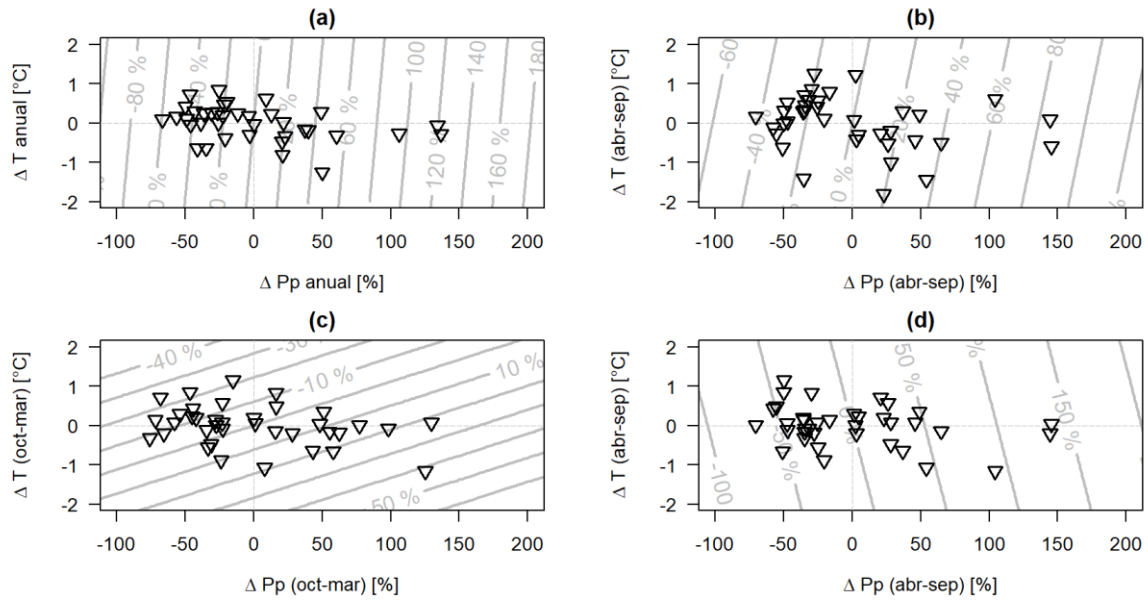
**Figura A - 12:** variaciones de caudal medio [-] para: año completo (a), temporada de invierno (b), temporada de verano (c) y temporada de verano con precipitación de año entero o de invierno. Cuenca 5100001



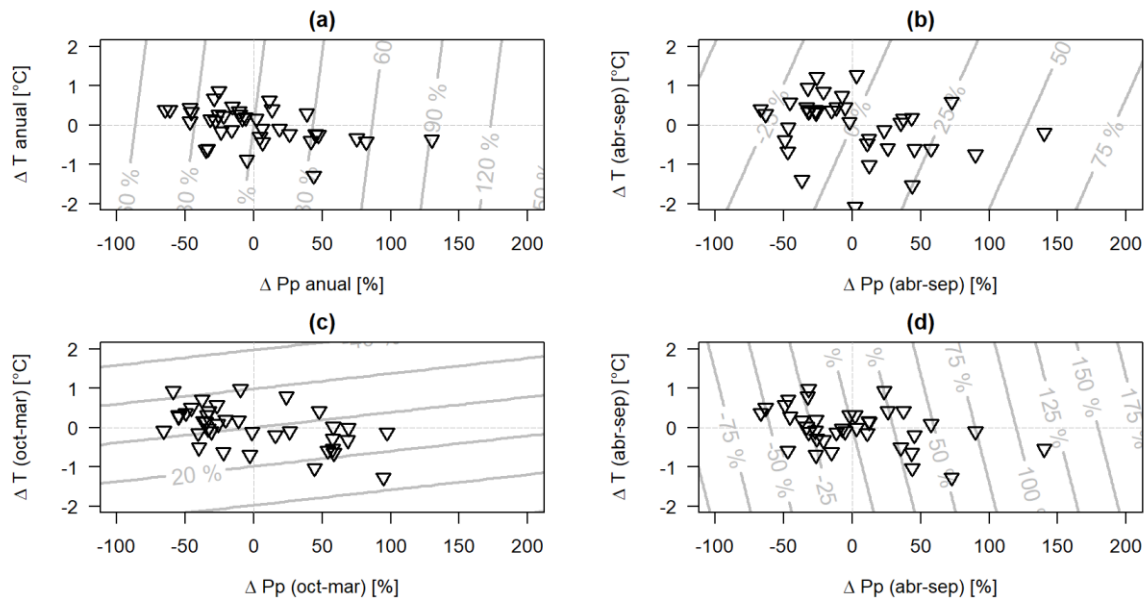
**Figura A - 13:** variaciones de caudal medio [-] para: año completo (a), temporada de invierno (b), temporada de verano (c) y temporada de verano con precipitación de año entero o de invierno. Cuenca 5101001



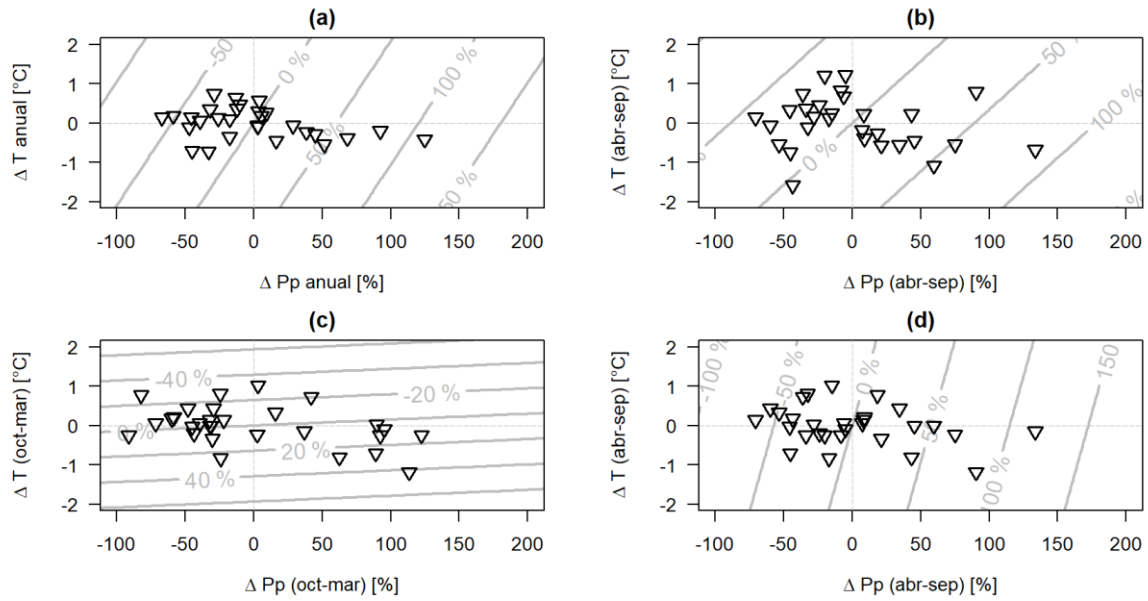
**Figura A - 14:** variaciones de caudal medio [-] para: año completo (a), temporada de invierno (b), temporada de verano (c) y temporada de verano con precipitación de año entero o de invierno. Cuenca 5200001



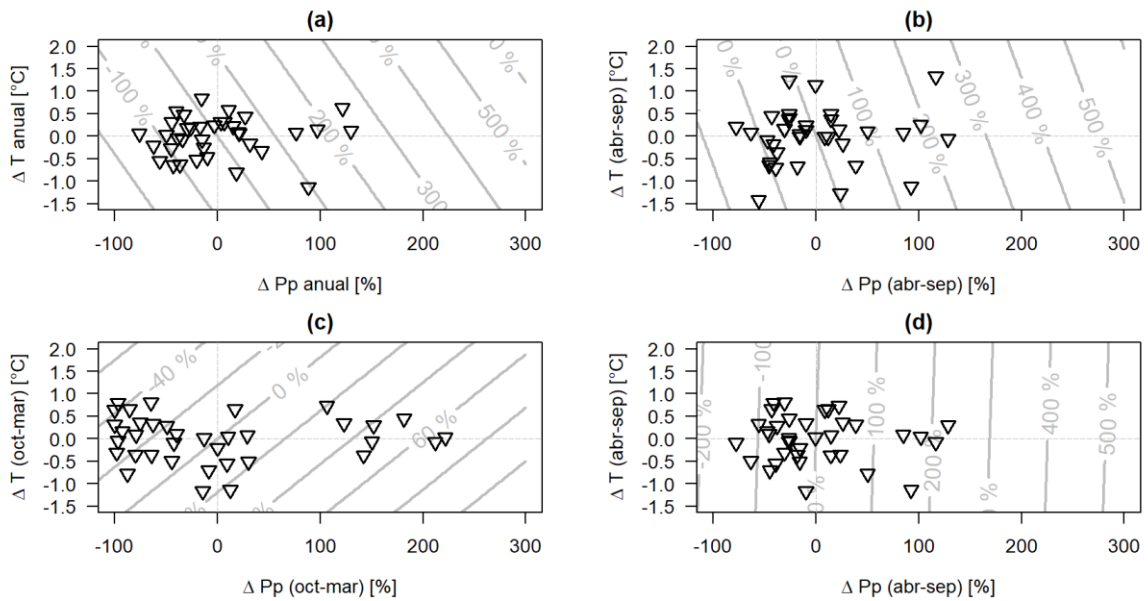
**Figura A - 15:** variaciones de caudal medio [-] para: año completo (a), temporada de invierno (b), temporada de verano (c) y temporada de verano con precipitación de año entero o de invierno. Cuenca 5410002



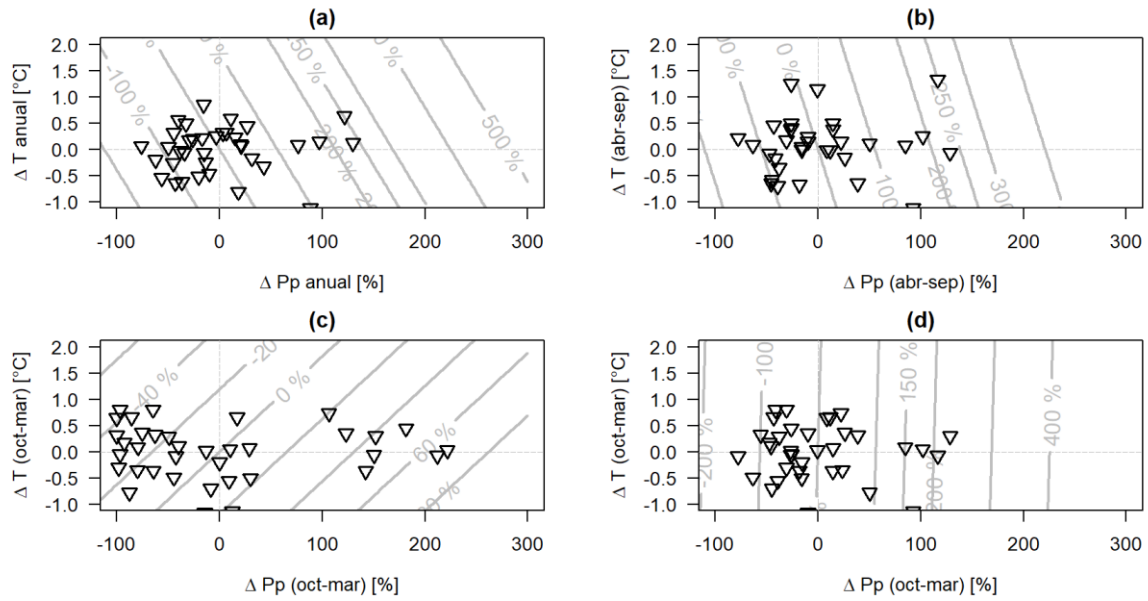
**Figura A - 16:** variaciones de caudal medio [-] para: año completo (a), temporada de invierno (b), temporada de verano (c) y temporada de verano con precipitación de año entero o de invierno. Cuenca 5710001



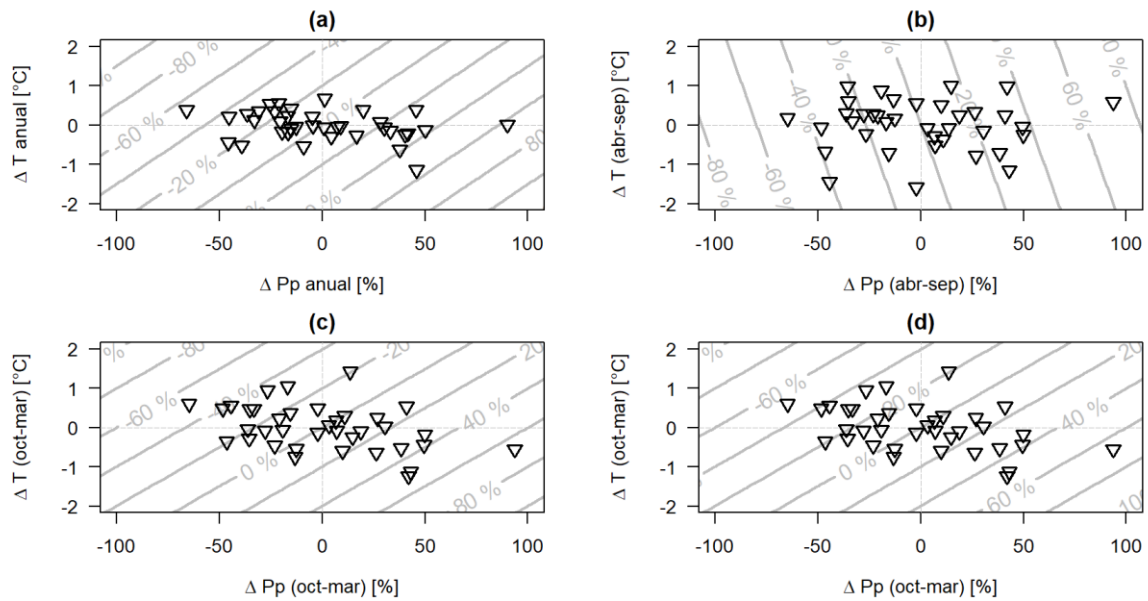
**Figura A - 17:** variaciones de caudal medio [-] para: año completo (a), temporada de invierno (b), temporada de verano (c) y temporada de verano con precipitación de año entero o de invierno. Cuenca 5721001



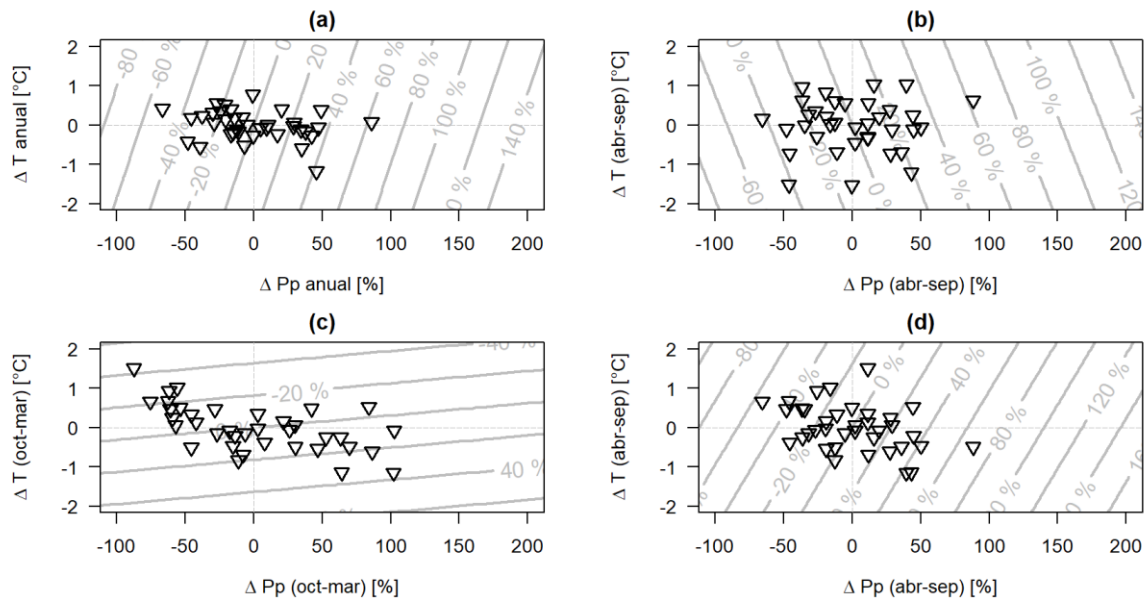
**Figura A - 18:** variaciones de caudal medio [-] para: año completo (a), temporada de invierno (b), temporada de verano (c) y temporada de verano con precipitación de año entero o de invierno. Cuenca 5741001



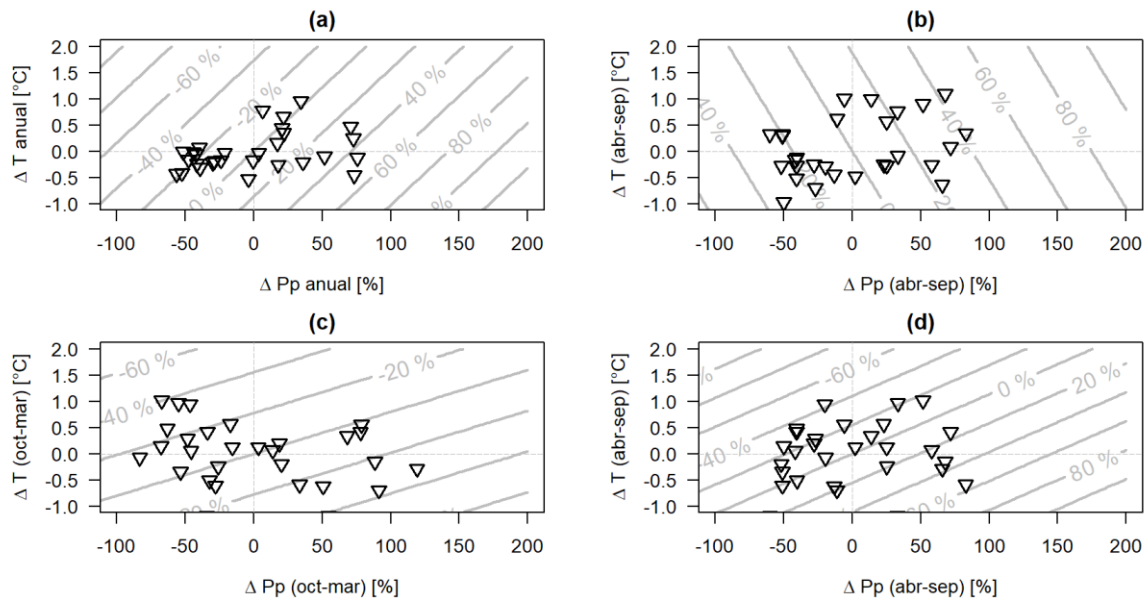
**Figura A - 19:** variaciones de caudal medio [-] para: año completo (a), temporada de invierno (b), temporada de verano (c) y temporada de verano con precipitación de año entero o de invierno. Cuenca 7103001



**Figura A - 20:** variaciones de caudal medio [-] para: año completo (a), temporada de invierno (b), temporada de verano (c) y temporada de verano con precipitación de año entero o de invierno. Cuenca 7112001

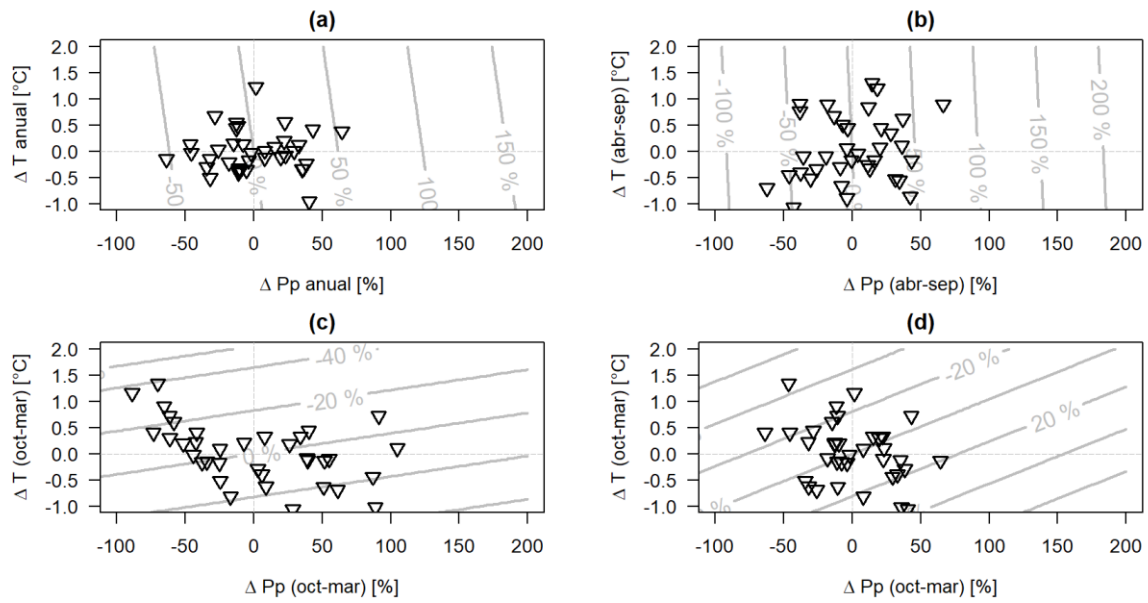


**Figura A - 21:** variaciones de caudal medio [-] para: año completo (a), temporada de invierno (b), temporada de verano (c) y temporada de verano con precipitación de año entero o de invierno. Cuenca 7115001

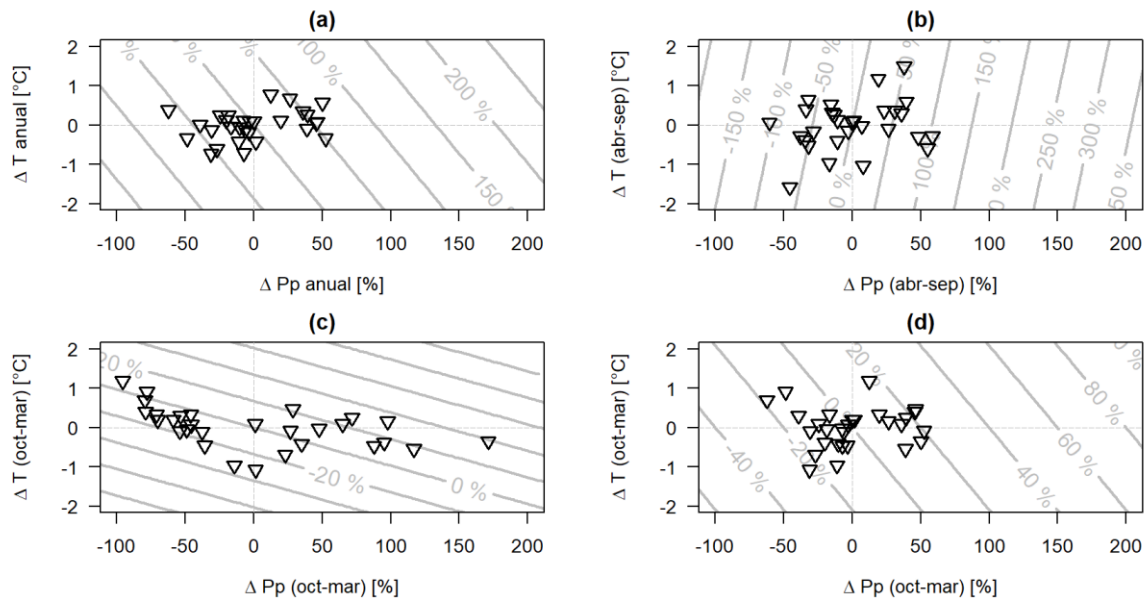


**Figura A - 22:** variaciones de caudal medio [-] para: año completo (a), temporada de invierno (b), temporada de verano (c) y temporada de verano con precipitación de año entero o de invierno. Cuenca 7354002





**Figura A - 23:** variaciones de caudal medio [-] para: año completo (a), temporada de invierno (b), temporada de verano (c) y temporada de verano con precipitación de año entero o de invierno. Cuenca 7358001



**Figura A - 24:** variaciones de caudal medio [-] para: año completo (a), temporada de invierno (b), temporada de verano (c) y temporada de verano con precipitación de año entero o de invierno. Cuenca 7381001



A continuación, se presentan Tablas con datos obtenidos al realizar una regresión para obtener variaciones de caudal a partir de variaciones de precipitación y temperatura para 25 cuencas en régimen natural.

*Tabla A - I: Resumen de valores A, B, C y R2 ajustado considerando año entero*

<b>Código</b>	<b>Estación</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>R2 aj</b>
1310002	Río San José en Ausipar	0,74	0,04	5,6.E-18	0,33
1050004	Río Collagüa en Peñablanca	0,20	-0,17	9,5.E-17	0,06
2101001	Río Loa antes represa Lequena	0,26	0,02	-2,2.E-16	0,39
3414001	Río Pulido en vertedero	0,51	-0,15	-2,3.E-16	0,52
4313001	Río Cochigüaz en El Peñón	0,94	-0,11	5,8.E-17	0,83
4311001	Estero Derecho en Alcohüaz	1,07	-0,10	9,2.E-17	0,79
4503001	Río Hurtado en angostura de Pangué	1,38	-0,18	-3,7.E-17	0,70
4522002	Río Rapel en Junta	1,66	-0,21	8,1.E-16	0,71
4513001	Río Grande en Cuyano	1,37	-0,13	-2,4.E-16	0,90
4531002	Río Cogotí entrada Embalse Cogotí	2,13	0,11	1,3.E-15	0,81
4712001	Río Chalinga en La Palmilla	1,11	-0,06	-8,7.E-17	0,79
4703002	Río Choapa en Cuncumen	1,19	0,001	2,1.E-16	0,90
5101001	Río Pedernal en Tejada	1,23	-0,26	-2,8.E-16	0,48
5100001	Río Sobrante en Piadero	1,77	0,180	1,9.E-02	0,86
5200001	Río Alicahue en Colligüay	1,36	-0,21	1,6.E-16	0,87
5410002	Río Aconcagüa en Chacabuquito	0,89	-0,02	2,4.E-16	0,87
5741001	Estero Puangue en Boquerón	1,78	0,55	-1,3.E-15	0,75
5721001	Estero Yerba Loca antes junta San Francisco	0,83	-0,156	6,1.E-17	0,83
5710001	Río Maipo en El Manzano	0,69	-0,03	2,5.E-16	0,71
7103001	Río Claro en Los Queñes	1,12	0,08	-2,2.E-16	0,58
7112001	Río Colorado en junta con Palos	0,70	-0,20	2,4.E-16	0,60
7115001	Río Palos en junta con Colorado	0,73	-0,07	2,3.E-17	0,622
7354002	Río Achibueno en La Recova	0,56	-0,23	3,1.E-16	0,229
7358001	Río Putagan en Yervas Buenas	0,81	0,05	-7,4.E-17	0,558
7381001	Estero Los Puercos en puente Los Puercos	1,13	0,27	-3,6.E-16	0,693

**Tabla A - 2:** resumen de valores A, B, C y R2 ajustado considerando meses de Invierno (entre abril y septiembre)

<b>Código</b>	<b>Estación</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>R2 aj</b>
1310002	Río San José en Ausipar	0,02	0,07	-9,2.E-03	-0,07
1050004	Río Collagüa en Peñablanca	0,03	-0,12	1,4.E-17	-0,01
2101001	Río Loa antes represa Lequena	-0,03	0,04	1,7.E-16	0,01
3414001	Río Pulido en vertedero	0,08	-0,12	-1,9.E-16	0,04
4313001	Río Cochigüaz en El Peñón	0,11	-0,12	3,9.E-17	0,09
4311001	Estero Derecho en Alcohüaz	0,20	-0,07	9,4.E-17	0,13
4503001	Río Hurtado en angostura de Pangué	0,48	-0,1	-1,8.E-16	0,25
4522002	Río Rapel en Junta	0,65	-0,19	2,7.E-16	0,36
4513001	Río Grande en Cuyano	0,87	-0,03	-1,4.E-16	0,78
4531002	Río Cogotí entrada Embalse Cogotí	1,8	-0,06	6,8.E-03	0,83
4712001	Río Chalinga en La Palmilla	0,68	-0,02	4,4.E-01	0,44
4703002	Río Choapa en Cuncumen	0,47	-0,08	-6,8.E-17	0,53
5101001	Río Pederal en Tejada	0,92	0,09	-5,1.E-16	0,37
5100001	Río Sobrante en Piadero	1,34	0,01	3,0.E-02	0,80
5200001	Río Alicahue en Colligüay	0,99	-0,02	7,4.E-17	0,76
5410002	Río Aconcagüa en Chacabuquito	0,59	-0,04	3,6.E-16	0,68
5741001	Estero Puangué en Boquerón	1,81	0,29	-2,4.E-16	0,72
5721001	Estero Yerba Loca antes junta San Francisco	0,56	-0,18	3,0.E-16	0,62
5710001	Río Maipo en El Manzano	0,39	-0,05	-7,0.E-17	0,53
7103001	Río Claro en Los Queñes	1,16	0,12	-1,9.E-16	0,54
7112001	Río Colorado en junta con Palos	0,75	0,05	-9,4.E-17	0,55
7115001	Río Palos en junta con Colorado	0,66	0,08	4,2.E-17	0,47
7354002	Río Achibueno en La Recova	0,46	0,11	1,0.E-16	0,17
7358001	Río Putagan en Yervas Buenas	1,09	0,02	-3,9.E-16	0,84
7381001	Estero Los Puercos en puente Los Puercos	1,72	-0,11	-3,0.E-16	0,85

**Tabla A - 3::** resumen de valores A, B, C y R2 ajustado considerando meses de Verano (entre octubre y marzo)

<b>Código</b>	<b>Estación</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>R2 aj</b>
1310002	Río San José en Ausipar	1,20	0,15	4,2.E-16	0,48
1050004	Río Collagüa en Peñablanca	0,31	-0,12	4,6.E-17	0,04
2101001	Río Loa antes represa Lequena	0,43	0,03	-9,9.E-18	0,50
3414001	Río Pulido en vertedero	-0,02	0,10	6,9.E-16	-0,05
4313001	Río Cochigüaz en El Peñón	-0,04	-0,76	3,7.E-16	0,03
4311001	Estero Derecho en Alcohüaz	-0,04	-0,98	-4,7.E-17	0,04
4503001	Río Hurtado en angostura de Pangué	0,10	-0,59	-1,9.E-15	-0,03
4522002	Río Rapel en Junta	0,14	-0,62	1,0.E-15	-0,03
4513001	Río Grande en Cuyano	0,28	-0,43	-1,7.E-15	0,03
4531002	Río Cogotí entrada Embalse Cogotí	0,32	0,050	-9,7.E-17	-0,01
4712001	Río Chalinga en La Palmilla	0,2	-0,61	8,7.E-02	0,09
4703002	Río Choapa en Cuncumen	0,26	-0,42	-1,6.E-15	0,08
5101001	Río Pederal en Tejada	0,34	-0,88	2,4.E-01	0,13
5100001	Río Sobrante en Piadero	0,90	-0,04	2,9.E-01	0,17
5200001	Río Alicahue en Colligüay	0,34	-0,41	-1,7.E-17	0,07
5410002	Río Aconcagüa en Chacabuquito	0,18	-0,16	4,2.E-16	0,03
5741001	Estero Puangué en Boquerón	0,31	-0,17	2,5.E-16	0,01
5721001	Estero Yerba Loca antes junta San Francisco	0,05	-0,31	-6,0.E-16	0,06
5710001	Río Maipo en El Manzano	0,08	-0,20	2,7.E-16	0,05
7103001	Río Claro en Los Queñes	0,45	-0,0002	3,0.E-16	0,23
7112001	Río Colorado en junta con Palos	-0,001	-0,35	2,7.E-16	0,25
7115001	Río Palos en junta con Colorado	0,08	-0,24	-1,2.E-16	0,20
7354002	Río Achibueno en La Recova	0,21	-0,26	-1,2.E-16	0,27
7358001	Río Putagan en Yervas Buenas	0,10	-0,24	4,4.E-16	0,08
7381001	Estero Los Puercos en puente Los Puercos	0,29	0,30	1,5.E-16	0,03

**Tabla A - 4:** resumen de valores A, B, C y R2 ajustado considerando meses de Verano para caudal y temperatura con precipitación del año entero o meses de Invierno

Código	Estación	A	B	C	R2 aj
1310002	Río San José en Ausipar	-	-	-	-
1050004	Río Collagüa en Peñablanca	-	-	-	-
2101001	Río Loa antes represa Lequena	-	-	-	-
3414001	Río Pulido en vertedero	0,88	-0,04	9,0.E-16	0,77
4313001	Río Cochigüaz en El Peñón	1,30	-0,14	1,2.E-16	0,90
4311001	Estero Derecho en Alcohüaz	1,49	-0,23	1,4.E-16	0,85
4503001	Río Hurtado en angostura de Pangué	2,07	-0,10	-6,9.E-16	0,79
4522002	Río Rapel en Junta	2,61	-0,15	1,3.E-15	0,76
4513001	Río Grande en Cuyano	1,73	-0,08	-2,4.E-16	0,90
4531002	Río Cogotí entrada Embalse Cogotí	2,36	-0,01	-9,9.E-17	0,71
4712001	Río Chalinga en La Palmilla	1,48	-0,11	6,3.E-16	0,88
4703002	Río Choapa en Cuncumen	1,38	0,01	7,7.E-16	0,93
5101001	Río Pedernal en Tejada	2,26	-0,28	1,6.E-01	0,81
5100001	Río Sobrante en Piadero	1,89	0,11	-1,1.E-02	0,85
5200001	Río Alicahue en Colligüay	1,56	-0,2	-1,3.E-17	0,84
5410002	Río Aconcagüa en Chacabuquito	0,95	0,07	1,6.E-17	0,89
5741001	Estero Puangué en Boquerón	1,77	-0,03	-6,7.E-16	0,55
5721001	Estero Yerba Loca antes junta San Francisco	0,87	-0,07	1,3.E-16	0,80
5710001	Río Maipo en El Manzano	0,84	0,06	-3,9.E-16	0,78
7103001	Río Claro en Los Queñes	0,95	0,01	1,9.E-16	0,43
7112001	Río Colorado en junta con Palos	0,60	-0,20	4,1.E-17	0,53
7115001	Río Palos en junta con Colorado	0,72	-0,12	-1,5.E-18	0,65
7354002	Río Achibueno en La Recova	0,41	-0,36	-1,5.E-16	0,46
7358001	Río Putagan en Yervas Buenas	0,26	-0,25	4,3.E-16	0,10
7381001	Estero Los Puercos en puente Los Puercos	0,40	0,10	7,0.E-17	-0,02

**Tabla A - 5:** Promedio, desviación estándar, máximo y mínimo de valores del coeficiente de correlación R<sup>2</sup> ajustado y número de cuencas.

Temporada	Año entero	Invierno	Verano	Verano modificado
Promedio	0,66	0,45	0,11	0,69
Desviación estándar	0,22	0,30	0,144	0,26
Máximo	0,90	0,85	0,47	0,93
Mínimo	0,06	-0,01	-0,05	-0,02
n	25	25	25	22

**Tabla A - 6:** Promedio, desviación estándar, máximo y mínimo de valores del coeficiente de correlación R<sup>2</sup> ajustado y número de cuencas para año entero para distintos regímenes de cuencas.

Régimen	Pluvial P verano	Nival	Nivo pluvial	Pluvio nival	Pluvial P invierno
Promedio	0,26	0,71	0,82	0,51	0,75
Desviación estándar	0,18	0,14	0,07	0,20	-
Máximo	0,39	0,90	0,90	0,69	-
Mínimo	0,06	0,48	0,71	0,23	-
n	3	11	6	4	1

**Tabla A - 7:** Promedio, desviación estándar, máximo y mínimo de valores del coeficiente de correlación  $R^2$  ajustado y número de cuencas para temporada de Invierno para distintos regímenes de cuencas.

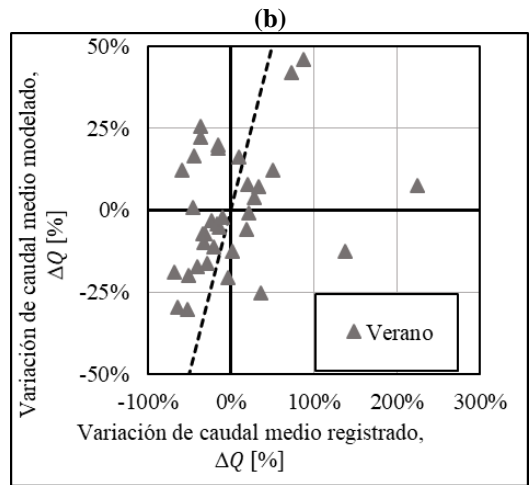
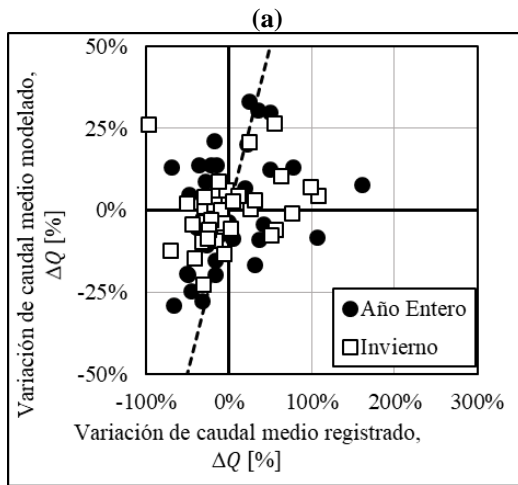
<b>Régimen</b>	<b>Pluvial Pp verano</b>	<b>Nival</b>	<b>Nivo pluvial</b>	<b>Pluvio nival</b>	<b>Pluvial P invierno</b>
Promedio	-0,02	0,35	0,61	0,62	0,72
Desviación estándar	0,04	0,25	0,20	0,28	-
Máximo	0,01	0,68	0,83	0,85	-
Mínimo	-0,07	0,03	0,36	0,17	-
n	3	11	6	4	1

**Tabla A - 8:** Promedio, desviación estándar, máximo y mínimo de valores del coeficiente de correlación  $R^2$  ajustado y número de cuencas para temporada de Verano para distintos regímenes de cuencas.

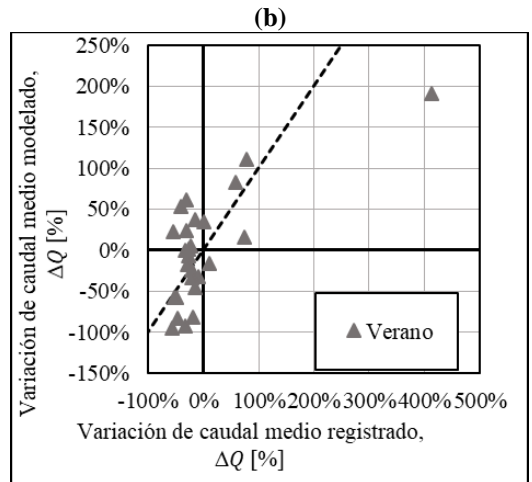
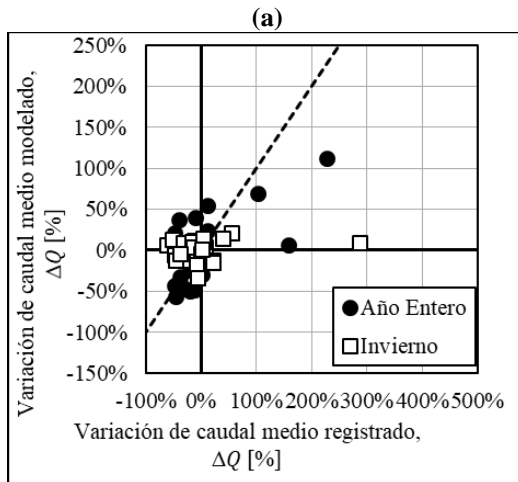
<b>Régimen</b>	<b>Pluvial Pp verano</b>	<b>Nival</b>	<b>Nivo pluvial</b>	<b>Pluvio nival</b>	<b>Pluvial P invierno</b>
Promedio	0,34	0,01	0,07	0,12	0,01
Desviación estándar	0,26	0,10	0,07	0,12	-
Máximo	0,50	0,25	0,17	0,27	-
Mínimo	0,04	-0,05	-0,03	0,01	-
n	3	11	6	4	1

**Tabla A - 9:** Promedio, desviación estándar, máximo y mínimo de valores del coeficiente de correlación  $R^2$  ajustado y número de cuencas para temporada de Verano modificado para distintos regímenes de cuencas.

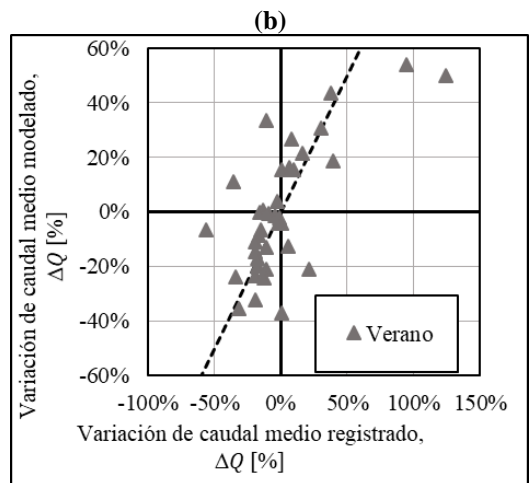
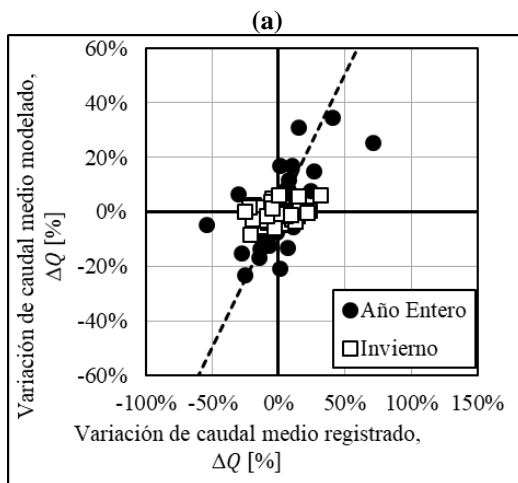
<b>Régimen</b>	<b>Pluvial Pp verano</b>	<b>Nival</b>	<b>Nivo pluvial</b>	<b>Pluvio nival</b>	<b>Pluvial P invierno</b>
Promedio	-	0,84	0,83	0,30	0,55
Desviación estándar	-	0,12	0,07	0,25	-
Máximo	-	0,90	0,93	0,55	-
Mínimo	-	0,53	0,71	-0,02	-
n	-	11	6	4	1



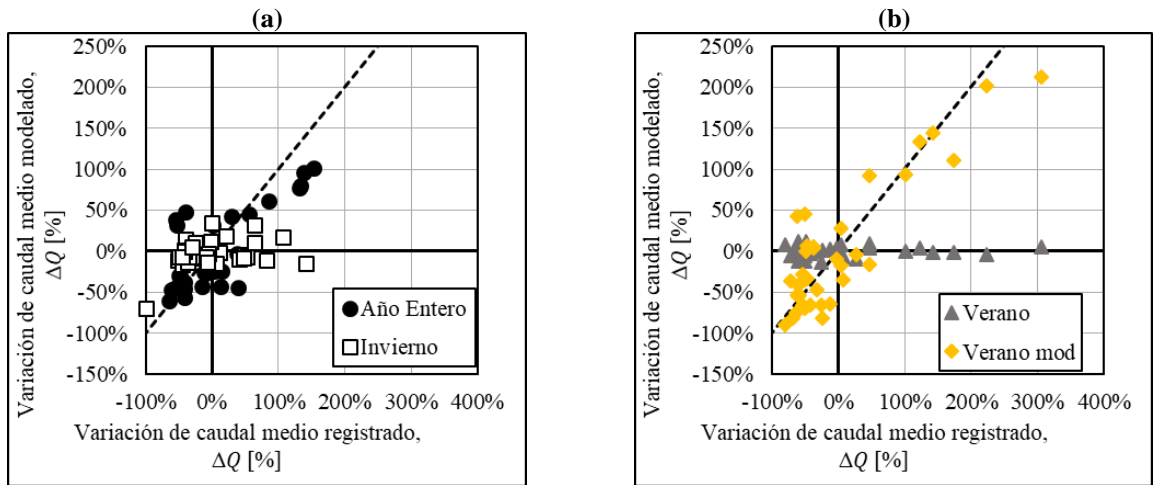
**Figura A - 25:** variaciones de caudal medio [%] para: año completo y temporada de invierno (a) y temporada de verano (b). Cuenca 1050004.



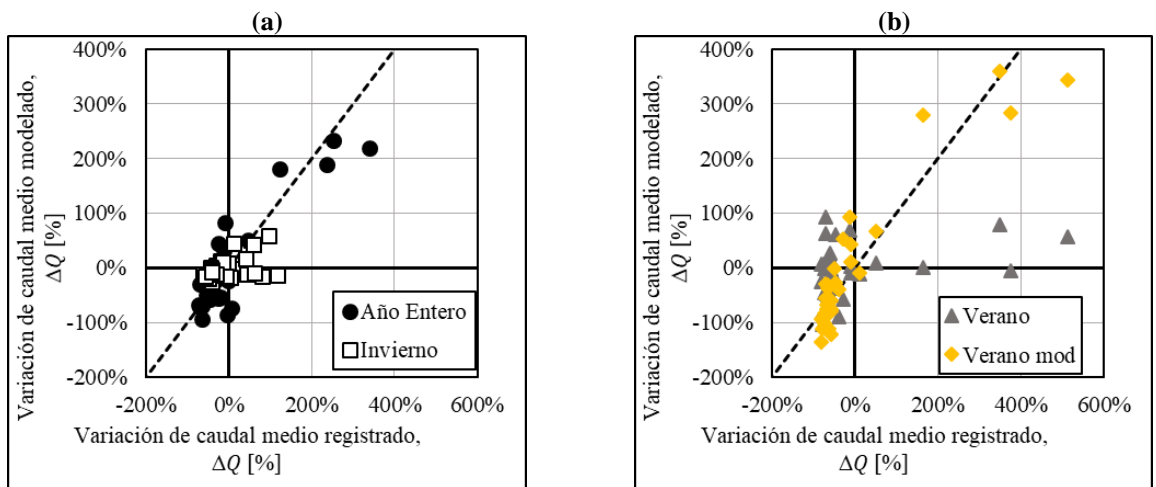
**Figura A - 26:** variaciones de caudal medio [%] para: año completo y temporada de invierno (a) y temporada de verano (b). Cuenca 1310002.



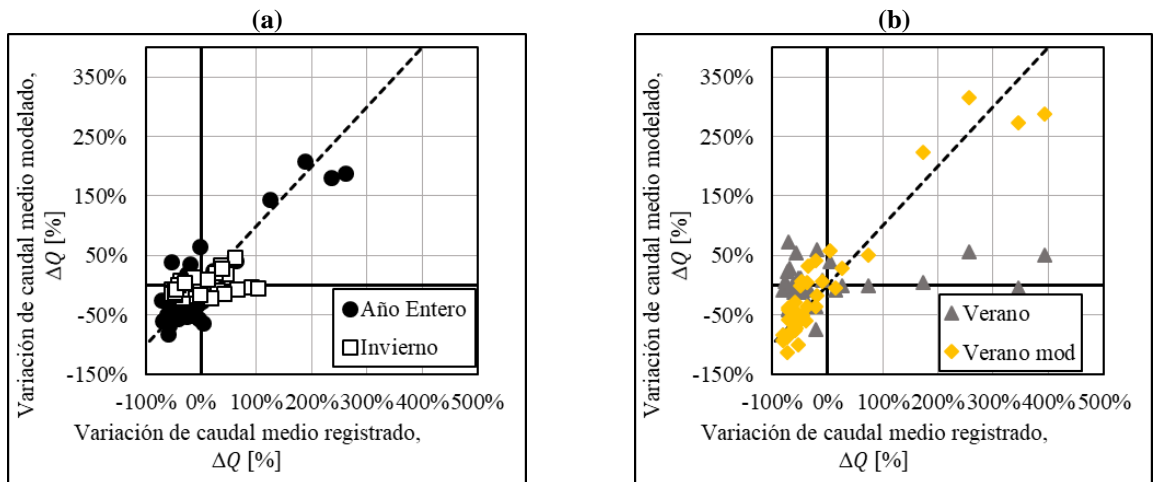
**Figura A - 27:** variaciones de caudal medio [%] para: año completo y temporada de invierno (a) y temporada de verano (b). Cuenca 2101001.



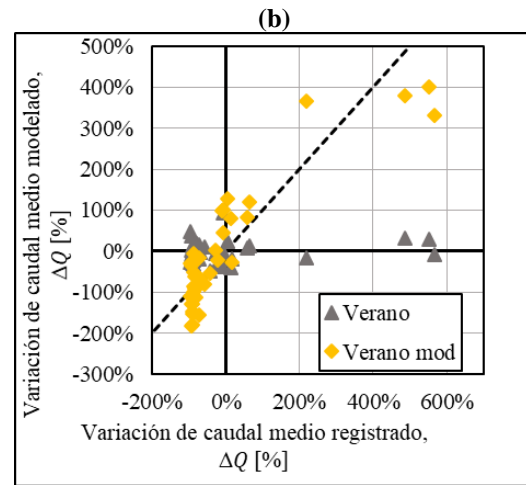
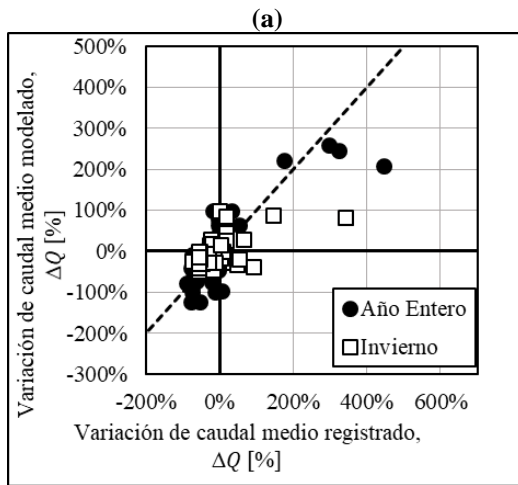
**Figura A - 28:** variaciones de caudal medio [%] para: año completo con temporada de invierno (a) y temporada de verano con temporada de verano con precipitación de año entero o de invierno (b). Cuenca 3414001.



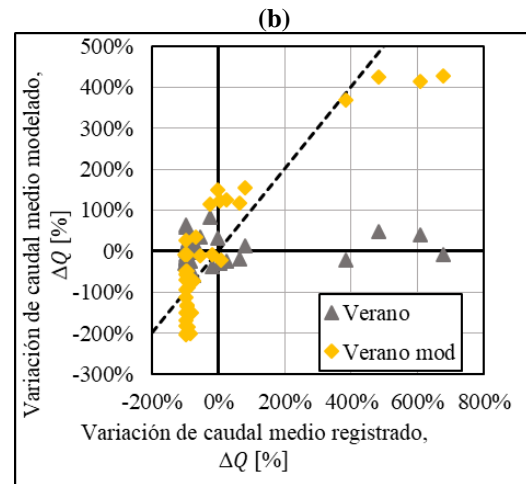
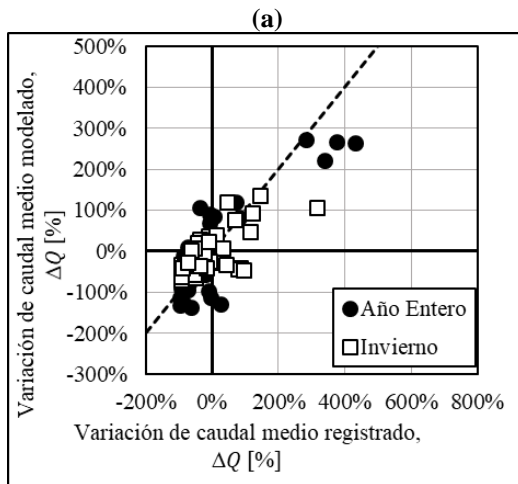
**Figura A - 29:** variaciones de caudal medio [%] para: año completo con temporada de invierno (a) y temporada de verano con temporada de verano con precipitación de año entero o de invierno (b). Cuenca 4311001.



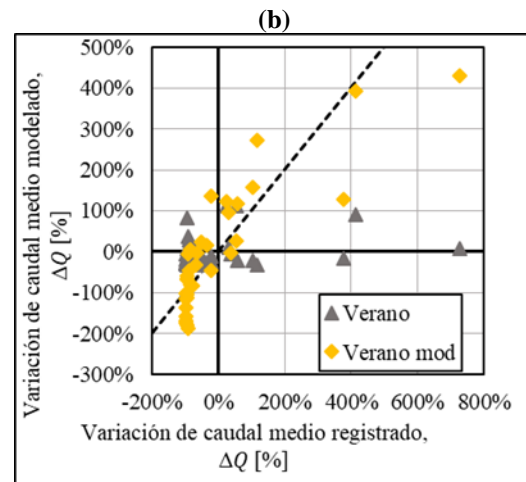
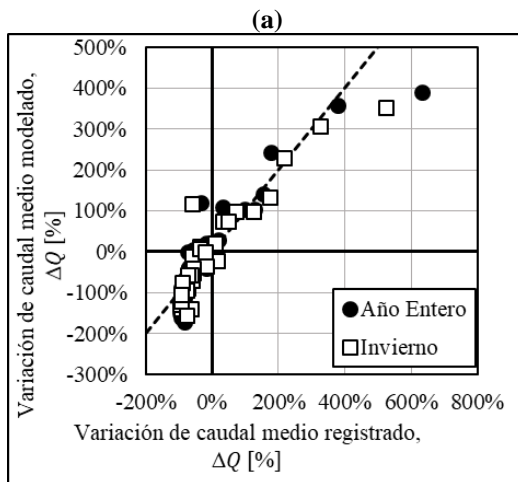
**Figura A - 30:** variaciones de caudal medio [%] para: año completo con temporada de invierno (a) y temporada de verano con temporada de verano con precipitación de año entero o de invierno (b). Cuenca 43130011.



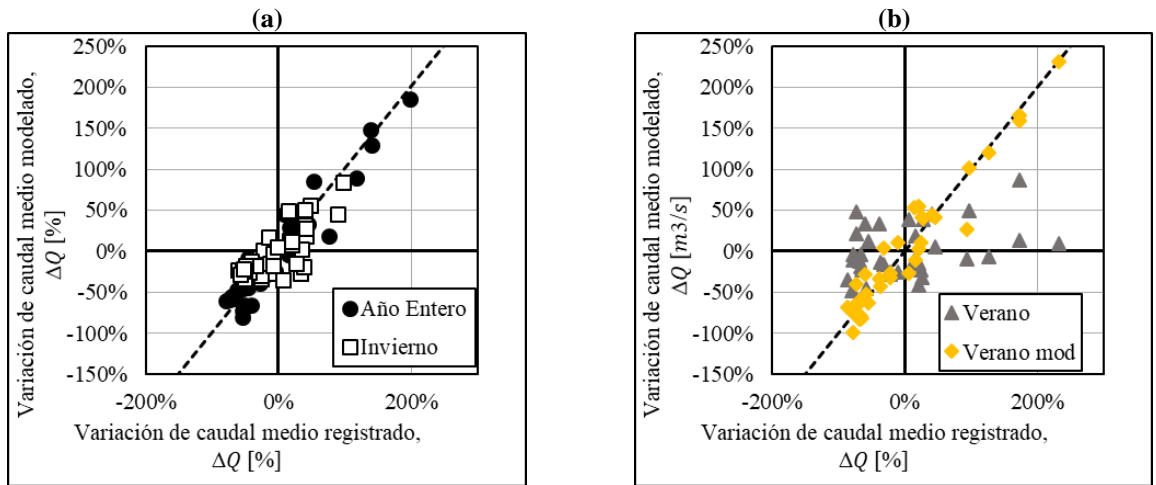
**Figura A - 31:** variaciones de caudal medio [%] para: año completo con temporada de invierno (a) y temporada de verano con temporada de verano con precipitación de año entero o de invierno (b). Cuenca 4503001.



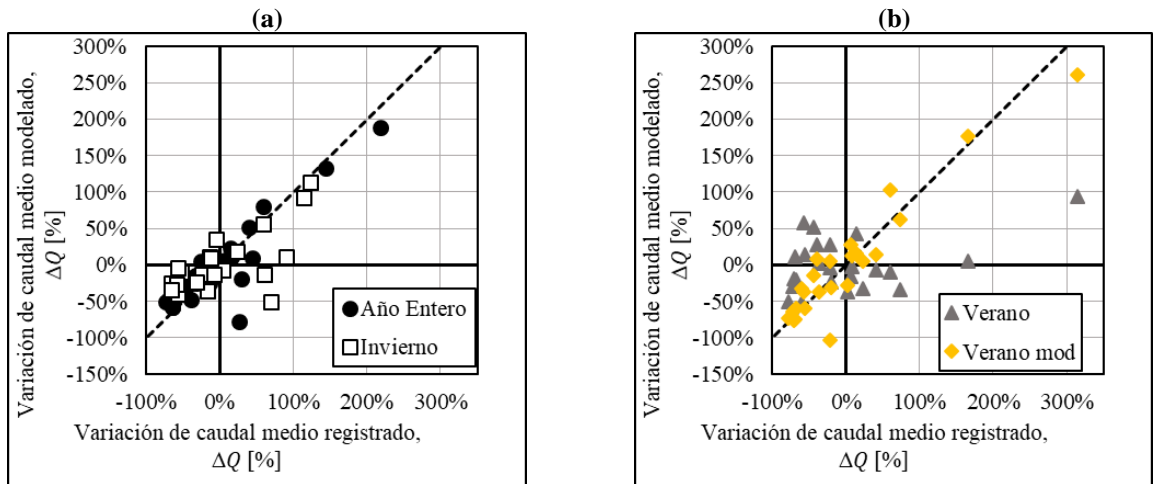
**Figura A - 32:** variaciones de caudal medio [%] para: año completo con temporada de invierno (a) y temporada de verano con temporada de verano con precipitación de año entero o de invierno (b). Cuenca 45220021.



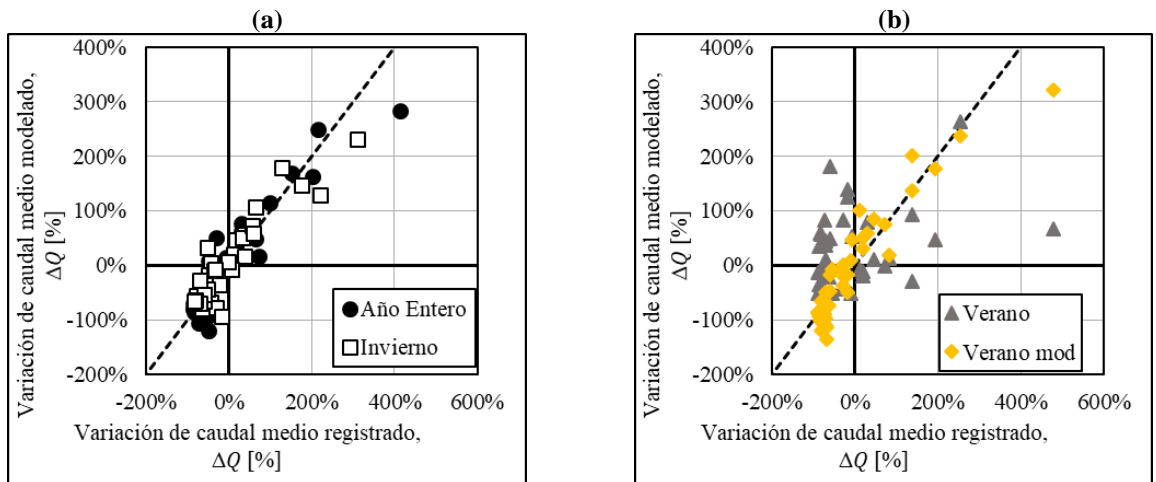
**Figura A - 33:** variaciones de caudal medio [%] para: año completo con temporada de invierno (a) y temporada de verano con temporada de verano con precipitación de año entero o de invierno (b). Cuenca 4531002.



**Figura A - 34:** variaciones de caudal medio [%] para: año completo con temporada de invierno (a) y temporada de verano con temporada de verano con precipitación de año entero o de invierno (b). Cuenca 4703002.

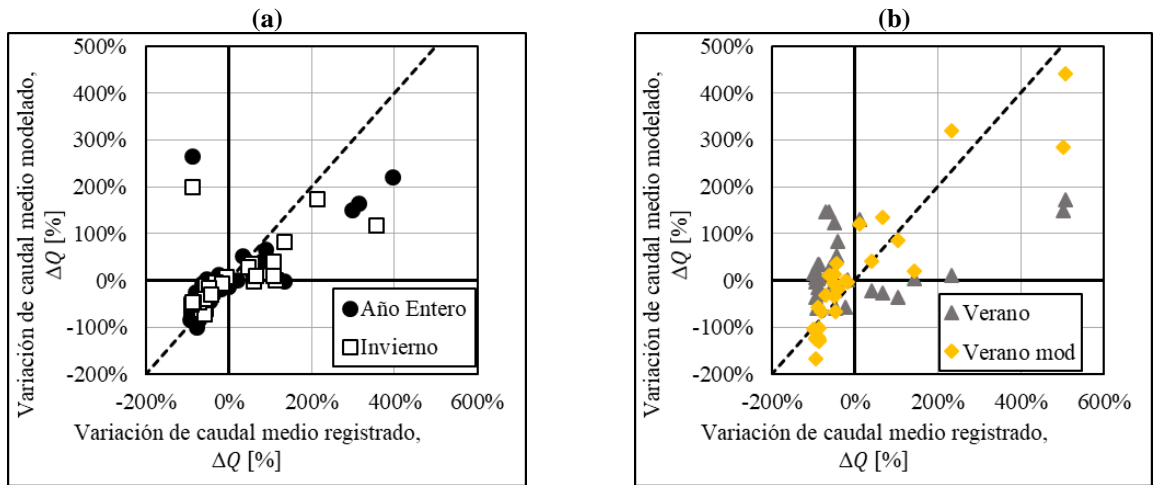


**Figura A - 35:** variaciones de caudal medio [%] para: año completo con temporada de invierno (a) y temporada de verano con temporada de verano con precipitación de año entero o de invierno (b). Cuenca 4712001.

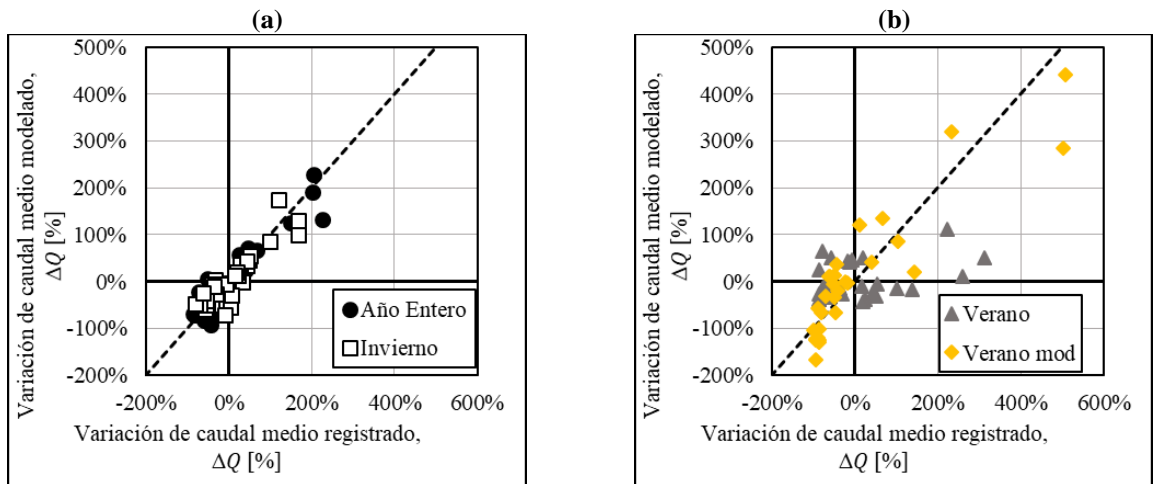


**Figura A - 36:** variaciones de caudal medio [%] para: año completo con temporada de invierno (a) y temporada de verano con temporada de verano con precipitación de año entero o de invierno (b). Cuenca 5100001.

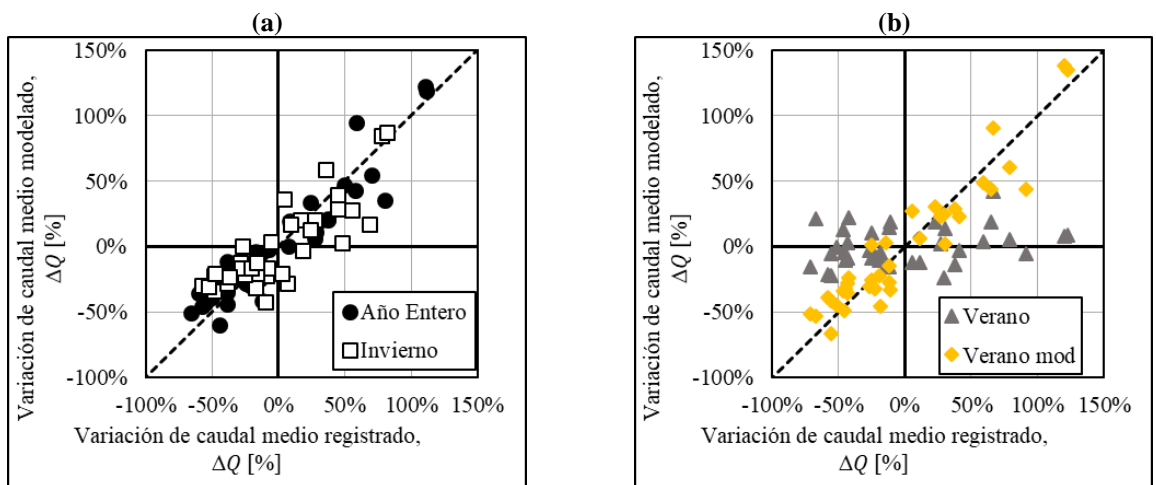




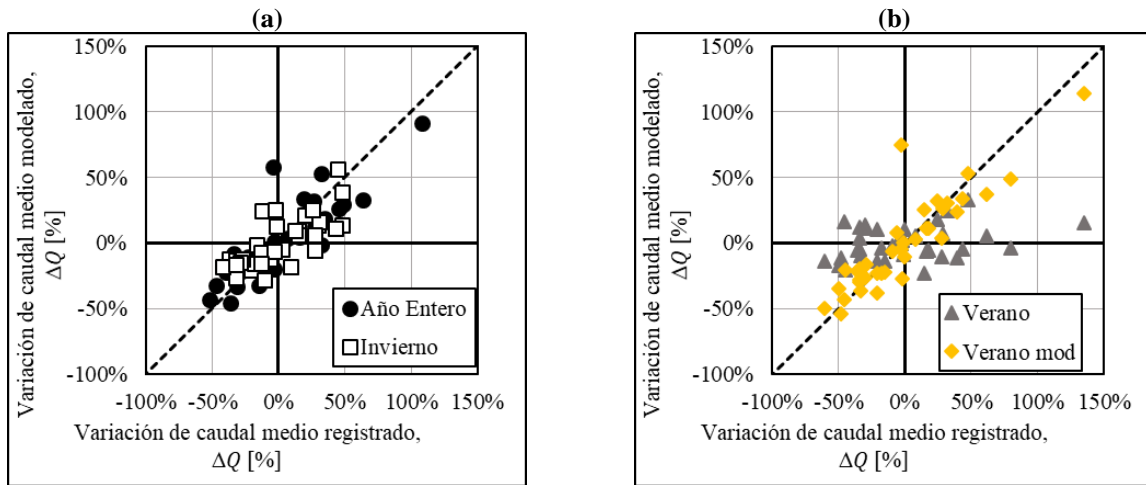
**Figura A - 37:** variaciones de caudal medio [%] para: año completo con temporada de invierno (a) y temporada de verano con temporada de verano con precipitación de año entero o de invierno (b). Cuenca 51010011.



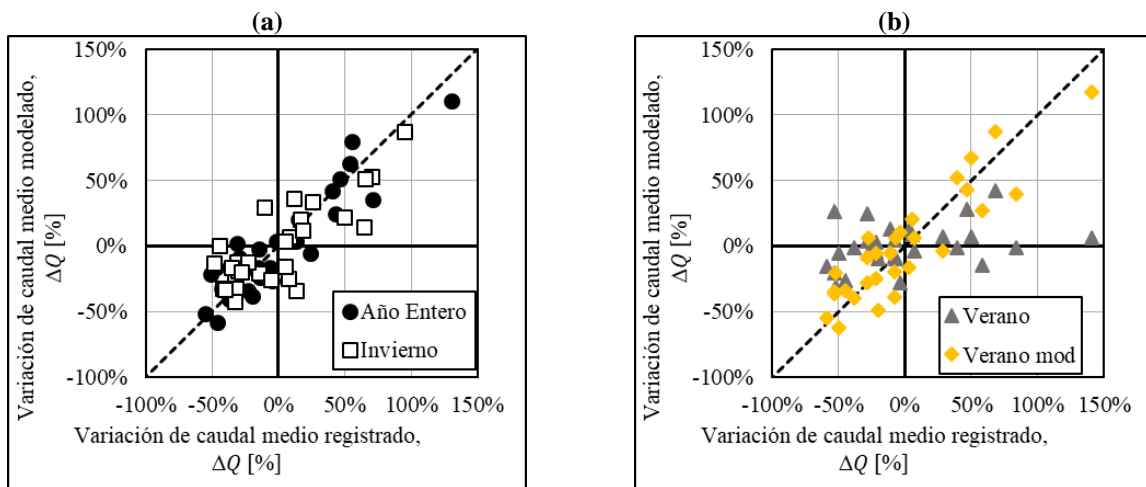
**Figura A - 38:** variaciones de caudal medio [%] para: año completo con temporada de invierno (a) y temporada de verano con temporada de verano con precipitación de año entero o de invierno (b). Cuenca 5200001.



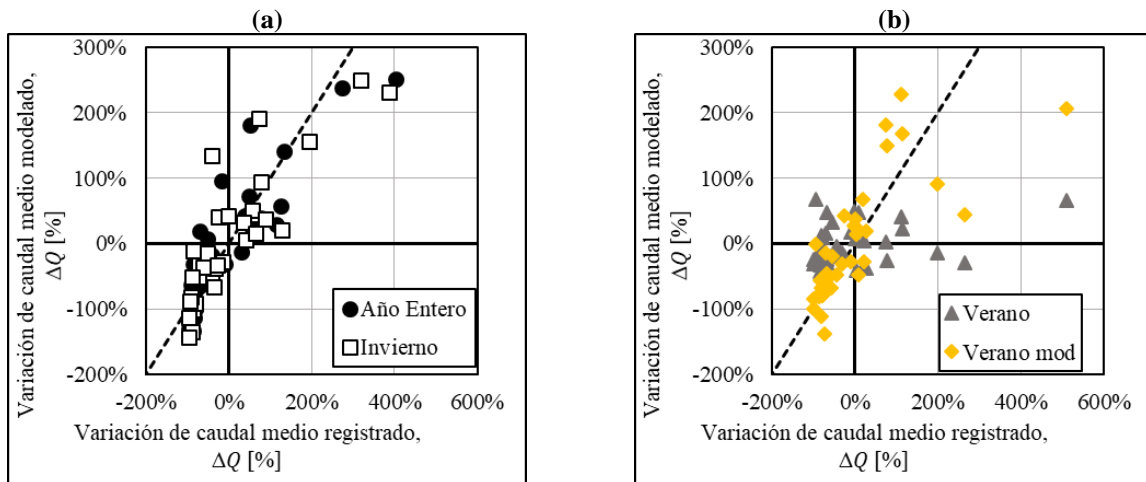
**Figura A - 39:** variaciones de caudal medio [%] para: año completo con temporada de invierno (a) y temporada de verano con temporada de verano con precipitación de año entero o de invierno (b). Cuenca 5410002.



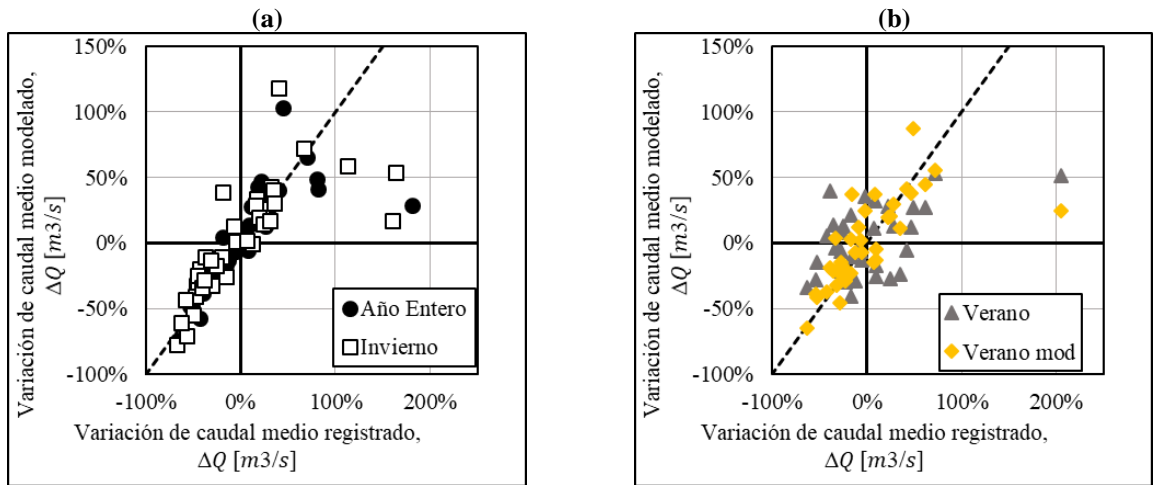
**Figura A - 40:** variaciones de caudal medio [%] para: año completo con temporada de invierno (a) y temporada de verano con temporada de verano con precipitación de año entero o de invierno (b). Cuenca 5710001.



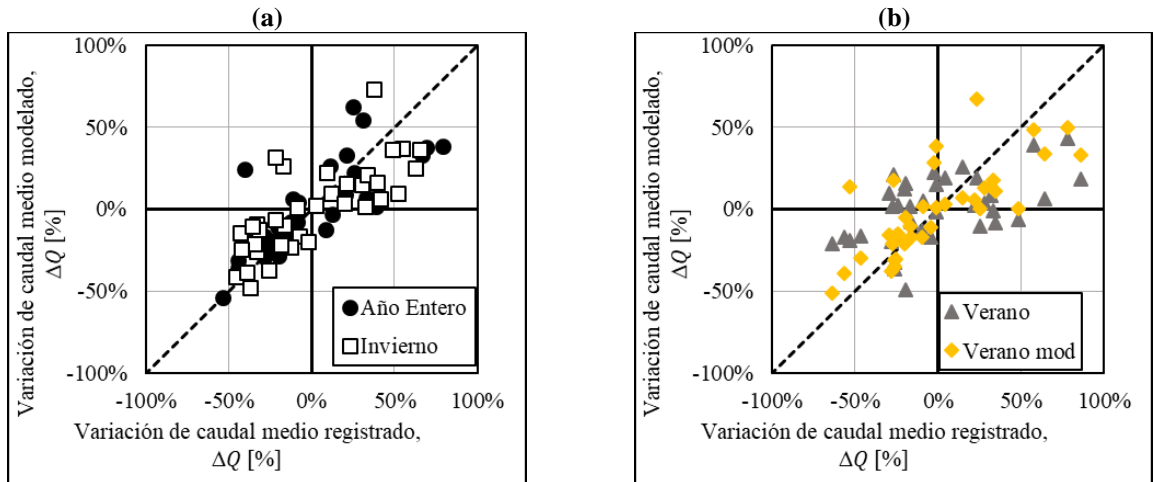
**Figura A - 41:** variaciones de caudal medio [%] para: año completo con temporada de invierno (a) y temporada de verano con temporada de verano con precipitación de año entero o de invierno (b). Cuenca 5721001.



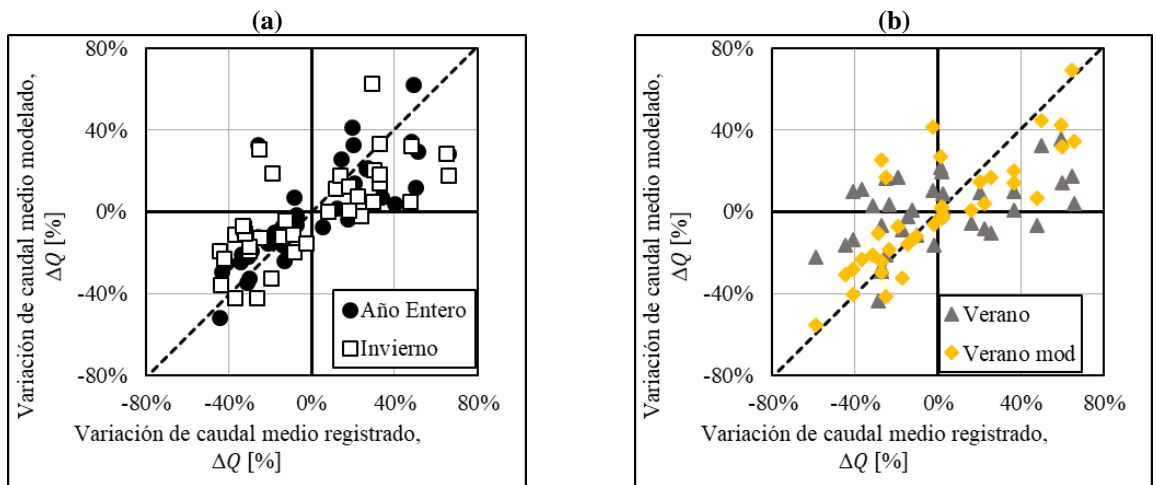
**Figura A - 42:** variaciones de caudal medio [%] para: año completo con temporada de invierno (a) y temporada de verano con temporada de verano con precipitación de año entero o de invierno (b). Cuenca 57410011.



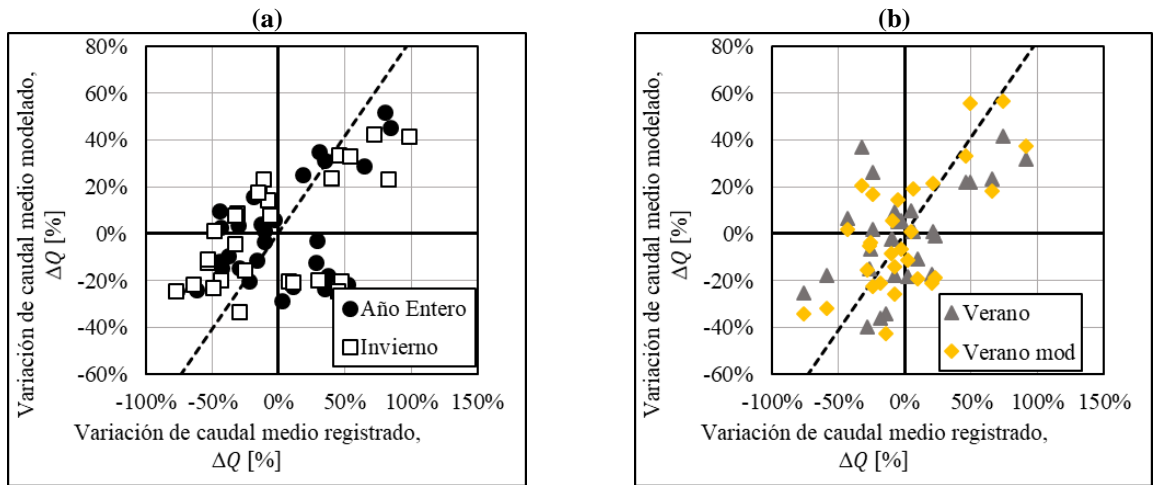
**Figura A - 43:** variaciones de caudal medio [%] para: año completo con temporada de invierno (a) y temporada de verano con temporada de verano con precipitación de año entero o de invierno (b). Cuenca 7103001.



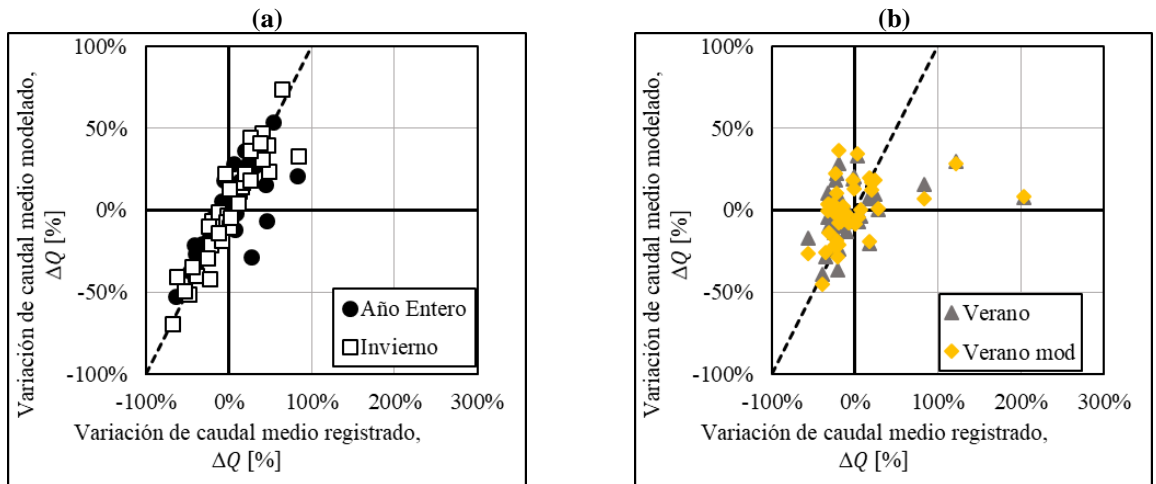
**Figura A - 44:** variaciones de caudal medio [%] para: año completo con temporada de invierno (a) y temporada de verano con temporada de verano con precipitación de año entero o de invierno (b). Cuenca 7112001.



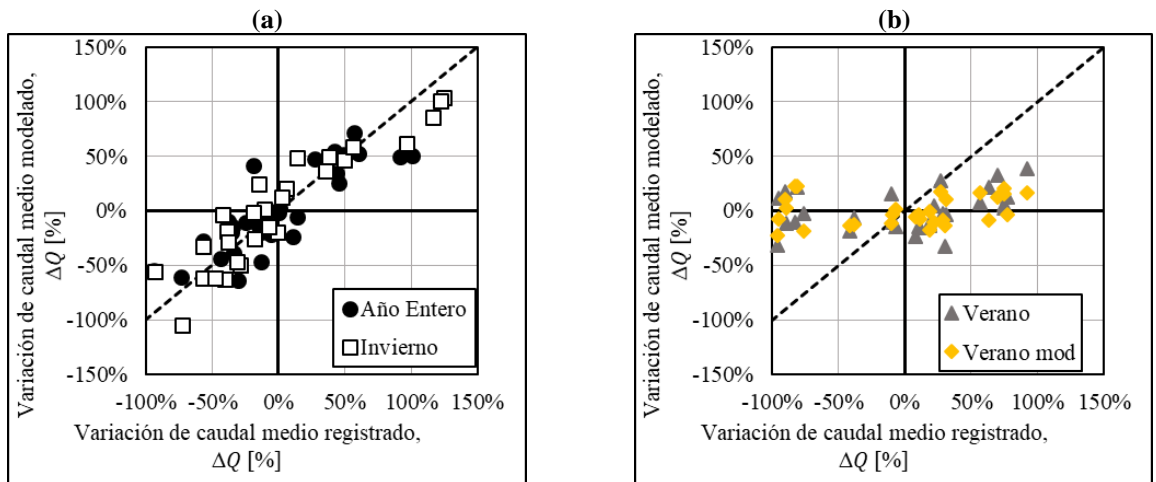
**Figura A - 45:** variaciones de caudal medio [%] para: año completo con temporada de invierno (a) y temporada de verano con temporada de verano con precipitación de año entero o de invierno (b). Cuenca 7115001.



**Figura A - 46:** variaciones de caudal medio [%] para: año completo con temporada de invierno (a) y temporada de verano con temporada de verano con precipitación de año entero o de invierno (b). Cuenca 7354002.



**Figura A - 47:** variaciones de caudal medio [%] para: año completo con temporada de invierno (a) y temporada de verano con temporada de verano con precipitación de año entero o de invierno (b). Cuenca 7358001.



**Figura A - 48:** variaciones de caudal medio [%] para: año completo con temporada de invierno (a) y temporada de verano con temporada de verano con precipitación de año entero o de invierno (b). Cuenca 7381001.

**Tabla A - 10:** resumen de R2 obtenidas de la validación cruzada para año entero.

<b>Cuenca</b>	<b>Regimen</b>	<b>Año Entero</b>	<b>Año Humedo</b>	<b>Año Seco</b>
1050004	Pluvial V	0,08	0,07	0,08
1310002	Pluvial V	0,02	0,03	0,02
2101001	Pluvial V	0,10	0,07	0,07
3414001	Nival	0,00	0,63	0,06
4311001	Nival	0,02	0,46	0,23
4313001	Nival	0,03	0,72	0,03
4503001	Nival	0,11	0,38	0,11
4513001	Nivopluvial	0,61	0,89	0,59
4522002	Nivopluvial	0,04	0,65	0,38
4531002	Nivopluvial	0,27	0,69	0,06
4703002	Nival	0,49	0,83	0,01
4712001	Nivopluvial	0,54	0,70	0,47
5100001	Nivopluvial	0,30	0,73	0,04
5101001	Nival	0,24	0,77	0,03
5200001	Nivopluvial	0,16	0,74	0,00
5410002	Nival	0,46	0,73	0,18
5710001	Nival	0,14	0,53	0,43
5721001	Nival	0,43	0,58	0,24
5741001	Pluvial Inv	0,16	0,48	0,09
7103001	Pluvionival	0,61	0,01	0,71
7112001	Nival	0,15	0,00	0,05
7115001	Nival	0,19	0,02	0,28
7354002	Pluvionival	0,13	0,15	0,40
7358001	Pluvionival	0,19	0,00	0,86

**Tabla A - 11:** resumen de R2 obtenidas de la validación cruzada para meses de invierno.

<b>Cuenca</b>	<b>Regimen</b>	<b>Año Entero</b>	<b>Año Humedo</b>	<b>Año Seco</b>
1050004	Pluvial V	0,00	0,09	0,62
1310002	Pluvial V	0,02	0,03	0,34
2101001	Pluvial V	0,24	0,20	0,32
3414001	Nival	0,41	0,38	0,00
4311001	Nival	0,39	0,01	0,08
4313001	Nival	0,16	0,51	0,04
4503001	Nival	0,22	0,29	0,01
4513001	Nivopluvial	0,07	0,85	0,32
4522002	Nivopluvial	0,15	0,04	0,46
4531002	Nivopluvial	0,06	0,84	0,15
4703002	Nival	0,00	0,36	0,11
4712001	Nivopluvial	0,02	0,12	0,09
5100001	Nivopluvial	0,01	0,69	0,11

Continuación Tabla A - 11.

5101001	Nival	0,52	0,39	0,13
5200001	Nivopluvial	0,05	0,59	0,00
5410002	Nival	0,11	0,37	0,00
5710001	Nival	0,50	0,00	0,00
5721001	Nival	0,66	0,43	0,21
5741001	Pluvial Inv	0,01	0,52	0,18
7103001	Pluvionival	0,62	0,01	0,69
7112001	Nival	0,42	0,04	0,10
7115001	Nival	0,31	0,00	0,04
7354002	Pluvionival	0,06	0,01	0,27
7358001	Pluvionival	0,72	0,53	0,79

Tabla A - 12: resumen de R2 obtenidas de la validación cruzada para meses de verano.

Cuenca	Regimen	Año Entero	Año Humedo	Año Seco
1050004	Pluvial V	0,16	0,00	0,01
1310002	Pluvial V	0,01	0,00	0,28
2101001	Pluvial V	0,10	0,40	0,07
3414001	Nival	0,04	0,46	0,02
4311001	Nival	0,03	0,03	0,06
4313001	Nival	0,01	0,02	0,06
4503001	Nival	0,00	0,53	0,15
4513001	Nivopluvial	0,19	0,07	0,08
4522002	Nivopluvial	0,00	0,01	0,40
4531002	Nivopluvial	0,12	0,02	0,02
4703002	Nival	0,13	0,00	0,05
4712001	Nivopluvial	0,22	0,12	0,25
5100001	Nivopluvial	0,00	0,09	0,05
5101001	Nival	0,00	0,08	0,01
5200001	Nivopluvial	0,20	0,18	0,00
5410002	Nival	0,07	0,01	0,03
5710001	Nival	0,47	0,04	0,32
5721001	Nival	0,04	0,02	0,11
5741001	Pluvial Inv	0,05	0,12	0,02
7103001	Pluvionival	0,02	0,04	0,00
7112001	Nival	0,06	0,01	0,02
7115001	Nival	0,08	0,04	0,00
7354002	Pluvionival	0,02	0,47	0,02
7358001	Pluvionival	0,00	0,03	0,12

**Tabla A - 13:** resumen de R2 obtenidas de la validación cruzada para meses de verano con precipitación de invierno o del año entero.

<b>Cuenca</b>	<b>Regimen</b>	<b>Año Entero</b>	<b>Año Humedo</b>	<b>Año Seco</b>
1050004	Pluvial V	-	-	-
1310002	Pluvial V	-	-	-
2101001	Pluvial V	-	-	-
3414001	Nival	0,17	0,77	0,21
4311001	Nival	0,57	0,41	0,68
4313001	Nival	0,55	0,65	0,51
4503001	Nival	0,62	0,50	0,29
4513001	Nivopluvial	0,83	0,80	0,56
4522002	Nivopluvial	0,52	0,77	0,00
4531002	Nivopluvial	0,25	0,41	0,04
4703002	Nival	0,48	0,88	0,12
4712001	Nivopluvial	0,43	0,78	0,78
5100001	Nivopluvial	0,51	0,70	0,02
5101001	Nival	0,56	0,64	0,86
5200001	Nivopluvial	0,52	0,61	0,00
5410002	Nival	0,37	0,76	0,34
5710001	Nival	0,16	0,80	0,43
5721001	Nival	0,24	0,50	0,47
5741001	Pluvial Inv	0,65	0,13	0,00
7103001	Pluvionival	0,00	0,02	0,56
7112001	Nival	0,06	0,01	0,02
7115001	Nival	0,02	0,13	0,25
7354002	Pluvionival	0,02	0,41	0,06
7358001	Pluvionival	0,01	0,10	0,14

**Tabla A - 14:** Promedio, desviación estándar, máximo y mínimo de valores del coeficiente de correlación  $R^2$  de validación cruzada.

<b>Período</b>	<b>Año entero</b>			<b>Invierno</b>		
<b>Año</b>	<b>Normal</b>	<b>Humedo</b>	<b>Seco</b>	<b>Normal</b>	<b>Humedo</b>	<b>Seco</b>
Promedio	0,22	0,43	0,22	0,25	0,33	0,21
Desviación estándar	0,19	0,32	0,24	0,24	0,29	0,22
Máximo	0,61	0,89	0,86	0,72	0,89	0,79
Mínimo	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
n	25	25	25	25	25	25
<b>Período</b>	<b>Verano</b>			<b>Verano mod</b>		
<b>Año</b>	<b>Normal</b>	<b>Humedo</b>	<b>Seco</b>	<b>Normal</b>	<b>Humedo</b>	<b>Seco</b>
Promedio	0,08	0,11	0,09	0,36	0,53	0,32
Desviación estándar	0,11	0,16	0,11	0,25	0,29	0,28
Máximo	0,47	0,53	0,40	0,83	0,93	0,86
Mínimo	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00
n	25	25	25	22	22	22

**Tabla A - 15:** Promedio, desviación estándar, máximo y mínimo de valores del coeficiente de correlación  $R^2$  de validación cruzada para el año entero según régimen

<b>Régimen</b>	<b>Pluvial (P en verano)</b>			<b>Nival</b>		
<b>Año</b>	<b>Normal</b>	<b>Humedo</b>	<b>Seco</b>	<b>Normal</b>	<b>Humedo</b>	<b>Seco</b>
Promedio	0,07	0,06	0,06	0,20	0,51	0,15
Desviación estándar	0,04	0,02	0,03	0,18	0,28	0,13
Máximo	0,10	0,07	0,08	0,49	0,83	0,43
Mínimo	0,02	0,03	0,02	0,00	0,00	0,01
n	3	3	3	11	11	11
<b>Período</b>	<b>Nivo pluvial</b>			<b>Pluvio nival</b>		
<b>Año</b>	<b>Normal</b>	<b>Humedo</b>	<b>Seco</b>	<b>Normal</b>	<b>Humedo</b>	<b>Seco</b>
Promedio	0,32	0,73	0,26	0,24	0,04	0,53
Desviación estándar	0,22	0,08	0,25	0,25	0,07	0,31
Máximo	0,61	0,89	0,59	0,61	0,15	0,86
Mínimo	0,04	0,65	0,00	0,03	0,00	0,16
n	6	6	6	4	4	4
<b>Período</b>	<b>Pluvial (P en invierno)</b>					
<b>Año</b>	<b>Normal</b>	<b>Humedo</b>	<b>Seco</b>			
Promedio	0,16	0,48	0,09			
Desviación estándar	-	-	-			
Máximo	0,16	0,48	0,09			
Mínimo	0,16	0,48	0,09			
n	1	1	1			



*Tabla A - 16: Promedio, desviación estándar, máximo y mínimo de valores del coeficiente de correlación R<sup>2</sup> de validación cruzada para meses de invierno según régimen*

<b>Régimen</b>	<b>Pluvial (P en verano)</b>			<b>Nival</b>		
<b>Año</b>	<b>Normal</b>	<b>Humedo</b>	<b>Seco</b>	<b>Normal</b>	<b>Humedo</b>	<b>Seco</b>
Promedio	0,09	0,11	0,42	0,34	0,25	0,07
Desviación estándar	0,13	0,08	0,17	0,20	0,20	0,07
Máximo	0,24	0,20	0,62	0,66	0,51	0,21
Mínimo	0,00	0,03	0,32	0,00	0,00	0,00
n	3	3	3	11	11	11
<b>Período</b>	<b>Nivo pluvial</b>			<b>Pluvio nival</b>		
<b>Año</b>	<b>Normal</b>	<b>Humedo</b>	<b>Seco</b>	<b>Normal</b>	<b>Humedo</b>	<b>Seco</b>
Promedio	0,06	0,52	0,19	0,49	0,36	0,49
Desviación estándar	0,05	0,36	0,17	0,29	0,43	0,30
Máximo	0,15	0,85	0,46	0,72	0,89	0,79
Mínimo	0,01	0,04	0,00	0,06	0,01	0,19
n	6	6	6	4	4	4
<b>Período</b>	<b>Pluvial (P en invierno)</b>					
<b>Año</b>	<b>Normal</b>	<b>Humedo</b>	<b>Seco</b>			
Promedio	0,16	0,48	0,09			
Desviación estándar	-	-	-			
Máximo	0,16	0,48	0,09			
Mínimo	0,16	0,48	0,09			
n	1	1	1			

*Tabla A - 17: Promedio, desviación estándar, máximo y mínimo de valores del coeficiente de correlación R<sup>2</sup> de validación cruzada para meses de verano según régimen*

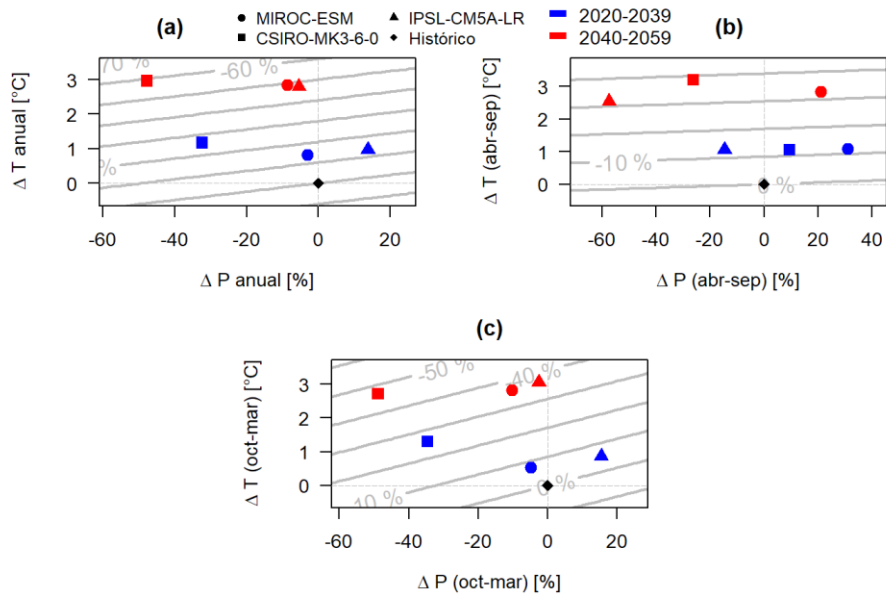
<b>Régimen</b>	<b>Pluvial (P en verano)</b>			<b>Nival</b>		
<b>Año</b>	<b>Normal</b>	<b>Humedo</b>	<b>Seco</b>	<b>Normal</b>	<b>Humedo</b>	<b>Seco</b>
Promedio	0,09	0,14	0,12	0,08	0,11	0,07
Desviación estándar	0,08	0,23	0,14	0,13	0,19	0,09
Máximo	0,16	0,40	0,28	0,47	0,53	0,32
Mínimo	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00
n	3	3	3	11	11	11
<b>Período</b>	<b>Nivo pluvial</b>			<b>Pluvio nival</b>		
<b>Año</b>	<b>Normal</b>	<b>Humedo</b>	<b>Seco</b>	<b>Normal</b>	<b>Humedo</b>	<b>Seco</b>
Promedio	0,12	0,08	0,13	0,02	0,14	0,06
Desviación estándar	0,10	0,07	0,16	0,01	0,22	0,06
Máximo	0,22	0,18	0,40	0,03	0,47	0,12
Mínimo	0,00	0,01	0,00	0,00	0,01	0,00
n	6	6	6	4	4	4

Continuación *Tabla A - 5* *Tabla A - 17.*

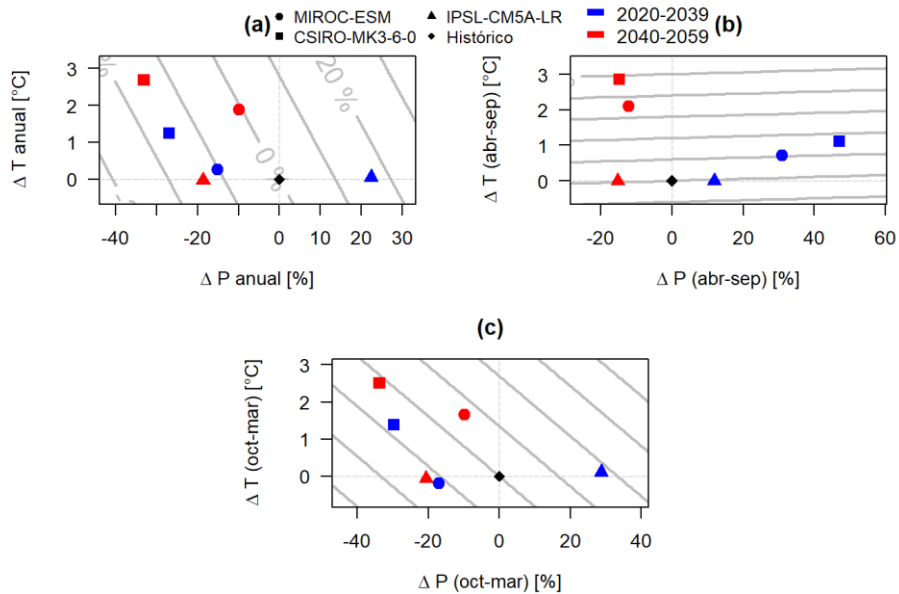
<b>Período</b>	<b>Pluvial (P en invierno)</b>					
<b>Año</b>	<b>Normal</b>	<b>Humedo</b>	<b>Año</b>			
Promedio	0,05	0,12	0,02			
Desviación estándar	-	-	-			
Máximo	0,05	0,12	0,02			
Mínimo	0,05	0,12	0,02			
n	1	1	1			

*Tabla A - 18: Promedio, desviación estándar, máximo y mínimo de valores del coeficiente de correlación  $R^2$  de validación cruzada para el año entero según régimen*

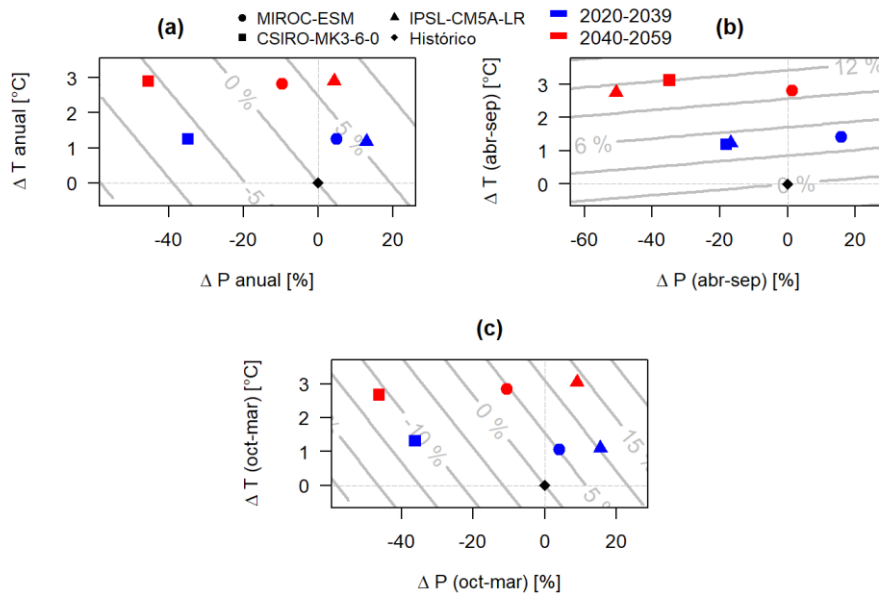
<b>Régimen</b>	<b>Nival</b>			<b>Nivo pluvial</b>		
<b>Año</b>	<b>Normal</b>	<b>Humedo</b>	<b>Seco</b>	<b>Normal</b>	<b>Humedo</b>	<b>Seco</b>
Promedio	0,35	0,55	0,38	0,51	0,68	0,23
Desviación estándar	0,22	0,28	0,24	0,19	0,15	0,35
Máximo	0,62	0,88	0,86	0,83	0,80	0,78
Mínimo	0,02	0,01	0,02	0,25	0,41	0,00
n	11	11	11	6	6	6
<b>Período</b>	<b>Pluvio nival</b>			<b>Pluvial (P en invierno)</b>		
<b>Año</b>	<b>Normal</b>	<b>Humedo</b>	<b>Seco</b>	<b>Normal</b>	<b>Humedo</b>	<b>Seco</b>
Promedio	0,12	0,36	0,37	0,65	0,13	0,00
Desviación estándar	0,21	0,41	0,31	-	-	-
Máximo	0,44	0,93	0,70	0,65	0,13	0,00
Mínimo	0,00	0,02	0,06	0,65	0,13	0,00
n	4	4	4	1	1	1



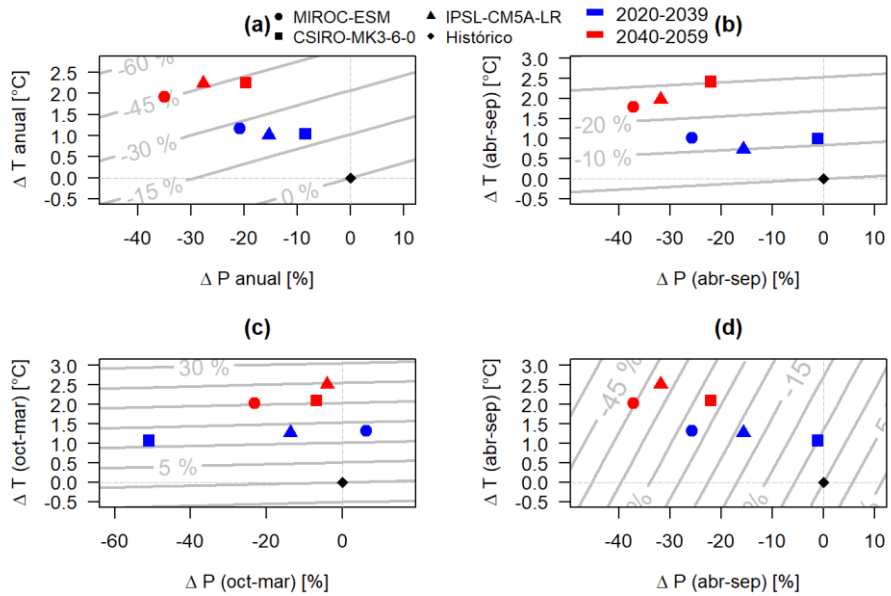
**Figura A - 49:** Variaciones de caudal medio [-] para: año completo (a), temporada de invierno (b), temporada de verano (c) y temporada de verano con precipitación de año entero o de invierno. Cuenca 1050004.



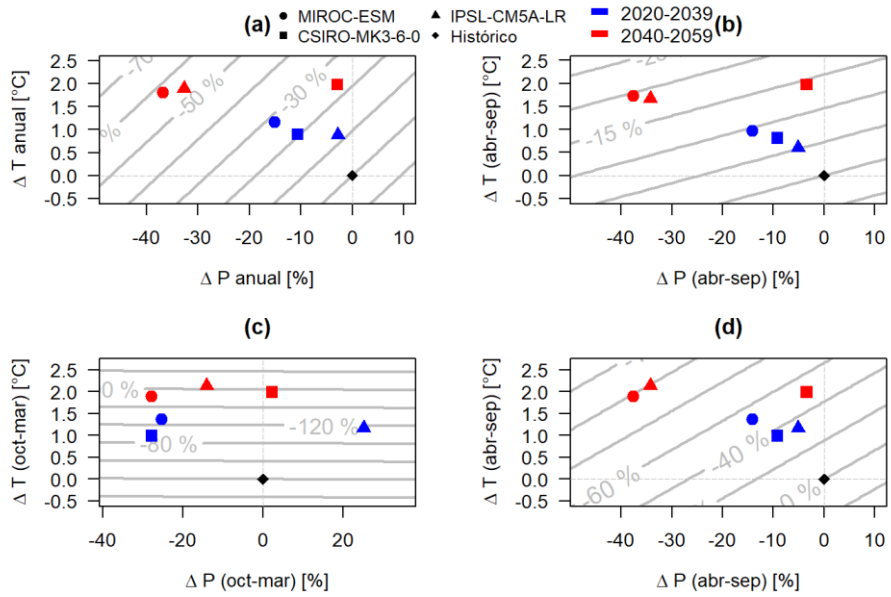
**Figura A - 50:** variaciones de caudal medio [-] para: año completo (a), temporada de invierno (b), temporada de verano (c) y temporada de verano con precipitación de año entero o de invierno. Cuenca 1310002



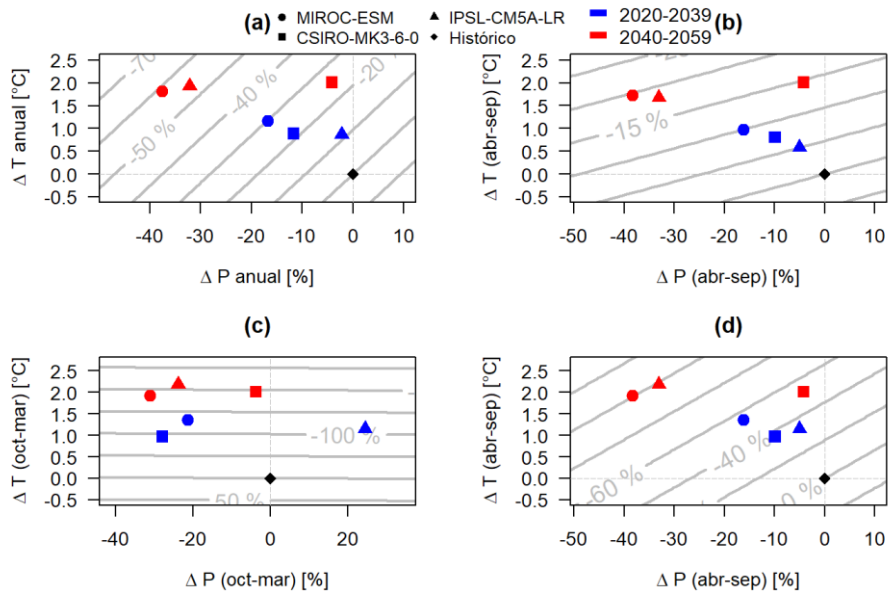
**Figura A - 51:** variaciones de caudal medio [-] para: año completo (a), temporada de invierno (b), temporada de verano (c) y temporada de verano con precipitación de año entero o de invierno. Cuenca 2101001



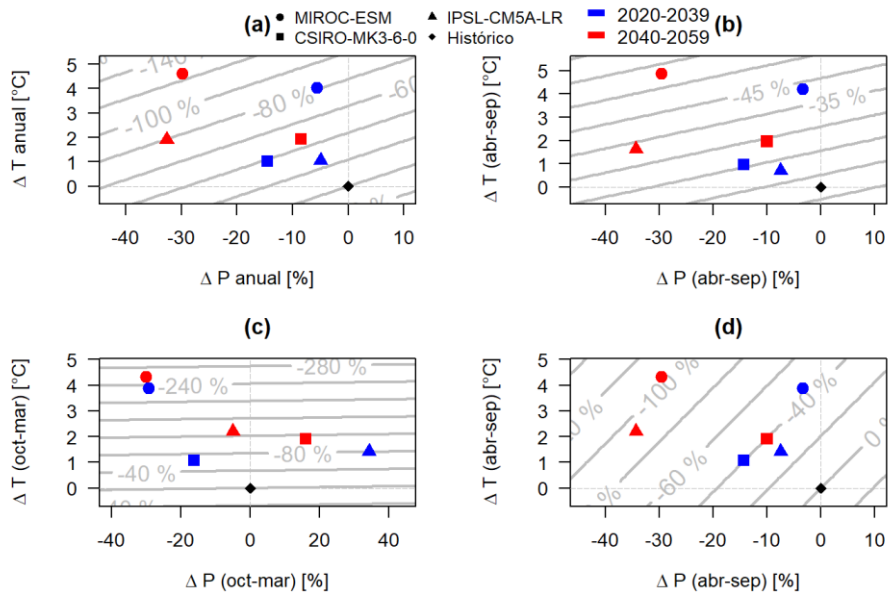
**Figura A - 52:** variaciones de caudal medio [-] para: año completo (a), temporada de invierno (b), temporada de verano (c) y temporada de verano con precipitación de año entero o de invierno. Cuenca 3414001



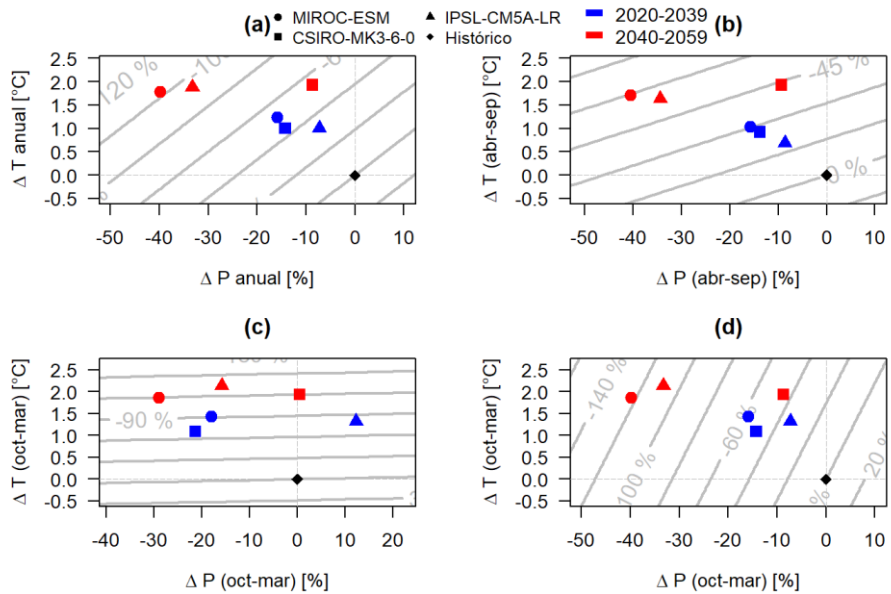
**Figura A - 53:** variaciones de caudal medio [-] para: año completo (a), temporada de invierno (b), temporada de verano (c) y temporada de verano con precipitación de año entero o de invierno. Cuenca 4311001



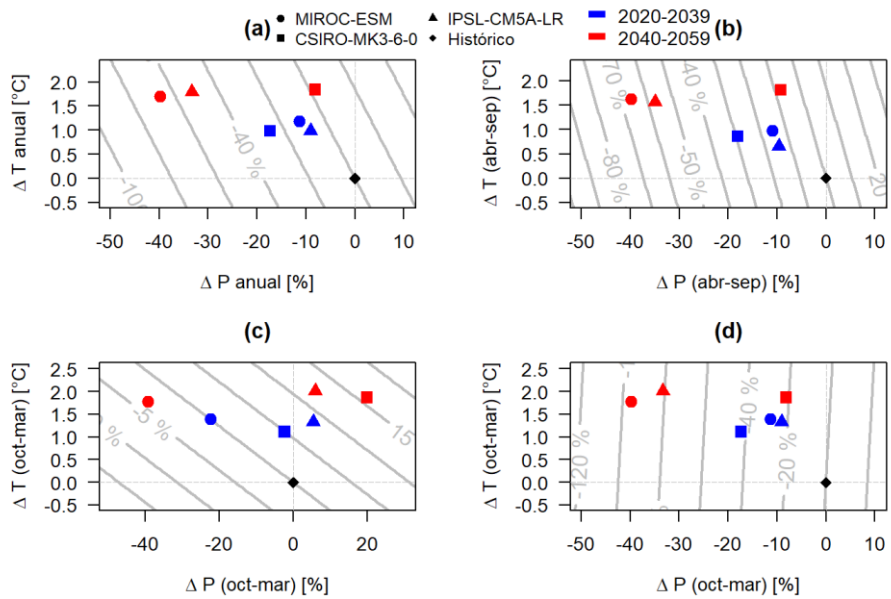
**Figura A - 54:** variaciones de caudal medio [-] para: año completo (a), temporada de invierno (b), temporada de verano (c) y temporada de verano con precipitación de año entero o de invierno. Cuenca 4313001



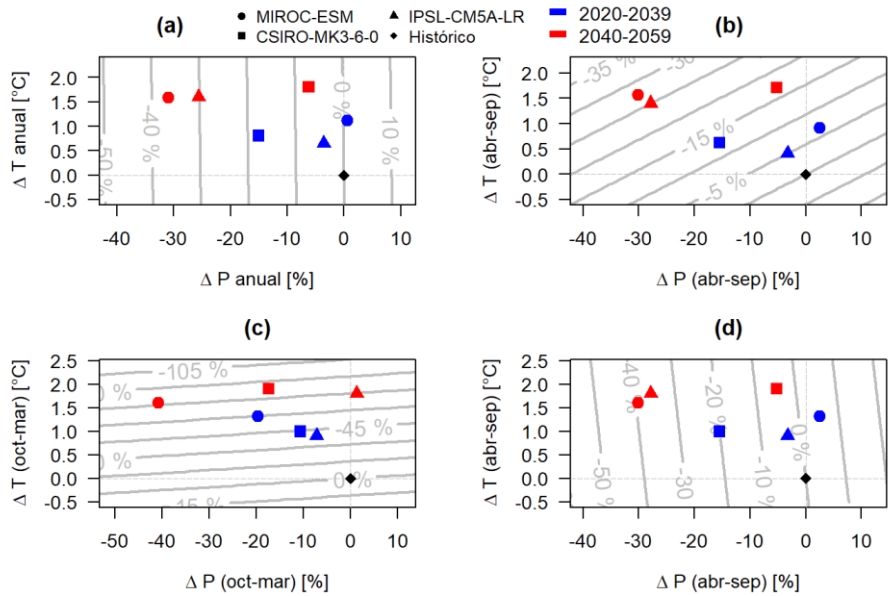
**Figura A - 55:** variaciones de caudal medio [-] para: año completo (a), temporada de invierno (b), temporada de verano (c) y temporada de verano con precipitación de año entero o de invierno. Cuenca 4503001



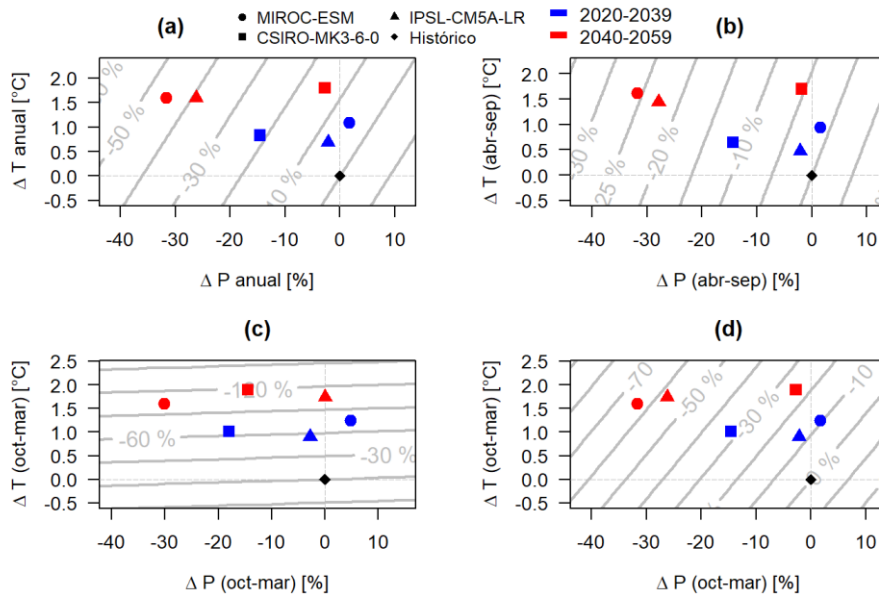
**Figura A - 56:** variaciones de caudal medio [-] para: año completo (a), temporada de invierno (b), temporada de verano (c) y temporada de verano con precipitación de año entero o de invierno. Cuenca 4522002



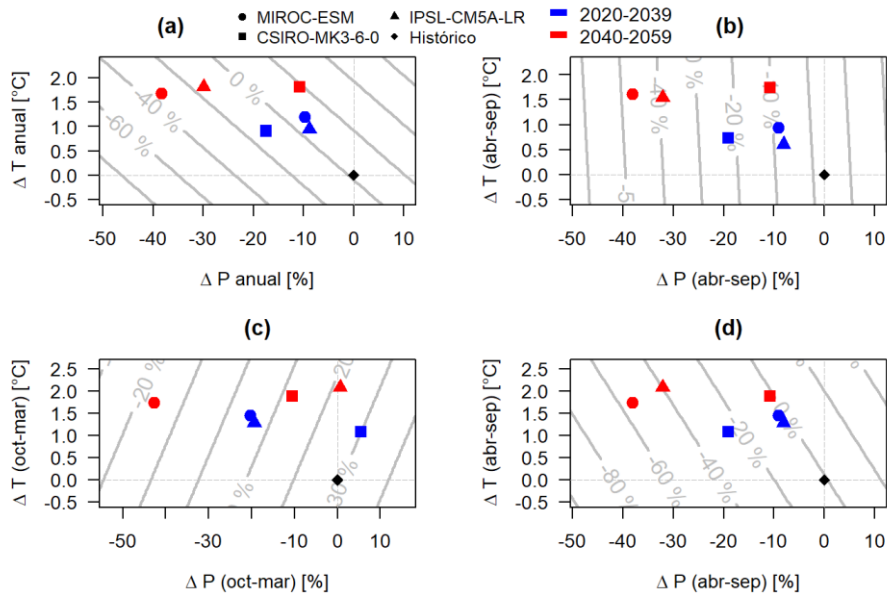
**Figura A - 57:** variaciones de caudal medio [-] para: año completo (a), temporada de invierno (b), temporada de verano (c) y temporada de verano con precipitación de año entero o de invierno. Cuenca 4531002



**Figura A - 58:** variaciones de caudal medio [-] para: año completo (a), temporada de invierno (b), temporada de verano (c) y temporada de verano con precipitación de año entero o de invierno. Cuenca 4703002

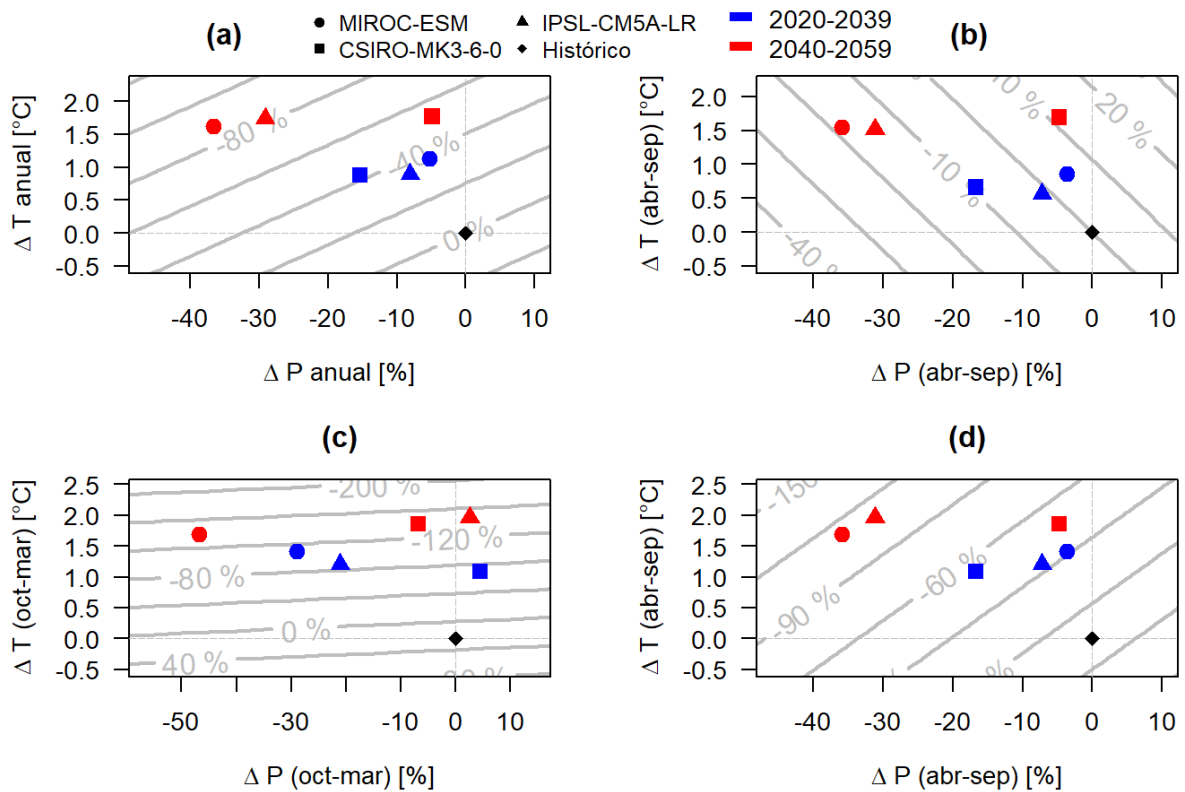


**Figura A - 59:** variaciones de caudal medio [-] para: año completo (a), temporada de invierno (b), temporada de verano (c) y temporada de verano con precipitación de año entero o de invierno. Cuenca 4712001

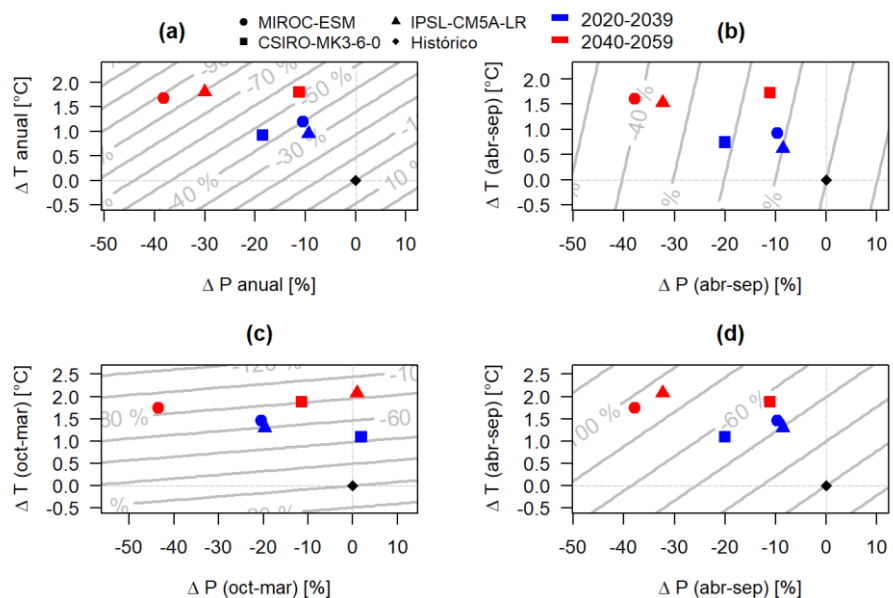


**Figura A - 60:** variaciones de caudal medio [-] para: año completo (a), temporada de invierno (b), temporada de verano (c) y temporada de verano con precipitación de año entero o de invierno. Cuenca 5100001

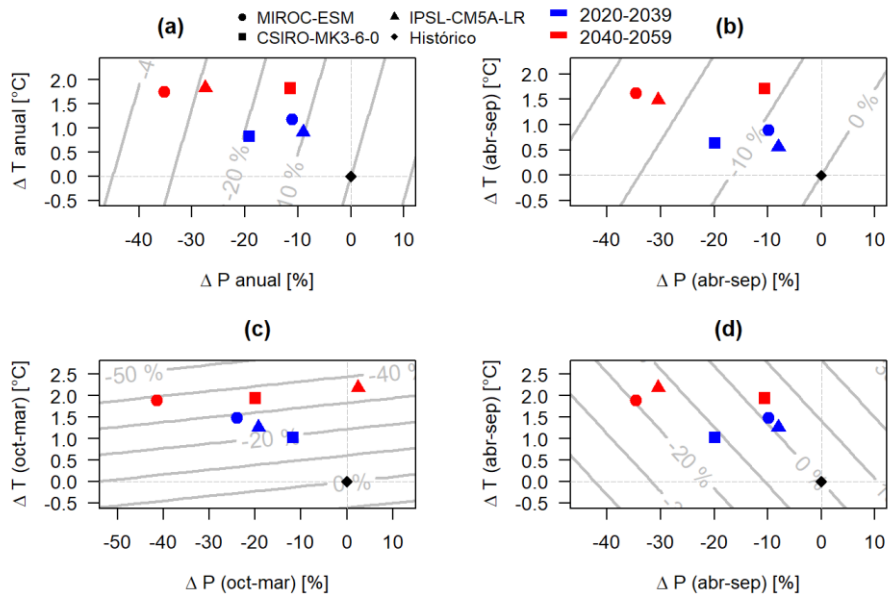




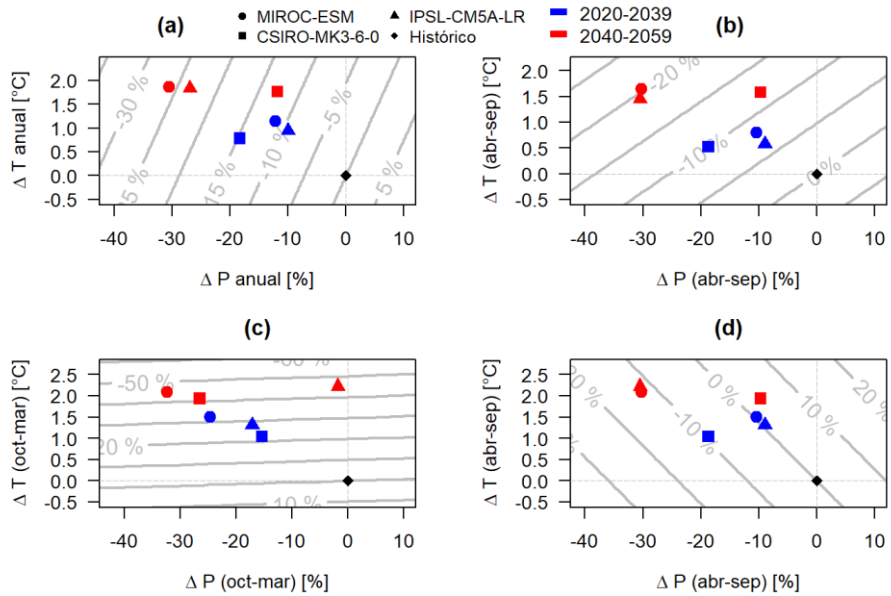
**Figura A - 61:** variaciones de caudal medio [-] para: año completo (a), temporada de invierno (b), temporada de verano (c) y temporada de verano con precipitación de año entero o de invierno. Cuenca 5101001



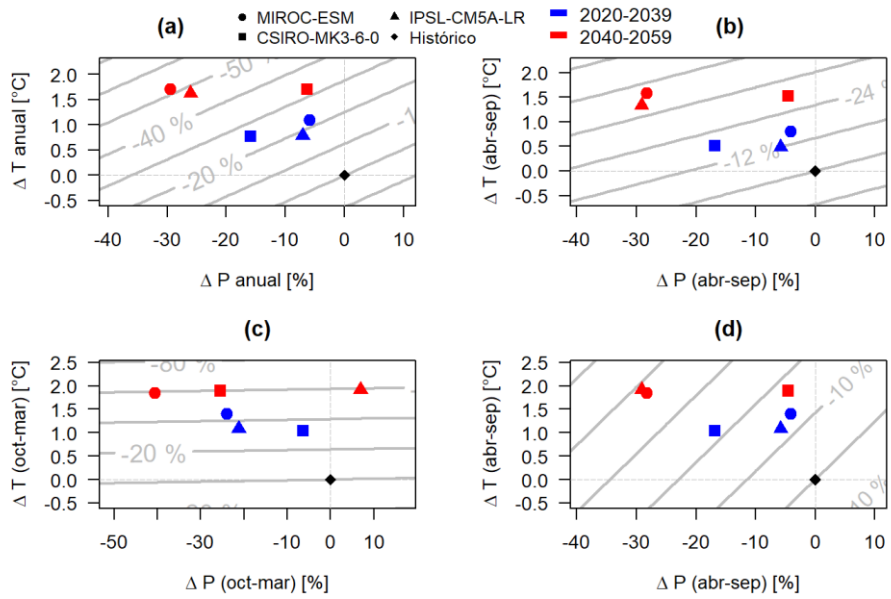
**Figura A - 62:** variaciones de caudal medio [-] para: año completo (a), temporada de invierno (b), temporada de verano (c) y temporada de verano con precipitación de año entero o de invierno. Cuenca 5200001



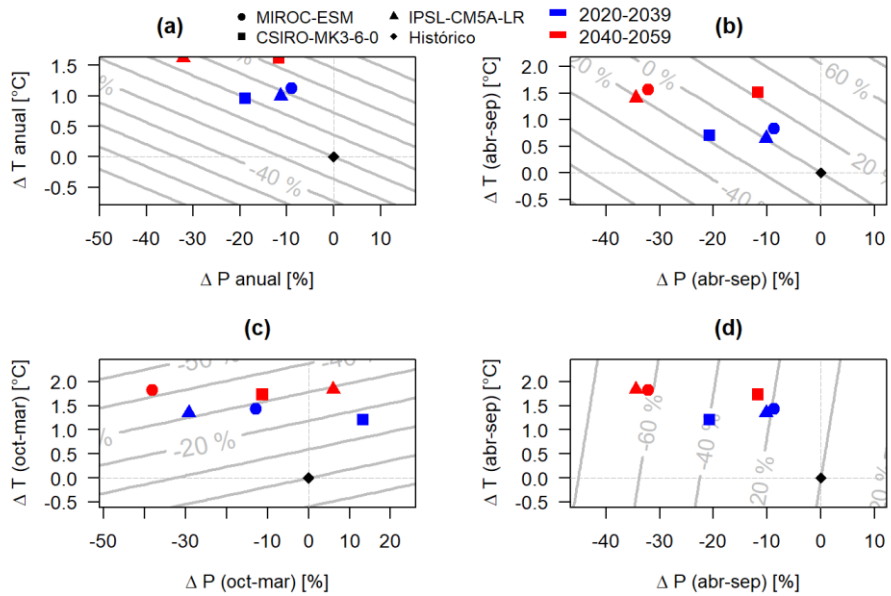
**Figura A - 63:** variaciones de caudal medio [-] para: año completo (a), temporada de invierno (b), temporada de verano (c) y temporada de verano con precipitación de año entero o de invierno. Cuenca 5410002



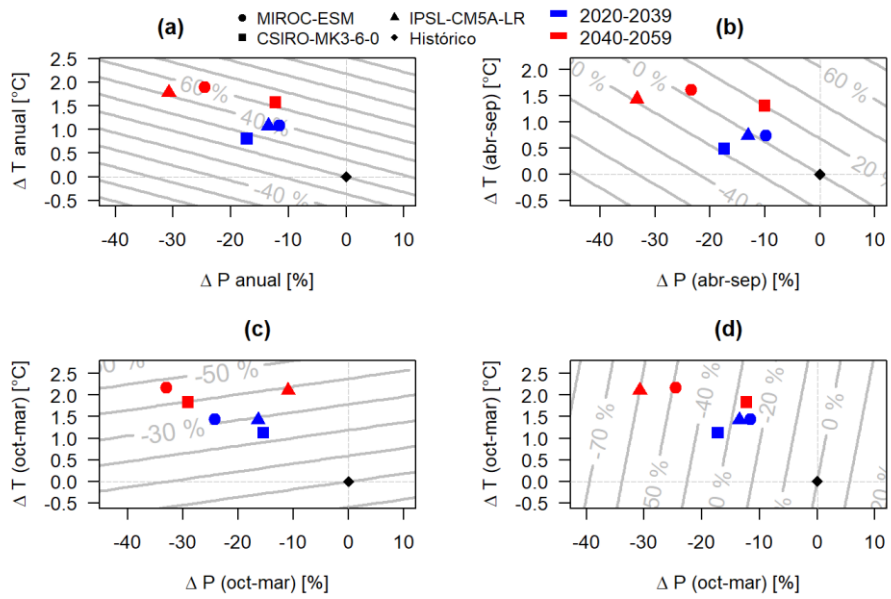
**Figura A - 64:** variaciones de caudal medio [-] para: año completo (a), temporada de invierno (b), temporada de verano (c) y temporada de verano con precipitación de año entero o de invierno. Cuenca 5710001



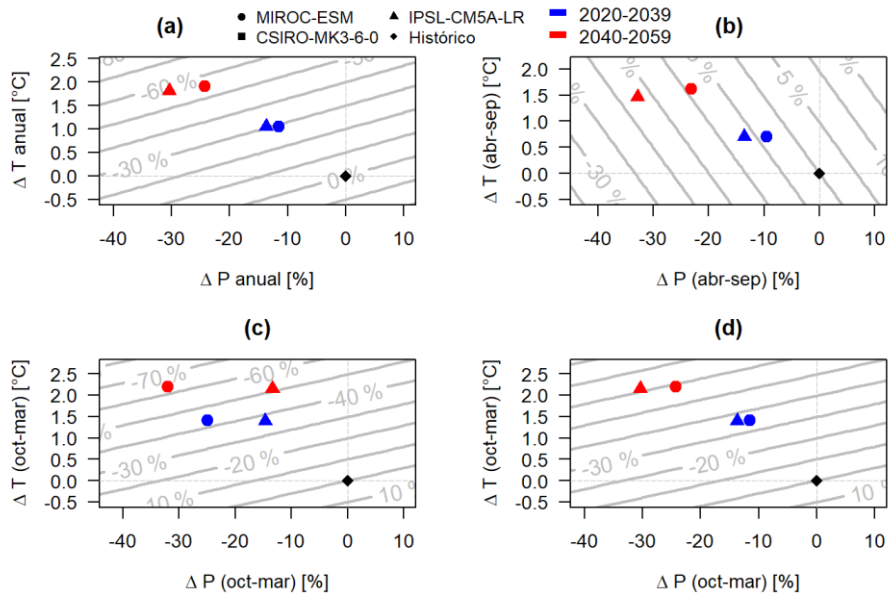
**Figura A - 65:** variaciones de caudal medio [-] para: año completo (a), temporada de invierno (b), temporada de verano (c) y temporada de verano con precipitación de año entero o de invierno. Cuenca 5721001



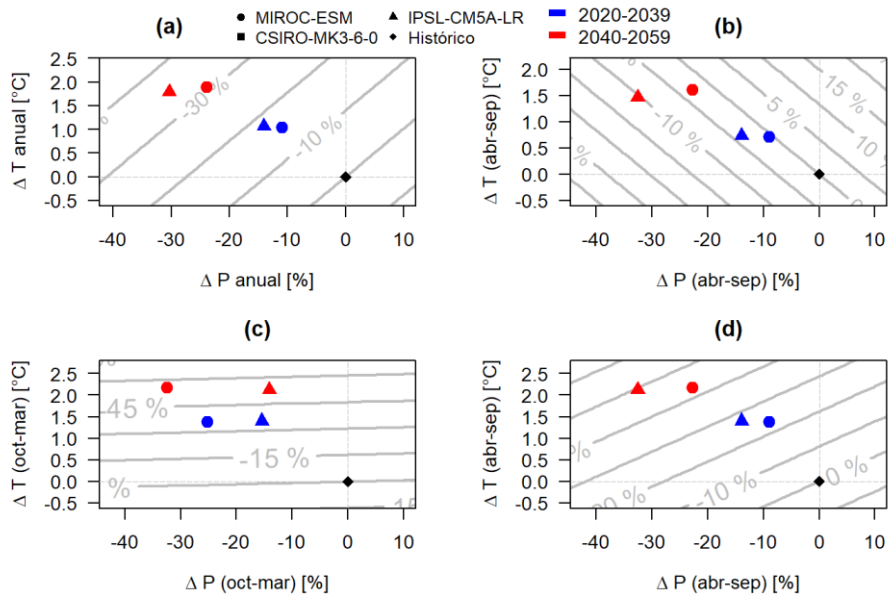
**Figura A - 66:** variaciones de caudal medio [-] para: año completo (a), temporada de invierno (b), temporada de verano (c) y temporada de verano con precipitación de año entero o de invierno. Cuenca 5741001



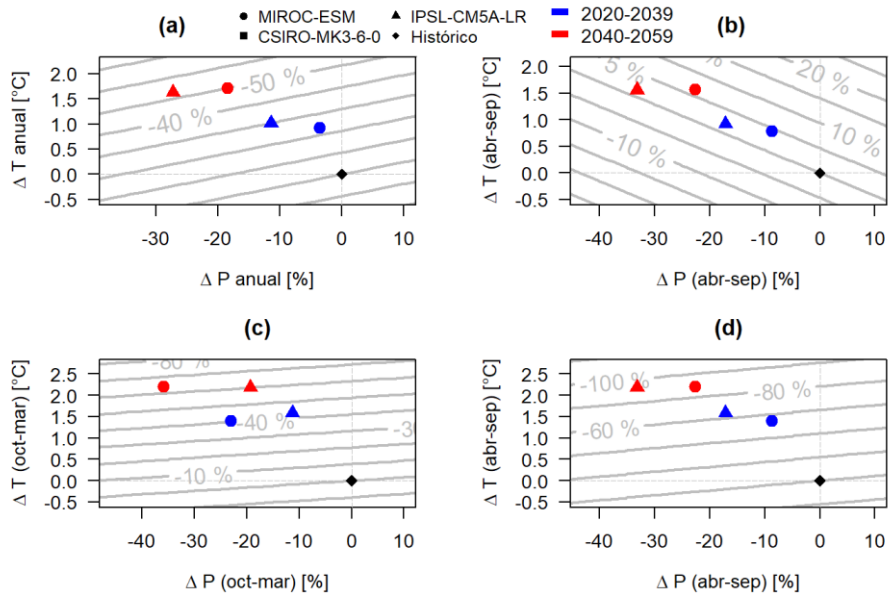
**Figura A - 67:** variaciones de caudal medio [-] para: año completo (a), temporada de invierno (b), temporada de verano (c) y temporada de verano con precipitación de año entero o de invierno. Cuenca 7103001



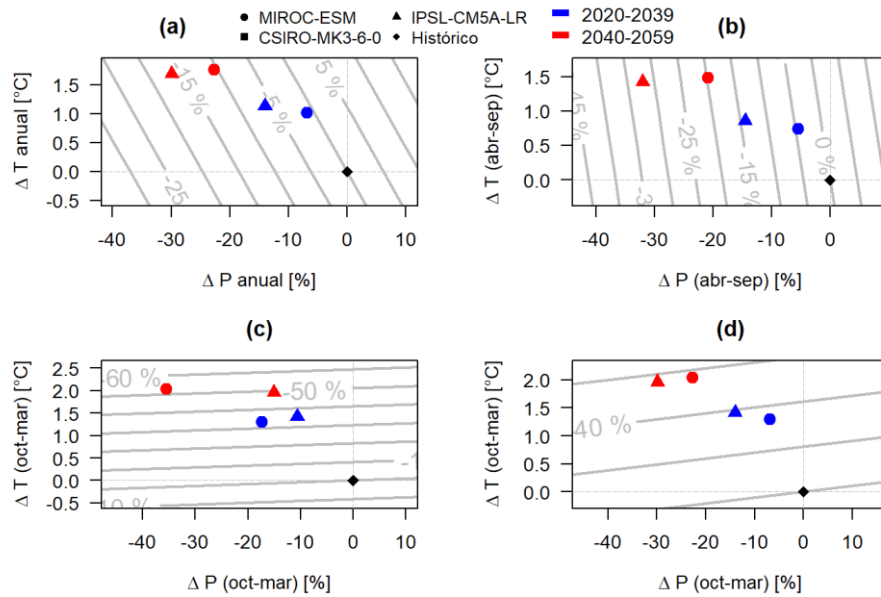
**Figura A - 68:** variaciones de caudal medio [-] para: año completo (a), temporada de invierno (b), temporada de verano (c) y temporada de verano con precipitación de año entero o de invierno. Cuenca 7112001



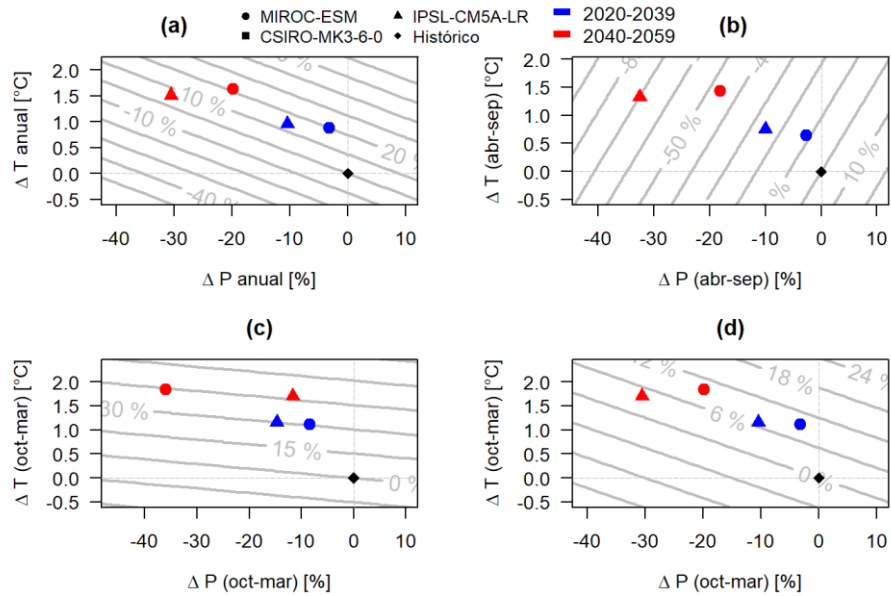
**Figura A - 69:** variaciones de caudal medio [-] para: año completo (a), temporada de invierno (b), temporada de verano (c) y temporada de verano con precipitación de año entero o de invierno. Cuenca 7115001



**Figura A - 70:** variaciones de caudal medio [-] para: año completo (a), temporada de invierno (b), temporada de verano (c) y temporada de verano con precipitación de año entero o de invierno. Cuenca 7354002

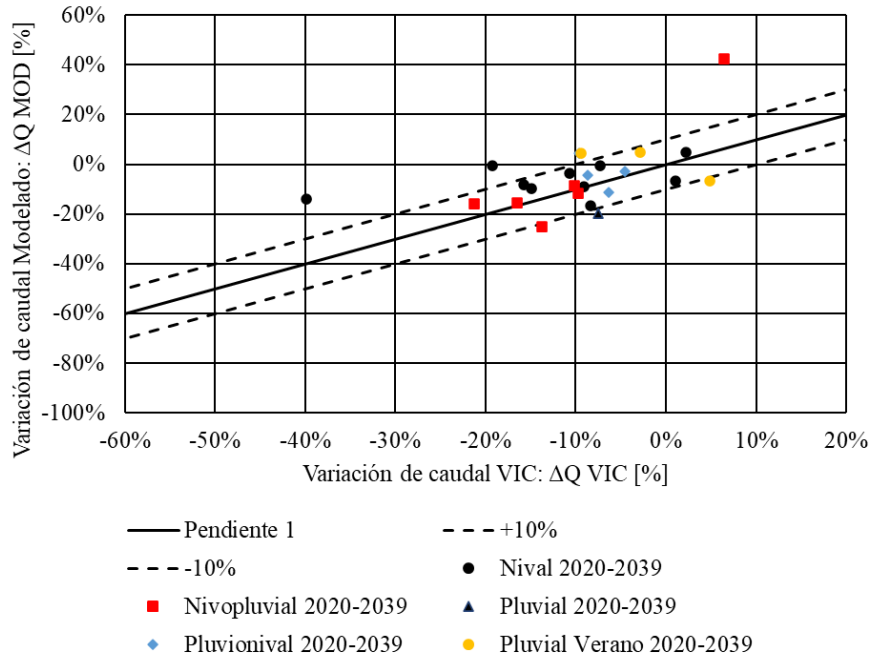


**Figura A - 71:** variaciones de caudal medio [-] para: año completo (a), temporada de invierno (b), temporada de verano (c) y temporada de verano con precipitación de año entero o de invierno. Cuenca 7358001

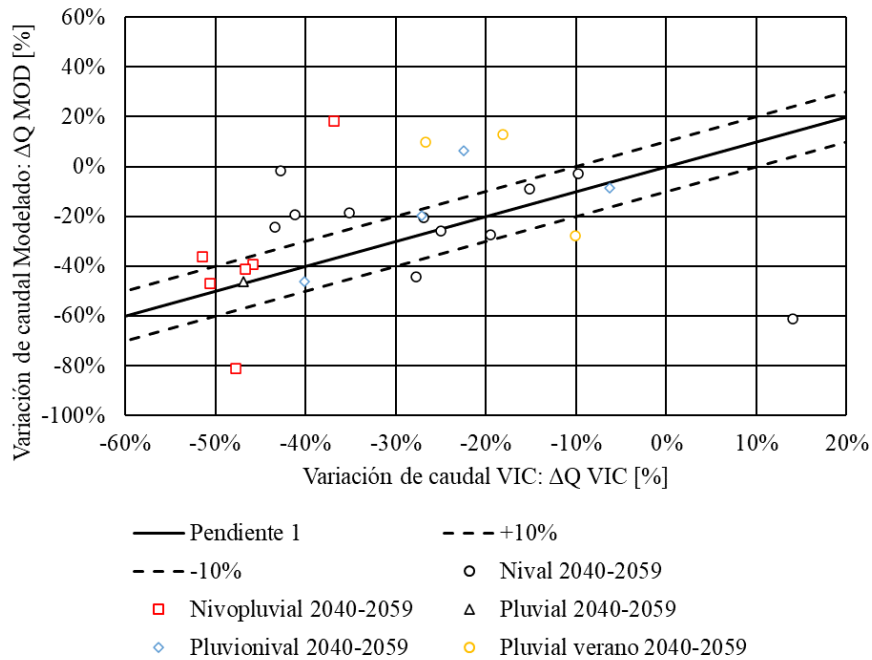


**Figura A - 72:** variaciones de caudal medio [-] para: año completo (a), temporada de invierno (b), temporada de verano (c) y temporada de verano con precipitación de año entero o de invierno. Cuenca 7381001

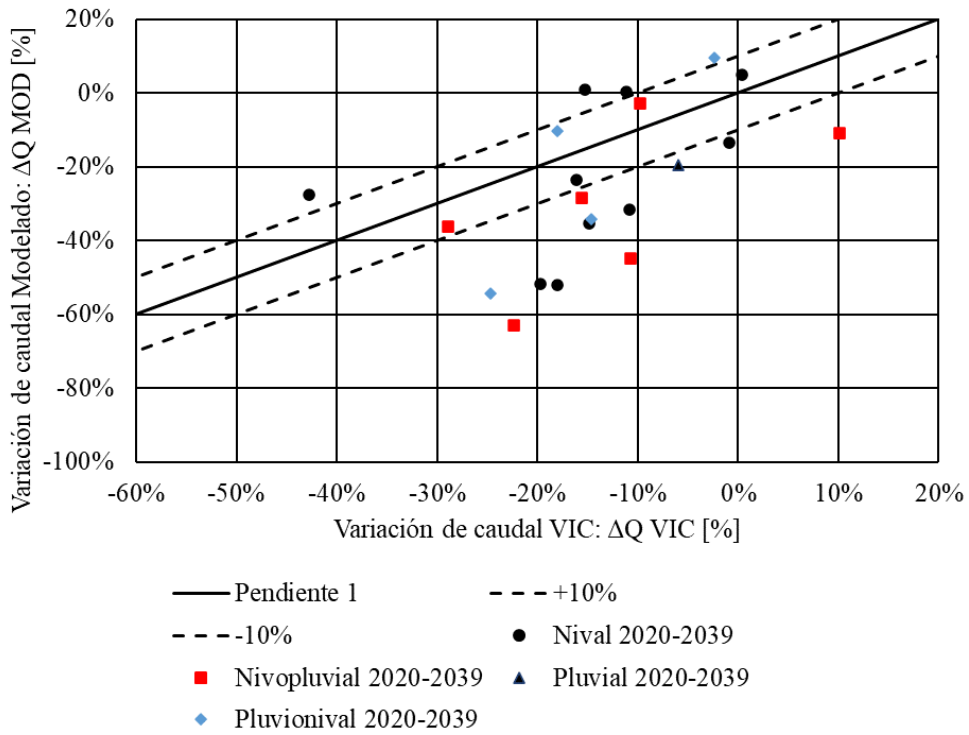
## Anexo B: comparación con caudales VIC, figuras



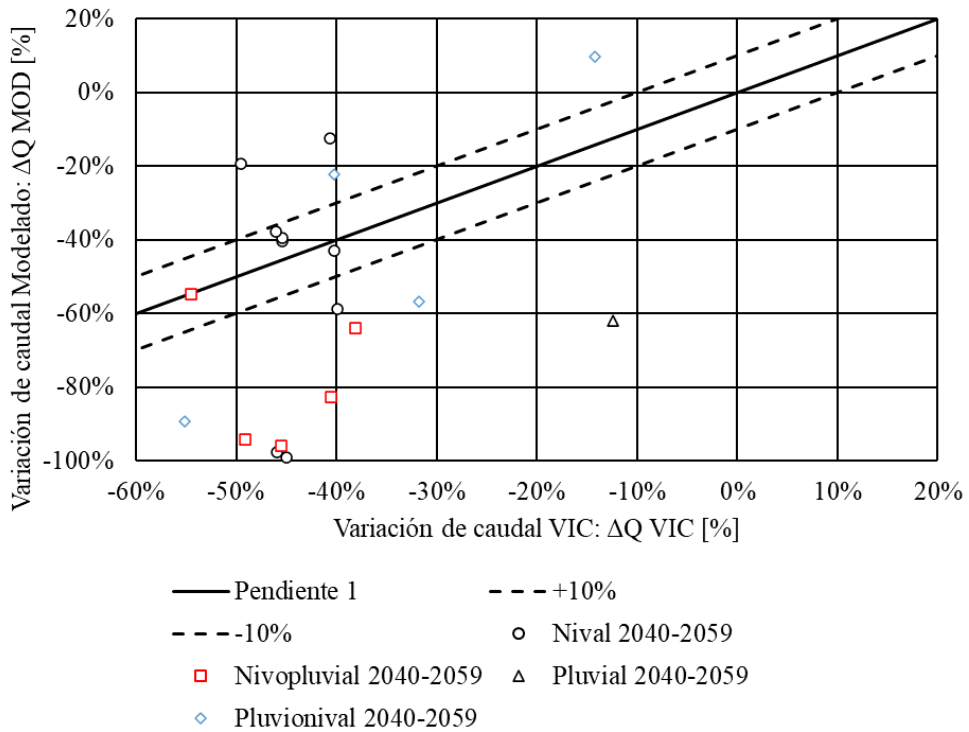
**Figura B - 1:** Comparación de variaciones de caudales VIC y caudales MOD para invierno para futuro cercano 2020-2039, para GCM MIROC-ESM.



**Figura B - 2:** Comparación de variaciones de caudales VIC y caudales MOD para invierno para futuro lejano 2040-2059, para GCM MIROC-ESM.

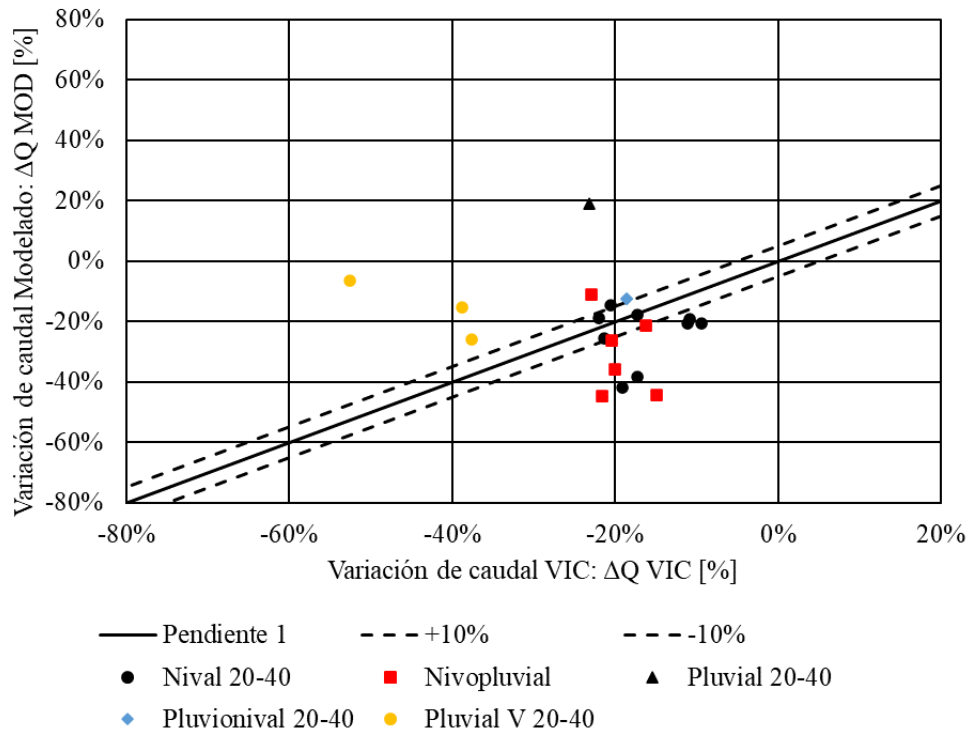


**Figura B - 3:** Comparación de variaciones de caudales VIC y caudales MOD para verano para futuro cercano 2020-2039, para GCM MIROC-ESM.

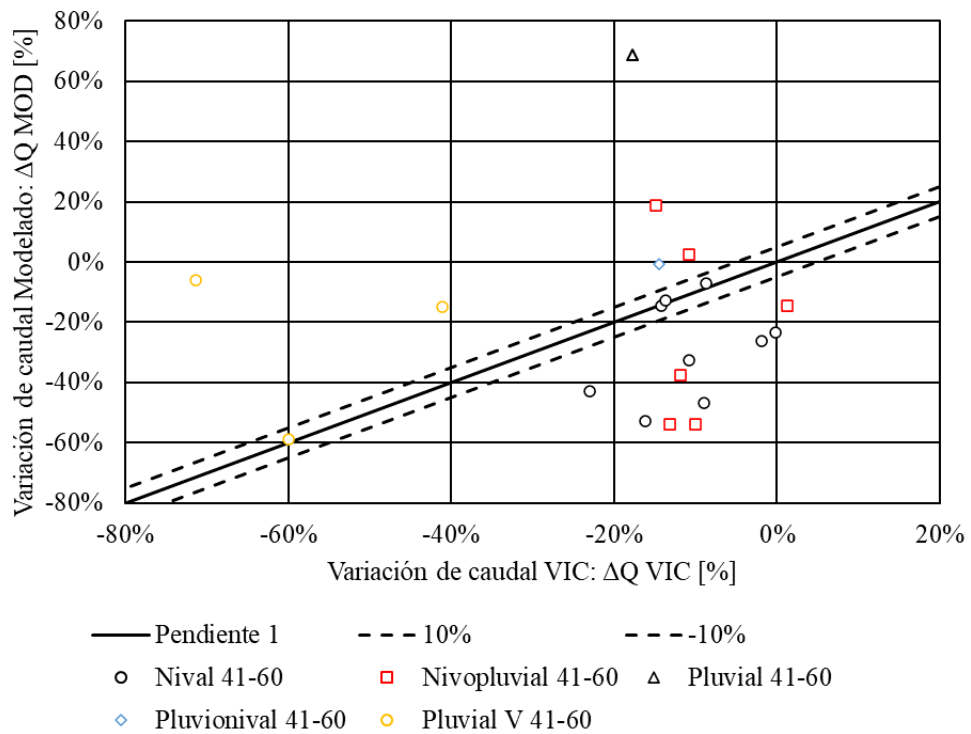


**Figura B - 4:** Comparación de variaciones de caudales VIC y caudales MOD para verano para futuro lejano 2040-2059, para GCM MIROC-ESM.

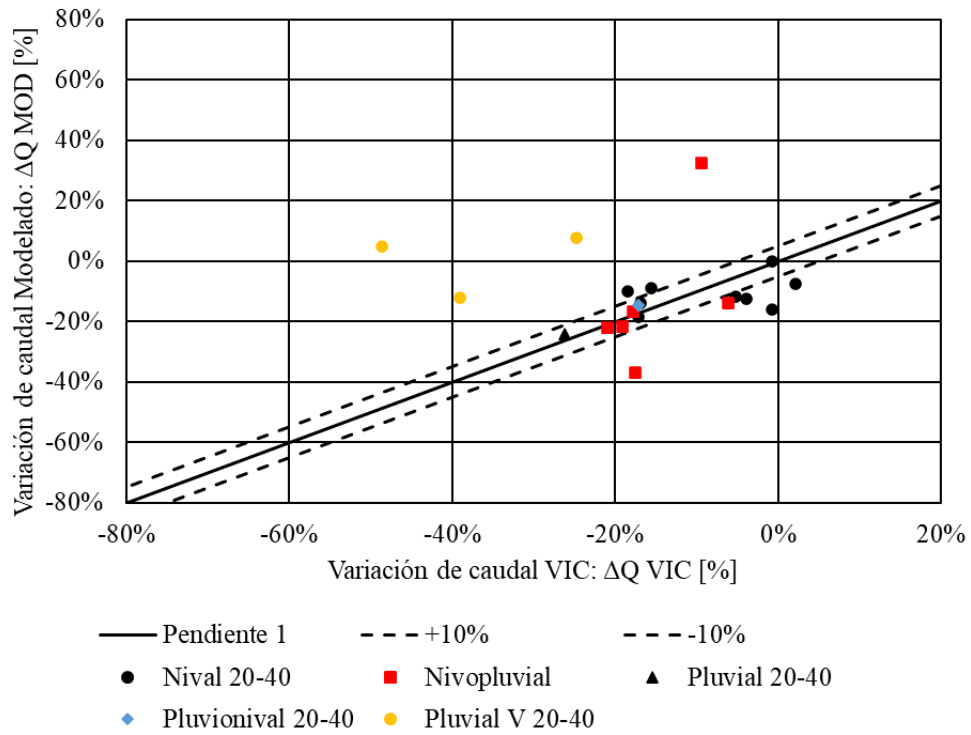




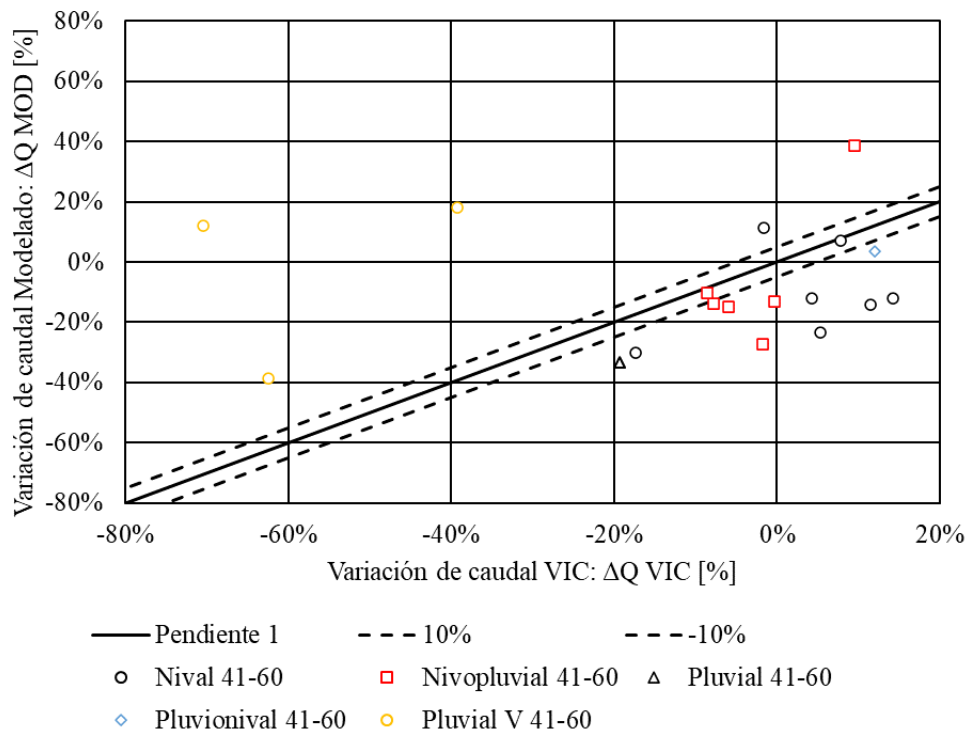
**Figura B - 5:** Comparación de variaciones de caudales VIC y caudales MOD para año entero para futuro cercano 2020-2039, para GCM CSIRO-MK3-6-0.



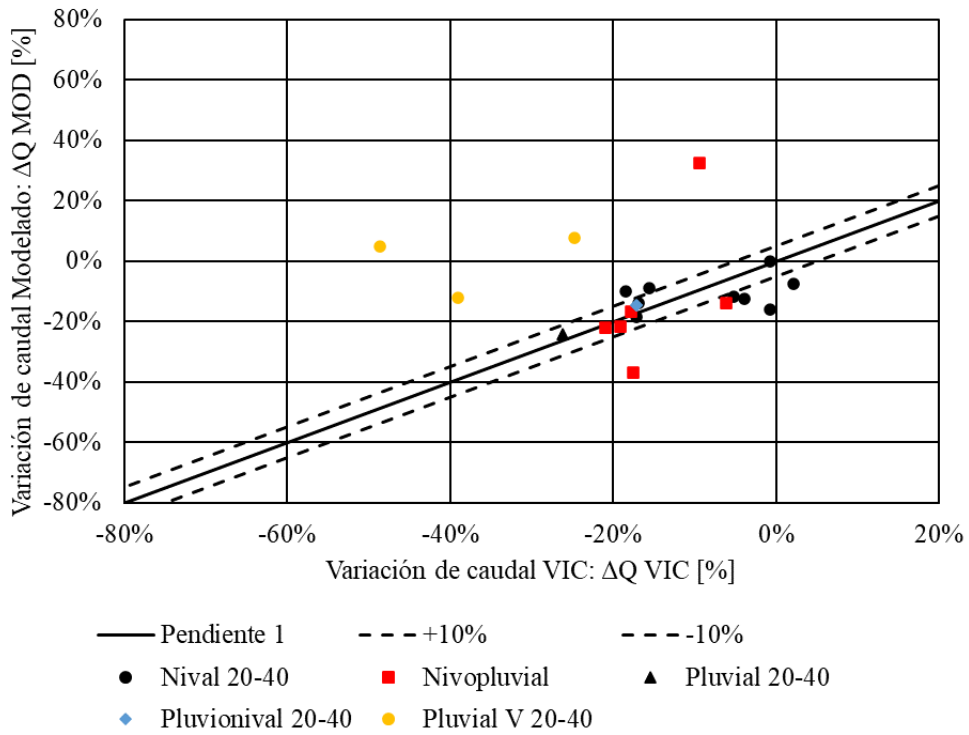
**Figura B - 6:** Comparación de variaciones de caudales VIC y caudales MOD para año entero para futuro lejano 2040-2059, para GCM CSIRO-MK3-6-0.



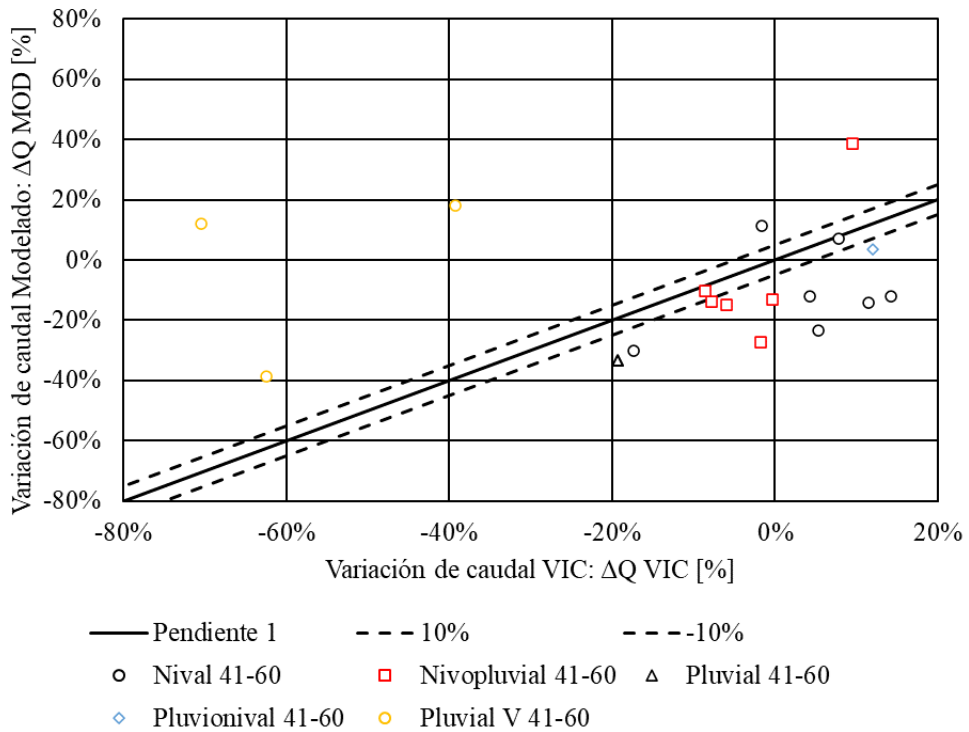
**Figura B - 7:** Comparación de variaciones de caudales VIC y caudales MOD para invierno para futuro cercano 2020-2039, para GCM CSIRO-MK3-6-0.



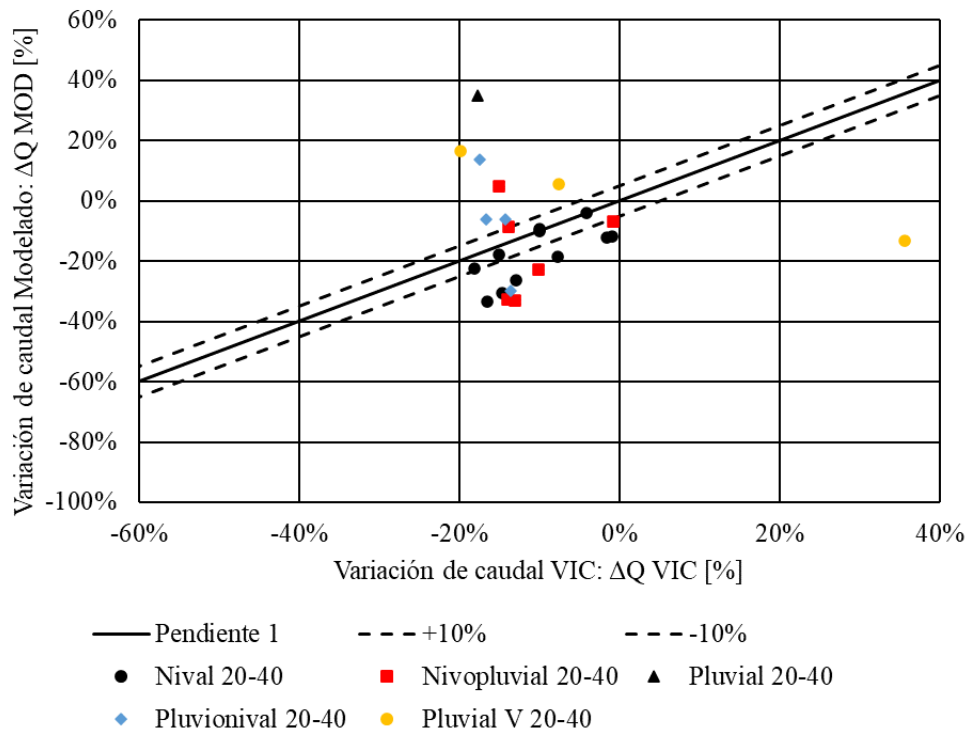
**Figura B - 8:** Comparación de variaciones de caudales VIC y caudales MOD para invierno para futuro lejano 2040-2059, para GCM CSIRO-MK3-6-0.



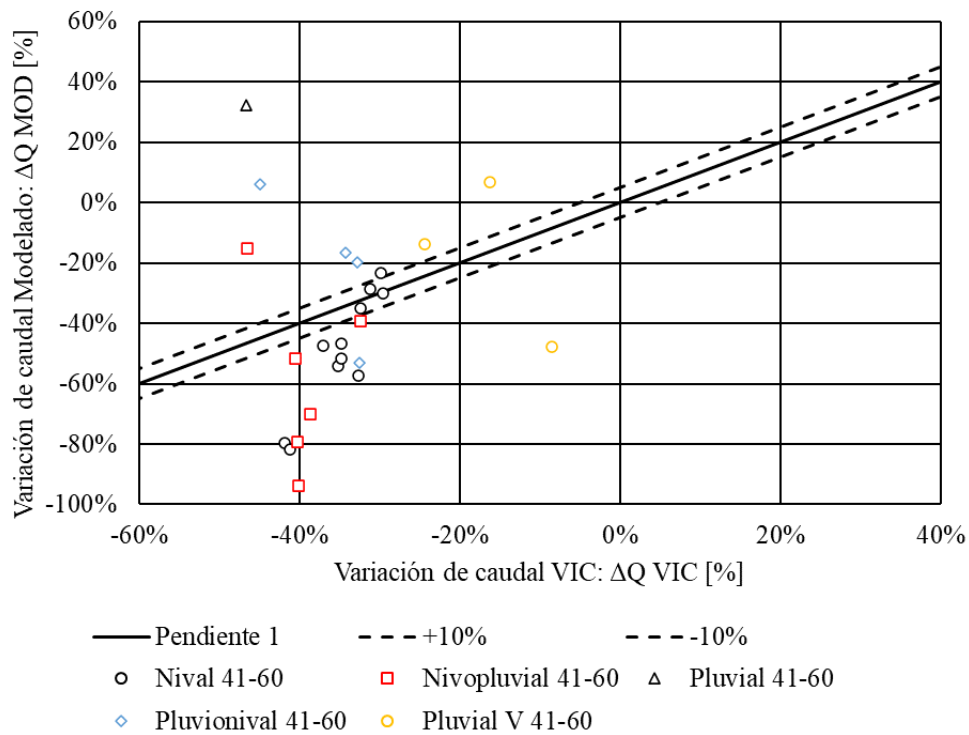
**Figura B - 9:** Comparación de variaciones de caudales VIC y caudales MOD para verano para futuro cercano 2020-2039, para GCM CSIRO-MK3-6-0.



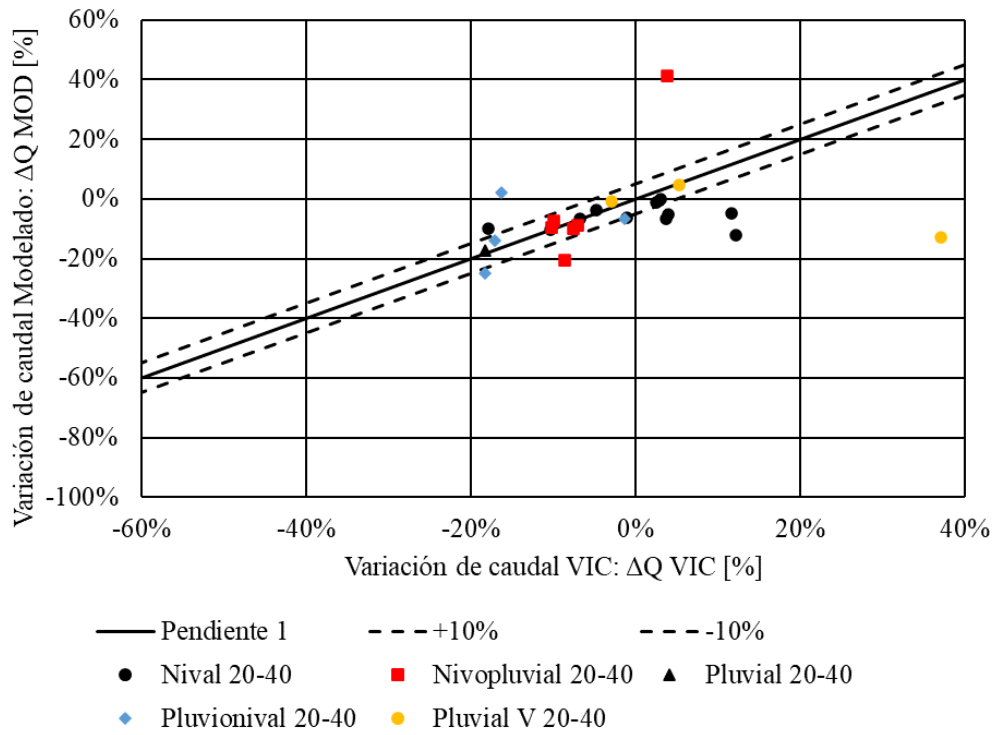
**Figura B - 10:** Comparación de variaciones de caudales VIC y caudales MOD para verano para futuro lejano 2040-2059, para GCM CSIRO-MK3-6-0.



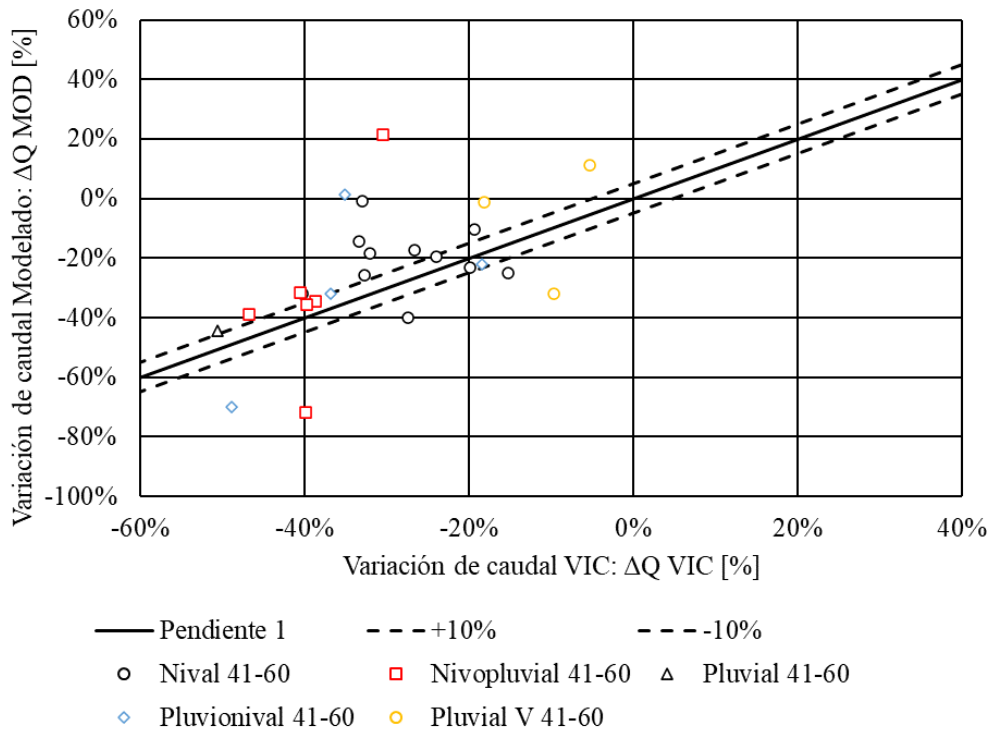
**Figura B - 11:** Comparación de variaciones de caudales VIC y caudales MOD para año entero para futuro cercano 2020-2039, para GCM IPSL-CM5A-LR.



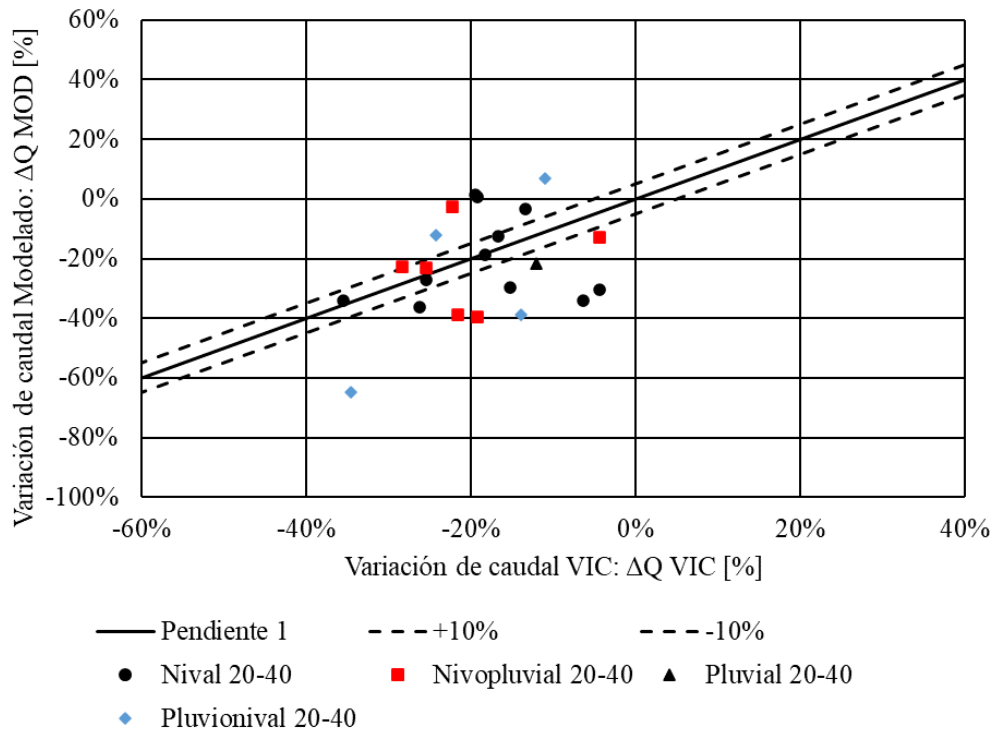
**Figura B - 12:** Comparación de variaciones de caudales VIC y caudales MOD para año entero para futuro lejano 2040-2059, para GCM IPSL-CM5A-LR.



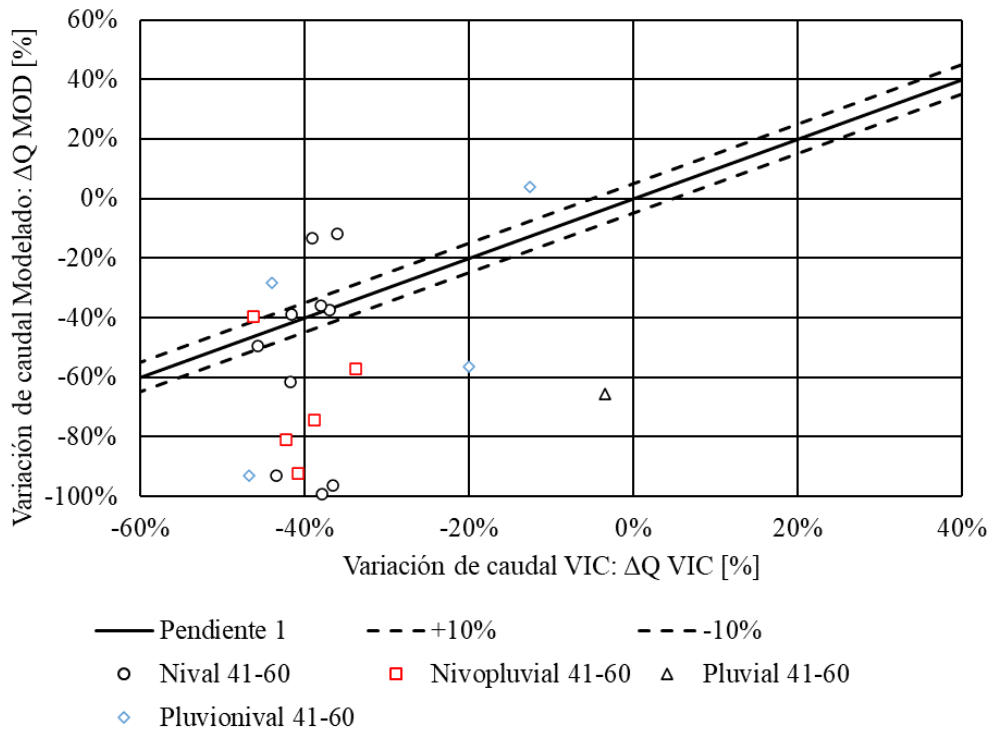
**Figura B - 13:** Comparación de variaciones de caudales VIC y caudales MOD para invierno para futuro cercano 2020-2039, para GCM IPSL-CM5A-LR.



**Figura B - 14:** Comparación de variaciones de caudales VIC y caudales MOD para invierno para futuro lejano 2040-2059, para GCM IPSL-CM5A-LR.

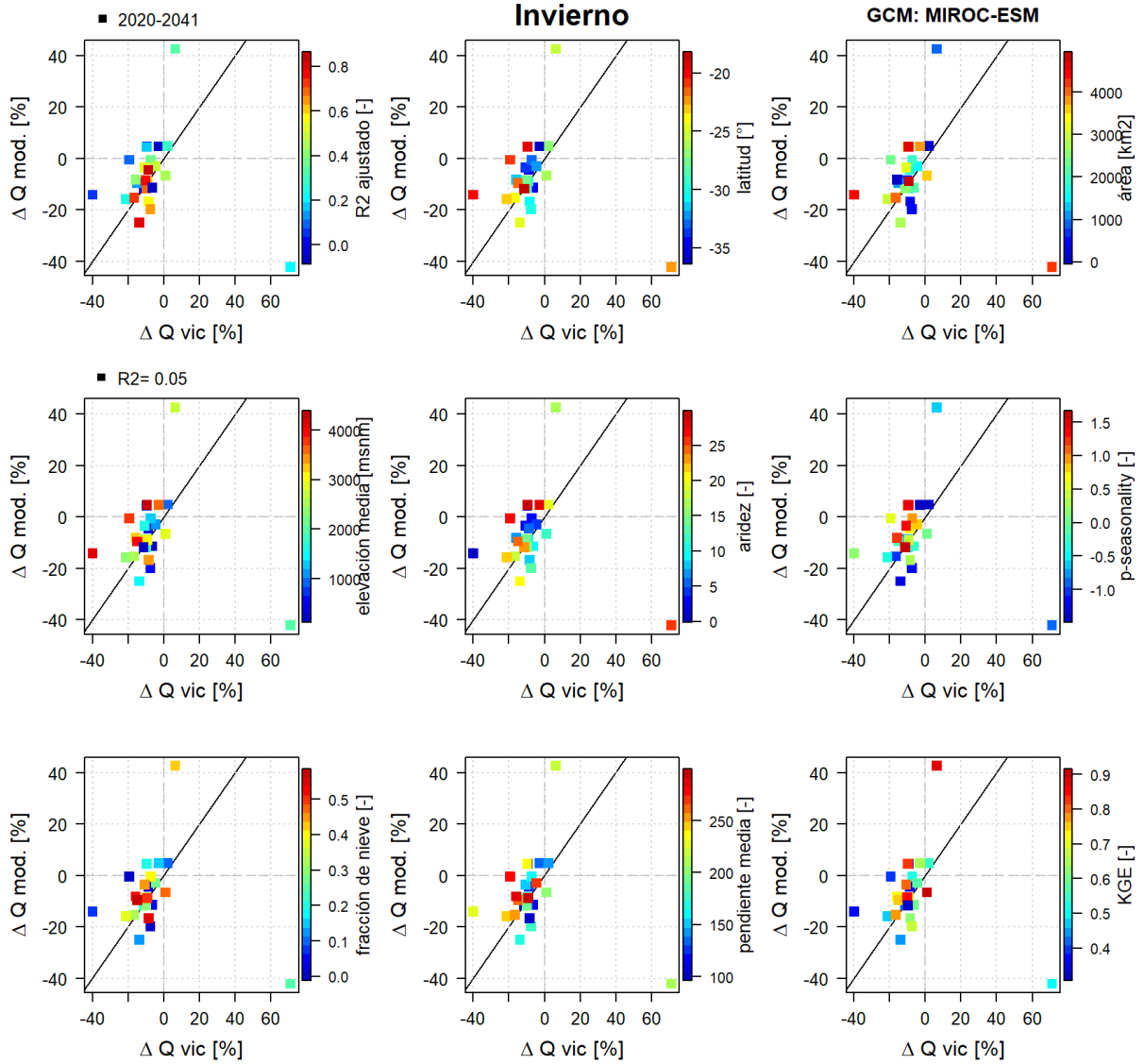


**Figura B - 15:** Comparación de variaciones de caudales VIC y caudales MOD para invierno para futuro cercano 2020-2039, para GCM IPSL-CM5A-LR.

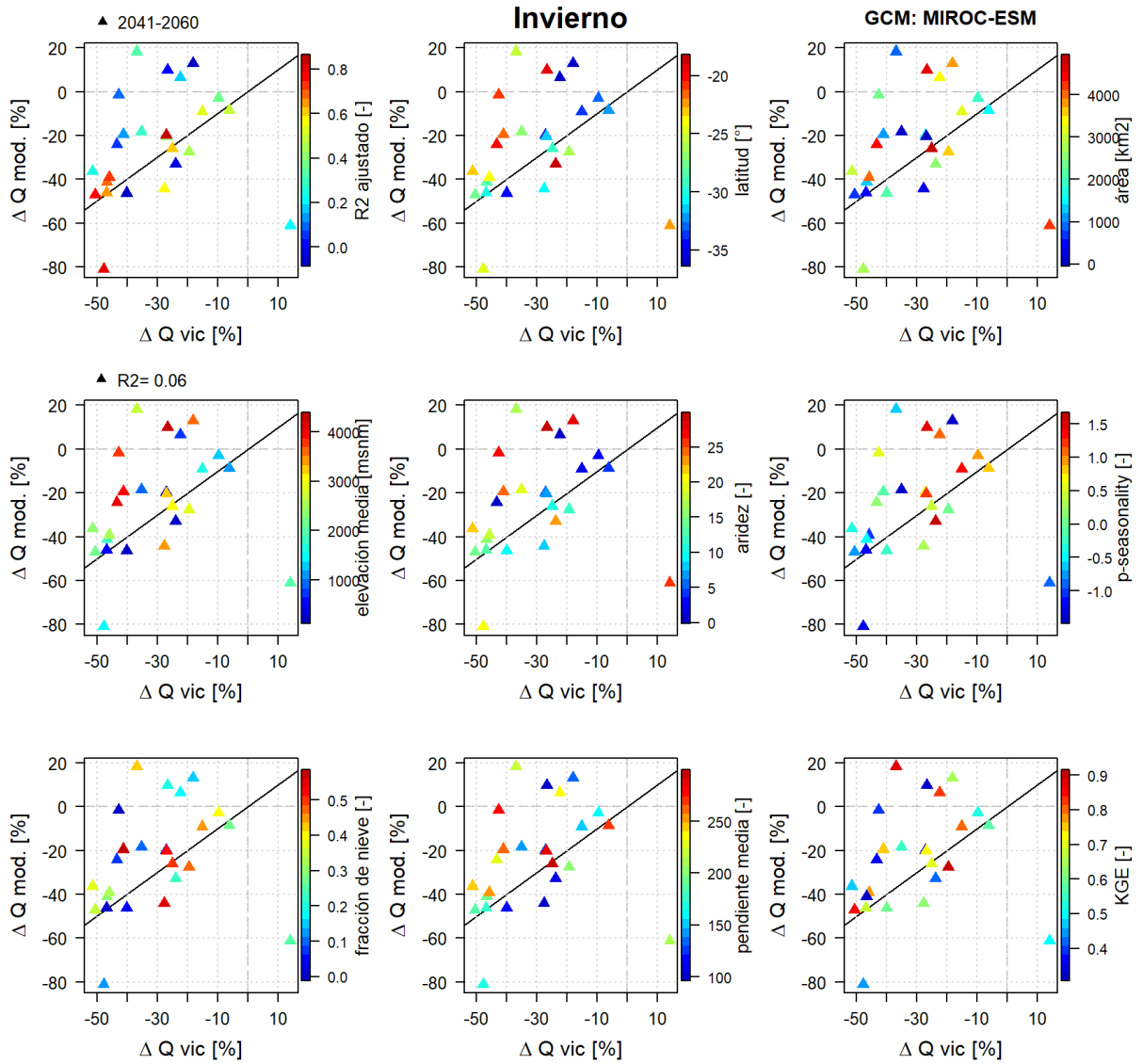


**Figura B - 16:** Comparación de variaciones de caudales VIC y caudales MOD para invierno para futuro lejano 2040-2059, para GCM IPSL-CM5A-LR.

## Anexo C: comparación con caudales VIC, según características

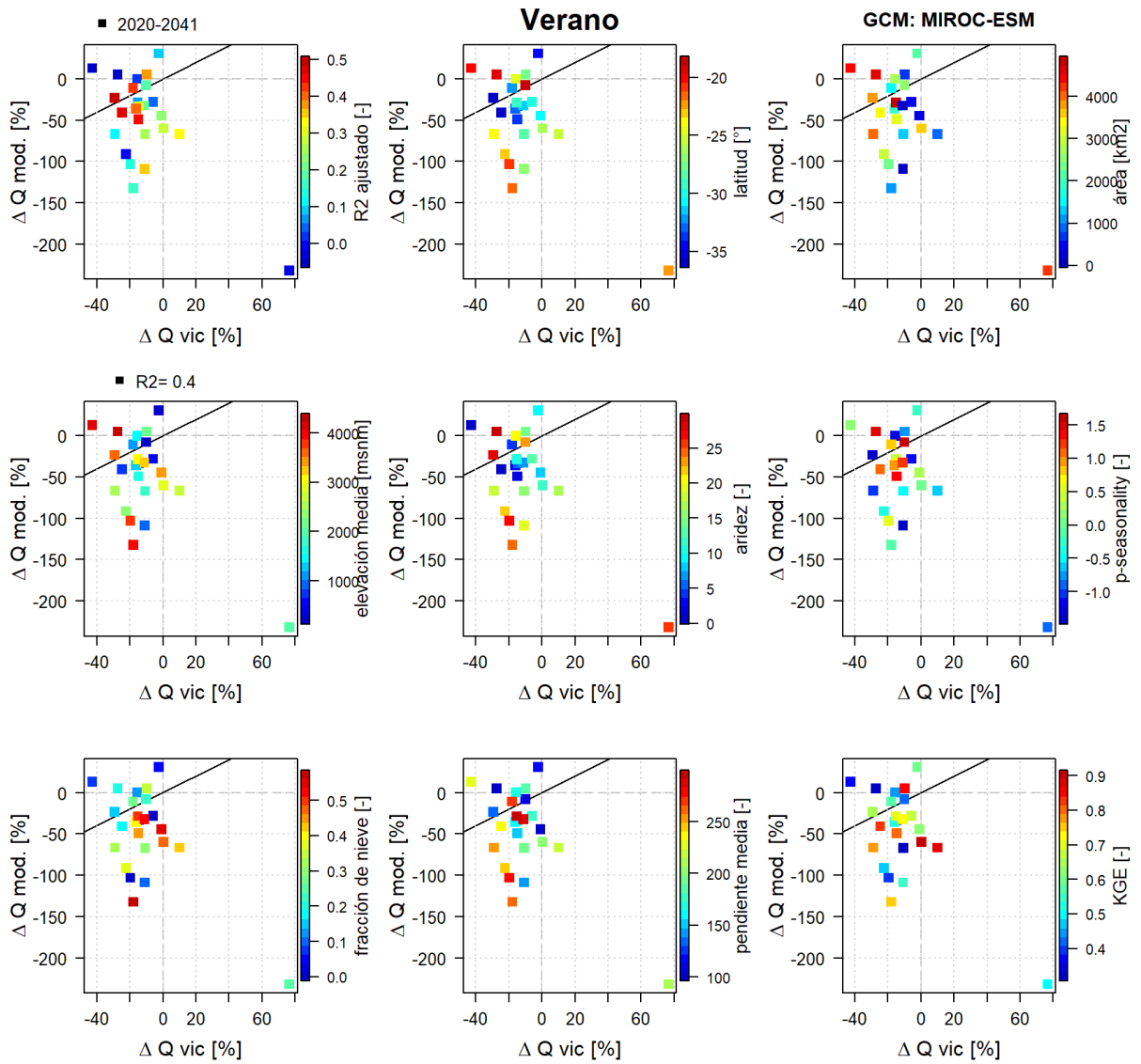


**Figura C-1:** Comparación de variaciones de caudales VIC y caudales MOD en Invierno junto a estadísticos y características de las cuencas para GCM MIROC-ESM. Período 2020-2039.

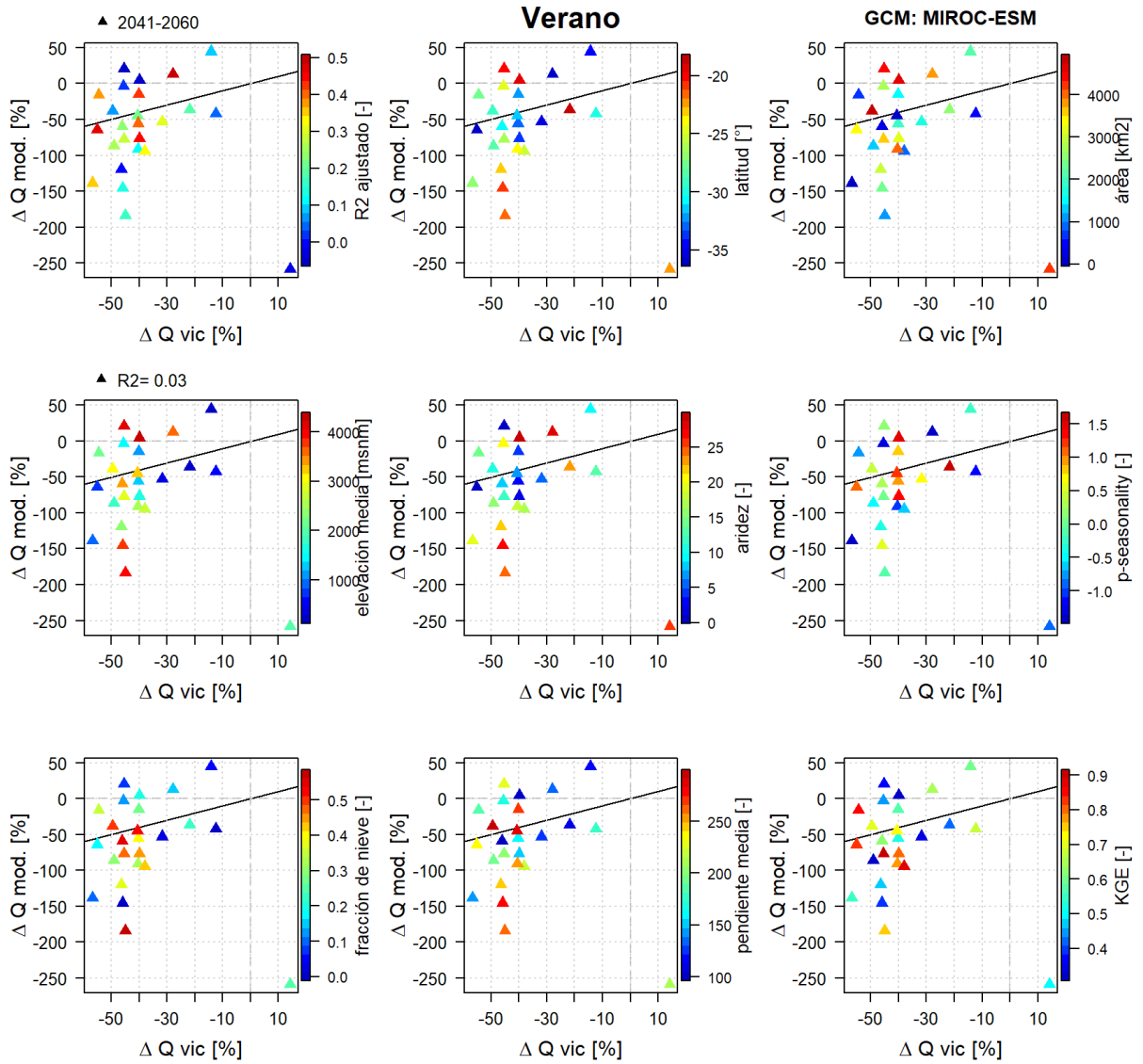


**Figura C- 2:** Comparación de variaciones de caudales VIC y caudales MOD en Invierno junto a estadísticos y características de las cuencas para GCM MIROC-ESM. Período 2040-2059.

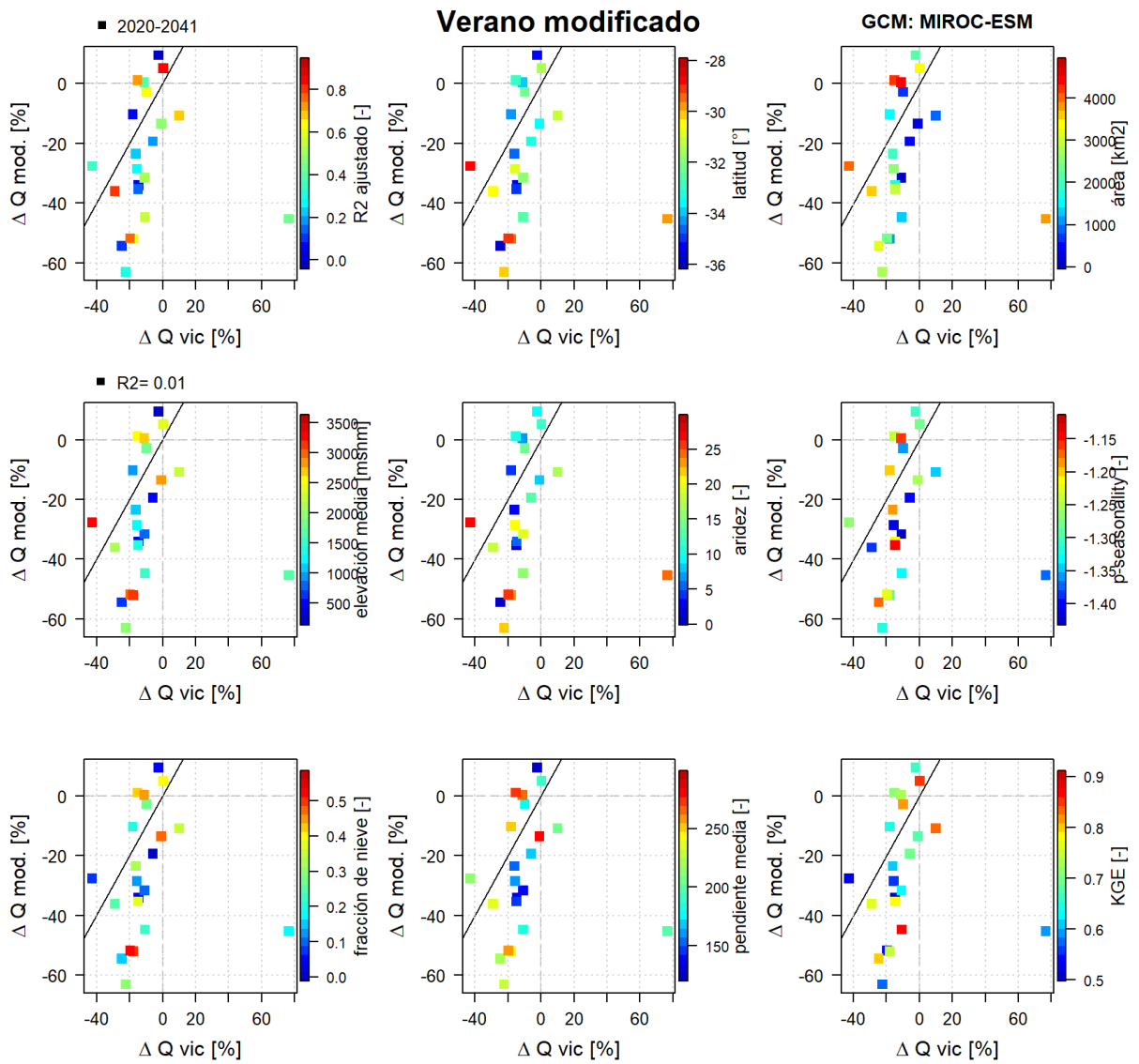




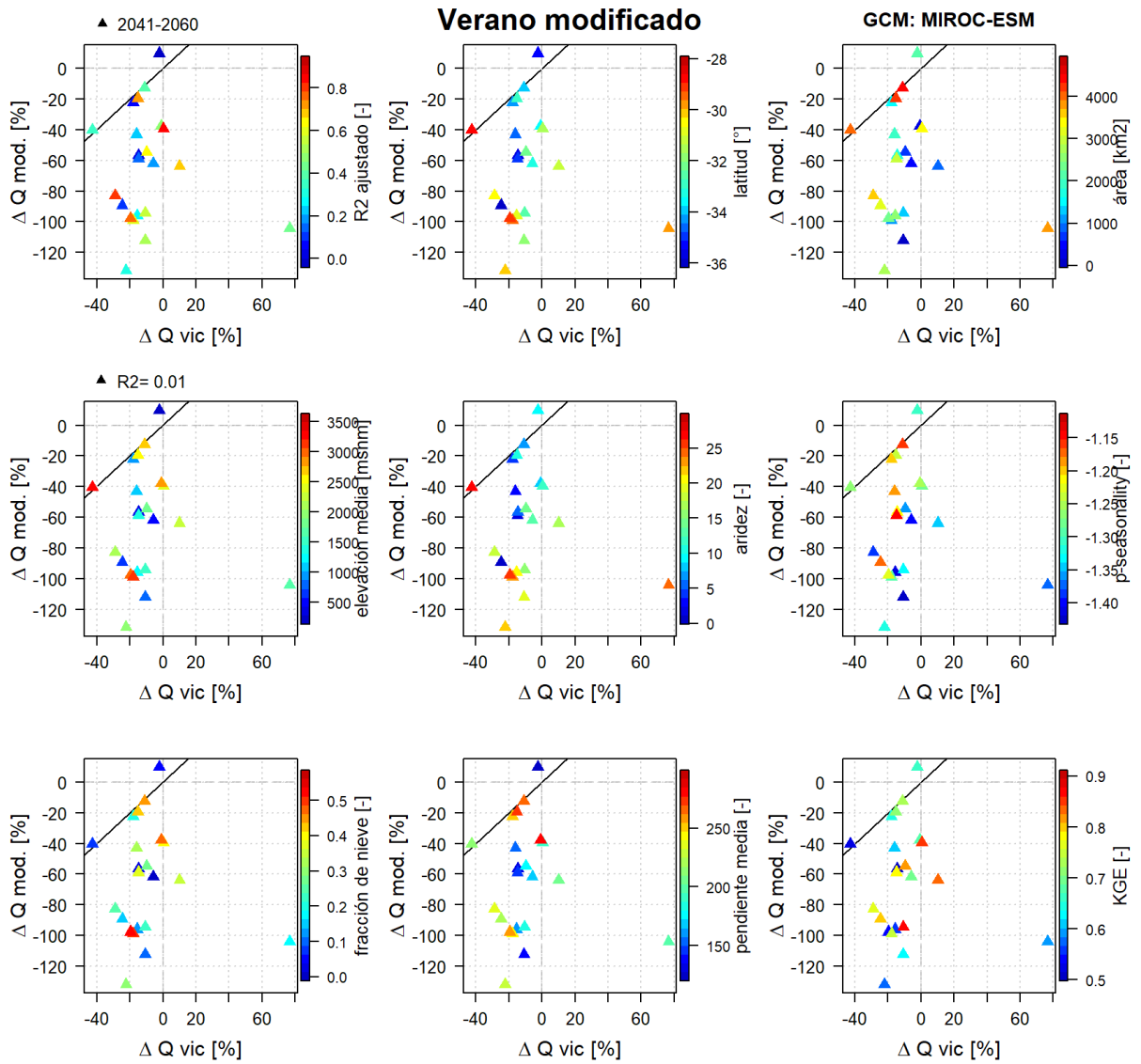
**Figura C- 3:** Comparación de variaciones de caudales VIC y caudales MOD en Verano junto a estadísticos y características de las cuencas para GCM MIROC-ESM. Período 2020-2039.



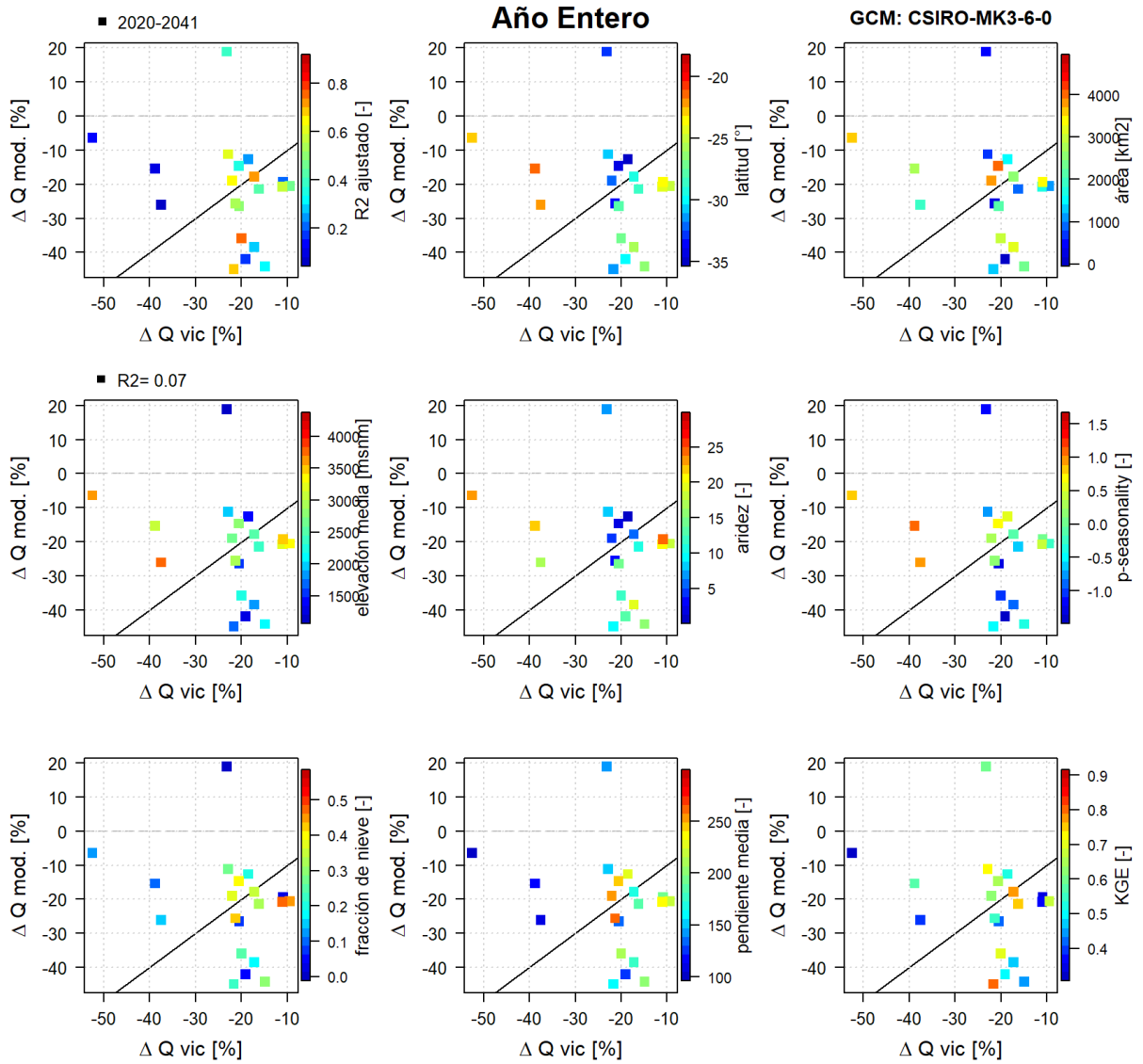
**Figura C- 4:** Comparación de variaciones de caudales VIC y caudales MOD en Verano junto a estadísticos y características de las cuencas para GCM MIROC-ESM. Período 2040-2059.



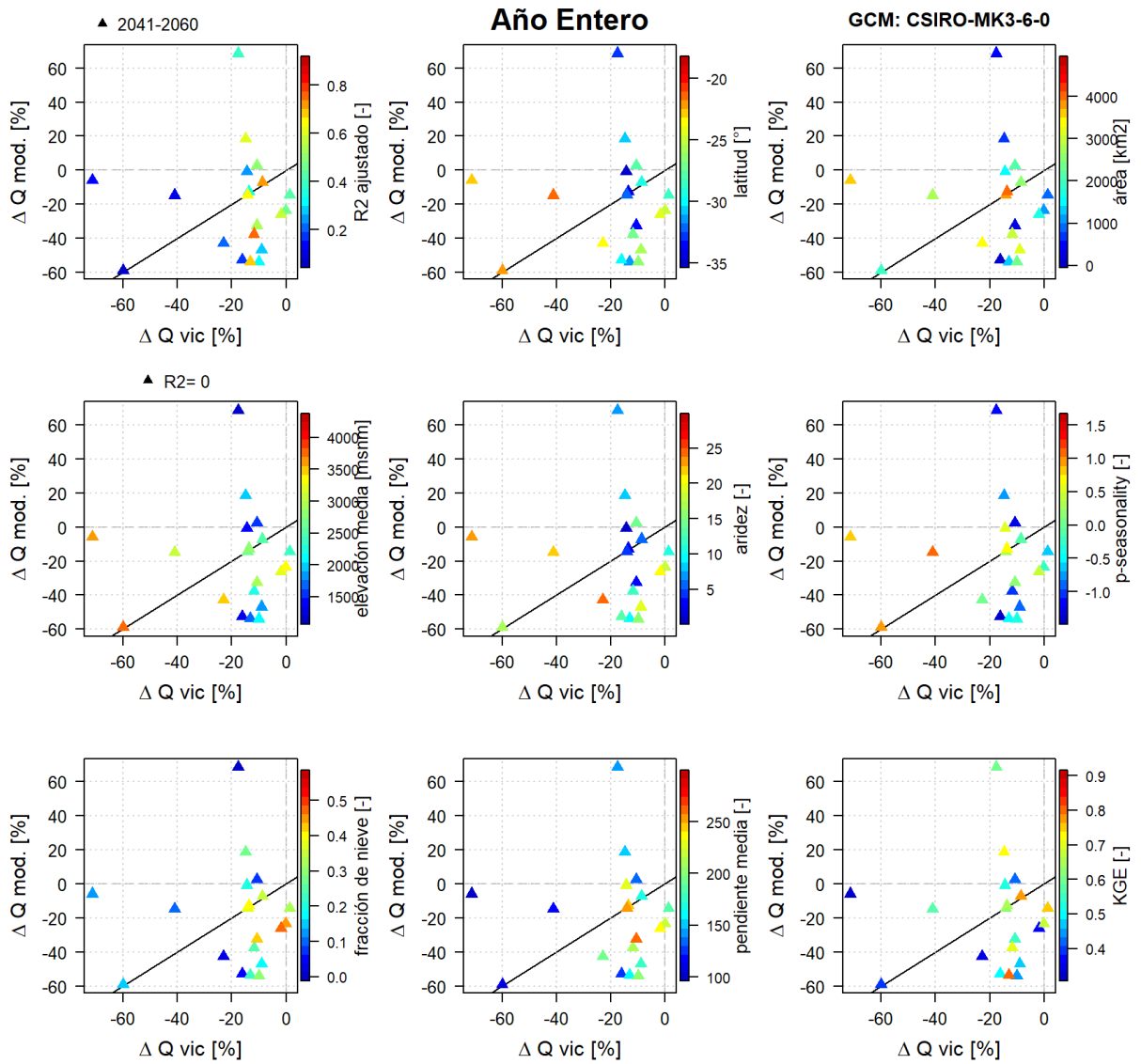
**Figura C- 5:** Comparación de variaciones de caudales VIC y caudales MOD en Verano Modificado junto a estadísticos y características de las cuencas para GCM MIROC-ESM. Período 2020-2039.



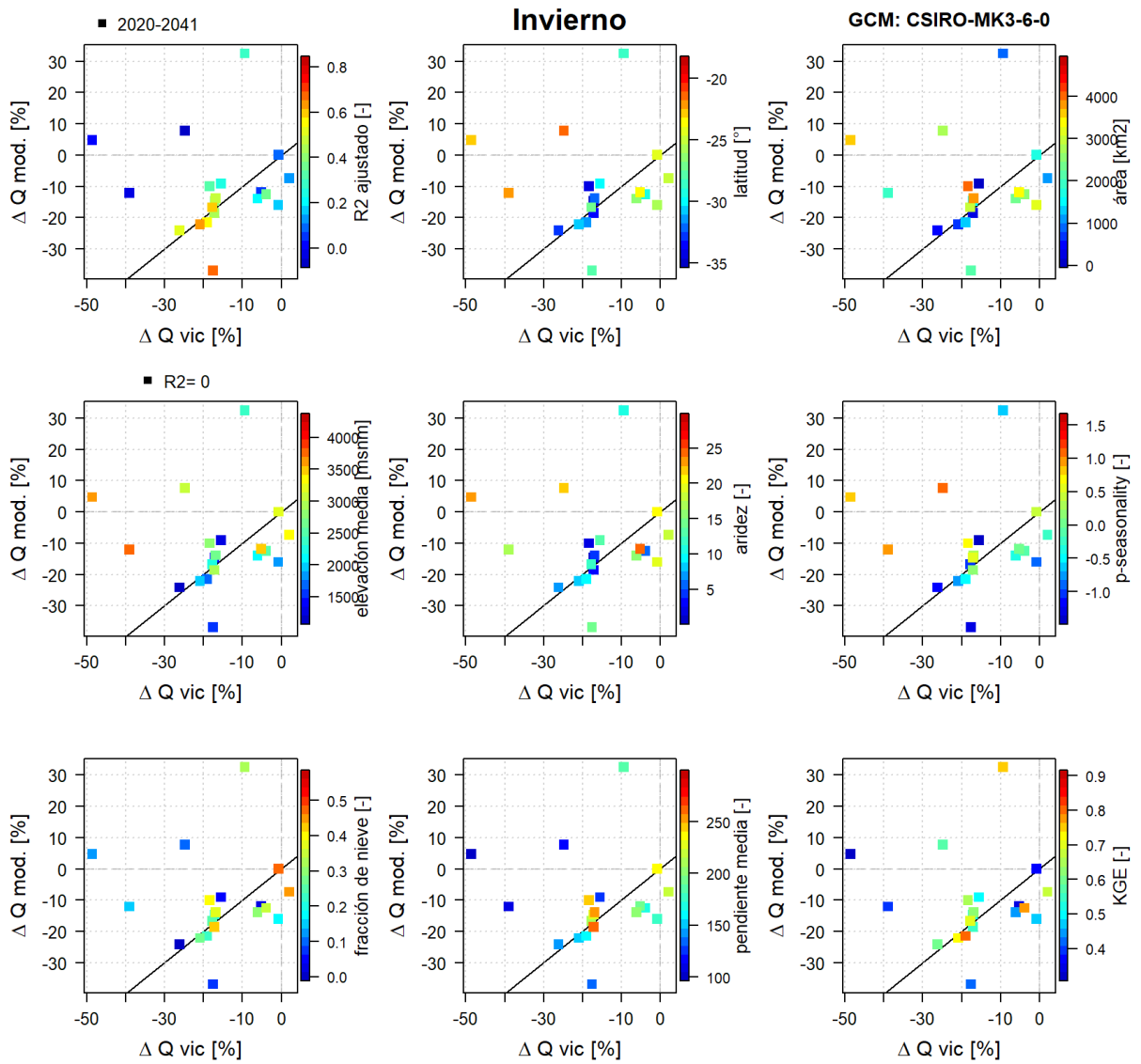
**Figura C- 6:** Comparación de variaciones de caudales VIC y caudales MOD en Verano Modificado junto a estadísticos y características de las cuencas para GCM MIROC-ESM. Período 2040-2059.



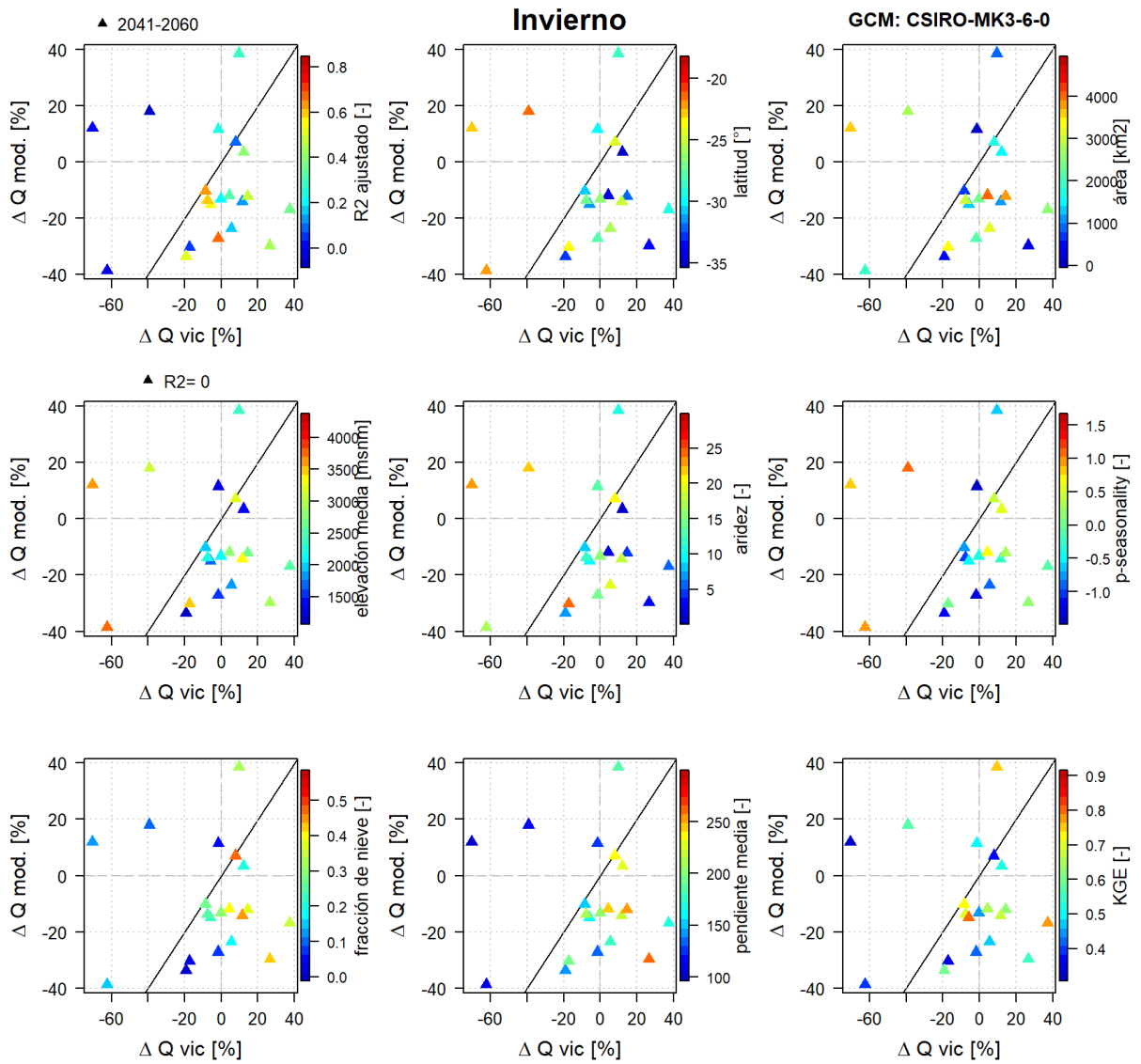
**Figura C- 7:** Comparación de variaciones de caudales VIC y caudales MOD en Año Entero junto a estadísticos y características de las cuencas para GCM CSIRO-MK3-6-0. Período 2020-2039.



**Figura C- 8:** Comparación de variaciones de caudales VIC y caudales MOD en Año Entero junto a estadísticos y características de las cuencas para GCM CSIRO-MK3-6-0. Período 2040-2059.

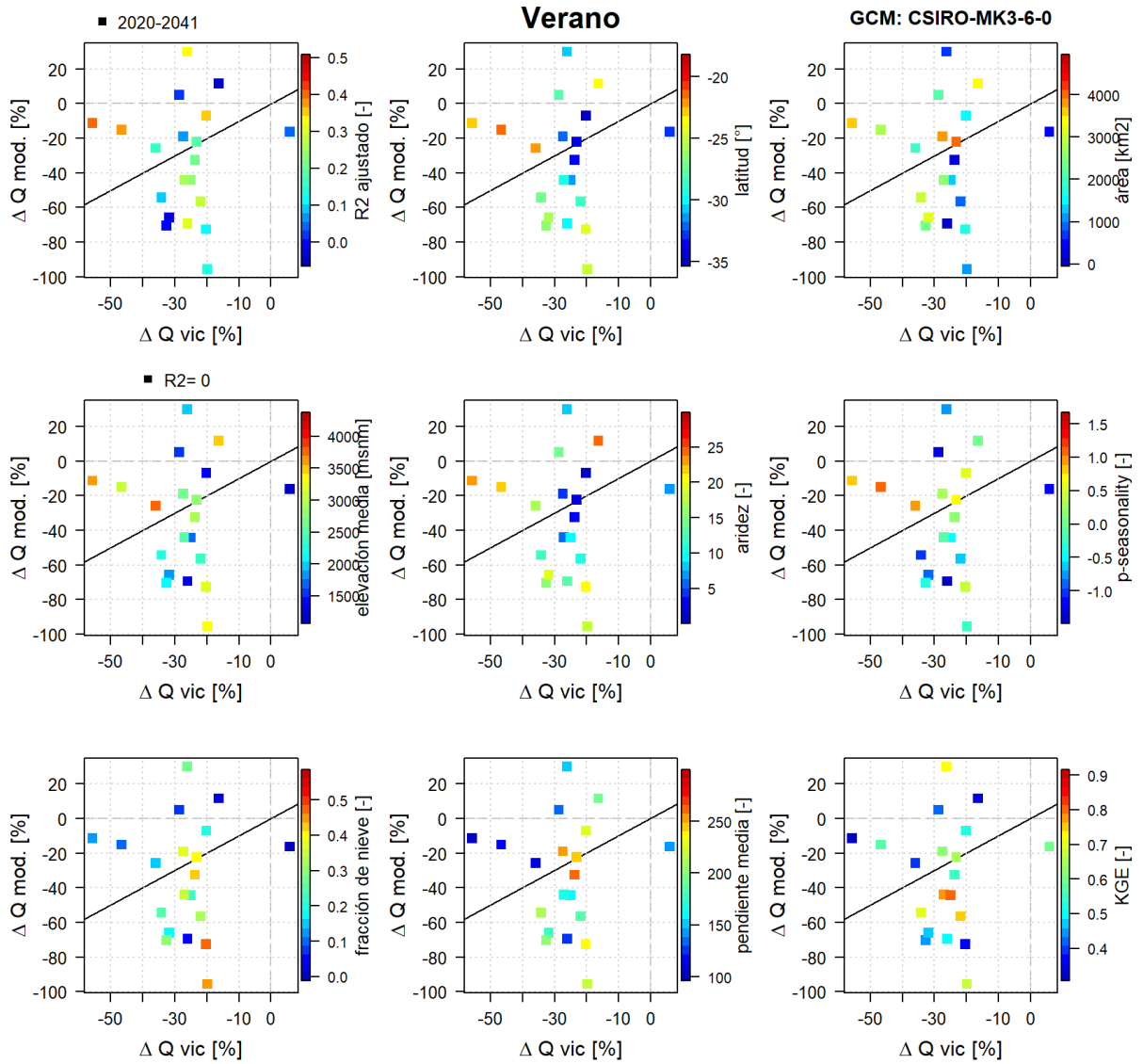


**Figura C- 9:** Comparación de variaciones de caudales VIC y caudales MOD en Invierno junto a estadísticos y características de las cuencas para GCM CSIRO-MK3-6-0. Período 2020-2039.

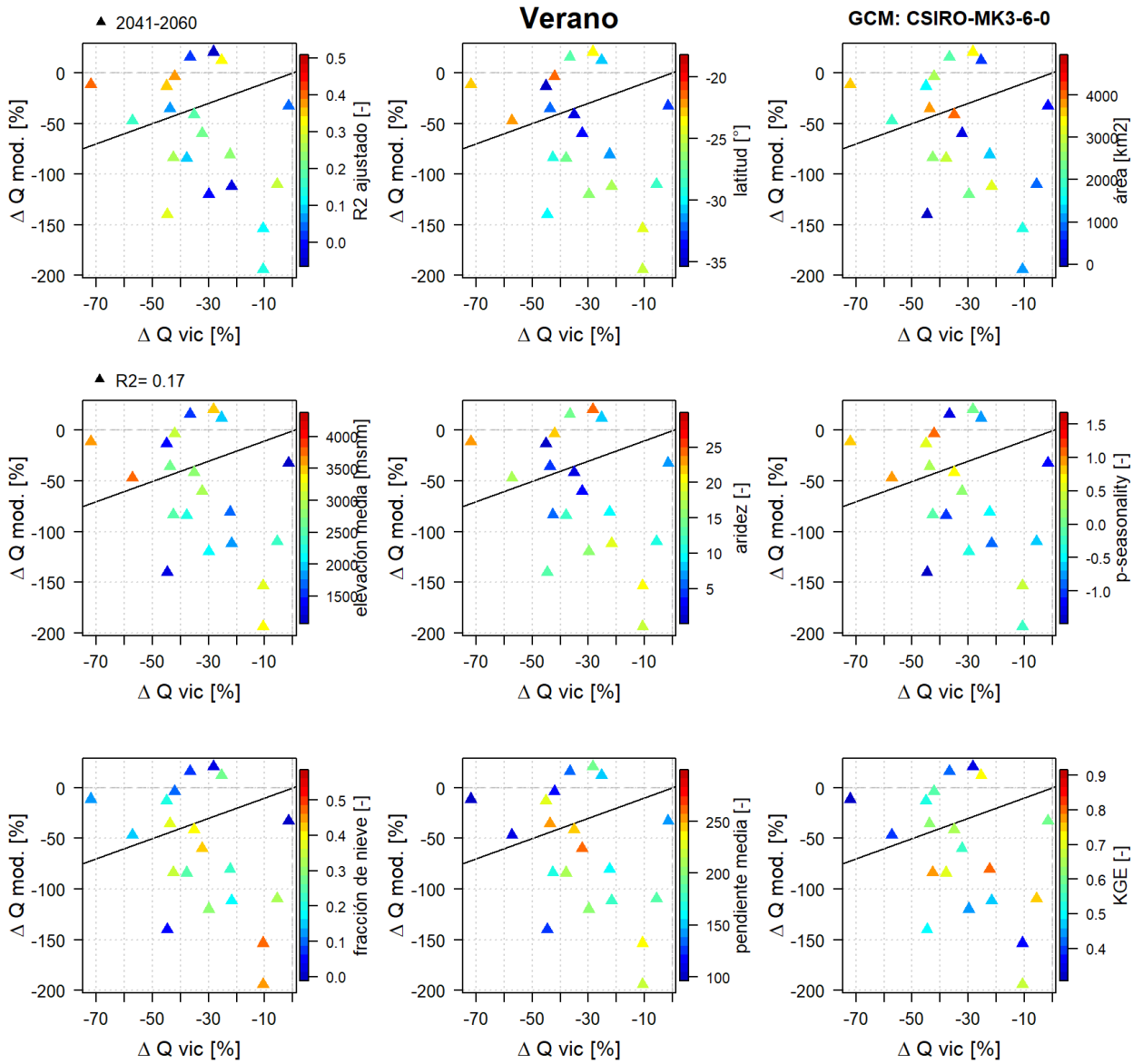


**Figura C- 10:** Comparación de variaciones de caudales VIC y caudales MOD en Invierno junto a estadísticos y características de las cuencas para GCM CSIRO-MK3-6-0. Período 2040-2059.

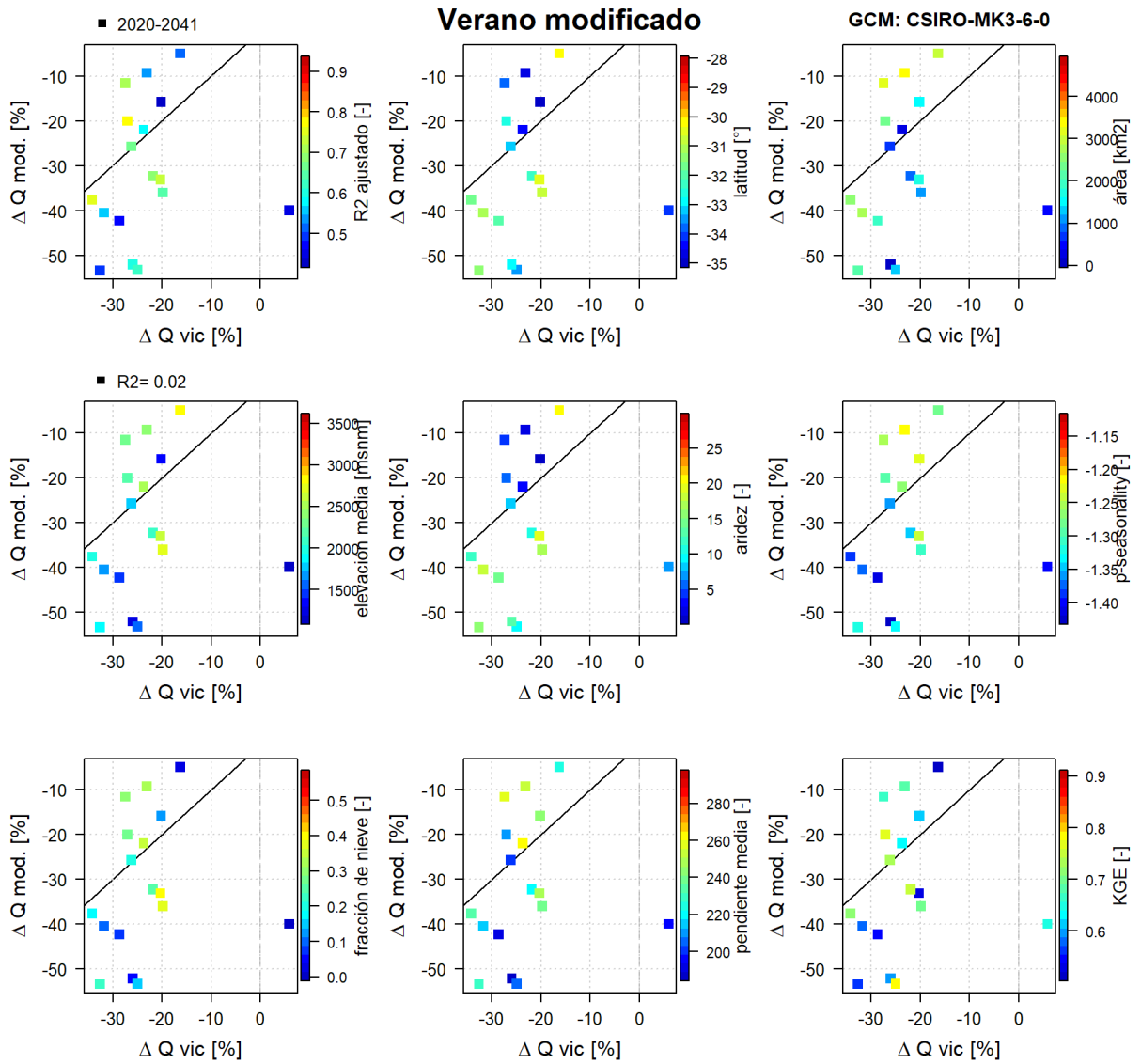




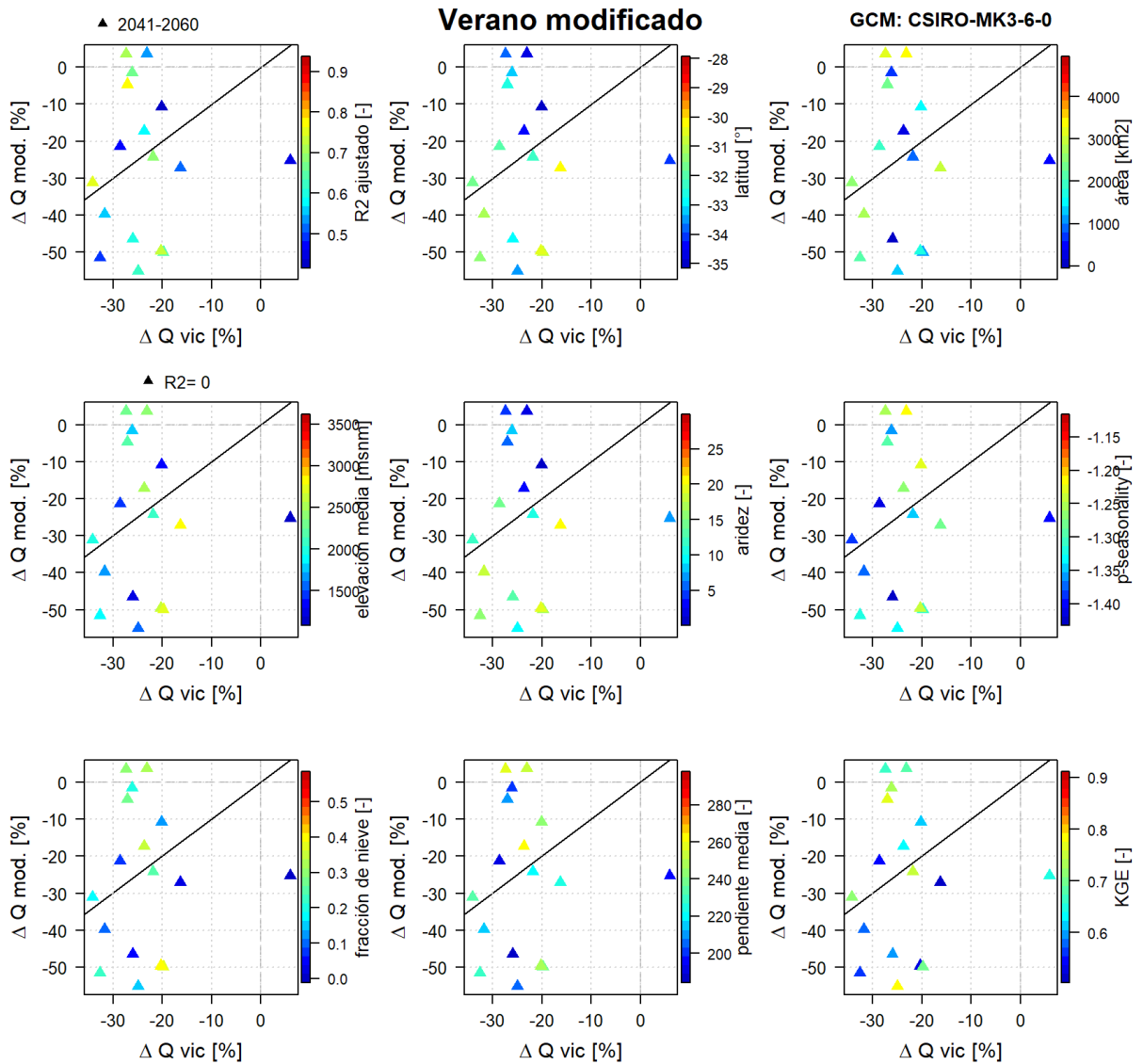
**Figura C- 11:** comparación de variaciones de caudales VIC y caudales MOD en Verano junto a estadísticos y características de las cuencas para GCM CSIRO-MK3-6-0. Período 2020-2039.



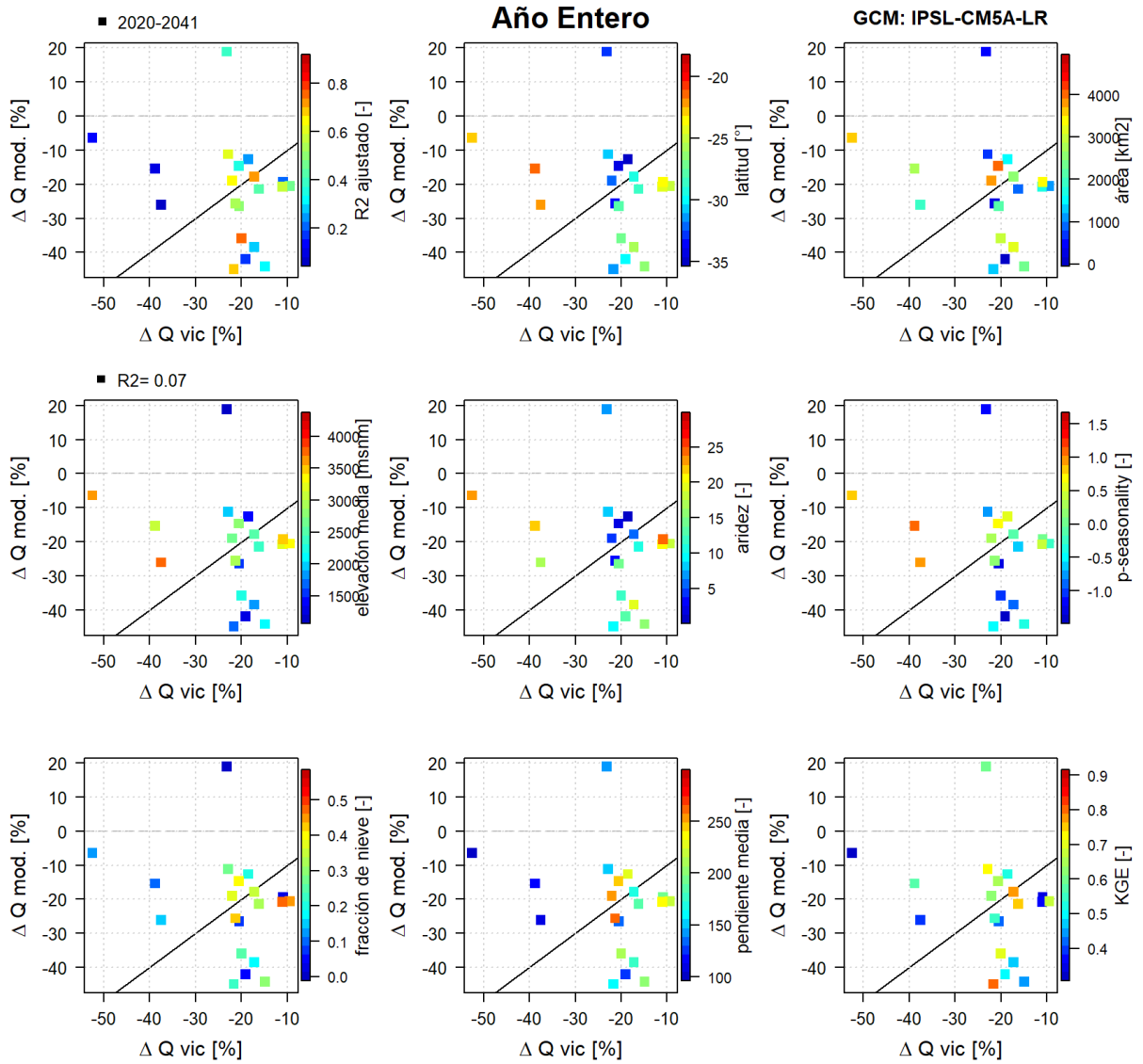
**Figura C- 12:** Comparación de variaciones de caudales VIC y caudales MOD en Verano junto a estadísticos y características de las cuencas para GCM CSIRO-MK3-6-0. Período 2040-2059.



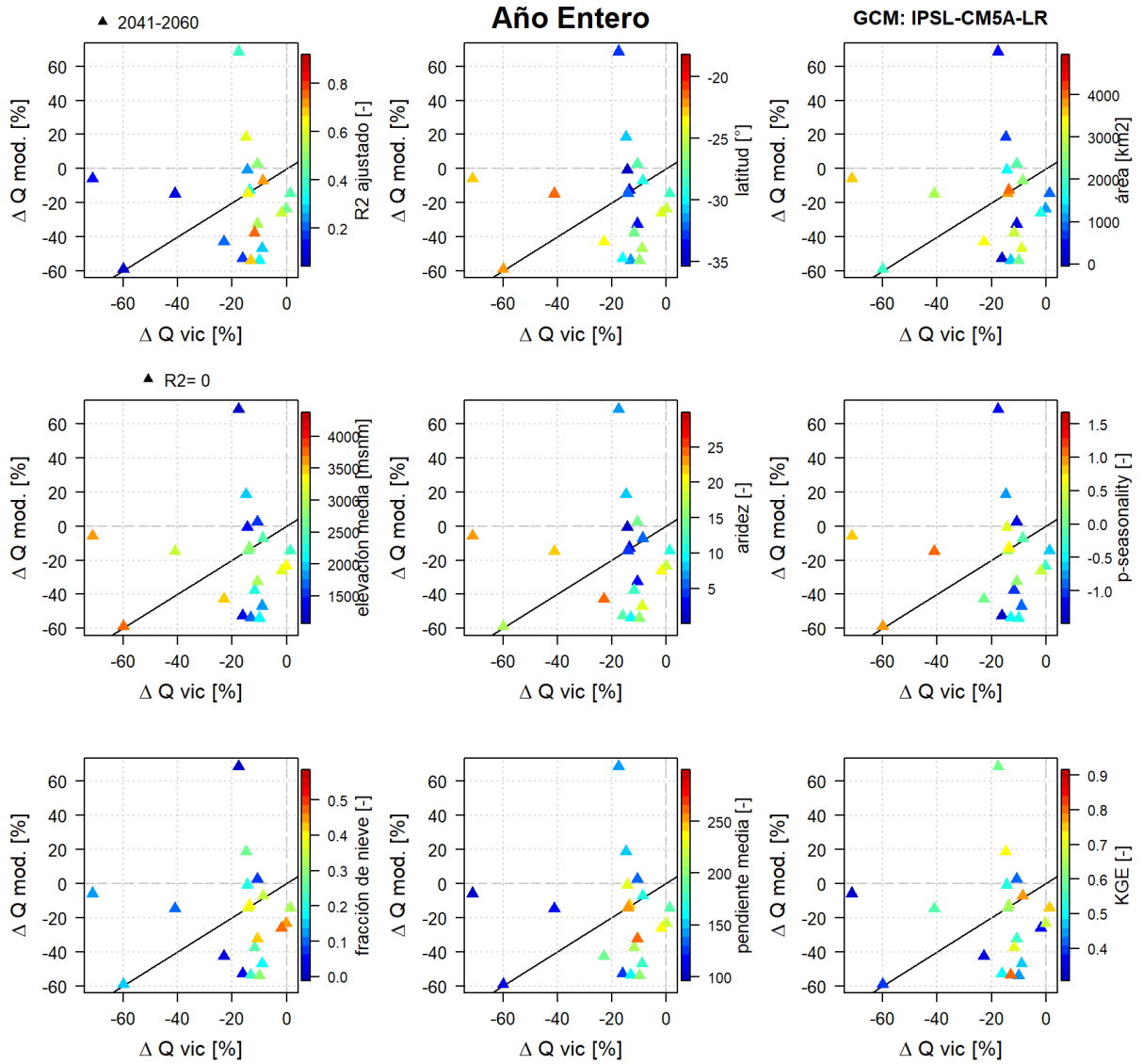
**Figura C- 13:** Comparación de variaciones de caudales VIC y caudales MOD en Verano Modificado junto a estadísticos y características de las cuencas para GCM CSIRO-MK3-6-0. Período 2020-2039.



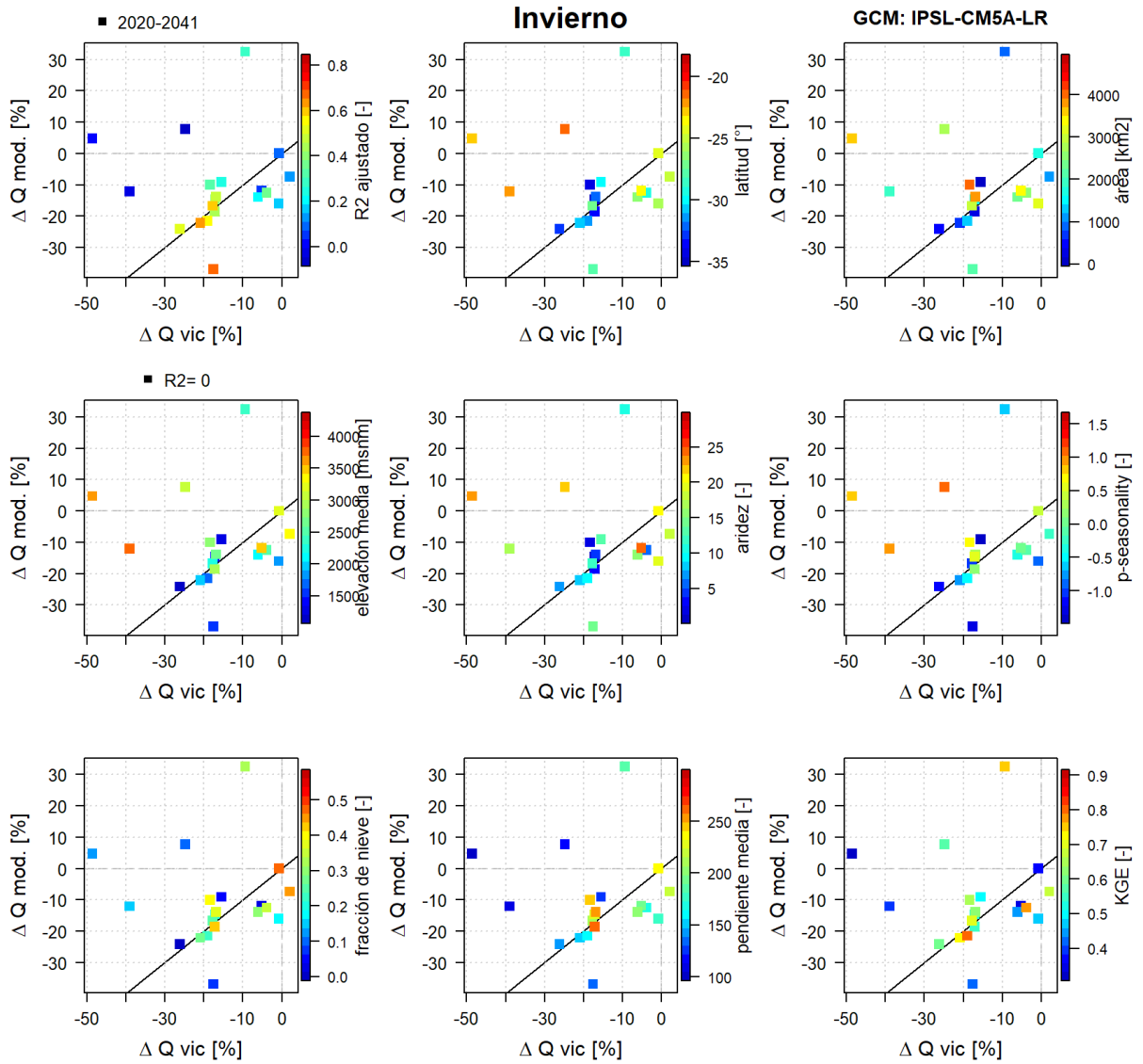
**Figura C- 14:** Comparación de variaciones de caudales VIC y caudales MOD en Verano Modificado junto a estadísticas y características de las cuencas para GCM CSIRO-MK3-6-0. Período 2040-2059.



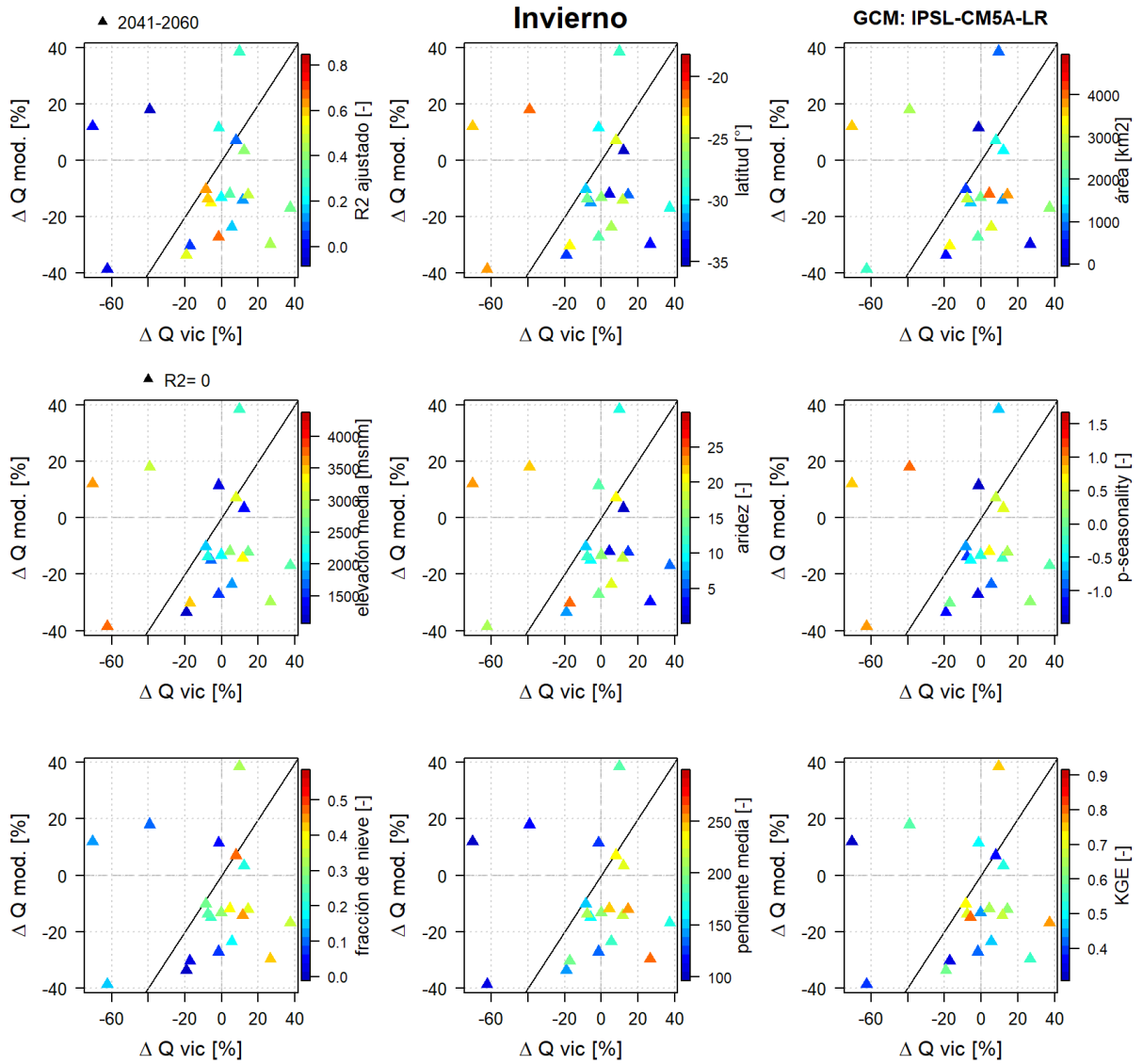
**Figura C- 15:** Comparación de variaciones de caudales VIC y caudales MOD en Año Entero junto a estadísticos y características de las cuencas para IPSL-CM5A-LR. Período 2020-2039.



**Figura C- 16:** Comparación de variaciones de caudales VIC y caudales MOD en Año Entero junto a estadísticos y características de las cuencas para IPSL-CM5A-LR. *Período 2040-2059.*

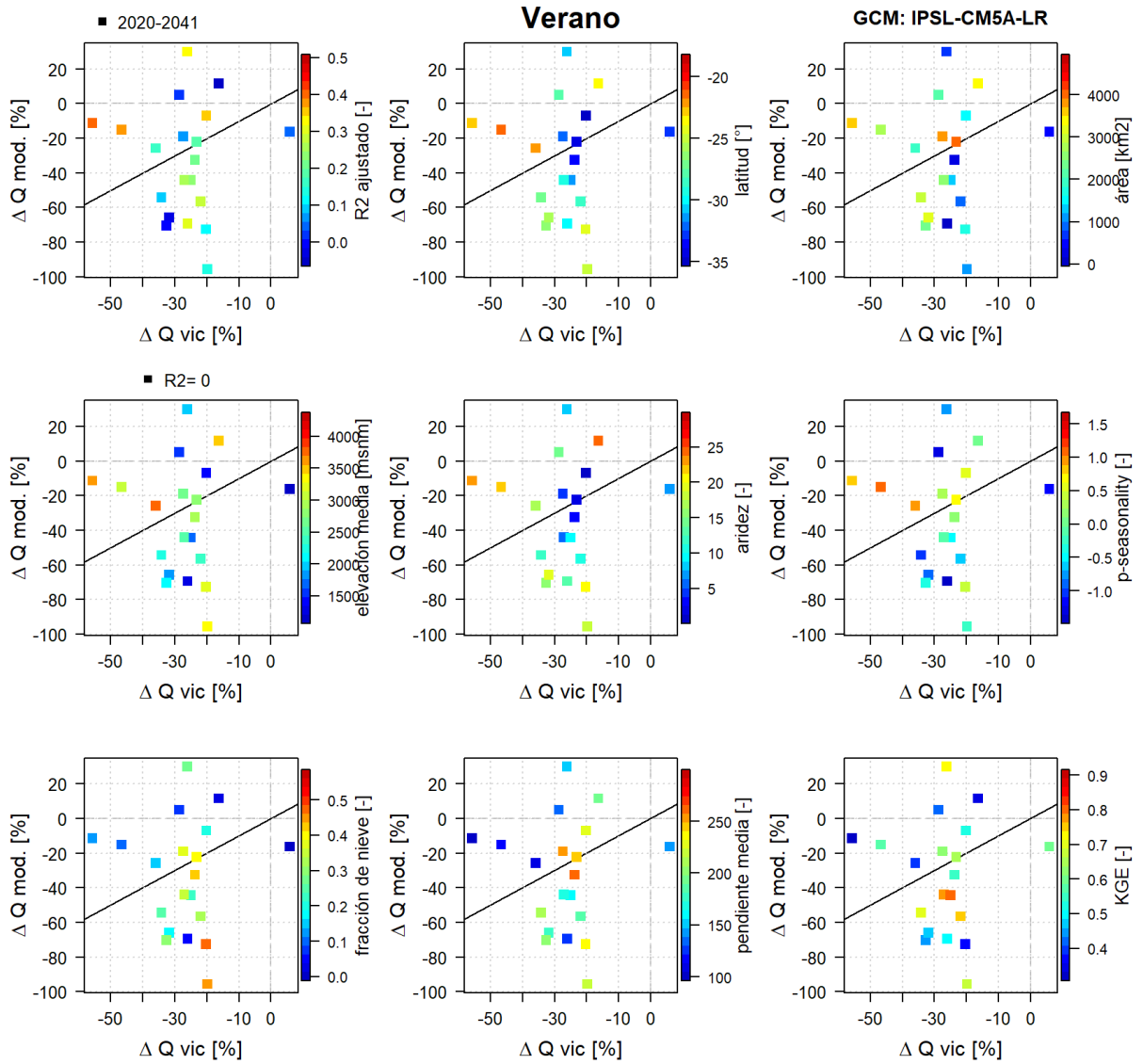


**Figura C- 17:** Comparación de variaciones de caudales VIC y caudales MOD en Invierno junto a estadísticos y características de las cuencas para IPSL-CM5A-LR. Período 2020-2039.

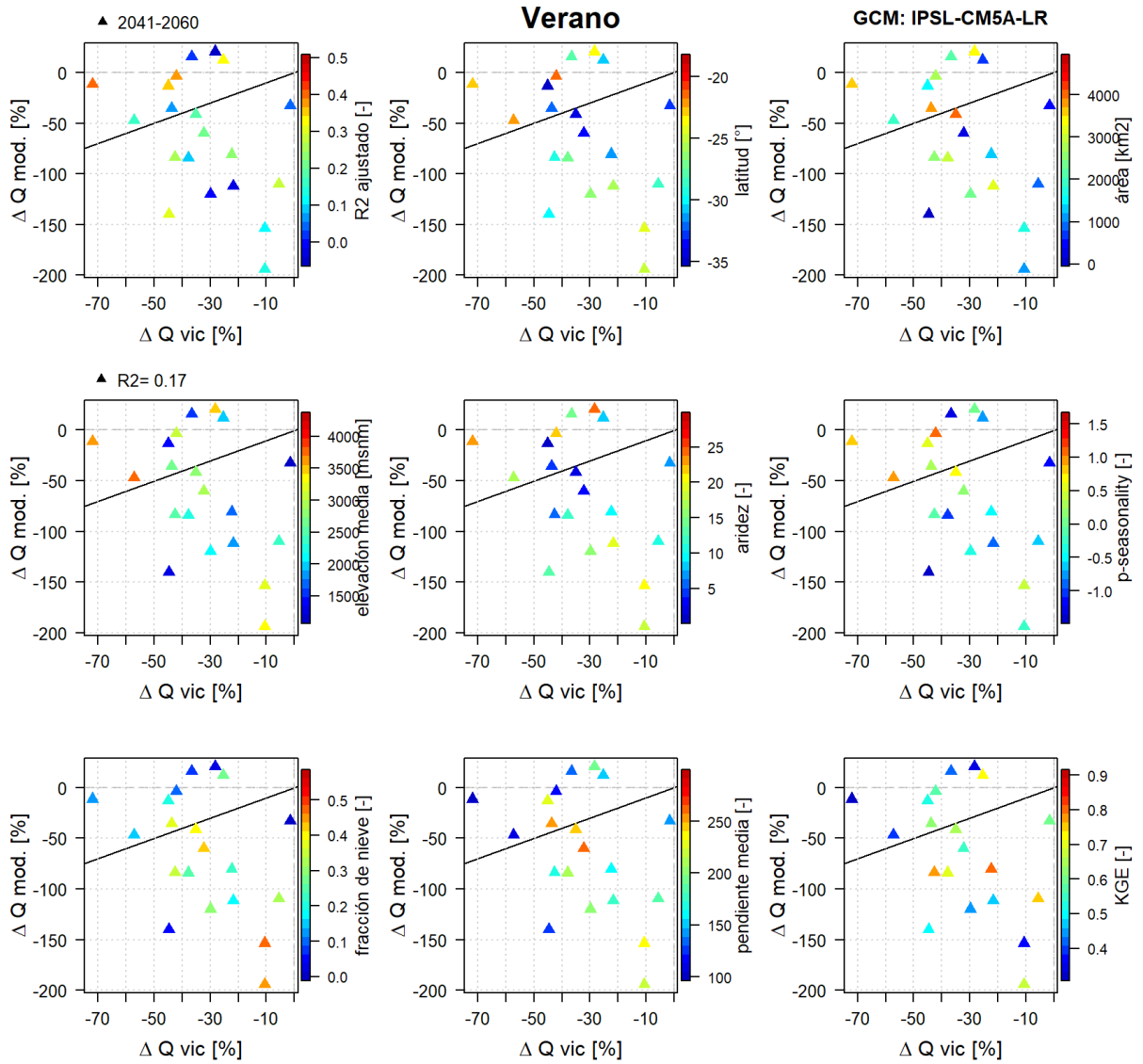


**Figura C- 18:** Comparación de variaciones de caudales VIC y caudales MOD en Invierno junto a estadísticos y características de las cuencas para IPSL-CM5A-LR. Período 2020-2039.

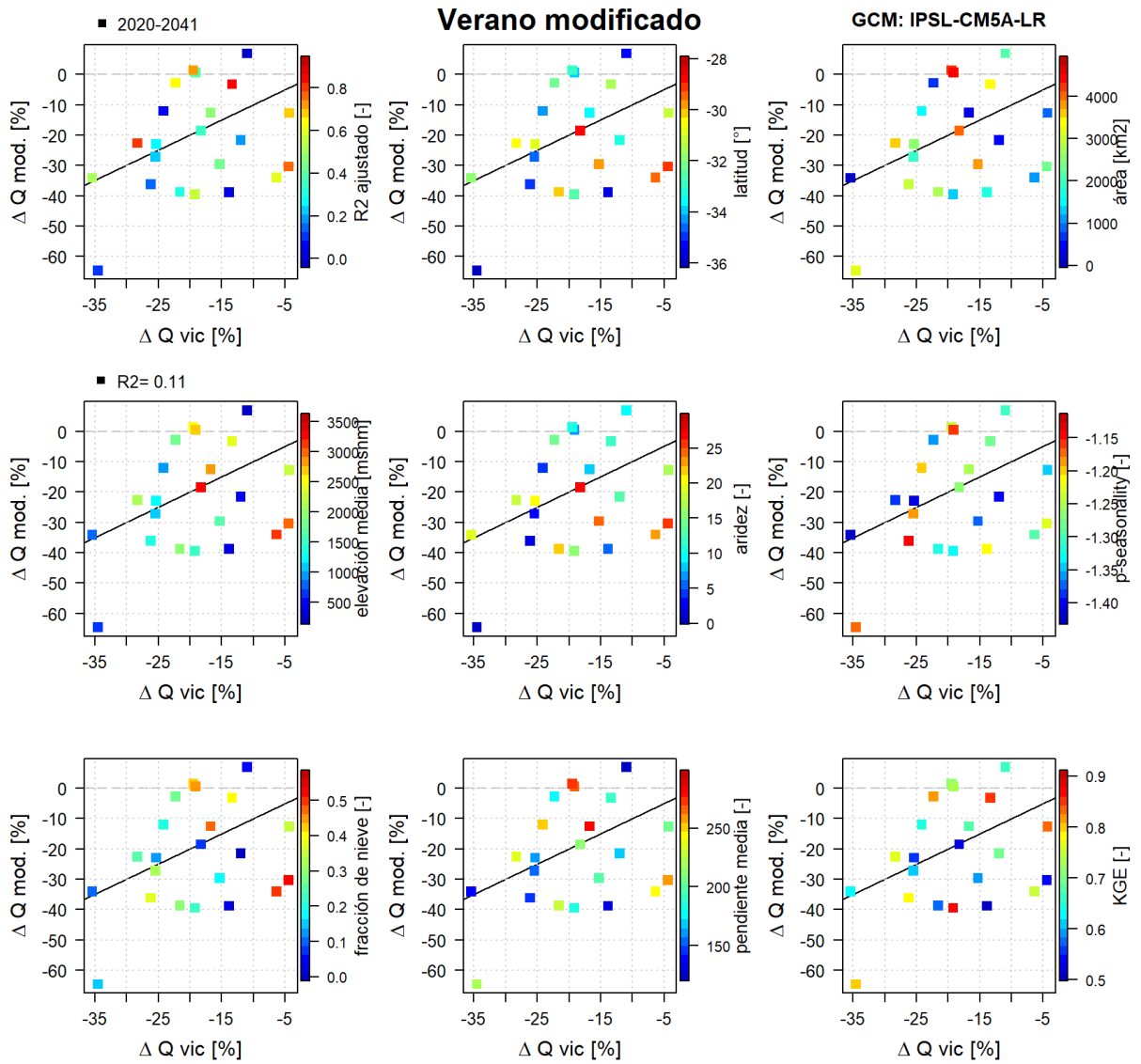




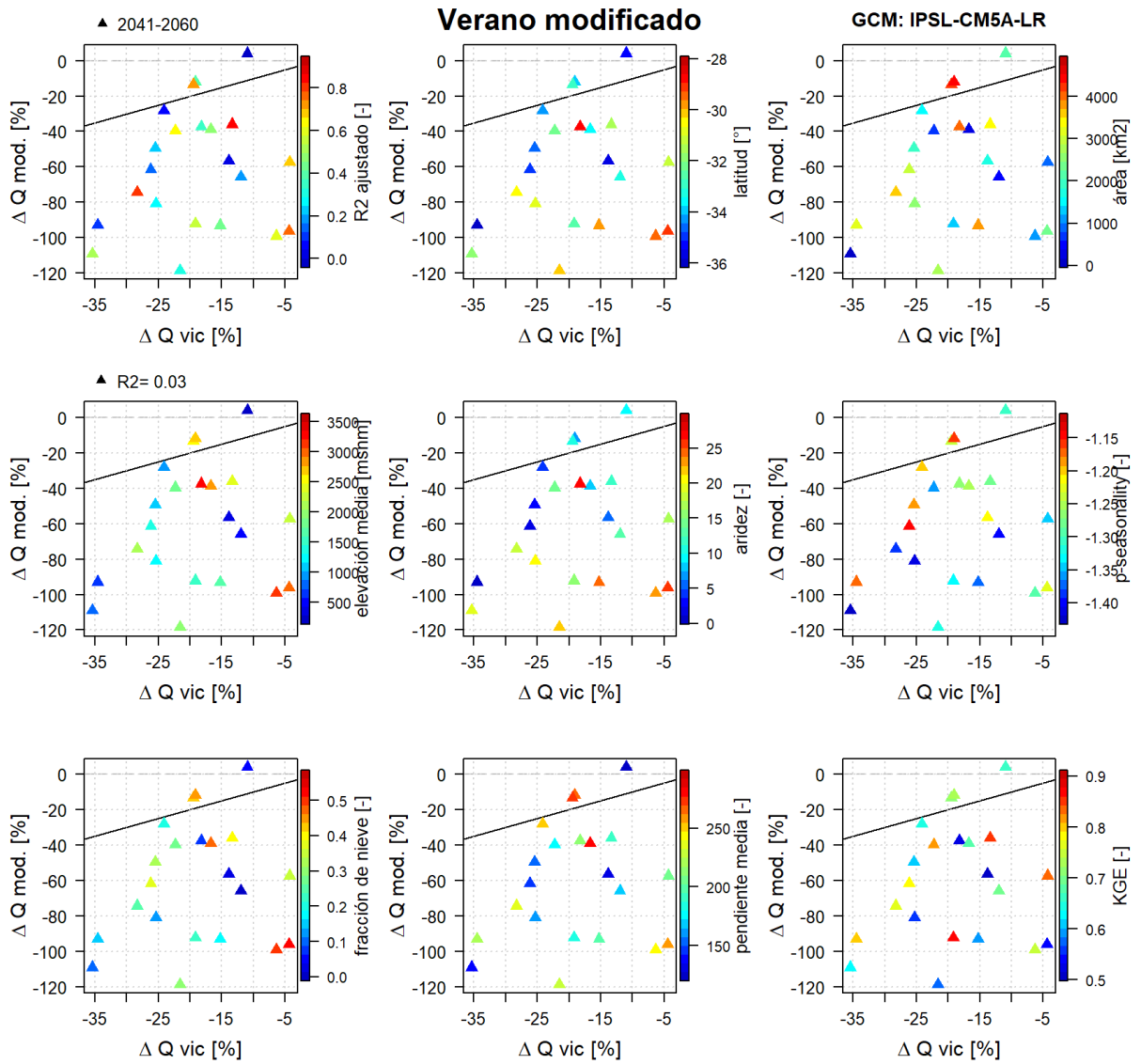
**Figura C- 19:** Comparación de variaciones de caudales VIC y caudales MOD en Verano junto a estadísticos y características de las cuencas para IPSL-CM5A-LR. Período 2040-2059.



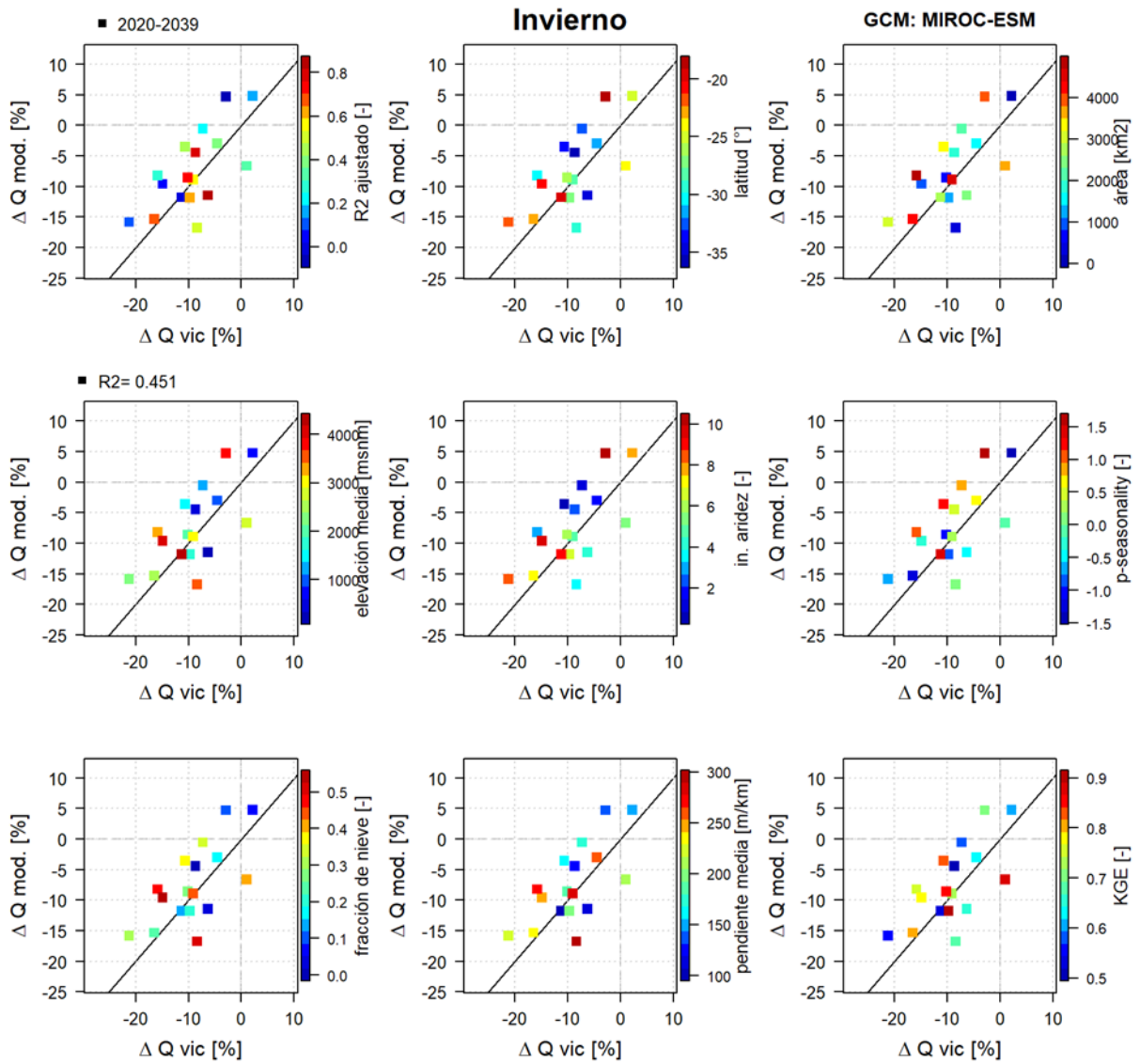
**Figura C- 20:** comparación de variaciones de caudales VIC y caudales MOD en Verano junto a estadísticos y características de las cuencas para IPSL-CM5A-LR. Período 2020-2039.



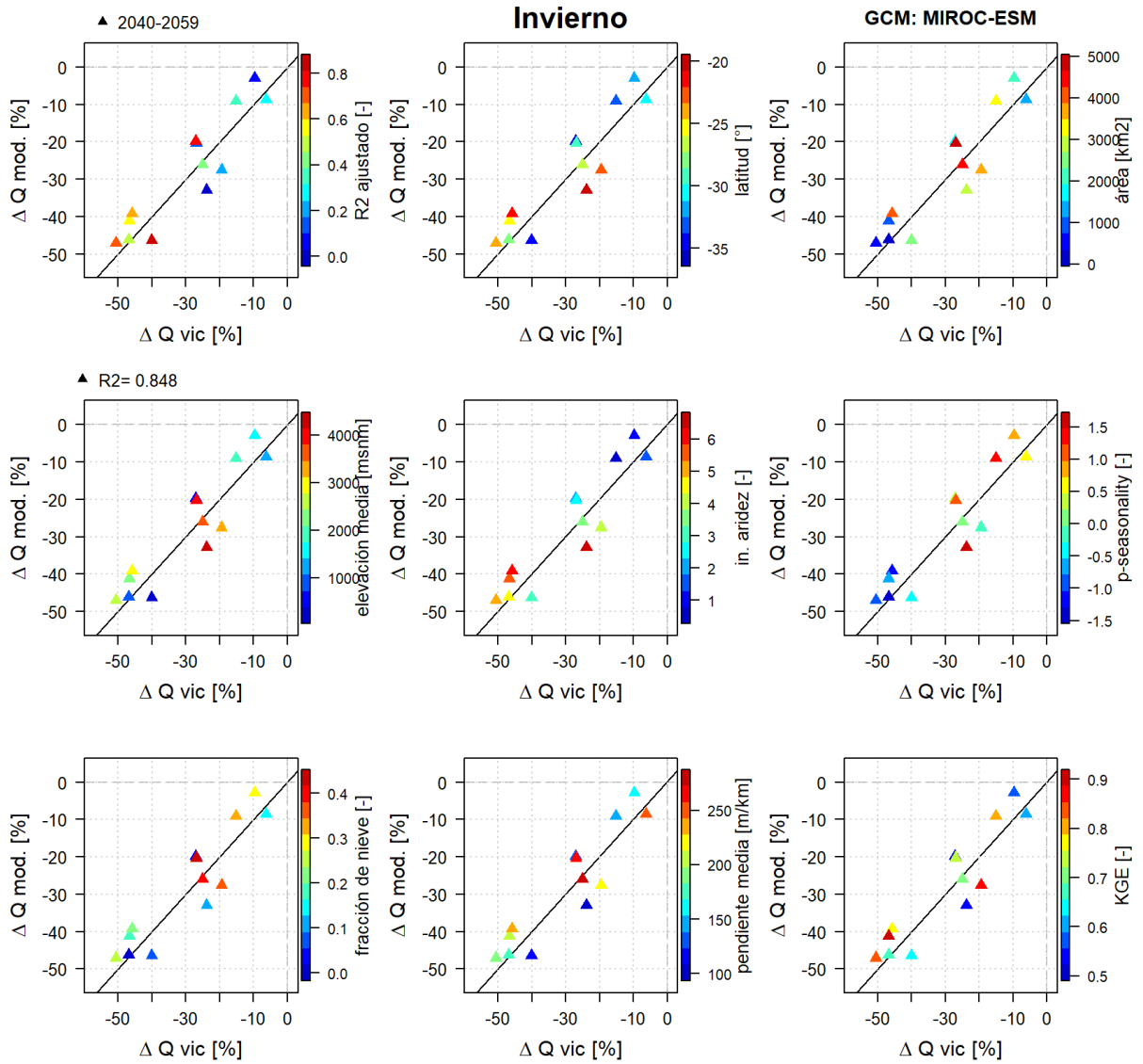
**Figura C- 21:** Comparación de variaciones de caudales VIC y caudales MOD en Verano Modificado junto a estadísticos y características de las cuencas para IPSL-CM5A-LR. Período 2020-2039.



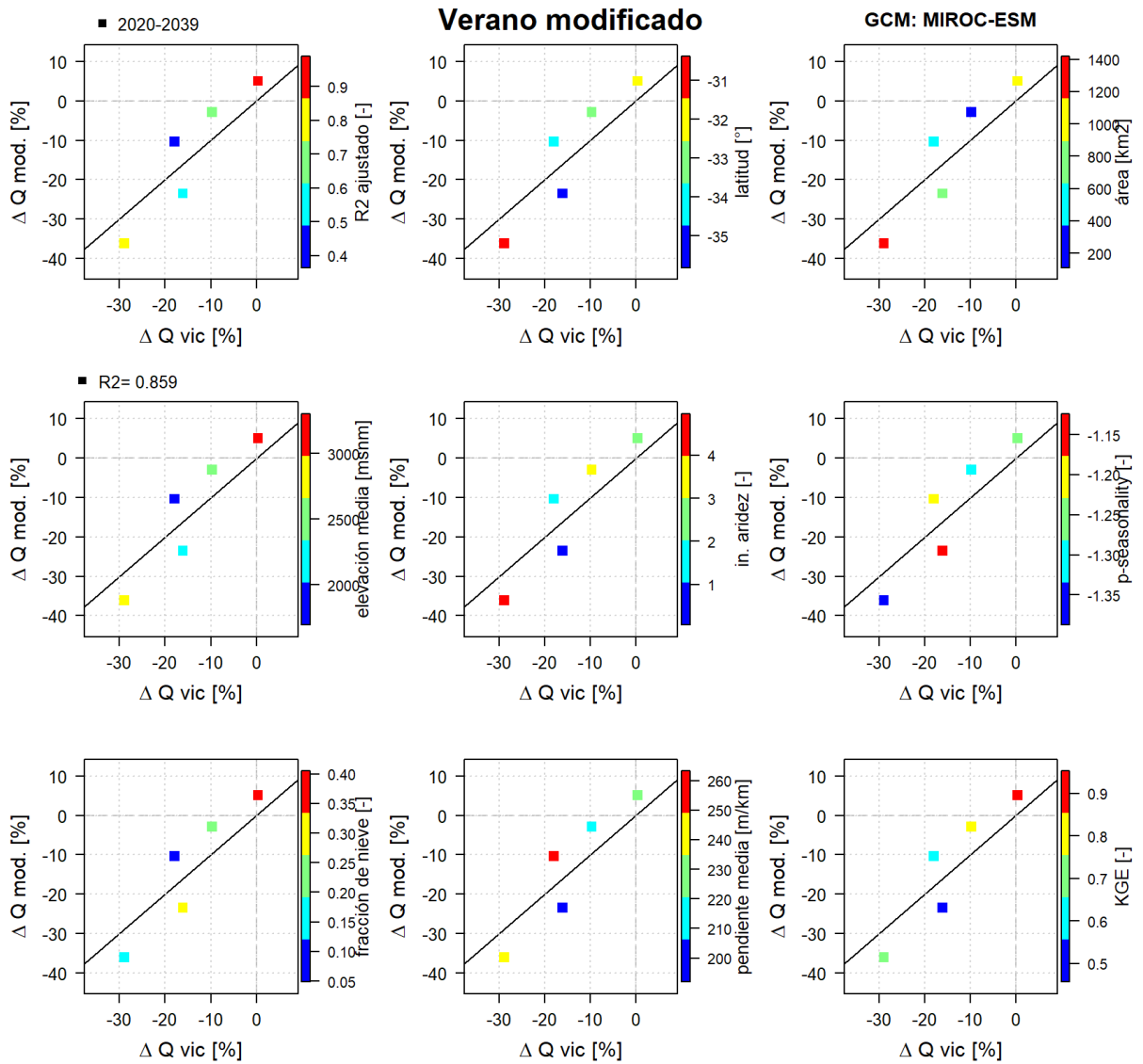
**Figura C- 22:** Comparación de variaciones de caudales VIC y caudales MOD en Verano Modificado junto a estadísticas y características de las cuencas para IPSL-CM5A-LR. Período 2040-2059.



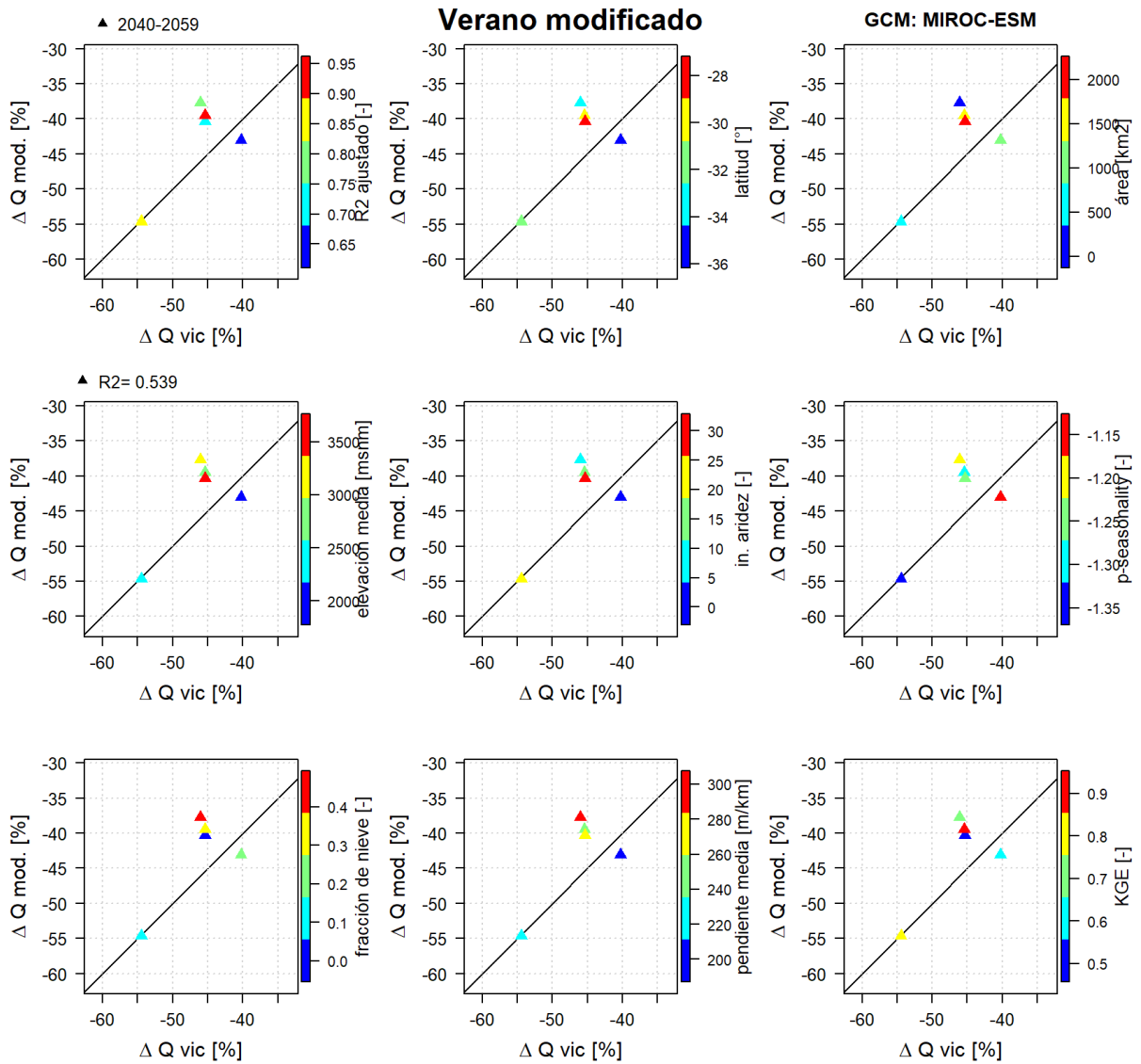
**Figura C- 23:** Comparación de variaciones de caudales VIC y caudales MOD en Invierno junto a estadísticos y características de las cuencas para GCM MIROC-ESM para error absoluto menor a 10%. Período 2020-2039.



**Figura C- 24:** comparación de variaciones de caudales VIC y caudales MOD en Invierno junto a estadísticos y características de las cuencas para GCM MIROC-ESM para error absoluto menor a 10%. Período 2040-2059.



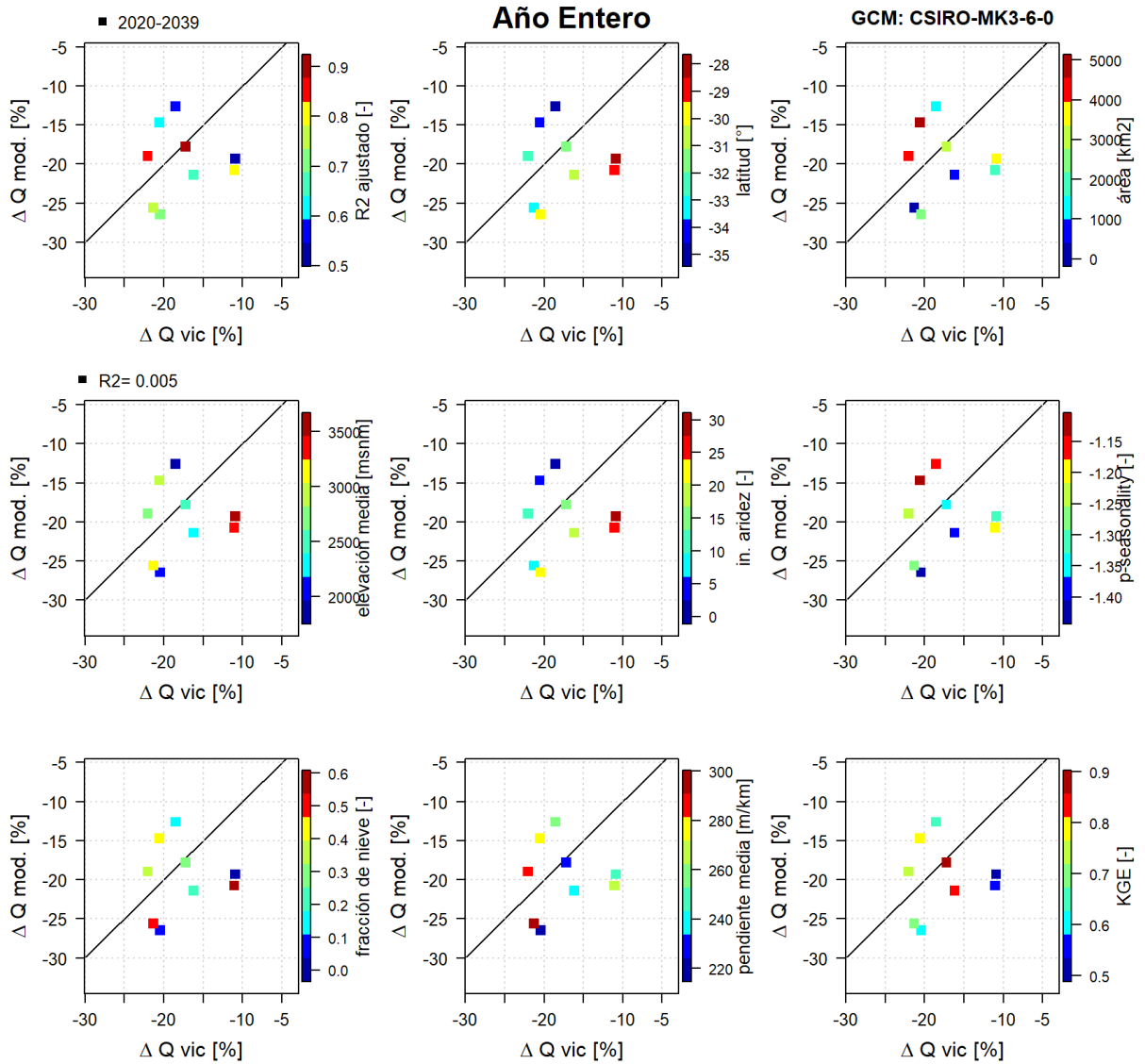
**Figura C- 25:** comparación de variaciones de caudales VIC y caudales MOD en Verano Modificado junto a estadísticos y características de las cuencas para GCM MIROC-ESM para error absoluto menor a 10%. Período 2020-2039.



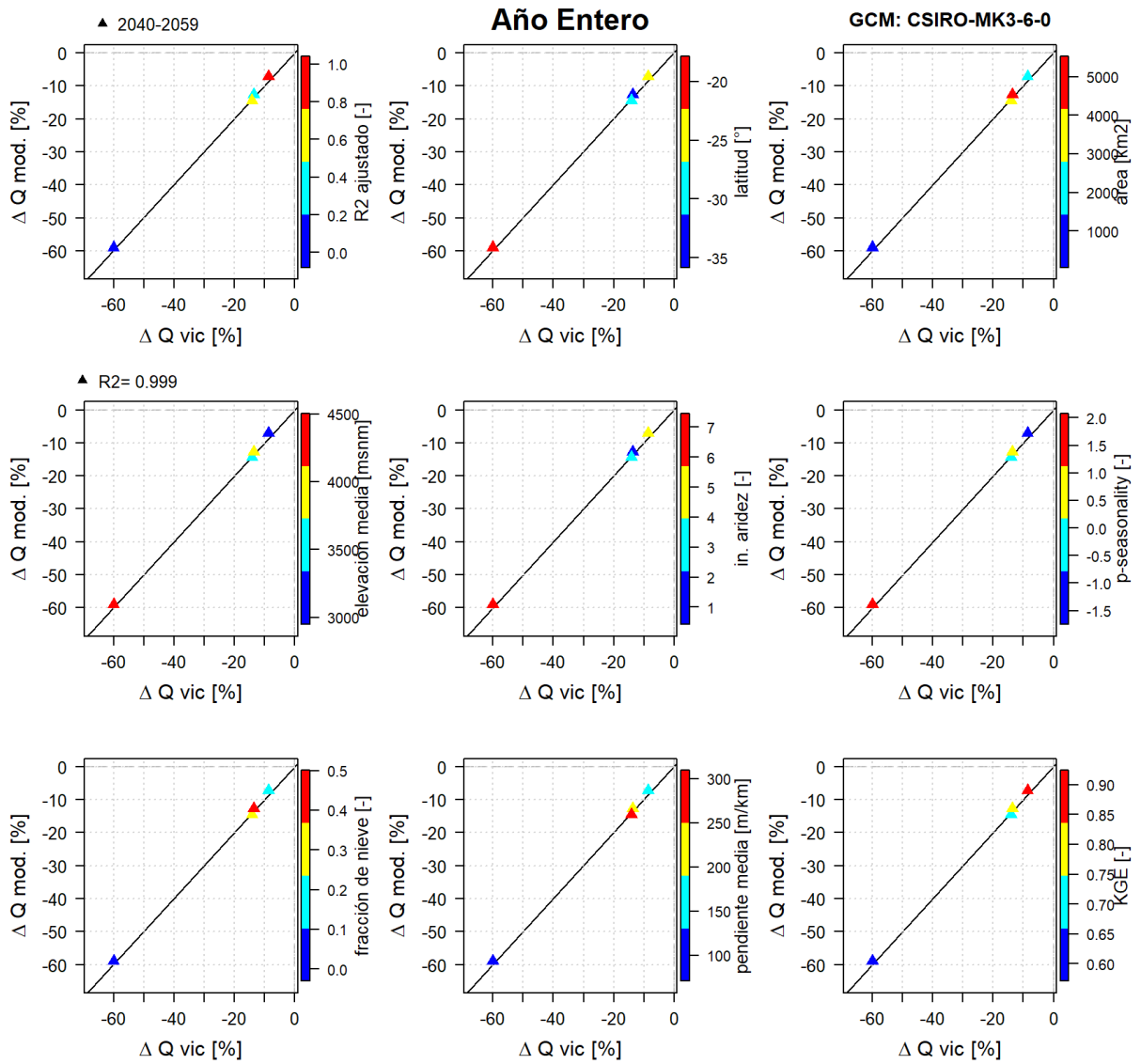
**Figura C- 26:** Comparación de variaciones de caudales VIC y caudales MOD en Verano Modificado junto a estadísticos y características de las cuencas para GCM MIROC-ESM para error absoluto menor a 10%.

Período 2040-2059.

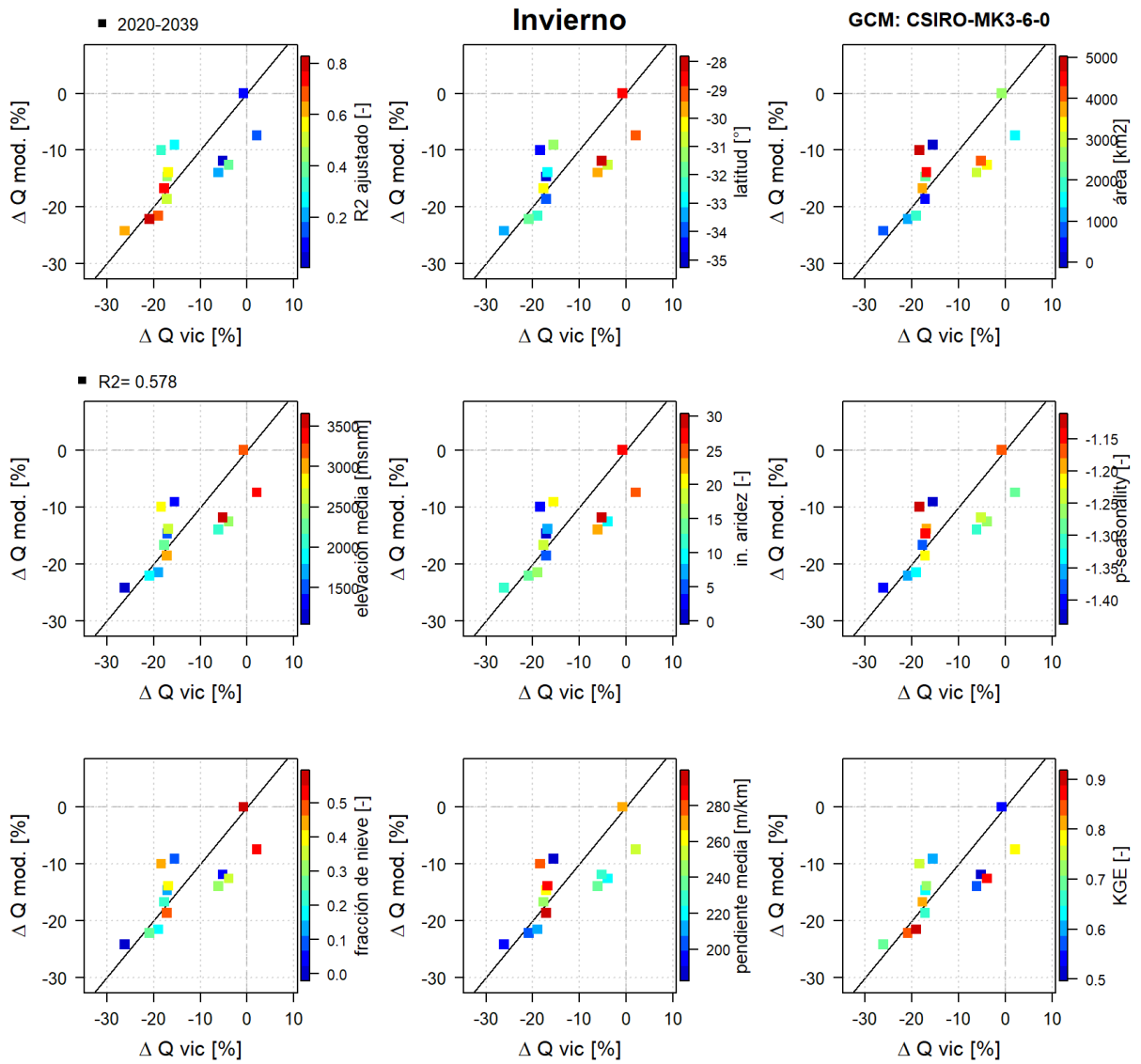




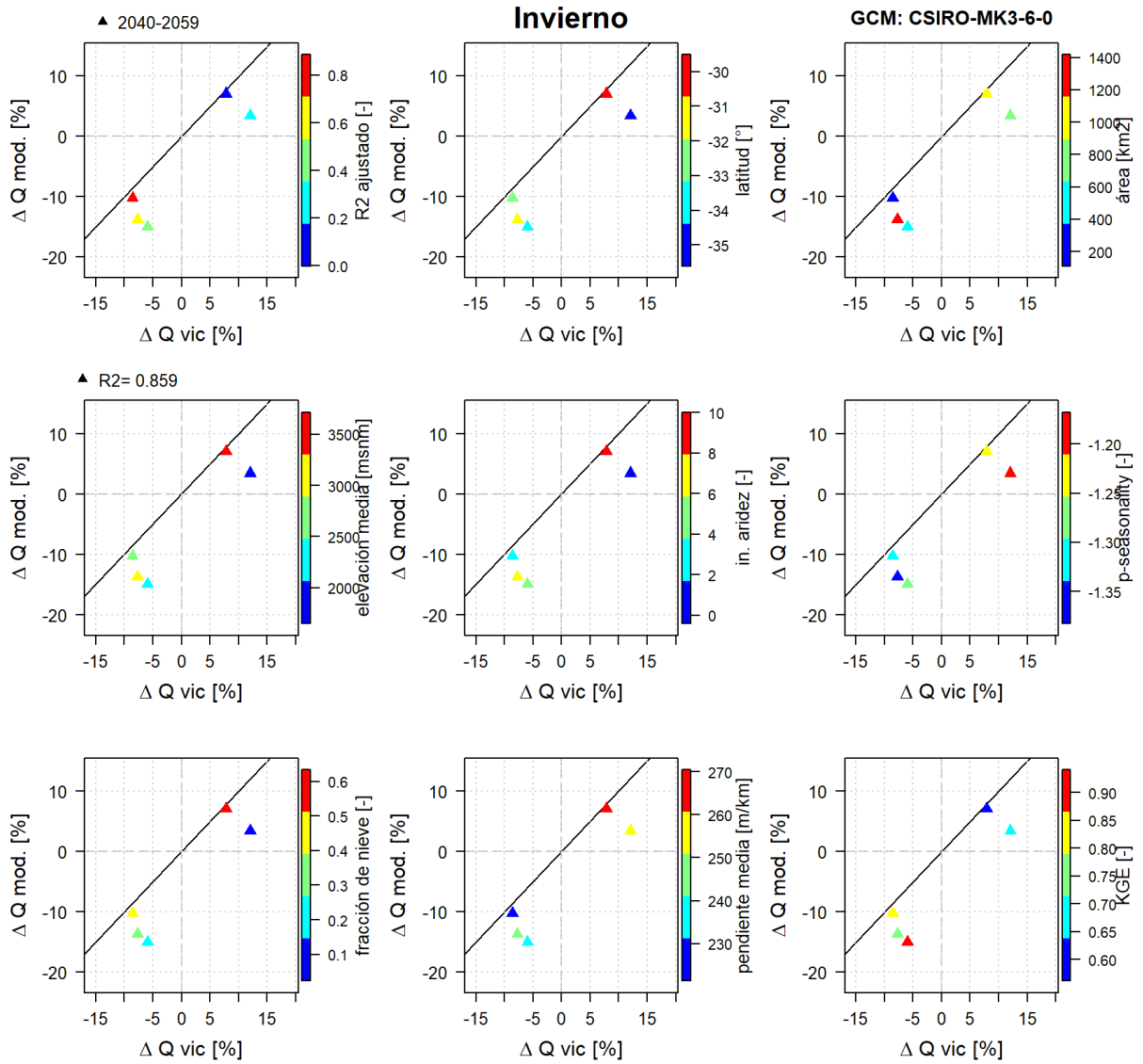
**Figura C- 27:** Comparación de variaciones de caudales VIC y caudales MOD en Año Entero junto a estadísticos y características de las cuencas para GCM CSIRO-MK3-6-0 para error absoluto menor a 10%.  
Período 2020-2039.



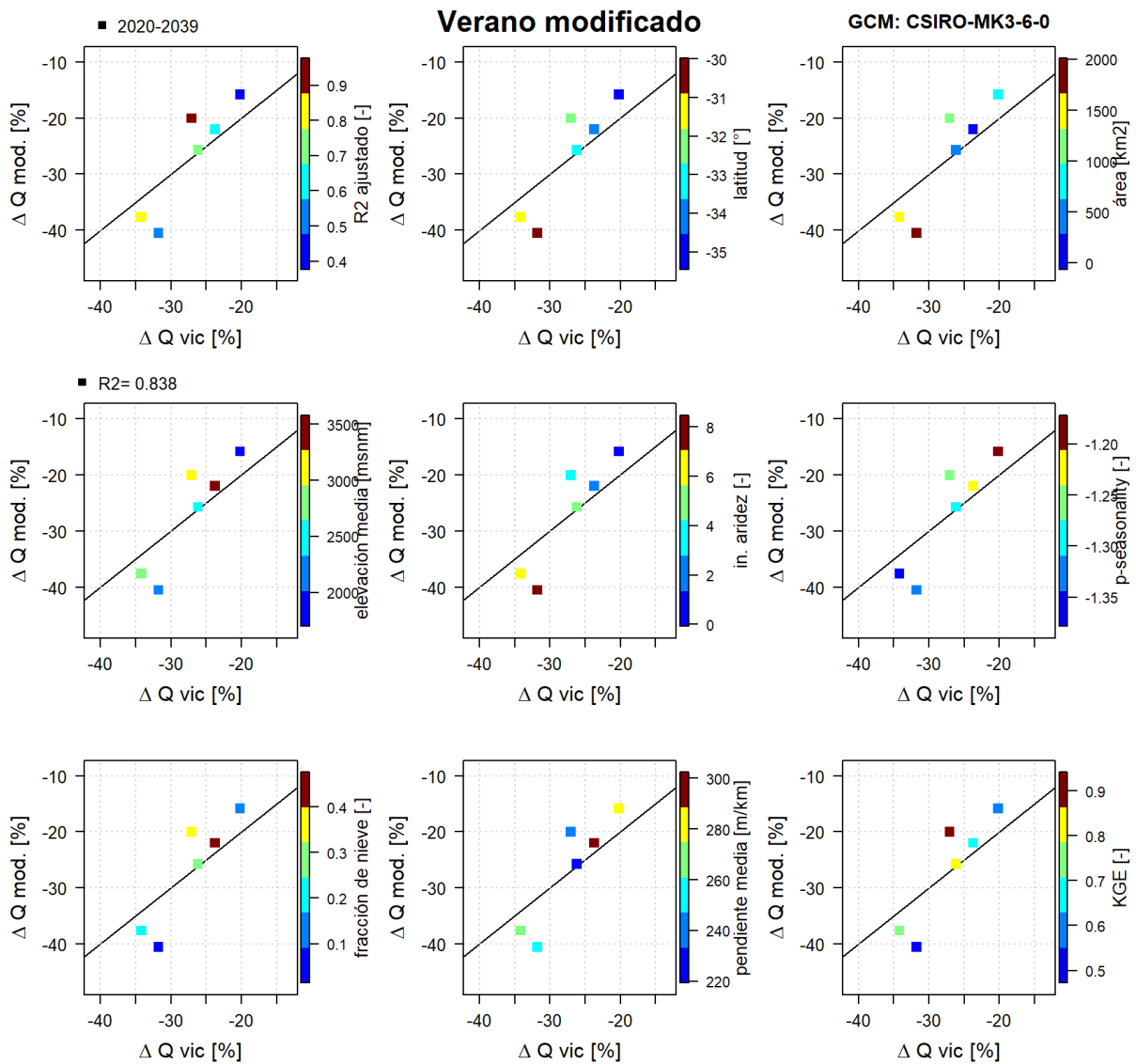
**Figura C- 28:** Comparación de variaciones de caudales VIC y caudales MOD en Año Entero junto a estadísticos y características de las cuencas para GCM CSIRO-MK3-6-0 para error absoluto menor a 10%. Período 2040-2059.



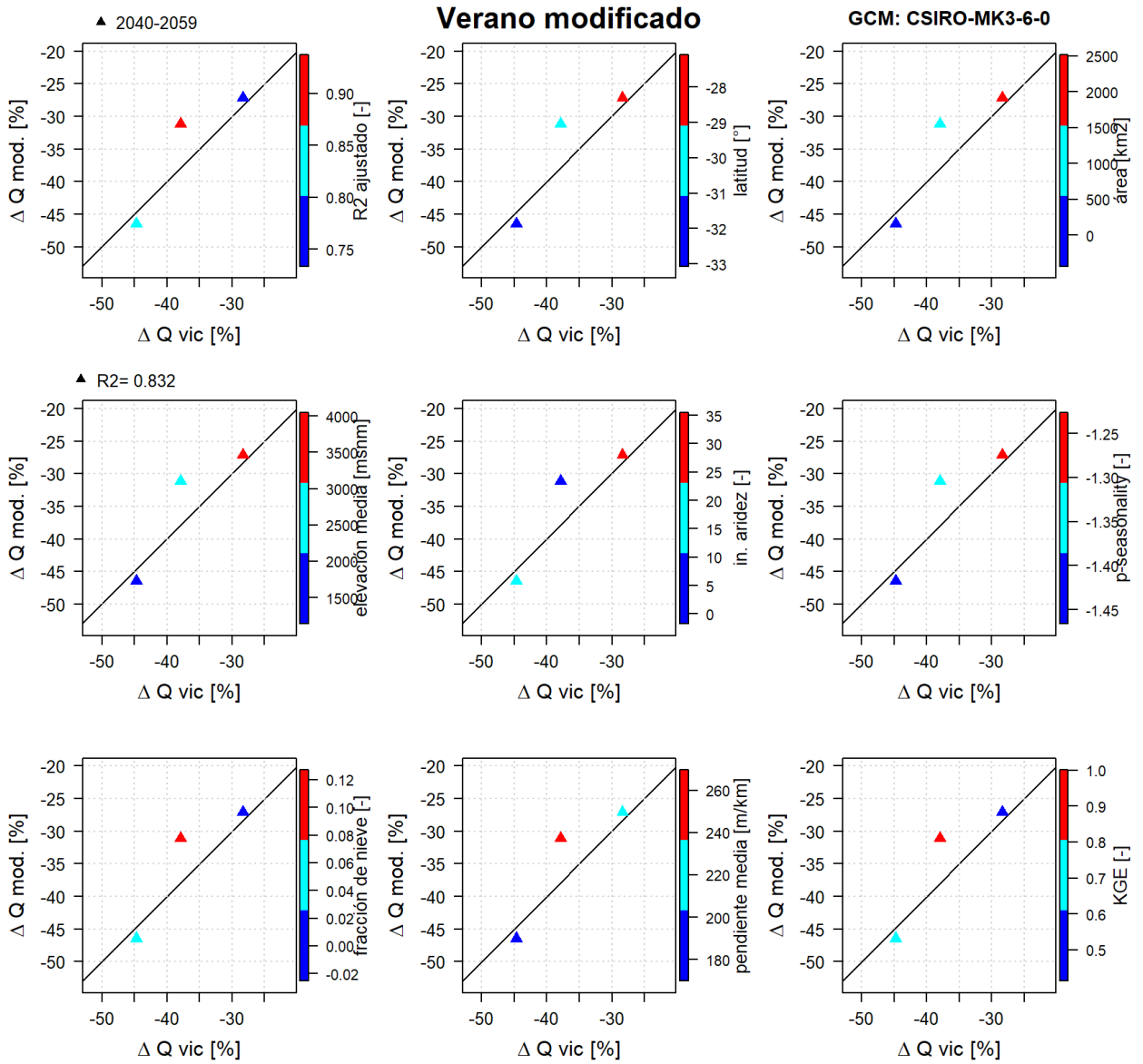
**Figura C- 29:** Comparación de variaciones de caudales VIC y caudales MOD en Invierno junto a estadísticos y características de las cuencas para GCM CSIRO-MK3-6-0 para error absoluto menor a 10%. Período 2020-2039.



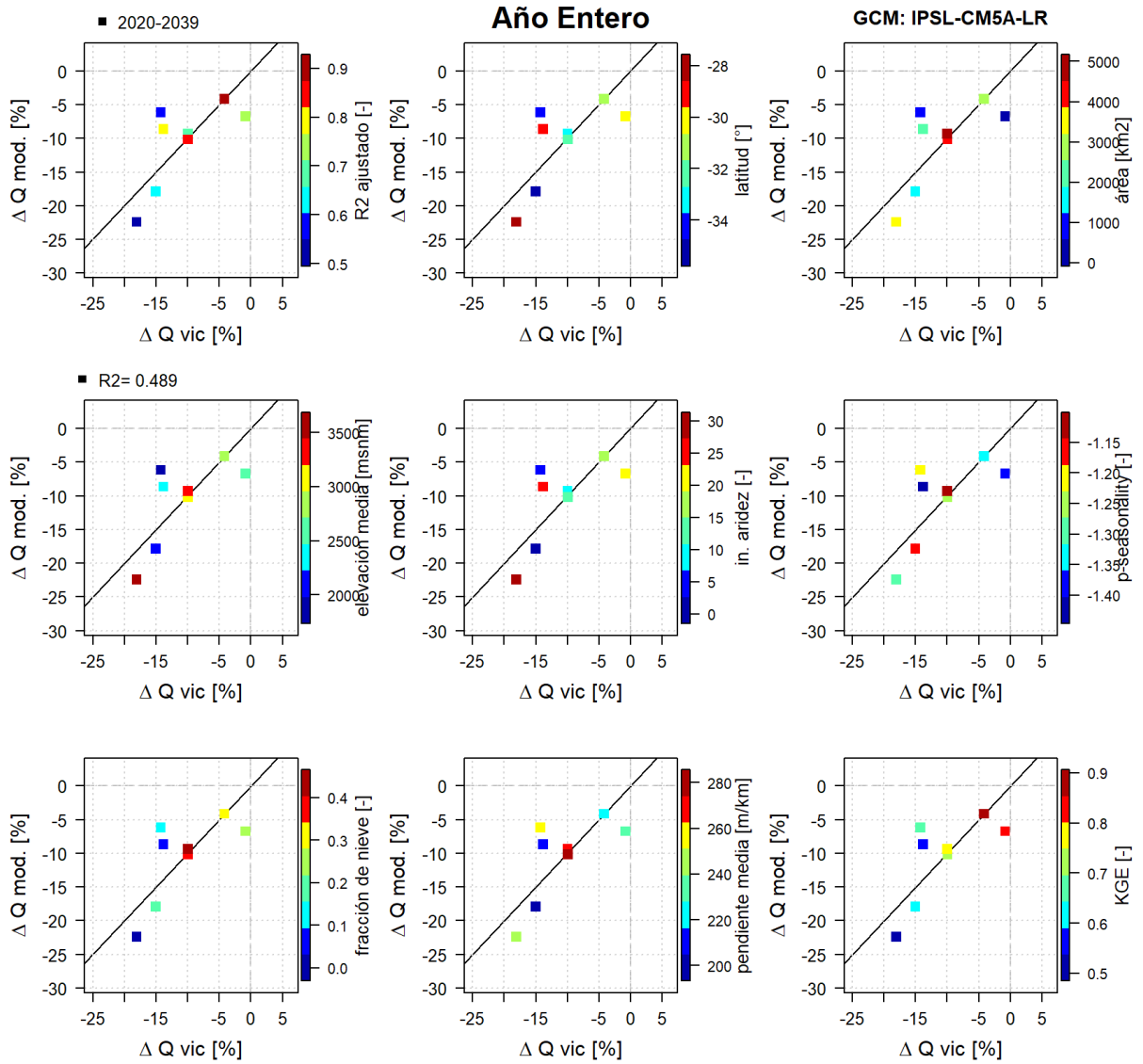
**Figura C- 30:** Comparación de variaciones de caudales VIC y caudales MOD en Invierno junto a estadísticos y características de las cuencas para GCM CSIRO-MK3-6-0 para error absoluto menor a 10%. Período 2020-2039.



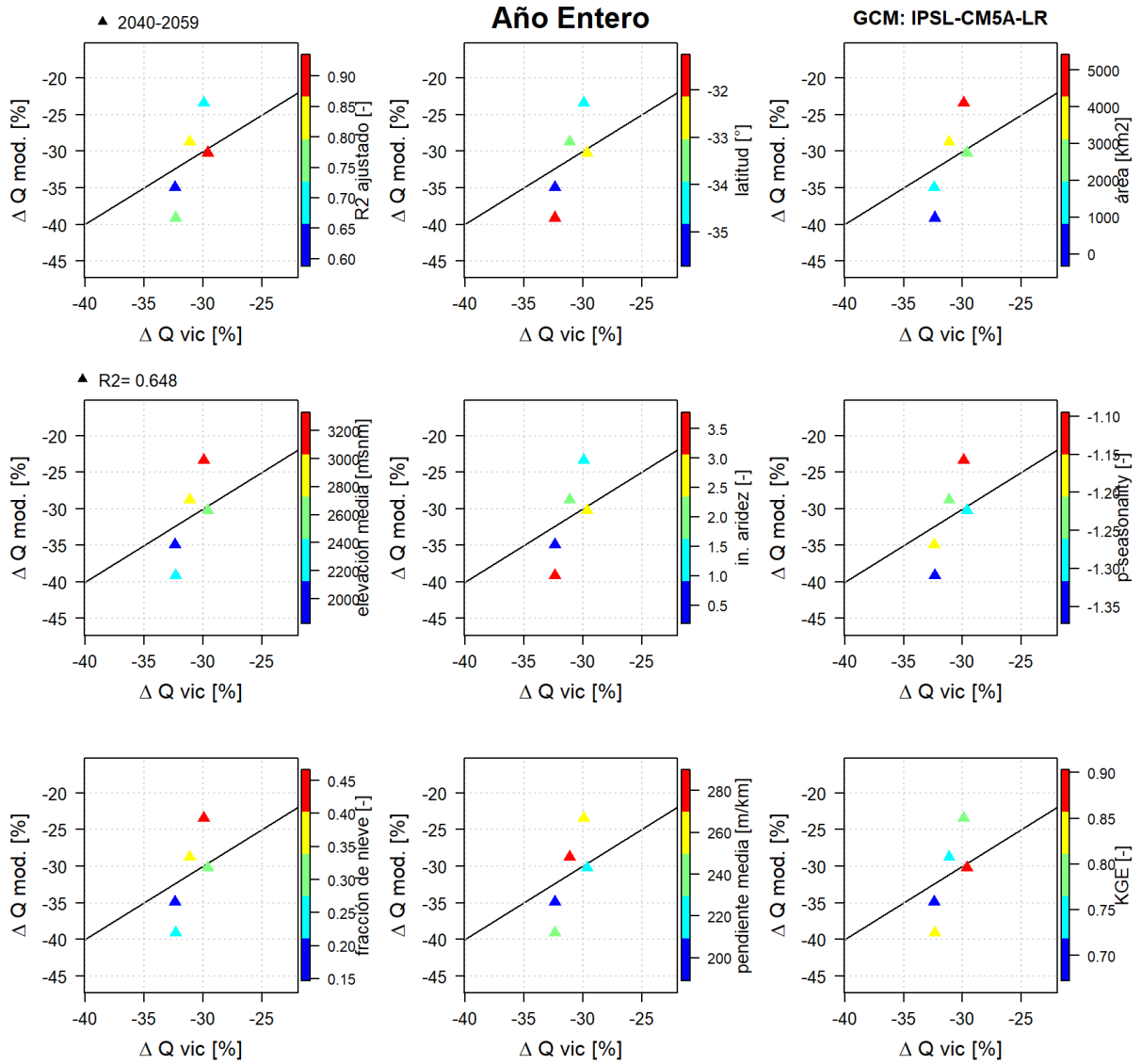
**Figura C- 31:** Comparación de variaciones de caudales VIC y caudales MOD en Verano Modificado junto a estadísticos y características de las cuencas para GCM CSIRO-MK3-6-0 para error absoluto menor a 10%. Período 2020-2039.



**Figura C- 32:** Comparación de variaciones de caudales VIC y caudales MOD en Verano Modificado junto a estadísticos y características de las cuencas para GCM CSIRO-MK3-6-0 para error absoluto menor a 10%. Período 2040-2059.

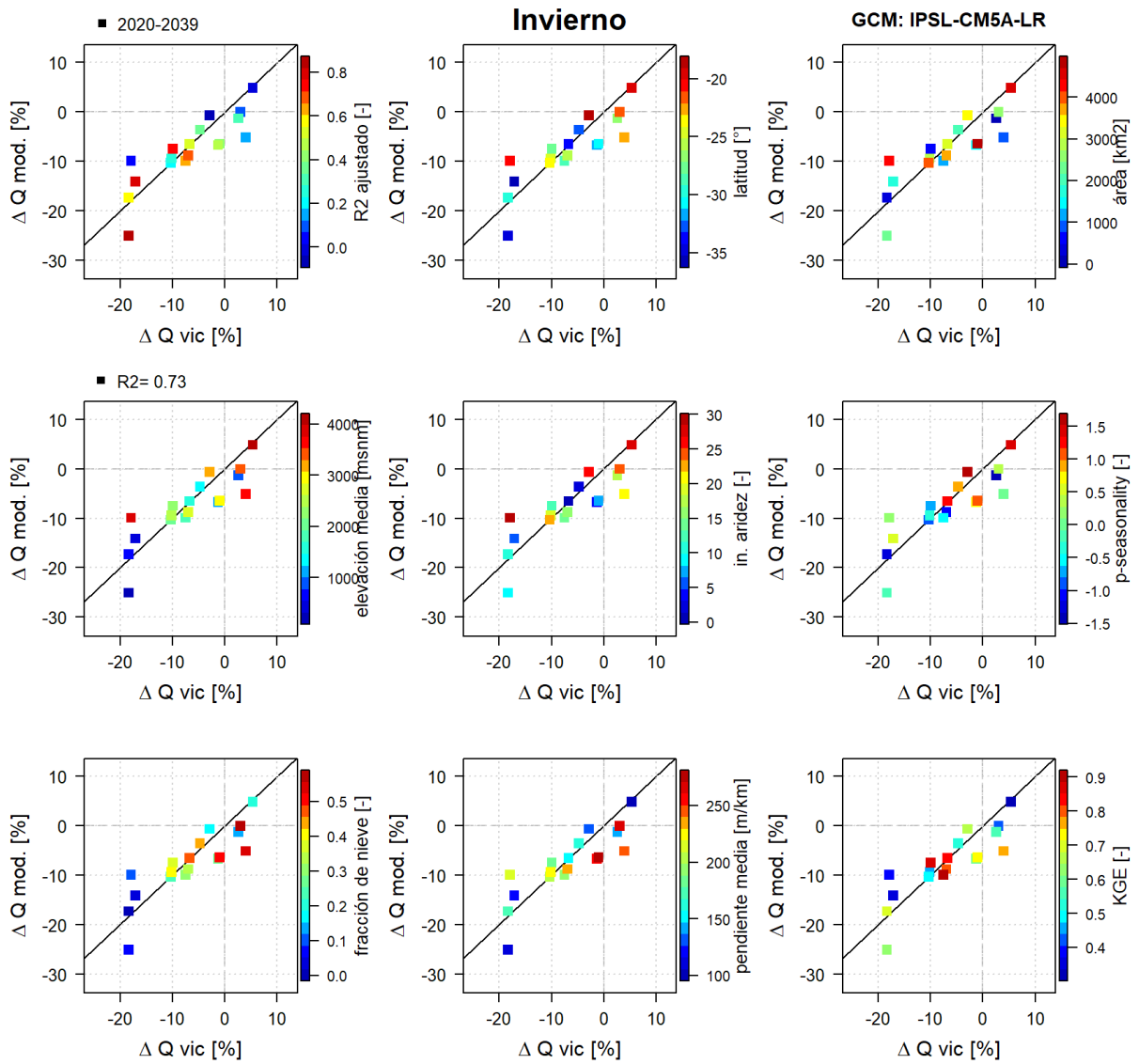


**Figura C- 33:** Comparación de variaciones de caudales VIC y caudales MOD en Año Entero junto a estadísticos y características de las cuencas para GCM IPSL-CM5A-LR para error absoluto menor a 10%. Período 2020-2039.

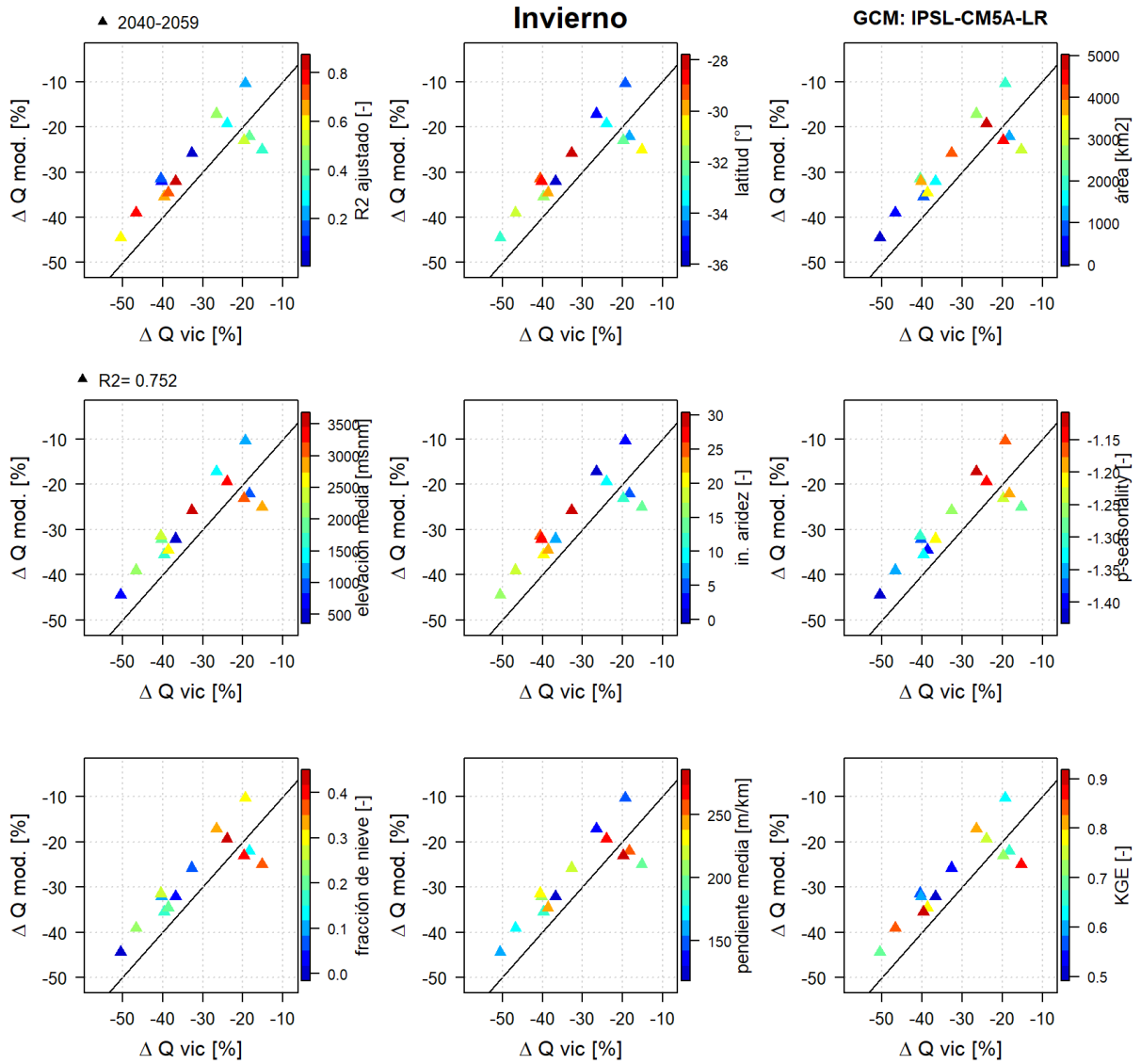


**Figura C- 34:** Comparación de variaciones de caudales VIC y caudales MOD en Año Entero junto a estadísticos y características de las cuencas para GCM IPSL-CM5A-LR para error absoluto menor a 10%. Período 2040-2059.

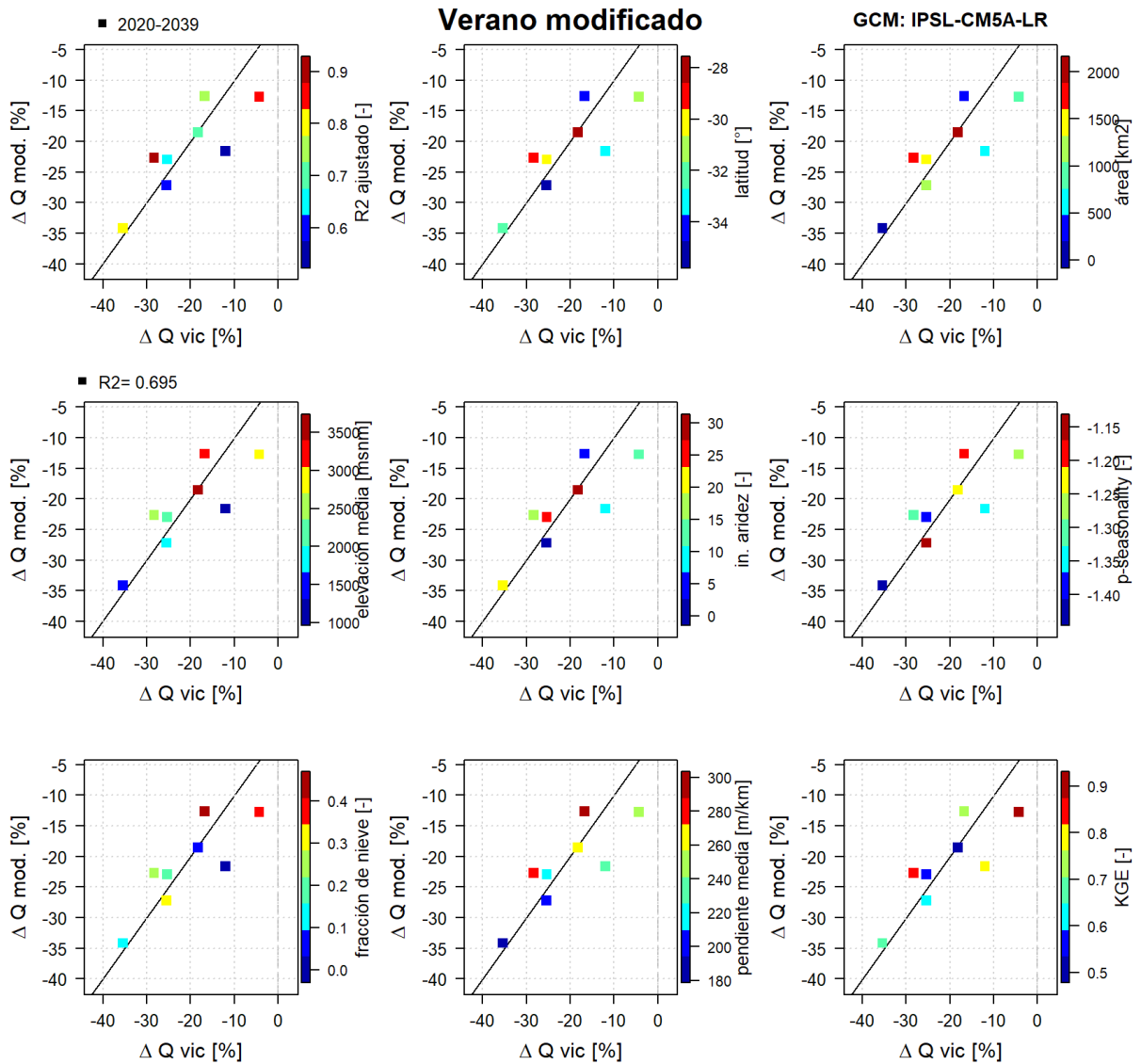




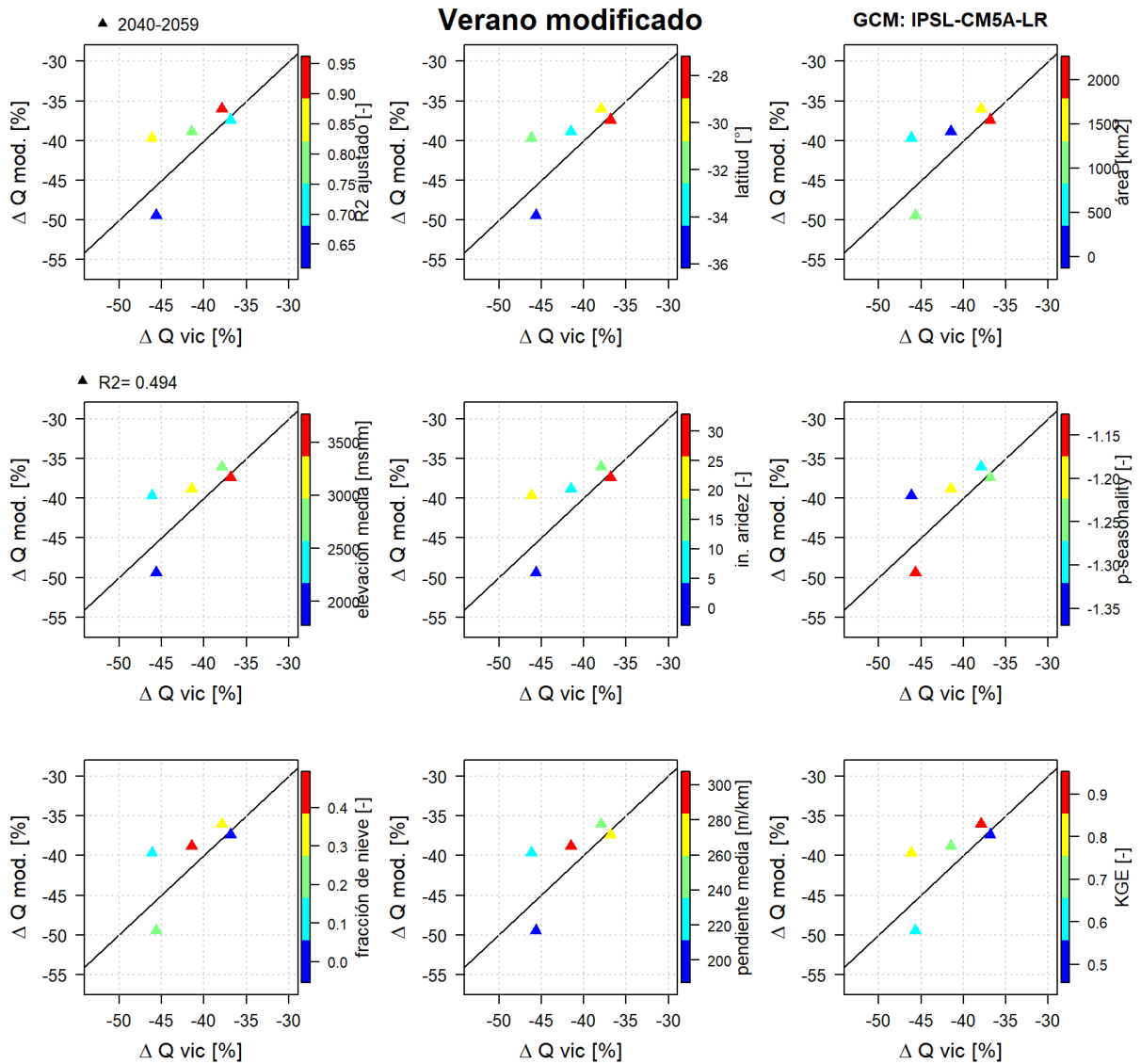
**Figura C-35:** Comparación de variaciones de caudales VIC y caudales MOD en Invierno junto a estadísticos y características de las cuencas para GCM IPSL-CM5A-LR para error absoluto menor a 10%. Período 2020-2039.



**Figura C- 36:** Comparación de variaciones de caudales VIC y caudales MOD en Invierno junto a estadísticos y características de las cuencas para GCM IPSL-CM5A-LR para error absoluto menor a 10%. Período 2040-2059.



**Figura C- 37:** Comparación de variaciones de caudales VIC y caudales MOD en Verano Modificada junto a estadísticos y características de las cuencas para GCM IPSL-CM5A-LR para error absoluto menor a 10%. Período 2020-2039.



**Figura C- 38:** Comparación de variaciones de caudales VIC y caudales MOD en Verano Modificad junto a estadísticos y características de las cuencas para GCM IPSL-CM5A-LR para error absoluto menor a 10%. Período 2040-2059.

**Tabla C - 1:** Promedio, desviación estándar, máximo y mínimo de errores absolutos medios y número de cuencas para distintas temporadas para dos períodos futuros para GCM MIROC-ESM.

<b>Período</b>	<b>Año entero</b>		<b>Invierno</b>	
<b>Años</b>	<b>2020-2039</b>	<b>2040-2059</b>	<b>2020-2039</b>	<b>2040-2059</b>
Promedio	21%	29%	13%	18%
Desviación estándar	31%	30%	23%	18%
Máximo	156%	139%	113%	75%
Mínimo	0,03%	1,34%	0,21%	0,67%
n	25	25	25	25
<b>Período</b>	<b>Verano</b>		<b>Verano mod</b>	
<b>Años</b>	<b>2020-2039</b>	<b>2040-2059</b>	<b>2020-2039</b>	<b>2040-2059</b>
Promedio	50%	53%	22%	34%
Desviación estándar	62%	55%	24%	27%
Máximo	309%	273%	122%	118%
Mínimo	2,22%	4,23%	4,72%	0,19%
n	25	25	22	22

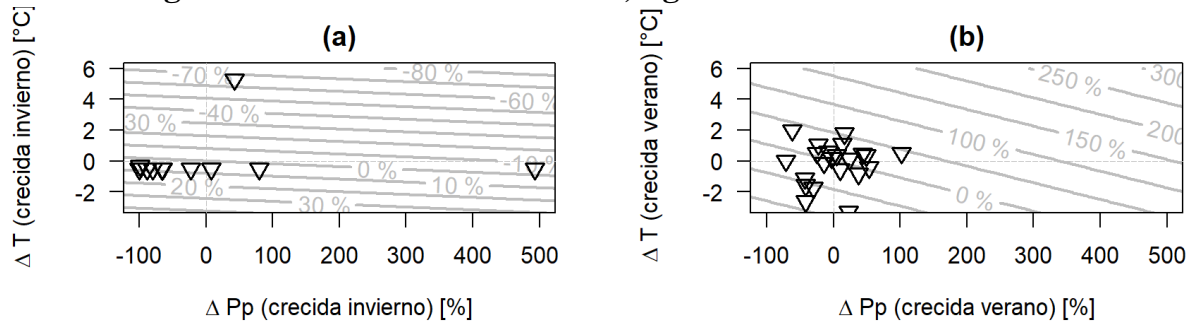
**Tabla C - 2:** Promedio, desviación estándar, máximo y mínimo de valores del coeficiente de correlación  $R^2$  ajustado y número de cuencas para distintas temporadas para dos períodos futuros CSIRO-MK3.

<b>Período</b>	<b>Año entero</b>		<b>Invierno</b>	
<b>Años</b>	<b>2020-2039</b>	<b>2040-2059</b>	<b>2020-2039</b>	<b>2040-2059</b>
Promedio	15%	27%	13%	27%
Desviación estándar	13%	22%	15%	21%
Máximo	46%	86%	53%	82%
Mínimo	0,58%	0,30%	1,08%	1,66%
n	20	20	20	20
<b>Período</b>	<b>Verano</b>		<b>Verano mod</b>	
<b>Años</b>	<b>2020-2039</b>	<b>2040-2059</b>	<b>2020-2039</b>	<b>2040-2059</b>
Promedio	30%	60%	13%	23%
Desviación estándar	19%	46%	11%	14%
Máximo	76%	183%	46%	47%
Mínimo	0,85%	6,23%	0,45%	1,24%
n	20	20	17	17

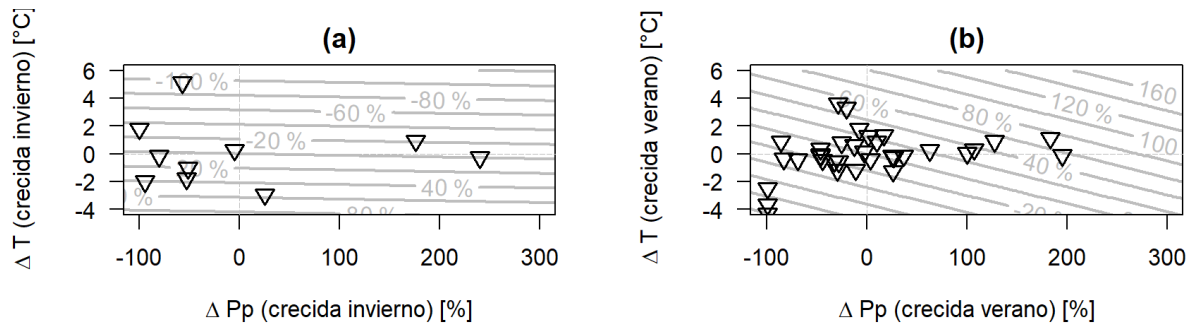
**Tabla C - 3:** Promedio, desviación estándar, máximo y mínimo de valores de diferencia absoluta entre variaciones de caudal y número de cuencas para distintas temporadas para dos periodos futuros para IPSL-CM5A.

<b>Período</b>	<b>Año entero</b>		<b>Invierno</b>	
<b>Años</b>	<b>2020-2039</b>	<b>2040-2059</b>	<b>2020-2039</b>	<b>2040-2059</b>
Promedio	15%	24%	9%	13%
Desviación estándar	14%	19%	12%	11%
Máximo	53%	79%	50%	52%
Mínimo	0,05%	0,61%	0,01%	3,26%
n	25	25	25	25
<b>Período</b>	<b>Verano</b>		<b>Verano mod</b>	
<b>Años</b>	<b>2020-2039</b>	<b>2040-2059</b>	<b>2020-2039</b>	<b>2040-2059</b>
Promedio	36%	51%	13%	31%
Desviación estándar	25%	41%	9%	22%
Máximo	109%	169%	30%	70%
Mínimo	4,81%	2,28%	0,29%	0,52%
n	25	25	22	22

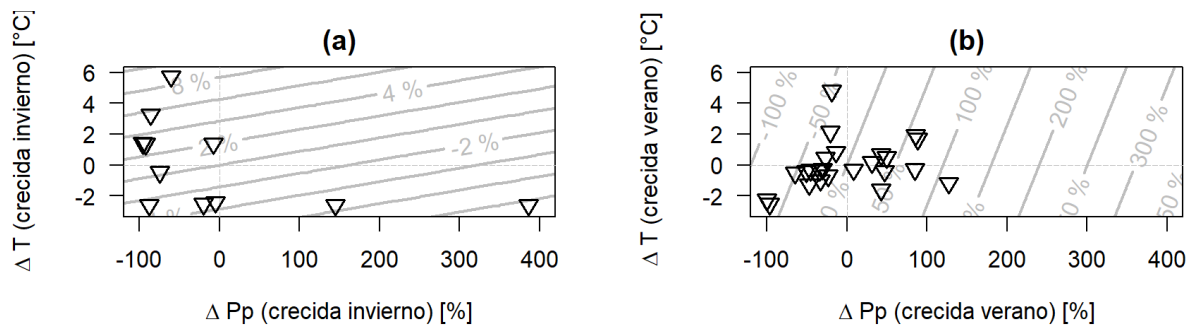
**Anexo D: regresión de crecidas de caudales, figuras**



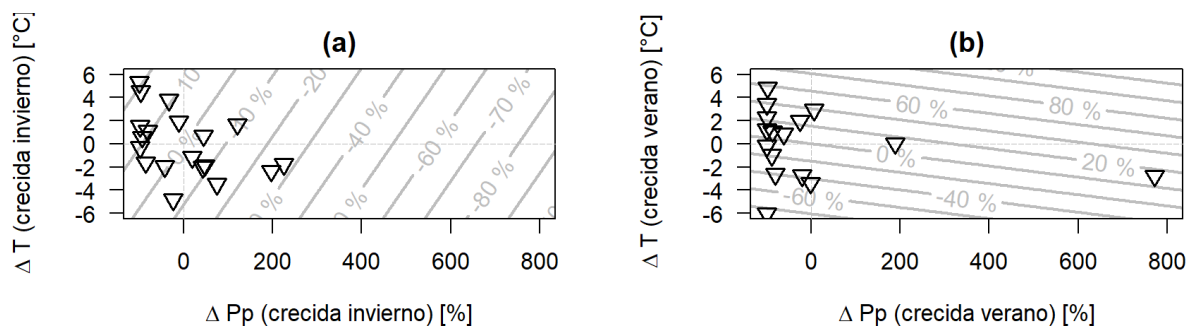
**Figura-D 1:** variaciones de caudal máximo [-] para temporada de invierno (a) y temporada de verano (b). Cuenca 1050004



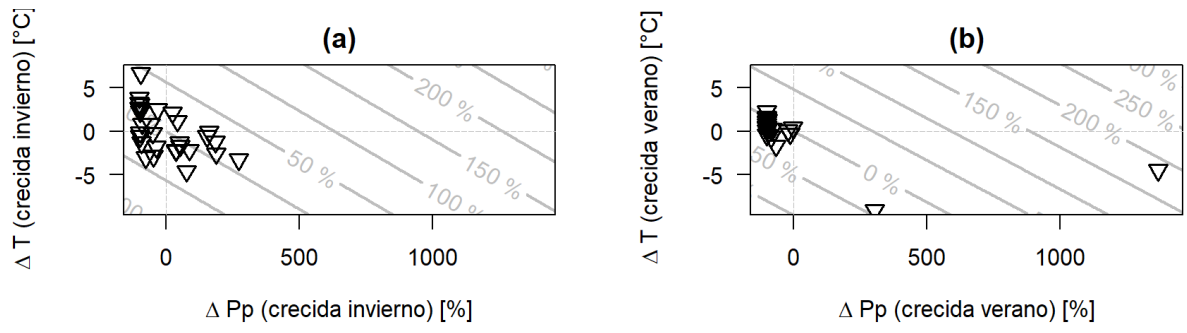
**Figura-D 2:** variaciones de caudal máximo [-] para temporada de invierno (a) y temporada de verano (b). Cuenca 1310002



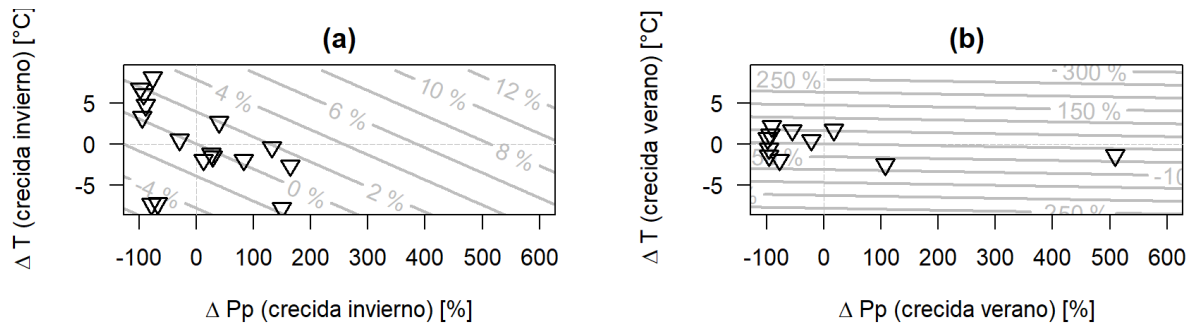
**Figura-D 3:** variaciones de caudal máximo [-] para temporada de invierno (a) y temporada de verano (b). Cuenca 2101001



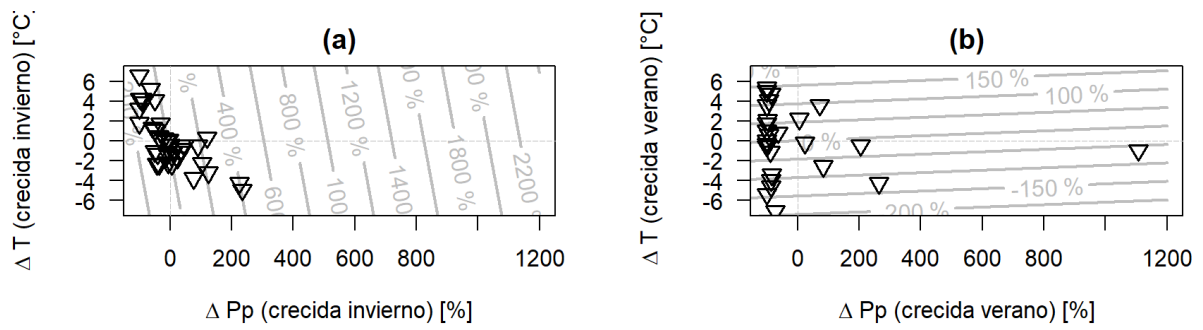
**Figura-D 4:** variaciones de caudal máximo [-] para temporada de invierno (a) y temporada de verano (b). Cuenca 3414001



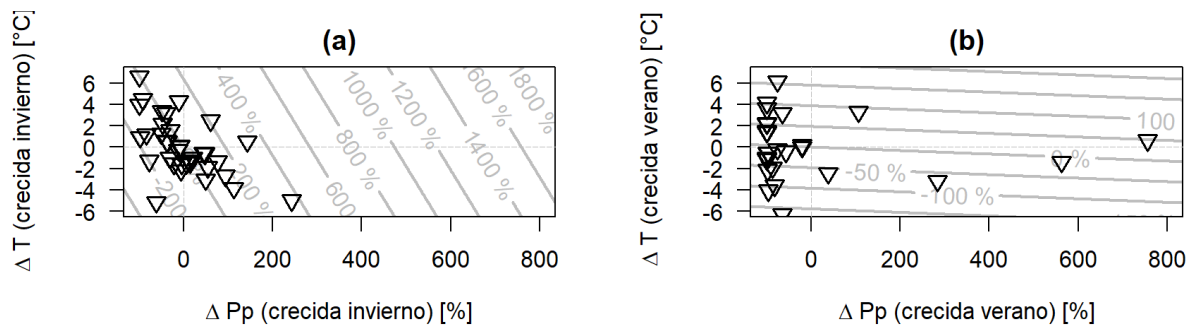
**Figura-D 5:** variaciones de caudal máximo [-] para temporada de invierno (a) y temporada de verano (b). Cuenca 4311001



**Figura-D 6:** variaciones de caudal máximo [-] para temporada de invierno (a) y temporada de verano (b). Cuenca 4313001

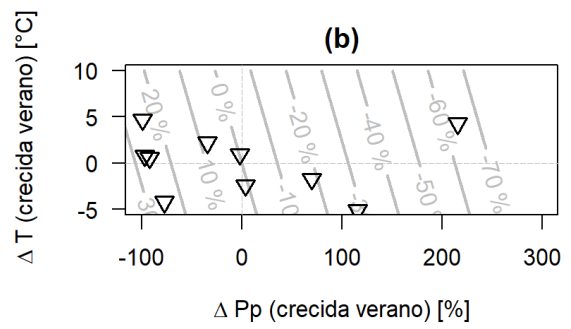
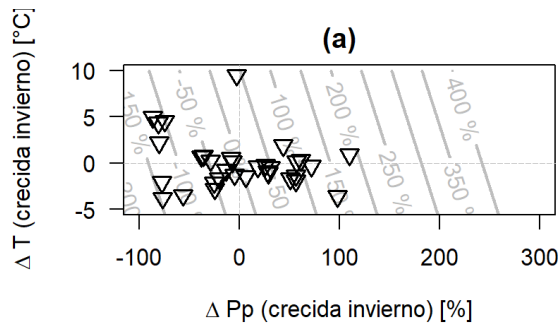


**Figura-D 7:** variaciones de caudal máximo [-] para temporada de invierno (a) y temporada de verano (b). Cuenca 4503001

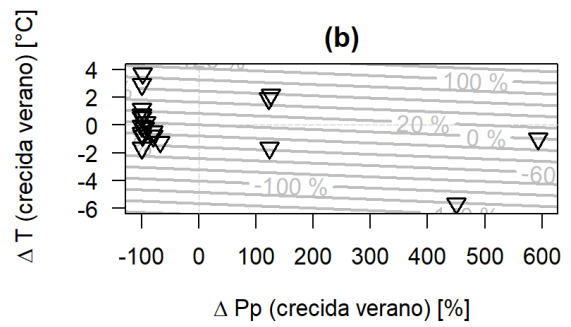
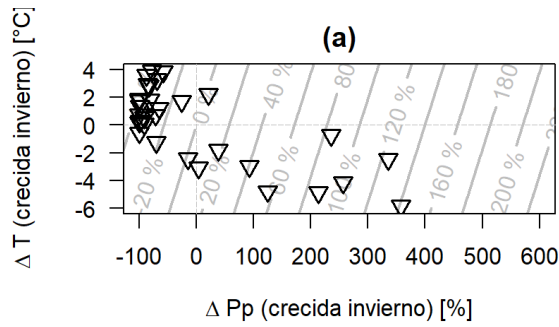


**Figura-D 8:** variaciones de caudal máximo [-] para temporada de invierno (a) y temporada de verano (b). Cuenca 4522002

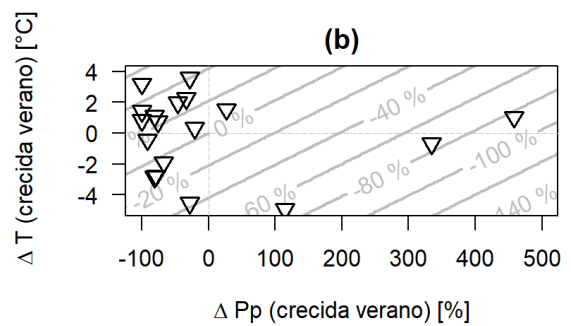
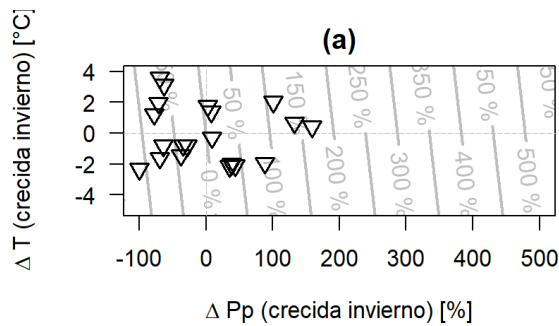




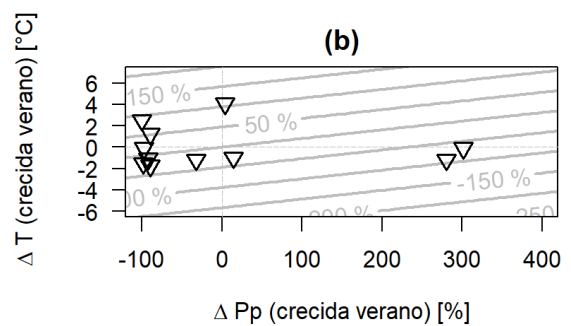
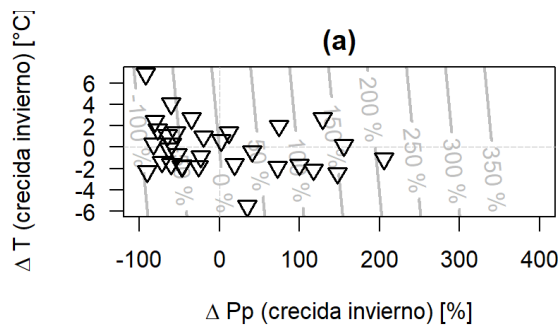
**Figura-D 9:** variaciones de caudal máximo [-] para temporada de invierno (a) y temporada de verano (b). Cuenca 4531002



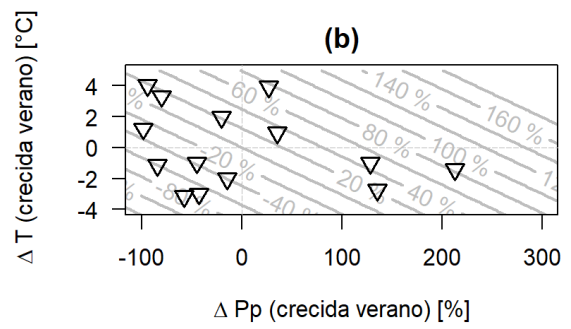
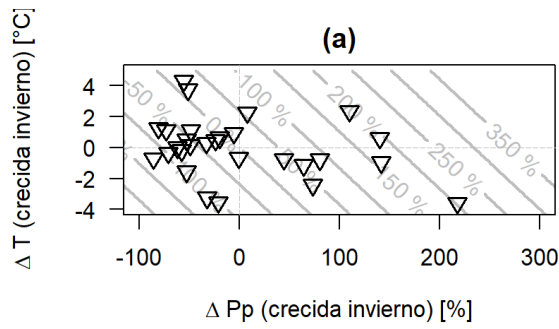
**Figura-D 10:** variaciones de caudal máximo [-] para temporada de invierno (a) y temporada de verano (b). Cuenca 4703002



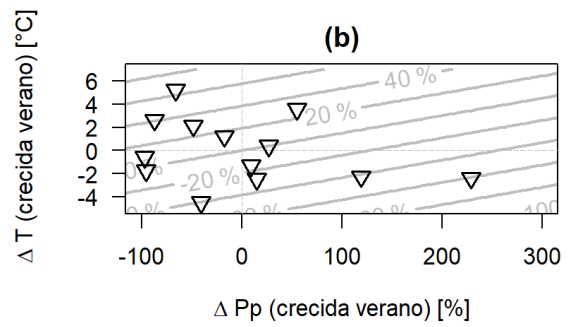
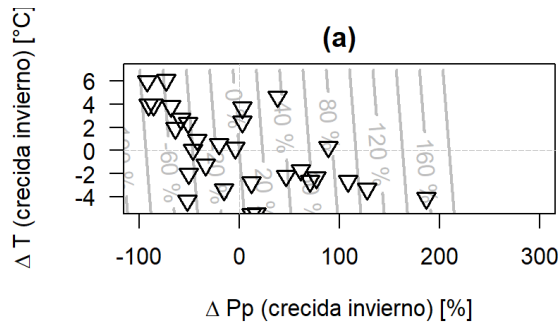
**Figura-D 11:** variaciones de caudal máximo [-] para temporada de invierno (a) y temporada de verano (b). Cuenca 4712001



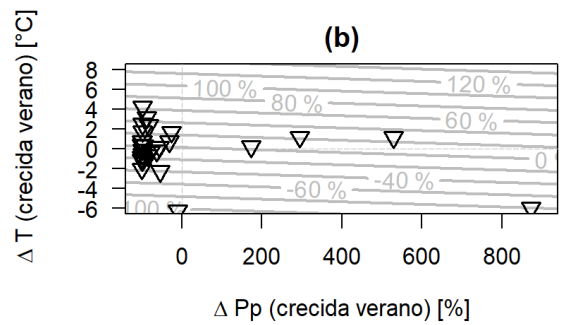
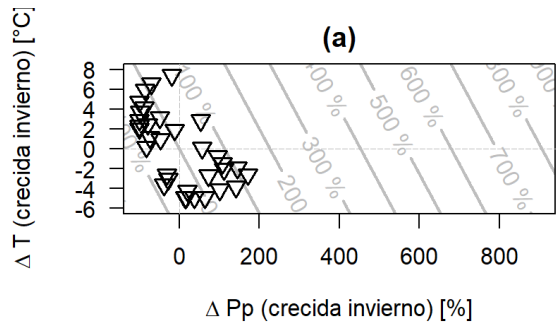
**Figura-D 12:** variaciones de caudal máximo [-] para temporada de invierno (a) y temporada de verano (b). Cuenca 5100001



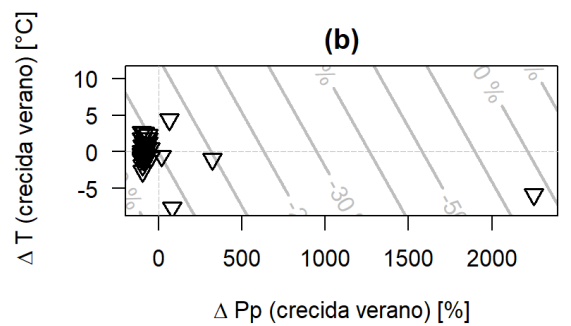
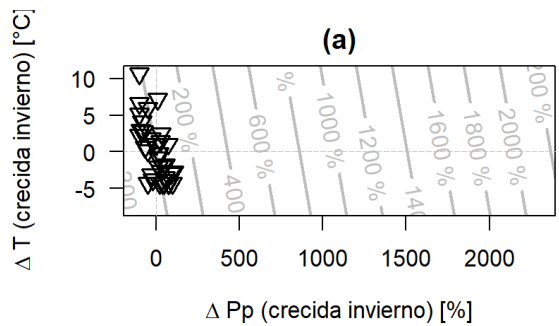
**Figura-D 13:** variaciones de caudal máximo [-] para temporada de invierno (a) y temporada de verano (b). Cuenca 5101001



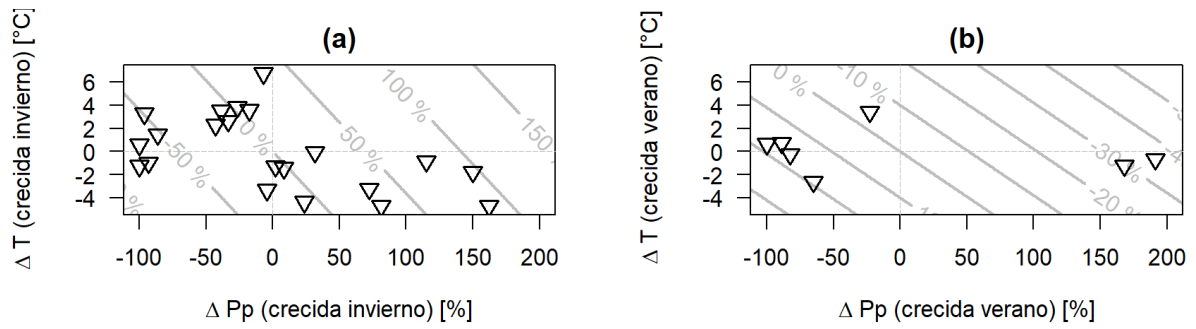
**Figura-D 14:** variaciones de caudal máximo [-] para temporada de invierno (a) y temporada de verano (b). Cuenca 5200001



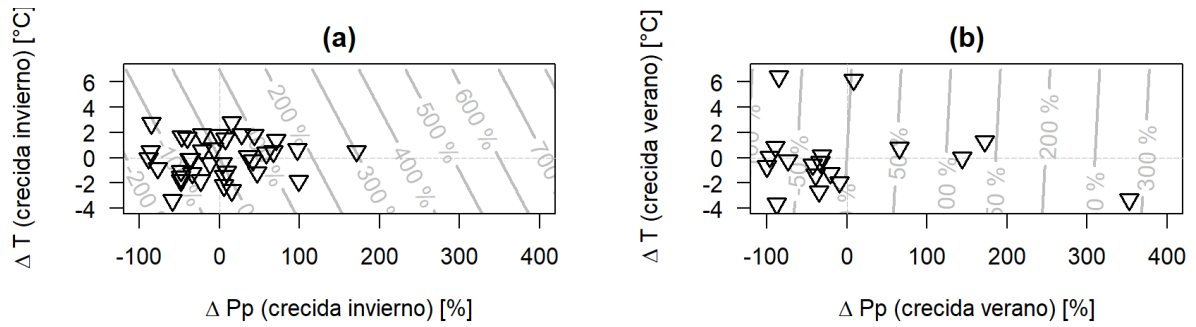
**Figura-D 15:** variaciones de caudal máximo [-] para temporada de invierno (a) y temporada de verano (b). Cuenca 5410002



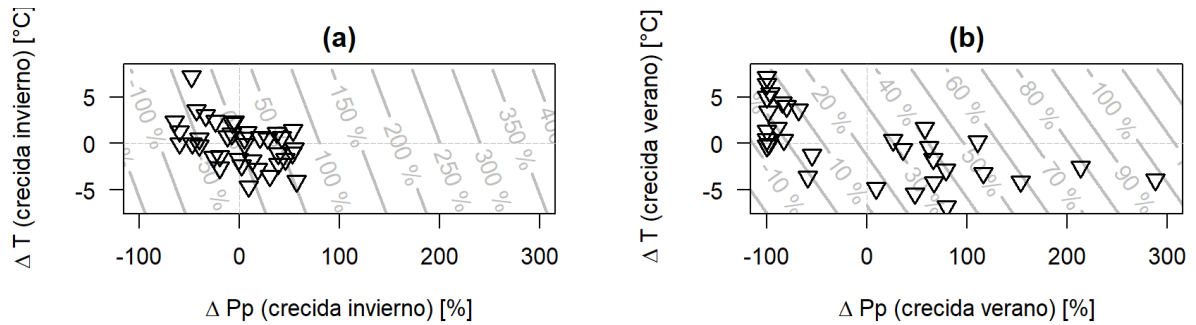
**Figura-D 16:** variaciones de caudal máximo [-] para temporada de invierno (a) y temporada de verano (b). Cuenca 5710001



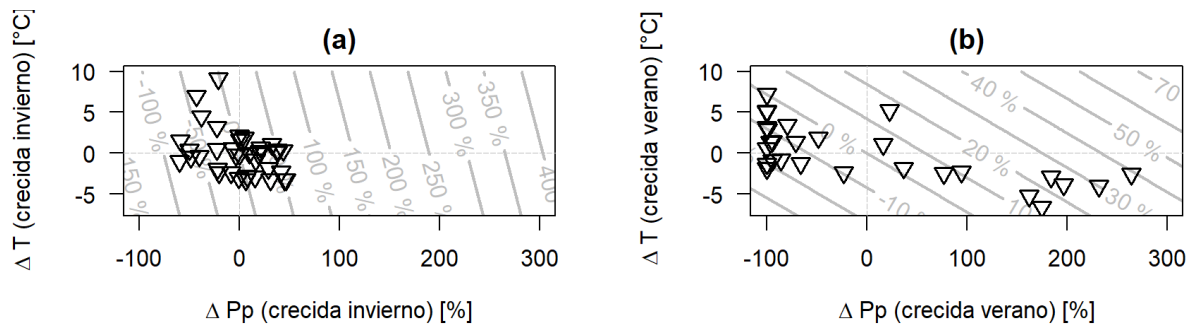
**Figura-D 17:** variaciones de caudal máximo [-] para temporada de invierno (a) y temporada de verano (b). Cuenca 5721001



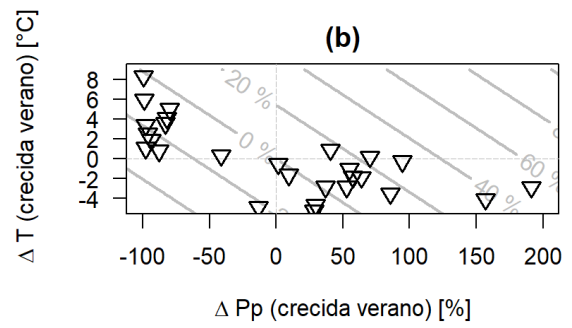
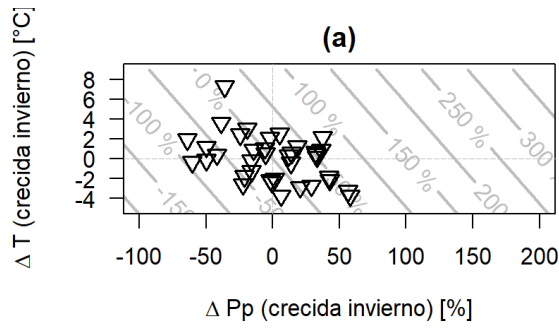
**Figura-D 18:** variaciones de caudal máximo [-] para temporada de invierno (a) y temporada de verano (b). Cuenca 5741001



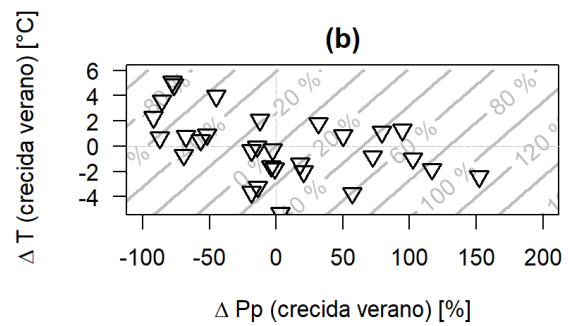
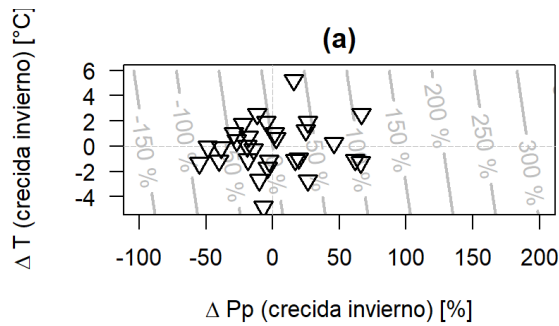
**Figura-D 19:** variaciones de caudal máximo [-] para temporada de invierno (a) y temporada de verano (b). Cuenca 7103001



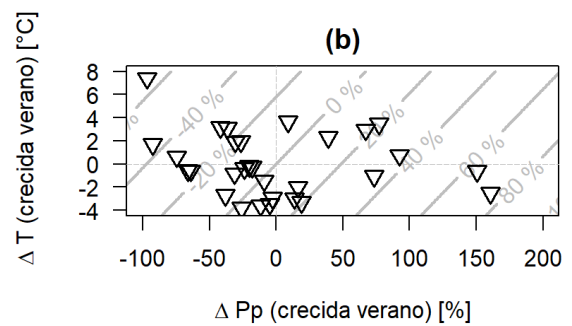
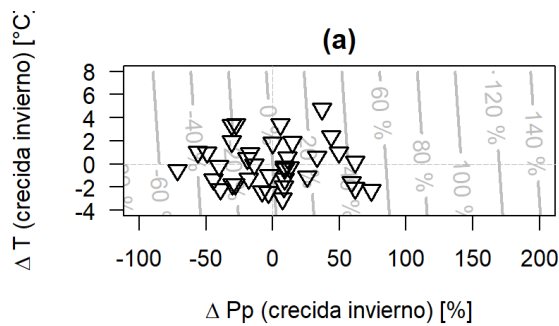
**Figura-D 20:** variaciones de caudal máximo [-] para temporada de invierno (a) y temporada de verano (b). Cuenca 7112001



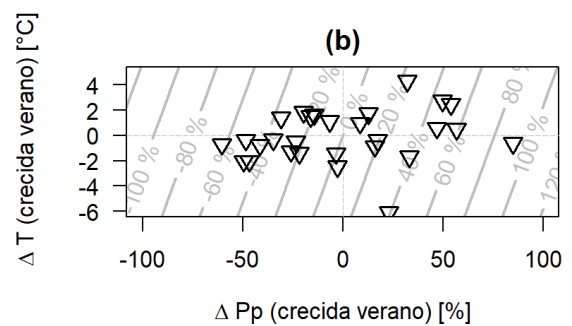
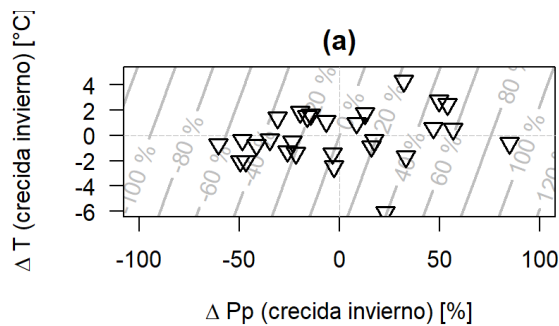
**Figura-D 21:** variaciones de caudal máximo [-] para temporada de invierno (a) y temporada de invierno (b). Cuenca 7115001



**Figura-D 22:** variaciones de caudal máximo [-] para temporada de invierno (a) y temporada de invierno (b). Cuenca 7354002



**Figura-D 23:** variaciones de caudal máximo [-] para temporada de invierno (a) y temporada de invierno (b). Cuenca 7358001



**Figura-D 24:** variaciones de caudal máximo [-] para temporada de invierno (a) y temporada de invierno (b). Cuenca 7381001

## Anexo E: métricas de evaluación

Para las regresiones se calcula el Coeficiente de Pearson Ajustado al cuadrado:

$$R^2_{aj} = 1 - \frac{(1 - R^2) \cdot (n - 1)}{(n - k - 1)} \quad \text{Ecuación X.1}$$

Con,

- $R^2$ : coeficiente de correlación de Pearson al cuadrado [-]

- $n$ : número de datos para realizar la regresión [-]

- $k$ : número de forzantes de la regresión [-]

Considerando:

$$R^2 = \left( \frac{\sum[(Q_{obs} - \overline{Q_{obs}}) \cdot (Q_{mod} - \overline{Q_{mod}})]}{\sqrt{[\sum(Q_{obs} - \overline{Q_{obs}})^2 \cdot \sum(Q_{mod} - \overline{Q_{mod}})^2]}} \right)^2 \quad \text{Ecuación X.2}$$

- $Q_{obs}$ : caudal observado  $\left[\frac{m^3}{s}\right]$

- $\overline{Q_{obs}}$ : promedio de caudales observado  $\left[\frac{m^3}{s}\right]$

- $Q_{mod}$ : caudal obtenido por la regresión  $\left[\frac{m^3}{s}\right]$

- $\overline{Q_{mod}}$ : promedio de caudales obtenidos por la regresión  $\left[\frac{m^3}{s}\right]$

## Anexo F: características de las cuencas estudiadas

*Tabla F - 1: régimen, latitud, área, elevación media e índice de aridez de las cuencas estudiadas.*

		<b>Latitud</b>	<b>Área</b>	<b>Elevación media</b>	<b>Índice de aridez</b>
<b>Cuenca</b>	<b>Regimen</b>	<b>[°]</b>	<b>[km2]</b>	<b>[msnm]</b>	<b>[-]</b>
1050004	Pluvial Ver	-20,11	739,29	4309,61	6,58
1310002	Pluvial Ver	-18,58	1281,48	3466,04	10,23
2101001	Pluvial Ver	-21,66	2053,28	4094,02	10,64
3414001	Nival	-28,09	2021,80	3566,14	29,31
4311001	Nival	-30,22	338,24	3544,45	7,59
4313001	Nival	-30,12	675,35	3510,76	8,97
4503001	Nival	-30,44	1837,30	2554,19	7,76
4513001	Nivopluvial	-30,92	1286,61	2726,15	4,48
4522002	Nivopluvial	-30,71	820,55	2661,32	5,80
4531002	Nivopluvial	-31,03	753,07	2123,73	5,62
4703002	Nival	-31,97	1131,63	3142,29	2,60
4712001	Nivopluvial	-31,70	243,90	3037,62	3,42
5100001	Nivopluvial	-32,23	241,08	2609,62	2,91
5101001	Nival	-32,07	56,11	1624,57	4,48
5200001	Nivopluvial	-32,33	348,03	2402,61	3,03
5410002	Nival	-32,85	2113,42	3177,58	2,03
5710001	Nival	-33,59	4839,05	3181,02	1,31
5721001	Nival	-33,34	109,95	3424,26	1,73
5741001	Pluvial Inv	-33,17	144,24	1136,53	2,76
7103001	Pluvionival	-35,00	354,41	1856,58	0,64
7112001	Nival	-35,28	877,89	2288,17	0,53
7115001	Nival	-35,27	490,00	1973,44	0,55
7354002	Pluvionival	-36,00	894,35	1328,91	0,50
7358001	Pluvionival	-35,77	390,49	471,50	0,95
7381001	Pluvionival	-35,37	558,83	205,55	1,76

*Tabla F - 2: régimen, p seasonality, fracción de nieve y pendiente de las cuencas estudiadas.*

		<b>P_seasonality</b>	<b>Fracción de nieve</b>	<b>Pendiente</b>
<b>Cuenca</b>	<b>Regimen</b>	<b>[-]</b>	<b>[-]</b>	<b>[m/km]</b>
1050004	Pluvial Ver	1,60	0,04	100,58
1310002	Pluvial Ver	1,61	0,00	170,89
2101001	Pluvial Ver	1,54	0,03	100,14
3414001	Nival	-1,27	0,00	233,84
4311001	Nival	-1,28	0,54	255,36
4313001	Nival	-1,23	0,57	265,60
4503001	Nival	-1,35	0,05	232,47
4513001	Nivopluvial	-1,36	0,10	253,05
4522002	Nivopluvial	-1,32	0,14	252,03
4531002	Nivopluvial	-1,42	0,00	219,28
4703002	Nival	-1,27	0,37	230,88
4712001	Nivopluvial	-1,34	0,26	233,66
5100001	Nivopluvial	-1,35	0,13	226,19
5101001	Nival	-1,43	0,00	186,41
5200001	Nivopluvial	-1,34	0,09	229,27
5410002	Nival	-1,24	0,42	279,86
5710001	Nival	-1,12	0,43	275,98
5721001	Nival	-1,25	0,44	295,55
5741001	Pluvial Inv	-1,42	0,00	222,57
7103001	Pluvionival	-1,19	0,08	256,17
7112001	Nival	-1,12	0,31	196,04
7115001	Nival	-1,15	0,18	199,01
7354002	Pluvionival	-1,14	0,01	249,01
7358001	Pluvionival	-1,19	0,00	124,02
7381001	Pluvionival	-1,29	0,00	123,44